Poboljšana analiza i predviđanje sklopnih prenapona u elektroenergetskoj mreži razvojem grafičkog sučelja

Miklošević, Krešimir

Doctoral thesis / Disertacija

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:864618

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Krešimir Miklošević

Poboljšana analiza i predviđanje sklopnih prenapona u elektroenergetskoj mreži razvojem grafičkog sučelja

Doktorska disertacija

Osijek, 2017.

Doktorska disertacija izrađena je na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Sveučilišta Josipa Jurja Storossmayera u Osijeku.

Mentor: Prof.dr.sc. Marinko Stojkov, redoviti profesor

Doktorska disertacija ima ukupno **237** stranica.

Broj doktorske disertacije: **63**

Članovi povjerenstva za ocjenu doktorskog rada

Za potrebe postupka ocjene doktorskog rada u svrhu stjecanja doktorata znanosti u suglasnosti s mentorom predlažem povjerenstvo u sljedećem sastavu:

1. Izv.prof.dr.sc. Željko Hederić, dipl.ing. (predsjednik povjerenstva)
2. Prof.dr.sc. Marinko Stojkov, dipl.ing. (mentor - član)
3. Izv.prof.dr.sc. Dubravko Franković, dipl.ing. (vanjski član)

u Osijeku, 5. rujna 2017.

Pristupnik:

Krešimir Miklošević, dipl.ing.

Izjava o autorskom djelu

Izjavljujem da sam doktorski rad pod nazivom ***Poboljšana analiza i predviđanje sklopnih prenapona u elektroenergetskoj mreži razvojem grafičkog sučelja***, predao na ocjenu mentoru ***Prof. dr. sc. Marinku Stojkovu, dipl. ing.,*** napisao samostalno i da je u potpunosti riječ o mojem autorskom radu. Također, izjavljujem da dotični rad nije objavljen niti korišten u svrhe ispunjenja nastavnih obaveza na ovom ili nekom drugom javnom visokom učilištu, te da na temelju toga nisam stekao ECTS bodove. Nadalje izjavljujem da sam u radu poštivao etička pravila znanstvenog i akademskog rada.

u Osijeku, 5. rujna 2017.

Pristupnik:

Krešimir Miklošević, dipl. ing,

Zamolba

Poštovani,

Budući da svojim kvalifikacijama i iskustvom udovoljavam svim potrebnim uvjetima sukladno članku 29. Pravilnika o poslijediplomskom znanstvenom studiju molim Vas da mi odobrite pokretanje javne obrane u svrhu stjecanja doktorata znanosti. Informacije o mome obrazovanju i radnom iskustvu prilažem u životopisu.

u Osijeku, 5. rujna 2017.

Pristupnik:

Krešimir Miklošević, dipl.ing.

Osobna izjava

Izjavljujem da postupak stjecanja akademskog stupnja doktora znanosti nisam pokrenuo niti u jednoj drugoj znanstveno - obrazovnoj ustanovi iz sustava javnog visokog obrazovanja.

u Osijeku, 5. rujna 2017.

Pristupnik:

Krešimir Miklošević, dipl. ing,

Članovi povjerenstva za obranu doktorskog rada

Za potrebe postupka obrane doktorskog rada u svrhu stjecanja doktorata znanosti u suglasnosti s mentorom predlažem povjerenstvo u sljedećem sastavu:

1. Izv.prof.dr.sc. Željko Hederić, dipl.ing. (predsjednik povjerenstva - član)
2. Prof.dr.sc. Marinko Stojkov, dipl.ing. (mentor - član)
3. Izv.prof.dr.sc. Dubravko Franković, dipl.ing. (vanjski član)
4. Prof.dr.sc. Damir Šljivac, dipl.ing. (član)
5. Doc.dr.sc. Marinko Barukčić, dipl.ing. (član)
6. Doc.dr.sc.Tomislav Rudec, prof. (zamjenski član)
7. Doc.dr.sc. Goran Knežević, dipl.ing. (zamjenski član)

Datum obrane doktorske disertacije: 09.11.2017.

u Osijeku, 6. listopada 2017. Pristupnik:

Krešimir Miklošević, dipl.ing.

Zahvala

Svaki znanstvenik na početku svoga istraživačkoga puta nailazi na brojne poteškoće i pitanja na koja nerijetko teško može odgovoriti bez pomoći svojih starijih kolega i mentora. Iz toga razloga koristim ovu prigodu da se zahvalim mentoru prof. dr. sc. Marinku Stojkovu, dipl. ing. za uspješno i korektno vođenje kroz znanstveno istraživački rad, za interesantne i korisne savjete i sugestije tijekom osmišljavanja, provedbe i opisivanja znanstveno stručnog istraživanja iz područja tranzijentnih dinamičkih pojava u elektroenergetskom sustavu.

Isto tako bi se zahvalio i prof. dr. sc. Gorislavu Ercegu, dipl. ing. na pomoći u korisnim idejama tijekom izrade doktorskoga rada. Što odabrati za istraživanje, kako i koje podatke prikupljati te kako opisati, prikazati i interpretirati samo istraživanje.

I na kraju ali i ne manje bitno, zahvalio bi se svojoj suprugi na svojoj bezuvjetnoj ljubavi te strpljenju tijekom turbulentnog životnog razdoblja razvoja doktorskog rada.

Krešimir Miklošević, dipl. ing.

Osijek, Hrvatska, rujan 2017.

Osobni moto

Male stvari čine savršenost, a savršenost nije nimalo mala stvar.

Michelangelo Buanorro

Sadržaj

Članovi povjerenstva za ocjenu doktorskog rada I
Izjava o autorskom djelu II
Zamolba III
Osobna izjava IV
Članovi povjerenstva za obranu doktorskog rada V
Zahvala VI
Osobni moto VII
Sadržaj VIII
Predgovor XI
1. Uvod 1
2. Prijelazni prenaponi 6
2.1. Pojam prijelaznih prenapona u elektroenergetskom sustavu 8
2.2. Klasifikacija kategorija prijelaznih prenapona 9
2.2.1. Ispitivanje opreme na sklopni prijelazni prenapon 14
2.3. Primjeri slučajeva pojave prijelaznih prenapona 33
2.3.1. Uklop energetskog kondenzatora 36
2.3.2. Uklop energetskog voda 37
2.3.3. Pokretanje električnih motora 38
2.4. Proračuni prijelaznih prenapona 39
2.4.1. Uklop realne prigušnice 40
2.4.2. Početna raspodjela sklopnog prenapona uzduž namota distributivnog transformatora 43
2.4.3. Isklop primarne strane neopterećenog energetskog transformatora 46
2.4.4. Isklop sekundarne strane energetskog transformatora opterećenog radno – induktivnim teretom 48
3. Matematičko modeliranje distributivne mreže 51
3.1. Matematičko modeliranje nadomjesnog izvora i odvodne impedancije transformatora 52
3.2. Matematičko modeliranje kondenzatora i prigušnice 53
3.3. Matematičko modeliranje sklopnog aparata 55
3.4. Matematičko modeliranje elektroenergetskog voda 56

3.5. Matematičko modeliranje visokofrekvencijskog modela dvonamotnog trofaznog elektroenergetskog transformatora ... 57

3.6. Matematičko modeliranje opterećenja NN sabirnice ... 60

4. Razvoj simulacijskog modela testne elektroenergetske mreže u Matlab – SimPowerSystemsu ... 62

4.1. Uvod u Matlab – SimPowerSystems ... 62

4.2. Simulacijsko modeliranje namota energetskog transformatora za dobivanje početne raspodjele sklopnog prenapona uzduž namota ... 63

4.3. Simulacijsko modeliranje namota energetskog transformatora za dobivanje raspodjele sklopnog prenapona uzduž namota ... 70

4.4. Simulacijsko modeliranje testne distributivne mreže u Matlab – SimPowerSystemsu ... 73

4.4.1. Simulacijsko modeliranje komponenata distributivne mreže u Matlab – SimPowerSystemsu ... 76

4.4.1.1. Simulacijsko okruženje za Matlab – SimPowerSystems modele ... 77

4.4.1.2. Nadomjesni naponski izvor ... 80

4.4.1.3. Trofazni prekidač ... 83

4.4.1.4. Distributivni SN / NN vod ... 85

4.4.1.5. VF model trofaznog dvonamotnog distributivnog transformatora ... 88

4.4.1.6. Ekvivalentni nadomjesni kapaciteti SN i NN namota trofaznog transformatora. 91

4.4.1.7. Simulacijski model opterećenja NN sabirnice ... 93

4.4.2. Prijelazne metode analize karakteristike sklopnog prenapona u Matlab – SimPowerSystemsu ... 96

5. Grafičko sučelje za analizu osjetljivosti direktnih i indirektnih utjecaja na karakteristiku sklopnog prenapona ... 99

5.1. Razvoj grafičkog sučelja za analizu sklopnih scenarija ... 99

5.1.1. Dizajn simulacijskog modela testne distributivne mreže ... 106

5.1.2. Primjena grafičkog sučelja Powergui na simulacijski sklopni slučaj isklopa opterećenog transformatora ... 107

6. Analiza osjetljivosti direktnih i indirektnih utjecaja na visinu i trajanje sklopnog prenapona ... 110

6.1.1. Utjecaj promjene omjera ukupnog poprečnog i uzdužnog kapaciteta namota transformatora na oblik karakteristike početne raspodjele sklopnog prenapona ... 111

6.1.2. Utjecaj promjene načina uzemljenja namota transformatora na oblik karakteristike početne raspodjele sklopnog prenapona ... 117

6.1.3. Utjecaj promjene vrste testne pobude na oblik početne raspodjele sklopnog prenapona u SN namotu transformatora ... 120

6.1.4. Utjecaj promjene koeficijenta α na oblik raspodjele sklopnog prenapona u uzemljenom i izoliranom namotu transformatora ... 125

6.1.5. Utjecaj promjene veličine nazivne snage distributivnih transformatora na karakteristiku sklopnog prenapona za slučaj isklopa radno - induktivnog tereta ... 142

6.1.6. Utjecaj promjene stupnja i faktora snage opterećenja na karakteristiku sklopnog prenapona za slučaj isklopa radno - induktivnog tereta ... 148

6.1.7. Utjecaj promjene duljine sekundarnoga NN voda na karakteristiku sklopnog prenapona za slučaj isklopa radno - induktivnog tereta ... 155

7. Eksperimentalni laboratorijski sustav za mjerenje sklopnih prenapona ... 161

7.1. Konfiguracija energetskog i mjernog sustava za mjerenje sklopnog prenapona u laboratorijskim uvjetima ... 161

7.2. Isklop neopterećenog laboratorijskog transformatora ... 164

8. Dijagnostika i monitoring visokonaponskog rasklopnog postrojenja ... 168

8.1. Primjeri suvremenih rješenja monitoringa distributivnih energetskih prekidača i transformatora ... 169

8.2. Dijagnostički mjerni podsustavi energetskog transformatora za predviđanje negativnih posljedica pojave sklopnog prenapona ... 172

9. Evaluacijski okvir ... 175

9.1. Analitička verifikacija ... 175

9.1.1. Usporedba razvijenog simulacijskog modela VN namota za početnu raspodjelu sa analitičkim proračunom početne raspodjele sklopnog prenapona ... 175

9.1.2. Usporedba razvijenog simulacijskog modela mreže sa analitičkim proračunom pri isklopu radno - induktivnog tereta ... 179

9.2. Eksperimentalna verifikacija ... 182

9.2.1. Usporedba razvijenog simulacijskog modela isklopa neopterećenog laboratorijskoga transformatora sa laboratorijskim fizičkim modelom ... 182

10. Zaključak ... 188

Popis literature ... XIV

Sažetak ... XX

Abstract ... XXII

Životopis ... XXIV

Popis i opis uporabljenih slika ... XXV

Popis i opis uporabljenih tablica ... XXXIV

Popis znanstvenih publikacija ... XXXIX

Prilog1 (Ispitni list transformatora 50 kVA, Yzn5) ... XLI

Predgovor

Određeni broj znanstvenih publikacija iz šireg područja istraživačke teme bavi se problematikom razvoja tehnologije sklopnih aparata. Osim elektromehaničkih, elektromagnetskih i elektrotermičkih procesa koji se javljaju tijekom preklapanja sklopnog aparata, potrebno je poznavati i njegovu ulogu, namjenu te utjecaj na širu elektroenergetsku mrežu. Dobro je poznata i dokumentirana ovisnost brzine prekida struje prekidača na visinu sklopnog prenapona. Upravo je taj smjer razvoja omogućio istraživanje različitih principa rada lučnih komora (vakuumski, uljni, malouljni, SF_6 – sumpor heksafluoridni) koje imaju za posljedicu razvoj različitih tehnika uklapanja i prekidanja struje. S druge pak strane zbog složene matematičke podloge kojom se opisuju popratni dinamički procesi elektroenergetskog sustava na tržištu su razvijeni simulacijski alati koji omogućavaju vrjednije i dublje spoznaje o samoj pojavi sklopnih prenapona. Upravo su ta dva čimbenika potaknula daljnji razvoj fonda znanja iz područja sklopnih prenapona.

Tranzijentni prenaponi oscilatorne su prirode koje u većini slučajeva karakterizira kratkotrajno povećanje nominalnog napona u mikrosekundnom području, a koja mogu biti višestruko veća od postojećih nominalnih napona. Najveće vrijednosti prenapona nastaju atmosferskim pražnjenjem. Ukoliko ne proradi zaštita, tranzijentni prenapon dovodi do trenutačnog uništenja priključenih potrošača te oštećenja izolacije energetskih transformatora. Ti inducirani naponi u energetskim postrojenjima mogu dostići višestruku vrijednost nominalnog nazivnog napona. Sklopni prenaponi prilikom uklapanja nisu toliko visoki kao atmosferski, ali su zato učestaliji te također mogu nepovoljno utjecati na pouzdanost elektroenergetskog sustava. Uz određeno vremensko kašnjenje narušavaju pouzdanost rada elektroenergetskog sustava, jer uslijed pojave sklopnih prenapona izazvano starenje dijelova pogođenih elektroničkih aparata oštećuju postupno. U zavisnosti od točnog uzroka nastanka, odnosno mjesta izvora sklopnog prenapona, provode se različite zaštitne mjere.

Upotreba razvijenih simulacijskih modela za procjenu osjetljivosti različitih vanjskih utjecaja na visinu i trajanje sklopnih prenapona doprinosi procesu održivog planiranja stabilnosti elektroenergetskog sustava. Simulacijsko modeliranje uz odgovarajuće uvjete oponaša realne događaje. Ustroj istraživanja temelji se na analitičkom, simulacijskom i eksperimentalnom pristupu. Namjena istraživanja je utvrđivanje kako i u kojoj mjeri određeni sklopni događaji utječu na visinu i mjesto nastanka sklopnog prenapona. Pošto samo

istraživanje uspoređuje dvije metode ishod znanstvenog - istraživanja je usmjeren prema pokazateljima koji opisuju njihovo slaganje. Svakako su to faktor prenapona i faktor izobličenja prenapona (engl. *THD – total harmonic distortion*). Mjera je prosječna razlika između vrijednosti faktora dvaju metoda.

Doktorska disertacija je nastala na Zavodu za elektrostrojarstvo. Rad je u osnovi multidisciplinaran. Znanstvena tema je prema dostupnim citatnim i bibliografskim bazama interesantna i konkretna. Po dostupnim međunarodnim člancima suvremena, a time i podobna za obradu. Izloženi rezultati istraživanja temeljeni su na objektivnosti i preciznosti. Pri tom želim istaknuti kako je malo literature o navedenoj temi na hrvatskom jeziku, tako da je bilo potrebno i određeno vrijeme za prikupljanje, proučavanje, analizu i prevođenje znanstveno - stručnih knjiga i radova, kao i znanstvenih radova i empirijskih studija koje se na različite načine i u različitim disciplinama bave ovim pitanjima. Osim toga, trebalo je dakle proučiti i veliki broj znanstvenih članaka u raznim svjetskim znanstvenim časopisima, koji su mi bili dostupni preko digitalnih baza, te sam se u radu ograničio na kritičku analizu samo nekih i to prema kriteriju njihove relevantnosti za temu koja odgovara osnovnim ciljevima i analizi ovog rada, te je ukupno u radu korišteno osamdesetak bibliografskih jedinica, odnosno knjiga i znanstvenih radova. Spoznaje do kojih sam došao u doktorskom radu praktično se mogu primijeniti u daljnjim teorijskim i istraživačkim analizama navedenim modelom. Razvijeni metodološki pristup prikupljanja i modeliranja je dobra osnova za formiranje drugih modela specifičnih za područje prijelazanih pojava. Osim toga, relativno je malo znanstvenih i stručnih članaka i knjiga koje problematiziraju navedenu temu kod nas na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, pa se i u tome može istaknuti doprinos znanstvenom bavljenju ovom temom.

1. Uvod

Za odvijanje normalnog pogona elektroenergetskog sustava u ustaljenom stanju karakteristične su kontinuirane spore promjene koje se uglavnom nadziru stalnim mjerenjem proizvedene snage. Redovite pogonske operacije, slučajni ispadi proizvodnih kapaciteta uz pojavu slučajnih mrežnih kvarova te njihovo otklanjanje posredstvom zaštite uzrokuju unutar samog elektroenergetskog sustava kontinuirane karakteristične prijelazne procese. Nakon što završe ti prijelazni procesi sustav dospijeva u novo ravnotežno stanje.

Rad elektroenergetskog sustava pri nedozvoljenim naponima, ako je ta pojava lokalne prirode (npr. povećani napon VN sabirnice) svrstava se u pogon pri otežanim uvjetima, zahtijevajući dispečersku operaciju na tom lokalitetu. Međutim, ukoliko se ti visoki prenaponi redovito pojavljuju na širem području to povlači za sobom koordinirane dispečerske akcije na više lokaliteta elektroenergetskog prijenosnog sustava. Često su te koordinacije usmjerene na slabljenje sigurnosti sustava isključivanjem pojedinih bitnih dalekovoda ili zahtjevom za rad značajnih elektrana u dubljoj poduzbudi, tada se u tim situacijama sustav nalazi u izvanrednom ili poremećenom pogonu uz opasnost od daljnjeg širenja poremećaja koji mogu proizvesti i teže posljedice na isporuku električne energije. Iz toga razloga otežane uvjete rada sustava pa tako i pojave previsokih prenapona treba predvidjeti i identificirati u samoj fazi planiranja pogona. Dakle na osnovu praćenja naponskih prilika na karakterističnim elektroenergetskim postrojenjima, sagledavanja njihovog iznosa i vremena trajanja unutar odgovarajućeg vremenskog okvira, može se izvršiti identifikacija uzroka i mjerenje uzorka prijelaznog prenapona. Na kraju se može posredstvom prethodno razvijene simulacijske modelirane mreže kritički analizirati identificirani sklopni poremećaj te predložiti daljnje aktivnosti.

Prijelazni prenaponi uzrokovani raznim sklopnim operacijama ili atmosferskim pražnjenjima na visokonaponskim elektroenergetskim i industrijskim postrojenima, mogu imati značajan utjecaj na oštećenje mjerne opreme i pogonskih uređaja ili na samo onemogućenje sklopne operacije [1], [2], [3]. Visokofrekventni prijelazni procesi su prepoznati već neko vrijeme kao problem te se uglavnom tretiraju kao elektroničko opterećenje kao što se može vidjeti u [4], [5], [6] i [7]. Srednjefrekventni prijelazni procesi, kao što je uklapanje kondenzatorskih baterija uglavnom su nižih prijelaznih vrijednosti ali sadržavaju znatnu električnu energiju tako da se njihov stvarni učinak gledano iz točke

nastajanja događa znatno kasnije kao što se može vidjeti u [8]. Niskofrekventni prijelazni procesi također su snažno povezani s neželjenom proradom elektroničke opreme.

Tranzijentni poremećaji su posljedica naglih promjena stanja elektroenergetskog sustava. Zapravo su posljedica prijelazne pojave koja nastaje pri prijelazu između dva stanja pogona, nakon isklapanja i uklapanja sklopnih aparata u normalnim ili havarijskim (neželjenim) uvjetima. Sama sklopna operacija ima za posljedicu promjenu u konfiguraciji promatranog kruga i sa tim krugom povezana promjena pripadajućeg prenapona. Dakle, potrebna je određena količina vremena prije nego što se postigne nova stabilna radna točka pogona. S druge pak strane, atmosfersko pražnjenje na izložene prijenosne i distributivne električke krugove može ubrizgati veliku količinu energije u elektroenergetski sustav što uzrokuje devijacije pogonskog napona ili struje koje postoje sve dok se višak energije (u obliku prenapona) ne apsorbira na disipativnim elementima u vrlo kratkom vremenu. Oba događaja izazivaju privremeno odstupanje napona i struje elektroenergetskog sustava od svojih nominalnih stacionarnih sinusnih valnih oblika. Svi tranzijentni poremećaji uzrokovani su bilo spajanjem ili odvajanjem elemenata unutar strujnog kruga ili injektiranjem energije zbog izravnog ili neizravnog atmosferskog pražnjenja.

Analitički pristup zahtijeva poznavanje elemenata nadomjesne mreže ispitivane mreže (npr. nadomjesna shema krute mreže, nadomjesna shema dalekovoda). Poseban osvrt je posvećen pojašnjavanju nadomjesne sheme VF energetskih transformatora. Jedan dio istraživanja bit će usmjeren i na frekvencijske ovisnosti prijenosnih elemenata. Frekvencija sklopnog prenapona ovisi o parametrima promatranog kruga u kojima prenapon nastaje. To su vrijednosti od nekoliko kiloherca pa do nekoliko desetaka megaherca ovisno o obliku i trajanju prenapona. Općenito se sve prijelazne pojave mogu opisati složenim diferencijalnim jednadžbama što se detaljno razrađuje u [9]. U nekim najjednostavnijim pogonskim slučajevima ove se jednadžbe mogu riješiti analitički, uglavnom primjenom Laplaceove transformacije [10]. Ovakav pristup odluku temelji na strukturi problema, na odnosu između izbora i ishoda te što je više moguće na upotrebi numeričkih informacija za proračun rješenja. Kao prvo cilj doktorske disertacije je na jednostavnim primjera kao što je isklop malih induktivnih struja prikazati oblik i strukturu prolaznog sklopnog prenapona.

Proizvođači i korisnici zaštitne elektroničke opreme opravdano su zabrinuti u pogledu visokonaponske prenaponske zaštite jer iskustvo iz toga polja govori da postoji bogata povijest kvarova koji se mogu pripisati prolaznim prenaponima. Nedovoljno znanje o prirodi pojave tih prolaznih prenapona tijekom prošlosti učinio je njihov zadatak teškim. S druge pak strane postojanje širokog izbora zaštitnih tehnika i uređaja na raspolaganju bez izravnih

usporedbi među njima također samim korisnicima otežava izbor. Tehnike proizvođača se razlikuju od jedne do druge tvrtke. Specifikacije zaštitnih uređaja nisu uvijek dosljedne. Međutim, u posljednjih nekoliko godina napravljen je iskorak da se riješi ovaj problem. Većina temeljnih tehnika zaštite su standardne sigurnosne mjere koje omogućavaju zaštitu od direktnih i indirektnih utjecaja. Zaštita od indirektnih utjecaja podrazumijeva bezopasno odvođenje struje i blokiranje puta između izvora prijelazne pojave i instaliranih osjetljivih uređaja. Zaštitni koncept od indirektnih utjecaja uzima u obzir metode ispitivanja i uključuje razloge za ispitivanje i testiranje. Podrazumijeva i demonstraciju mjerne opreme. Osim toga određeni proizvođači se bave dizajniranjem zaštitnih proizvoda za određene oblike izvora prenapona te daju primjere pojedinačnih primjena zaštitnih uređaja kao i usklađenost različitih koordinacija zaštite. Odgovarajući izbor zaštitnog uređaja i dalje ostaje ključni zadatak jer točna i jedinstvena priroda prijelazne pojave u konkretnoj primjeni je u najboljem slučaju samo statistički definirana, tako da se prilikom izbora mora uključiti tehnički i ekonomski aspekt na temelju konkretnih podataka. Odabir snage zaštitnog uređaja za zaštitu od tranzijentnih prenapona zahtijeva znanje o vrsti prolaznog prenapona koji se pojavio kao u [11]. U općenitim tranzijentnim studijama, budući da prolazni prenaponi imaju tendenciju da se pojavljuju često, kratkotrajni monitoring je sve što je potrebno kako bi se okarakterizirala vrsta sklopnog prenapona [12]. Doktorska disertacija će između ostaloga rezultirati opisnim smjernicama za smanjenje negativnih utjecaja sklopnih prenapona te sa tim predloženim standardnim mjerama.

Znatnijim razvojem softverske podrške i specijalnih računalnih alata iz područja dinamičkih prijelaznih pojava počeo se uglavnom koristiti numerički proračun za različitu konfiguraciju elektroenergetske mreže te za odgovarajuće tranzijentne događaje [13]. U tu su svrhu razvijene i posebne numeričke platforme kao što su matematički laboratorij (engl. *MATLAB – mathematical laboratory*), alternativni prijelazni programi (engl. *ATP – alternative transients program*), elektromagnetski prijelazni programi (engl. *EMTP – electromagnetic transients program*) i slični [14]. Fazorska analiza ili neka druga pojednostavljena razvijena metoda obično je neadekvatna za analizu nelinearnih sustava u frekvencijskom području. Iz toga razloga, u doktorskoj disertaciji dominiraju simulacijski modeli analizirani u vremenskom području. Pri tome su upotrijebljeni odgovarajući simulacijski modeli elemenata nadomjesne mreže. U prvom redu se tu misli na model energetskog transformatora za promatranu nadomjesnu mrežu kao u [9] i [15]. Ovakav pristup omogućava rješavanje složenijih mreža koje su u praksi redovito i zastupljene. Računalne simulacije pružaju prikladan način za definiranje i opisivanje simulacijskog događaja.

Korišteni matematički modeli ovise o temeljnim karakteristikama sustava. Rezultati analize iz tog područja uključuju preporuke za optimalno rješenje problema nastalog sklopnim događajem. Pravilan odabir dostupnih numeričkih metoda za kontroliranje tranzijentnih prolaznih prenapona se utvrđuje na temelju ekonomskih, tehničkih i upravljačkih preduvjeta za konkretni slučaj. Pri tome su korištene specifikacije energetske, mjerne i sklopne opreme te postojeća trenutna ograničenja za analiziranu mrežu.

U sklopu doktorske disertacije će se stoga razviti grafičko sučelje za analizu i predviđanje sklopnih prenapona i analizirati osjetljivosti različitih utjecaja na visinu i trajanje sklopnih prenapona. Istraživanje će se provesti na energetskim transformatorima različitih snaga i grupa spoja. Navedeni transformatori će biti dokumentirani i prezentirani preko svojih ispitnih lista. Time su definirani kriteriji odabira modeliranih energetskih transformatora. Posebno će se analizirati slučaj distributivnoga transformatora koji imaju iste prijenosne omjere, ali različite nazivne snage. Između ostaloga istraživat će se utjecaj načina uzemljenja zvjezdišta transformatora na visinu sklopnog prenapona, te ispitati utjecaj promjene faktora snage i stupnja opterećenja modeliranog tereta na iznos sklopnog prenapona. Doktorska disertacija će sadržavati opis izrade i programske strukture razvijenog grafičkog sučelja te opis funkcija i opcija korištenih u aplikaciji. Za izvršeno istraživanje bit će definirano porijeklo i karakteristike korištenog materijala te će se opisati prednosti i razvojne mogućnosti korisničkog sučelja u analizi prijelaznih prenapona s naznakom na primjenu u energetskim mrežama. Eksperimentalna verifikacija grafičkog sučelja za analizu sklopnih prenapona će se potvrditi na laboratorijskom modelu. Eksperimentalni pristup bit će ojačan prijedlogom laboratorijskog mjernog lanca za snimanje sklopnog prenapona za isklop neopterećenog energetskog transformatora [16]. Također će detaljnije biti pojašnjena procedura snimanja sklopnih prenapona. Grafičko sučelje koje je razvijeno, zasnovano je na onome objavljenom u [17] i [18]. Znanstveni doprinosi ove doktorske disertacije su sljedeći:

- Modeliranje grafičkog sučelja za analizu sklopnih prenapona.
- Mogućnosti primjene baze rezultata simulacije i analize parametara elektroenergetske mreže.
- Analiza mogućnosti primjene rezultata analize osjetljivosti različitih utjecaja na visinu i trajanje sklopnih prenapona.
- Eksperimentalni okvir i metodologija za verifikaciju razvijenog grafičkog sučelja za analizu sklopnih prenapona.
- Analiza mjera za smanjenje negativnih utjecaja sklopnih prenapona.

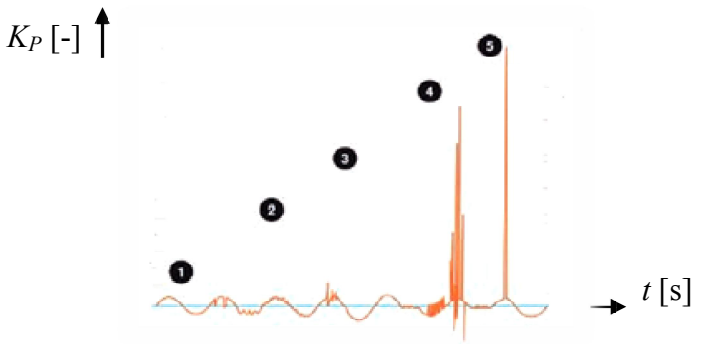
Na početku ove disertacije kroz jednostavan primjer su objašnjene kategorije, karakteristike, principi i mehanizmi nastajanja sklopnih prenapona. U trećem poglavlju je prikazana i objašnjena matematička podloga korištenih komponenata elektroenergetske mreže. U četvrtom poglavlju se pojašnjava razvoj simulacijskog modela u *Matlab - SimPowerSystemsu*. Peto poglavlje prikazuje pregled izvedbe i mogućnosti daljnjeg razvoja grafičkog sučelja. U šestom poglavlju se simulacijski analizira osjetljivost različitih utjecaja na visinu i trajanje sklopnih prenapona. U sedmom poglavlju se na primjeru isklopa malih induktivnih struja opisuje laboratorijski postav za mjerenje sklopnih prenapona. Osmo poglavlje prikazuje primjere gotovih suvremenih rješenja monitoringa sklopnih prenapona za zaštitu energetskog transformatora. U devetom poglavlju se daje evaluacijski okvir i primijenjena metodologija za verifikaciju razvijenog simulacijskog modela u svrhu analize sklopnih prenapona. Deseto poglavlje predstavlja zaključak cijele disertacije.

2. Prijelazni prenaponi

U ovom poglavlju razmatrat će se kategorizacija i karakteristike prijelaznih poremećaja do kojih dolazi prilikom sklopnih operacija. Da bi se dobila što jasnija fizikalna slika, razmatranje će se provesti na izabranim primjerima čiji su elementi koncentrirani i konstantni, te nepromjenjivi tijekom sklopnih operacija. Isto tako, pretpostavlja se da su uvjeti sklapanja prekidača idealni. Dobiveni rezultati razmatranja poslužit će analiziranju naponskih i strujnih naprezanja kojima je izložen energetski transformator i prekidač tijekom sklopnih operacija.

Prijelazni poremećaji u elektroenergetskim mrežama su neizbježni pratilac raznih događanja kao što je uklapanje neopterećenog voda preko transformatora, uklapanje većeg broja dugih vodova ili kabela, isklapanje i uklapanje sklopnih aparata u normalnim ili havarijskim uvjetima, razni kratki spojevi ili nagla promjena opterećenja. U tim situacijama generiraju se prijelazni prenaponi koji dovode do maksimalnih naprezanja, što u najvećoj mjeri utječe na normalan rad instaliranih visokonaponskih uređaja i energetskih transformatora te pouzdanost elektroenergetske mreže u cjelini. Mogu poprimiti takve iznose koji dovode do oštećenja ključne mjerne i zaštitne opreme te izolacije energetskih transformatora.

Za samu ilustraciju vrsta i oblika kratkotrajnih prolaznih sklopnih prenapona poslužit će slika 2.1. koja prikazuje različite oblike karakteristika prenapona koji se generiraju pri određenim uvjetima. Na *y* osi nalazi se faktor prenapona K_P dok je na *x* osi vrijeme trajanja *t* prijelazne pojave.



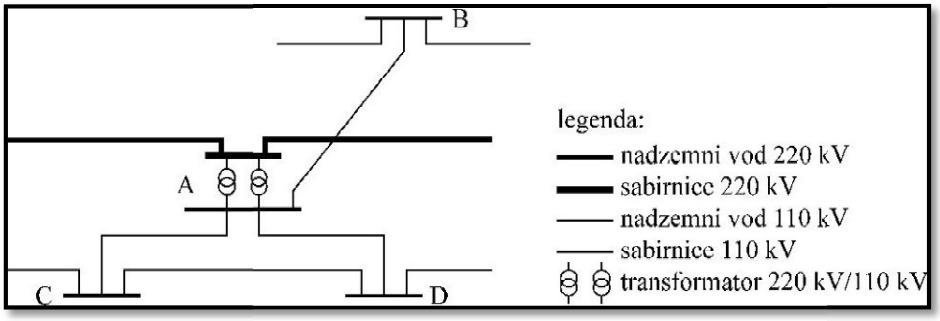
Slika 2.1. Ilustracija identificiranih kratkotrajnih prijelaznih pojava,
1 - kratki prekidi, 2 - spore i brze promjene napona, 3 - povremena povećanja napona, 4 - sklopni prenaponi, 5 - atmosferski prenaponi [18]

Za samu ilustraciju reda veličine vremenskog trajanja prijelaznih procesa poslužit će tablica 2.1. Na pojavu brzih poremećaja reagiraju lokalni, unaprijed predpodešeni zaštitni uređaji, ukoliko su instalirani.

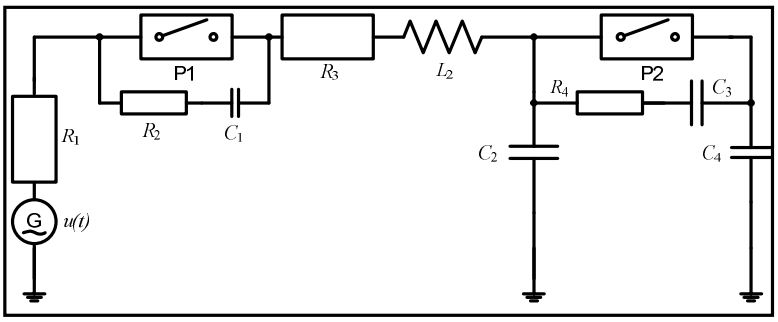
Tablica 2.1. Relativna usporedba dinamičkih i elektromagnetskih pojava prema trajanju

Slučajevi izvora prijelaznih dinamičkih pojava	Trajanje	Jedinica mjere
Elektromagnetski prijelazni prenaponi	1 - 10	μs
Elektromehanička njihanja generatora	0,01 - 15	s
Brze promjene frekvencija	0,02 - 30	s
Djelovanje zaštitnih funkcija	0,05 - 2	s
Djelovanje mjernih funkcija	0,1 - 1000	μs
Djelovanje upravljačkih funkcija	0,15 - 500	μs
Regulacija uzbude generatora	0,05 - 5	s
Primarna regulacija frekvencije generatora	0,1 - 30	s
Sekundarna regulacija snage generatora	1 - 5	min
Regulacija kotla	1 - 15	min

Bilo koja konfiguracija promatrane elektroenergetske mreže u stabilnom ustaljenom stanju ima određeni raspored akumulirane energije. Stoga, bilo kakvoj promjeni konfiguracije originalne mreže uzrokovane sklopnim operacijama ili neželjenim kvarovima, pripada drugi raspored akumulirane energije što se može vidjeti u [19]. Prema tome, bilo koja kombinacija pretvorbe energija je popraćena titrajnim procesima i pripadnom akumulacijom energije. Štoviše, novoj konfiguraciji mreže u određenom trenutku može odgovarati više ili manje akumulirane elektromagnetske energije. Po svemu sudeći razlika se nadoknađuje iz mehaničke energije sustava ili se u nju vraća, pri čemu popratno nastaju gubici te se u konačnici sklopni prenapon prigušuje [20]



a)



b)

Slika 2.2. Ilustracija korištenih vrsta mreža [21]

a) Orginalna električna mreža,

b) Nadomjesna električna mreža.

2.1. Pojam prijelaznih prenapona u elektroenergetskom sustavu

Pod pojmom prenapon podrazumijeva se bilo koji napon između faznog vodiča i zemlje ili između faznih vodiča čija vršna vrijednost napona prelazi odgovarajuću vršnu vrijednost dozvoljenog napona opreme. Dozvoljeni napon opreme se predstavlja najvišom efektivnom vrijednosti međufaznog napona za koje je oprema izgrađena uvažavajući izolaciju i druge specifične uvjete. Prema uzroku nastajanja mogu biti vanjski i unutrašnji. Po svemu sudeći unutrašnji prenaponi se pak dijele na sklopne ili prijelazne i privremene ili povremene napone. Unutrašnji prenaponi nastaju isključivo uslijed poremećaja u samom sustavu. Jedini predstavnik vanjskih prenapona je atmosferski prenapon.

Pojam prijelazni prenaponi u teoriji električnih krugova označava promjenu sinusoidalnog oblika napona i struje koja se događa tijekom prijelazne pojave prijelazom iz jednog u drugo stabilno stanje. Nadomjesni električni krugovi se opisuju odgovarajućim diferencijalnim jednadžbama čije je rješenje suma općeg i partikularnog rješenja. Partikularno rješenje povezano je sa stabilnim stanjem dok je opće rješenje povezano isključivo sa prijelaznom pojavom. U teoriji analize električnih krugova prijelazni prenapon je uvijek povezan sa promjenom koja se odvija tijekom sklopnog događaja. U energetskim sustavima termin prijelazni prenapon se nešto drugačije definira i određuje. Jednoznačno povezuje dva kratkotrajna fenomena koja se isprepleću te su usko povezana sa promjenom struje i napona. Nema krute granice te se obično za potrebe istraživanja uzima da je prijelazna pojava manjeg trajanja od jedne periode.

Interes za istraživanjem prijelaznih prenapona u energetskim mrežama je kruto povezan s razvojem tehnologije električnih prekidača te različitim mehanizmima lučnih komora za

uklapanje energetskih krugova [22] i [23]. Štoviše, novija istraživanja prolaznih prenapona ukazuju na mogući utjecaj na kvalitetu električne energije [24]. Po svemu sudeći novi pristup na interpretaciju i analizu prijelaznih odziva je nužan što će za posljedice imati nove zahtjeve prema mjernoj opremi koja bude korištena za mjerenje sklopnih prenapona. Dakako da će se to reflektirati na razvoj novih metoda za izvlačenje vrijednih informacija dobivenih modeliranjem i estimacijom parametara energetskih transformatora. Tako razvijene metode bi bile korištene u analizama visokofrekvencijskih prijelaznih prenapona. Više o tome se može pročitati u [25]. Značajan broj objavljenih znanstvenih članaka istražuje vrlo interesantne i zahtjevne probleme kao što je na primjer analiza udarnih sklopnih prenapona, optimalni uvjeti uklopa energetskog kondenzatora na industrijsku mrežu, analiza udara atmosferskog pražnjenja, analiza uklopa odvodnika prenapona, pokretanje električnog motora, mehanizmi i tehnike uklopa vakuumskog i SF_6 prekidača na analiziranu mrežu, analiza naponskih propada, uklop uređaja energetske elektronike, analiza prijelaznih prenapona vjetroelektrane tijekom pojave jednofaznog kratkog spoja, analiza koordinacije izolacije itd. Ključna je značajka u svim ovim slučajevima da su se ti prenaponi pokazali dosta opasnim za pouzdanost i stabilnost elektroenergetskog ili industrijskog sustava [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32]. Također, jedan broj znanstvenih publikacija istražuje područja što preciznijeg programiranja algoritama za kontrolu i upravljanje visokofrekventnom prijelaznom pojavom u elektroenergetskom sustavu. Naravno to vodi prema dodatnim zahtjevima prema mjernim sustavima za uzorkovanje sklopnog prenapona [33], [34].

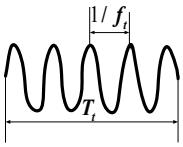
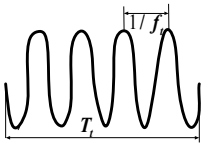
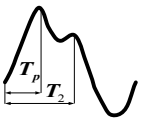
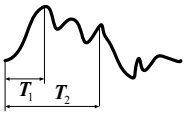
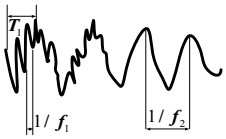
2.2. Klasifikacija kategorija prijelaznih prenapona

Dakle, elektromagnetski prijelazni prenaponi se dijele prema vrsti, obliku i trajanju. Sklopni, atmosferski i ultra brzi (engl. *VFT – Very fast transients*) imaju prolazni karakter. Dostižu amplitudu u kratkom vremenu, nakon čega se prigušuju ili nestaju. Za razliku od njih povremeni prenaponi traju duže. Njihovo trajanje ima red veličine sekunde, a mogu doseći i sate. U novije vrijeme sve više prevladava klasifikacija temeljena na specifičnim slučajevima [11]. Elektromagnetska kompatibilnost obuhvaća tri osnovna aspekta: otpornost elektroenergetskog (EES) sustava na veličinu poremećaja s kojim se sustav mora nositi, emisijom poremećaja na druge sustave te samim elektromagnetskim okolišom u kojem se proračunava veličina poremećaja na mjestu gdje bi sustav trebao funkcionirati. Isto tako koordinacija izolacije bavi se veličinom prenapona koje oprema mora izdržati bez pojave preskoka (tzv. dielektrična čvrstoća opreme) i izračunavanjem amplitude prenapona na mjestu

u mreži gdje će oprema biti instalirana. Prema standardima Međunarodne elektrotehničke asocijacije (engl. *IEC – International electrotehnical comission*) koji se primjenjuju u području elektromagnetske kompatibilnosti sama klasifikacija [35] prijelazne pojave u elektroenergetskom sustavu dijeli se prema vrsti, obliku i trajanju prenapona u sljedeće klase:

Tablica 2.2. Podjela prema vrsti, obliku i trajanju prenapona [35]

Klasifikacija kategorija prijelaznih prenapona

Vrste prenapona	Privremeni ili povremeni prenaponi		Prijelazni prenaponi		
	Niska frekvencija		Visoka frekvencija		
	Trajni napon	Kratkotrajni	Spori	Brzi	Vrlo brzi
Oblik prenapona					
Područje oblika	$f_1 = 50$ Hz $f_2 = 60$ Hz $T = 3600$ ms	$10 < f_t < 500$ Hz $3600 \leq T_t \leq 0,03$ s	$5000 > T_p > 20$ μs 20 ms $\geq T_2$	$20 > T_1 > 0,1$ μs 300 ms $\geq T_2$	$100 > T_1 > 3$ ns $0,3 > f_1 > 100$ MHz $30 > f_2 > 300$ kHz
Standardni oblik	$f_1 = 50$ Hz $f_2 = 60$ Hz $T = 20$ ms	$f = 0,066$ Hz $T = 60$ s	250 μs $< T < 2500$ μ 4 kHz $< f < 40$ kHz	$1,2$ μs $< T < 50$ μs 833 kHz $< f < 20$ kHz	Nije definiran
Standardno ispitivanje	Nije potrebno	Ispitivanje kratkotrajnim naponom 50Hz	Ispitivanje sklopnim impulsom	Ispitivanje atmosferskim impulsom	Nije definiran

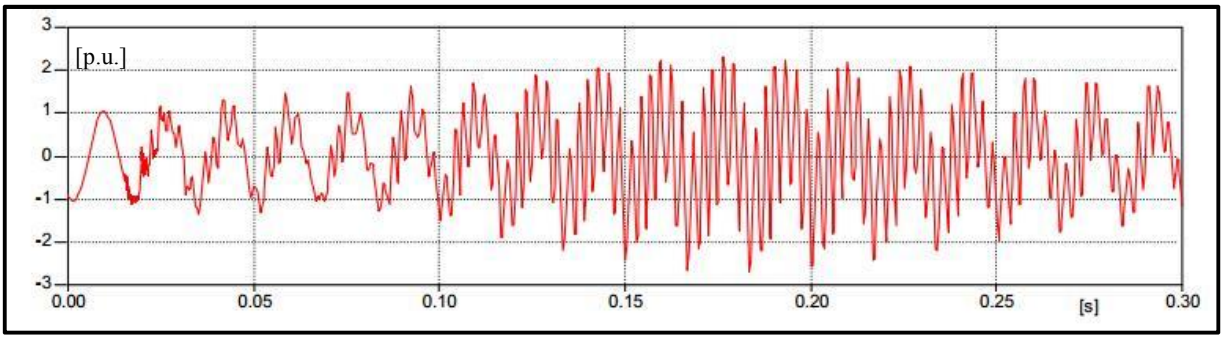
Prema tablici 2.2. može se vidjeti da postoje tri klase prenapona. U prvu klasu spadaju privremeni prenaponi klasificirani prema osnovnoj pogonskoj frekvenciji. U ovu klasu pripadaju događaji gdje se povišeni iznos napona zadržava duži vremenski period. Istraživači su se tijekom vremena upoznali sa tim promjenama te su problemi iz tog dijela rješivi. Ova klasa dominira među svim istraživanim događajima. Prolazni prenaponi (engl. *TOV – temporary overvoltages*) karakteriziraju slučajeve gdje prenapon dosegne vršnu vrijednost za 3 ili više periode. Prolazni prenapon u situacijama gdje se relativno veliki transformator uklapa na relativno slabi prijenosni sustav može sklapanjem prekidača rezultirati zasićenjem željezne jezgre energetskih transformatora. Visina prolaznog prenapona koji se javlja prilikom uklopa energetskih transformatora u praznom hodu ovisi o stupnju zasićenja željezne jezgre

transformatora. U tim trenucima kada je željezna jezgra premagnetizirana stvara se prolazna struja. Prolazna struja poprima visoke iznose sa značajnim udjelom harmonijskih članova [36].

Frekvencijska struktura prolazne struje dolazi u interakciju s rezonantnom frekvencijom energetskog sustava. Rezonantna frekvencija je funkcija serijskih induktiviteta povezanih sa električnim krugom i pripadnih kapaciteta kabela i vodova. Kombinacija visokih induktiviteta (relativno slab energetski sustav) i visokih kapaciteta (dugi vodovi i kabeli) dovodi do niže rezonantne frekvencije, a time i veće šanse za pojavom prolaznog prenapona. Ti harmonici mogu u interakciji s rezonantnim induktivno - kapacitivnim sustavom rezultirati pojavom rezonantnih prenapona koji mogu trajati i do nekoliko sekundi. Općenito gledajući, u početnim trenutcima tijekom prvih pet perioda prijenosni sustav se nalazi u *tzv. Block out* stanju. Instalirana mjerna oprema u uvjetima i tijekom *Block outa* mjeri visoke prenapone za razliku od normalnog pogona. Nadomjesni induktivitet ekvivalentnog sustava je relativno visok tijekom procesa obnove zato što je relativno mali broj generatora uključen, a stanje mreže je takvo da su generatori u pripravnosti. Iz toga razloga rezonantna frekvencija sustava može biti znatno manja od pogonske frekvencije sustava u stanju normalnog pogona. Visoka kapacitivnost doprinosi u tim situacijama nižoj rezonantnoj frekvenciji. Ogledni primjer prolaznog prenapona u stanju *Block outa* elektroenergetskog sustava prikazuje slika 2.3. Ovdje se vidi da za razliku od sklopnih prenapona gdje dominira samo jedna vršna vrijednost, prolazni prenaponi mogu imati stotine vršnih vrijednosti jednakih iznosa ako prolazni prenapon traje više sekundi. Dobiveni rezultati ukazuju da su prolazni prenaponi osjetljivi na nekoliko parametara, uključujući trenutak zatvaranja prekidača (tzv. sklopni kut), krivulju magnetiziranja transformatora, zaostali tok u transformatoru te na izvore impedancija i kapaciteta samog sustava. Uključenje velikih energetskih transformatora je primjer slučaja koji može izazvati *block out* stanje sustava. Općenito gledajući, uklop energetskog transformatora se može izvršiti na dva načina. Ukoliko se energetski transformator uklapa na mrežu preko generatora kod kojeg nije instaliran prekidač, tada se transformator uklapa u beznaponskom stanju. Upravljanjem brzinom turbine generatora postupno podižemo napon transformatoru. Ovaj način proizvodi relativno manje vršne vrijednosti prolazne struje. Popratno se javlja prolazni prenapon, odnosno nešto niži prolazni napon. U slučaju kada postoji generatorska sabirnica srednjeg napona, a to su slučajevi gdje postoji generatorski prekidač, transformator se može tada uklopiti direktno na prijenosni sustav koji će također prouzrokovati prolazni prenapon [37]. Prolazni prenaponi dugog trajanja mogu aktivirati prenaponske zaštitne releje ukoliko se ne predvidi ovaj događaj prilikom vođenja pogona

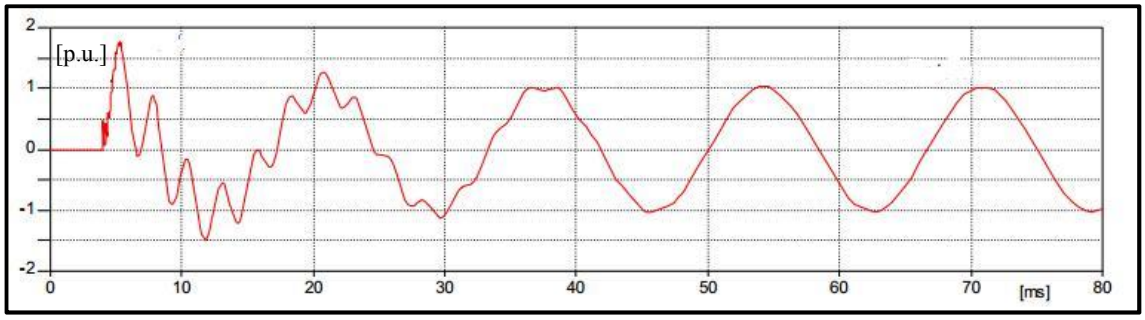
elektroenergetskog sustava. Stariji i novi tipovi odvodnika prenapona su preosjetljivi na visoke razine prolaznih prenapona. Moderni metal - oksidni varistori (engl. *MOV – metal oxide varistor*) odvode struju na svim naponskim razinama što ih čini preosjetljivim. Očekivana razina prolaznog prenapona i vrijeme trajanja se mora usporediti s deklariranim proradnim proizvođačkim karakteristikama za odabrani odvodnik prenapona [1]. Prolazni prenapon može preći u prijelazni u slučajevima kada se veliki transformator uklapa preko kabela ili voda [37].

Slučajeve pokretanja visokonaponskih električnih motora karakterizira s jedne strane kratkotrajni pad napona u trajanju od 50 ms do nekoliko sekundi te s druge strane propad napona u trajanju od nekoliko sekundi. Više o tome može se pročitati u [26].



Slika 2.3. Sklopni prenapon dobiven EMTP simulacijom uklopa transformatora u uvjetima tzv. *Block outa* gdje je napon iskazan u p.u. (u odnosu na nominalni fazni napon) [37]

Događaje iz druge klase karakterizira značajna promjena visine prijelazne frekvencije, ali kratkog trajanja. Sklopni prenaponi pripadaju u prijelazne prenapone koji se pojavljuju u trenutku uklopa ili isklopa energetskog prekidača ili nekog drugog prekidnog elementa (npr. rastavljača). Ti prenaponi nakon dva ili tri perioda istitravanja prelaze u stabilno stanje (napon pogonske frekvencije 50 Hz). Primjer tipičnog sklopnog prenapona prikazuje slika 2.4. Uzorak dijagrama dobiven je softverom za simulaciju elektromagnetskih prijelaznih pojava (engl. *EMTP - Electromagnetic transient program*) uklopa dugog energetskog dalekovoda.



Slika 2.4. Sklopni prenapon dobiven EMTP simulacijom uklopa dugog voda gdje je napon iskazan u p.u. [37]

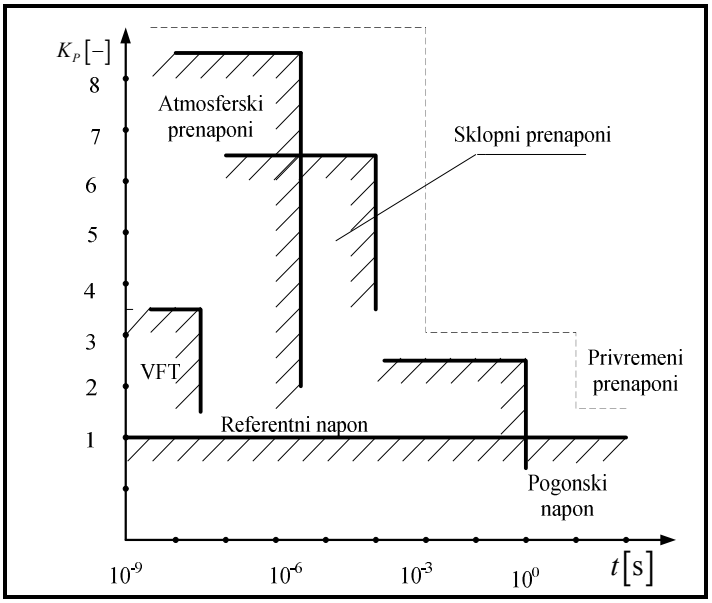
Iznos i oblik sklopnog prenapona ovisi o preciznosti zatvaranja energetskog prekidača tijekom generiranja sinusoidalnog napona pogonske frekvencije. Iz toga razloga mnoge simulacije slučajeva se rade za različite tehnike i mehanizme uklopa prekidača da bi se izvukle iscrpne informacije o samoj pojavi sklopnih prenapona. Metode analize koje su se u tim slučajevima primijenile uglavnom su prezentirane u obliku statističke distribucije. Odvodnici prenapona ili uklopni otpornici obično su efikasni u limitiranju vršne vrijednosti sklopnih prenapona [1]. Posredno dodani uklopni otpornici štite element blokiranjem prekomjernog napona.

Estimacija veličine sklopnog prenapona može biti u specijalnim analiziranim slučajevima dosta otežana [37]. Također postoje situacije kod kojih informacija o visini pogonske frekvencije ne nudi nikakvu vrijednu povratnu informaciju. Visokofrekvencijske komponente signala za ovu složenu klasu izvlače se na temelju dodatnih istraživanja i klasifikacija [38]. Samo razumijevanje kategorija sklopnih prenapona otvara mogućnost razvoja modela i metoda za estimaciju parametara signala korištenjem razvijenih naprednih tehnika. Koristi se metoda koja se temelji na estimaciji parametara sustava primjenom različitih tehnika (engl. *ESPRIT - Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques*) što se može vidjeti na primjeru [38]. Članak analizira primjer uklopa energetskog kapaciteta koji generira oscilatorni prenapon frekvencije 1,2 kHz koji je superponiran na signal pogonske frekvencije od 60 Hz. Prema tome ova metoda s velikom točnošću estimira frekvenciju oscilacije. Korištena metoda predstavlja značajan pomak u analizi brzih prijelaznih pojava. Štoviše, to nas uvodi u analizu oscilatornih valnih odziva kako bi se povezale same pojave i temeljna obilježja pojavnosti generiranih prenapona. Poveže li se znanje o razvijenim metodama i tehnikama za estimaciju komponenti signala s temeljnim znanjima o elektroenergetskim sustavima, po svemu sudeći to bi povezalo pojavu s uzrokom nastanka prolaznog prenapona.

Nešto drugačiju klasifikaciju prenapona prema trajanju i faktoru prenapona prikazuje slika 2.5. Na ordinati je faktor prenapona koji se prikazuje u odnosu na maksimalnu faznu vrijednost napona.

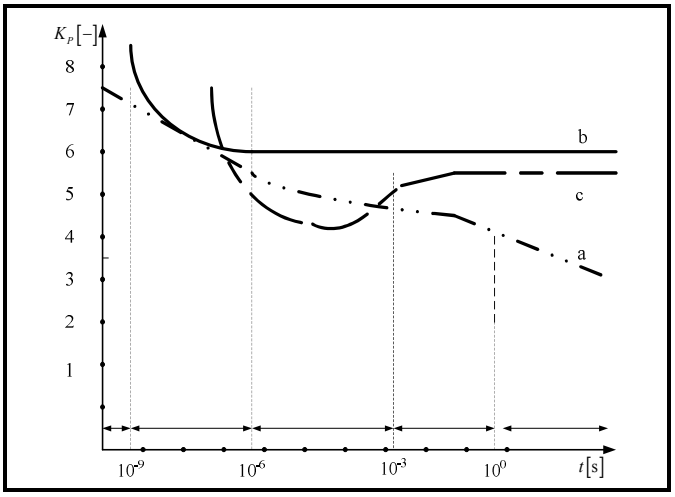
$$K_P = \frac{U_{MAX}}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U} = 1.225 \cdot \frac{U_{MAX}}{U} \tag{2.1}$$

gdje je K_p - faktor prenapona u [-], U_{MAX}– maksimalna amplituda faznoga prenapona u [kV], U - efektivna vrijednost linijskog pogonskog napona u [kV].



Slika 2.5. Klasifikacija prenapona prema faktoru i vremenu trajanja prenapona [39]

Dobro je poznata veza između faktora prenapona, vremena trajanja privremenih i prolaznih prenapona i vrste izolacije što pokazuje slika 2.6. Vidi se da u trenutku nastanka vrlo brzog prijelaznog prenapona instalirana oprema sa zračnim rasporom manjim od 2 m može podnijeti veći iznos udarnog prenapona.



Slika 2.6. Klasifikacija prenapona prema faktoru prenapona i vrsti unutarnje izolacije a) papir, b) zračni raspor manji od 2 m i c) zračni raspor veći od 2 m [39]

2.2.1. Ispitivanje opreme na sklopni prijelazni prenapon

Različite sklopne manipulacije i neželjeni kvarovi uzrokuju poremećaje u obliku visokofrekvencijskih prijelaznih prenapona koji se u obliku putujućih valova šire vodovima.

Nastale smetnje se putem mjernih transformatora, metalnih plašteva kabela, uzemljivačkih sustava konduktivnim putem ili zračenjem prenose do osjetljive elektroničke opreme za upravljanje, signalizaciju, zaštitu, mjerenje i regulaciju rasklopnog postrojenja [40]. Dalekovodi posjeduju svoju izolacijsku razinu pa se preveliki naponi na njima ne mogu dugo održati bez pojave neželjenih preskoka. Nastaje preskok preko iskrišta na izolatorskim lancima, prorade odvodnici prenapona, pa dalekovodom ubrzo putuje val koji odgovara izolacijskoj razini voda. Dokazano je da pri tome očekivana naponska razina vala ovisi o izolacijskoj razini dalekovoda i obično je bitno niža na dalekovodima niže naponske razine bez obzira što se nalaze u jednakim klimatskim i geografskim uvjetima [20]. Ovdje treba naglasiti da postoje specijalni slučajevi gdje prekidač ne uspije odrezati struju kao što su sklapanje dva elektroenergetska sustava koja su u fazno pomaknuta za 180° (tzv. opoziciji faza), pri kojem se javljaju naponska naprezanja daleko teža nego kod prekidanja struje kratkog spoja, pa se može dogoditi da prekidač ne uspije prekinuti struju unatoč tome što je njen iznos desetak pa i stotinjak puta niži od njegove nazivne prekidne moći [40].

Mjerenje i analiza sklopnih prenapona u visokonaponskim postrojenjima spadaju u vrlo zahtjevna mjerenja. Primjerice, u [40], [41], [1], može se pročitati nešto više o utjecaju sklopnih prenapona na NN elektroničku opremu; iscrpnom programu mjerenja sklopnih prenapona u TS 35 / 20 (10) kV Obrovac i rasklopnom postrojenju 110 kV i 220 kV u Hidroelektrani Zakučac; karakteristikama korištene mjerne opreme za monitoring sklopnih prenapona na VN i SN strani rasklopnog postrojenja. Mjerenja na primarnoj VN strani se uglavnom koriste za ispitivanje naprezanja opreme i služe prvenstveno za procjenu stanja opreme dok mjerenja na sekundarnoj strani daju informacije o potrebnim zaštitnim mjerenjima na osjetljivoj elektroničkoj opremi. Problemi sa sklopnim prenaponima doveli su do tehničkih i ekonomskih problema budući da se povećala cijena sustava monitoringa zbog uvođenja dodatne prenaponske zaštite, boljih elektroničkih uređaja koji su otporniji na veće elektromagnetske smetnje te dodatnog oklapanja kabela i senzora. Stvoreni su preduvjeti za kontinuirani nadzor prekidača u stvarnom vremenu, rastavljača, strujnih i naponskih mjernih transformatora, zemljospojnika i odvodnika prenapona.

Iscrpna analiziranja i mjerenja prenapona sklopnog podrijetla pokazala su da je osnovna karakteristika oscilatornih prenapona veoma strmo i brzo rastuće čelo vala s blagim opadanjem kroz vrijeme (tzv. hrbat prenapona). U svrhu ispitivanja izdržljivosti energetske primarne i sekundarne opreme koriste se generatori sklopnih i udarnih kratkotrajnih visokonaponskih impulsa. Štoviše, promatranje je rezultiralo dogovorom o obliku i iznosu ispitnog prenapona s kojim treba ispitati svaki tip transformatora kako bi se mogla utvrditi

otpornost na prenapon. Karakteristike prenapona su jednake za sve naponske razine. Maksimalne tjemene vrijednosti podnosivog napona su normirane i usklađene s podnosivim naponima pogonske frekvencije i najvišim naponima opreme. U tablici 2.3. prema IEC normama [35] iskazane su vrijednosti podnosivih izmjeničnih udarnih napona za najviše napone opreme.

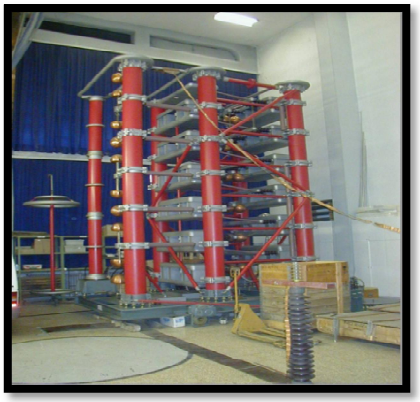
Tablica 2.3. Podnosivi udarni naponi prema IEC standardu [35]

Najviši napon opreme U_m u kV	**Podnosivi napon industrijske frekvencije u kV**	**Podnosivi udarni impulsni napon u kV**
3,6	10	40
7,2	20	60
12	28	75
24	50	125
36	70	170
123	185	450
	230	550
245	360	850
	395	950
420	570	1300
	630	1425

Najviši pogonski napon mreže je najviša vrijednost napona, koja se u normalnim uvjetima pojavljuje u bilo kojem trenutku i u bilo kojoj točki mreže. Ta vrijednost ne uzima u obzir povremene i prolazne promjene napona zbog smetnji i kvarova. Podatak o najvišem naponu važniji je od nazivnog napona, jer on služi za utvrđivanje nivoa izolacije. Kako se u mreži pojavljuju i znatno viši naponi zbog prijelaznih pojava izolacija mora biti sposobna izdržati i znatno više napone, jer bi u protivnom svaka takva pojava izazvala kvar u postrojenju. Zbog toga su standardizirani sklopni i impulsni ispitni naponi koje mora izdržati ispitivani aparat ili element postrojenja. Skup mjera za sprječavanje štete zbog povišenja napona naziva se koordinacija izolacije, koja se provodi tako da se preskoci lokaliziraju na mjestu gdje neće nanijeti štetu. Da se to postigne, određuje se stupanj izolacije aparata i uređaja koji je definiran vrijednošću podnosivih napona, koji pak karakteriziraju izolaciju tog aparata ili uređaja s obzirom na njihovu dielektričnu čvrstoću. Podnosivi napon industrijske frekvencije za vrijeme jedne minute je najviši napon frekvencije 50 Hz koga transformator ili bilo koji uređaj mora izdržati jednu minutu, a da ne dođe do proboja ili preskoka pri ispitivanju. Osim podnosivog napona frekvencije 50 Hz, transformator mora podnijeti tipsko ispitivanje udarnim naponom [35]. Preskočni ili probojni napon je najviša tjemena vrijednost prenapona koji se pojavljuje u mreži. U pedeset posto slučajeva preskočni ili probojni ispitni

prenapon javlja se na provodnim izolatorima koja dovodi do narušavanja pouzdanosti elektroenergetske mreže.

Elektromagnetske pojave u namotima transformatora prilikom dolaska prenapona na transformator iznimno su kompleksne zbog složenosti svih elemenata koji utječu na dinamiku prijelazne pojave. Iz toga razloga da bi se dobila jasnija slika same pojave, elementi nadomjesne mreže i sama karakteristika prenapona se obično pojednostavljuje prilikom modeliranja. Bit same pojave se neće znatno promijeniti ako se stvarni prenapon nadomjesti standardnim modelom prenapona koji će se dalje koristi prilikom ispitivanja elementa [35].

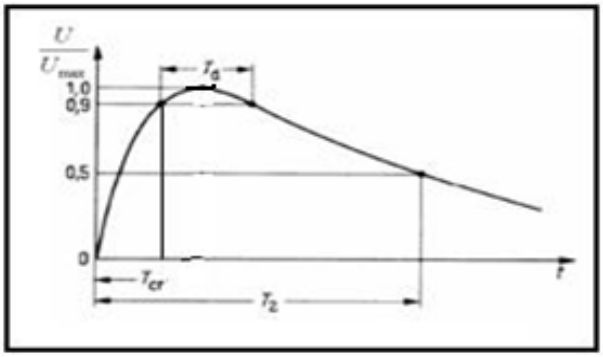


Slika 2.7. Izvedba generatora za ispitivanje udarnim naponima [42]

Slika 2.8. Primjer izvedbe energetskog transformatora firme Končar – energetski transformatori [43]

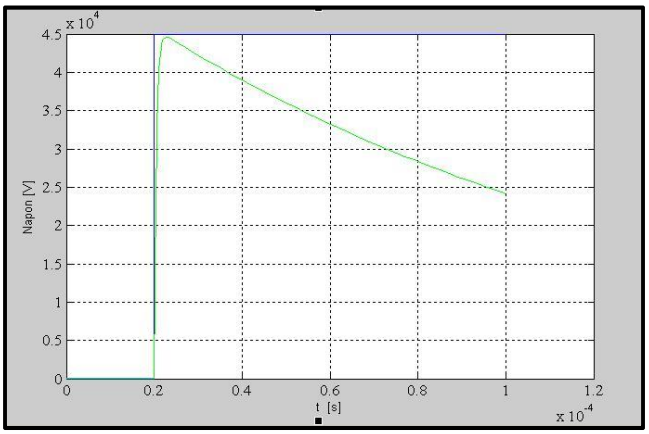
Prijelazni prenaponi razlikuju se prema vremenu potrebnom da maksimum napona dostigne punu vrijednost. Prijelazni prenaponi kod kojih vrijeme do maksimuma iznosi do nekoliko desetaka mikrosekundi smatraju se impulsnim prenaponima, a oni s duljim vremenima sklopnim prenaponima. Uobičajen je impulsni prenapon 1,2 / 50 μs. Prema IEC standardu dozvoljena su odstupanja za čelo impulsnog prenapona ± 30 % a za hrbat prenapona ± 20 %. Sklopne prenapone karakteriziraju vremena T_{cr} = 250 μs (± 20 %) i T_2 = 2000 μs (± 60 %) i označava se kao val prenapona 250 / 2000 μs. Sklopni ispitni prenapon definiran IEC standardima dozvoljava duža karakteristična vremena prenapona.

Vidimo da ovdje IEC standard dozvoljava nešto manja odstupanja čela i nešto veća odstupanja hrbta prenapona. Kod sklopnih prenapona vrijeme porasta prenapona T_{cr} je stvarno vrijeme između početne i 90 % maksimalne tjemene vrijednosti prenapona. Karakteristični pokazatelj sklopnog prenapona je vrijeme trajanja maksimuma prvog čela prenapona T_d koje predstavlja razliku vremena da sklopni prenapon padne ispod 90 % tjemene vrijednosti. Slika 2.9. prikazuje karakteristične značajke testnih prenapona.



Slika 2.9. Karakteristični oblik sklopnog prenapona [35]

Usporedbu testnog prenapona s karakterističnim vrijednostima T_1 / T_2 = 1 / 100 μs i prenapona oblika skokovite funkcije prikazuje slika 2.10.



Slika 2.10. Usporedba sklopnoga prenapona 450 kV, 250 / 2000 μs i prenapona oblika skokovite funkcije dobiven simulacijom u Matlab - u

U skladu s koordinacijom izolacije, elektromagnetska oprema instalirana u SN rasklopnim postrojenjima ispituje se na standardni udarni prenapon koji se definira maksimalnom tjemenom vrijednošću u kilovoltima, dužinom trajanja čela prenapona (vrijeme potrebno da prenapon na rastućem dijelu prođe put od 0 % do 90 % tjemene vrijednosti) i dužinom trajanja cijelog prenapona (vrijeme od početka vala prenapona do trenutka kada val na hrptu prenapona padne na 50 % tjemene vrijednosti).

Ispitivanje stanja izolacije energetskih transformatora zasniva se na usporedbi i analizi naponskih i strujnih dijagrama zabilježenih prilikom primjene testnih napona na priključke transformatora. S obzirom da je prema [44], [45] i [46] praktično nemoguće postaviti jasne kriterije o prolaznosti ispitivanja, procjena rezultata ispitivanja vrši se iskustveno. Iz toga razloga svako novo izvršeno ispitivanje na standardnim transformatorima predstavlja novo iskustvo u procjeni stanja izolacije transformatora. Više o mjernom krugu i protokolu ispitivanja se može pročitati u [45] gdje je opisan standardni postupak ispitivanja, a koji se radi odvojeno za svaku fazu. Smatra se da je izolacija uspješno prošla ispitivanje ukoliko nema značajnih razlika između naponskih i strujnih odziva snimljenih pri sniženom i punom podnosivom ispitnom udarnom naponu. Interpretacija dijagrama temelji se na usporedbi valnih oblika napona i struje, koji se snimaju pri sniženom i punom standardnom udarnom naponu. Opće smjernice za interpretaciju rezultata ispitivanja dane su u [45]. Uz pravilnu interpretaciju dobivenih naponskih i strujnih signala mogu se dobiti važne informacije o stanju izolacije transformatora. Raznovrsnost analiziranih signala može poslužiti lakšoj interpretaciji sličnih rezultata u budućnosti.

Za potrebe generiranja različitih vrsta i oblika udarnog prenapona u Matlabu je razvijen simulacijski model. Sam model se temelji na Marxovom višerazinskom udarnom generatoru. Ovom izvedbom za ulazni istosmjerni napon reda kilovolti moguće je dobiti vrijednosti prenapona reda nekoliko megavolti. U praksi postoje, osim ove izvedbe, i nešto jednostavnije opcije jednorazinskih izvedbi za generiranje impulsnih prenapona. Simulacijsko generiranje udarnog prenapona vrlo visokih tjemenih vrijednosti prema tim izvedbama zahtijevalo bi istosmjerni izvor znatno veće vrijednosti nego kod Marxovog višerazinskog udarnog generatora. Simulacijsko modeliranje fizičkih komponenata strujnog kruga za ispitivanje energetskog transformatora udarnim naponom u MATLAB - Simulinku podrazumijeva balansiranje između brzine simulacije s jedne strane i vjerodostojnosti kompleksnog simulacijskog modela. Svakako bi bilo poželjno napraviti određenu simulacijsku bazu u kojoj bi bili prikupljeni valni oblici napona i struje dobiveni u virtualnom okruženju.

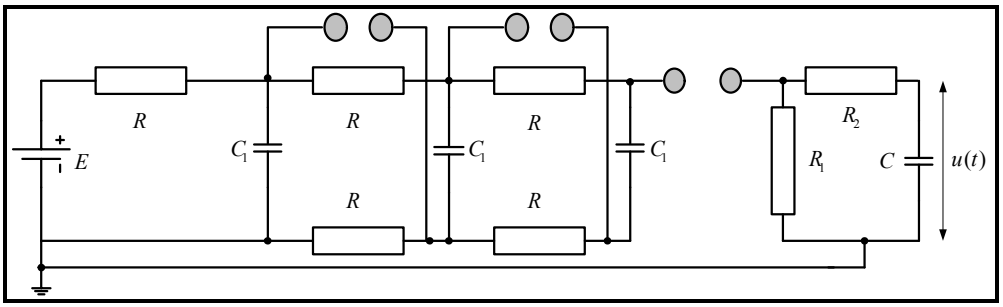
Električna shema spoja za generiranje vrlo visokih vršnih iznosa udarnog ispitnog prenapona prema Marxu može se vidjeti na slici 2.11. Na izlaz kondenzatora C priključuje se ispitivani objekt na kojeg djeluje udarni prenapon $u(t)$ koji može biti reda veličine megavolta.

Ako se zna da je kondenzator C_1 u posljednjem stupnju prije provođenja iskrišta bio nabijen na napon izvora E, dok je kondenzator C bio nenabijen, jednadžba koja opisuje jednoznačno udarni prenapon svodi se na oblik:

$$u(t) = U_m \cdot (e^{-T_{cr} \cdot t} - e^{-T_2 \cdot t}) \tag{2.2}$$

gdje je U_m – maksimalna vrijednost udarnog prenapona u [kV], T_{cr} – vrijeme trajanja čela prenapona u [μs], T_2 - vrijeme trajanja hrbta prenapona u [μs]. Generirani oblik prenapona na izlazu udarnog generatora nastaje kao rezultat nabijanja i pražnjenja kondenzatora. Dakle, odgovarajućim odabirom vremenskih konstanti *RC* kruga postižemo željeni oblik testnog prenapona. Promjenom parametara utječe se na oblik i karakteristiku udarnog prenapona.

Više o samom višerazinskom mehanizmu generiranja ispitnog prenapona može se pogledati u [45].

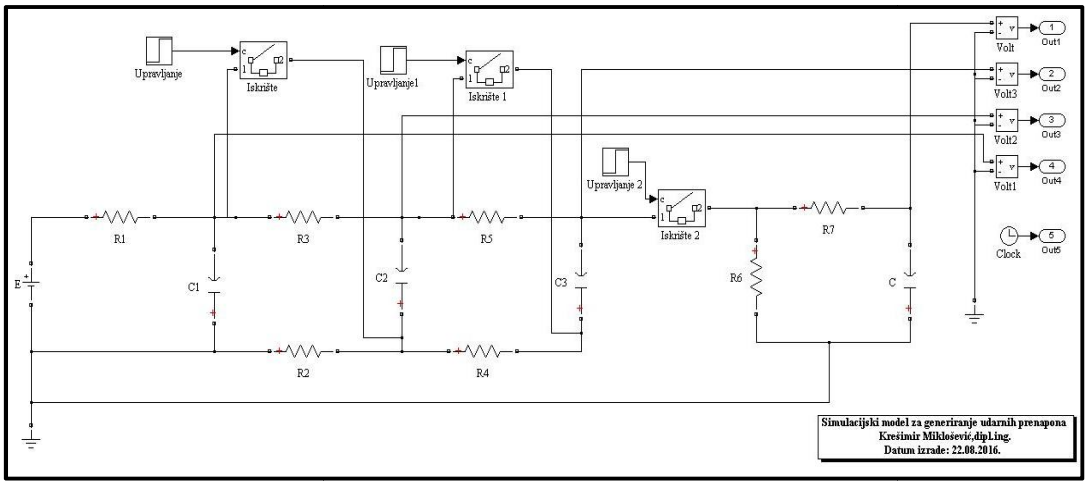


Slika 2.11. Marxov višerazinski impulsni generator udarnog napona

Kako je i bilo prikazano ovim se modelom generira udarni prenapon jednim ili više stupnjeva pražnjenja i punjenja pripadnih *RC* članova sve dok se prenaponu ne prekine veza s izvorom napona. Odziv signala je prenapon karakteristike *u(t)* koji na početku odskočne pobude prati funkciju na ulazu i iz kojeg se može prepoznati nagla izmjena energije. Energija koja se izmjenjuje ušla je u sustav kao energetski sadržaj pobudnog signala, a prenapon je vanjski vidljivi pokazatelj procesa izmjene te energije između pojedinih energetskih spremnika energije. Realni elektroenergetski sustavi reagiraju na idealne ili vrlo dobre aproksimacije odskočne pobude s prenaponima konačnog trajanja zato što posjeduju inerciju (preslika određenih vremenskih konstanti sustava). Realne fizičke komponente EES zbog svoje prirode i zbog fizikalnih zakona ne mogu trenutačno odreagirati na veliku količinu energije koja putem vanjskih ili unutrašnjih poremećaja i kvarova naglo uleti u sustav. Stabilni elektroenergetski sustavi tako su konstruirani da nagle promjene energije nakon nekog vremena prestanu a elektromagnetski spremnici energije se ustale na novim većim ili manjim razinama energije pohranjenima u sebi. Na izlaznom dijelu prenapona to se vidi kao stacionarno ustaljeno stanje.

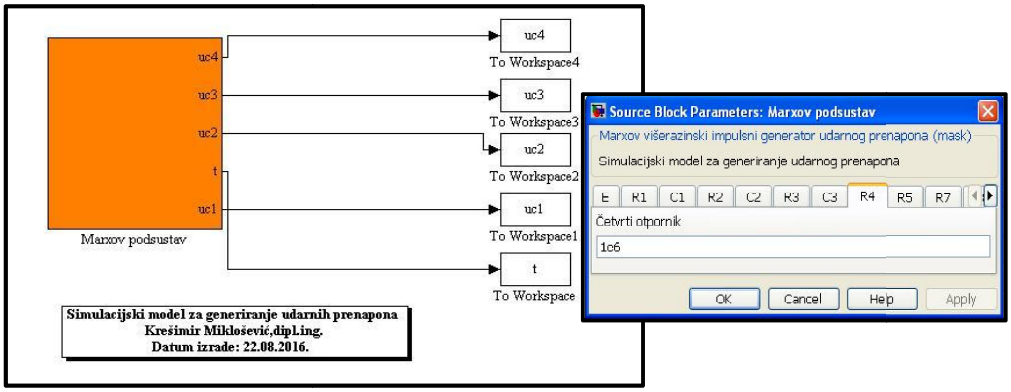
Pojedini pokazatelji vrste i oblika prenapona, poput vremena porasta, vremena prvog maksimuma, vremena ulaska u područje malene širine oko stacionarnog stanja, faktora

izobličenja signala prenapona, postotnog iznosa nadvišenja (faktora prenapona) u odnosu na pogonski napon prihvaćeni su kao standardni pokazatelji. Više o izračunu takvih pokazatelja može se pronaći u [47]. Simulacijski model Marxovog generatora udarnih impulsa prikazuje slika 2.12.



Slika 2.12. Simulacijski model za generiranje udarnih prenapona

No, osim toga smatrajući da se dielektrična konstanta iskrišta može prikazati idealnim prekidačem određenog prigušnog otpora i induktiviteta u nastavku će biti simulirani različiti oblici udarnih prenapona *u(t)* uz poznate karakteristične parametre udarnog generatora.



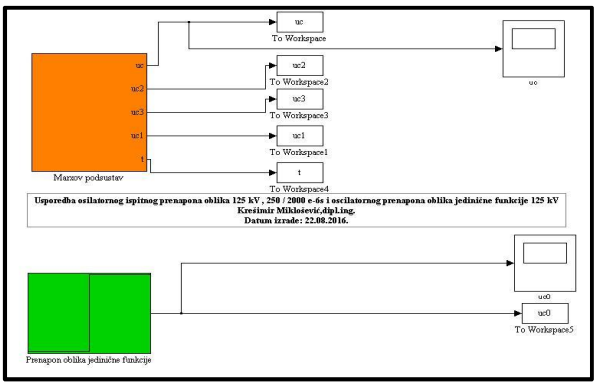
Slika 2.13. Simulacijski podsustav za generiranje udarnih sklopnih prenapona

Korišteni parametri za generiranje impulsnog i oscilatornog prenapona su prikazani u tablici 2.4. Model prikazan na slici 2.12. korišten je za simulaciju različitih slučajeva kao što je utjecaj trenutka prorade iskrišta, utjecaj promjene probojne čvrstoće dielektrika i utjecaj promjene visine ulaznog visokonaponskog istosmjernog napona.

Tablica 2.4. Karakteristični parametri udarnog generatora za dobivanje impulsnog prenapona 75 kV, 1,2 / 50 μs i oscilatornog prenapona 125 kV, 250 / 2000 μs

R.br.	Naziv parametra	Oznaka	Parametri - I	Parametri - O
	Impulsni generator			
1.	Unutarnji otpor prvog stupnja	R_1	1 kΩ	8 kΩ
2.	Unutarnji otpor prvog stupnja	R_2	1 kΩ	9 kΩ
3.	Unutarnji otpor drugog stupnja	R_3	1 kΩ	10 kΩ
4.	Unutarnji otpor drugog stupnja	R_4	1 kΩ	10 kΩ
5.	Unutarnji otpor trećeg stupnja	R_5	1 kΩ	1 kΩ
6.	Unutarnji otpor trećeg stupnja	R_6	385 Ω	345 Ω
7.	Unutarnji otpor četvrtog stupnja	R_7	385 Ω	355 Ω
8.	Unutarnji kapacitet prvog stupnja	C_1	0,3 μF	16,5 μF
9.	Unutarnji kapacitet drugog stupnja	C_2	0,3 μF	16,5 μF
10.	Unutarnji kapacitet trećeg stupnja	C_3	0,3 μF	16,5 μF
11.	Unutarnji kapacitet četvrtog stupnja	C	0,0035 μF	0,505 μF
12.	Prigušni otpor iskrišta	R_s	1 MΩ	1 MΩ
13.	Prigušni kapacitet iskrišta	C_s	beskonačan	beskonačan
14.	Unutarnji otpor iskrišta	R_{on}	0,01 Ω	0,01 Ω
15.	Visokonaponski istosmjerni izvor	E	30 kV	60 kV

Štoviše, simulacijski model prikazan na slici 2.14. korišten je za analizu različitih utjecaja na visinu i karakteristiku sklopnog prenapona. U nastavku su uvjetovano simulirana sva četiri analizirana slučaja sklopnog prenapona te su pokazatelji određeni grafo - analitičkom metodom prikazani u tablici 2.5. Naravno, odzivi karakterističnih signala i usporedba sa jediničnom skokovitom funkcijom prikazana je na slici 2.15. i 2.16.

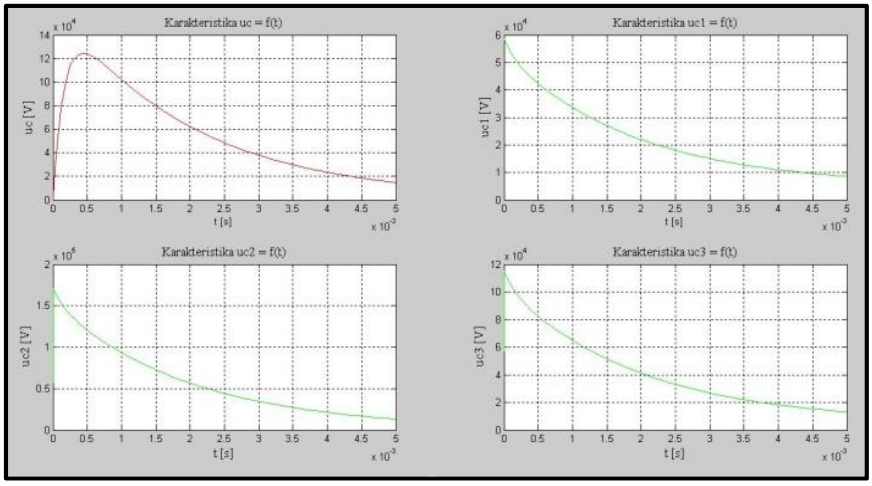


Slika 2.14. Grafičko sučelje ispitnog prenapona 125 kV, 250 / 2000 μs i ispitnog prenapona oblika jedinične funkcije 125 kV

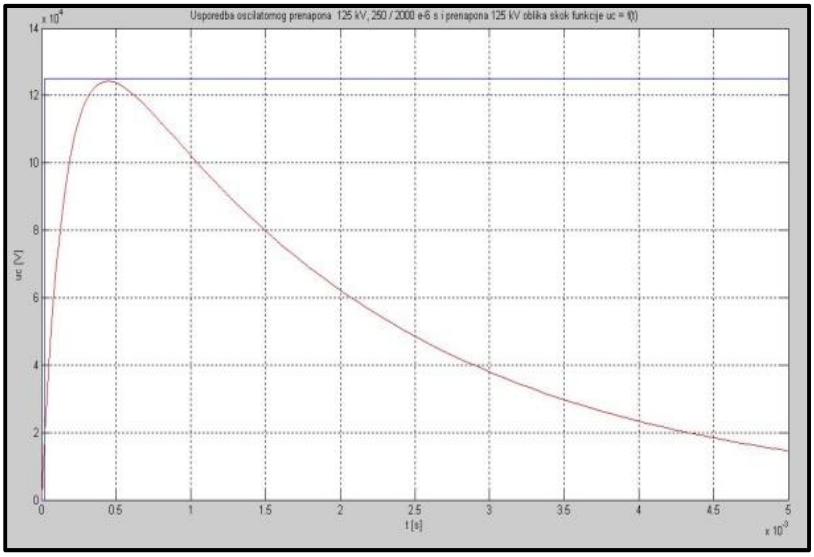
Tako tablica 2.5 prikazuje pokazatelje sklopnoga prenapona uz uvjet jednakih trenutaka prorade iskrišta i maksimalne tjemene vrijednosti prenapona.

Tablica 2.5. Simulacijski pokazatelji sklopnoga prenapona uz uvjet jednakih sinkronih trenutaka prorade iskrišta i maksimalne tjemene vrijednosti prenapona

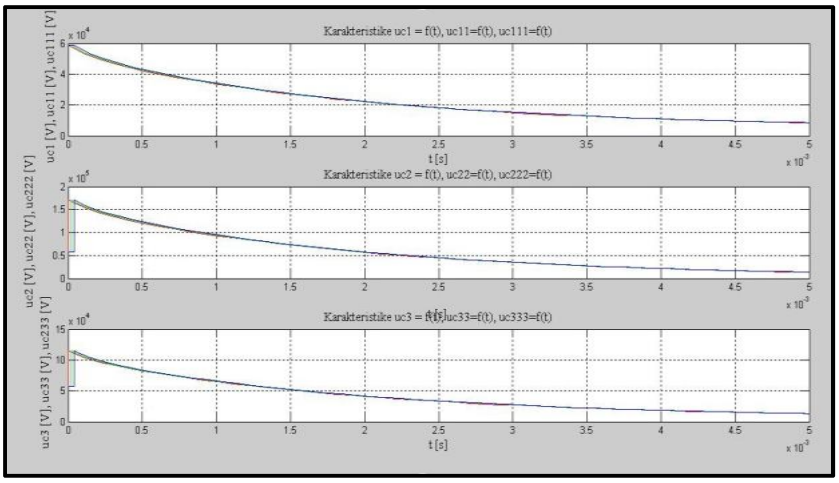
Slučaj	$t_1 = t_2 = t_3$	E	U_m	T_{cr}	T_2	T_d
	[μs]	[kV]	[kV]	[μs]	[μs]	[μs]
1.	0	U_m	125	248,23	1991,82	541,68
2.	20	U_m	125	267,83	2011,48	542,28
3.	40	U_m	125	287,84	2031,51	542,24



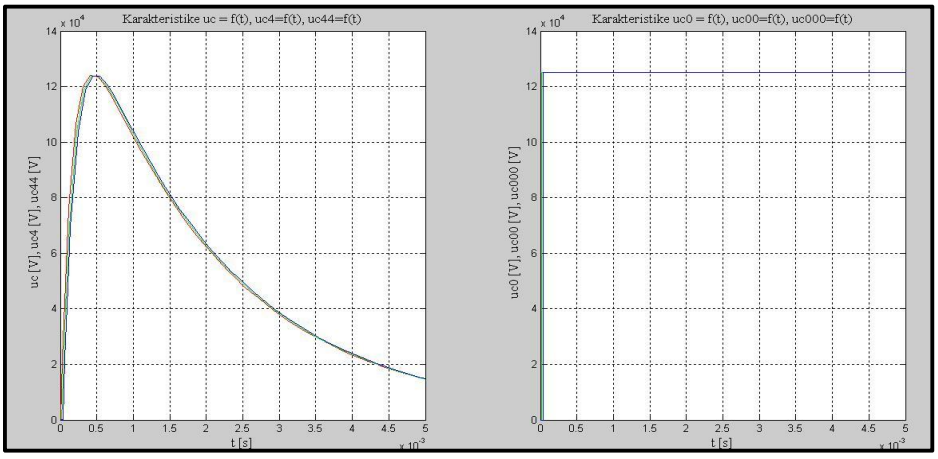
Slika 2.15. Karakteristični vremenski odzivi prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ i posljednjeg $u_c(t)$ stupnja sklopnog generatora uz uvjet jednakog trenutka prorade iskrišta i maksimalne tjemene vrijednosti prenapona U_m



Slika 2.16. Usporedba sklopnog prenapona $u_c(t)$ 125 kV, 250 / 2000 μs i prenapona $u_0(t)$ 125 kV oblika skokovite funkcije



Slika 2.17. Usporedba karakterističnih vremenskih odziva prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ stupnja sklopnog generatora uz uvjet različitih trenutaka sinkrone prorade iskrišta i maksimalne tjemene vrijednosti prenapona U_m

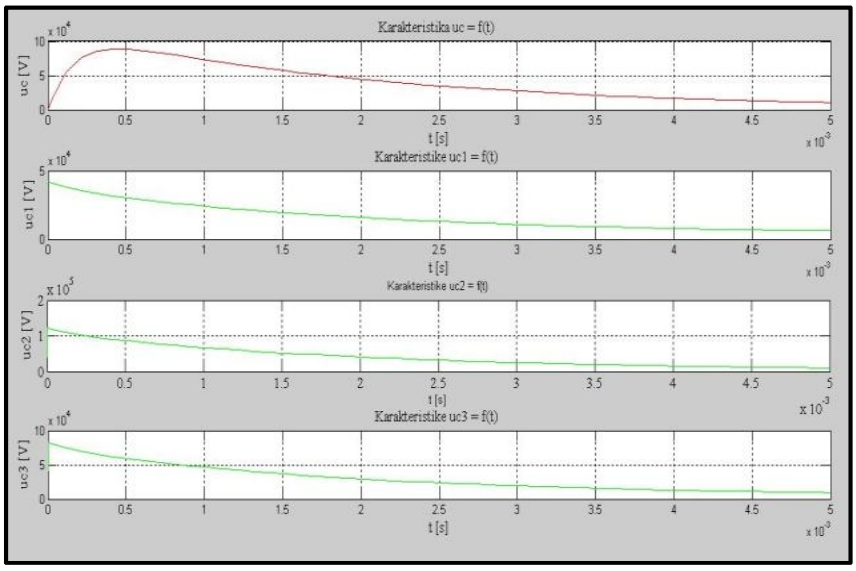


Slika 2.18. Usporedba generiranog sklopnog prenapona $u_c(t)$ s referentnom funkcijom $u_0(t)$ uz uvjet različitih trenutaka sinkrone prorade iskrišta i maksimalne tjemene vrijednosti prenapona U_m

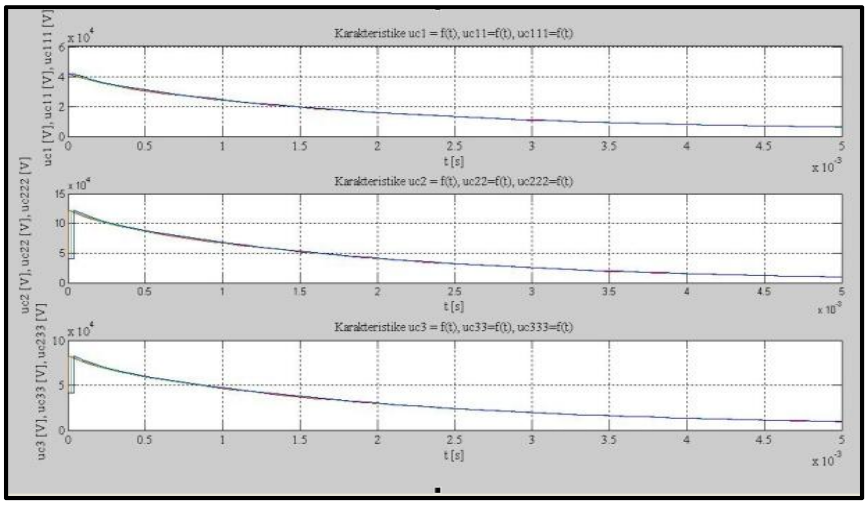
Tablica 2.6. Simulacijski pokazatelji prenapona uz uvjet sinkronih trenutaka prorade iskrišta i 75 % tjemene vrijednosti prenapona

Slučaj	$t_1 = t_2 = t_3$	E	U_m	T_{cr}	T_2	T_d
	[μs]	[kV]	[kV]	[μs]	[μs]	[μs]
1.	0	$0{,}75 \times U_m$	93,75	253,59	2005,15	550,52
2.	20	$0{,}75 \times U_m$	93,75	274,66	2024,95	549,57
3.	40	$0{,}75 \times U_m$	93,75	294,68	2044,95	549,75

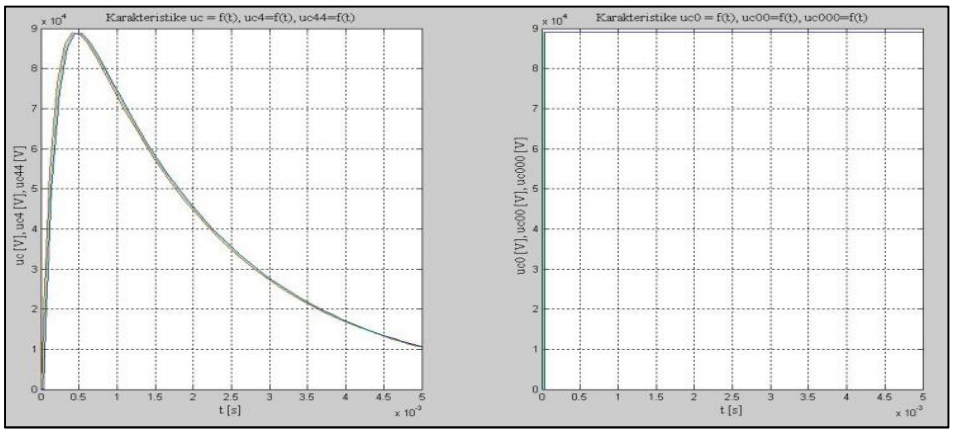
Slika 2.19. Usporedba sklopnog prenapona $u_c\ (t)$ 93,75 kV, 250 / 2000 μs i prenapona $u_0(t)$ 93,75 kV oblika skokovite funkcije



Slika 2.20. Karakteristični vremenski odzivi prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ i posljednjeg $u_c(t)$ stupnja sklopnog generatora uz uvjet sinkronog trenutka prorade iskrišta i 75 % tjemene vrijednosti prenapona U_m



Slika 2.21. Usporedba karakterističnih vremenskih odziva prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ stupnja sklopnog generatora uz uvjet različitih trenutaka prorade iskrišta i 75 % tjemene vrijednosti prenapona U_m

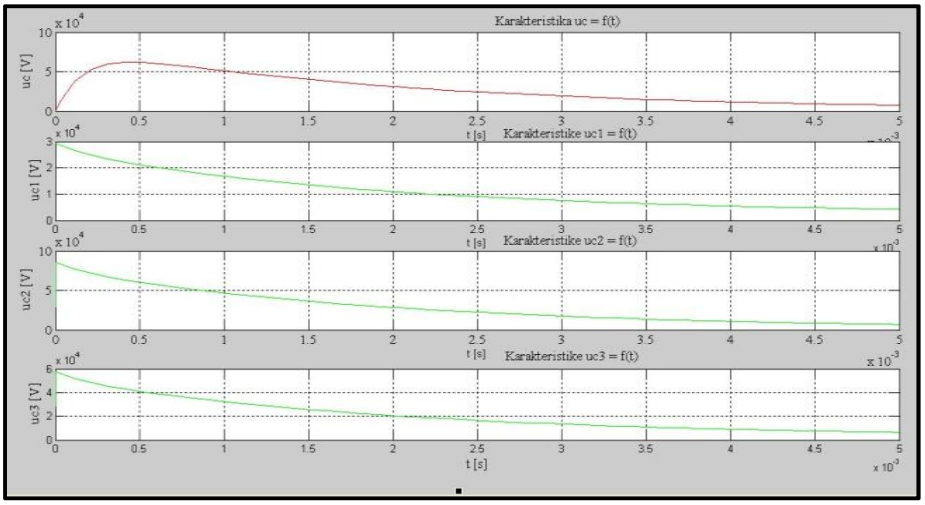


Slika 2.22. Usporedba generiranog sklopnog prenapona $u_c(t)$ s referentnom funkcijom $u_0(t)$ uz uvjet različitih trenutaka sinkrone prorade iskrišta i 75 % tjemene vrijednosti prenapona U_m.

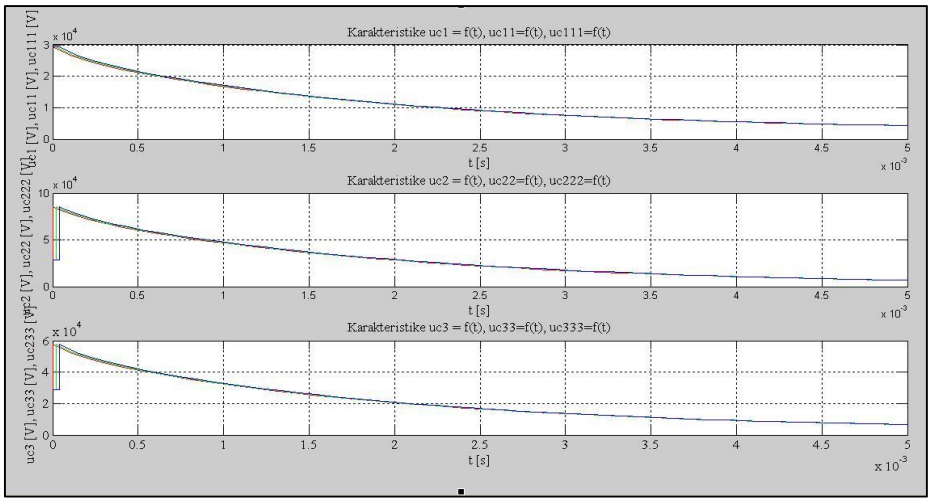
Tablica 2.7. Simulacijski parametri prenapona uz uvjet jednakih sinkronih trenutaka prorade iskrišta i 50 % tjemene vrijednosti prenapona

Slučaj	$t_1 = t_2 = t_3$	E	U_m	T_{cr}	T_2	T_d
	[μs]	[kV]	[kV]	[μs]	[μs]	[μs]
1.	0	$0{,}5\times U_m$	62,5	259,08	1992,15	529,77
2.	20	$0{,}5\times U_m$	62,5	279,52	2011,91	529,55
3.	40	$0{,}5\times U_m$	62,5	299,52	2031,91	529,55

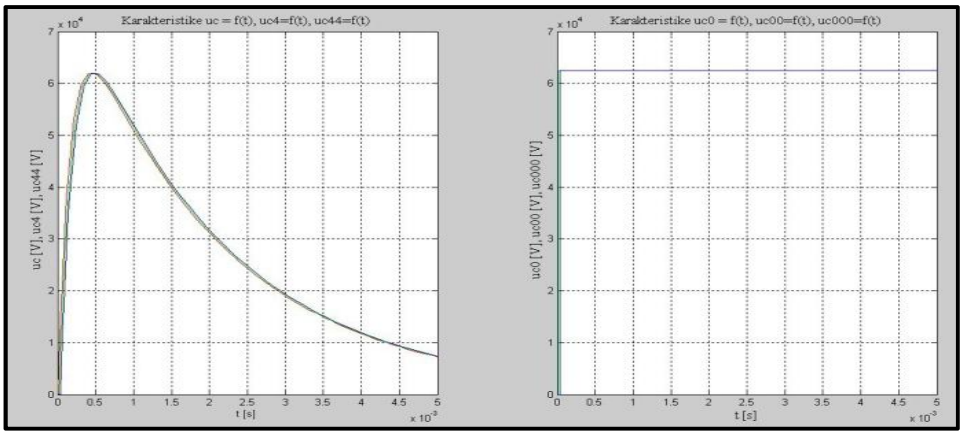
Slika 2.23. Usporedba sklopnog prenapona $u_c\ (t)$ 62,5 kV, 250 / 2000 µs i prenapona $u_0(t)$ 62,5 kV oblika skokovite funkcije



Slika 2.24. Karakteristični vremenski odzivi prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ i posljednjeg $u_c(t)$ stupnja sinkronog generatora uz uvjet sinkronog trenutka prorade iskrišta i 50 % tjemene vrijednosti prenapona U_m



Slika 2.25. Karakteristični vremenski odzivi prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$ i trećeg $u_{c3}(t)$ stupnja sinkronog generatora uz uvjet sinkronog trenutka prorade iskrišta i 50 % tjemene vrijednosti prenapona U_m

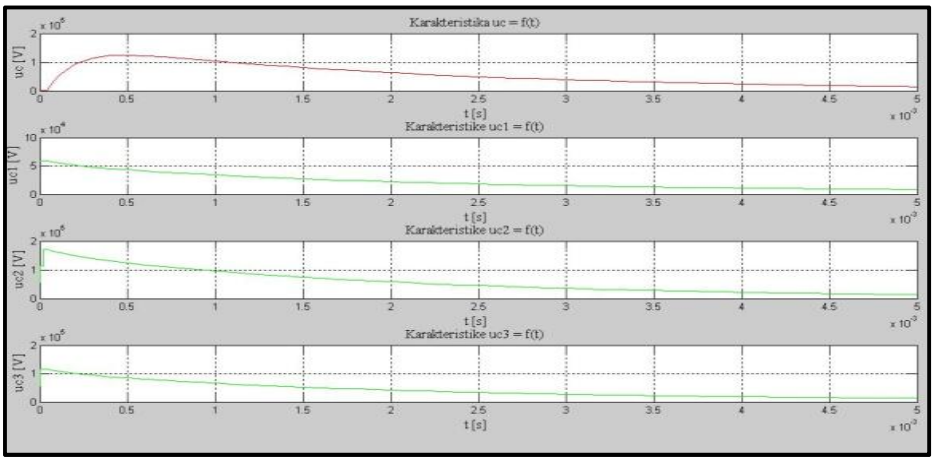


Slika 2.26. Usporedba generiranog sklopnog prenapona $u_c(t)$ s referentnom funkcijom $u_0(t)$ uz uvjet različitih trenutaka sinkrone prorade iskrišta i 50 % tjemene vrijednosti prenapona U_m

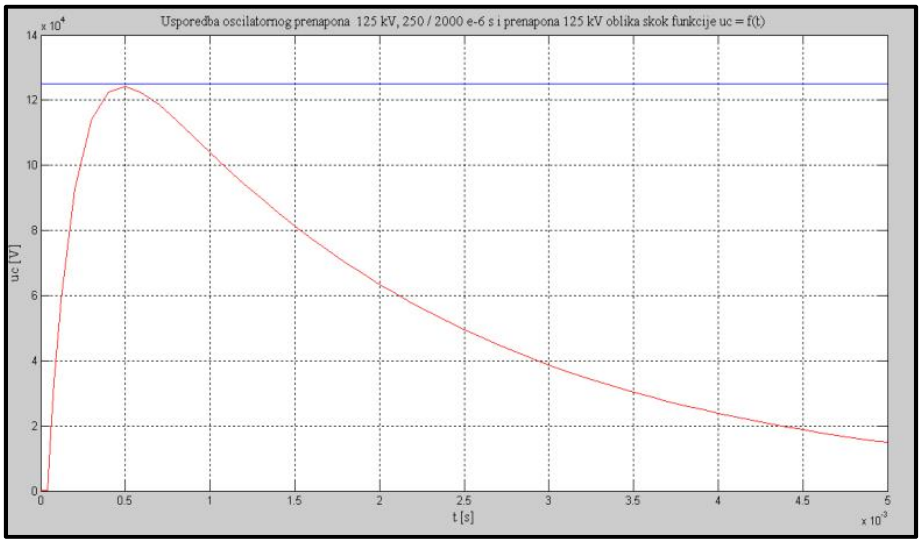
Nadalje, simulacijski model prikazan na slici 2.13. korišten je za analizu utjecaja asinkrone prorade iskrišta na visinu i karakteristiku sklopnoga prenapona. U nastavku su uvjetovano simulirana sva četiri analizirana slučaja prenapona te su pokazatelji određeni grafo - analitičkom metodom prikazani u tablicama. Naravno, usporedba s jediničnom skokovitom funkcijom prikazana je na slici 2.28.

Tablica 2.8. Simulacijski pokazatelji prenapona uz uvjet asinkrone prorade iskrišta i 100 % tjemene vrijednosti prenapona

Slučaj	t_1	t_2	t_3	E	U_m	T_{cr}	T_2	T_d
	[μs]	[μs]	[μs]	[kV]	[kV]	[μs]	[μs]	[μs]
1.	0	20	40	U_m	124	292,55	2031,32	534,80
2.	20	40	0	U_m	124	290,20	2031,42	538,31
3.	40	0	20	U_m	124	292,29	2030,51	534,69



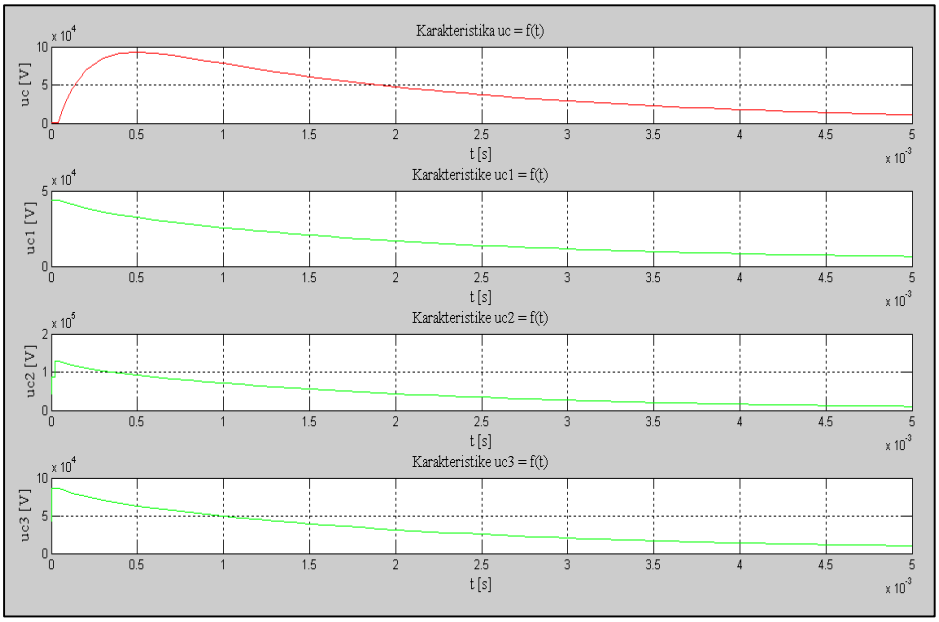
Slika 2.27. Karakteristični vremenski odzivi prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ i posljednjeg $u_c(t)$ stupnja sinkronog generatora uz uvjet asinkronog trenutka prorade iskrišta i 100 % tjemene vrijednosti prenapona U_m



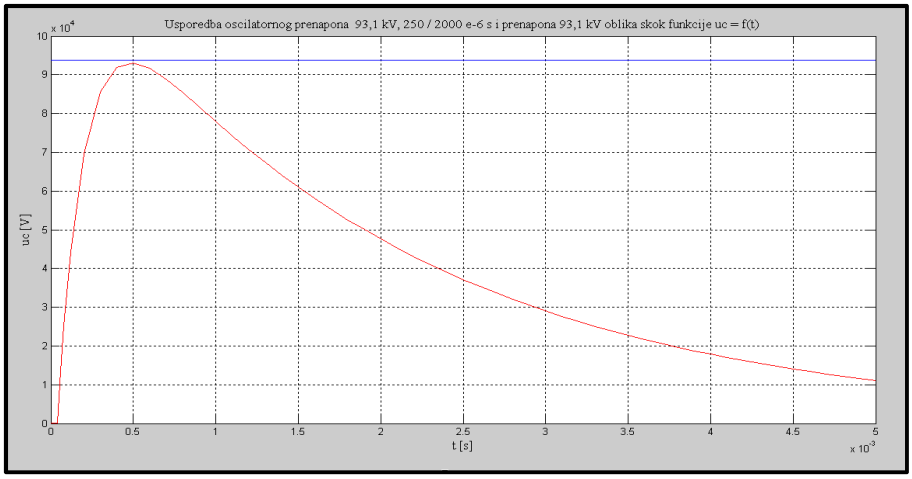
Slika 2.28. Usporedba sklopnog prenapona $u_c(t)$ 125 kV, 250 / 2000 μs i prenapona $u_0(t)$ 125 kV oblika skokovite funkcije

Tablica 2.9. Simulacijski pokazatelji prenapona uz uvjet asinkrone prorade iskrišta i 75 % tjemene vrijednosti prenapona

Slučaj	t_1	t_2	t_3	E	U_m	T_{cr}	T_2	T_d
	[μs]	[μs]	[μs]	[kV]	[kV]	[μs]	[μs]	[μs]
1.	0	20	40	$0{,}75\times U_m$	93,1	292,55	2045,20	535,08
2.	20	40	0	$0{,}75\times U_m$	93,2	290,17	2045,40	538,34
3.	40	0	20	$0{,}75\times U_m$	93,1	292,29	2045,51	534,68



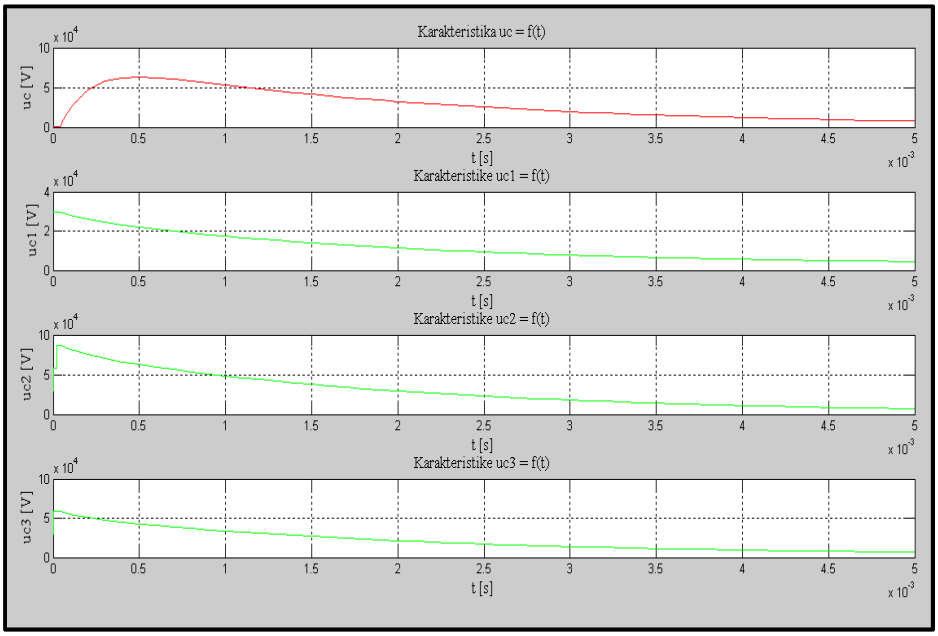
Slika 2.29. Karakteristični vremenski odzivi prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ i posljednjeg $u_c(t)$ stupnja sklopnog generatora uz uvjet asinkronog trenutka prorade iskrišta i 75 % tjemene vrijednosti prenapona U_m



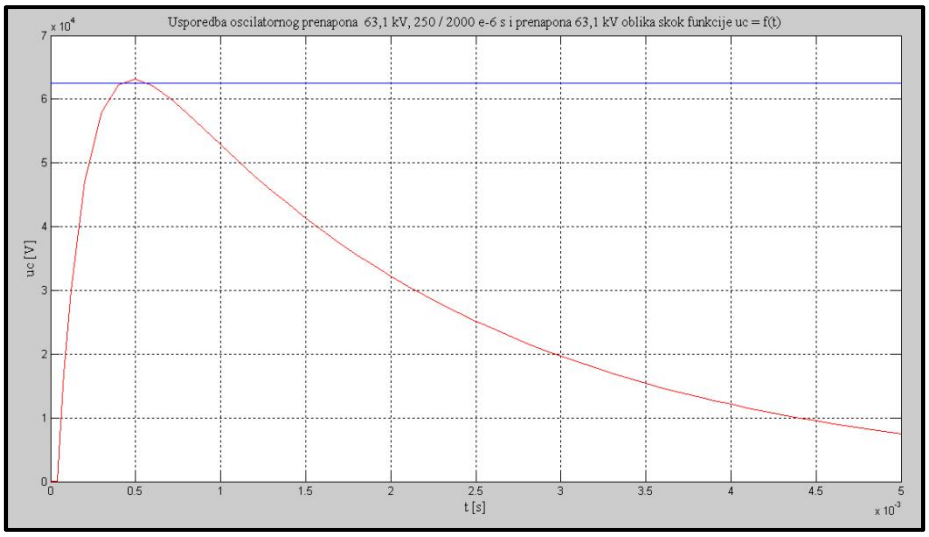
Slika 2.30. Usporedba sklopnog prenapona $u_c(t)$ 93,1 kV, 250 / 2000 μs i prenapona $u_0(t)$ 93,1 kV oblika skokovite funkcije

Tablica 2.10. Simulacijski pokazatelji prenapona uz uvjet asinkrone prorade iskrišta i 50 % maksimalne tjemene vrijednosti prenapona

Slučaj	t_1	t_2	t_3	E	U_m	T_{cr}	T_2	T_d
	[μs]	[μs]	[μs]	[kV]	[kV]	[μs]	[μs]	[μs]
1.	0	20	40	$0{,}5\times U_m$	63,1	288,91	2045,20	554,64
2.	20	40	0	$0{,}5\times U_m$	63,1	286,45	2045,50	557,96
3.	40	0	20	$0{,}5\times U_m$	63,1	288,63	2044,60	554,29



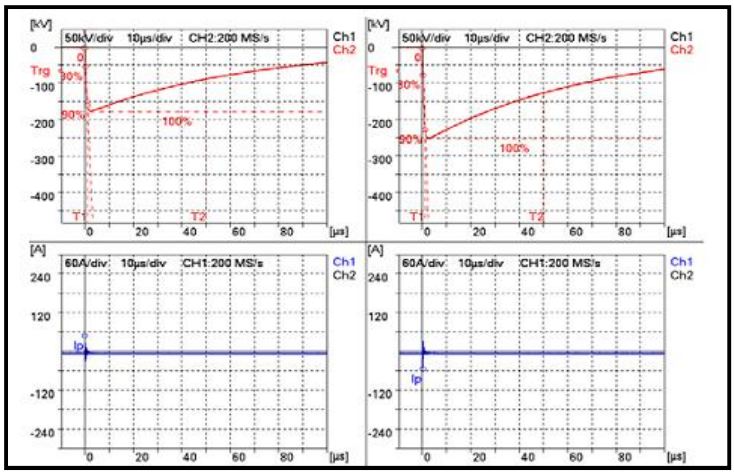
Slika 2.31. Karakteristični vremenski odzivi prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ i posljednjeg $u_c(t)$ stupnja sinkronog generatora uz uvjet asinkronog trenutka prorade iskrišta i 50 % tjemene vrijednosti prenapona U_m



Slika 2.32. Usporedba sklopnog prenapona $u_c\ (t)$ 63,1 kV, 250 / 2000 μs i prenapona $u_0(t)$ 63,1 kV oblika skokovite funkcije

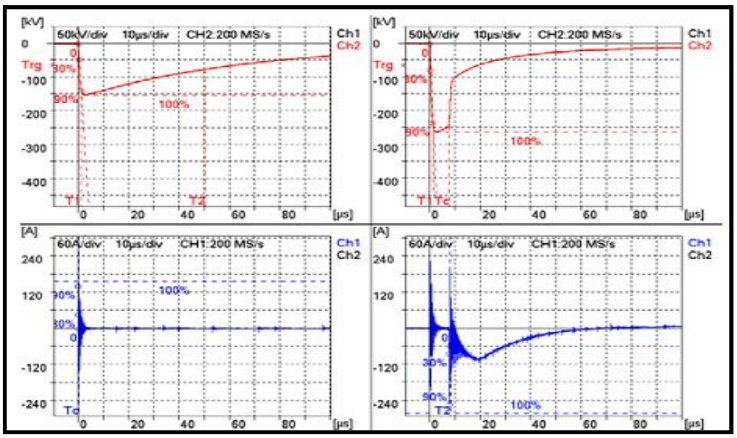
Prema tome simulirani pokazatelji testnog sklopnog prenapona ovise o trenutku nastajanja prenapona, o načinu uklopa energetskih elemenata i o vrijednosti energetskog izvora. Po svemu sudeći, kod sinkronog uklapanja što je maksimalna tjemena vrijednost prenapona manja to se čelo vala prenapona sporije uspinje, dok hrbat prenapona duže traje. Dakako da je trajanje prvog čela sklopnog prenapona duže. Nasuprot tome, kod asinkronog uklapanja što je maksimalna tjemena vrijednost prenapona manja imamo još duže uspinjanje, a time i duže trajanje sklopnog prenapona. Trajanje prvog čela sklopnog prenapona je nešto duže. U nastavku će se navedeni simulacijski model koristiti za analizu početne raspodjele sklopnog prenapona uzduž namota energetskog transformatora.

Eksperimentalna ispitivanja ukazuju i na to da ukoliko dođe do značajnih promjena amplitude i frekvencije sklopnog prenapona dolazi i do proboja na ispitivanom namotu energetskog transformatora i to najčešće prema zemlji. Struje se mogu smanjiti ili povećati, a upravo ti smjerovi promjena mogu prema [47] odrediti prirodu i mjesto kvara. Značajno povećanje struje koje se vidno manifestira kroz promjenu frekvencije dokazuje da je došlo do kvara u ispitivanom namotu energetskog transformatora. U suprotnom nagovještava kvar između ispitivanog i susjednog namota ili zemlje. U nastavku će prema [47] biti prikazana dva primjera oscilograma gdje se to može vidjeti.



a) b)

Slika 2.33. Primjer idealnog naponskog prenapona i struje odvoda pri a) sniženom i b) punom naponu [47]



a)

b)

Slika 2.34. Primjer proboja izolacije od epoksidne smole između namota energetskog transformatora snage 250 kVA gdje je a) sklopni prenapon i b) strujni odvod [47]

2.3. Primjeri slučajeva pojave prijelaznih prenapona

Kako je jedan od dodatnih ciljeva doktorske disertacije produbljenje teorijskih spoznaja o sklopnim prijelaznim prenaponima u ovom podpoglavlju će biti detaljnije opisani i citirani neki istraživani primjeri koji do sada nisu istaknuti, a imaju za svrhu iznjedriti popis učinkovitijih tehnika i metoda za obradu sklopnih prijelaznih prenapona. Ovdje treba istaknuti koje tehnike i metode za izdvajanje odgovarajućih korisnih uzoraka prenaponskih signala daju vrijedne povratne informacije te koje su po svemu sudeći idejno i konceptualno obrađene znanstveno prihvatljivim metodama uz uvažavanje određenih ograničenja [11].

Sklopni prenaponi temeljeni na obliku prenapona se prema [11] mogu klasificirati na oscilatorne i impulsne prenapone. Prema tome prijelazni prenaponi se mogu kategorizirati

prema obliku prenapona i analiziranim slučajevima pojava prenapona prema tablici 2.11. i 2.12.

Tablica 2.11. Primjer klasifikacije prema dostupnim analiziranim slučajevima

Klasifikacija prema obliku prenapona	Klasifikacija prema slučajevima
Impulsni prijelazni prenaponi	Atmosfersko pražnjenje
Oscilatorni prijelazni prenaponi	Uklop kondenzatora Uklop dalekovoda ili kabela Automatski ponovni uklop kondenzatora
Višestruki kombinirani prenaponi	Trenutno rezanje struje Višestruka ograničenja Ponavljanje sklopnih operacija

Tablica 2.12. Relativna usporedba slučajeva pojavnosti sklopnog prenapona s visinom faktora prenapona

Slučajevi pojava prijelaznih prenapona izazvani manipulacijom prekidača	Faktor prenapona [-]
Uklop kraćih dalekovoda u praznom hodu	1,5 – 1,8
Uklop dugih dalekovoda u praznom hodu	1,0 – 2,0
Automatski ponovni uklop dalekovoda u praznom hodu	3,5 – 4,0
Isklop dalekovoda u praznom hodu	1,5 – 1,8
Isklop transformatora u praznom hodu	2,0 – 5,0
Isklop transformatora opterećenog prigušnicom	1,8 – 4,6
Isklop motora u praznom hodu	2,0 – 5,0
Isklop motora u fazi zaleta	2,2 – 5,2
Isklop kondenzatora	1,5 – 2,5
Isklop jednofaznog kratkog spoja	1,5 – 1,7
Isklop dvofaznog kratkog spoja	1,5 – 1,7
Prolazni kvar	1,4 – 1,8

Sklopni prenaponi predstavljaju samo jedan oblik unutarnjih prenapona koji mogu proizvesti promjene u operativnom upravljanju pogonom elektroenergetskog sustava. Kao što se dosad vidjelo postoji značajan broj istraživanih slučajeva koji mogu generirati sklopni prenapon bilo da se radi o prijenosnim ili distributivnim mrežama. Prekidanje struje sklopnim operacijama na električnim krugovima koji imaju induktivitet ili kapacitet mogu rezultirati pojavom oscilatornog prenapona. Kao što se vidi u tablici 2.12. faktor prenapona iskazan je preko raspona vrijednosti. Trenutna vrijednost sklopnog prenapona ovisi o trenutku uklopa prekidača. Iz toga razloga želi li se proračunati iznos prenapona u određenom trenutku potrebno je u konačni izraz za prijelazni prenapon uzeti u obzir trenutak uklopa prekidača.

Dapače, prijelazni prenaponi se mogu kategorizirati prema izvoru nastanka oscilatornog prenapona i frekvencijskom rasponu pojavnosti istog prema tablici 2.13.

Tablica 2.13. Relativna usporedba izvora pojavnosti sklopnog prenapona s frekvencijskim rasponom

Slučajevi pojava prijelaznih prenapona izazvani manipulacijom prekidača	Frekvencijski raspon
Uključenje energetskog transformatora	0,1 Hz – 1 kHz
Ferorezonancija	0,1 Hz – 1 kHz
Rasterećenje energetskog transformatora	0,1 Hz – 3 kHz
Uklop voda	50 Hz – 20 kHz
Isklop kvara	50 Hz – 3 kHz
Početak kvara	50 Hz – 20 kHz
Automatski ponovni uklop voda	50 Hz – 20 kHz
Višestruko uklapanje prekidača	10 kHz – 1 MHz
Udari groma u rasklopno postrojenje	10 kHz – 3 MHz
Uklapanje rastavljačem	100 kHz – 50 MHz

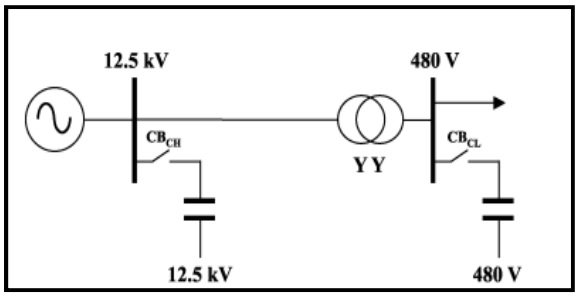
Uklapanje različitih energetskih prekidača unutar elektroenergetskog sustava mogu proizvesti oscilatorne prenapone čije maksimalne tjemene vrijednosti ovise o nekoliko faktora kao što su konfiguracija energetske mreže odnosno stanja energetskog prekidača na strani izvora i kratkotrajno povećanje naboja i energije tijekom sklopne operacije na strani potrošača. Iz toga razloga sklopni slučajevi koji se istražuju služe da se ustanovi maksimalna tjemena vrijednost oscilatornog prenapona. U nastavku će biti izdvojena i prikazana tri primjera prema [8], [11], [16], [48], [49]. Prema navedenim izvorima uklapanje kapacitivnih struja podrazumijeva slučajeve kao što su uklop i isklop energetskog kondenzatora, rasterećenje dugih energetskih vodova i kabela. Podrazumijeva injektiranje kapacitivne struje u trenutku pojave maksimalne tjemene vrijednosti prenapona. Sa druge strane isklapanje induktivnih struja podrazumijeva slučajeve kao što su isključenje transformatora u praznom hodu, opterećene realnim teretom, isključenje elektromotora u praznom hodu i isključenje motora u fazi zaleta. Prema prethodno navedenim izvorima, kada se prekidaju male induktivne struje koriste se prekidači sa nezavisnom karakteristikom koji mogu prekinuti električni luk i prije nego što struja prođe kroz nulu. Energetski prekidači sa zavisnom karakteristikom nemaju to svojstvo. Dielektrična čvrstoća predstavlja značajnu osobinu prekidača. Posljedica sporog uspostavljanja dielektrične čvrstoće dovodi do ponovnog paljenja električnog luka. Više o utjecaju paljenja električnog luka i konstrukciji modernih prekidača može se pročitati u izvorima [50], [51], [52], [53]. Kontrolirano sklapanje struje dolazi do izražaja prilikom sklapanja induktivnih i kapacitivnih struja koje je detaljno prikazano u [53]. SF_6 moderni prekidači opremljeni su elektroničkim kontrolnim modulom. Na temelju informacija s različitih integriranih senzora kontrolni modul konvertira sirovi

signal u signal za kontrolirano sklapanje. To je postignuto odgovarajućim vremenom kašnjenja koje se određuje na temelju podataka o trenutnoj vrijednosti napona na obje strane prekidača, struji kroz prekidač i vremenu mehaničke operacije. Dodatni parametri kao što su temperatura okoline, upravljački napon i tlak plina su također uključeni u izračun. Sklopni prenaponi čiji su izvori neželjeni jednofazni kratki spojevi mogu se smanjiti reduciranjem omjera pripadnih induktiviteta. Asimetrija napona kod ovog tipa kvara je naročito izražena.

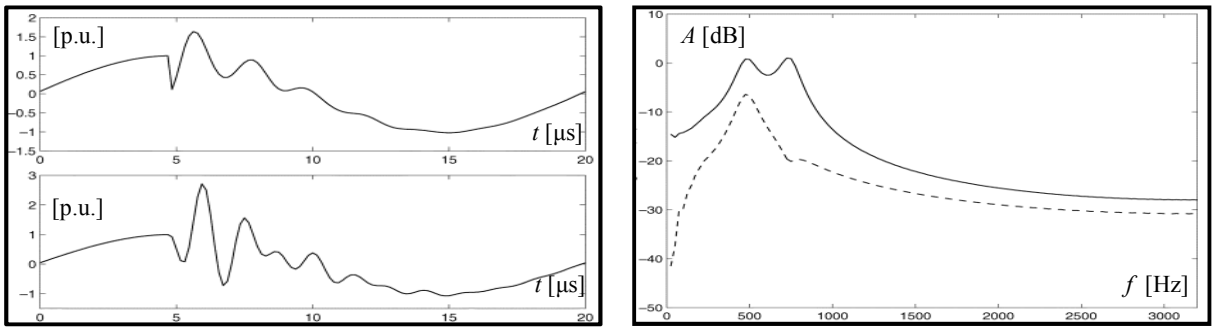
Privremeni prenaponi kao što smo prethodno rekli traju duže od prijelaznih. Klasifikacija privremenih prenapona je nešto drugačija od prijelaznih prenapona. Neke od najznačajnijih slučajeva koji se istražuju i gdje se privremeni prenaponi pojavljuju su kod relativno dugih energetskih vodova, kod odbacivanja velikih induktivnih tereta, uključenja transformatora velikih snaga te kvarova prema zemlji. U slučajevima dugačkih prijenosnih vodova veliki induktivni tereti se trenutno isključuju, generator ubrzava, a napon na sabirnici značajno poraste što dovodi do odbacivanja velikih induktivnih tereta. Više o tome može se pročitati u [54].

2.3.1. Uklop energetskog kondenzatora

Tipični primjer i izvor oscilatornog prenapona predstavlja uklop energetskog kondenzatora. Frekvenciju oscilatornog prenapona određuje kapacitet samog kondenzatora i induktivitet kruga. Prema [11] i [8] uključivanje kondenzatora odgovarajućeg kapaciteta može proizvesti povećanje ili smanjenje oscilatornog prenapona. U [11] je simuliran i modeliran primjer uklopa kondenzatora na 12,5 kV visokonaponsku sabirnicu u situaciji kada je fiksni kondenzator priključen na NN sabirnicu. Vod je modeliran elementima sa koncentriranim parametrima čime se anulira njihov utjecaj na prolazni prenapon. Primarni kondenzator snage je 2,5 MVAr dok je sekundarni snage 170 kVAr. Rezultati dobivenih oscilatornih prenapona na VN i NN sabirnici su preuzeti iz [11] te prikazani na slici 25. Maksimalna tjemena vrijednost na NN sabirnici je dosegla 2,5 p.u. Slika 25. prikazuje spektar prijelaznog prenapona. Prijelazni prenapon doseže svoju maksimalnu tjemenu vrijednost pri 450 Hz. Spektralnom analizom prema slici 25. može se vidjeti pojava dva vrha. Jedan se pojavljuje pri 450 Hz a drugi pri 700 Hz. Njihove amplitude su relativno jednake. Kao što je prikazano u [55] prisutnost sekundarnog kondenzatora uz primarni tijekom uklopa generira prijelazni prenapon koji je kombinacija dvije frekvencije prouzročene uklopom oba kondenzatora svaki sa svojom frekvencijom. U navedenom izvoru može se također vidjeti da nastaju i ferorezonantne frekvencije ukoliko dođe do uklopa i tercijarnih kondenzatora.



Slika 2.35. Sustav za simulaciju promjene napona tijekom uklopa kondenzatora [11]

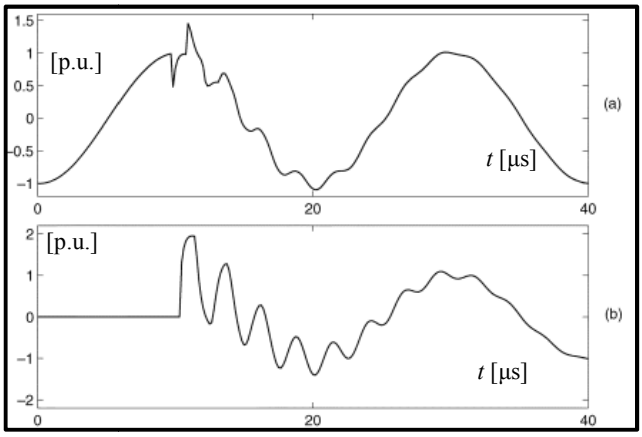


Slika 2.36. Dijagrami sklopnog prenapona u p.u. i frekvencijskog spektra u dB prijelaznog prenapona tijekom uklopa kondenzatora [11]

Ukoliko se sekundarnom kapacitetu smanji vrijednost na 40 kVAr i izvrši uklapanje primarnoga kapaciteta na VN sabirnici moguće je i smanjenje tjemene vrijednosti sklopnog prenapona [55]. Međutim, tada možda kompenzacija jalove energije nije zadovoljena.

2.3.2. Uklop energetskog voda

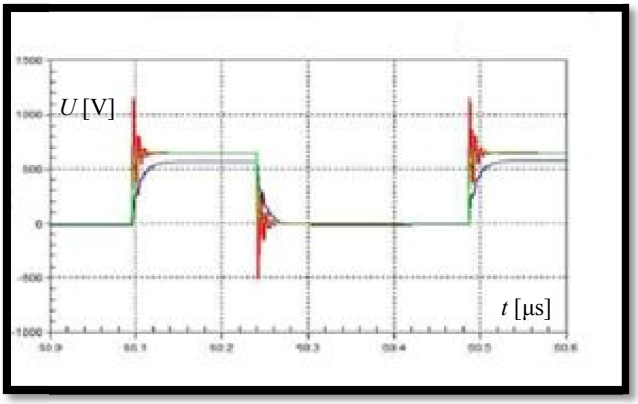
Ukoliko se prijenosni vod modelira pomoću kapaciteta sa koncentriranim parametrima [3] dobiju se karakteristične oscilacije kao kod uklopa kondenzatora na mrežu. Ovakav model zanemaruje početne oscilacije prenapona koji se pojavljuju u trenutku pojave prenapona. Slika 2.37. prikazuje oblik oscilatornog prenapona uzrokovanog uklopom 160 km dugog voda. Vidi se da je prenapon na početku voda na strani izvora iznosa 1.4 p.u., dok je na kraju voda 2.0 p.u.



Slika 2.37. Dijagram sklopnog prenapona tijekom uklopa voda iskazan u p.u., a) na strani izvora, b) na kraju voda [11]

2.3.3. Pokretanje električnih motora

Također u [32] i [56] vidi se na koji se način modelira, simulira, mjeri, identificira i estimira oscilatorni prenapon nastao kod pokretanja električnog motora uz uvjet asinkronog upravljanja uklopom prekidača. Prijelazno vrijeme je obično vrlo kratko, u rasponu od nekoliko mikrosekundi do par milisekundi. Prijelazni period sklopnog prenapona prilikom pokretanja električnog motora je nešto kraći zbog čega su elektroenergetske mrežne komponente izložene dodatnom prijelaznom naprezanju, ali u dozvoljenim granicama. Slika 2.38. prikazuje ogledni primjer sklopnog prenapona koji se javlja u trenutku pokretanja električnog motora. Dijagram prikazuje tri zasebna trenutka uklopa asinkronoga motora. Na y osi je izmjereni linijski napon *U* na priključnicama motora, dok je na x osi vrijeme *t* u mikrosekundama. U slučajevima sa različitim vrstama asinkronih motora dobivaju se oblikom slične sklopne karakteristike [56].



Slika 2.38. Dijagram sklopnog prenapona iskazan u voltima tijekom pokretanja električnog motora [32]

2.4. Proračuni prijelaznih prenapona

Iz dosada iznesenog može se tvrditi da je računalo dominantan, a time i najznačajniji uređaj za analiziranje i proračunavanje prenapona zbog svoje velike točnosti, brzine i jednostavnosti mijenjanja parametara testnog modela originalne mreže. Postoje mnoge metode za analizu elektromagnetskih prijelaznih prenapona kao što su Bewley lattice dijagram, Fourierova transformacija, analiza prijelaznih stanja elektroenergetske mreže (engl. *TNA – Transient Network Analysis*). Posebno područje zauzimaju elektromagnetski prijelazni programi.

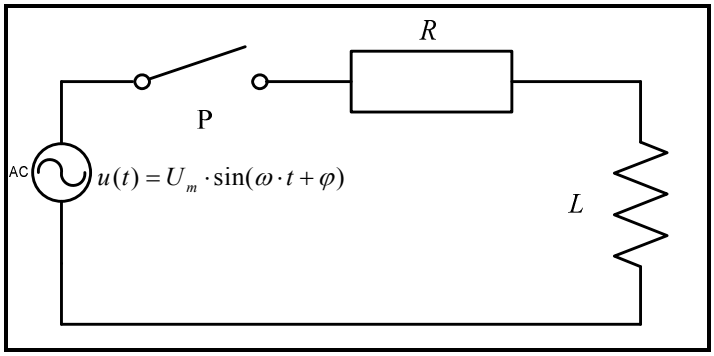
Bewley lattice dijagram je proračunska metoda koja prati promjene refleksije na vodu kada se pojavi poremećaj [57]. Primjena teorije refleksije omogućava detekciju prenapona u trenutku nastajanja. Najprikladnija je za primjenu u analiziranju prenapona na jednofaznim vodovima. Fourierova metoda se primjenjuje za analizu u frekvencijskoj domeni i za konverziju u vremensku domenu. Konačni rezultati su se pokazali točniji od Bewley lattice dijagrama. Nije prikladna za složenije energetske mreže. Mrežni simulatori se koriste za analizu prijelaznih pojava impulsnih i sklopnih prenapona koji se mogu pojaviti u rasklopnim postrojenjima. Dobiveni rezultati se mogu koristiti za određivanje i koordinaciju prikladnog oscilatornog prenapona potrebnog za zaštitu uređaja rasklopne podstanice. Upotrebom specijalnih elektromagnetskih prijelaznih programa mogu se simulirati rješenja za određivanje stabilnih stanja analizirane mreže na određeni poremećaj. Također je moguće simulirati prijelazne analize odabranih upravljačkih sustava (engl. *TACS – Transient Analysis of Control Systems*). Ovaj pristup omogućava na jednostavan način modifikacije i ponavljanje simulacije modela kontrolnog sustava ukoliko dođe do izmjene uređaja unutar rasklopnog postrojenja [57].

Sklopne studije koje uključuju korištenje navedenih metoda imaju ciljeve koje možemo klasificirati u dvije opće kategorije. Jedan od njih je projektiranje koji uključuje koordinaciju izolacije, odabir zaštitne opreme, specifikaciju zaštitinih uređaja i dizajn kontrolnih sustava. Drugi cilj je rješavanje operativnih problema kao što su neobjašnjivi zastoji ili kvarovi na opremi. Odabir zaštitne snage uređaja kojim se štiti energetski transformator zahtijeva temeljno razumijevanje vrsta i oblika prijelaznih prenapona.

Proračunavanje i određivanje oscilatornih prenapona analitičkom metodom je dosta složeno te će u nastavku biti prikazani i izdvojeni primjeri gdje se vidi složenost analitičkog pristupa analizi oscilatornog prenapona. Opisani analitički primjeri će biti korišteni za evaluaciju simulacijskog modela.

2.4.1. Uklop realne prigušnice

Na primjeru jednostavnog slučaja uklopa sinusoidalnog oblika napona na realnu prigušnicu pomoću idealnog prekidača može se vidjeti što se događa s prijelaznim prenaponom u trenutku uklopa prekidača. Pri tome idealni prekidač, ovisno o karakteristici električnog luka, može, ali i ne mora kao što je prikazano u [58] imati utjecaja na visoko frekvencijsku prijelaznu struju koja egzistira tijekom nestabilnosti električnog luka. Slika 2.39. prikazuje opisani primjer uklopa VN prekidača na kratku prijenosnu mrežu.



Slika 2.39. Uklop idealnog prekidača na *RL* krug

Naponu izvora *u(t)* odgovara prema slici 2.39. elektromotorna sila sinusnog valnog oblika:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \tag{2.3}$$

gdje φ predstavlja fazni kut ili trenutak uklopa idealnog prekidača, a ω prirodnu frekvenciju električnog kruga.

U želji da izračun diferencijalne jednadžbe po struji *i(t)* bude što jednostavniji jednadžba (2.3) se može drugačije zapisati.

$$u(t) = U_m \cdot \left[\sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\varphi) + \cos(\omega \cdot t) \cdot \sin(\varphi)\right] \tag{2.4}$$

Ukupni nadomjesni induktivitet električnoga kruga *L* predstavlja induktivitet generatora, odgovarajući induktivitet transformatora i prijenosnog voda. Ukupan otpor *R* predstavlja otpor električnog kruga. Ukoliko se analizirana mreža sastoji samo od linearnih elemenata, ukupnu struju kruga u trenutku uklopa jednoznačno određuje prijelazna struja i struja u stabilnom stanju. Primjenom Kirchhoffovih zakona za napone na promatrani krug

dobiva se nehomogena diferencijalna jednadžba čiji rezultat jednoznačno predstavlja električni krug nakon uklopa idealnog prekidača.

$$R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} = u(t) \tag{2.5}$$

gdje *i(t)* predstavlja varijablu stanja električnog kruga. Faktor snage kruga *cosφ* u stabilnom stanju ovisi o vrsti i iznosu tereta određuje se prema izrazu (2.6).

$$\cos\varphi = \frac{R}{L} = \frac{R}{\sqrt{\left(R^2 + \omega^2 \cdot L^2\right)}} \tag{2.6}$$

Povezivanjem jednadžbe (2.4) i (2.5) dobiva se sljedeće:

$$R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} = U_m \cdot \left[\sin\left(\omega \cdot t\right) \cdot \cos\left(\varphi\right) + \cos\left(\omega \cdot t\right) \cdot \sin\left(\varphi\right)\right] \tag{2.7}$$

Primjenom Laplaceove transformacije na jednadžbu (2.7) dobije se izraz za struju *I(s)* u Laplaceovom području:

$$\begin{aligned} &R \cdot I(s) + L \cdot s \cdot I(s) = U_m \cdot \left(\frac{\omega \cdot \cos\left(\varphi\right)}{s^2 + \omega^2} + \frac{s \cdot \sin\left(\varphi\right)}{s^2 + \omega^2}\right) \Leftrightarrow \\ &I(s) = \frac{U_m}{L \cdot s + R}\left(\frac{\omega \cdot \cos\left(\varphi\right)}{s^2 + \omega^2} + \frac{s \cdot \sin\left(\varphi\right)}{s^2 + \omega^2}\right) \end{aligned} \tag{2.8}$$

U želji da se jednadžba (2.8) prilagodi za što lakšu transformaciju u vremensku domenu ista je zapisana u sljedećoj formi:

$$I(s) = \frac{A}{\left(s + \alpha\right) \cdot \left(s^2 + \omega^2\right)} + \frac{B \cdot s}{\left(s + \alpha\right) \cdot \left(s^2 + \omega^2\right)} \tag{2.9}$$

gdje transformacijske konstante predstavljaju:

$$
\begin{aligned}
\mathrm{A} &= \frac{U_m}{L} \cdot \omega \cdot \cos(\varphi) \\
\mathrm{B} &= \frac{U_m}{L} \cdot \sin(\varphi) \\
\alpha &= \frac{R}{L}
\end{aligned}
\tag{2.10}
$$

Primjenom inverzne Lapalaceove transformacije na jednadžbu (2.9) dobiva se izraz za trenutnu vrijednost struje *i(t)* u vremenskoj domeni.

$$
\begin{aligned}
i(t) = &\frac{\mathrm{A}}{\left(\alpha^2 + \omega^2\right)} \cdot \left[e^{-\alpha \cdot t} - \cos(\omega \cdot t) + \frac{\alpha}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \right] \\
&+ \frac{\mathrm{B}}{\left(\alpha^2 + \omega^2\right)} \cdot \left[-\alpha \cdot e^{-\alpha \cdot t} + \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) + \alpha \cdot \cos(\omega \cdot t) \right]
\end{aligned}
\tag{2.11}
$$

Uključivanjem transformacijskih koeficijenata iz (2.10) u jednadžbu (2.11) dovodi nas do konačnog izraza za struju *i(t).*

$$
\begin{aligned}
i(t) = &\frac{U_m \cdot \omega \cdot \cos(\varphi)}{L \cdot \left(\alpha^2 + \omega^2\right)} \cdot \left[e^{-\alpha \cdot t} - \cos(\omega \cdot t) + \frac{\alpha}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \right] + \\
&\frac{U_m \cdot \omega \cdot \sin(\varphi)}{L \cdot \left(\alpha^2 + \omega^2\right)} \cdot \left[-\alpha \cdot e^{-\alpha \cdot t} + \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) + \alpha \cdot \cos(\omega \cdot t) \right]
\end{aligned}
\tag{2.12}
$$

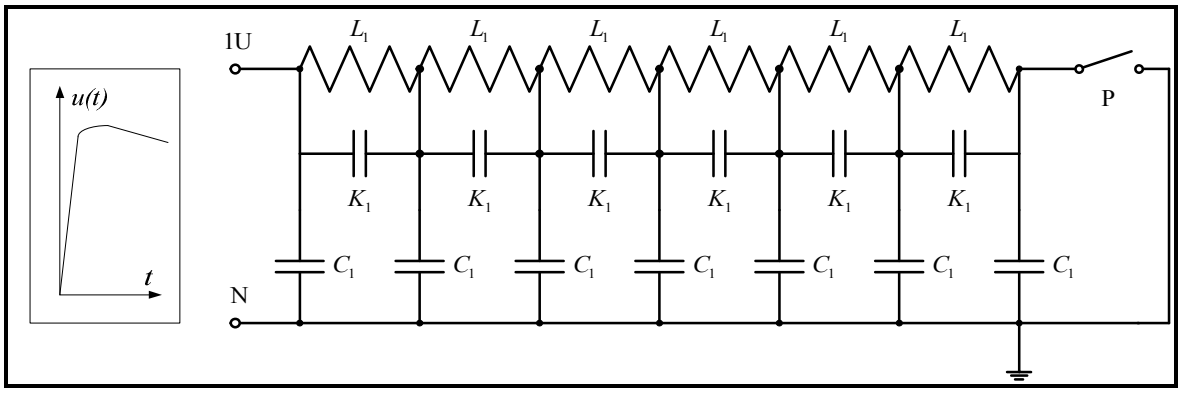
Jednadžba (2.12) se može pojednostaviti ukoliko jednadžbe (2.6) i (2.10) pravilno uvrstimo u (2.12).

$$
i(t) = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot L^2}} \cdot \left[\sin(\omega \cdot t + \varphi - \alpha) - \sin(\omega - \alpha) \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} \right] \tag{2.13}
$$

Prvi dio jednadžbe (2.13) predstavlja stabilno stanje električne mreže. Kut α ukazuje da napon *u(t)* prednjači struji *i(t).* Drugi dio jednadžbe (2.13) predstavlja prijelazno stanje električne mreže. U trenutku kada idealni prekidač uklopi stabilno stanje prelazi u prijelazno stanje. Isklopom prekidača pri 90° dobiva se maksimalna vrijednost prijelazne struje. Nasuprot tome uklop prekidača pri 0° predstavlja najpovoljnije stanje za naprezanje električnog uređaja. Uvjet uklapanja pri 0° dovodi do toga da rezultantna struja bude jednaka trajnoj struji u novom stabilnom stanju mreže.

2.4.2. Početna raspodjela sklopnog prenapona uzduž namota distributivnog transformatora

U svrhu dobivanja što čvršće i jasnije slike početne raspodjele sklopnog prenapona uzduž namota energetskog transformatora potrebno je temeljnu nadomjesnu mrežu pojednostaviti. U tom se slučaju prema [20] složena nadomjesna mreža namota transformatora može prikazati mrežom jednakih ekvivalentnih induktiviteta i jednakih uzdužnih i poprečnih kapaciteta. Slika 2.40. prikazuje pojednostavljenu nadomjesnu mrežu namota.



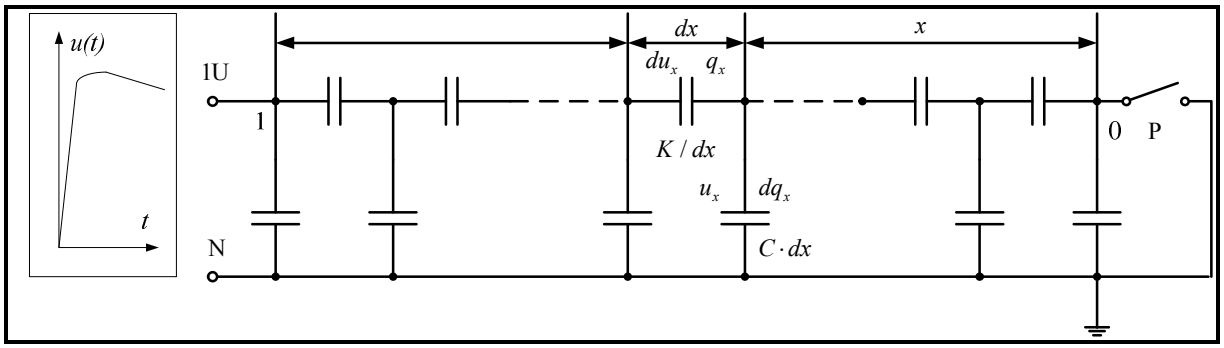
Slika 2.40. Pojednostavljena nadomjesna shema namota

Ukoliko na takvu topologiju namota naiđe sklopni prenapon standardnog oblika, u samom začetku prijelazne pojave induktiviteti ne dopuštaju nikakvu struju što ih čini nebitnim pri analizi početne raspodjele prenapona uzduž namota. Dakle, početna raspodjela je određena mrežom i iznosima vlastitih uzdužnih i poprečnih kapaciteta, koji će opet ovisiti o tome je li nultočka namota izolirana, uzemljena direktno ili posredno preko otpora [20]. Prema tome, kapacitivna mreža jedinične duljine namota se može zamisliti kao niz beskonačno malih elementarnih duljina dx. Elementarni poprečni C_e i uzdužni K_e kapaciteti se mogu definirati na sljedeći način:

$$C_e = C \cdot dx \tag{2.14}$$

$$K_e = K \cdot dx \tag{2.15}$$

gdje su C i K ukupni uzdužni i poprečni kapaciteti namota transformatora iskazani po metru dužine.



Slika 2.41. Nadomjesna kapacitivna shema namota

Prema slici 2.41. vidimo se da se napon u_x i njegov pripadajući elementarni dio du_x na udaljenosti x odnosno elementarnoj udaljenosti dx od kraja namota mogu odrediti na sljedeći način:

$$u_x = \frac{dq_x}{C_e} = \frac{dq_x}{C \cdot dx} \tag{2.16}$$

$$du_x = \frac{q_x}{K_e} = \frac{q_x \cdot dx}{K} \tag{2.17}$$

Povezivanjem jednadžbi (2.16) i (2.17) dobiva se konačan izraz koji prikazuje formula (2.18).

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u_x}{dx^2} &= \frac{C}{K \cdot L} \cdot u_x \\ \frac{d^2 u_x}{dx^2} - \frac{C}{K \cdot L} \cdot u_x &= 0 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Jednadžba (2.18) prikazuje konačan izraz za početnu raspodjelu prenapona uzduž namota po jedinici duljine. Prema [20] ukoliko je prenapon u_R standardnog oblika i amplitude i ovisno o tome je li nultočka uzemljena ili izolirana rješenje jednadžbe (2.18) poprima sljedeće oblik:

$$\frac{u_x}{u_R} = \frac{\sinh(\alpha \cdot x)}{\sinh \alpha} \tag{2.19}$$

$$\frac{u_x}{u_R} = \frac{\cosh(\alpha \cdot x)}{\cosh \alpha} \tag{2.20}$$

Jednadžba (2.19) predstavlja slučaj sa uzemljenom nultočkom dok jednadžba (2.20) sa izoliranom nultočkom. Specifični koeficijent α određuje se prema izrazu:

$$\alpha = \sqrt{C / K} \tag{2.21}$$

Za granične slučajeve vrijede sljedeći izrazi:

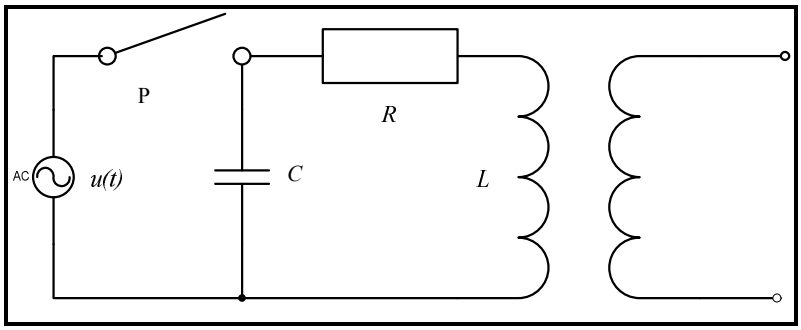
$$\lim_{\alpha \to 0} \left[\frac{\sinh(\alpha \cdot x)}{\sinh \alpha} \right] = x \tag{2.22}$$

$$\lim_{\alpha \to 0} \left[\frac{\cosh(\alpha \cdot x)}{\cosh \alpha} \right] = 1 \tag{2.23}$$

Granični slučaj prema izrazu (2.22) opisuje početnu raspodjelu prenapona za uzemljeno zvjezdište dok izraz (2.23) vrijedi za izolirano zvjezdište. Poznavanjem početne raspodjele prenapona može se utvrditi daljnji tijek pojava u namotu. Raspodjela prenapona unutar namota ovisi o svojstvima transformatora. Unutar namota mogu nastati gradijenti prenapona opasni po samu izolaciju. Ukoliko na transformator naiđe val periodičkog oblika i beskonačne frekvencije strmina sinusne funkcije sve se više uspravlja i u tim uvjetima transformator se ponaša sasvim drugačije nego u stacionarnom stanju. Istraživanja pokazuju da je srednje vrijeme nabijanja kondenzatora reda veličine nanosekundi, odnosno nabijanje je praktički trenutno. Nabijeni kapaciteti izbijaju se preko induktiviteta i tako nastaju oscilacije. Te oscilacije se postupno prigušuju i pojava prijelazi u stacionarno stanje. Kod uzemljenog zvjezdišta prema (2.22) u stacionarnom stanju raspodjela prenapona je linearnog karaktera dok kod izoliranog zvjezdišta sukladno izrazu (2.23) nema prijelazne pojave u namotu. Dinamiku prenapona nakon početnog trenutka diktiraju djelatni otpori namota. Iz toga razloga možemo zaključiti da je potrebno prilikom odabira zaštite od sklopnog prenapona postići što manji koeficijent α. Pojačanjem izolacije između svitaka ne rješava se problem otpornosti prema prenaponu jer se na taj način povećava ukupni uzdužni kapacitet K, a time i povećava koeficijent α što dovodi do pogoršanja početne raspodjele prenapona. Rješenje je u povećanju ukupnog uzdužnog kapaciteta K. Višestruko smanjenje koeficijenta α postiže se prema [20] različitim idejnim izvedbama namota od kojih je najpoznatiji interpolirani namot koji se pridodaje VN namotu.

2.4.3. Isklop primarne strane neopterećenog energetskog transformatora

Isklop neopterećenog energetskog transformatora pri prekidanju nazivnih ili većih struja zbog velike energije električnog luka generira visoke povratne prenapone. Električna vodljivost luka održava se tijekom čitavog poluvala struje. U tim trenutcima struja zadržava sinusni valni oblik sve do gašenja električnog luka. U većini slučajeva gašenje električnog luka će uslijediti prolaskom struje kroz nul - točku. Kod prekidanja struja manjih od nazivnih zbog manje energije luka proces gašenja električnog luka će se dogoditi prije normalne nul - točke struje [10]. Slika 2.42. prikazuje nadomjesnu shemu isklopa malih induktivnih struja.



Slika 2.42. Nadomjesna shema isklopa neopterećenog transformatora

Magnetska energija na primarnoj strani nadomjesne mreže određuje se prema izrazu:

$$W_L = \frac{L \cdot i_g^2}{2} \tag{2.24}$$

gdje je L – primarni induktivitet namota a $i_g(t)$ – trenutna vrijednost struje gašenja. U trenutku gašenja električnoga luka magnetska energija se pretvara u elektrostatsku.

$$W_c = \frac{C \cdot u_c^2}{2} \tag{2.25}$$

gdje je $u_c(t)$ sklopni prenapon na kapacitetu u trenutku isklopa, a C dozemni kapacitet. Izjednačavanjem jednadžbe (2.24) i (2.25) dobivamo približni izraz za sklopni prenapon:

$$u_c = i_g \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{2.26}$$

Izraz (2.26) nam ukazuje na to da će mehanizmi prekidača koji umjetno izobličuju karakteristiku električnoga luka prouzročiti veće sklopne prenapone. Intenzivnije gašenje električnoga luka ima za posljedicu jaču deformaciju prirodne krivulje struje. Rezanje struje u trenutku $t = 0$ ne može se dogoditi trenutačno zbog čega će u krugu nastati prijelazna pojava koja u početnom trenutku zadržava svoju trenutnu vrijednost i_g i koja je određena izrazom:

$$\begin{aligned} &R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int i \cdot dt = 0 \\ &\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{L \cdot C} \cdot i = 0 \end{aligned} \tag{2.27}$$

gdje je R vrijednost djelatnog otpora primarnog namota transformatora. Izraz (2.27) prikazuje oscilatornu prirodu pojave zbog induktivnog karaktera promatranog kruga. Rješenje jednadžbe (2.27) je dakle:

$$i(t) = \mathrm{e}^{-\chi \cdot t} \cdot \left(K_1 \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot t\right) + K_2 \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t\right) \right) \tag{2.28}$$

gdje je $\chi = R / 2 \cdot L$ vremenska konstanta kruga a $\omega_0 = \sqrt{1 / L \cdot C - R^2 / 4 \cdot L^2}$ kružna frekvencija strujnog kruga. Na osnovu toga dolazimo do konačne jednadžbe za sklopni prenapon na kapacitetu *C:*

$$u_c(t) = \frac{e^{-\chi \cdot t}}{C \cdot \left(\omega_0^2 + \chi^2\right)} \cdot \left[\left(K_1 \cdot \omega_0 - K_2 \cdot \chi\right) \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t\right) - \left(K_1 \cdot \chi + K_2 \cdot \omega_0\right) \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot t\right) \right] + K_3 \tag{2.29}$$

Konstante K_1, K_2 i K_3 određuju se iz prethodnog stabilnog stanja prema kojima mora biti:

$$\begin{aligned} &t = 0 \Rightarrow i(0) = i_g, u_c(0) = -u_g \\ &t = \infty \Rightarrow u_c(\infty) = 0 \end{aligned} \tag{2.30}$$

Na temelje originalne mreže vrijedi sljedeće:

$$u(t) = u_{c1}(t) \Rightarrow u_c(t) = u_{c2}(t) = -u_{c1}(t) = -u(t) \tag{2.31}$$

Na osnovu toga proizlazi iz jednadžbi (2.28) i (2.29):

$$
\begin{aligned}
&i(0) = K_1 = i_g \\
&u_c(\infty) = K_3 = 0 \\
&u_c(0) = -\frac{i_g}{C} \cdot \frac{\chi}{\omega_0^2 + \chi^2} - \frac{K_2}{C} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0^2 + \chi^2} = -u_g \\
&K_2 = u_g \cdot \frac{C \cdot \left(\omega_0^2 + \chi^2\right)}{\omega_0^2} - i_g \cdot \frac{\chi}{\omega_0}
\end{aligned}
\tag{2.32}
$$

Uvrštavajući granične uvjete određene prema (2.30) u (2.31) izraz za sklopni prenapon prelazi u oblik:

$$
u_c(t) = e^{-\chi \cdot t} \cdot \left[\left(\frac{i_g}{C \cdot \omega_0} - u_g \cdot \frac{\chi}{\omega_0} \right) \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t\right) - u_g \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot t\right) \right] \tag{2.33}
$$

Ukoliko je djelatni otpor kruga puno veći od induktivnog dijela slijedi konačni izraz za sklopni prenapon:

$$
u_c(t) = e^{-\chi \cdot t} \cdot \left[\left(i_g \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} - u_g \cdot \frac{\chi}{2 \cdot \sqrt{L/C}} \right) \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t\right) - u_g \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot t\right) \right] \tag{2.34}
$$

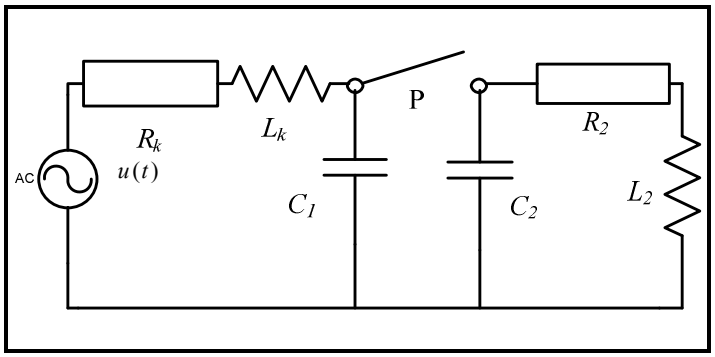
gdje je $\chi = R / 2 \cdot L$ a $\omega_0 = \sqrt{1 / L \cdot C}$.

Maksimalnu vrijednost prenapon može doseći u trenutku t_m:

$$
\begin{aligned}
&\omega_0 \cdot t_m = \pi / 2 \\
&t_m = \frac{\pi}{2 \cdot \omega_0} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{L \cdot C} \\
&u_{cm} = e^{-\frac{R}{2 \cdot L} \cdot t_m} \cdot \left(i_g \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} - u_g \cdot \frac{R}{2 \cdot \sqrt{L/C}} \right)
\end{aligned}
\tag{2.35}
$$

2.4.4. Isklop sekundarne strane energetskog transformatora opterećenog radno – induktivnim teretom

Nastajanje sklopnog prenapona može se prikazati na primjeru isključivanja realne prigušnice priključene na distributivni transformator [20].



Slika 2.43. Nadomjesna shema energetskog transformatora opterećenog prigušnicom

Energetski transformator se za potrebe proračuna sklopnog prenapona nadomješta rasipnim induktivitetom L_k, nadomjesnim djelatnim otporom R_k i kapacitetom sekundarnog namota prema zemlji C_1. Trošilo se nadomješta induktivitetom L_2, djelatnim otporom R_2. I kapacitetom C_2. Štoviše, pošto se promatra sklopni prenapon energetski transformator se prema [59] može nadomjestiti odgovarajućom impedancijom kratkog spoja. Dozemni kapaciteti C_1 i C_2 za analizu visokofrekvencijskih sklopnih poremećaja imaju dominantnu ulogu.

Dok je realna prigušnica bila povezana sa izvorom, napon na izlazu iz transformatora je bio niži od napona izvora za iznos pada napona na impedanciji kratkog spoja energetskog transformatora Z_k. U stacionarnom stanju primjenom Kirchhoffovih zakona dobiva se sljedeći diferencijalni izraz:

$$(R_k + R_2)\cdot i_0(t) + \left(L_k + L_2\right)\cdot \frac{di_0(t)}{dt} = u(t) \qquad (2.36)$$

U trenutku isklapanja prekidača dolazi do razdvajanja izvora energije i radno - induktivnog trošila. Nastaju dvije nezavisne strujne petlje koje se mogu promatrati za potrebe analitičkog proračuna odvojeno. Obje nezavisne strujne petlje su povezane zajedničkom prošlošću. Iz zajedničke prošlosti (staro stacionarno stanje) određuju se početni uvjeti za analizu prijelazne pojave koje će završiti novim stacionarnim stanjem u oba kruga. Njihova se razlika pojavljuje na energetskom prekidaču i može uzrokovati proboj između njihovih kontakata ili vanjski preskok [20].

Za određivanje sklopnog prenapona potrebno je primijeniti Kirchhoffov zakon za sve tri petlje. Za prvu petlju vrijede sljedeći izrazi:

$$R_k \cdot i_1(t) + L_k \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + \frac{1}{C_1} \cdot \int i_1(t) \cdot dt = u(t) \tag{2.37}$$

$$u_{c1}(t) = u(t) - i_1(t) \cdot R_k - L_k \cdot \frac{di_1(t)}{dt} \tag{2.38}$$

Za drugu petlju vrijedi:

$$R_2 \cdot i_2(t) + L_2 \cdot \frac{di_2(t)}{dt} + \frac{1}{C_2} \cdot \int i_2(t) \cdot dt = 0 \tag{2.39}$$

$$u_{c2}(t) = -i_2(t) \cdot R_2 - L_2 \cdot \frac{di_2(t)}{dt} \tag{2.40}$$

Za sklopne prenapone na kapacitetima C_1 i C_2 prema [20] nakon prekida strujnoga kruga vrijede relacije:

$$u_{c_1}(t) = u_{c_{1s}}(t) + \left(\Delta u_{01} \cdot \cos(\nu \cdot t) + \Delta i_0 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \sin(\nu \cdot t) \right) \cdot \exp(-t / T) \tag{2.41}$$

$$u_{c_2}(t) = u_{c_{2s}}(t) + \left(\Delta u_{02} \cdot \cos(\nu \cdot t) + \Delta i_0 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \sin(\nu \cdot t) \right) \cdot \exp(-t / T) \tag{2.42}$$

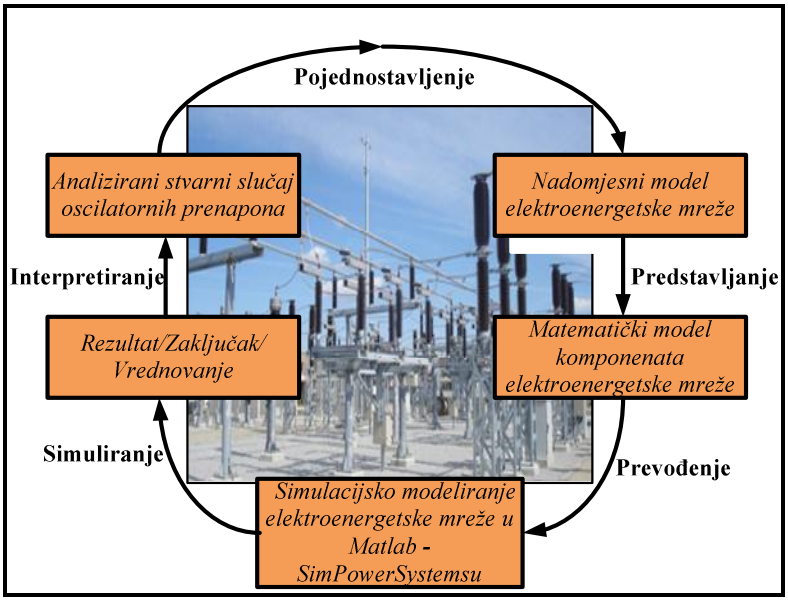
$$u_c(t) = u_{c1}(t) - u_{c2}(t) \tag{2.43}$$

gdje su $u_{c1s}(t)$ *i* $u_{c2s}(t)$ trenutne vrijednosti stacionarnih napona na kapacitetima C_1 i C_2, Δu_{01} i Δu_{02} razlike trenutnih vrijednosti napona na kapacitetima neposredno prije otvaranja prekidača i vrijednosti stacionarnih napona na kapacitetima u trenutku (t = 0 s), Δi_0 trenutna vrijednost struje kroz prekidač u trenutku otvaranja kontakata prekidača (iznos odrezane struje), $\sqrt{L/C}$ valni otpor kruga, $\nu = 1/\sqrt{L \cdot C}$ valna frekvencija kruga i $T = 2 \cdot L / R$ vremenska konstanta kruga.

Sklopni prenaponi su izrazito visoki u krugu visokog valnog otpora ako odrezana struja ima veliku vrijednost. Prenapon nastaje u transformatoru, prigušnici i ostalim dijelovima mreže uglavnom zbog viška magnetske energije u samom krugu. Frekvencija sklopnog prenapona ovisi o parametrima strujnih krugova u kojima sklopni prenapon nastaje.

3. Matematičko modeliranje distributivne mreže

Sklopni prijelazni prenaponi predstavljaju vanjsku manifestaciju iznenadnih promjena uvjeta rada električne mreže. Rezultati dobiveni simulacijskim modeliranjem tog fenomena daju koristan doprinos za utvrđivanje koordinacije izolacije, zaštitnih proradnih karakteristika odvodnika prenapona, visine povratnog prijelaznog napona na prekidaču te razine učinkovitosti zaštitnih uređaja (pridodani umetnuti otpornik prekidaču, prigušnice ili kompleksni kontrolirani zaštitni uređaji). Sklopni prenaponi generiraju u elektroenergetskoj mreži tijekom sklopnih operacija kompleksne naponske i strujne valne oblike koji se mogu opisati spektrom različitih frekvencija. Takav sklopni prenapon putujući kroz transformatorski namot može proizvesti prirodnu namotnu rezonantnu frekvenciju. Namotna rezonantna frekvencija može dovesti do različitih unutarnjih prenapona ili popratnih abnormalnih izolacijskih naprezanja transformatora. U svrhu analize mogućih sklopnih prenapona koji se mogu razviti na distributivnim transformatorima tijekom različitih sklopnih događaja u ovom poglavlju će biti opisani testni matematički modeli komponenata elektroenergetske distributivne mreže.



Slika 3.1. Simulacijsko modeliranje elektroenergetske mreže

Glavni cilj ovoga poglavlja je opisati što jednostavniji matematički model testne distributivne mreže, a da se ne naruši fizikalna slika i točnost samog modela. Razvojni testni model ima svoju primjenu u predviđanju sklopnih prenapona i analizi međuovisnosti različitih utjecaja na prirodu prijelazne pojave. Simulacija sklopnih prenapona pomaže prilikom

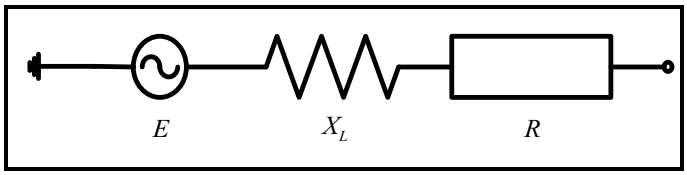
identifikacije potencijalnih realnih sklopnih događaja koji mogu proizvesti kritične sklopne prenapone na distributivnim transformatorima. Opisani visokofrekvencijski matematički model transformatora će se koristit za analiziranje osjetljivosti različitih utjecaja na visinu i trajanje sklopnih prenapona. Istraživanje će se provesti na distributivnim transformatorima različitih snaga i grupa spoja. Posebno će biti opisan utjecaj načina i vrste uzemljenja zvjezdišta transformatora. Kompleksna matematička podloga modeliranih komponenata testne mreže koristit će se u daljnjim digitalnim simulacijama.

Razina korištenog matematičkog modela komponente varira ovisno o analiziranom sklopnom slučaju. Na primjer, vod se može predstaviti modelom s koncentriranim parametrima u nekim sklopnim slučajevima. U nekim drugim situacijama model voda sa distribuiranim i frekvencijski ovisnim parametrima je vjerodostojnija tehnika modeliranja. U nekim pak slučajevima rezultati su preosjetljivi na određene parametre. Maksimalna tjemena vrijednost prenapona za uklop voda ovisi o egzaktnoj točki u kojem se sklopni kontakti prekidača zatvaraju. Zbog toga je potrebno učiniti mnogo ponavljanja uklopa voda na istom sustavu ili na prediktivni ili statistički način izvršiti uklapanja s ciljem dobivanja najbolje distribucije prenapona.

Ovo poglavlje raspravlja o korištenoj tehnici modeliranja komponenata sustava i dodatnim modelima zaštitne opreme. Razina korištenih matematičkih modela podrazumijeva temeljno razumijevanje i poznavanje prijelazne pojave, korištenom frekvencijskom rasponu i vremenskom okviru promatranja sklopnog događaja. Specifični model opreme podrazumijeva tipične modele koji se koriste u analizi sklopnih događaja.

3.1. Matematičko modeliranje nadomjesnog izvora i odvodne impedancije transformatora

U sklopnim prijelaznim događajima izvor krutog napona se modelira idealnim sinusnim oblikom. Generator izvora napona se modelira kao serijski spoj Theveninovog izvora elektromotorne sile E i odgovarajuće nadomjesne impedancije. Omjer induktivnog X_L i omskog R djela Theveninove nadomjesne impedancije predstavlja pad napona. Ovakva mrežna konfiguracija predstavlja pojednostavljenu reprezentaciju krute elektroenergetske mreže.

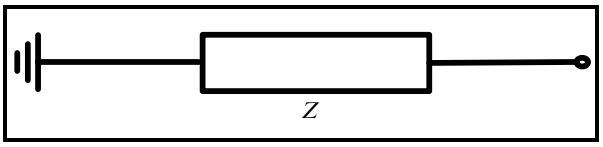


Slika 3.2. Theveninov nadomjesni model izvora

Jednadžba stanja Theveninovog nadomjesnog izvora se može izraziti pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\overline{U} = \overline{E} - \overline{I} \cdot \left(R + j \cdot X_L \right) \tag{3.1}$$

Odvodnik impedancije $\overline{Z}$ spojen u zvjezdište transformatora modelira se odgovarajućom impedancijom kao što prikazuje slika 3.3. Distribucijska mreža najčešće je direktno uzemljena, izolirana ili uzemljena preko otpora tako da struja zemljospoja ne bude veća od 300 A ili 150 A. U specijalnim slučajevima i s nekim drugim većim vrijednostima. Mrežni distributivni transformatori srednjih snaga najčešće su dvonamotni trofazni u kombiniranom spoju Dyn ili Yzn. Najčešće sa satnim brojem 5 ili 11. Spoj Yzn koristi se samo za manje snage transformatora do 630 kVA.



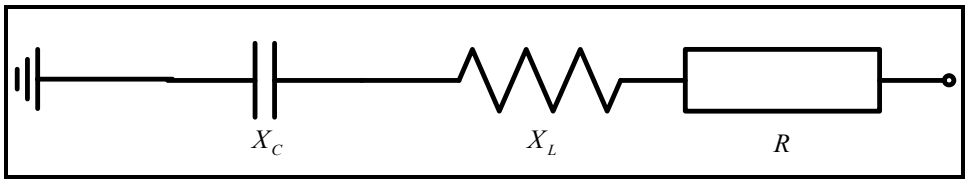
Slika 3.3. Nadomjesni model impedancije odvodnika

Matematički tretman odvodnika impedancije $\overline{Z}$ se može izraziti pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\overline{U} = \overline{I} \cdot \overline{Z} \tag{3.2}$$

3.2. Matematičko modeliranje kondenzatora i prigušnice

Energetski kapacitet se obično modelira kao samostalan koncentrirani element. Međutim, u nekim simuliranim sklopnim događajima koncentrirani nadomjesni kapacitet se nadograđuje pomoću sekundarnih elemenata, kao što su serijski spoj induktiviteta i otpora. Induktivitet sabirnice potrebno je uzeti u obzir prilikom simuliranja povratnog djelovanja koji prouzrokuje prekid kondenzatorske baterije ili simuliranja kvara na kapacitivnoj sabirnici. U takvim slučajevima javlja se efekt prigušenja induktivnoga otpora sabirnice na temelju čega se u konačnici estimira prirodna frekvencija sklopnoga prenapona.

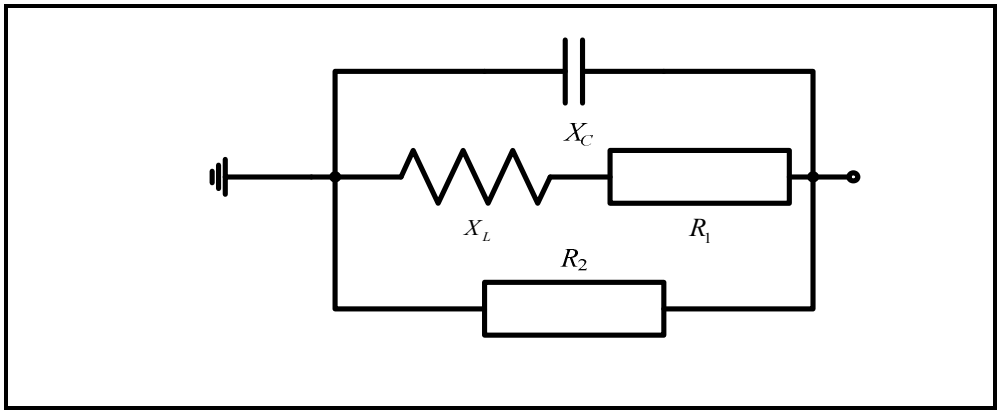


Slika 3.4. Nadomjesni model impedancije kondenzatora

Jednadžba stanja energetskog kondenzatora se može izraziti pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\overline{U} = \overline{I} \cdot \left[R + j \cdot (X_L - X_C) \right] \tag{3.3}$$

Energetske prigušnice se modeliraju kao samostalan koncentrirani serijski spoj induktiviteta i otpora. Ukoliko se želi modelirati realan visokofrekvencijski sklopni događaj paralelno se dodaje otpor. Isto tako, ukoliko se želi modelirati slučaj rezanja malih induktivnih struja tada se paralelno prigušnici uključuje totalni kapacitet odgovarajuće kapacitivnosti. Pod totalnim kapacitetom se podrazumijeva umetnuti ili ekvivalentni kapacitet namota prema zemlji. Ukoliko postoji potreba spajanja prigušnice u seriju tada se mora uzeti u obzir kapacitet priključnice prema zemlji i kapacitet između serijski spojenih prigušnica.



Slika 3.5. Nadomjesni model prigušnice za visokofrekvencijske sklopne događaje

Jednadžba stanja energetske prigušnice se može izraziti pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\overline{U} = \overline{I} \cdot \overline{Y} \tag{3.4}$$

gdje je Y nadomjesna ukupna admitancija prigušnice.

3.3. Matematičko modeliranje sklopnog aparata

Pod matematičkim modelom sklopnog aparata podrazumijeva se prekidač energetskog kruga ili neki drugi uređaj kojemu je osnovna funkcija prekidanje energetskih krugova. U sklopnim analizama, prekidač se modelira pomoću jednadžbi stanja. Prekidač se najčešće opisuje stanjem vođenja (impedancija nula ohma) ili stanjem prekida (beskonačna impedancija). Implementirani model prekidača u Matlab - SimPowerSystemsu omogućava različite dodatne opcije. Najčešće su to podešavanje načina i vrste upravljanja te upravljanje trenutkom uklopa prekidača. Način upravljanja može biti od jednog determinističkog do višesklopnog statističkog ili sustavnog sklapanja [60]. Jedna od značajki modela prekidača u Matlab - SimPowerSystemsu je mogućnost simultanog i nesimultanog sklapanja. Kada se sva tri pola prekidača zatvaraju trenutno sklopni prenapon je manji nego kad je uklop nesimultani.

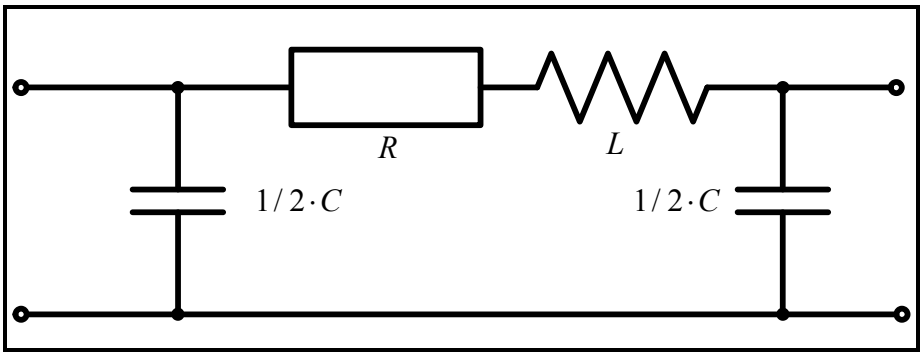
Statističko sklapanje podrazumijeva sklapanje od najmanje 100 ili više ponavljanja simulacije uklopa, gdje se za svaku pojedinačnu simulaciju uklopa može definirati drugačiji set trenutaka prekidanja kruga. Statistička metoda se koristi za procesiranje vršne tjemene vrijednosti prenapona za svaku simulaciju posebno. Prekidač se može uklopiti u bilo kojem sklopnom trenutku ili kutu. Trofazni tropolni prekidač se modelira kao tri upravljiva jednofazna prekidača. Model korišten u Matlab – SimPowerSystemsu ne uzima u obzir konačno vrijeme kašnjenja zatvaranja pojedinih polova između trenutaka uklopa u slučajevima simultanog sklapanja. Upravljanje sklopnim kutom pola u blizini prolaska napona kroz nulu također nije moguće. Naime, mehanički pokreti kontakata prekidača proizvode oscilacije oko ciljajućeg kuta sklapanja. Na zatvaranje električnoga kruga može prijevremeno utjecati pojava luka između kontakata prekidača. Trenutak pojave električnog luka je relevantan za pojavu oporavka prijelaznog napona te razumijevanje samog fizikalnog fenomena te uključuje poznavanje paralelnih fizikalnih procesa koje su slučajni i nerazdvojivi. Dinamičke karakteristike električnoga luka nisu predmet studiranja doktorske disertacije i iz toga razloga nisu uzete u obzir prilikom modeliranja električnog sklopnog aparata. Istaknuo bih da je modeliranje električnog luka naročito bitno prilikom pojave kvarova, rezanja malih induktivnih struja ili u slučajevima pojave sekundarnih fenomena električnoga luka kao što je ponovni uklop jednofaznog pola trofaznog prekidača. Diskusija o sofisticiranim aproksimacijama i tehnikama modeliranja električnoga luka može se pronaći u [50] i [51].

Slika 3.6. Primjer ABB – ovog $E_{max}2$ upravljivog suvremenog prekidača [61]

3.4. Matematičko modeliranje elektroenergetskog voda

Postoje tri temeljne tehnike modeliranja energetskog voda: π model, Bergeron model te frekvencijski ovisan model voda [62], [63], [64]. Bergeronov model i frekvencijski model voda su bazično modeli voda sa distribuiranim parametrima. Za korištenje i rješavanje ovih modela potrebno je poznavanje naprednih tehnika modeliranja u faznoj domeni. Dakle, potreba za samim istraživanim slučajem, dužina voda, dostupnost korištenih podataka i razumijevanje naprednih tehnika modeliranja određuje koji će se od prethodno navedenih modela koristiti.

Najpogodniji korišteni i računski nešto zahtjevniji je model sa koncentriranim parametrima (π model voda) koji će biti korišten za potrebe doktorske disertacije. Ekvivalentni nadomjesni π model voda prikazuje slika 3.7.



Slika 3.7. π model sekcije voda

Opće jednadžbe stanja energetskog prijenosnog voda za struju i napon na bilo kojem mjestu na vodu se mogu izraziti pomoću sljedećih jednadžbi:

$$I(x,s) = A_1 \cdot e^{\gamma \cdot x} + A_2 \cdot e^{-\gamma \cdot x} \tag{3.5}$$

$$U(x,s) = -Z_c \cdot A_1 \cdot e^{\gamma \cdot x} + Z_c \cdot A_2 \cdot e^{-\gamma \cdot x} \tag{3.6}$$

gdje x predstavlja udaljenost između početne točke i točke promatranja na vodu, s Laplaceov operacijski simbol, A_1 i A_2 – konstante voda, Z_c – karakteristična valna impedancija a γ – propagacijska vremenska konstanta vala. Karakteristična valna impedancija Z_c te propagacijska vremenska konstanta vala γ određuju se na sljedeći način:

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y} \tag{3.7}$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \tag{3.8}$$

gdje je Z jedinična impedancija voda a Y jedinična admitancija voda.

Upotreba π modela voda je ograničena na slučajeve duljine voda do 15 km. Ukupni električni parametri voda se zadaju po kilometru dužine voda. Međutim, u mnogim istraživanjima, kaskadni spojevi se mogu koristiti bez bojaznosti gubitka točnosti. Broj kaskada spojenih u seriju ovisi o željenoj točnosti i zbog toga odabiru odgovarajućeg broja kaskada treba posvetiti više pozornosti. Maksimalan i adekvatan broj je 10 π sekcija. Za vrlo duge vodove, vrijednost impedancije se može dobiti posredstvom sustava simetričnih komponenti (direktna, inverzna, nulta) koji se koriste u analizama tokova snaga.

3.5. Matematičko modeliranje visokofrekvencijskog modela dvonamotnog trofaznog elektroenergetskog transformatora

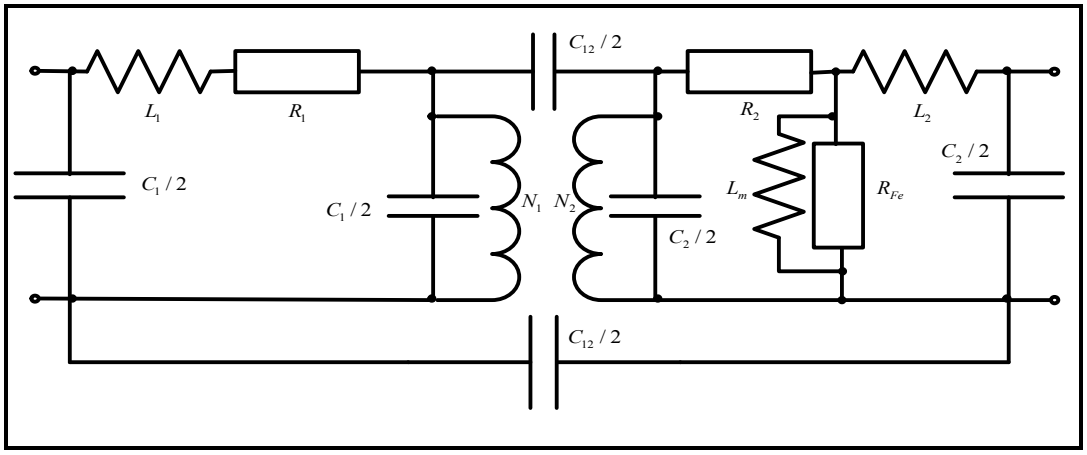
Postoji više različitih kriterija iz kojih se mogu klasificirati razvijeni simulacijski modeli transformatora i koji su integrirani u postojeće simulacijske programe. Neki od tih kriterija su broj faza te kategorija prijelazne pojave. Temelj svakog modela transformatora je T nadomjesna shema koju karakterizira dobro poznavanje omskih, induktivnih i kapacitivnih karakteristika transformatora. Za slučajeve sporijih sklopnih prenapona do nekoliko desetaka kHz dovoljno je prema [9], [15], [59], [65], [66], [67] koristiti reducirani transformatorski model. U prethodno navedenim izvorima temeljito su dokumentirane različite tehnike i načini matematičkog modeliranja željezne jezgre, efekta zasićenja, gubitaka zbog petlje histereze i vrtložnih struja koji se u nekim sklopnim događajima uzimaju u obzir. Posebno je

dokumentiran slučaj utjecaja remanentnog magnetizma. Karakteristike vrsta nadomjesnih shema za analizu prijelaznih pojava u transformatoru prikazuje tablica 3.1.

Tablica 3.1. Nadomjesne sheme za prijelazne pojave u transformatorima

Parametri/Efekti	Skupina 1	Skupina 2	Skupina 3	Skupina 4
Frekvencijski raspon	0,1 Hz – 3 kHz	0,05 – 20 kHz	0,01 – 3 MHz	0,1– 50 MHz
Impedancija KS	Vrlo važno	Vrlo važno	Važno	Zanemarivo
Zasićenje	Vrlo važno	Vrlo važno	Zanemarivo	Zanemarivo
Frekvencijski gubici	Važno	Važno	Zanemarivo	Zanemarivo
Gubici u praznom hodu	Važno	Važno	Zanemarivo	Zanemarivo
Parazitski kapaciteti	Zanemarivo	Važno	Vrlo važno	Vrlo važno
Remanentni magnetizam	Vrlo važno	Važno	Važno	Zanemarivo

Korišteni reducirani matematički model transformatora u Matlab – SimPowerSystemsu za razliku od kompletnog matematičkog modela koji se koristi za analizu složenih slučajeva koordinacije izolacije odlikuje manji broj ulaznih parametara. Ne treba zaboraviti, da za analizu sklopnih slučajeva odgovarajući broj povezanih *RLC* elemenata na ulaznim stezaljkama energetskog transformatora unutar promatranog frekvencijskog područja daje odgovarajuću odziv impedancije nelinearnoga elementa (npr. transformatora). Nelinearnost željezne jezgre i petlja histereze je uzeta u obzir prilikom parametriranja i konfiguriranja simulacijskog modela distributivnog transformatora.



Slika 3.8. Nadomjesni prikaz modela jedne faze dvonamotnog energetskog transformatora

Razumijevanje frekvencijskih ovisnosti ulaznih parametara s jedne strane te poznatih efekata transformatora s druge strane ima vrlo važnu ulogu prilikom odabira dostupnih modela transformatora u Matlab - SimPowerSystemsu te je stoga potrebno primijeniti onaj model koji najtočnije opisuje jezgru i namote transformatora, induktivitete i

međuindukitvitete između zavoja namota, krivulju magnetiziranja željezne jezgre, poznate efekte i gubitke u namotima i željeznoj jezgri te kapacitivne i skin efekte.
Opća jednadžbe stanja primarnog kruga dvonamotnog trofaznog energetskog transformatora se može izraziti korištenjem pridružene matrice impedancije ***Z***:

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{I} \cdot \boldsymbol{Z} \tag{3.9}$$

gdje su ***U*** i ***I*** svojstvene matrice napona odnosno struja modeliranog transformatora.

U proračunu prijelaznih prenapona matrična jednadžba primarnog kruga (3.9) se može određenim transformacijama izraziti na sljedeća dva načina:

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & 0 & 0 \\ 0 & R_{22} & 0 \\ 0 & 0 & R_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{pmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} \tag{3.10}$$

$$\boldsymbol{L}^{-1} \cdot \boldsymbol{u} = \boldsymbol{L}^{-1} \cdot \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{i} + \frac{\boldsymbol{di}}{\boldsymbol{dt}} \tag{3.11}$$

gdje ***R*** i ***L*** predstavljaju pridružene realne i imaginarne dijelove matrice impedancije ***Z,*** a čiji se svojstveni elementi matrice (odgovarajući otpori, induktiviteti i međuinduktiviteti) izvode ispitivanjima na realnim transformatorima ili iz gotovih testnih izvještaja. Primjer jednog takvog izvještaja dan je u prilogu 1. Jednostupčastom vektoru ***u*** pripadaju svojstveni naponi priključnica transformatora dok vektoru ***i*** pripadaju svojstvene vrijednosti struja faza transformatora.

Neki od ulaznih podataka koje reducirani matematički model uzima su *RLC* vrijednosti svake faze namota, prijenosni omjer transformatora, grupa spoja, nazivna prividna snaga, nazivna struja i napon, nazivni gubitci u praznom hodu i kratkom spoju, kapaciteti između ulaznih priključnica i između namota i poznata krivulja magnetiziranja transformatora. Uporabna vrijednost korištenog simulacijskog modela je limitirana na transformatore do 3 namota. Paralelni spoj nelinearnog / linearnog induktiviteta magnetiziranja L_m i otpora magnetiziranja R_m nije u svim analiziranim slučajevima topologijski korektni spoj te se iz toga razloga ograničava na tri namota. Numerička nestabilnost reduciranog simulacijskog modela je zabilježena u [15] za transformatore koji imaju više od šest namota. Ovaj modelski pristup ne uzima u obzir poznate efekte unutar željezne jezgre i specifičnu topologiju željezne jezgre i

namota energetskog transformatora. Matematički tretman oblika i dizajna namota i jezgre je isti neovisno o karakteristikama samog transformatora.

Svaki od idejnih pristupa modeliranju transformatora ima svoje prednosti i nedostatke. Njihov odabir isključivo ovisi o rezultatima i ciljevima koji se traže. Sam teorijski pristup modeliranju energetskog transformatora detaljno opisan u [9] i [15] može se kategorizirati u tri glavna smjera:

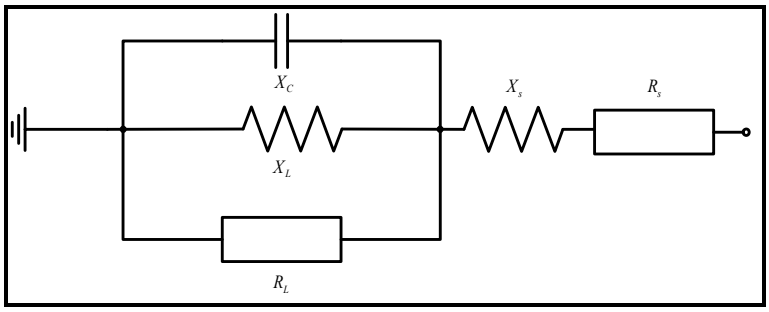
- Matematički model koji je direktno modeliran i dobiven posredstvom standardnih mjerenih transformatorskih karakteristika. Korištenjem rezultata mjerenja na stvarnim transformatorima pokušavaju se kreirati matematički modeli pomoću takozvane modalne analize.
- Matematički model koji je sintetiziran iz mjerenja odziva impedancije nelinearnog elementa promatranog unutar željenog frekvencijskog područja. Utvrđivanje osnovnog frekvencijskog opsega pojave sklopnog prenapona je standardni pristup koji se radi u tim uvjetima. Dobiveni simulacijski frekvencijski odziv se može usporediti sa dostupnom mjernom karakteristikom unutar razmatranog propusnog opsega. Navedeni odzivi se simuliraju za sve moguće varijante promjena uvjeta rada prekidača, a s tim je povezana i promjena konfiguracije mreže. Red veličine sklopnih prenapona induciran na ulaznim priključnicama transformatora dobiven unutar poznatog frekvencijskog opsega je predmet razmatranja. Također, komparacija između mjerenja i simulacijskog modela sa priključenim nadomjesnim ekvivalentnim kondenzatorima je izrazito korisna u slučajevima usporedbe dva simulacijska modela.
- Detaljni topologijski distribuirani modeli dobiveni iz geometrijskih parametara i karakteristika materijala. Ovakav pristup modeliranju podrazumijeva razumijevanje složene geometrijske konfiguracije jezgre i namota transformatora. Spada u skupinu tzv. teških matematičkih modeliranja.

3.6. Matematičko modeliranje opterećenja NN sabirnice

Model opterećenja se prikazuje ekvivalentnim strujnim krugom sa paralelno spojenim otpornim i induktivnim elementima. Faktor snage opterećenja određuje relativni omjer otpora i induktiviteta trošila. Poprečni kapacitet je jednoznačno određen otpornim i induktivnim elementima samog tereta ukoliko je korištena korekcija kapaciteta faktora snage. Kada je teret priključen na sabirnice, efekt vodova, kabela i bilo kojeg energetskog transformatora u smjeru

prema izvoru od sabirnice opterećenja se mora uzeti u obzir u simulacijama [3]. Ovo je naročito važno u slučajevima modeliranja visokofrekvencijskog energetskog transformatora. U tim slučajevima, impedancija Z_s u seriji sa paralelnom *RLC* impedancijom tereta jednoznačno određuje opterećenje sabirnice. Serijska impedancija kombinirana sa ekvivalentnom impedancijom opterećenja se obično uzima u vrijednosti od 10 - 20 % iznosa impedancije tereta.

Prema [56] tipovi tereta kao što su velika opterećenja električnih motora, fluorescentni svjetlosni izvori, energetski pretvarači, upravljivi industrijski pogoni pripadaju posebnoj skupini tereta koji se obično prikazuju specifičnim modelom tereta. Udaljena industrijska opterećenja se modeliraju pomoću koncentriranih dugih vodova i distribuiranih modela tereta.



Slika 3.9. Ekvivalentni model tereta energetske mreže za simulaciju sklopnih prenapona

Jednadžba stanja opterećenja sabirnice se može izraziti pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\overline{U} = \overline{I} \cdot \overline{Y} \tag{3.12}$$

gdje je *Y* ukupna nadomjesna admitancija sabirnice opterećenja.

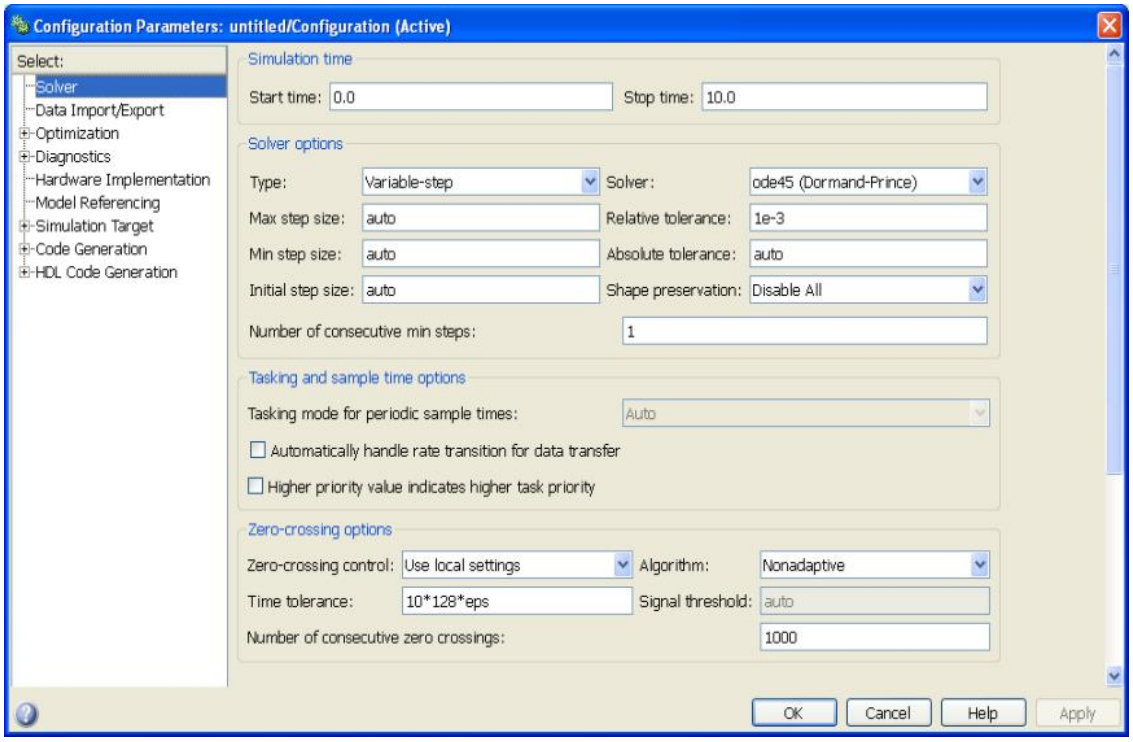
4. Razvoj simulacijskog modela testne elektroenergetske mreže u Matlab – SimPowerSystemsu

Kontinuirani razvoj grafički orijentiranih komercijalnih simulatora omogućava sve učinkovitije i složenije simulacije slučajeva sklopnih prenapona. Između ostaloga, jedan od dostupnih korištenih alata za prijelaznu analizu je Matlab – SimPowerSystems koji se prema [68] koristi ovisno o primjeni te analiziranom fizikalnom fenomenu. U ovom poglavlju se koristi za prikaz simulacijskih modela komponenata korištenih u svrhu analize osjetljivosti sklopnog prenapona. Dodatno će biti pojašnjeni korišteni ulazni parametri, simulacijske metode i parametri koji utječu na odabrani simulacijski postupak.

4.1. Uvod u Matlab – SimPowerSystems

Pri odabiru i dizajnu prikladne simulacijske mreže u Matlab - SimPowerSystemsu te u analizi i optimiranju ponašanja iste koristi se simulacija na računalu. Simulacijska testna mreža se dijeli na niz simulacijskih modela komponenata čija se međusobna fizikalna ovisnost opisuje matematičkim modelima. Dakle, osnovni uvjet za to je postojanje matematičke analogije između originalne komponentne i njegova modela. Na samom istraživačkom putu traženja i dobivanja rezultata analize osjetljivosti sklopnih prenapona na različite uvjete ispituju se koncepcije s različitim parametrima. Ti parametri variraju sve dok rezultat ne udovolji postavljenom cilju s obzirom na mjerenje na stvarnom fizičkom modelu. Povećana dubina korištenog simulacijskog modela testne simulacijske mreže i time povezana složenost simulacijskog modela za posljedicu ima duže trajanje simulacije. Kako se ovdje radi o diferencijalnim jednadžbama da bi se došlo do rješenja koristit će se neke od metoda kao što su Runge - Kutta (tzv. ode45), Hammingova (tzv. ode23s), Korektor metoda (tzv. ode23m) ili metoda trapezne integracije (tzv.ode15s). Koju od numeričkih metoda upotrijebiti, ovisi o složenosti sklopnog problema. Rezultati simulacije se prikazuju u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. Simuliranje se odvija numeričkim metodama najčešće s automatski promjenjivom duljinom koraka. Sama simulacija se izvodi u sljedećim fazama: razvoj simulacijskih komponenata testne mreže, izvođenje i odabir simulacijskog ili nekog drugog integriranog numeričkog postupka te vrednovanje dobivenih simulacijskih rezultata. Matlab – SimPowerSystems koristi šest numeričkih metoda čija se rješenja mogu dobiti fiksnom ili promjenjivom duljinom koraka. Odabir iznosa duljine koraka mora biti dovoljno kratko da bi se sklopni prenapon mogao točno prikazati. Također bi trebao biti značajno manji od perioda

najviše frekvencije oscilacije komponente (oko 1/20 μs). Dodatno, parametar simulacije koji utječe na odabir fiksnog koraka je postojanje nelinearnih karakteristika modela komponenata. Obično se uzima za fiksni korak raspon vremena od 5 μs do 50 μs (obično 20 μs). Simulacijsko vrijeme u tipičnim sklopnim studijama kreće se oko 20 ms do 200 ms (obično 50 ms). Za odabir prikladne numeričke metode i fiksnog koraka može poslužiti spoznaja da ukoliko nema daljnjeg dobitka na točnosti simulacije ne treba raditi daljnje smanjenje koraka. Slika 4.1. prikazuje osnovne i dodatne konfiguracijske parametre simulacijskog postupka.

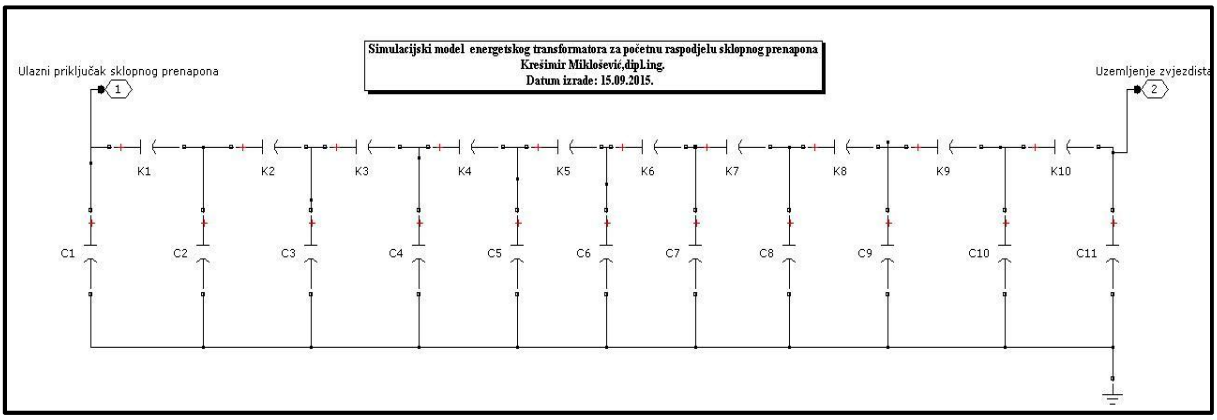


Slika 4.1. Konfiguracijski parametri simulacijskog postupka

4.2. Simulacijsko modeliranje namota energetskog transformatora za dobivanje početne raspodjele sklopnog prenapona uzduž namota

Cilj ove simulacije je utvrditi karakteristiku početne raspodjele i maksimalni iznos sklopnog prenapona koji se može pojaviti na priključnicama i uzduž namota energetskog transformatora, ustanoviti kritična mjesta u namotu te predložiti prikladne mjere neutraliziranja negativnih utjecaja sklopnih prenapona. Na osnovu toga utvrditi vremenski tijek pojave u namotu. Dobiveni odzivi mogu se koristiti za analizu daljnjih pojava u namotu. Potrebno je posredno ustanoviti na koji način vrsta uzemljenja zvjezdišta utječe na karakteristiku početne raspodjele sklopnog prenapona. Pri povećanim frekvencijama,

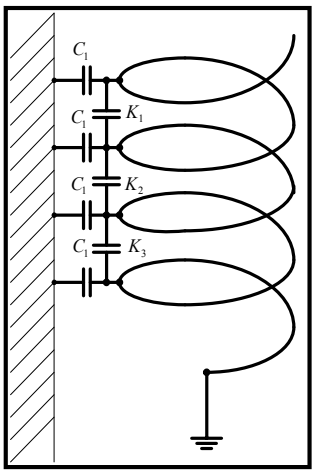
fizikalno gledajući, struja teče kapacitivnim vezama obilazeći namot kroz umetnute nadomjesne parazitne i dozemne kapacitete. Kapacitivni efekti mogu biti značajni i zbog toga se moraju uključiti u simulacijski model transformatora. Dominantne kapacitivne veze energetskog transformatora imaju veliki utjecaj na karakteristiku sklopnog prenapona. Zbog toga je proračun kapaciteta transformatora jedan od ključnih elemenata kod analize pri visokim frekvencijama. Ti proračuni se temelje na provjerenim analitičkim aproksimacijama pločastim ili cilindričnim kondenzatorima [69]. Osim toga, procesi koji nastaju u transformatorima zavise od toga, da li je nul - točka transformatora direktno uzemljena ili izolirana prema zemlji. Slika 4.2. prikazuje razvijeni simulacijski model za jedan koncentrirani cilindrični visokonaponski namot.



Slika 4.2. Simulacijski model namota energetskog transformatora jedne faze za početnu raspodjelu sklopnog prenapona

Prilikom dolaska sklopnog prenapona na ulazne priključnice transformatora, spojeni uzdužni svitci VN namota transformatora ne dopuštaju nikakvu promjenu struje. Može se reći da sklopni prenapon u tim trenutcima ne vidi induktivitete namota, te se kondenzatorska mreža nabija trenutno (vremenska konstanta je nula). Dakle, induktiviteti se za slučajeve analize početne raspodjele sklopnoga prenapona duž namota transformatora mogu zanemariti. Slika 4.3. prikazuje pojednostavljenu ilustraciju kapacitivnih veza za jedan koncentrirani cilindrični visokonaponski namot. Ovdje je K kapacitet između dva uzdužna susjedna svitka, a C kapacitet svitka prema zemlji. Obično se kapaciteti prema zemlji ne mogu potpuno zanemariti, ali se njihov kapacitivni efekt može kompenzirati. Odgovarajućim dodatnim VN namotom koji po svojim projektiranim karakteristikama doprinosi dodatnom povećanju uzdužnog kapaciteta, a smanjenju poprečnog, značajno se poboljšava početna raspodjela prenapona [20]. Dakle, da bi transformator bio nerezonantan mora se neutralizirati djelovanje kapaciteta prema zemlji, a ostaviti samo kapacitete među svicima. Kapacitet između slojeva

koncentriranog cilindričnog transformatorskog namota premašuje kapacitet prema zemlji. Uzdužni kapaciteti spojeni su u seriju dok su poprečni kapaciteti spojeni u paralelu. Namot ima *n* svitaka jednakih kapaciteta između svitaka te prema zemlji.



Slika 4.3. Ilustracija kapacitivnih veza namota

Za sklopne slučajeve koji uključuju frekvencije do 20 kHz, potrebno je parazitne i dozemne kapacitete svitaka transformatora uključiti u reducirani transformatorski model. Nadomjesni reprezentativni kapaciteti u stvarnosti su distribuirani, ali za potrebe simulacije sklopnih prenapona uzima se da su na VN i NN priključnicama namota koncentrirani. Reprezentativni ekvivalentni kapaciteti predstavljaju električko povezivanje između namota iste faze ili između namota i jezgre transformatora.

Neki specifični testni izvještaji daju potrebne geometrijske parametre nadomjesnih pojedinačnih kapaciteta VN i NN namota. Dakle, ukoliko je dizajn oblika namota poznat, proračun reprezentativnih nadomjesnih pojedinačnih kapaciteta je moguć. Metodologija kratkih testnih mjerenja kapacitivnih struja na stvarnom transformatoru opisana je detaljno u [59]. Međutim, u većini slučajeva ti podatci nisu poznati. Unutrašnja i vanjska strana cilindričnoga namota su kao kondenzatorske paralelne ploče s dielektrikom od ulja ili papira. Poznavanjem vrijednosti presjeka namota i duljine razmaka između svitaka namota mogu se proračunati nadomjesni kapaciteti namota. Transformatorski namot se može aproksimirati paralelnim pločama gdje je kapacitet proporcionalan razmaku između ploča, a obrnuto proporcionalan udaljenosti između njih. Za veličinu ploče može se približno uzeti da je proporcionalna drugom korijenu prividne nazivne snage transformatora. Razmak između jezgre i namota je proporcionalan najvećoj baznoj naponskoj razini od dva uključena namota [70]. Za dvonamotni transformator, nadomjesni kapacitet između VN namota i uzemljenja je

manji od kapaciteta između NN namota i zemlje zbog potrebnog zračnog razmaka između VN i NN namota i između namota i jezgre iste faze. Rezultati istraživanja u [25], [64], [66] i [71] pokazuju da je nadomjesni ekvivalentni kapacitet između NN namota prema zemlji tri puta veći od nadomjesnog ekvivalentnog kapaciteta između VN namota. Nadomjesni kapacitet između VN i NN namota je pet puta veći nego kapacitet između VN namota i zemlje. Dakle, za potrebe simulacijskog modeliranja transformatora bitan je relativni omjer nadomjesnih kapaciteta za analizirani sklopni događaj.

Ukoliko dizajn namota nije poznat ili dostupan tada se umjesto nadomjesnih kapaciteta proračunavaju efektivni priključni kapaciteti [72]. Proračun se temelji na poznavanju prirodne frekvencije oscilacije VN i NN namota. Efektivni priključni kapacitet C_{eff} se izračunava prema formuli [72] :

$$C_{eff} = 1/\left(2 \cdot \pi \cdot f_{TRV}\right)^2 \cdot L_m = k / X_L \cdot f_{TRV}{}^2 = k \cdot S_n / U_L^2 \cdot X \cdot f_{TRV}^2 \tag{4.1}$$

gdje je k konstanta koja ovisi o pogonskoj frekvenciji sustava, f_{TRV} reprezentativna frekvencija oscilacije promatranog namota u kHz , L_m induktivitet magnetiziranja u H, X_L reaktancija magnetiziranja u Ω, U_L linijski napon u kV, S_n nazivna prividna snaga transformatora u MVA i X bazna reaktancija u p.u. Ukoliko se frekvencija oscilacije VN ili NN namota poznaje, efektivna vrijednost kapaciteta se prema jednadžbi (4.1) može proračunati za poznati induktivitet magnetiziranja.

Reprezentativna prirodna frekvencija oscilacije f_{TRV} promatranog namota je obrnuto proporcionalna drugom korijenu nominalnog napona, a proporcionalna drugom korijenu struje kvara I_{ks} [67]. Koristi se za evaluaciju proračunatih efektivnih vrijednosti kapaciteta, a samim tim i u svrhu poboljšanja postojećih analitičkih proračuna. Očigledno prema formuli (4.2) da prirodna frekvencija ima tendenciju pada vrijednosti s povećanjem nazivne prividne snage transformatora zbog toga što je kapacitet funkcija konstrukcijskih parametara transformatora uključujući i električnu veličinu kao što je prividna snaga.

$$f_{TRV} = \frac{\sqrt{I_{ks}}}{\sqrt{U_n} \cdot S_n} \tag{4.2}$$

gdje je: I_{ks} struja kvara transformatora u [A], U_n nazivni fazni pogonski napon transformatora u [kV] i S_n nazivna prividna snaga transformatora u [kVA].

Za odgovarajuće nadomjesne kapacitete VN i NN namota vrijede sljedeći izrazi [15]:

$$C_{eff} = C_1 + C_{12} \tag{4.3}$$

$$C_{eff} = C_2 + C_{12} \tag{4.4}$$

gdje je: C_1 nadomjesna dozemna koncentrirana vrijednost kapaciteta na VN priključnicama transformatora u [pF], C_2 dozemna koncentrirana vrijednost kapaciteta na SN priključnicama transformatora u [pF] , C_{12} nadomjesna koncentrirana vrijednost kapaciteta između VN i SN namota transformatora iste faze u [pF] i C_{eff} efektivna vrijednost kapaciteta na VN i SN priključnicama transformatora u [pF].

U mnogim sklopnim slučajevima ne postoji mogućnost izmjeriti pojedine kapacitete namota transformatora. Iz toga razloga nastao je standard IEEE C37.011 1994 koji predstavlja svojevrsni vodič za estimaciju vrijednosti efektivnih kapaciteta energetskih transformatora. Pri tome se prema [59] i [70] uzima da je visokofrekvencijski omjer pripadnih kapaciteta manji od 0,4 odnosno za njega vrijedi sljedeći izraz:

$$\frac{C_{12}}{C_{12} + C_2} \leq 0,4 \tag{4.5}$$

Ukoliko se želi simulirati utjecaj pada reprezentativne frekvencije prouzrokovan efektom povećanja otpora VN i NN namota transformatora i gubitaka zbog vrtložnih struja potrebno je prema [9] pravilno te efekte modelirati te ih ispravno uključiti u reducirani model transformatora. Na disipaciju pri visokim frekvencijama utječe otpor unutar namota vodiča te dielektrični gubici izolacije. Ukupnim disipativnim gubicima pridonose ohmski gubici, gubici uslijed skin efekta, gubici uslijed efekta brzine te gubici unutar jezgre. Ti utjecaji se modeliraju odgovarajućim visokofrekventnim promjenjivim ekvivalentnim otporom R_D prema zemlji na svakoj strani namota [67]. Za većinu energetskih transformatora faktor prigušenja oscilacije D_F (omjer uzastopnih vršnih vrijednosti u oscilaciji) se kreće od 0,6 do 0,8. Vrijeme između uzastopnih vršnih vrijednosti oscilacije se može izračunati prema sljedećoj formuli [67]:

$$t_{pp} = 1 / f_{pp} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_m \cdot C_{eff}} \tag{4.6}$$

Visokofrekvencijski prigušni otpor R_D se izračunava pomoću sljedeće jednadžbe [67]:

$$R_D = \frac{-\pi \cdot \sqrt{L_m / C_{eff}}}{\ln(D_F)} \tag{4.7}$$

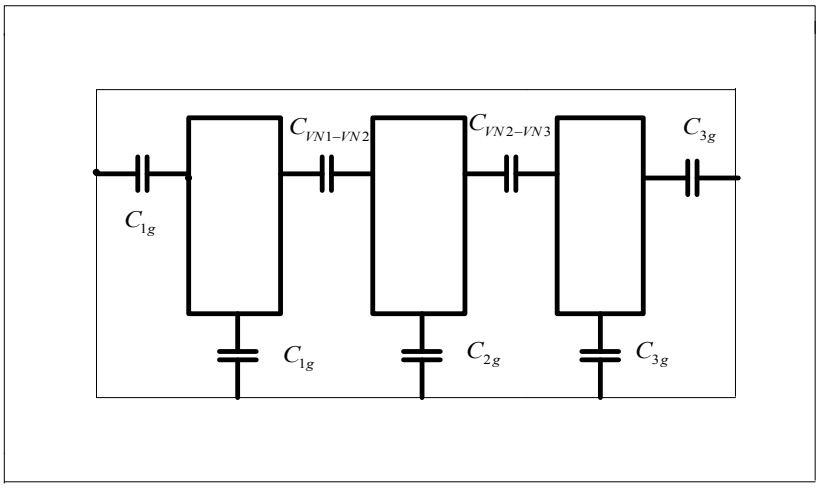
gdje je L_m induktivitet magnetiziranja transformatora dok je C_{eff} efektivni kapacitet promatranog VN ili NN namota. Na osnovu efektivnih vrijednosti priključnih kapaciteta transformatora te odgovarajućeg visokofrekvencijskoga omjera kapaciteta mogu se proračunati priključni nadomjesni kapaciteti svakog VN i NN namota prema zemlji i međusobno:

$$C_{12} = \left(\frac{C_{12}}{C_{12} + C_2} \right) \cdot C_{eff} \tag{4.8}$$

$$C_2 = C_{eff} - C_{12} \tag{4.9}$$

$$C_1 = C_{eff} - C_{12} \tag{4.10}$$

Ne treba zaboraviti i na postojeću električnu vezu između VN namota različitih faza. Znači moguća je veza između VN namota faze A i VN namota faze B i veza između VN namota faze B i VN namota faze C. Ovi nadomjesni kapaciteti su obično manjeg iznosa od kapaciteta između VN namota i NN namota iste faze. Prema [70] iznose trećinu vrijednosti kapaciteta između VN namota i NN namota iste faze zbog toga što je debljina izolacije tri puta veća na VN strani namota. Slika 4.4. prikazuje glavne kapacitivne veze između željezne jezgre i namota transformatora. Za svaku fazu tri reprezentativna nadomjesna kapaciteta opisuju transformatorske električne veze. VN i NN namoti svake faze su odvojeni izolacijskim materijalima. Takvu pak električnu vezu opisuju još dva dodatna nadomjesna kapaciteta. Prethodno opisane električne veze će biti implementirane u reducirani simulacijski model transformatora u Matlab - SimPowerSystemsu koji će se koristi kao komponenta testne simulacijske mreže. Ukoliko se promatra samo jedna faza distributivnog transformatora u tom slučaju električne veze $C_{VN1\text{-}VN2}$ i $C_{VN2\text{-}VN3}$ se mogu zanemariti.



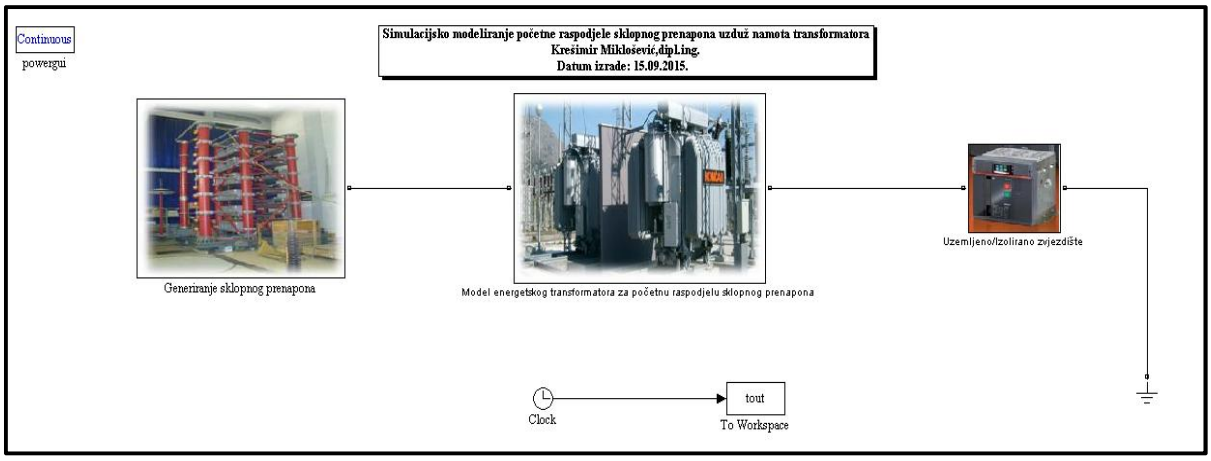
Slika 4.4. Kapacitivne veze VN koncentriranog namota

Standardom IEEE C37.011 1994 su definirane i ostale referentne vrijednosti nadomjesnih ekvivalentnih kapacitivnih elemenata. Slika 13.8. u izvoru [73] pruža referentne vrijednosti efektivnih kapaciteta transformatora prema zemlji po fazi. Za potrebe simulacije sklopnih prenapona poslužit će i tablica 4.1. iz koje će se estimirati potrebni nadomjesni kapaciteti između svake faze i zemlje. Referentni rasponi vrijednosti efektivnih kapaciteta transformatora ovisno o nominalnom naponu i snazi prikazuje tablica 4.1. Preostale nadomjesne efektivne vrijednosti kapaciteta energetskih komponenata se mogu estimirati iz standarda IEEE C37.011 1994.

Tablica 4.1. Referentne vrijednosti efektivnih kapaciteta energetskog transformatora

Veličina transformatora (MVA)	Nominalni napon (kV)	Efektivni kapacitet (pF)
1 do 10	15 – 121 kV	900 – 10000
10 do 100	15 – 121 kV	2000 – 12000
	121 kV – 550 kV	2000 – 6500
100 do 1000	121 kV – 550 kV	3500 – 16000

Korišteni simulacijski modeli testne pobude i VN namota energetskog transformatora za početnu raspodjelu sklopnog prenapona su razvijeni i modelirani prema smjernicama danima u podpoglavljima 2.2.1. odnosno 2.4.2. Početna raspodjela prenapona mjerodavna je za daljnji tijek pojave u namotu transformatora.



Slika 4.5. Simulacijsko modeliranje nadomjesne sheme namota transformatora za početnu raspodjelu sklopnog prenapona

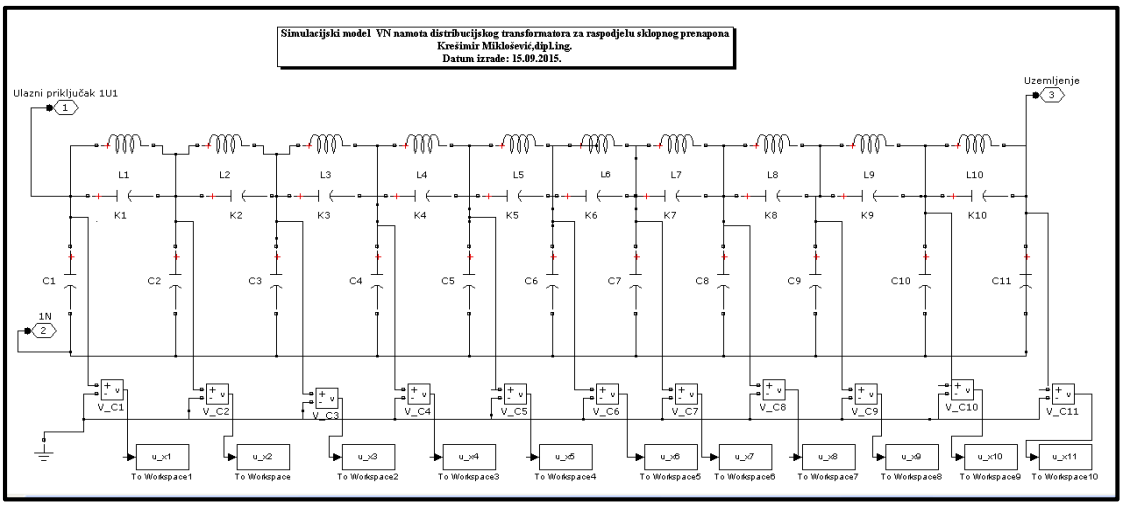
4.3. Simulacijsko modeliranje namota energetskog transformatora za dobivanje raspodjele sklopnog prenapona uzduž namota

Promatranjem raspodjele napona u vremenskom okviru pojavnosti sklopnog prenapona može se ustanoviti u kojem djelu VN namota transformatora se pojavljuje najveći prirast ili povišenje napona. Također, odgovarajućim pristupom može se utvrditi u kojem trenutku se to događa, odnosno postoji li opasnost od proboja izolacije na početku ili na kraju VN namota, ali postoji li možda i opasnost proboja izolacije za svaki zavoj namota. Iz prethodnog razmatranja vidjelo se da se nabijeni uzdužni i poprečni kondenzatori izbijaju preko rasipnog induktiviteta VN namota te na taj način uzrokuju oscilacije unutar namota. U svojoj cjelini VN namot je učvršćen na svojim krajevima te u prijelaznom režimu vibrira. Vibracija predstavlja vidljivu manifestaciju te pojave. Poznavanjem reprezentativne frekvencije oscilacije može se odrediti nadomjesni ekvivalentni kapacitet namota. Te oscilacije se nakon nekog vremena prigušuju. Sve jače prigušenje je posljedica djelovanja radne komponente namota transformatora. Promjena magnetske energije na induktivitetu praćena je prenaponom koji ovisi o iznosu ekvivalentnog uzdužnog induktiviteta VN namota i brzini promjene struje na njemu. Brzina prigušenja i vremenska raspodjela prenapona ovisi i o vrsti uzemljenja namota što se moglo vidjeti u analizi početne raspodjele prenapona. Pri tome ne treba zaboraviti da će oscilacije biti to veće što je koeficijent α veći. Inače, koeficijent α jednoznačno određuje ukupan poprečni C i uzdužni kapacitet K namota transformatora. Što je ukupan poprečni kapacitet veći u odnosu na uzdužni kapacitet dobiva se veći koeficijent α a time i veće oscilacije unutar VN namota transformatora. Usporedba raspodjele prenapona u

vremenskom okviru prijelazne pojave daje argument za odabir optimalne zaštite energetskog transformatora. Korišteni simulacijski model testne pobude i energetskog transformatora za dobivanje pojednostavljene raspodjele prenapona u rasponu od početnog trenutka do trenutka promatranja razvijeni su i modelirani prema smjernicama danima u podpoglavljima 2.2.1. odnosno 2.4.2.

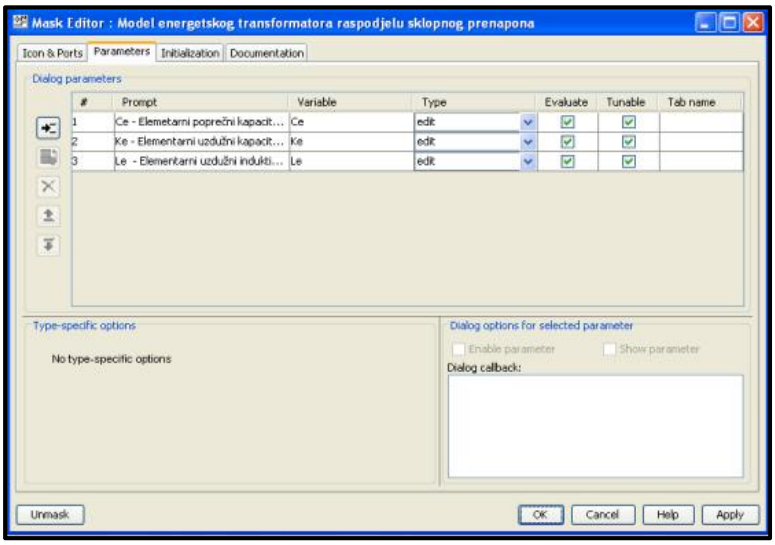
Na razvijenom pojednostavljenom simulacijskom modelu VN namota za analizu raspodjele prenapona prikazanom na slici 6.1. analizirani su specifični slučajevi raspodjele prenapona u rasponu od početne raspodjele ($t = 0$ s) do krajnjeg trenutka promatranja. Krajnji trenutak promatranja ovisi o vrsti pobude i analiziranom sklopnom slučaju.

Složeni simulacijski model sheme VN namota razvijen je u Matlab – SimPowerSystemsu za potrebe simulacije scenarija različitih konstrukcijskih utjecaja na raspodjelu prenapona (Slika 4.6.).

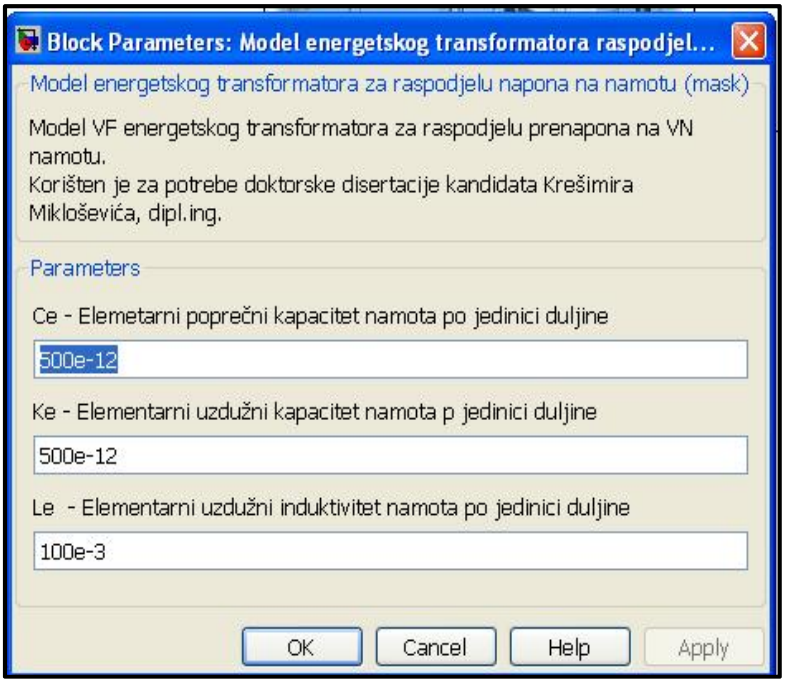


Slika 4.6. Simulacijsko modeliranje pojednostavljenje nadomjesne sheme namota transformatora

Simulacijski model na slici 4.6. je primjenom simulacijske tehnike grupiranja i maskiranja sveden na sljedeći oblik:



Slika 4.7. Grupirani i maskirani pojednostavljeni simulacijski model VN namota distributivnog transformatora za raspodjelu prenapona



Slika 4.8. Ulazni parametri u pojednostavljeni simulacijski model distributivnog transformatora za raspodjelu sklopnog prenapona

U zadnje vrijeme je dosta pokušaja da se mjerenjima na fizičkim modelima namota transformatora nadopuni znanje o parametrima namota. Najčešća korištena metoda mjerenja koja pri tome prevladava je FRA (*engl. Frequency Response Analyses*) metoda analize. Ovdje pojam mjerenje podrazumijeva kratka mjerenja koja se koriste u svrhu verifikacije proračuna ekvivalentnih ulaznih nadomjesnih parametara. Najčešće su to mjerenja napona i struja i to u onim točkama namota koje su nedostupne ispitivaču tijekom standardnih ispitivanja. Pokazalo

se da ova mjerenja dosta dobro nadopunjuju nedostatak ulaznih parametara dobivenih standardnim testnim ispitivanjima. Više o samoj estimaciji ulaznih parametara u svrhu modeliranja transformatora može se pronaći u izvoru [59].

4.4. Simulacijsko modeliranje testne distributivne mreže u Matlab – SimPowerSystemsu

Razviti apsolutno točan cjeloviti simulacijski model koji će reflektirati ponašanje fizičkih realnih komponenata pri poznatom frekvencijskom opsegu prijelazne pojave predstavlja prvi problem s kojim se susreće istraživač iz područja prijelaznih pojava. Dakle, razvoj simulacijskog modela zahtjeva specifično znanje o dinamičkom ponašanju svake simulacijske komponentne zasebno. Da bi se izbjegao veliki broj neuobičajenih ulaznih parametara u simulacijski model, potrebno je razdvojiti relevantne i irelevantne efekte. Više o tome se može pročitati u poglavlju 3. Drugi problem je određivanje ulaznih simulacijskih parametara. Dok se karakteristike komponenata simulacijskog modela pri određenom frekvencijskom opsegu mogu pronaći kod proizvođača, preostali parametri moraju se proračunati ili estimirati na temelju dizajna (geometrijskih parametara) same fizičke komponentne. Na primjer, simulacijski krug VN distributivnog transformatora sadrži kapacitete namota i određene međuinduktivitete. Dok se kapaciteti namota mogu jednostavno proračunati sukladno poglavlju 3. za proračun međuinduktiviteta transformatora na visokim frekvencijama praktički ne postoji odobrena znanstveno - istraživačka metoda. Dokumentirani su određeni pokušaji [59]. U praksi se uglavnom koriste kratka specifična ispitivanja koja se temelje na potvrđenim tehnikama estimacije parametara nadomjesnog modela. S druge pak strane, za frekvencije iznad 10 kHz, magnetski krugovi su praktički linearni [56]. Iz toga razloga prilikom istraživanja sklopnih prenapona, simulacijsko modelirani uređaji se mogu promatrati kao linearne komponente. Ova spoznaja omogućava primjenu metoda iz teorije linearnih sustava. Isto tako, kada god postoji točan fizički model potrebno ga je koristiti. Međutim, to nije uvijek slučaj posebno u istraživanju kvarova. U takvim slučajevima, mjerni rezultati dobiveni na fizičkom modelu će generirati i proizvesti potreban simulacijski model. Kako bi se utvrdili parametri kao što su kapaciteti namota ili međuinduktiviteti između VN i NN namota fizičkog modela potrebna je prilagodba ulazne impedancije transformatora stvarnim mjernim podacima. Dakle, ukoliko se razvija simulacijski model, moraju se uzeti u obzir specifični aspekti svake simulacijske komponente posebno. Simulacijski model

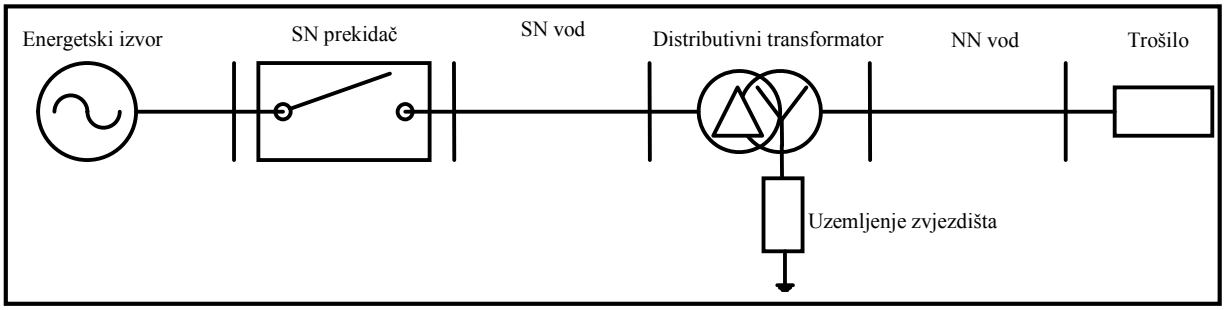
prosječne realne komponente korišten u testnoj mreži razvijen je i testiran sukladno izmjerenim frekvencijskim karakteristikama prosječnog fizičkog modela.

U ovome podpoglavlju će biti prikazana testna simulacijska mreža sa odabranim simulacijskim komponentama. Prvo će biti prikazani implementirani simulacijski modeli komponenata koji se temelje na matematičkim modelima opisanim u poglavlju 3. Navedeni prikazi komponenata će biti popraćeni detaljnim opisima. Nadalje, na razvijenoj simulacijskoj testnoj mreži će biti istraživane optimalne mrežne konfiguracije modeliranih elemenata kruga. Sve preostale simulacijske konfiguracije će biti dodatno opisane i pojašnjene. Osnovni kriterij odabira optimalne konfiguracije testne mreže je utjecaj na visinu sklopnog prenapona. Drugo, specifičan mehanizam kontrole visine sklopnog prenapona pomoću odabranog distributivnog transformatora u krugu opterećenja će biti detaljno obrazložen. Mehanizmi generiranja sklopnih prenapona u radno - induktivnom krugu su naveliko istraživani [26]. U tim slučajevima dobiveni virtualni rezultati visine amplitude sklopnog prenapona ovise o kalibriranim karakteristikama radno – induktivnog opterećenja, voda, distributivnog transformatora i prekidača. Pokazat će se da u tim situacijama efekt putujućeg vala na sekundarnoj strani transformatora skoro udvostručuje amplitudu pogonskog napona. Dakle, amplituda sklopnog prenapona snažno ovisi o frekvencijskoj karakteristici impedancije transformatora. Štoviše, određeni tipovi distributivnih transformatora štite sekundarni krug transformatora od sklopnih prenapona uzrokovanih uklopom prekidača na primarnoj strani transformatora. Sklopni prenaponi koji proizlaze iz uklopa prekidača, za krug opterećenja ne predstavlja nikakav problem izolaciji trošila. Simulacijskim testiranjem ustanovljeno je da samo višestruko okidanje prekidača eventualno može proizvesti opasan sklopni prenapon za krug opterećenja. Istraživanjem na testnoj simulacijskoj mreži je dodatno otkriveno koji uvjeti moraju biti ispunjeni da se pojave relativno vrlo visoki prenaponi. Pitanje je koja konfiguracija mreže može za posljedicu imati povećani rizik od pojave prijelaznog prenapona određenog sklopnog tipa. Pod konfiguracijom mreže misli se na kombinaciju dužine VN i NN voda, visine impedancije transformatora i vrijednosti opterećenja. Treće, na koji način grafičko sučelje razvijeno i korišteno u Matlab - SimPowerSystemu pomaže u odabiru optimalnog konfiguracijskog kruga te u skladu s tim je moguće predviđanje karakteristike sklopnih prenapona. Ishodi računalnih istraživanja će biti potvrđeni kombinacijom laboratorijskog mjerenja, analitičkog i numeričkog proračuna.

Simulirana mreža se sastoji od modela krutog nadomjesnog izvora, modela sklopnog prekidača, modela VN električnog voda, VF modela distributivnog transformatora te modela radno – induktivnog opterećenja. Nominalni pogonski napon iznosi 10 kV. Za analizu

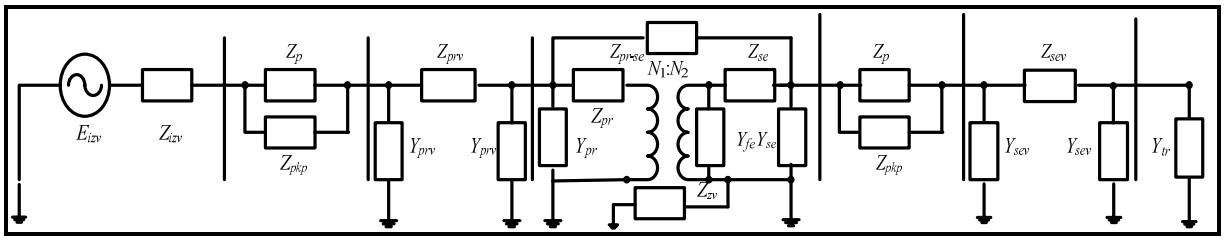
osjetljivosti različitih sklopnih događaja prvi korak je razvoj simulacijskog modela testne mreže sa grafičkim sučeljem. Na osnovu direktnih ulaznih podataka dobivenih iz dostupnih ispitnih izvještaja, dodatnih kratkih simulacijskih testnih ispitivanja, IEEE standarda i mjerenja u nastavku su proračunati i iskazani potrebni dodatni ulazni parametri za simulacijske modele komponenata. U nastavku će biti dan detaljni prikaz odabira ulaznih parametara simulacijskog modela i parametriranja simulacijskog postupka. Tipični transformatorski ispitni izvještaji dobiveni su od proizvođača te se koriste za određivanje ulaznih simulacijskih parametara. Ulazni parametri se direktno ili indirektno unose u simulacijske modele komponenata testne mreže. Pri tome, dodatni kratki proračuni i estimacija parametara su potrebni da bi se dobili preostali indirektni ulazni parametri potrebni za simulacijsko modeliranje komponenata. Prilikom proračuna ulaznih parametara koristila se teorija koncentriranih parametara. Ukoliko se želi istražiti frekvencijski uvjetovan efekt željezne jezgre na visinu i trajanje sklopnog prenapona potrebno je provesti postupak razdvajanja gubitaka zbog vrtložnih struja od ukupnih histereznih gubitaka [59].

Istraživana jednofazna mreža za analizu utjecaja SN i NN kruga transformatora na karakteristiku sklopnog prenapona prikazana je na slici 4.9.



Slika 4.9. Jednofazni dijagram za istraživanje utjecaja primarnog i sekundarnog kruga transformatora na karakteristiku sklopnog prenapona

Slika 4.10. ilustrira reprezentativne modele komponenata jednofazne nadomjesne testne mreže za istraživanje utjecaja različitih konfiguracija primarnih i sekundarnih krugova transformatora na karakteristiku sklopnog prenapona. Temelji se na predhodno proračunatim koncetriranim parametrima modela komponenti elektroenergetske mreže. Ilustrirani simulacijski modeli komponenata prikazani su odgovarajućom impedancijom ili admitancijom. Korišteni model elektroenergetske mreže za potrebe doktorske disertacije proizlazi iz poznatih matematičkih modela pojedinih komponenti.



Slika 4.10. Jednofazna ekvivalentna mreža za istraživane utjecaja konfiguracije primarnih i sekundarnih krugova transformatora na karakteristiku sklopnog prenapona

gdje je: E_{izv} nadomjesni Theveninov napon krute mreže u [kV], Z_{izv} nadomjesna Theveninova impedancija krute mreže u [Ω], Z_p nadomjesna impedancija stanja prekidača u [Ω], Z_{pkp} nadomjesna impedancija titrajnoga SN ili NN kruga prekidača u [Ω], Z_{prv} nadomjesna impedancija SN voda u [Ω], Y_{prv} nadomjesna admitancija SN voda u [S], Z_{pr} nadomjesna impedancija SN namota transformatora u [Ω], Z_{se} nadomjesna impedancija NN namota transformatora u [Ω], Z_{pr-se} nadomjesna impedancija između SN i NN namota transformatora u [Ω], Y_{pr} nadomjesna admitancija SN namota transformatora u [S], Y_{se} nadomjesna admitancija NN namota transformatora u [S], Y_{se} nadomjesna admitancija željezne jezgre transformatora u [S], Z_{zv} - nadomjesna impedancija zvjezdišta transformatora u [Ω], Z_{sev} nadomjesna impedancija NN voda u [Ω], Y_{sev} nadomjesna admitancija NN voda u [S] i Y_{tr} ukupna nadomjesna admitancija opterećenja u [S].

4.4.1. Simulacijsko modeliranje komponenata distributivne mreže u Matlab – SimPowerSystemsu

Dakle, Matlab – SimPowerSystems pruža široku biblioteku razvijenih simulacijskih komponenata u svrhu modeliranja i simulacije elektroenergetskih i industrijskih dinamičkih sustava. Između ostaloga uključuje AC i DC modele složenih električnih strojeva i pogona, fleksibilne izmjenične sustave prijenosa električne energije (engl. FACTS) i fleksibilne modele vjetroagregata. U biblioteci Matlab – SimPowerSystemsa između ostaloga mogu se pronaći i razvijeni modeli komponenata kao što su modeli energetskih učinskih ventila preko kojih se može analizirati njihov dinamički učinak uzrokovan sklopnim događajem. Razvijeni simulacijski modeli komponenata uglavnom se koriste za modeliranje i simulaciju proizvodnje, prijenosa, distribucije, transformacije i potrošnje električne energije. Posebno razvijeni simulacijski blokovi koriste u području analize dinamike prijelaznih pojava. Da bi se poboljšalo korisničko iskustvo, Matlab – SimPowerSystems omogućava i razvoj specijalnih

korisničkih grafičkih blokova koji se mogu koristiti za istraživanje slučajeva međudjelovanja elektromagnetskih pridodanih krugova testnoj simulacijskoj mreži. Primjerice, pri tome se blok simulacijskog modela električnoga luka može modelirati kao strujno kontrolirani naponski izvor ili konstantan naponski izvor. Poznato je iz teorije električnih sklopnih aparata da strujno – naponska karakteristika električnoga luka može biti zavisna ili nezavisna. To pak ovisi o korištenoj tehnologiji.

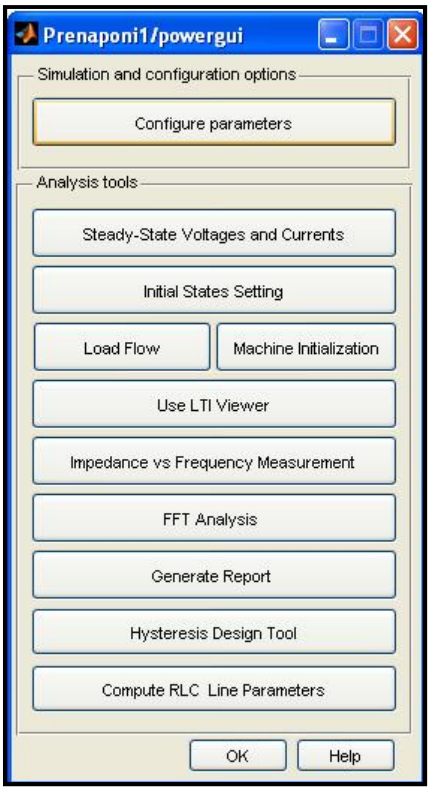
U sljedećim odjeljcima, energetski izvor, distributivni transformator, distributivni vod, prekidač bit će simulacijski modelirani s ciljem istraživanja karakteristike sklopnog prenapona. U tu svrhu modeliran je jednostavan energetski sustav koji će poslužiti za demonstraciju simulacijskih rezultata. Intencija je razviti što jednostavniji simulacijski model testne mreže na kojem se efikasno mogu primjenjivati različite tehnike modeliranja za različite istraživačke slučajeve, a da se pri tome ne gubi na točnosti modela. U svrhu prijenosa praktičnih smjernica tehnike modeliranja bit će između ostaloga demonstriran i prezentiran istraživački slučaj isklopa opterećenog transformatora. Posebno će biti istaknuta usporedba dominantnih simulacijskih rezultata dobivenih istraživanjem različitih utjecaja. Nadalje, bit će opisano na koji se način određuju i utvrđuju koncentrirani parametri simulacijske komponente. Pri tome će specifični proračun svake komponente biti posebno raspravljen te uzet u obzir.

4.4.1.1. Simulacijsko okruženje za Matlab – SimPowerSystems modele

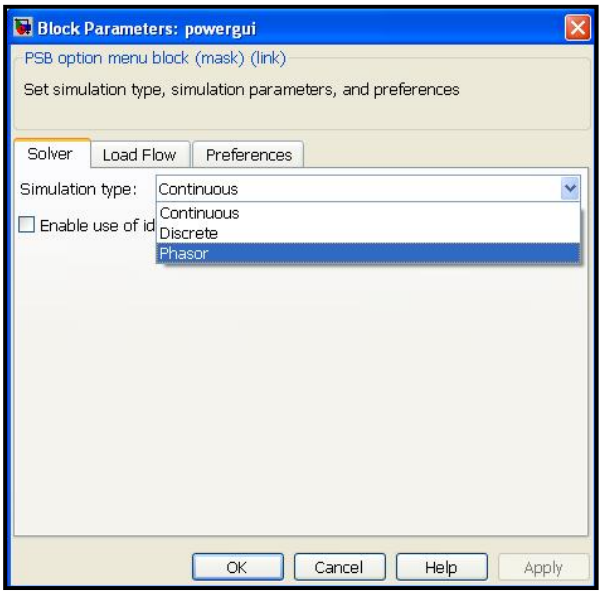
Razvijeni Powergui simulacijski blok omogućuje odabir i konfiguraciju implementiranih metoda za proračun dinamičkih elektroenergetskih i industrijskih mreža. Između ostaloga na raspolaganju su kontinuirane i diskretne metode. Kontinuirane metode koriste varijabilni korak simulacije dok diskretne metode koriste fiksni korak simulacije. Simulacijsko okruženje u Matlab - SimPowerSystemsu omogućava i analizu elektroenergetskih mreža u fazorskom području. Blok Powergui je neophodan za simulaciju bilo kojeg jednostavnog ili složenog SimPowerSystems modela. SimPowerSystems simulacijski okoliš se koristi za pohranjivanje ekvivalentnih Simulink modela koji su predstavljeni reprezentativnim diferencijalnim jednadžbama.

S druge pak strane, Powergui blok je realiziran i implementiran u obliku grafičkog sučelja (engl. GUI). Grafičko sučelje nam omogućava pristup numeričkim alatima i funkcijama koji mogu biti korisni prilikom analize dinamičkih stanja Matlab – SimPowerSystems modela (Slika 4.11.). Slika 4.12. prikazuje konfiguraciju i parametriranje

simulacijskog postupka. Neke od korištenih integriranih alata i funkcija prikazuju slike od 4.13. do 4.15. Konfiguriranje i parametriranje različitih opcija digitalnih alata će biti detaljnije pojašnjeno prilikom analize isklopa opterećenog transformatora. Prednosti ovakvog pristupa su u tome da se na brži i jednostavniji način prikazuju rezultati simulacije.

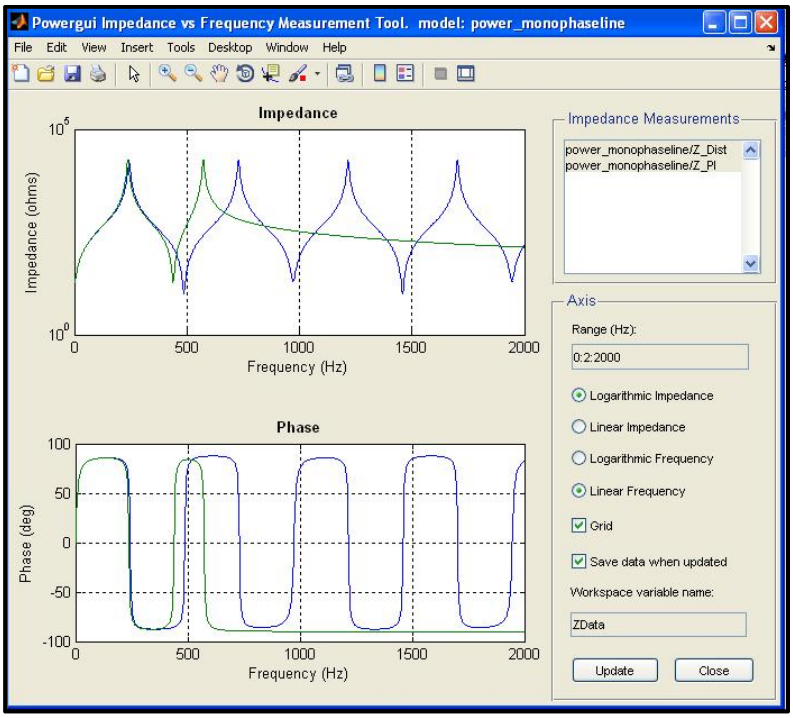


Slika 4.11. Simulacijsko parametriranje i konfiguriranje bloka Powergui



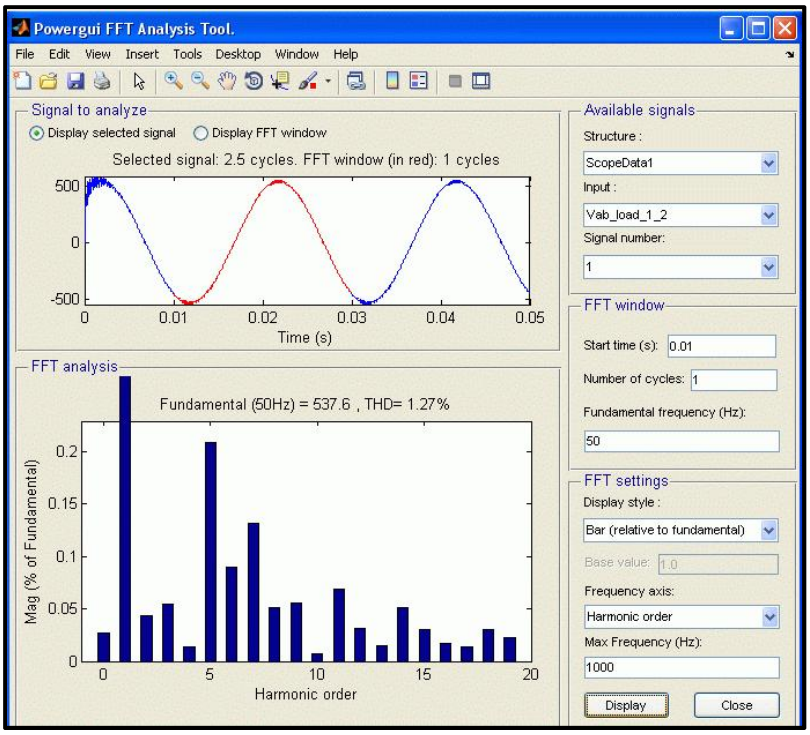
Slika 4.12. Podešavanje parametara i opcija simulacijskog postupka posredstvom bloka Powergui

U svrhu sinteze simuliranih komponenata, može poslužiti digitalni alat za frekvencijsku analizu mjernih ili simuliranih impedancija komponente. Kako bi se utvrdili ulazni koncentrirani parametri kao što su nadomjesni kapaciteti namota potrebno je izvršiti prilagodbu simulacijske impedancije transformatora. Kalibracijom simulacijske karakteristike impedancije tereta, voda, distributivnog transformatora i prekidača moguće je dobiti karakteristiku impedancije komponente što bliže karakteristici realne komponente. Slika 4.13. prikazuje amplitudno – fazni odziv koji se dobije na 10π koncentriranom simulacijskom modelu voda. Promatrano frekvencijsko područje je 2kHz.

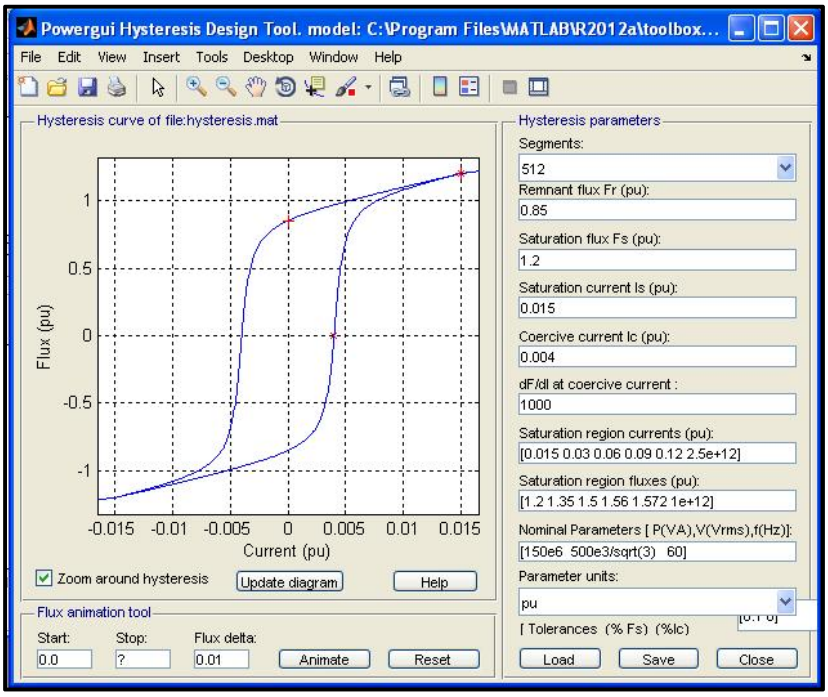


Slika 4.13. Grafičko sučelje za frekvencijsku analizu nadomjesnih mjerenih i simulacijskih impedancija komponente

Grafičko sučelje za FFT analizu prikazano na slici 4.14. se između ostaloga može koristiti za analizu karakteristike sklopnog prenapona. Dostupna simulirana karakteristika sklopnog slučaja privodi se GUI sučelju za FFT analizu posredstvom simulacijskog blok modela Fourier. Digitalni alat sa pripadnim opcijama prikazan na slici 4.15. će se koristiti za prikaz dizajna petlje histereze distributivnih transformatora.



Slika 4.14. Grafičko sučelje za FFT analizu karakteristike sklopnog prenapona



Slika 4.15. Grafičko sučelje za dizajn petlje histereze modeliranog transformatora

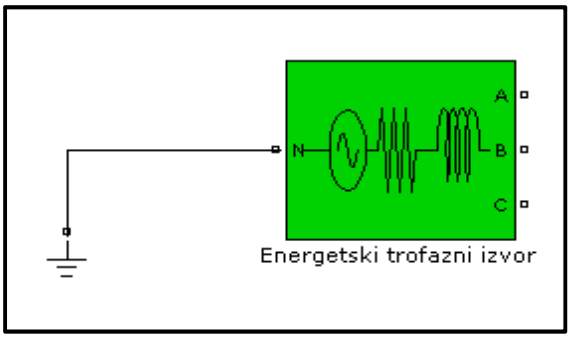
4.4.1.2. Nadomjesni naponski izvor

Implementirana simulacijska komponenta trofaznog izvora predstavlja uravnoteženi trofazni izvor napona sa ulaznom *RL* impedancijom. Tri jednofazna izvora su spojena u *Y* s

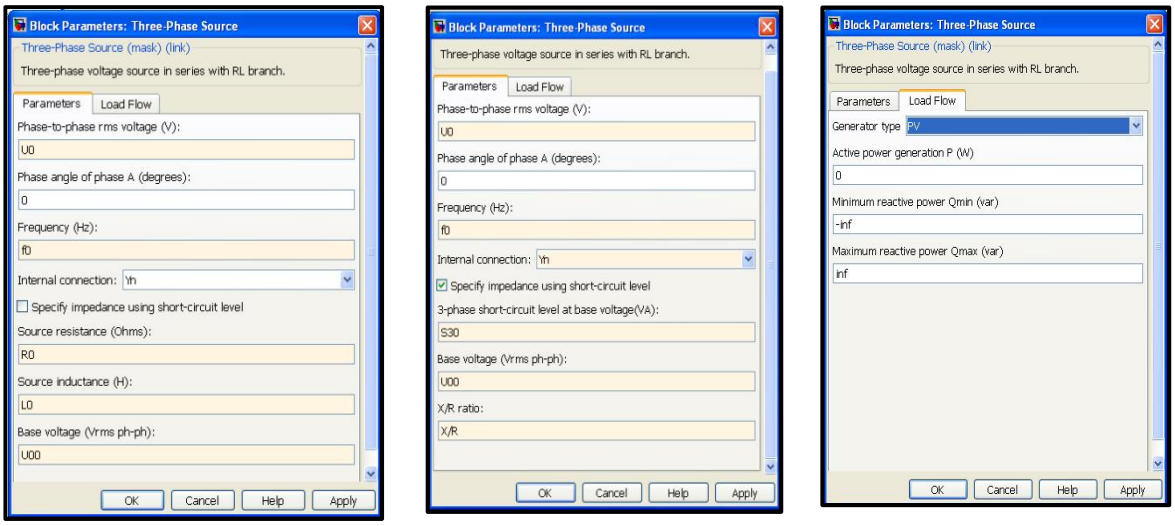
posebno dostupnim neutralnim priključkom koji omogućuje vanjsko uzemljenje. Simulacijski model trofaznog izvora je modeliran da generira pozitivnu sekvencu faznih kutova. Način tretiranja uzemljenja trofaznog izvora se podešava prilikom simulacijskog konfiguriranja. Simulacijski model komponente omogućava lokalno direktno uzemljenje ili lokalno izolirano uzemljenje. Za potrebe doktorske disertacije zvjezdište simetričnoga trofaznog izvora je dostupno kroz poseban terminal te je direktno uzemljeno. Način parametriranja simulacijske komponente je takav da se može navesti djelatni otpor i induktivitet bilo izravno unošenjem vrijednosti ulazne varijable R i L ili pak neizravno navođenjem razine napona trofaznog kratkog spoja, baznog napona i omjera induktiviteta i radnoga otpora X / R izvora. Tablica 4.2. daje popis ulaznih parametara simulacijske komponente pri frekvenciji od 50 Hz. Slika 4.17. prikazuje načine i mogućnosti simulacijskog parametriranja komponente. U narednim istraživanjima će se koristiti simulacijska kartica prema slici 4.17a. Odabrani odgovarajući ulazni parametri će se pridijeliti simulacijskom modelu izvora posredstvom posebno razvijene m - skripte. Bazna efektivna vrijednost linijskog napona jednaka je nazivnom linijskom efektivnom naponu.

Tablica 4.2. Ulazni parametri nadomjesnog izvora

Ulazni parametri energetskog izvora	Oznaka ulaznog parametra	Jedinica ulaznog parametra
Pogonska efektivna vrijednost linijskog napona	U_0	[V]
Fazni kut trofaznog izvora faze A	φ_0	[°]
Pogonska frekvencija	f_0	[Hz]
Unutrašnji djelatni otpor izvora	R_0	[Ω]
Unutrašnji induktivitet izvora	L_0	[H]
Bazna efektivna vrijednost linijskog napona izvora	U_{00}	[V]



Slika 4.16. Blok simulacijskog modela nadomjesnog izvora



a) b) c)

Slika 4.17. Ulazni parametri nadomjesnog izvora, a) izravno parametriranje, b) neizravno parametriranje, c) parametriranje načina rada trofaznog izvora

Gledano iz položaja SN distribucijskog postrojenja gdje se nalazi 10 kV sabirnica, elektroenergetski distribucijski sustav je prikazan i opisan Theveninovom naponskim ekvivalentnim izvorom. Na temelju poznate ukupne aktivne i reaktivne snage sabirnice numerički se proračunava omjer ukupnog radnog i induktivnog otpora krute mreže. Na temelju proračunatog ukupnog radnog i induktivnog otpora krute mreže, numerički se proračunava iznos nadomjesnog Theveninovog naponskog izvora. Ulazni parametri simulacijskog blok modela nadomjesnoga izvora u kombinaciji sa Powergui blokom koriste se isključivo za potrebe inicijalizacije simulacijskih modela komponenata. Sam blok Powergui nema utjecaja na simulacijske modele komponenata i na učinak odabranih numeričkih metoda. Kontrolirane referentne vrijednosti amplitude napona i kuta se dodjeljuju ovisno o odabranom programu rada izvora napona. Simulacijski blok model ima tri programa rada. To su *PV*, *PQ* i kontrolirani program rada. Tip načina rada za potrebe realizacije doktorske disertacije je podešen na kontrolirani sa referentnom sabirnicom (engl. Swing). Referentna sabirnica kontrolira amplitudu i fazni kut pogonskog napona koristeći numeričku analizu tokova snaga. Razlika između navedenih programa je u tome što se mogu definirati pojedine minimalne i maksimalne granice djelatne i jalove snage te promjene efektivne vrijednosti linijskog napona.

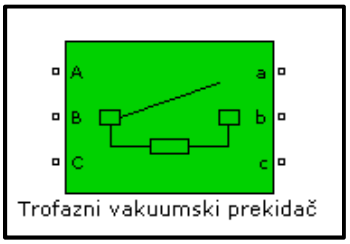
4.4.1.3. Trofazni prekidač

Simulacijsko modeliranje prekidača (engl. CBs - Circuit breaker) proizlazi iz orijentacije stanja. Razmatranje svih mogućih radnih stanja je čak i važnije nego detaljni fizički model prikazan za svako stanje posebno. Stanja prekidača koja se najviše modeliraju u istraživanim slučajevima su otvoreno stanje, zatvoreno stanje, stanje NF i VF iskrenja između kontakata prekidača, stanje prekidne čvrstoće dielektrika, stanje odgođenog električnog luka, stanje brzine oporavka napona između kontakata vakuumskog prekidača te stanje trenutka rezanja struje kroz prekidač. Posebno se analiziraju tehnike uklopa. Razlikujemo statističko uklapanje te simultano i nesimultano uklapanje trofaznog prekidača. Pri tome, sklopni prijelazni uvjeti analiziranog sklopnog događaja moraju biti što detaljnije i jasnije definirani.

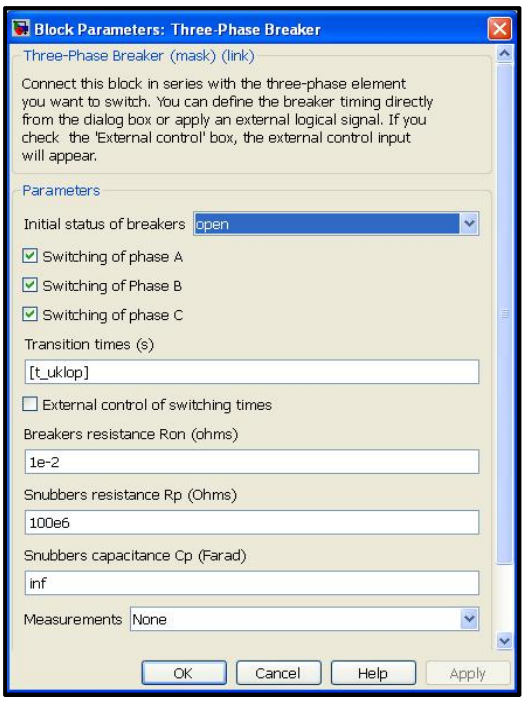
Diskontinuirana stanja analizirana u trenutcima prorade modeliranog prekidača mogu biti rezultat jednog te istog uzroka. Diskontinuirana stanja zabilježena u sklopnim simulacijama mogu prouzročiti numeričku nestabilnost. Primjerice, takva stanja su prijelaz između stanja NF iskrenja u stanje odgođenog električnog luka. Da bi se to izbjeglo korišteni modeli sklopnih stanja prekidača moraju u trenutcima promjene stanja rada imati istu provodljivost.

Implementirani osnovni simulacijski model prekidača je modeliran za temeljna stanja. To su otvoreno i zatvoreno stanje te stanje prekidanja u trenutku prolaska struje kroz nulu. Posebno razvijen i nadograđen podsustav prekidača omogućava kontrolirano vremensko upravljanje prorade prekidača i u trenutcima kada struja ne prolazi kroz nulu (tzv. rezanje struje). Pri tome razlikujemo interni i eksterni način upravljanja simulacijskom komponentom. Koji od programa upravljanja odabrati ovisi isključivo o analiziranom sklopnom slučaju. Primjerice, za realizaciju eksternog upravljanja potrebno je nadograditi izvorni model prekidača dodatnim simulacijskim blokovima. Ukoliko je program upravljanja postavljen kao interni, tada je potrebno definirati vektor uklopnih trenutaka. Za potrebe upravljanja prekidačem potrebno je na posebnom terminalu definirati signal odgovarajućeg sklopnog slijeda. Blok simulacijskog modela prekidača posjeduje i serijsku prigušnu impedanciju. Opremljen simulacijskim okidačem, preklapa trenutačno između uključenog i isključenog položaja. Provodi struju u oba smjera bez pada napona. Modeliran je kao strujni izvor. Slika 4.18. prikazuje blok simulacijskog modela energetskog prekidača. Slika 4.19. prikazuje načine i mogućnosti simulacijskog parametriranja prekidača. Između ostaloga moguće je podesiti početno stanje te broj aktivnih faza prekidača. Korisniku simulacijskog

bloka je u kombinaciji sa trofaznim mjernim blokom dana mogućnost odabira mjerenja napona i struje na ulaznim priključnicama.



Slika 4.18. Blok simulacijskog modela trofaznog prekidača



Slika 4.19. Parametriranje trofaznoga prekidača

Tablica 4.3. Ulazni koncentrirani parametri trofaznog prekidača

Ulazni koncentrirani parametri trofaznog prekidača	Oznaka ulaznog parametra	Jedinica ulaznog parametra
Unutrašnji otpor prekidača u vodljivom stanju	R_{on}	[Ω]
Trenutak uklopa prekidača	t_{uklopa}	[ms]
Trenutak isklopa prekidača	$t_{isklopa}$	[ms]
Prigušni otpor prekidača	R_p	[Ω]
Prigušni kapacitet prekidača	C_p	[F]

Tablica 4.3. daje popis ulaznih parametara simulacijske komponente pri frekvenciji od 50 Hz. Matlab - SimPowerSystems u svojoj biblioteci ne raspolaže sa drugim modelskim tehnologijama izvedbe prekidača (npr. SF6, vakuumski, malouljni). Odabrani odgovarajući

ulazni koncentrirani parametri će se pridijeliti simulacijskom modelu trofaznog prekidača posredstvom posebno razvijene m - skripte.

4.4.1.4. Distributivni SN / NN vod

Implementirani trofazni vod pripada skupini simulacijskih modela voda sa koncentriranim parametrima za razliku od modela voda sa distribuiranim parametrima gdje su djelatni otpori, induktiviteti i kapaciteti ravnomjerno raspoređeni po cijeloj dužini voda. Cjeloviti koncentrirani ulazni parametri voda uzimaju u obzir realne električne i magnetske petlje između sve tri faze voda, kao i električne veze prema zemlji. Ova metoda određivanja ulaznih koncentriranih parametara voda pretpostavlja da su sve tri faze u simetriji.

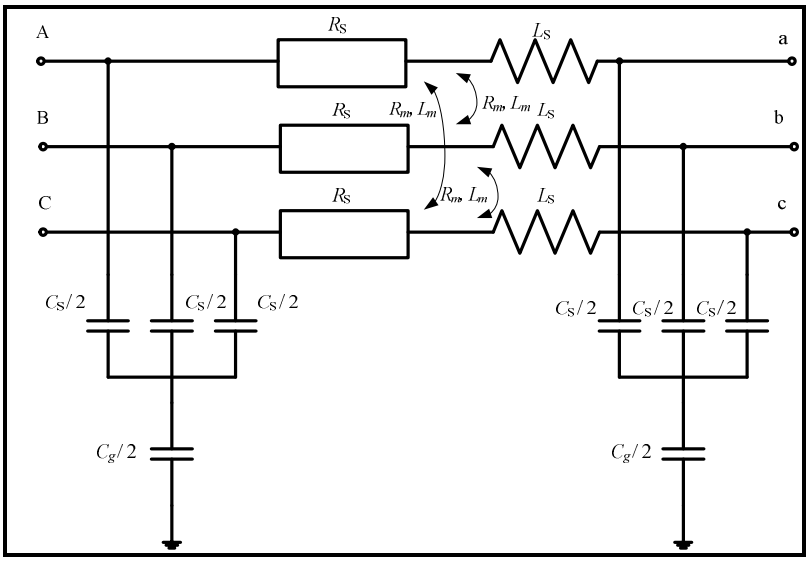
Ukupni koncentrirani fazni i međufazni djelatni otpori (R_s, R_m) te ukupni koncentrirani fazni i međufazni induktiviteti (L_s, L_m) triju povezanih jednofaznih vodova, kao i ukupni koncentrirani fazni i dozemni kapaciteti (C_s, C_g) su proračunati i izvedeni iz simetričnoga direktnog i nultog sustava. Grupe totalnih nadomjesnih parametara voda se proračunavaju pomoću originalnih parametara voda kao što slijedi:

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_1 \cdot l_0 \cdot k_{R1} \\ L_{11} &= L_1 \cdot l_0 \cdot k_{L1} \\ C_{11} &= C_1 \cdot l_0 \cdot k_{C1} \\ R_{10} &= R_0 \cdot l_0 \cdot k_{R0} \\ L_{10} &= L_0 \cdot l_0 \cdot k_{L0} \\ C_{10} &= C_0 \cdot l_0 \cdot k_{C0} \end{aligned} \tag{4.11}$$

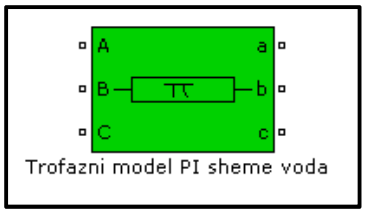
Izvorne grupe ulaznih parametara prijenosnog voda (R_1,R_0), (L_1,L_0) i (C_1,C_0) zadaju se po kilometru dužine voda. Na ovaj način proračunate grupe totalnih ulaznih parametara voda (R_{11},R_{10}), (L_{11},L_{10}) i (C_{11},C_{10}) uzimaju u obzir duljinu voda l_0 u kilometrima te pripadne direktne i nulte hiperbolne korekcijske faktore. Korekcijski hiperbolni faktori k_{R1}, k_{R0}, k_{L1}, k_{L0}, k_{C1}, k_{C0} na kratkim vodovima nemaju utjecaja. Za vodove dulje od 15 km korekcijski faktori se moraju uzeti u obzir da bi se korigirali ukupni parametri voda pri određenoj frekvenciji. Konačni koncentrirani cjeloviti parametri π modela voda su jednoznačno određeni sljedećim relacijama:

$$
\begin{aligned}
R_s &= (2 \cdot R_{11} + R_{10}) / 3 \\
R_m &= (R_{10} - R_{11}) / 3 \\
L_s &= (2 \cdot L_{11} + L_{10}) / 3 \\
L_m &= (L_{10} - L_{11}) / 3 \\
C_s &= C_{11} \\
C_g &= 3 \cdot C_{11} \cdot C_{10} / (C_{11} - C_{10})
\end{aligned}
\tag{4.12}
$$

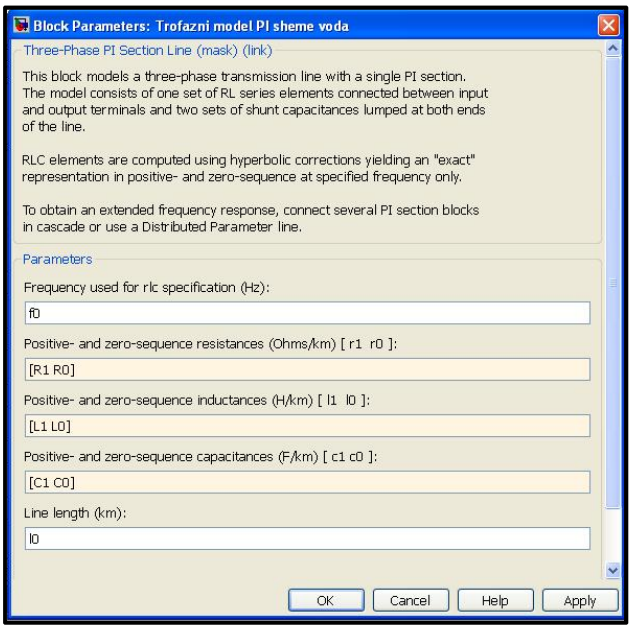
Dakle, simulacijski model voda jednoznačno određuju dvije grupe serijskih koncentriranih elemenata spojenih između ulaznih i izlaznih priključaka te jedna grupa paralelnih koncentriranih nadomjesnih kapaciteta pridodanih distributivnom SN ili NN vodu na svakom kraju. Slika 4.20. prikazuje nadomjesnu mrežu simulacijskog modela voda. Slika 4.21. prikazuje blok simulacijskog modela trofaznog prijenosnog voda. Slika 4.22. prikazuje načine i mogućnosti simulacijskog parametriranja trofaznog distributivnog voda. Između ostaloga moguće je podesiti pogonsku frekvenciju f_0 i dužinu prijenosnog voda l_0. Da bi se dobio prošireni frekvencijski odziv simulacijske komponente, potrebno je spojiti više π simulacijskih modela voda u kaskadni spoj ili upotrijebiti model voda sa distribuiranim parametrima.



Slika 4.20. Nadomjesna mreža simulacijskog modela voda



Slika 4.21. Blok simulacijskog modela SN / NN voda



Slika 4.22. Parametriranje SN / NN voda

Tablica 4.4. Ulazni parametri SN / NN voda

Ulazni koncentrirani parametri energetskog voda	Oznaka ulaznog parametra	Jedinica ulaznog parametra
Direktni djelatni otpor voda	R_1	[Ω / km]
Nulti djelatni otpor voda	R_0	[Ω / km]
Direktni induktivitet voda	L_1	[H / km]
Nulti induktivitet voda	L_0	[H / km]
Direktni fazni kapacitet voda	C_1	[F / km]
Direktni dozemni kapacitet voda	C_0	[F / km]
Duljina voda	l_0	[km]
Pogonska frekvencija voda	f_0	[Hz]

Tablica 4.4. daje popis ulaznih parametara simulacijske komponente voda pri odgovarajućoj pogonskoj frekvenciji. Odabrani odgovarajući ulazni koncentrirani parametri će se pridijeliti simulacijskom modelu voda posredstvom posebno razvijene m - skripte. Tablica 4.5. daje popis proračunatih parametara simulacijske komponente pri odgovarajućoj

pogonskoj frekvenciji. Tablica 4.5. će se koristiti za potrebe analitičkog proračuna isklopa opterećenog transformatora.

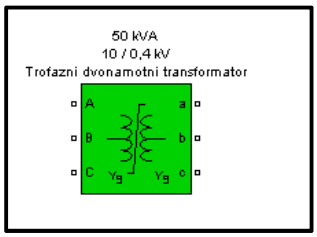
Tablica 4.5. Proračunati koncentrirani parametri SN / NN voda

Proračunati koncentrirani parametri energetskog voda	Oznaka proračunatog parametra	Jedinica proračunatog parametra
Fazni djelatni otpor voda	R_s	[Ω / km]
Međufazni djelatni otpor voda	R_m	[Ω / km]
Fazni induktivitet voda	L_s	[H / km]
Međufazni induktivitet voda	L_m	[H / km]
Fazni kapacitet voda	C_s	[F / km]
Fazni dozemni kapacitet voda	C_g	[F / km]
Duljina prijenosnog voda	l_0	[km]
Pogonska frekvencija voda	f_0	[Hz]

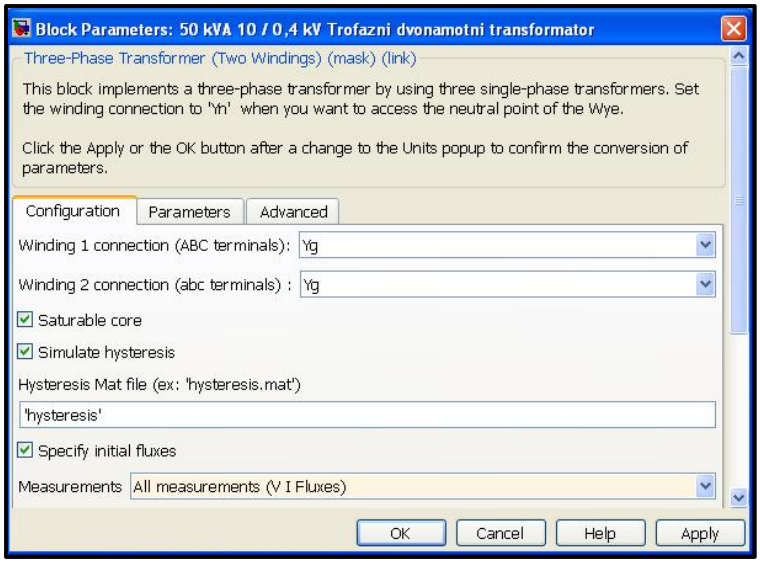
4.4.1.5. VF model trofaznog dvonamotnog distributivnog transformatora

Implementirani simulacijski blok je modeliran odgovarajućim spajanjem tri jednofazna transformatora. Implementirani model trofaznog dvonamotnog distributivnog transformatora temelji se na matematičkom modelu jednofaznog transformatora koji je prikazan u podpoglavlju 3.5. Korištenjem ovoga bloka moguće je izvršiti simulacijska testiranja u nisko frekvencijskom području. U svrhu analize sklopnog prenapona u višim frekvencijskim područjima nadograđen je postojeći trofazni dvonamotni transformator dodatnim električnim vezama. Kao što znamo električne veze pri visokim frekvencijskim područjima postaju sve snažnije u odnosu na magnetske veze. Poznato je da što je frekvencija sklopnog prenapona veća to je utjecaj glavne magnetske veze sve manji. Prijelazno ponašanje trofaznoga dvonamotnog transformatora u niskofrekventnom području je dominantno pod utjecajem glavnog magnetskoga polja. S druge strane, u MHz području prijelazno ponašanje je dominantno pod utjecajem glavnih električnih veza. Dakle, da bi se proširilo frekvencijsko područje nadograđen je implementirani simulacijski blok transformatora s glavnim električnim koncentriranim komponentama sukladno opisu u podpoglavlju 3.5. Dominantni električni nadomjesni kapaciteti su uzeti u obzir bez obzira što je njihova vrijednost kod većine distributivnih transformatora reda veličine pF (vidi tablicu 4.1.). Kratki proračun rasipnih induktiviteta simuliranog bloka transformatora temelji se na izvornim podatcima dobivenim testnim eksperimentalnim protokolom. Slika 4.23. prikazuje blok simulacijskog

modela trofaznog dvonamotnog transformatora. Slika 4.24. i 4.25. prikazuju konfiguriranje odnosno parametriranje simulacijskog bloka trofaznog dvonamotnog transformatora.



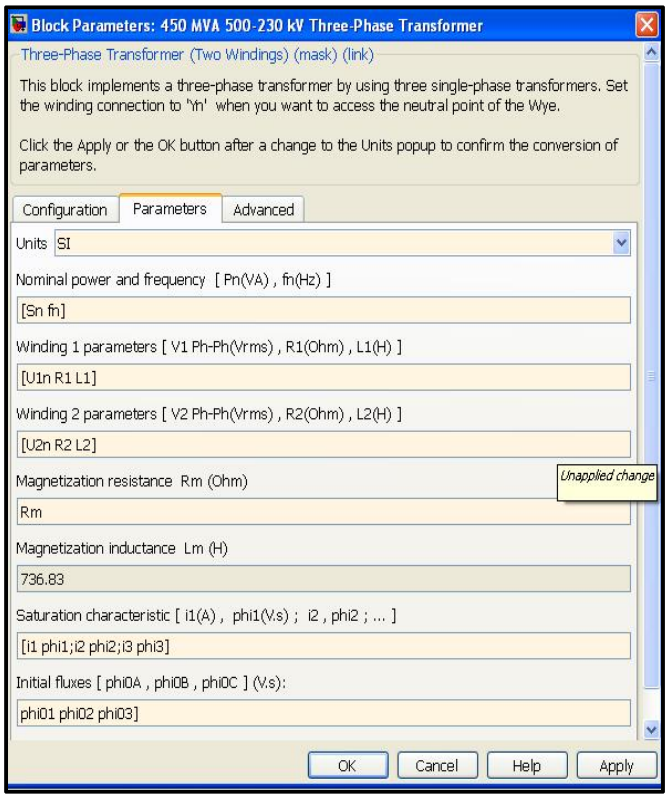
Slika 4.23. Blok simulacijskog modela dvonamotnog trofaznog transformatora



Slika 4.24. Konfiguracija namota i petlje histereze trofaznog dvonamotnog transformatora

Između ostaloga blok simulacijskog modela omogućava simuliranje efekta zasićenja željezne jezgre. Prethodno je potrebno odabrati model karakteristike zasićenja željezne jezgre umjesto krivulje petlje histereze. Petlja histereze se pridjeljuje odgovarajućem transformatoru pomoću skriptne datoteke ili automatski. Ovako definirana petlja histereze odnosi se na jedan stup trofaznog dvonamotnog transformatora. Ne treba zaboraviti da su modelirane faze dvonamotnog transformatora simetrične. Također, na dvonamotnom trofaznom simulacijskom transformatoru moguće je konfigurirati različite spojeve zvjezdišta i grupa spoja s ciljem simuliranja utjecaja na karakteristiku sklopnog prenapona. Simulacijski blok omogućuje slijedeće načine tretiranja zvjezdišta SN i NN namota transformatora: dostupno neutralno zvjezdište, interno direktno uzemljeno zvjezdište, vanjsko uzemljeno zvjezdište preko pridodane nadomjesne impedancije uzemljenja zvjezdišta. Odgovarajuća koncentrirana nadomjesna impedancija uzemljenja zvjezdišta transformatora bit će pridodana simulacijskom modelu posredstvom posebno razvijene m - skripte. U skladu s tim, simulacijski blok omogućuje podešavanje uglavnom svih kombinacija grupa spojeva SN i NN namota

transformatora koje dominiraju u elektroenergetskoj i industrijskoj primjeni. Dakako da je u kombinaciji s mjernim virtualnim simulacijskim blokom dostupno i mjerenje električnih veličina transformatora u svrhu daljnje analize. Blok simulacijskog modela trofaznog dvonamotnog transformatora omogućava istovremeno ili pojedinačno mjerenje faznog napona, triju faznih struja te struju magnetiziranja i ulančanog toka na trima namotima. Blok simulacijskog modela baziran na koncentriranim parametrima ne posjeduje interne priključne točke za mjerenje napona i struje u transformatoru iz čega proizlazi da nije moguće estimirati interne rezonancijske prenapone. Mjerenje trofaznih i jednofaznih napona, struje i ulančanih tokova posredstvom odgovarajućih simulacijskih blokova ekvivalentno je mjerenju koje bi se izvelo spajanjem fizičkih mjernih instrumenata unutar promatranih blokova.



Slika 4.25. Parametriranje namota i petlje histereze trofaznog dvonamotnog transformatora

Tablica 4.6. daje popis ulaznih parametara simulacijske komponente trofaznoga dvonamotnog transformatora pri odgovarajućoj nominalnoj frekvenciji. Odabrani odgovarajući ulazni koncentrirani parametri će se pridijeliti simulacijskom modelu trofaznoga dvonamotnog transformatora posredstvom posebno razvijene m - skripte. Posebno će biti modelirani koncentrirani ekvivalentni nadomjesni kapaciteti faze i međufaze SN i NN namota. Odabrani odgovarajući ulazni koncentrirani nadomjesni kapaciteti će se pridijeliti

simulacijskom modelu trofaznoga dvonamotnog transformatora posredstvom posebno razvijene m - skripte.

Tablica 4.6. Ulazni parametri trofaznog dvonamotnog transformatora

Ulazni parametri trofaznog dvonamotnog transformatora	Oznaka proračunatog parametra	Jedinica proračunatog parametra
Nazivna prividna snaga trofaznog dvonamotnog transformatora	S_n	[kVA]
Efektivna vrijednost linijskog napona SN namota	U_{1n}	[kV]
Efektivna vrijednost linijskog napona NN namota	U_{2n}	[kV]
Efektivna vrijednost linijske struje SN namota	I_{1n}	[A]
Efektivna vrijednost linijske struje NN namota	I_{2n}	[A]

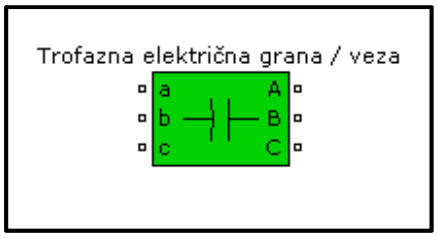
Tablice 4.6. i 4.7. će se koristiti za potrebe analitičkog proračuna isklopa opterećenog distributivnog transformatora.

Tablica 4.7. Proračunati koncentrirani parametri trofaznog dvonamotnog transformatora

Proračunati koncentrirani parametri trofaznog dvonamotnog transformatora	Oznaka proračunatog parametra	Jedinica proračunatog parametra
Fazni djelatni otpor primarnog kruga SN namota	R_1	[Ω]
Fazni djelatni otpor sekundarnog kruga NN namota	R_2	[Ω]
Fazni induktivitet primarnog SN namota	L_1	[H]
Fazni induktivitet sekundarnog NN namota	L_2	[H]
Međuinduktivitet između SN / NN namota i željezne jezgre	L_m	[H]
Magnetski otpor željezne jezgre transformatora	R_m	[Ω]

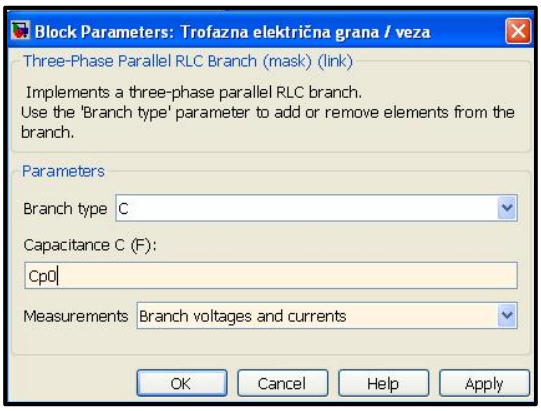
4.4.1.6. Ekvivalentni nadomjesni kapaciteti SN i NN namota trofaznog transformatora

Idealne ili realne trofazne električne veze su implementirane posredstvom nadomjesnog ekvivalentnog kapaciteta. Simulacijski blok trofazna elektromagnetska grana karakterizira paralelan spoj jednog djelatnog otpora, kapaciteta i induktiviteta. Na korisniku je da odluči koji od simulacijskih elemenata komponente će se koristiti. Stanje simulacijskog modela bloka se mijenja ovisno o aktiviranim nadomjesnim elementima. Samo aktivirani elementi su prikazani u ikoni bloka. Slika 4.26. prikazuje blok simulacijskog modela ekvivalentnog nadomjesnog kapaciteta SN i NN namota trofaznog transformatora.



Slika 4.26. Blok simulacijskog modela trofazne električne grane

Slika 4.27. prikazuje parametriranje simulacijskog bloka trofazne električne grane.



Slika 4.27. Parametriranje simulacijskog bloka paralelne trofazne električne veze

Na ovaj način su simulacijski modelirani koncentrirani nadomjesni kapaciteti faze i međufaze SN i NN namota transformatora. Odabrani odgovarajući ulazni nadomjesni kapaciteti električne grane će biti pridijeljeni izvornom simulacijskom modelu trofaznoga dvonamotnog transformatora posredstvom posebno razvijene m - skripte. Dakako da je u kombinaciji s mjernim virtualnim simulacijskim blokom dostupno i mjerenje napona i struje električne grane u svrhu daljnje analize. Dokazano je da struja kroz električnu kapacitivnu vezu raste što je karakteristika sklopnog prenapona strmija [59].

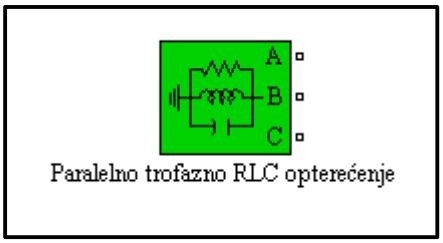
Tablica 4.8. Ulazni koncentrirani parametri pridodanih električnih grana transformatora

Ulazni koncentrirani parametri trofazne električne grane transformatora	Oznaka proračunatog parametra	Jedinica proračunatog parametra
Fazni nadomjesni dozemni kapaciteti SN namota	C_{p0}	[pF]
Fazni nadomjesni dozemni kapaciteti NN namota	C_{s0}	[pF]
Nadomjesni međufazni kapaciteti SN namota	C_{p12}	[pF]
Nadomjesni međufazni kapaciteti NN namota	C_{s12}	[pF]
Fazni nadomjesni međunamotni kapacitet između SN i NN namota	C_{ps1}	[pF]

Tablica 4.8. daje popis ulaznih parametara simulacijske komponente električna grana. Odabrani odgovarajući ulazni koncentrirani nadomjesni kapaciteti će biti pridijeljeni simulacijskom modelu trofaznoga dvonamotnog transformatora posredstvom posebno razvijene m - skripte.

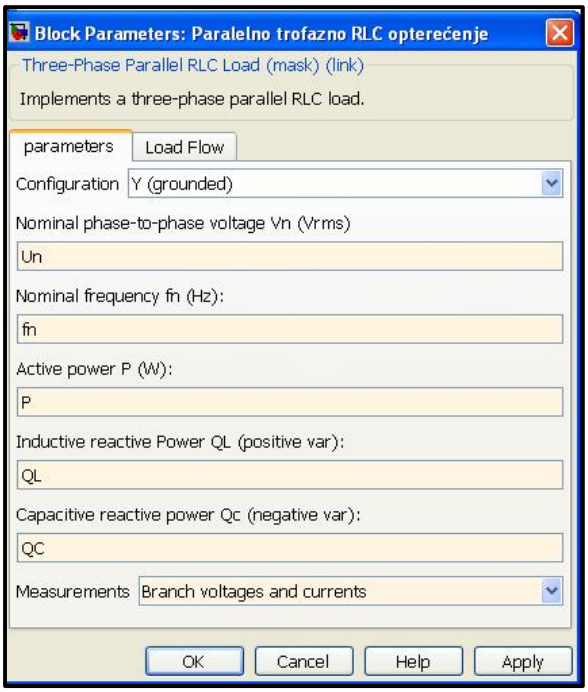
4.4.1.7. Simulacijski model opterećenja NN sabirnice

Implementirani trofazni uravnotežni simulacijski model opterećenja realiziran je kao paralelni spoj *RLC* elemenata. Iznad određene pogonske frekvencije simulacijski model opterećenja virtualno radi u režimu konstantnog prividnog otpora. Aktivne i reaktivne snage opterećenja proporcionalne su kvadratu priključenoga pogonskog napona. Stanje simulacijskog modela bloka se mijenja ovisno o aktiviranim nadomjesnim elementima. Samo aktivirani elementi su prikazani u ikoni bloka. Oni elementi koji su predpodešeni na vrijednost nula nisu prikazani u ikoni bloka. Slika 4.28. prikazuje blok simulacijskog modela nadomjesnog trofaznoga opterećenja.



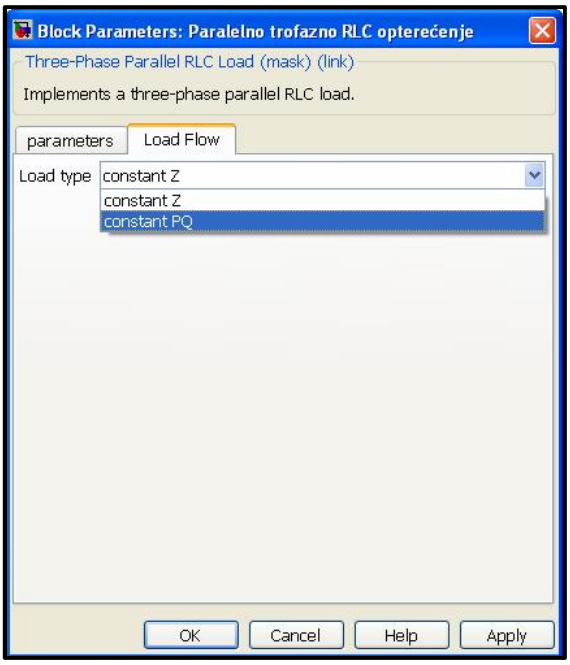
Slika 4.28. Blok simulacijskog modela nadomjesnog trofaznog opterećenja

Kombiniranjem aktivnih i reaktivnih snaga opterećenja mijenja se faktor snage i karakter opterećenja. Karakter opterećenja može biti radno – induktivni ili radno – kapacitivni. Slika 4.29. prikazuje parametriranje i konfiguriranje simulacijskog bloka nadomjesnog trofaznog opterećenja s koncentriranim parametrima.



Slika 4.29. Parametriranje simulacijskog bloka parametri nadomjesnog trofaznog opterećenja

U simulacijskoj kartici parametri moguće je konfigurirati standardne načine uzemljenja trofaznog opterećenja (interno uzemljenje, direktno eksterno uzemljenje, izolirano uzemljenje te spoj trošila u trokut). Blok simulacijskog modela se ažurira ovisno o odabranom spoju zvjezdišta. U simulacijskoj kartici tokovi snaga konfigurira se program rada simulacijskog modela. S druge pak strane želi li se uzeti u obzir efekt sabirnice mora se u seriju sa simulacijskim blokom opterećenje spojiti blok simulacijskog modela serijska trofazna električna grana. Pojedini istraživači u istraživanim sklopnim slučajevima blok simulacijski model sabirnice dizajniraju i konfiguriraju kaskadnim spajanjem više π shema voda. Također, želi li se simulirati sklopni slučaj skokovitog rasterećenja transformatora potrebno je zamijeniti uravnoteženi simulacijski model opterećenja sabirnice sa skokovitim simulacijskim modelom opterećenja sabirnice. Želi li se analizirati utjecaj sklopnog prenapona na sabirnicu različitih vrsta opterećenja potrebno je kreirati simulirani model industrijskog opterećenja koji odgovara realnom industrijskom opterećenju.



Slika 4.30. Parametriranje simulacijskog bloka tokovi snaga nadomjesnog trofaznog opterećenja

Simulacijski parametri potrebni za unos u karticu tokovi snaga koriste se isključivo za inicijalizaciju SimPowerSystems modela. Ti parametri nemaju nikakav utjecaj na blok simulacijskog modela opterećenja niti na rezultate simulacije. Odabere li se program rada konstantan Z tada se numerički iznos impedancije određuje na osnovu ukupne djelatne i jalove snage te iz nazivnog faznog napona. Trofazno trošilo je simetrično. Tijekom numeričkog proračuna nadomjesnih koncentriranih RLC elemenata modela trošila impedancija se održava konstantnim. Efektivne vrijednosti ukupne djelatne P i ukupne jalove snage ($Q_L - Q_C$) se mijenjaju proporcionalno promjeni kvadrata pogonskog napona na sabirnici opterećenja. Numerički proračun napona sabirnice stoga proizlazi iz analize tokova snaga u tom čvoru. Ukoliko se postavi program rada konstantan PQ tada se aktivna snaga P i ukupna jalova snaga Q održavaju konstantnim i jednakim vrijednostima prethodno navedenim u kartici parametri. Ukoliko se na ove uvjete primjeni numerički proračun tokova snaga nominalni linijski napon se automatski prilagođava na linijski napon sabirnice koji proizlazi iz numeričkog proračuna tokova snaga. Odabrani odgovarajući ulazni parametri će biti pridijeljeni simulacijskom modelu opterećenja posredstvom posebno razvijene m - skripte. Dakako da je u kombinaciji s mjernim virtualnim simulacijskim blokom dostupno i mjerenje napona i struje opterećenja sabirnice u svrhu daljnje analize.

Tablica 4.9. daje popis ulaznih parametara simulacijske blok komponente modela opterećenja NN sabirnice.

Tablica 4.9. Ulazni parametri simulacijskog blok modela opterećenja NN sabirnice

Ulazni parametri simulacijskog blok modela opterećenja NN sabirnice	Oznaka proračunatog parametra	Jedinica proračunatog parametra
Efektivna vrijednost nazivnog linijskog napona	U_{1n}	[V]
Nazivna frekvencija	f_n	[Hz]
Ukupna trofazna aktivna snaga	P	[W]
Ukupna pozitivna reaktivna snaga	Q_L	[VAr]
Ukupna negativna reaktivna snaga	Q_C	[VAr]

4.4.2. Prijelazne metode analize karakteristike sklopnog prenapona u Matlab – SimPowerSystemsu

Harmonijska analiza, proračun ukupnog harmonijskog izobličenja (THD), proračun tokova snaga te preostale implementirane numeričke analize koje se dominantno koriste u elektroenergetici, uglavnom su u Matlab - SimPowerSystemsu automatizirane. Navedene analize se provode u vremenskom, frekvencijskom ili fazorskom području. Analizirane sklopne karakteristike, između ostaloga, će pribaviti informacije o uzroku sklopnog poremećaja. U slučajevima sklopnih prenapona odgovarajuće značajke karakteristike sklopnog prenapona su amplituda, frekvencija ili propad napona čija se pojavnost utvrđuje na energetskim komponentama. Oni mogu biti vezani za kapacitet ili induktivitet bilo koje komponente sustava.

Za istraživanje karakteristika sklopnih signala u različitim frekvencijskim okvirima dostatna je vremensko – frekvencijska analiza. Korištenjem vremensko – frekvencijske analize mogu se odgovarajućim metodama estimacije rekonstruirati i razložiti vremenski signal i u frekvencijskom području sklopne pojave. Kratka vremenska Fouirierova transformacija (engl. SFTF) je jedna od dominantno korištenih dekompozicijskih metoda estimacije. Dekompozicijska SFTF metoda je ekvivalentna skupu frekvencijskih filtara jednakih propusnosti. Filtar sklopnog vala je druga dekompozicijska vremenska - frekvencijska metoda analize sklopnog prenapona koja izvlači određeni vremenski ili frekvencijski okvir za prethodno podešenu oktavnu propusnost. Također, želi li se ubrzati simulacija, potrebno je simulacijski model i postupak pravilno konfigurirati, parametrirati i diskretizirati [11].

Kao što znamo analiziranjem karakteristike sklopnog prenapona dolazi se do informacije o izvoru i uzroku prijelazne pojave. Kada se želi izdvojiti dominantna komponenta konfigurirane mreže koja generira sklopni prenapon (pri nepoznatim sklopnim

frekvencijama), tada je potrebno na ispravan način primijeniti estimacijsku metodu analize sklopnog prenapona. Glavna značajka korištenih estimacijskih metoda je da mora biti pretpodešena na visokofrekvencijsku rezoluciju sklopnog prenapona. Na taj se način može odrediti frekvencija oscilacije komponente. Za većinu prijelaznih stanja elektroenergetskih sustava oscilatorna frekvencija komponente javlja se zbog prirodne rezonantne frekvencije sustava. Korištenjem odgovarajućih metoda estimacije parametara komponente, generiraju se temeljne informacije o sustavu te načinu manifestacije. Poznato je da se karakteristika sklopnog prenapona može prema [11] modelirati na sljedeći način:

$$x(t_k) = \sum_{i=1}^{p} A_i \cdot e^{-\alpha_i \cdot t_k} \cdot \cos\left(\omega_i \cdot t_k + \phi_i\right) \cdot u\left(t_k - t_i\right) + e\left(t_k\right) \tag{4.13}$$

gdje je $e(t_k)$ pridodani bijeli šum, a $u(t_k - t_i)$ predstavlja jediničnu step funkciju definiranu kao:

$$u(t_k - t_i) = \begin{Bmatrix} 1, t_k > t_i \\ 0, t_k < t_i \end{Bmatrix} \tag{4.14}$$

gdje je t_i nepoznati parametar koji se razlikuje ovisno o analiziranom slučaju i uzroku sklopnog prenapona, a nepoznati vektor Q :

$$Q = \left[\alpha_1, A_1, \omega_1, \phi_1, t_1 .....\alpha_p, A_p, \omega_p, \phi_p, t_p\right]^T \tag{4.15}$$

Gledano općenito razlikujemo tri potvrđene metode / tehnike analize karakteristike sklopnog prenapona. Estimacija parametara karakteristike sklopnog prenapona se provodi na na sljedeći način: pomoću implementiranog kalibriranog filtra sklopnog prenapona ili poopćenog modela karakteristike sklopnog prenapona te pomoću implementiranih metoda ESPIRIT i Prony. Slično Fourierovoj transformaciji, Pronyova metoda estimira vrijedne informacije iz uzorkovanog signala te konstruira izvorni sklopni prenapon pomoću niza složenih eksponencijalnih ili sinusoidalnih funkcija. Pomoću Prony analize omogućuje se procizna procjena sklopne frekvencije, amplitude, faze i faktora prigušenja uzroka pojave sklopnog prenapona. Za razliku od Fourierove transformacije, Prony analiza daje bolju analizu karakteristike sklopnog prenapona te proširuje spektar propuštanja sklopnih frekvencija [11]. Sve se više koriste u primjenama u drugim područjima znanosti. Razvijeni

ESPIRIT i Prony algoritmi prema [11] predstavljaju dva moguća načina estimacije parametara sklopnog prenapona (frekvencija, koeficijenti propada, inicijalni fazni pomak te amplitude prenapona). Pod predpostavkom da je prirodna frekvencija komponente eksponencijalna prigušena sinusoida, ESPIRIT metoda se može koristiti za približno dobivanje dominantne prostorne frekvencije. Dakle, ESPIRIT metoda estimacije rastavlja originalni signal na sumu različitih sinusoida koristeći pristup temeljen na podprostoru signala. Obje metode estimiranja parametara sklopnog prenapona se koriste za analizu prijelaznih pojava kratkoga trajanja. ESPIRIT metoda estimacije parametara karakteristike sklopnog prenapona se može primijeniti samo na stacionarne signale. Preduvjet je da je simulacija dinamičke prijelazne pojave završila. Mora biti poznat početak i kraj sklopne pojave. ESPIRIT metoda temeljena na algoritmu omogućava određivanje vremenskih intervala sklopne pojave. Postupak rekonstrukcije signala primjenjuje se nakon poznatih estimiranih parametara karakteristike sklopnog prenapona. Simulacijska tehnika rekonstrukcije signala se koristi u svrhu indikacije koliko kvalitetno je originalna prijelazna pojava modelirana te s kojom točnošću su estimirani parametri karakteristike sklopnog prenapona [11]. Koju prijelaznu metodu estimacije koristiti ovisi o samom cilju istraživanja te analiziranom slučaju.

5. Grafičko sučelje za analizu osjetljivosti direktnih i indirektnih utjecaja na karakteristiku sklopnog prenapona

Naredno poglavlje prikazuje načelni opis metodologije dizajna virtualnog grafičkog sučelja. Dakako da je opisana metodologija dizajna grafičkog sučelja SmtdmGUI2.fig. nakon utvrđenih općih i specifičnih ciljeva doktorske disertacije primijenjena na simulacijsku testnu distribucijsku mrežu. Štoviše, generiranje karakteristike sklopnog prenapona na osmišljenoj i ostvarenoj konfiguraciji sekundarne testne distribucijske mreže je realizirano posredstvom implementiranog i integriranog grafičkog sučelja Powergui u Matlab – SimPowerSystemsu. Vidimo da istraživanje simulacijskih scenarija na razvijenoj testnoj mreži ima za cilj demonstrirati mogućnosti grafičkog sučelja Powergui u analizi osjetljivosti direktnih utjecaja na karakteristiku sklopnog prenapona. S jedne strane, poznate su općenite mogućnosti ekspertnih digitalnih alata ATP – EMTP i MATLAB – Simulinka za vremensko – frekvencijsku analizu istraživanja prijelaznih pojava u elektroenergetskim i industrijskim sustavima [68]. S druge strane, veliki broj istraživača kontinuirano dizajnira, razvija i nadograđuje virtualne specifične grafičke sustave. Više o tome se može pogledati u [18], [74]. Štoviše, kontinuiranom nadogradnjom testne simulacijske distributivne mreže u MATLAB – SimPowerSystemsu implementiranim ili novo razvijenim simulacijskim blok komponentama, koji uzimaju u obzir različite efekte, simulaciju kao tehniku analize prijelaznih pojava čini mnogo efikasnijom. Implementirane digitalne funkcije integrirane unutar MATLAB – SimPowerSystemsa, ovisno o pristupu i aspektu gledišta značajno se razlikuju. Koji od digitalnih alata upotrijebiti ovisi o istraživanom sklopnom slučaju. U nastavku je kratko opisana veza grafičkog sučelja Powergui sa razvijenom testnom simulacijskom mrežom. Posebno su istaknute simulacijske smjernice za daljnju implementaciju i integraciju odabranih sklopnih scenarija i s tim povezanih metoda analize karakteristike sklopnog prenapona.

5.1. Razvoj grafičkog sučelja za analizu sklopnih scenarija

Za bilo koju konfiguraciju primarnog i sekundarnoga kruga distributivnog transformatora moguće je implementirati simulacijske scenarije koji su uvjetovani različitim tipovima sklopnih slučajeva. Inicijalni ulazni parametri se unose u radni prostor Matlab – SimPowerSystemsa. Inicijalizacija podrazumijeva ručno ili automatsko pokretanje razvijenih m – skripti. Matlabove m – skripte sadrže dizajnirane ulazne parametre simulacijskih blok modela. Za svaku odabranu konfiguraciju simulacijske distributivne mreže posebno je

dizajnirana m – skripta. Pri tome se za svaki preferirani ili dostupni distributivni prijenosni vod, kabel, VF model transformatora, vrstu opterećenja mogu proračunati ulazni koncentrirani ili distribuirani nadomjesni parametri. Na ovaj je način stvorena elektronska baza ulaznih parametara različitih vrsta proizvođača. Pojedini ulazni parametri simulacijskog modela testne distributivne mreže mogu biti definirani lokalno ili globalno. Koristi li se m – skripta doseg ulaznih varijabli je lokalnog karaktera. S druge strane pokrene li se m - funkcija doseg ulaznih varijabli je globalan. Funkcijske datoteke prihvaćaju globalne ulazne argumente (tzv. varijable stanja) te daju globalne izlazne argumente (tzv. izlazne varijable). Ulazna varijabla stanja može biti simulirana karakteristika sklopnog prenapona dok izlazna varijabla može biti maksimalna tjemena vrijednost sklopnog prenapona. Funkcijske datoteke su u Matlab – SimPowerSystems implementirane u obliku grafičkog sučelja. Korišteni set grafičkih sučelja unutar Powergui predstavlja numeričke alate s implementiranom osnovnom razinom vizualizacije. Što je broj dizajniranih ulaznih varijabli veći, time je moguć i veći broj različitih kombinacija dizajniranih izlaznih varijabli. Izlazne varijable pri tome moraju zadovoljiti grupu ograničenja koja su definirana u samim uvjetima simulacijskog postupka.

U svakom bloku simulacijskog modela komponente moguće je na ulaznim priključnicama mjeriti fazni napon prema zemlji, čime se postiže prikaz sklopnog prenapona u više čvorova simulacijske distribucijske mreže. Na ovaj način je ostvarena mogućnost usporedne analize sklopnih prenapona na raznim mjestima u testnoj simulacijskoj distributivnoj mreži. Pri tome je potrebno pravilno izabrati i proračunati direktne ili indirektne ulazne parametre. Ulazni podatci i informacije za simulacijski modelirane komponente numerički su zapisani u radnom prozoru u obliku varijabli stanja. Varijable stanja se definiraju kao minimalni broj unutrašnjih varijabli sustava testne mreže kojima se u potpunosti može opisati ponašanje simulacijskog modela testne distributivne mreže. Varijabli stanja ima onoliko koliko cjeloviti model ima elemenata koji imaju sposobnost pohrane energije. Općenito vrijedi da broj varijabli stanja odgovara redu prijenosne funkcije sustava. Matlab - SimPowerSystems razlikuje tri grupe varijabli stanja. Prva grupa su *RLC* elementi, druga grupa su elektromehanički uređaji, a treća grupa su kontrolni, upravljački i mjerni sustavi. Sami podatci su organizirani u numeričkom i nenumeričkom obliku i pridijeljeni matrici prostora stanja. Matrica prostora stanja proizlazi iz diferencijalnih jednadžbi sustava koje jednoznačno predstavljaju reprezentativni simulacijski model testne mreže. Ukoliko se želi mijenjati samo iznos i faza svih sekvencijalnih simetričnih napona i struja dovoljno je riješiti skup algebarskih jednadžbi. Fazorski numerički proračun tada je dovoljan za analizu usporedbi različitih utjecaja. Električna stanja svih varijabli sustava su numeričkim

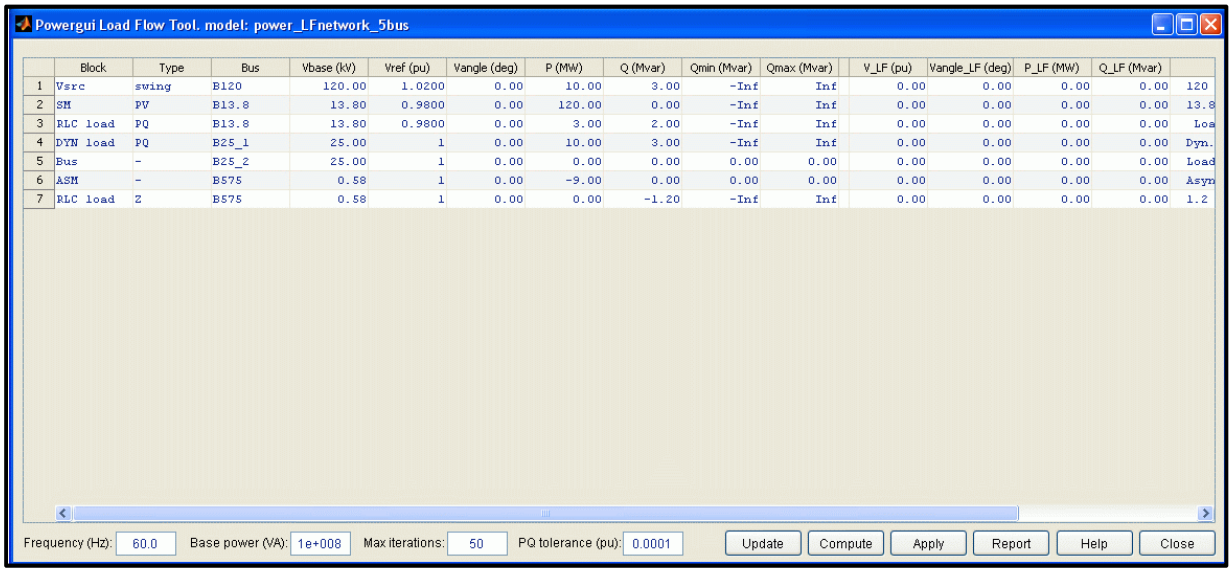
postupkom fazorske transformacije pojednostavljena. Ovakav pristup ne zahtjeva partikularna rješenja elektromagnetskog dijela sustava, pa iz toga razloga simulacija traje kraće. Fazorski proračun daje rješenje na jednoj frekvenciji. Dakle, svako stanje sustava je određeno matricom stanja. Oblik i tip ulazno - izlaznih varijabli stanja je moguće definirati u blokovima simulacijskog modela komponente. Te informacije se zatim na sustavan način dalje koriste prema unaprijed zadanim simulacijskim procedurama. Svako zasebno stanje električnih varijabli sustava je dobiveno odgovarajućim numeričkim algoritmom.

Interakcija između korisnika i razvijenog simulacijskog modela testne distributivne mreže je uspostavljena kroz grafičko sučelje. Korisnik može birati koju vrstu simulacijskog testiranja (dinamički ili statički) želi provesti za određeni simulacijski slučaj. Na korisniku je da sukladno simulacijskom scenariju odabere implementirani tip simulacijskog postupka i željeni digitalni alat. Simulacijski postupak može biti kontinuirani (promjenjivi vremenski korak), diskretni (nepromjenjivi vremenski korak) i fazorski. Preciznost simulacijskog proračuna određene numeričke metode je diktirana inicijalnim vremenskim korakom. Jedini način da se utvrdi koja numerička metoda je točnija i preciznija je ponavljanje simulacije sa različitim vremenima diskretizacije. Općenito se može uzeti da vrijeme numeričkog koraka od 20 μs do 50 μs daje prihvatljive rezultate za simulaciju sklopnih prenapona. Ukoliko postoje složenije blok simulacijske komponente (npr. energetski pretvarači) tada je potrebno smanjiti numerički korak simulacije. U tim slučajevima numerički korak pada ispod 1 μs. Fazorska metoda simulacije koristi se kod proučavanja uvjeta dinamičke i statičke stabilnosti te elektromagnetskih sklopnih oscilacija. Za razliku od diskretne i kontinuirane numeričke metode, fazorska numerička metoda koristi reducirani model prostora stanja. Jednoznačno određene matrice prostora stanja sadrže matrične komponente određene ulaznim i proračunatim parametrima modela. Promjene dinamičkih stanja sustava od početnog do krajnjeg ima za posljedicu promjene stanja elemenata matrice prostora stanja. S jedne strane, Powergui grafičko sučelje uzima u obzir početna stanja blokova simulacijskih komponenti te sve zajedno prikazuje u grafičkom sučelju inicijalnih vrijednosti mjerenih napona i struja. S druge strane, grafičko sučelje Powegui definira početna stanja elemenata te služi za parametriranje simulacijskog modela testne distributivne mreže. Inicijalno primijenjena početna stanja mreže podešavaju se izravno u dijaloškim prozorima simulacijskih blokova ili indirektno pomoću Powergui aplikacije. Početna stanja upisana u dijaloški prozor simulacijskog bloka zamjenjuju prethodno izračunate vrijednosti. S druge pak strane moguće je promijeniti početne uvjete varijabli stanja svih simulacijskih blokova upisujući ih direktno u Powergui digitalni alat. Postoji opcija automatskog podešenja matrice varijabli stanja

simulacijskog modela testne distributivne mreže. Nemogućnost trenutne promjene energije na induktivitetu ili kapacitetu prilikom uklopa ili isklopa prekidača dovodi do toga da se novo ustaljeno stabilno / nestabilno stanje ne uspostavlja trenutačno. Ako povišenje napona ili struje ne prekorači dozvoljene vrijednosti te ako se sklopna pojava vrlo brzo priguši nema znatne posljedice za sustav ili element. Korištenjem numeričkog fazorskog proračuna prekoračenje dozvoljenih vrijednosti sklopnog prenapona je vidljivo u obliku efektivnih tjemenih vrijednosti napona ili struje. Vremensko – frekvencijski odziv karakteristike nije vidljiv. Dakle, želi li se prikazati oblik i tip sklopne karakteristike potrebno je odabrati kontinuirani ili diskretni simulacijski postupak. Nadalje, prilikom dinamičke simulacije potrebno je podesiti odgovarajuća inicijalna ograničenja (npr. porast napona sabirnice, limit zagrijanja trošila, način upravljanja simulacijskom komponentom te odgovarajući model transformatora). Powergui grafičko sučelje olakšava analizu sklopnog scenarija. Vidi se da je broj stanja modela sustava s ulaznim koncentriranim parametrima konačan za razliku od modela sa distribuiranim parametrima. Za istraživanje i proučavanje interakcije između energetskih komponenti simulacijski model s koncentriranim ulaznim parametrima je dovoljan. Ne treba zaboraviti da odluka o tome koji simulacijski postupak koristiti za analizu sklopnih fenomena ovisi o frekvencijskom opsegu koji se reprezentira i željenoj točnosti simulacijskog modela. Dakle, prilikom analize sklopnih prijelaznih pojava, potrebno je primijeniti određene inicijalne simulacijske uvjete ili ograničenja korištenjem simulacijskih obrazaca. U tu svrhu posebno je razvijena inicijalna m – skripta za generiranje ulaznih parametara simulacijskog postupka.

Općenito se može uzeti da se znanstveni rad u Matlab – SimPowerSystemsu zasniva na radu s varijablama stanja. Na definirane ulazne argumente primjenjuju se kreirane Matlabove m – skripte i m – funkcije. Kao rezultat dobiju se izlazni argumenti. Također ulazne i izlazne varijable stanja tijekom promjena stanja sustava mogu mijenjati iznos i tip varijable stanja. Periodičke varijable stanja su matrice različitih dimenzija. Mogu biti realne, kompleksne, simboličke i strukturne. Ako je u početnom trenutku poznat iznos napona na kondenzatoru ili struje kroz zavojnicu, onda ove dvije nezavisne varijable mogu poslužiti kao opis ponašanja testne distributivne mreže za sva iduća vremena. Ukoliko u sklopnim konfiguracijama testne simulacijske distributivne mreže postoje zatvorene simulacijske petlje s kondenzatorima ili serijski spojenih zavojnica, onda i varijable stanja postaju zavisne. U Matlab – SimPowerSystemsu oznaka nezavisne varijable stanja se sastoji od imena simulacijskog bloka s pridodanim prefiksom za odgovarajuću struju prigušnice ili napona na kondenzatoru. Da bi se prikazao traženi model distribucijske mreže u prostoru stanja potrebno je izravno koristiti

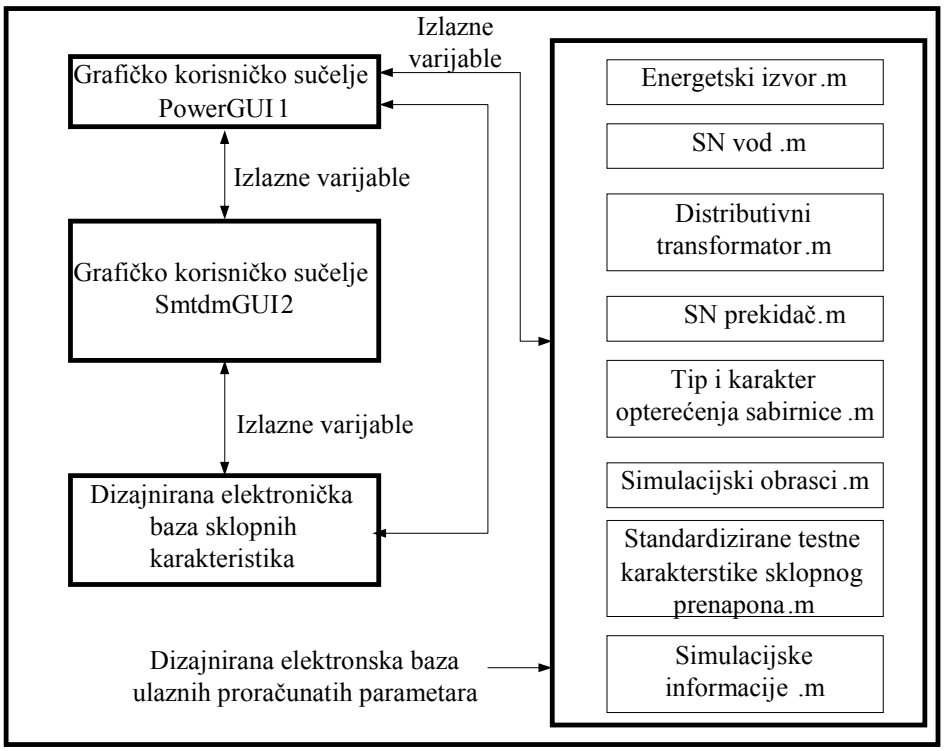
odgovarajuću implementiranu aplikaciju. Stacionarna stanja varijabli modelske mreže pri određenoj pogonskoj frekvenciji su predpodešena za prikaz u polarnom obliku. Slika 5.1. prikazuje grafičko sučelje tokova snaga u simulacijskoj mreži. Inicijalno je potrebno podesiti pogonsku frekvenciju, nominalnu snagu mreže te broj iteracija odabranog simulacijskog postupka. Na osnovu ulaznih parametara simulacijskog postupka proračunava se matrica admitancije simulacijskog modela, a time i tokovi snaga u simulacijskoj mreži. Na ovaj se način omogućava usporedba dva stacionarna stanja simulacijske mreže.



	Block	Type	Bus	Vbase (kV)	Vref (pu)	Vangle (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Qmin (Mvar)	Qmax (Mvar)	V_LF (pu)	Vangle_LF (deg)	P_LF (MW)	Q_LF (Mvar)	
1	Vsrc	swing	B120	120.00	1.0200	0.00	10.00	3.00	-Inf	Inf	0.00	0.00	0.00	0.00	120
2	SM	PV	B13.8	13.80	0.9800	0.00	120.00	0.00	-Inf	Inf	0.00	0.00	0.00	0.00	13.8
3	RLC load	PQ	B13.8	13.80	0.9800	0.00	3.00	2.00	-Inf	Inf	0.00	0.00	0.00	0.00	Loa
4	DYN load	PQ	B25_1	25.00	1	0.00	10.00	3.00	-Inf	Inf	0.00	0.00	0.00	0.00	Dyn.
5	Bus	-	B25_2	25.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Load
6	ASM	-	B575	0.58	1	0.00	-9.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Asyn
7	RLC load	Z	B575	0.58	1	0.00	0.00	-1.20	-Inf	Inf	0.00	0.00	0.00	0.00	1.2

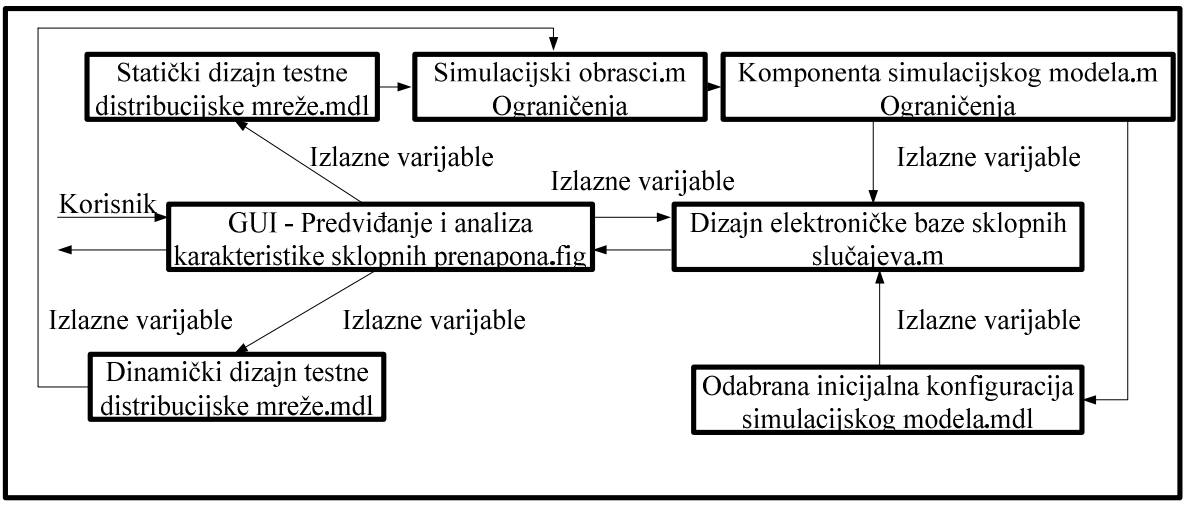
Slika 5.1. Grafičko sučelje tokovi snaga za prikaz stacionarnih varijabli stanja u polarnom obliku

Kako bi se prikazala promjena impedancije bloka simulacijske komponente koristi se direktna automatska metoda mjerenja impedancije pomoću simulacijskog bloka *Z*. Ovime je u radnom prostoru stvorena nova ulazna varijabla koja je zapravo matrica s dva retka. Prvi redak je frekvencija, a drugi redak je kompleksna impedancija. Za indirektnu metodu proračuna impedancije posredstvom matrice prostora stanja, potreban je dodatni strujni izvor spojen na odgovarajući virtualni čvor. Na taj se način pruža eksterni ulaz. Prikazom impedancije čvora u ovisnosti o frekvenciji može se kvalitetno vrednovati ulazni i proračunati koncentrirani parametri. Porastom frekvencije dolazi do izražaja induktivni karakter za razliku od smanjenja frekvencije kada dolazi do izražaja kapacitivni karakter simulacijske testne mreže. U slučaju da se promijeni neki ulazni parametar dolazi do više uzastopnih oscilacijskih stanja te povećanja ili smanjenja frekvencijskog spektra mreže. Glavni cilj pri tome je da prijenos električne energije bude u zadovoljavajućim sklopnim oscilacijama.

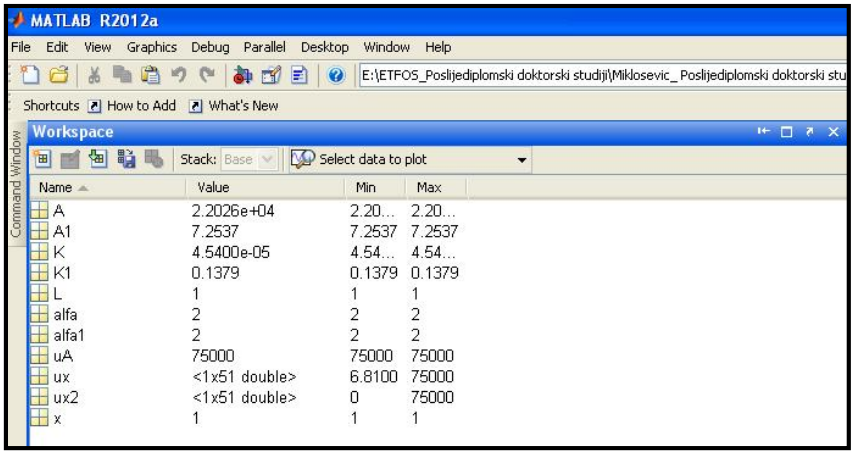


Slika 5.2. Struktura razvijenog grafičkog korisničkog sučelja za predviđanje sklopnih prenapona

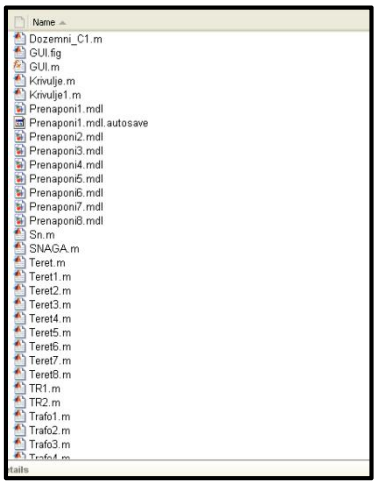
Virtualni simulacijski sustavi se sve više koriste za dizajn, procjenu, predviđanje i dijagnostiku sklopnih fenomena koji u uvjetima odlučivanja nisu dobro razumijevani procesi. Primjenjuju se na sintetizirane složene sklopne probleme koji mogu proizaći iz velikog broja mogućih stanja odluka. Na temelju dobivenih simulacijskih informacija inicijalnog sklopnog slučaja provodi se evaluacija. Posebno razvijenim simulacijskim protokolom dolazi se do prihvatljive simulacijske konfiguracije modela mreže. Dizajnirani simulacijski protokoli poslužit će za analizu specifičnih sklopnih efekata ili fenomena. Grafičko sučelje simulacijske mreže predstavlja individualno okruženje i konceptualni radni okvir za dizajn i analizu specifičnih sklopnih fenomena. Ovakav simulacijski okvir omogućuje brže i jednostavnije poboljšanje i nadogradnju izvornog simulacijskog modela. Neke od prednosti su nešto jednostavnije objašnjavanje zašto i zbog čega se nešto istražuje. Ovakav pristup omogućava veći stupanj automatizacije cijelog simulacijskog zadatka. Po svemu sudeći distribuirani radijalni sustavi postaju sve više kompleksniji da bi postigli bolje performanse i bolju pouzdanost. Virtualni grafički sustavi su dobar kompromis između kompleksnosti i prihvatljive razine pouzdanosti distributivnog sustava.



Slika 5.3. Prikaz dijagrama toka za grafičko korisničko sučelje



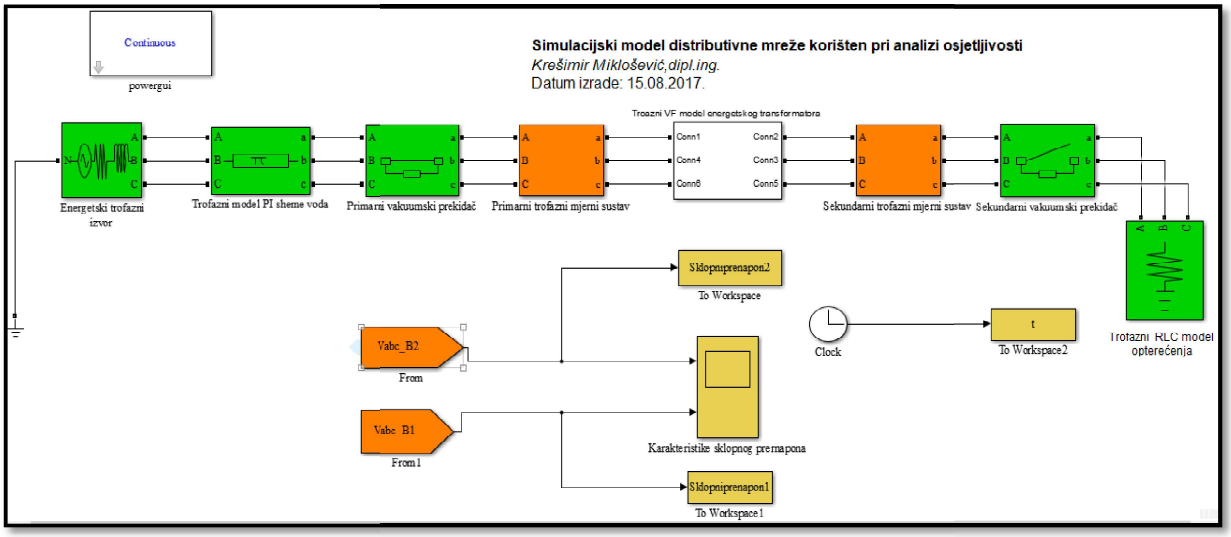
Slika 5.4. Razvoj digitalne baze proračunatih koncentriranih i distributivnih parametara



Slika 5.5. Razvoj digitalne baze slučajeva sklopnih prenapona

5.1.1. Dizajn simulacijskog modela testne distributivne mreže

Dinamička simulacija modela testne distributivne mreže oponaša događaje koji se mogu desiti prilikom rada distributivnog sustava. Interakcija između korisnika i odabranog dizajna simulacijskog modela testne distributivne mreže odvija se kroz grafičko sučelje. U samom početku procesa dizajna korisnik unosi imena simulacijskih komponenata iz dinamičke baze ulaznih i proračunatih podataka. Također unosi ograničenja za svaku komponentu posebno posredstvom dostupnih simulacijskih obrazaca. Za svaki inicijalni dizajn generira karakteristiku sklopnog prenapona. Grafičko korisničko sučelje SmtdmGUI2.fig. omogućava funkcionalno spajanje blok simulacijskih komponenata u jednu cjelinu. SN prekidačem prilikom uklopa / isklopa dovodi / odvodi se energija u strujni krug. Simulacijski blokovi impedancija služe za mjerenje impedancija kao funkcija promjene frekvencije. Iznos promjena impedancije komponente se dobije posredstvom prijenosne funkcije. Ukoliko generirana sklopna karakteristika zadovoljava inicijalne jasno argumentirane i artikulirane zahtjeve, konfiguracija mreže postaje odabrana. Za svaki diferencirani, a time i partikularni slučaj moguće je dobiti karakteristiku sklopnog prenapona. Ukoliko su narušena neka od prethodno utvrđenih ograničenja, radi se nova konfiguracija dizajna simulacijskog modela testne distribucijske mreže. Za potrebe prikaza karakteristike sklopnog prenapona pridodan je blok simulacijskog modela trofaznog mjernog sustava.



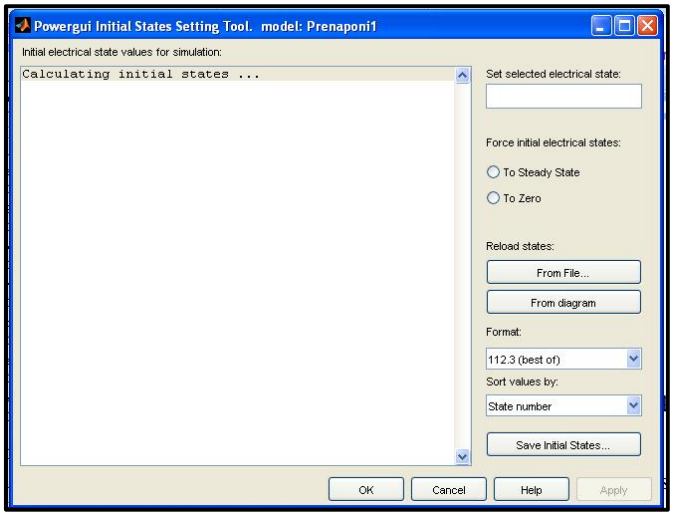
Slika 5.6. Dizajn simulacijskog modela testne distributivne mreže SmtdmGUI2.fig.

Jedna od mogućnosti daljnjeg razvoja je implementacija naprednih tehnika vizualizacije za različitu vremensko - frekvencijsku strukturu sklopnog prenapona. Time će se ojačati prikazi parametara karakteristike sklopnih prenapona. Jednom razvijena testna simulacijska

mreža se može vrlo jednostavno kombinirati s novim osmišljenim i dizajniranim krugovima primarne i sekundarne strane transformatora. Standardni inženjerski digitalni alati su glavni pristup koji se koristi u analizi osjetljivosti karakteristike sklopnog prenapona.

5.1.2. Primjena grafičkog sučelja Powergui na simulacijski sklopni slučaj isklopa opterećenog transformatora

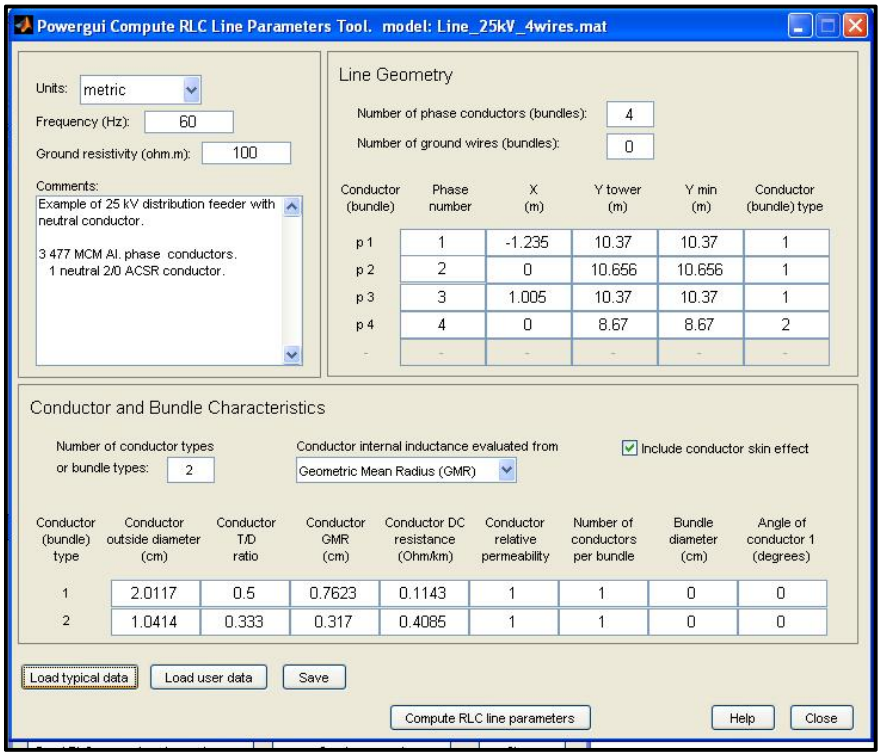
Nakon odabranih i pozvanih dizajniranih simulacijskih modula te nakon definiranja odabrane inicijalne konfiguracije simulacijskog modela pokreće se simulacija sklopnog slučaja isklopa opterećenog transformatora. Slika 5.7. prikazuje digitalni alat za automatsku inicijalizaciju početnih ulaznih parametara. Cilj ovog istraživanja je utvrditi oblik i tip karakteristike sklopnog prenapona da bi se potvrdili ulazni zahtjevi na konfiguraciju testne distributivne mreže. Sukladno tome treba odabrati i razinu izolacije.



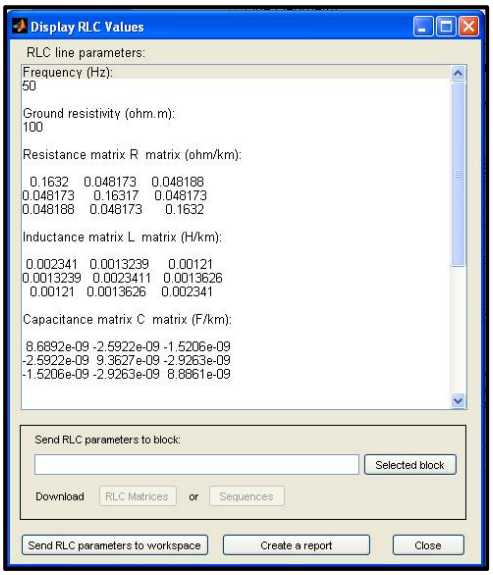
Slika 5.7. Utvrđivanje početnih vrijednosti električnih veličina simulacijskog modela testne distributivne mreže

U cilju istraživanja izolacijske otpornosti stupa dalekovoda na sklopni prenapon neophodno je poznavati ekvivalentni distribuirani simulacijski model stupa dalekovoda. Stoga, potrebno je u simulacijski model mreže uključiti način i tip uzemljenja stupa dalekovoda. Ukoliko, izvornu simulacijsku distributivnu mrežu nadogradimo prethodno razvijenim simulacijskim blokom stupa dalekovoda moguće je simulirati i sklopne prenapone između dva stupa dalekovoda i modela prijenosnog voda. Kao što znamo, prijenosni vod između dva stupa dalekovoda definiran je električnim i geometrijskim ulaznim distribuiranim ili koncentriranim parametrima π sheme voda. Dakle, moguće je simulirati direktni sklopni prijelazni slučaj koji je iniciran trenutkom i oblikom sklopnog udara. Cilj je simulacija

preskoka. Za generiranje ulaznih parametara u blok simulacijskog modela stupa dalekovoda može nam poslužiti funkcijska datoteka. U nekim slučajevima stup dalekovoda se može modelirati distribuiranim π modelom voda.



Slika 5.8. Grafičko sučelje za proračun *RLC* parametara SN voda



Slika 5.9. Proračunati ulazni distribuirani parametri SN voda u obliku matrice stanja

Ovaj odjeljak opisuje generalna pravila za istraživanje sklopnih slučajeva koristeći posebno razvijeno grafičko korisničko sučelje. Za svaki sklopni slučaj treba identificirati

oblik i frekvencijsku strukturu sklopnog prenapona. Potom je nužno predložiti optimalnu primarnu i sekundarnu konfiguraciju mreže. U testnu mrežu valja uključiti što više blok simulacijskih modela komponenata i s njima povezanih specifičnih efekata te analizirati njihove utjecaje na karakteristiku sklopnog prenapona. Zatim je zadaća diferencirati i vrednovati razvijene verzije simulacijskog modela testne mreže prema točnosti i značajkama. Potom treba proširiti bazu sklopnih slučajeva, a time i ulaznih koncentriranih tipskih parametara te na taj način poboljšati i ojačati vjerodostojnost simulacijske testne mreže odgovarajućim mjerenjima. Dijagnostičkim simulacijskim metodama valja utvrditi strukturu frekvencijskih odziva simuliranih sklopnih slučajeva i predložiti kvalitetne mjere za smanjenje negativnih utjecaja sklopnog prenapona. Sama tehnika modeliranja sklopnog slučaja je detaljnije ilustrirana u analizi utjecaja isklopa opterećenog transformatora.

6. Analiza osjetljivosti direktnih i indirektnih utjecaja na visinu i trajanje sklopnog prenapona

Analiza osjetljivosti sklopnog prenapona podrazumijeva proučavanje promjenjivosti parametara karakteristike prenapona u ovisnosti o promjenama parametara ulaznih varijabli. Na osnovu dinamike prije, u trenutku pojave te neposredno nakon pojave sklopnog prenapona može se utvrditi uzrok i posljedica sklopnog prenapona. Može se utvrditi karakteristika reakcije distributivne mreže na pobudu. Primijenjena frekvencijska ili vremenska metoda analize osjetljivosti predstavlja svojevrsnu tehniku odabira ulaznih parametara u simulacijski model da bi se analizirali uzroci i posljedice nastalih promjena na visinu, trajanje i frekvencijski spektar sklopnog prenapona. Može se smatrati potporom u donošenju odluka ili za izradu preporuka za smanjenje negativnih utjecaja sklopnih prenapona. U nastavku će se koristiti za razumijevanje same prirode nastanka sklopnog prenapona ili za daljnje poboljšanje simulacijskog modela. Analiza osjetljivosti pruža rangiranje učinaka prema utjecaju na karakteristiku sklopnog prenapona. Razumijevanje takvih veza nužno je da bi se model mogao ispravno koristiti. Iz toga razloga za potvrdu ove doktorske disertacije provodit će se odabrana uvjetna ispitivanja da bi se potvrdili znanstveni doprinosi.

Bez obzira o kojem je modelu ili pristupu riječ, većina autora iz područja numeričke analize sklopnih prenapona uvodi određena zanemarenja i aproksimacije kod određivanja *RLC* nadomjesnih koncentriranih ulaznih parametara. Dakle, ulazni parametri komponenata simulacijskog modela sadrže mnogo nesigurnosti uključujući greške testnih mjerenja i proračuna. Iz toga razloga takav model povlači za sobom graničnu pouzdanost rezultata odziva simulacijskog modela. Pouzdanost simulacijskog modela uglavnom se testira pouzdanošću ulaznih parametara. Pouzdanost simulacijskih modela u nekim slučajevima se ispituje i graničnim simulacijskim modelima. Rezultati dobiveni ovim simulacijskim testiranjima nam mogu dati novi pogled na sklopni slučaj koji do sada još nismo uočili.

Pokazalo se da je problematičnost određivanja vremenskog koraka simulacije nedostatak analize u vremenskoj domeni dok je tipičan problem analize u frekvencijskoj domeni nelinearnost elemenata. Iz dosada iznesenog, vidi se da se ovdje radi o numerički zahtjevnim postupcima gdje treba proračunati svojstvene vrijednosti matrice admitancije transformatora te ih još treba prema jednadžbi (3.12) invertirati. Treba uzeti u obzir da se raspon decimalnih brojeva kreće od 10^{-12} za ekvivalentne kapacitete, 10^{-3} za induktivitete te 10^{3} za napone. Premali korak je rezultirao sve većim trajanjem simulacije, dok preveliki korak

dovodi do manje točnosti. Korišteni simulacijski model transformatora u Matlab - SimPowerSystems su nadograđeni i prilagođeni za simulaciju specifičnih slučajeva. Za analizu sklopnih slučajeva model je nadograđen sa dodatnim ekvivalentnim nadomjesnim kapacitetima. Iz toga razloga u nastavku će biti analizirani utjecaji kao što je promjena omjera poprečnog i uzdužnog kapaciteta namota transformatora, utjecaj promjene vrste i karaktera uzemljenja transformatora, utjecaj vrste i karaktera opterećenja iz čega se može potvrditi treći znanstveni doprinos.

6.1.1. Utjecaj promjene omjera ukupnog poprečnog i uzdužnog kapaciteta namota transformatora na oblik karakteristike početne raspodjele sklopnog prenapona

Cilj je analizirati utjecaj promjene omjera ukupnog poprečnog i uzdužnog kapaciteta namota na oblik karakteristike početne raspodjele sklopnog prenapona. Za potrebe istraživanja početne raspodjele prenapona korišten je distributivni transformator opisan u tablici 6.1.

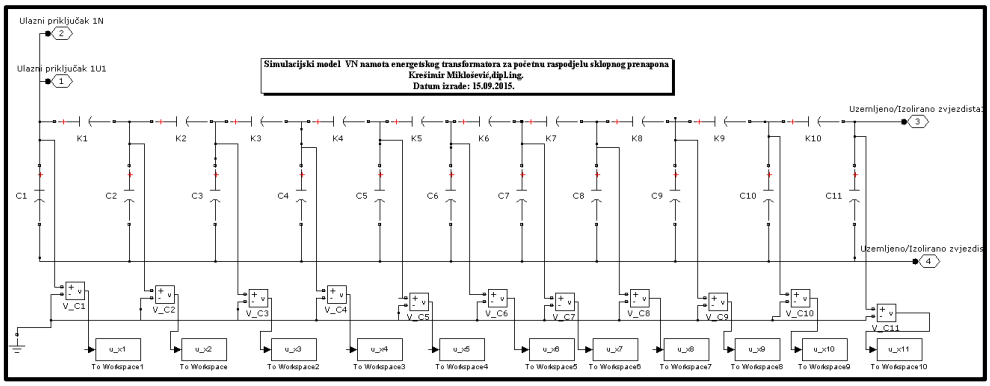
Tablica 6.1. Nazivni parametri istraživanog distributivnog transformatora

Parametri distributivnog transformatora	Oznaka parametra	Iznos i jedinica parametra
Nazivna snaga	S_n	50 kVA
Nazivni napon	U_{1n}	10 kV
Nazivna struja	I_{1n}	2,8 A
Grupa spoja	*Yzn*5	

Na razvijenom pojednostavljenom simulacijskom modelu SN namota prikazanom na slici 6.1. prvo su analizirana dva granična slučaja početne raspodjele prenapona u trenutku $t = 0$ s:

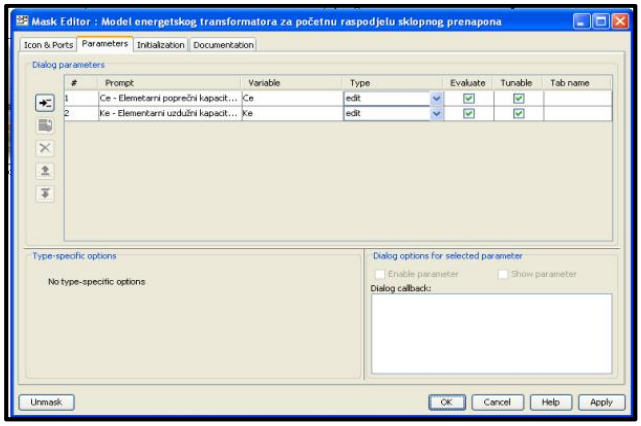
a) kada postoje samo kapaciteti između svitaka namota, a nema kapaciteta prema zemlji i

b) kada postoje samo kapaciteti prema zemlji, a nema kapaciteta između svitaka.

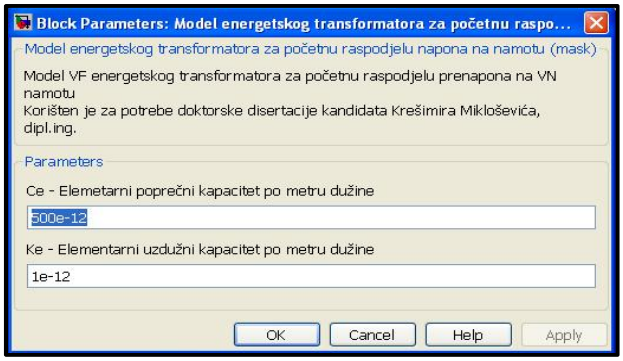


Slika 6.1. Pojednostavljeni simulacijski model jedne faze SN namota distributivnog transformatora

Simulacijski model na slici 6.1. je primjenom simulacijske tehnike grupiranja i maskiranja sveden na sljedeći oblik:



Slika 6.2. Grupirani i maskirani pojednostavljeni simulacijski model SN namota distributivnog transformatora za početnu raspodjelu prenapona



Slika 6.3. Ulazni parametri u pojednostavljeni simulacijski model distributivnog transformatora za početnu raspodjelu sklopnog prenapona

U prvom slučaju svi uzdužni kapaciteti između svitaka čine nadomjesni krug serijski spojenih kondenzatora kojima teče struja istog iznosa te se dobiva jednolika linearna raspodjela prenapona po dužini namota od vrijednosti linijskog napona na njegovom kraju (L = 1 m) do nule (L = 0 m) na uzemljenom kraju namota.

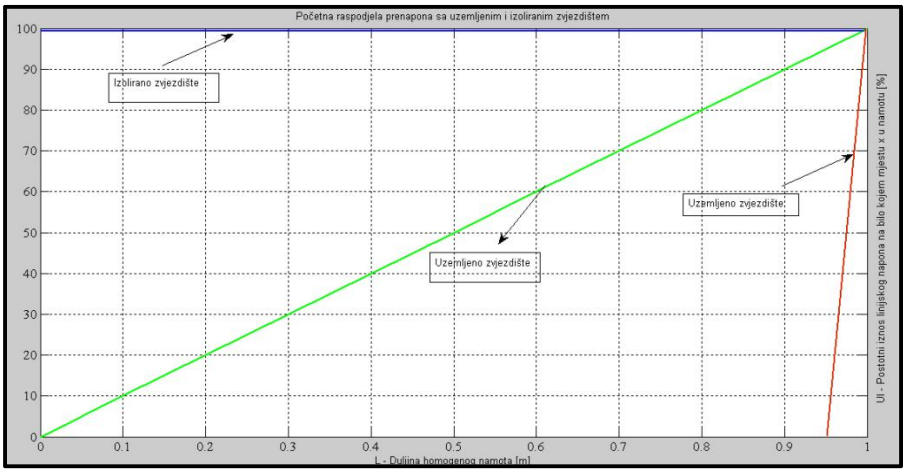
Tablica 6.2. Serijski i paralelni nadomjesni parametri zavoja SN namota za prvi granični slučaj ($C_{ekv} = C_1 \cdot n$)

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}
[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Serijski i paralelni nadomjesni parametri zavoja namota									
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

U drugom slučaju čitava struja prolazi samo kroz prvi dozemni kondenzator kojemu se dovodi puni linijski napon. Dakle, na prvi svitak namota javlja se maksimalni linijski napon i nadilazi nominalni napon. Ukupni uzdužni granični kapacitet je pet puta veći od ukupnog poprečnog graničnog kapaciteta SN namota.

Tablica 6.3. Serijski i paralelni nadomjesni parametri zavoja SN namota za drugi granični slučaj ($C_{ekv} = K_1 / n$)

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}
[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]
5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
Serijski i paralelni nadomjesni parametri SN namota									
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Slika 6.4. Granični rubni slučajevi početne raspodjele prenapona

Prema slici 6.4. vidi se da je početna raspodjela prenapona za slučaj uzemljenog zvjezdišta jednaka linearnoj raspodjeli napona u stacionarnom stanju. Nasuprot tome u drugom slučaju vidi se da čitava struja prolazi samo kroz prvi svitak na kojem leži puni linijski maksimalni napon. Ovaj granični slučaj raspodjele prenapona je najnepovoljniji i može dovesti do proboja izolacije prvoga svitka. Usporede li se svi granični slučajevi početne raspodjele prenapona vidi se da je u početnom trenutku kod izoliranog zvjezdišta vrijednost prenapona praktički jednaka kao kod transformatora s uzemljenim zvjezdištem. Kod izoliranog zvjezdišta u stacionarnom stanju sve točke namota se nalaze pod jednakim linijskim naponom. Razlika je u površinama koje zatvaraju granične krivulje raspodjele prenapona. Vidi se da je mnogo šira za slučaj izoliranog zvjezdišta što je upravo njegov bitan nedostatak u odnosu na slučaj sa uzemljenim zvjezdištem. To znači da je gradijent napona izraženiji kod izoliranih zvjezdišta.

Za potrebe simuliranja što realnije i preciznije početne raspodjele napona u tablici 6.4. odabrani su prikladni omjeri ukupnog uzdužnog i poprečnog kapaciteta namota. Prema jednadžbama 2.21 i 2.56. proračunate su vrijednosti koeficijenta α i ekvivalentnog nadomjesnog kapaciteta SN namota $C_{ekv.}$ Prilikom proračun korištena je teorija s distribuiranim parametrima.

Tablica 6.4. Tablica proračunatih koeficijenta α *i* ekvivalentnih kapaciteta C_{ekv} namota distributivnog transformatora 10 / 0,4 kV

C	C_e	n	K	K_e	C_{ekv}	α
[pF / m]	[pF / m]	[broj]	[pF / m]	[pF / m]	[pF / m]	[omjer]
0	0	10	5	50	5	0
40	4	10	10	100	20	2
320	32	10	20	200	80	4
1080	108	10	30	300	180	6
2560	256	10	40	400	320	8
5000	500	10	50	500	500	10

Tablica 6.4. predstavlja ulazne parametre za analizu utjecaja promjene omjera ukupnog uzdužnog i poprečnog kapaciteta na oblik karakteristike početne raspodjele prenapona. U cilju dobivanja željene rezolucije početne raspodjele prenapona, u tablici 6.5. su prikazani odabrani konfiguracijski parametri simulacije za sve simulirane događaje.

Tablica 6.5. Konfiguracijski parametri simulacije

Konfiguracijski parametri simulacije
Trajanje simulacije: 100 μs
Numerička metoda: Trapezoidna robusna metoda (ode 23tb)
Tip numeričke metode: Varijabilni korak simulacije
Relativna tolerancija: 1exp (-4)
Korak simulacije: Automatski korak

U svrhu simulacijskog testiranja u nastavku su detaljno istraživani scenariji koji će nam poslužiti za dobivanje najnepovoljnijeg uvjetovanog događaja.

Tablica 6.6. Početna raspodjela prenapona na uzemljenom namotu za $\alpha = 2$

Testni ulazni prenapon: $U_m = 75$ kV, 1,2 / 50 μs
Nadomjesni koeficijent: $\alpha = 2$
Način uzemljenja: Direktno uzemljeno

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$t = 0$ μs										
u_{x1}	u_{x2}	u_{x3}	u_{x4}	u_{x5}	u_{x6}	u_{x7}	u_{x8}	u_{x9}	u_{x10}	u_{x11}
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
74,55	60,49	48,86	39,17	31,10	24,19	18,28	13,11	8,46	4,15	0

Tablica 6.7. Početna raspodjela prenapona na uzemljenom namotu za $\alpha = 6$

Testni ulazni prenapon: $U_m = 75$ kV, 1,2 / 50 μs
Nadomjesni koeficijent: $\alpha = 6$
Način uzemljenja: Direktno uzemljeno

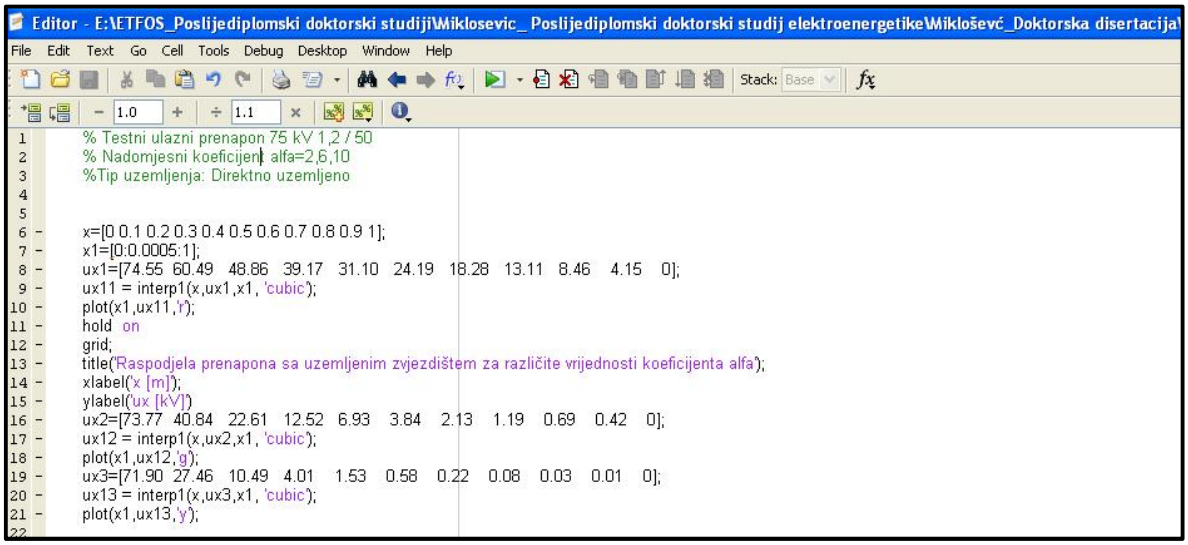
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$t = 0$ μs										
u_{x1}	u_{x2}	u_{x3}	u_{x4}	u_{x5}	u_{x6}	u_{x7}	u_{x8}	u_{x9}	u_{x10}	u_{x11}
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
73,77	40,84	22,61	12,52	6,93	3,84	2,13	1,19	0,69	0,42	0

Tablica 6.8. Početna raspodjela prenapona na uzemljenom namotu za $\alpha = 10$

Testni ulazni prenapon: $U_m = 75$ kV, 1,2 / 50 μs
Nadomjesni koeficijent: $\alpha = 10$
Način uzemljenja: Direktno uzemljeno

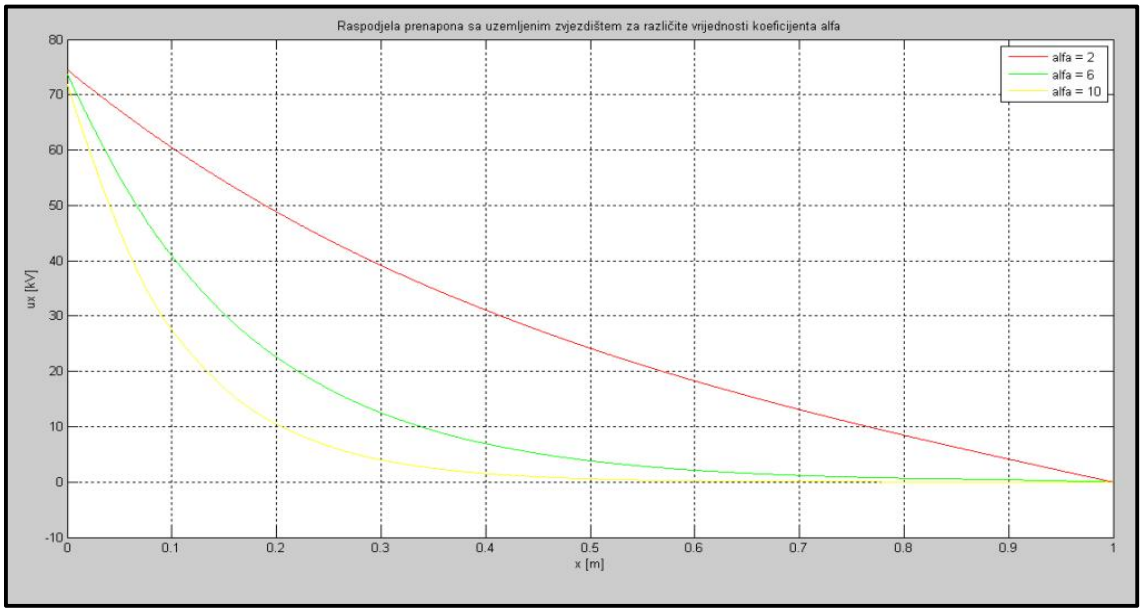
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$t = 0$ μs										
u_{x1}	u_{x2}	u_{x3}	u_{x4}	u_{x5}	u_{x6}	u_{x7}	u_{x8}	u_{x9}	u_{x10}	u_{x11}
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
71,90	27,46	10,49	4,01	1,53	0,58	0,22	0,08	0,03	0,01	0

U svrhu dobivanja višedijagramskih prikaza unutar jednog prozora za slučaj uzemljenog zvjezdišta kreirana je matlab m - skripta koja je prikazana na slici 6.5.



Slika 6.5. Simulacijski okoliš za pisanje m - skripte

U konačnici m - skripta prikazuje vrijednosti vektora napona čvorova distribuiranog VF modela namota transformatora. Vektori čvorova sastoje se od deset elemenata koje predstavljaju pripadne svojstvene vrijednosti napona čvorova. Prilikom generiranja preciznijih višedijagramskih prikaza korištena je kubična interpolacija nad ulaznim vrijednostima vektora napona čvora.



Slika 6.6. Početna raspodjela prenapona na uzemljenom namotu za različite vrijednosti koeficijenta α

Udarni ispitni val nema beskonačno strmo čelo ni beskonačno dugi hrbat kao što je slučaj kod step funkcije. Zna se da oba navedena električna svojstva utječu na reakciju namota transformatora. Iz dobivenih simulacija vidi se da naprezanje unutar distributivnog transformatora raste sa povećanjem poprečnog kapaciteta prema zemlji, odnosno pada sa većim serijskim kapacitetom svitka. Korektivna mjera u ovome smjeru bi značila veći razmak između namota što automatski znači i skuplji transformator. Također se može opaziti da će prijelazna pojava biti intenzivnija što je razlika između početne i konačne raspodjele prenapona veća. A razlika će biti veća što je koeficijent prigušenja veći. Dakle potrebno je na odgovarajući način utjecati na omjer nadomjesnog koeficijenta α. Osnovni cilj je dobiti što manju vrijednost. To se postiže povećanjem ukupnog uzdužnog kapaciteta. Kapacitete prema zemlji je potrebno kompenzirati do te mjere da ih se poništi. Konstrukcija dodanih nadomjesnih namota mora biti tako izvedena da poveća ukupni uzdužni dio kapaciteta K. To se radi s koncentričnim namotom sastavljenom od niza slojeva gdje kapaciteti između slojeva znatno premašuju kapacitet prema zemlji te time smanjuje veličinu koeficijenta α. Dodavanjem isprepletenih, interpoliranih namota, namota s pasivnim vodičima ili namota bez radijalnih kanala namotu s ciljem povećanja serijskog kapaciteta pokazala su se dosada prihvatljivim rješenjem. Utjecaj pridodanih SN kompenzacijskih namota na početnu i konačnu raspodjelu sklopnih prenapona unutar distributivnog transformatora nadilazi temu doktorske disertacije.

6.1.2. Utjecaj promjene načina uzemljenja namota transformatora na oblik karakteristike početne raspodjele sklopnog prenapona

Cilj je analizirati utjecaj promjene načina i vrste uzemljenja namota na oblik karakteristike početne raspodjele sklopnog prenapona. Za potrebe istraživanja početne raspodjele prenapona korišten je simulacijski model sa slike 6.2. te distributivni transformator opisan u tablici 6.1. Ulazni parametri u simulacijski model VF namota transformatora identični su ulaznim parametrima korištenim u podpoglavlju 6.1.1.

U svrhu dobivanja optimalnog numeričkog rješenja početne raspodjele prenapona, u tablici 6.9. su prikazani odabrani simulacijski konfiguracijski parametri za analizu utjecaja promjene načina uzemljenja na karakteristiku sklopnog prenapona.

Tablica 6. 9. Konfiguracijski parametri simulacije

Konfiguracijski parametri simulacije
Trajanje simulacije: 100 μs
Numerička metoda: Trapezoidna robusna metoda (ode 23tb)
Tip numeričke metode: Varijabilni korak simulacije
Relativna tolerancija: 1exp (-4)
Korak simulacije: Automatski korak

U svrhu simulacijskog testiranja u nastavku su detaljno istraživani scenariji sa izoliranim zvjezdištem koji će nam poslužiti za usporedbu sa simuliranim testnim scenarijima u podpoglavlju 6.1.1.

Tablica 6.10. Početna raspodjela prenapona na izoliranom namotu za $\alpha = 2$

Testni ulazni prenapon: $U_m = 75$ kV, 1,2 / 50 μs
Nadomjesni koeficijent: $\alpha = 2$
Način uzemljenja: Izolirano zvjezdište

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$t = 0$ μs										
u_{x1}	u_{x2}	u_{x3}	u_{x4}	u_{x5}	u_{x6}	u_{x7}	u_{x8}	u_{x9}	u_{x10}	u_{x11}
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
74,55	61,50	50,91	42,36	35,51	30,07	25,84	22,64	20,35	18,86	18,14

Tablica 6.11. Početna raspodjela prenapona na izoliranom namotu za $\alpha = 6$

Testni ulazni prenapon: $U_m = 75$ kV, 1,2 / 50 μs
Nadomjesni koeficijent: $\alpha = 6$
Način uzemljenja: Izolirano zvjezdište

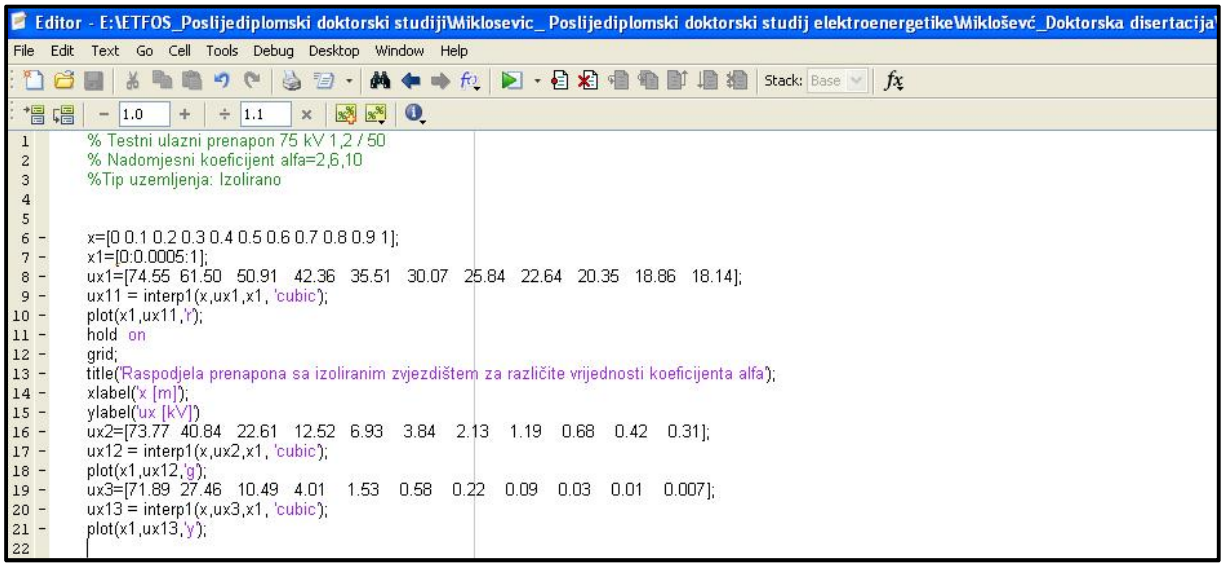
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$t = 0$ μs										
u_{x1}	u_{x2}	u_{x3}	u_{x4}	u_{x5}	u_{x6}	u_{x7}	u_{x8}	u_{x9}	u_{x10}	u_{x11}
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
73,77	40,84	22,61	12,52	6,93	3,84	2,13	1,19	0,68	0,42	0,31

Tablica 6.12. Početna raspodjela prenapona na izoliranim namotu za $\alpha = 10$

Testni ulazni prenapon: $U_m = 75$ kV, 1,2 / 50 μs
Nadomjesni koeficijent: $\alpha = 10$
Način uzemljenja: Izolirano zvjezdište

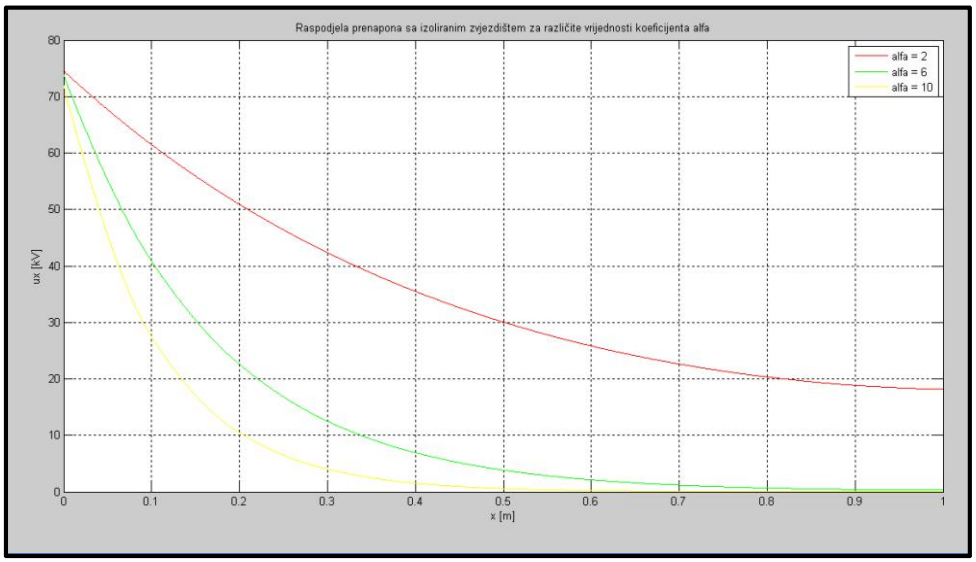
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$t = 0$ μs										
u_{x1}	u_{x2}	u_{x3}	u_{x4}	u_{x5}	u_{x6}	u_{x7}	u_{x8}	u_{x9}	u_{x10}	u_{x11}
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
71,89	27,46	10,49	4,01	1,53	0,58	0,22	0,09	0,03	0,01	0,007

U svrhu dobivanja višedijagramskih prikaza unutar jednog prozora za slučaj izoliranog zvjezdišta kreirana je matlab m - skripta koja je prikazana na slici 6.7.



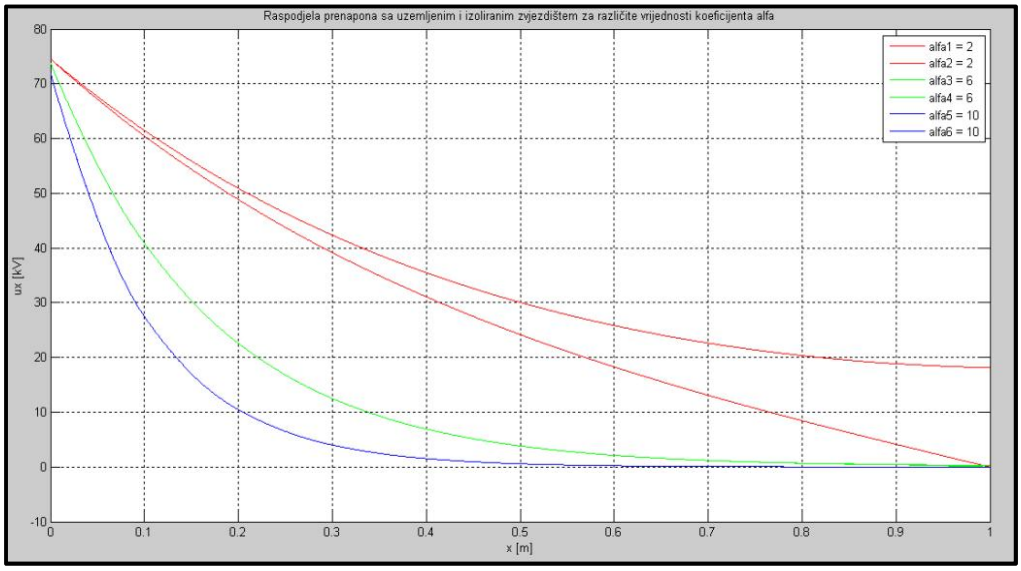
Slika 6.7. Simulacijski okoliš za kreiranje m - skripte

Pored prikaza jednog dijagrama u jednom prozoru, Matlab nudi i mogućnost programiranja višedijagramskog prikaza. Rezultate slijeda naredbi prikazane na slici 6.7. prikazuje slika 6.8. Prilikom generiranja preciznijih višedijagramskih prikaza korištena je kubična interpolacija nad ulaznim vrijednostima napona čvorova VF namota transformatora. Dijagrame početnih vrijednosti raspodjele prenapona u izoliranom i uzemljenom namotu za različite vrijednosti koeficijenta α, prikazuje slika 6.8.



Slika 6.8. Početna raspodjela prenapona na izoliranom namotu za različite vrijednosti koeficijenta α

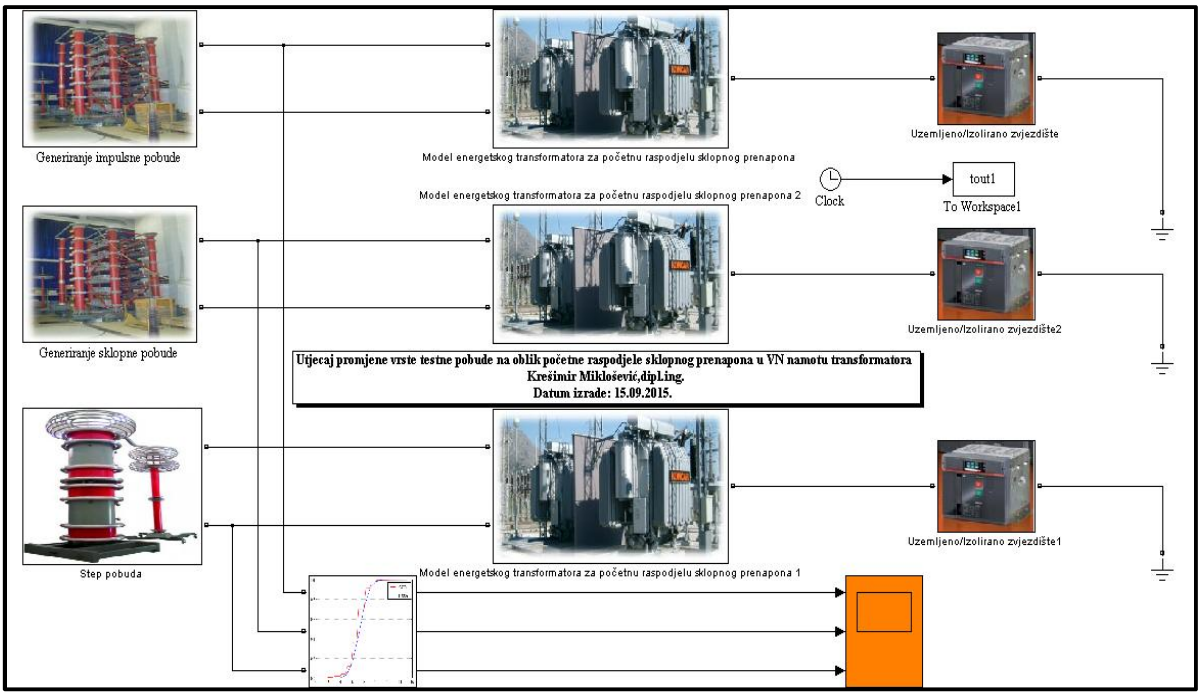
Početna raspodjela prenapona u transformatoru sa izoliranim namotom u početnom trenutku je nešto različita nego kod transformatora sa uzemljenim zvjezdištem. Vidi se da ukoliko je nadomjesni koeficijent α veći ili jednak 3 početne se raspodjele u uzemljenom i izoliranom namotu praktički ne razlikuju. Na slici 6.8. se ti simulacijski scenariji manifestiraju kao preklapanje. Dakle, odgovarajućim projektiranjem pridodanog SN namota moguće je negativne učinke sklopnog prenapona u slučaju izoliranog namota neutralizirati.



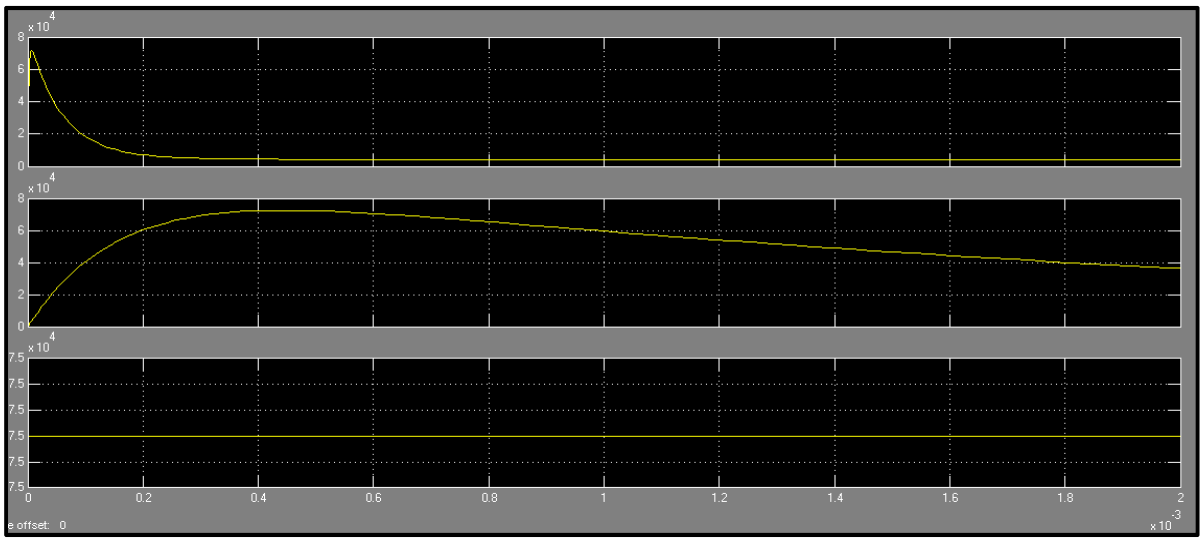
Slika 6.9. Usporedba početne raspodjele prenapona u uzemljenom i izoliranom namotu za različite vrijednosti koeficijenta α

6.1.3. Utjecaj promjene vrste testne pobude na oblik početne raspodjele sklopnog prenapona u SN namotu transformatora

Cilj je analizirati utjecaj promjene oblika generirane testne pobude na karakteristiku početne raspodjele sklopnog prenapona u SN namotu transformatora. Za potrebe istraživanja početne raspodjele prenapona korišten je simulacijski model sa slike 6.8. te energetski distributivni transformator dan u tablici 6.1. Ulazni parametri u simulacijski model VF namota transformatora identični su ulaznim parametrima korištenim u podpoglavlju 6.1.1. Za potrebe analiziranja utjecaja oblika i vrste sklopne pobude na karakteristiku prenapona korišten je simulacijski model sa slike 2.11. Nadalje, ulazni parametri u simulacijski model testne pobude preuzeti su iz tablice 2.4.



Slika 6.10. Usporedba različitih vrsta testne pobude na oblik početne raspodjele sklopnog prenapona u uzemljenom i izoliranom SN namotu



Slika 6.11. Prikaz oblika tri generirane testne pobude

U svrhu dobivanja optimalnog numeričkog rješenja početne raspodjele prenapona, u tablici 6.13. su prikazani odabrani konfiguracijski parametri simulacije za analizu utjecaja promjene oblika testne pobude na karakteristiku sklopnog prenapona.

Tablica 6.13. Konfiguracijski parametri simulacije

Konfiguracijski parametri simulacije
Trajanje simulacije: 200 μs
Numerička metoda: Trapezoidna robusna metoda (ode 23tb)
Tip numeričke metode: Varijabilni korak simulacije
Relativna tolerancija: 1exp (-4)
Korak simulacije: Automatski korak

U svrhu simulacijskog testiranja u nastavku su detaljno istraživani odabrani scenariji sa generiranim različitim oblicima prenapona koji će poslužiti za usporedbu sa simuliranim scenarijima iz prethodna tri podpoglavlja.

Tablica 6.14. Početna raspodjela prenapona (oblika step funkcije) u izoliranom namotu za $t = 0$ μs i $\alpha = 10$

Testni ulazni prenapon*:* $U_m = 75$ kV
Nadomjesni koeficijent: $\alpha = 10$
Način uzemljenja*:* Izolirano zvjezdište

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
					$t = 0$ μs					
u_{x1}	u_{x2}	u_{x3}	u_{x4}	u_{x5}	u_{x6}	u_{x7}	u_{x8}	u_{x9}	u_{x10}	u_{x11}
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
75,00	28,65	10,94	4,18	1,60	0,61	0,23	0,09	0,03	0,01	0

Tablica 6.15. Početna raspodjela prenapona (oblika udarne funkcije) u izoliranom namotu za $t = 0$ μs i $\alpha = 10$

Testni ulazni prenapon*:* $U_m = 75$ kV, 1,2 / 50 μs
Nadomjesni koeficijent: $\alpha = 10$
Način uzemljenja*:* Izolirano zvjezdište

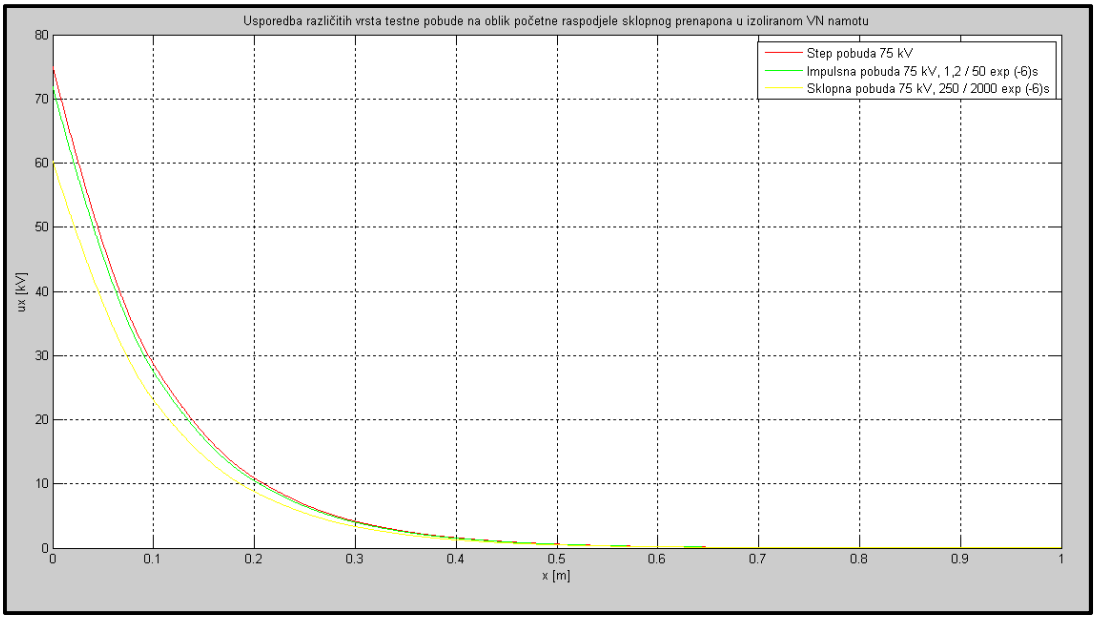
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
					$t = 0$ μs					
u_{x1}	u_{x2}	u_{x3}	u_{x4}	u_{x5}	u_{x6}	u_{x7}	u_{x8}	u_{x9}	u_{x10}	u_{x11}
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
71,89	27,46	10,49	4,01	1,53	0,58	0,22	0,09	0,03	0,01	0,007

Tablica 6.16. Početna raspodjela prenapona (oblika sklopne funkcije) u izoliranom namotu za $t = 0$ μs i $\alpha = 10$

Testni ulazni prenapon: $U_m = 75$ kV, 250 / 2000 μs
Nadomjesni koeficijent: $\alpha = 10$
Način uzemljenja: Izolirano zvjezdište

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
					$t = 0$ μs					
u_{x1}	u_{x2}	u_{x3}	u_{x4}	u_{x5}	u_{x6}	u_{x7}	u_{x8}	u_{x9}	u_{x10}	u_{x11}
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
60,29	23,03	8,79	3,36	1,28	0,49	0,19	0,07	0,03	0,01	0

Pored prikaza jednog dijagrama u jednom prozoru, Matlab nudi i mogućnost programiranja višedijagramskog prikaza. Prilikom generiranja preciznijih višedijagramskih prikaza korištena je kubična interpolacija nad ulaznim vrijednostima napona čvorova SN namota transformatora. Dijagrame usporedbe različitih vrsta testne pobude na oblik početne raspodjele sklopnog prenapona, prikazuje slika 6.12.



Slika 6.12. Usporedba različitih vrsta testne pobude na oblik početne raspodjele sklopnog prenapona u izoliranom namotu uz $\alpha = 10$

Tablica 6.17. Početna raspodjela prenapona (oblika step funkcije) u uzemljenom namotu za $t = 0$ μs i $\alpha = 10$

Testni ulazni prenapon: $U_m = 75$ kV
Nadomjesni koeficijent: $\alpha = 10$
Način uzemljenja: Direktno uzemljeno

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
					$t = 0$ μs					
u_{x1}	u_{x2}	u_{x3}	u_{x4}	u_{x5}	u_{x6}	u_{x7}	u_{x8}	u_{x9}	u_{x10}	u_{x11}
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
75,00	28,65	10,94	4,18	1,60	0,61	0,23	0,09	0,03	0,01	0

Tablica 6.18. Početna raspodjela prenapona (oblika udarne funkcije) u uzemljenom namotu za $t = 0$ μs i $\alpha = 10$

Testni ulazni prenapon: $U_m = 75$ kV, 1,2 / 50 μs
Nadomjesni koeficijent: $\alpha = 10$
Način uzemljenja: Direktno uzemljeno

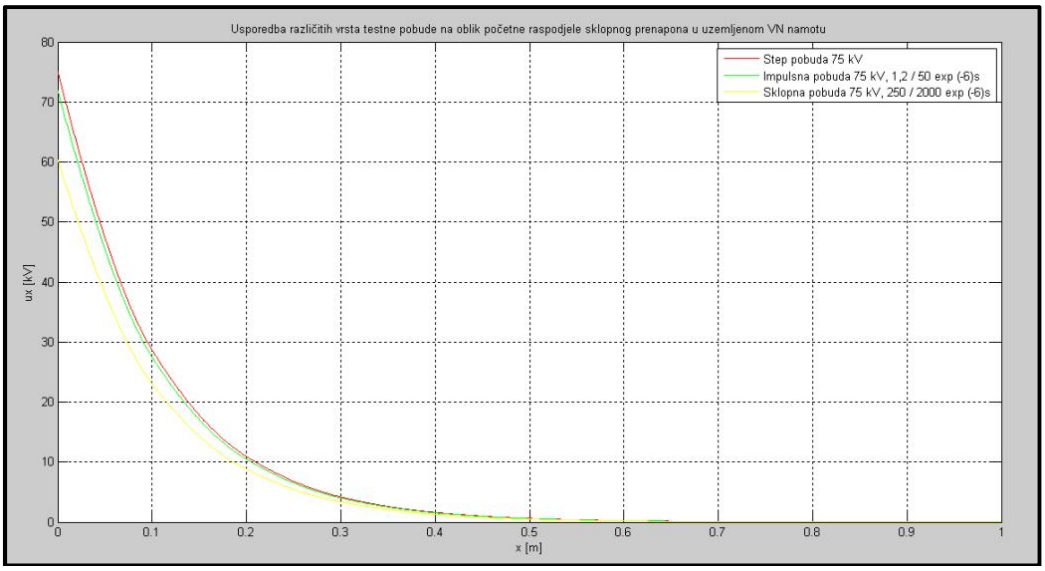
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
					$t = 0$ μs					
u_{x1}	u_{x2}	u_{x3}	u_{x4}	u_{x5}	u_{x6}	u_{x7}	u_{x8}	u_{x9}	u_{x10}	u_{x11}
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
71,90	27,46	10,49	4,01	1,53	0,58	0,22	0,08	0,03	0,01	0

Tablica 6.19. Početna raspodjela prenapona (oblika sklopne funkcije) u uzemljenom namotu za $t = 0$ μs i $\alpha = 10$

Testni ulazni prenapon: $U_m = 75$ kV, 250 / 2000 μs
Nadomjesni koeficijent: $\alpha = 10$
Način uzemljenja: Direktno uzemljeno

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
					$t = 0$ μs					
u_{x1}	u_{x2}	u_{x3}	u_{x4}	u_{x5}	u_{x6}	u_{x7}	u_{x8}	u_{x9}	u_{x10}	u_{x11}
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
60,29	23,03	8,80	3,36	1,28	0,49	0,19	0,07	0,03	0,01	0

Dijagrame usporedbe različitih vrsta testne pobude na oblik početne raspodjele sklopnog prenapona za slučaj uzemljenog SN namota transformatora, prikazuje slika 6.13.



Slika 6.13. Usporedba različitih vrsta testne pobude na oblik početne raspodjele sklopnog prenapona u uzemljenom namotu uz $\alpha = 10$

U svrhu dobivanja preciznijih višedijagramskih prikaza korištena je kubična interpolacija nad ulaznim vrijednostima napona čvorova SN namota. Dijagrame početnih vrijednosti raspodjele prenapona u izoliranom i uzemljenom namotu za vrijednosti koeficijenta $\alpha = 10$, prikazuje slika 6.12. i slika 6.13. Vidi se da je početna raspodjela prenapona u transformatoru sa izoliranim namotom u početnom trenutku jednaka kao kod transformatora sa uzemljenim zvjezdištem. Raspodjela početnog napona je nešto povoljnija kod sklopne pobude. Može se također opaziti da je najveći početni napon na ulaznom dijelu namota za slučaj step pobude. Učinak impulsne pobude je između step i sklopne pobude što se moglo i očekivati. Također vidimo da ukoliko je nadomjesni koeficijent α veći od 4 početne se raspodjele u uzemljenom i izoliranom namotu praktički preklapaju.

6.1.4. Utjecaj promjene koeficijenta α na oblik raspodjele sklopnog prenapona u uzemljenom i izoliranom namotu transformatora

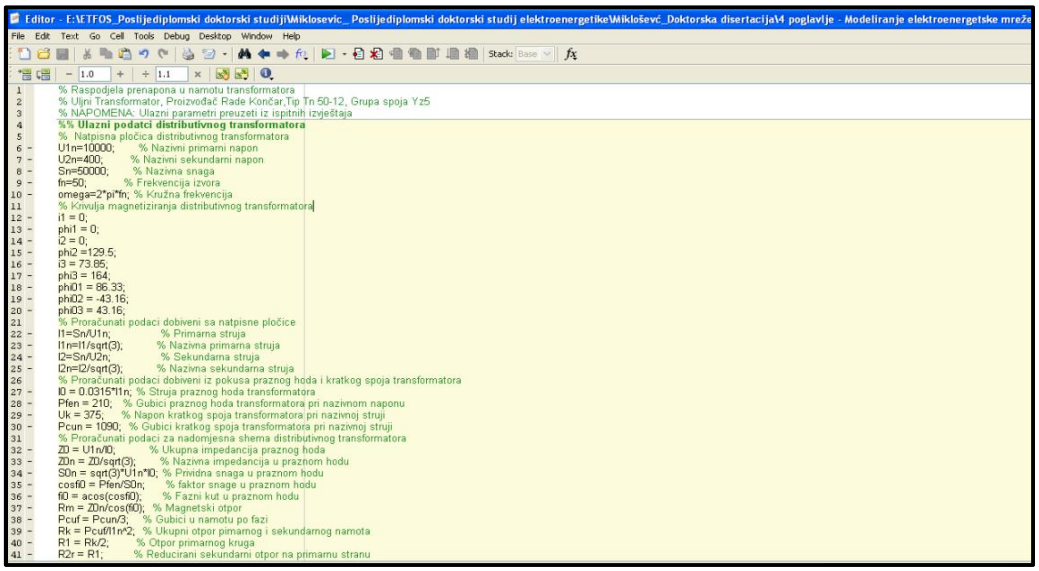
Cilj je u različitim trenutcima istražiti utjecaj promjene koeficijenta α na oblik raspodjele sklopnog prenapona u uzemljenom i izoliranom namotu. Za potrebe istraživanja raspodjele prenapona korišten je simulacijski model sa slike 4.6. te energetski distributivni transformator opisan u tablici 6.1. Ulazni parametri u simulacijski model VF modela namota transformatora prikazani su u tablici 6.20. Za potrebe analiziranja utjecaja vrste pobude na oblik raspodjele konačne raspodjele sklopnog prenapona u uzemljenom i izoliranom namotu korišten je

simulacijski model sa slike 2.11. Nadalje, ulazni parametri u simulacijski model testne pobude preuzeti su iz tablice 2.4.

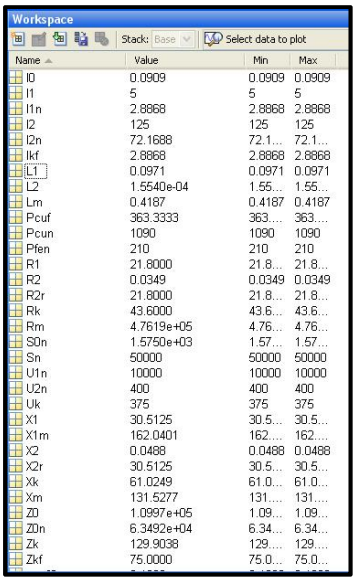
Tablica 6.20. Tablica proračunatih koeficijenta α i nadomjesnih elementarnih kapaciteta C_e i induktiviteta L_e svitka distributivnog transformatora 10 / 0,4 kV

C	C_e	n	K	K_e	L_e	L_1	C_{ekv}	α
[pF / m]	[pF / m]	[broj]	[pF / m]	[pF / m]	[mH / m]	[mH / m]	[pF / m]	[omjer]
0	0	10	5	50	10	100	5	0
40	4	10	10	100	10	100	20	2
320	32	10	20	200	10	100	80	4
1080	108	10	30	300	10	100	180	6
2560	256	10	40	400	10	100	320	8
5000	500	10	50	500	10	100	500	10

Dok se nazivni ulazni parametri transformatora mogu pronaći u ispitnim izvještajima samog proizvođača, parametar kao što je nadomjesni ekvivalentni induktivitet primarnog namota L_1 obično nije dostupan te se mora dodatno proračunati. Ekvivalentni induktivitet L_e svitka distributivnog transformatora 10 / 0,4 kV proračunat je pomoću m – skripte. Za potrebe numeričkog proračuna korištena je teorija s distribuiranim parametrima. Namot distributivnog transformatora sastoji od 10 svitaka koji su međusobno spojeni u seriju. Korišteni ulazni parametri preuzeti su iz testnog izvještaja koji je dan u Prilogu 1.



Slika 6.14. Proračun ekvivalentnog induktiviteta L_e namota distributivnog transformatora 10 / 0,4 kV



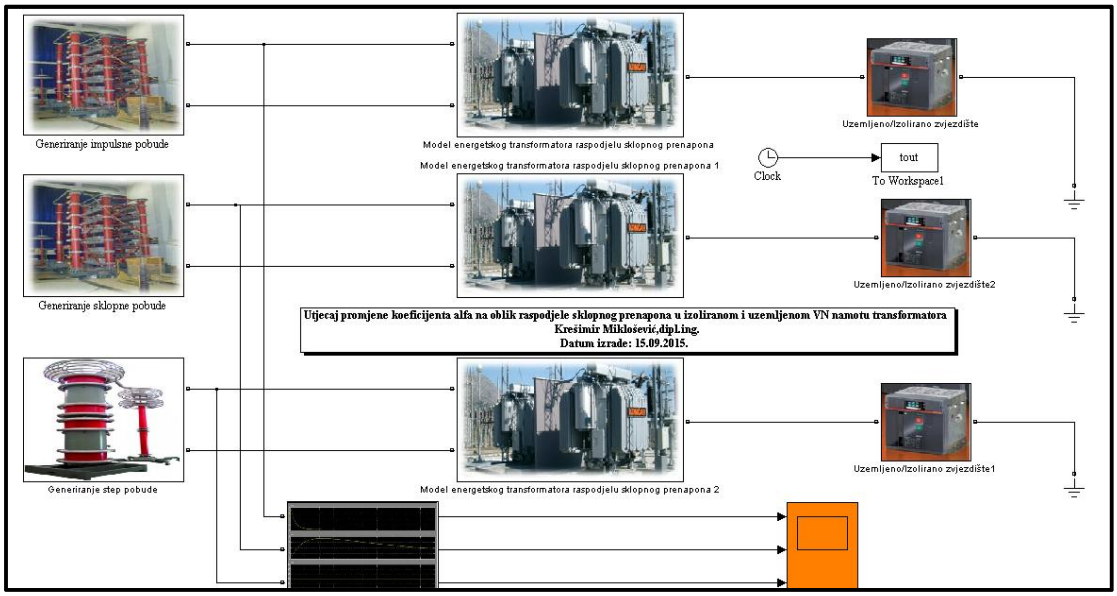
Workspace

Stack: Base | Select data to plot

Name	Value	Min	Max
I0	0.0909	0.0909	0.0909
I1	5	5	5
I1n	2.8868	2.8868	2.8868
I2	125	125	125
I2n	72.1688	72.1...	72.1...
Ikf	2.8868	2.8868	2.8868
L1	0.0971	0.0971	0.0971
L2	1.5540e-04	1.55...	1.55...
Lm	0.4187	0.4187	0.4187
Pcuf	363.3333	363....	363....
Pcun	1090	1090	1090
Pfen	210	210	210
R1	21.8000	21.8...	21.8...
R2	0.0349	0.0349	0.0349
R2r	21.8000	21.8...	21.8...
Rk	43.6000	43.6...	43.6...
Rm	4.7619e+05	4.76...	4.76...
S0n	1.5750e+03	1.57...	1.57...
Sn	50000	50000	50000
U1n	10000	10000	10000
U2n	400	400	400
Uk	375	375	375
X1	30.5125	30.5...	30.5...
X1m	162.0401	162....	162....
X2	0.0488	0.0488	0.0488
X2r	30.5125	30.5...	30.5...
Xk	61.0249	61.0...	61.0...
Xm	131.5277	131....	131....
Z0	1.0997e+05	1.09...	1.09...
Z0n	6.3492e+04	6.34...	6.34...
Zk	129.9038	129....	129....
Zkf	75.0000	75.0...	75.0...

Slika 6.15. Proračunate vrijednosti nadomjesnih parametara distributivnog transformatora 10 / 0,4 kV

Za dobivanje raspodjele prenapona uzduž namota u trenutcima koje slijede iza početnog razvijen je simulacijski testni model (Slika 6.16.). Razvijeni simulacijski model se koristi za dodatno pojašnjavanje raspodjele prenapona uzduž namota. Kada je simulacijski model razvijen, ulazni nadomjesni parametri se mogu jednostavno kroz m - skriptu unositi za bilo koji istraživani distributivni transformator. Nadalje, dobiveni rezultati simulacije na standardnim topologijskim VF modelima namota transformatora mogu poslužiti za pojašnjenje rizika od prenapona.



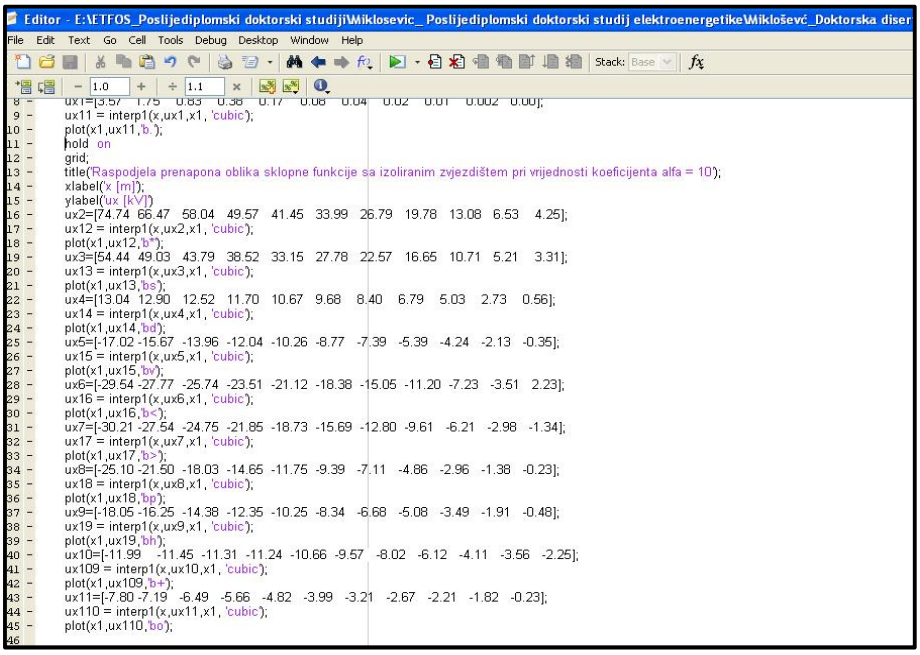
Slika 6.16. Simulacijski model za analizu utjecaja promjene koeficijenta α na oblik raspodjele sklopnog prenapona u uzemljenom i izoliranom namotu

U svrhu dobivanja optimalnog numeričkog rješenja raspodjele prenapona, u tablici 6.21. su prikazani odabrani konfiguracijski parametri simulacije za istraživanje utjecaja promjene koeficijenta α na oblik raspodjele sklopnog prenapona u uzemljenom i izoliranom namotu.

Tablica 6.21. Konfiguracijski parametri simulacije

Konfiguracijski parametri simulacije
Trajanje simulacije: 200 μs ili 2000 μs
Numerička metoda: Trapezoidna robusna metoda (ode 23tb)
Tip numeričke metode: Varijabilni korak simulacije
Relativna tolerancija: 1exp (-4)
Korak simulacije: Automatski korak

Matlab je potpuni programski jezik u kojem je moguće napisati vlastite programske funkcije ili skripte. Osnovna razlika je u dosegu ulaznih varijabli. Također, pomoću mnogobrojnih integriranih programskih funkcija postoji mogućnost kreiranja zasebnih programa. Svaki skup Matlabovih naredbi napisan korištenjem tekstualnog editora koji je pohranjen unutar m - datoteke predstavlja zaseban Matlabov program. Kombiniranjem različitih Matlabovih implementiranih funkcija povezanih da čine jednu cjelinu moguće je kreirati korisnu zasebnu skriptnu datoteku. Štoviše, skriptne datoteke ne uzimaju ulazne argumente ali vraćaju izlazne varijable. U nastavku je prikazan primjer m - skripte koja se koristi za prikazivanje početne i konačne raspodjele prenapona.

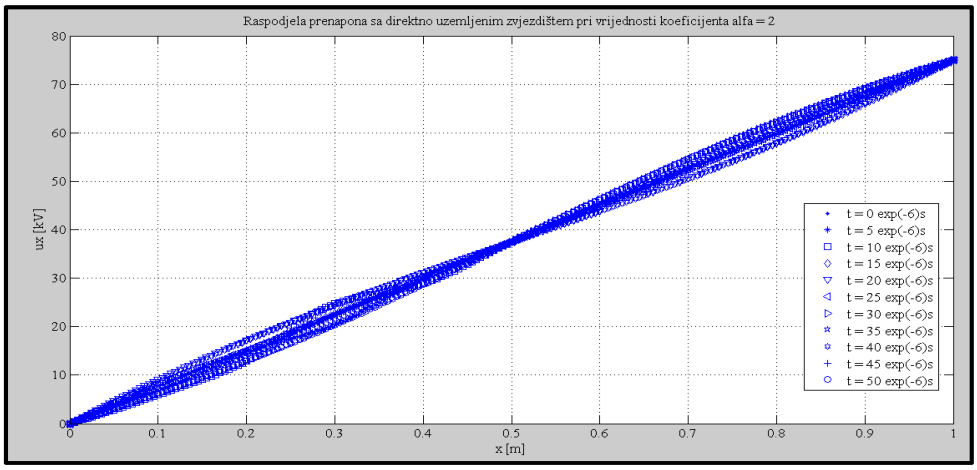


Slika 6.17. Primjer razvijene skriptne datoteke

Tablica 6.22. Raspodjela prenapona oblika step pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 50 μs za α = 2

Testni ulazni prenapon: U_m = 75 kV
Nadomjesni koeficijent: α = 2
Način uzemljenja: Direktno uzemljeno

x_1 [m]	x_2 [m]	x_3 [m]	x_4 [m]	x_5 [m]	x_6 [m]	x_7 [m]	x_8 [m]	x_9 [m]	x_{10} [m]	x_{11} [m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
					t = 0 μs					
u_{x1} [kV]	u_{x2} [kV]	u_{x3} [kV]	u_{x4} [kV]	u_{x5} [kV]	u_{x6} [kV]	u_{x7} [kV]	u_{x8} [kV]	u_{x9} [kV]	u_{x10} [kV]	u_{x11} [kV]
75,00	68,13	60,89	53,31	45,47	37,5	29,53	22,64	14,11	6,87	0,00
					t = 5 μs					
74,99	67,55	59,85	52,55	45,05	37,5	30,01	20,39	14,85	7,77	0,00
					t = 10 μs					
74,99	69,09	62,12	54,37	46,07	37,5	28,94	24,73	12,88	5,93	0,00
					t = 15 μs					
74,99	67,95	59,93	52,31	44,95	37,5	30,15	22,69	14,85	7,15	0,00
					t = 20 μs					
74,99	65,95	57,84	50,57	43,88	37,49	31,11	24,43	17,16	9,06	0,00
					t = 25 μs					
74,99	67,15	59,85	52,57	45,11	37,49	29,89	22,43	15,15	8,36	0,00
					t = 30 μs					
74,99	68,96	62,15	54,48	46,17	37,49	28,84	20,52	12,86	6,04	0,00
					t = 35 μs					
74,99	67,85	60,25	52,55	44,85	37,49	29,98	22,48	14,85	7,12	0,00
					t = 40 μs					
74,99	66,17	57,88	50,45	43,77	37,49	31,23	24,55	17,12	8,83	0,00
					t = 45 μs					
74,99	67,05	59,75	52,36	45,01	37,49	29,98	22,35	15,23	8,06	0,00
					t = 50 μs					
74,99	68,63	62,04	54,61	46,28	37,49	28,72	20,39	12,96	6,37	0,00

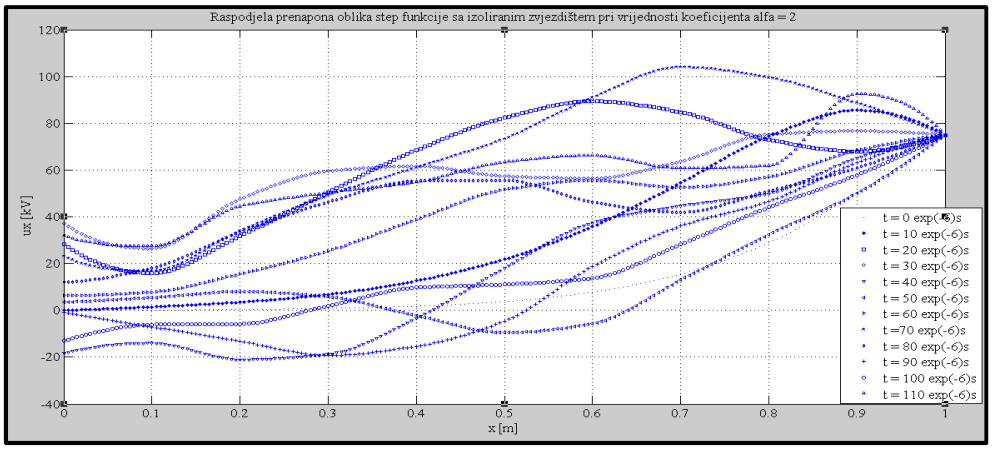


Slika 6.18. Raspodjela prenapona oblika step pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 50 μs za α = 2

Tablica 6.23. Raspodjela prenapona oblika step pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 50 μs za α = 2

Testni ulazni prenapon: U_m = 75 kV
Nadomjesni koeficijent: α = 2
Način uzemljenja: Izolirano zvjezdište

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
					t = 0 μs					
u_{x1}	u_{x2}	u_{x3}	u_{x4}	u_{x5}	u_{x6}	u_{x7}	u_{x8}	u_{x9}	u_{x10}	u_{x11}
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
75,00	50,26	28,92	15,55	7,81	3,72	1,82	0,85	0,38	0,14	0,00
					t = 10 μs					
75,00	85,55	74,47	54,44	35,78	21,84	12,61	6,82	3,53	1,47	0,00
					t = 20 μs					
75,00	67,91	72,99	84,78	89,42	82,35	68,52	50,55	31,85	15,86	28,35
					t = 30 μs					
75,00	76,67	75,29	63,66	56,47	57,35	61,67	59,55	47,59	26,45	37,25
					t = 40 μs					
75,00	65,13	49,96	44,71	37,55	18,05	-3,51	-18,73	-21,05	-14,01	-18,3
					t = 50 μs					
75,00	50,05	32,41	12,95	-5,69	-9,55	-2,25	5,79	8,05	5,45	3,52
					t = 60 μs					
75,00	68,36	57,11	52,57	55,59	51,61	38,85	25,36	15,55	7,82	6,32
					t = 70 μs					
75,00	88,65	99,55	103,97	90,86	73,29	60,95	49,05	33,92	16,79	23,12
					t = 80 μs					
75,00	60,85	51,02	41,95	46,29	55,59	55,35	46,31	33,46	18,08	12,02
					t = 90 μs					
75,00	63,15	46,55	36,05	18,74	-4,64	-15,35	-19,31	-13,25	-7,07	-1,25
					t = 100 μs					
75,00	57,82	44,05	28,22	13,75	11,06	9,75	1,91	-5,83	-6,11	-12,9
					t = 110 μs					
75,00	92,64	61,92	60,76	66,29	63,43	54,91	50,34	44,52	27,55	32,05

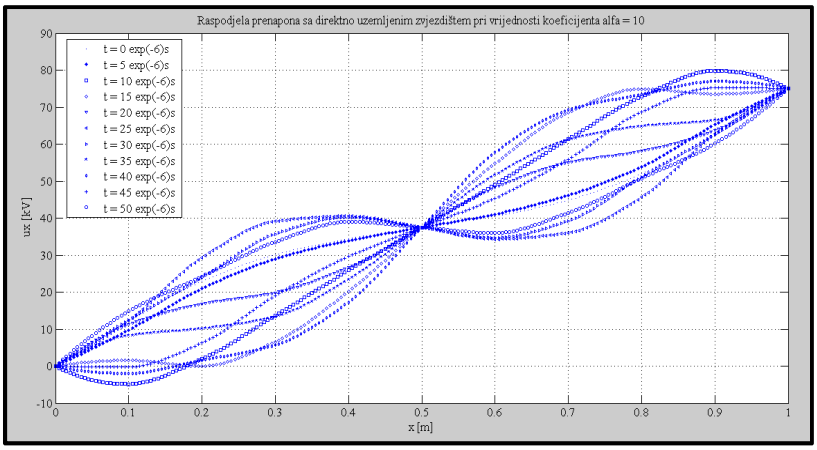


Slika 6.19. Raspodjela prenapona oblika step pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 110 μs za α = 2

Tablica 6.24. Raspodjela prenapona oblika step pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 50 μs za α = 10

Testni ulazni prenapon: U_m = 75 kV
Nadomjesni koeficijent: α = 10
Način uzemljenja: Direktno uzemljeno

x_1 [m]	x_2 [m]	x_3 [m]	x_4 [m]	x_5 [m]	x_6 [m]	x_7 [m]	x_8 [m]	x_9 [m]	x_{10} [m]	x_{11} [m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
					t = 0 μs					
u_{x1} [kV]	u_{x2} [kV]	u_{x3} [kV]	u_{x4} [kV]	u_{x5} [kV]	u_{x6} [kV]	u_{x7} [kV]	u_{x8} [kV]	u_{x9} [kV]	u_{x10} [kV]	u_{x11} [kV]
75,00	62,97	52,04	44,88	40,52	37,50	34,48	30,12	22,96	12,03	0,00
					t = 5 μs					
75,00	65,25	53,85	46,15	41,05	37,50	33,95	28,95	20,96	9,76	0,00
					t = 10 μs					
75,00	79,86	72,85	61,34	49,13	37,50	25,87	13,66	1,97	-4,86	0,00
					t = 15 μs					
75,00	73,55	74,95	68,55	54,77	37,50	20,22	6,55	0	1,55	0,00
					t = 20 μs					
75,00	63,69	58,15	55,11	48,29	37,50	26,71	19,89	16,85	11,31	0,00
					t = 25 μs					
75,00	62,69	45,65	36,06	34,35	37,50	40,55	39,15	29,35	12,29	0,00
					t = 30 μs					
75,00	62,55	51,13	39,27	34,72	37,50	40,28	35,73	23,87	12,45	0,00
					t = 35 μs					
75,00	66,45	64,85	61,15	51,59	37,50	23,41	13,31	10,15	8,25	0,00
					t = 40 μs					
75,00	76,96	73,42	69,29	57,73	37,50	17,27	5,71	1,59	-1,96	0,00
					t = 45 μs					
75,00	75,24	68,71	55,94	45,37	37,50	29,63	19,06	6,29	-0,24	0,00
					t = 50 μs					
75,00	60,12	50,79	41,44	35,95	37,50	39,05	33,56	24,21	14,88	0,00

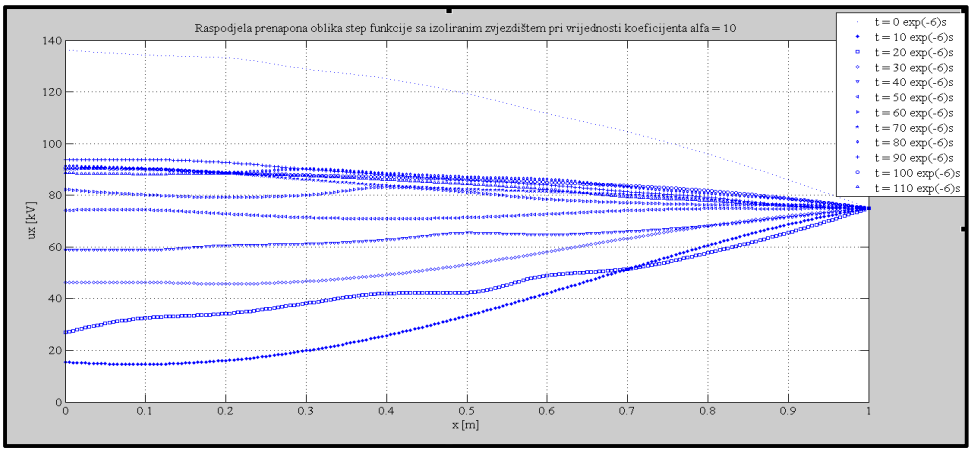


Slika 6.20. Raspodjela prenapona oblika step pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 50 μs za α = 10

Tablica 6.25. Raspodjela prenapona oblika step pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 110 μs za α = 10

Testni ulazni prenapon: U_m = 75 kV
Nadomjesni koeficijent: α = 2
Način uzemljenja: Izolirano zvjezdište

x_1 [m]	x_2 [m]	x_3 [m]	x_4 [m]	x_5 [m]	x_6 [m]	x_7 [m]	x_8 [m]	x_9 [m]	x_{10} [m]	x_{11} [m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
					t = 0 μs					
u_{x1} [kV]	u_{x2} [kV]	u_{x3} [kV]	u_{x4} [kV]	u_{x5} [kV]	u_{x6} [kV]	u_{x7} [kV]	u_{x8} [kV]	u_{x9} [kV]	u_{x10} [kV]	u_{x11} [kV]
75,00	85,97	95,96	104,55	111,62	119,25	125,15	128,85	133,15	134,25	136,25
					t = 10 μs					
75,00	68,67	60,53	51,41	42,09	33,32	25,74	19,86	16,05	14,57	15,45
					t = 20 μs					
75,00	65,53	57,68	51,43	48,99	42,35	42,04	38,15	34,18	32,53	26,86
					t = 30 μs					
75,00	72,01	68,12	63,29	58,06	53,15	49,22	46,67	45,63	46,32	46,19
					t = 40 μs					
75,00	71,42	68,16	65,99	64,76	65,45	62,77	61,16	60,56	58,85	58,96
					t = 50 μs					
75,00	74,82	74,84	74,08	72,71	71,41	70,84	71,40	72,83	74,31	74,28
					t = 60 μs					
75,00	76,43	76,39	77,14	78,43	81,25	83,15	80,06	79,12	80,15	82,25
					t = 70 μs					
75,00	76,23	78,39	80,15	81,28	82,27	83,72	85,97	88,51	90,25	90,01
					t = 80 μs					
75,00	78,46	80,74	83,15	86,15	87,09	88,47	90,15	88,77	90,34	91,34
					t = 90 μs					
75,00	76,05	79,25	81,35	83,95	85,89	87,92	90,07	92,64	93,79	93,75
					t = 100 μs					
75,00	78,75	81,75	83,66	85,01	86,07	87,00	87,77	88,71	90,11	90,53
					t = 110 μs					
75,00	75,89	77,88	79,33	82,35	84,32	85,99	87,46	88,32	88,22	88,57

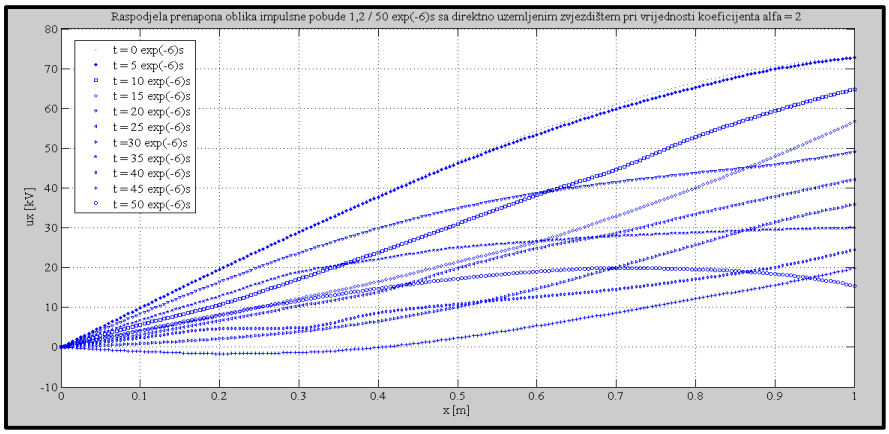


Slika 6.21. Raspodjela prenapona oblika step pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 110 μs za α = 10

Tablica 6.26. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 50 μs za α = 2

Testni ulazni prenapon: U_m = 75 kV, 1,2 / 50 μs
Nadomjesni koeficijent: α = 2
Način uzemljenja: Direktno uzemljeno

x_1 [m]	x_2 [m]	x_3 [m]	x_4 [m]	x_5 [m]	x_6 [m]	x_7 [m]	x_8 [m]	x_9 [m]	x_{10} [m]	x_{11} [m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
					t = 0 μs					
u_{x1} [kV]	u_{x2} [kV]	u_{x3} [kV]	u_{x4} [kV]	u_{x5} [kV]	u_{x6} [kV]	u_{x7} [kV]	u_{x8} [kV]	u_{x9} [kV]	u_{x10} [kV]	u_{x11} [kV]
73,03	70,58	66,49	61,01	54,35	46,69	38,26	29,21	19,71	9,93	0,00
					t = 5 μs					
72,75	69,85	65,25	59,85	53,43	46,15	37,74	28,89	19,56	9,86	0,00
					t = 10 μs					
64,80	59,35	52,82	44,65	38,23	30,99	23,83	17,13	10,64	5,66	0,00
					t = 15 μs					
56,66	47,95	40,05	32,95	26,45	21,43	16,48	12,23	7,85	3,95	0,00
					t = 20 μs					
49,16	45,90	43,79	41,50	38,72	34,91	29,88	23,65	16,40	8,39	0,00
					t = 25 μs					
42,15	37,88	33,45	28,66	24,85	19,85	13,86	10,34	6,62	3,15	0,00
					t = 30 μs					
35,85	31,42	25,69	20,10	14,71	10,13	6,54	3,92	2,12	0,91	0,00
					t = 35 μs					
29,95	29,48	28,74	27,86	26,55	24,98	22,05	18,81	12,75	6,65	0,00
					t = 40 μs					
24,54	20,11	17,11	14,57	12,65	10,83	8,65	4,85	4,62	2,33	0,00
					t = 45 μs					
19,86	15,61	12,19	8,68	5,33	2,31	-0,06	-1,34	-1,63	-1,06	0,00
					t = 50 μs					
15,46	18,41	19,55	19,90	18,99	17,22	14,76	11,70	8,14	4,18	0,00

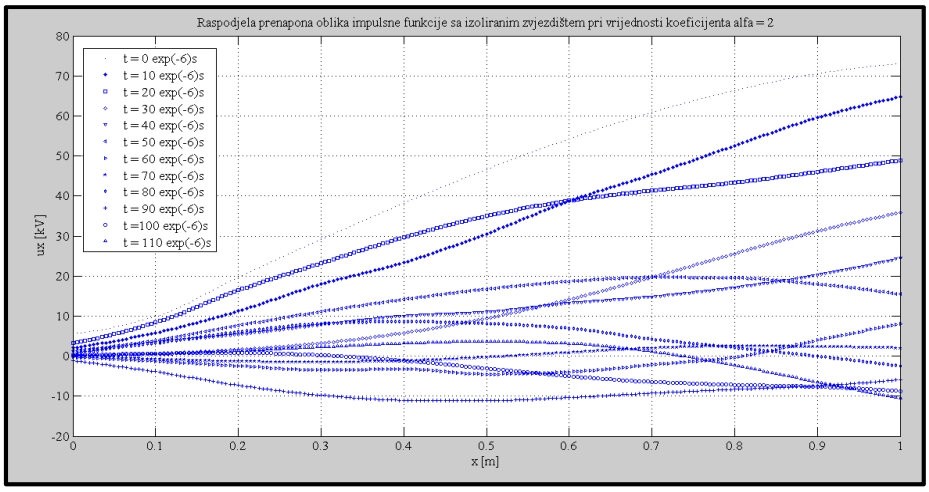


Slika 6.22. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 50 μs za α = 2

Tablica 6.27. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 110 μs za α = 2

Testni ulazni prenapon: U_m = 75 kV, 1,2 / 50 μs
Nadomjesni koeficijent: α = 2
Način uzemljenja: Izolirano zvjezdište

x_1 [m]	x_2 [m]	x_3 [m]	x_4 [m]	x_5 [m]	x_6 [m]	x_7 [m]	x_8 [m]	x_9 [m]	x_{10} [m]	x_{11} [m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
					t = 0 μs					
u_{x1} [kV]	u_{x2} [kV]	u_{x3} [kV]	u_{x4} [kV]	u_{x5} [kV]	u_{x6} [kV]	u_{x7} [kV]	u_{x8} [kV]	u_{x9} [kV]	u_{x10} [kV]	u_{x11} [kV]
73,02	70,58	66,32	60,92	54,26	46,64	38,20	29,15	19,72	9,9	5,67
					t = 10 μs					
64,71	59,55	52,55	45,35	38,75	30,55	23,35	17,98	11,25	5,80	2,06
					t = 20 μs					
48,92	46,03	43,34	41,35	38,83	35,01	29,65	23,19	16,44	8,42	3,23
					t = 30 μs					
35,81	31,21	25,59	19,67	14,13	9,43	5,79	3,23	1,59	0,62	0,06
					t = 40 μs					
24,53	20,25	17,16	14,86	13,25	11,05	10,04	7,86	5,41	3,45	0,34
					t = 50 μs					
15,46	18,00	19,53	19,69	18,67	16,75	14,17	11,10	7,64	3,90	1,31
					t = 60 μs					
8,08	3,95	-0,31	-2,16	-3,95	-4,51	-3,25	-3,45	-2,45	-1,27	-0,25
					t = 70 μs					
2,01	2,34	2,51	1,97	0,87	-0,31	-1,18	-1,52	-1,35	-0,78	0,00
					t = 80 μs					
-2,45	-0,01	2,12	4,25	6,95	8,15	8,65	8,12	6,06	3,25	1,23
					t = 90 μs					
-5,91	-7,45	-8,30	-9,26	-10,36	-11,13	-11,03	-9,75	-7,29	-3,89	-1,13
					t = 100 μs					
-8,70	-7,66	-7,17	-6,44	-5,02	-3,07	-1,15	0,24	0,82	0,63	0,25
					t = 110 μs					
-10,48	-6,49	-2,31	1,15	3,17	3,70	3,19	2,27	1,34	0,59	0,12

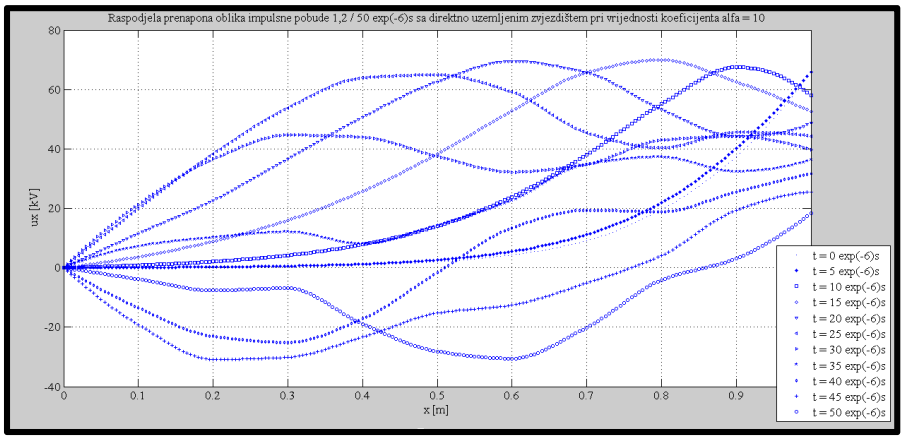


Slika 6.23. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 110 μs za α = 2

Tablica 6.28. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 50 μs za α = 10

Testni ulazni prenapon: U_m = 75 kV, 1,2 / 50 μs
Nadomjesni koeficijent: α = 10
Način uzemljenja: Direktno uzemljeno

x_1 [m]	x_2 [m]	x_3 [m]	x_4 [m]	x_5 [m]	x_6 [m]	x_7 [m]	x_8 [m]	x_9 [m]	x_{10} [m]	x_{11} [m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
					t = 0 μs					
u_{x1} [kV]	u_{x2} [kV]	u_{x3} [kV]	u_{x4} [kV]	u_{x5} [kV]	u_{x6} [kV]	u_{x7} [kV]	u_{x8} [kV]	u_{x9} [kV]	u_{x10} [kV]	u_{x11} [kV]
65,85	37,35	19,65	9,11	4,32	2,00	0,87	0,45	0,21	0,07	0,00
					t = 5 μs					
65,98	40,13	21,83	11,16	5,48	2,61	1,23	0,57	0,25	0,09	0,00
					t = 10 μs					
58,09	67,49	55,07	38,10	23,89	14,01	7,81	4,16	2,07	0,85	0,00
					t = 15 μs					
52,61	62,55	69,95	65,75	52,85	38,24	25,74	15,98	8,87	3,67	0,00
					t = 20 μs					
48,71	44,15	53,27	65,67	69,54	62,65	50,65	36,64	22,65	11,52	0,00
					t = 25 μs					
44,35	45,56	40,35	45,38	59,15	64,91	63,91	53,85	38,33	19,92	0,00
					t = 30 μs					
39,74	44,19	42,95	34,79	32,22	37,50	43,96	44,65	36,52	21,28	0,00
					t = 35 μs					
36,32	32,41	37,26	34,84	22,65	14,25	8,05	12,06	10,19	7,25	0,00
					t = 40 μs					
31,74	25,56	18,83	19,39	13,44	-1,60	-17,16	-25,10	-23,12	-13,48	0,00
					t = 45 μs					
25,56	19,37	4,05	-5,12	-12,56	-15,25	-23,35	-30,15	-30,85	-19,13	0,00
					t = 50 μs					
18,25	3,12	-4,15	-20,11	-30,56	-28,16	-18,92	-6,87	-7,65	-3,85	0,00

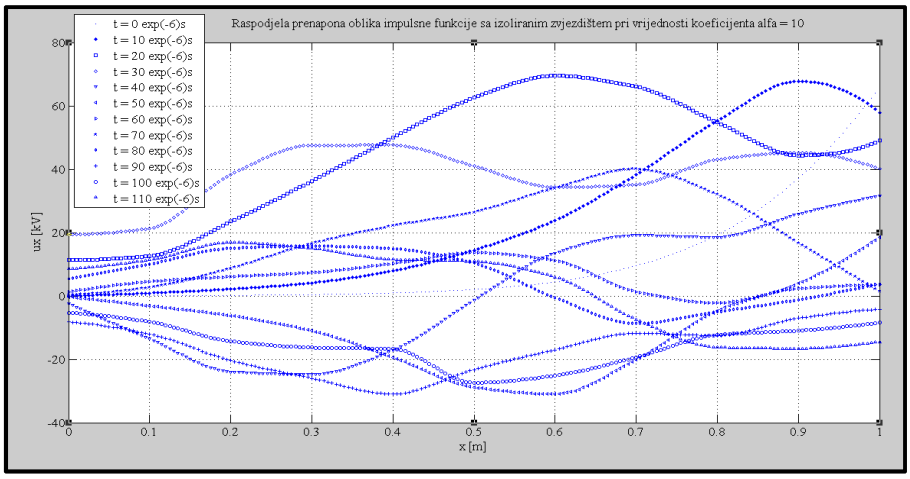


Slika 6.24. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 50 μs za α = 10

Tablica 6.29. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 110 μs za α = 10

Testni ulazni prenapon: U_m = 75 kV, 1,2 / 50 μs
Nadomjesni koeficijent: α = 10
Način uzemljenja: Izolirano zvjezdište

x_1 [m]	x_2 [m]	x_3 [m]	x_4 [m]	x_5 [m]	x_6 [m]	x_7 [m]	x_8 [m]	x_9 [m]	x_{10} [m]	x_{11} [m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
t = 0 μs										
u_{x1} [kV]	u_{x2} [kV]	u_{x3} [kV]	u_{x4} [kV]	u_{x5} [kV]	u_{x6} [kV]	u_{x7} [kV]	u_{x8} [kV]	u_{x9} [kV]	u_{x10} [kV]	u_{x11} [kV]
65,75	37,15	19,25	9,55	4,42	2,05	0,92	0,42	0,18	0,06	0,00
t = 10 μs										
57,88	67,78	55,25	38,25	23,85	14,45	7,93	4,13	2,16	0,89	0,0
t = 20 μs										
49,03	44,36	54,81	66,07	69,49	62,55	50,02	36,26	23,46	12,56	11,32
t = 30 μs										
40,16	45,21	43,02	35,08	34,31	40,97	47,60	47,53	38,32	21,31	19,35
t = 40 μs										
31,63	25,87	18,55	19,15	13,56	-1,32	-17,15	-24,78	-23,91	-13,55	-2,35
t = 50 μs										
18,53	3,92	-4,71	-20,11	-30,99	-28,83	-19,39	-11,03	-6,24	-3,14	-0,32
t = 60 μs										
3,46	2,32	-2,25	1,35	11,15	13,65	10,25	7,38	6,09	4,52	1,25
t = 70 μs										
1,45	16,71	31,99	40,03	34,01	26,43	22,10	16,51	8,69	2,63	0,35
t = 80 μs										
3,85	-1,19	-5,04	-8,71	-0,56	10,36	14,92	15,71	15,04	10,05	5,32
t = 90 μs										
-4,21	-7,05	-12,52	-11,77	-17,02	-23,23	-31,00	-25,99	-20,40	-12,05	-8,23
t = 100 μs										
-8,48	10,97	-12,32	-19,35	-25,18	-27,42	-16,73	-16,29	-14,32	-8,20	-5,32
t = 110 μs										
-14,52	16,59	-16,25	-7,43	5,97	10,92	11,51	15,02	16,87	11,36	8,56

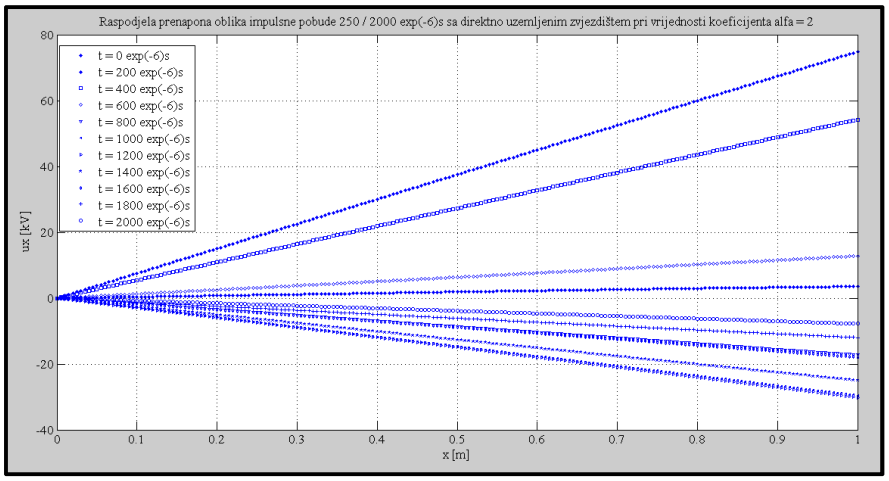


Slika 6.25. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 110 μs za α = 10

Tablica 6.30. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 2000 μs za α = 2

Testni ulazni prenapon: U_m = 75 kV, 250 / 2000 μs
Nadomjesni koeficijent: α = 2
Način uzemljenja: Direktno uzemljeno

x_1 [m]	x_2 [m]	x_3 [m]	x_4 [m]	x_5 [m]	x_6 [m]	x_7 [m]	x_8 [m]	x_9 [m]	x_{10} [m]	x_{11} [m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
t = 0 μs										
u_{x1} [kV]	u_{x2} [kV]	u_{x3} [kV]	u_{x4} [kV]	u_{x5} [kV]	u_{x6} [kV]	u_{x7} [kV]	u_{x8} [kV]	u_{x9} [kV]	u_{x10} [kV]	u_{x11} [kV]
3,53	3,26	2,97	2,61	2,25	1,91	1,51	1,12	0,76	0,38	0,00
t = 200 μs										
74,85	67,38	59,95	52,46	45,00	37,52	30,02	22,52	15,02	7,51	0,00
t = 400 μs										
54,25	48,88	43,54	38,13	32,73	27,31	21,86	16,40	10,93	5,47	0,00
t = 600 μs										
12,82	11,52	10,22	8,91	7,63	6,34	5,06	3,79	2,52	1,26	0,00
t = 800 μs										
-17,11	-15,51	-13,71	-11,98	-10,28	-8,57	-6,84	-5,12	-3,41	-1,70	0,00
t = 1000 μs										
-29,54	-26,55	-23,55	-20,59	-17,63	-14,67	-11,74	-8,80	-5,86	-2,93	0,00
t = 1200 μs										
-30,16	-27,08	-24,02	-20,95	-17,94	-14,91	-11,90	-8,91	-5,93	-2,96	0,00
t = 1400 μs										
-25,02	-22,58	-20,11	-17,67	-15,17	-12,69	-10,17	-7,63	-5,08	-2,54	0,00
t = 1600 μs										
-17,98	-16,12	-14,30	-12,46	-10,64	-8,85	-7,05	-5,28	-3,52	-1,77	0,00
t = 1800 μs										
-11,97	-10,85	-9,68	-8,51	-7,33	-6,12	-4,93	-3,70	-2,47	-1,24	0,00
t = 2000 μs										
-7,80	-7,01	-6,21	-5,45	-4,64	-3,87	-3,09	-2,31	-1,55	-0,78	0,00

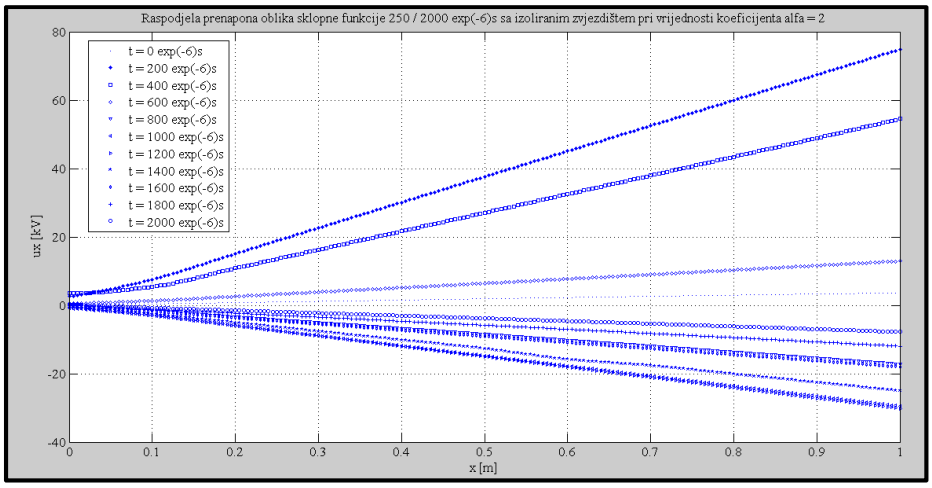


Slika 6.26. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 2000 μs za α = 2

Tablica 6.31. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 2000 μs za α = 2

Testni ulazni prenapon: U_m = 75 kV, 250 / 2000 μs
Nadomjesni koeficijent: α = 2
Način uzemljenja: Izolirano zvjezdište

x_1 [m]	x_2 [m]	x_3 [m]	x_4 [m]	x_5 [m]	x_6 [m]	x_7 [m]	x_8 [m]	x_9 [m]	x_{10} [m]	x_{11} [m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
t = 0 μs										
u_{x1} [kV]	u_{x2} [kV]	u_{x3} [kV]	u_{x4} [kV]	u_{x5} [kV]	u_{x6} [kV]	u_{x7} [kV]	u_{x8} [kV]	u_{x9} [kV]	u_{x10} [kV]	u_{x11} [kV]
3,59	3,30	2,97	2,63	2,27	1,91	1,53	1,15	0,77	0,39	0,00
t = 200 μs										
74,84	67,40	59,96	52,51	45,06	37,59	30,10	22,61	15,09	7,55	2,55
t = 400 μs										
54,49	48,91	43,42	37,95	32,50	27,06	21,64	16,23	10,83	5,42	3,46
t = 600 μs										
12,93	11,61	10,29	8,98	7,69	6,41	5,13	3,86	2,58	1,30	0,52
t = 800 μs										
-17,12	-15,3	-13,60	-11,84	-10,12	-8,39	-6,67	-4,98	-3,31	-1,65	-0,82
t = 1000 μs										
-29,53	-26,6	-23,62	-20,68	-17,72	-14,77	-11,82	-8,87	-5,92	-2,96	-0,87
t = 1200 μs										
-30,15	-27,1	-24,10	-21,07	-18,04	-15,01	-11,99	-8,96	-5,96	-2,97	-0,56
t = 1400 μs										
-25,02	-22,6	-20,12	-17,66	-15,82	-12,68	-10,15	-7,62	-5,08	-2,54	-0,43
t = 1600 μs										
-17,98	-16,2	-14,42	-12,64	-10,87	-9,08	-7,28	-5,47	-3,67	-1,83	0,02
t = 1800 μs										
-11,97	-10,7	-9,46	-8,23	-7,02	-5,84	-4,66	-3,49	-2,32	-1,17	0,45
t = 2000 μs										
-7,80	-6,99	-6,18	-5,39	-4,61	-3,83	-3,05	-2,28	-1,51	-0.75	0,15

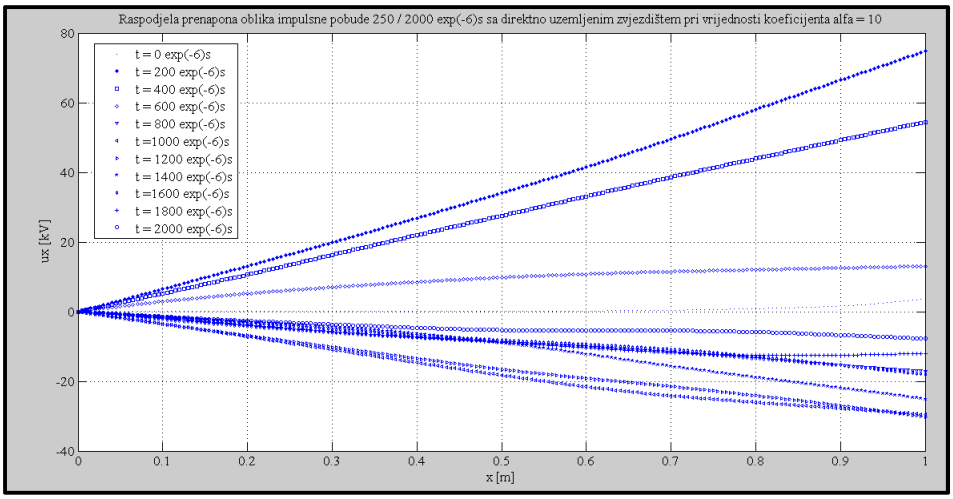


Slika 6.27. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 2000 μs za α = 2

Tablica 6.32. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 2000 μs za α = 10

Testni ulazni prenapon: U_m = 75 kV, 250 / 2000 μs
Nadomjesni koeficijent: α = 10
Način uzemljenja: Direktno uzemljeno

x_1 [m]	x_2 [m]	x_3 [m]	x_4 [m]	x_5 [m]	x_6 [m]	x_7 [m]	x_8 [m]	x_9 [m]	x_{10} [m]	x_{11} [m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
t = 0 μs										
u_{x1} [kV]	u_{x2} [kV]	u_{x3} [kV]	u_{x4} [kV]	u_{x5} [kV]	u_{x6} [kV]	u_{x7} [kV]	u_{x8} [kV]	u_{x9} [kV]	u_{x10} [kV]	u_{x11} [kV]
3,65	1,61	0,85	0,41	0,19	0,09	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00
t = 200 μs										
74,76	66,44	58,01	49,54	41,48	34,04	26,85	19,85	13,08	6,47	0,00
t = 400 μs										
54,45	49,20	43,93	38,59	33,10	27,51	21,96	16,28	10,62	5,21	0,00
t = 600 μs										
13,02	12,53	12,01	11,49	10,79	9,80	8,50	6,99	5,18	2,89	0,00
t = 800 μs										
-17,06	-15,38	-13,44	-11,61	-10,08	-8,75	-7,46	-5,99	-4,23	-2,27	0,00
t = 1000 μs										
-29,54	-27,75	-26,05	-24,15	-21,56	-18,26	-14,63	-10,88	-7,17	-3,51	0,00
t = 1200 μs										
-30,20	-27,00	-24,10	-21,48	-19,13	-16,57	-13,44	-10,17	-6,89	-3,54	0,00
t = 1400 μs										
-25,08	-21,95	-18,89	-15,70	-12,23	-8,94	-6,36	-4,44	-2,93	-1,43	0,00
t = 1600 μs										
-18,04	-15,40	-12,87	-10,84	-9,42	-8,21	-6,80	-5,06	-3,25	-1,67	0,00
t = 1800 μs										
-11,97	-12,46	-12,51	-11,78	-10,37	-8,84	-7,36	-5,68	-3,78	-1,81	0,00
t = 2000 μs										
-7,79	-6,74	-5,86	-5,47	-5,43	-5,30	-4,64	-3,68	-2,65	-1,44	0,00

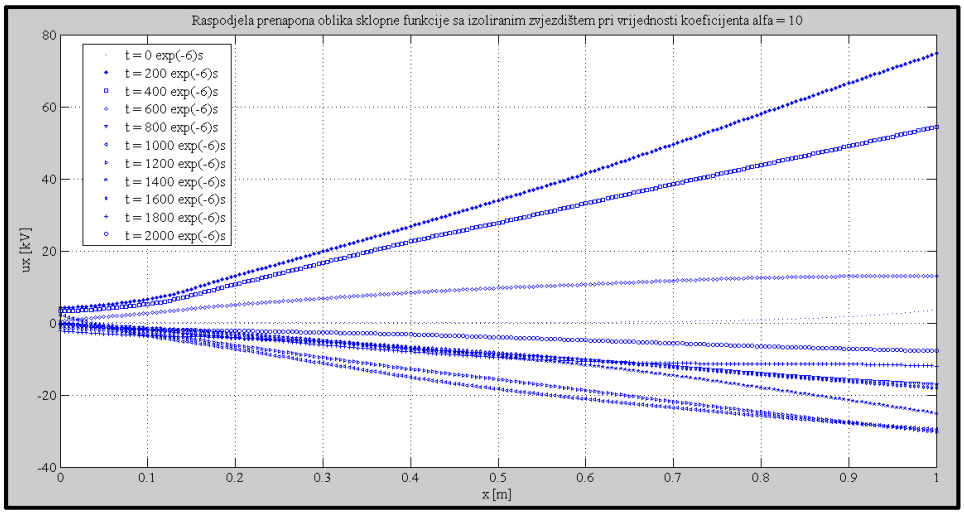


Slika 6.28. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 2000 μs za α = 10

Tablica 6.33. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 110 μs za α = 10

Testni ulazni prenapon: U_m = 75 kV, 250 / 2000 μs
Nadomjesni koeficijent: α = 10
Način uzemljenja: Izolirano zvjezdište

x_1 [m]	x_2 [m]	x_3 [m]	x_4 [m]	x_5 [m]	x_6 [m]	x_7 [m]	x_8 [m]	x_9 [m]	x_{10} [m]	x_{11} [m]
1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
t = 0 μs										
u_{x1} [kV]	u_{x2} [kV]	u_{x3} [kV]	u_{x4} [kV]	u_{x5} [kV]	u_{x6} [kV]	u_{x7} [kV]	u_{x8} [kV]	u_{x9} [kV]	u_{x10} [kV]	u_{x11} [kV]
3,57	1,75	0,83	0,38	0,17	0,08	0,04	0,02	0,01	0,002	0,00
t = 200 μs										
74,74	66,47	58,04	49,57	41,45	33,99	26,79	19,78	13,08	6,53	4,25
t = 400 μs										
54,44	49,03	43,79	38,52	33,15	27,78	22,57	16,65	10,71	5,21	3,31
t = 600 μs										
13,04	12,90	12,52	11,70	10,67	9,68	8,40	6,79	5,03	2,73	0,56
t = 800 μs										
-17,02	-15,7	-13,96	-12,04	-10,26	-8,77	-7,39	-5,39	-4,24	-2,13	-0,35
t = 1000 μs										
-29,54	-27,8	-25,74	-23,51	-21,12	-18,38	-15,05	-11,20	-7,23	-3,51	2,23
t = 1200 μs										
-30,21	-27,5	-24,75	-21,85	-18,73	-15,69	-12,80	-9,61	-6,21	-2,98	-1,34
t = 1400 μs										
-25,10	-21,5	-18,03	-14,65	-11,75	-9,39	-7,11	-4,86	-2,96	-1,38	-0,23
t = 1600 μs										
-18,05	-16,3	-14,38	-12,35	-10,25	-8,34	-6,68	-5,08	-3,49	-1,91	-0,48
t = 1800 μs										
-11,99	-11,5	-11,31	-11,24	-10,66	-9,57	-8,02	-6,12	-4,11	-3,56	-2,25
t = 2000 μs										
-7,80	-7,19	-6,49	-5,66	-4,82	-3,99	-3,21	-2,67	-2,21	-1,82	-0,23



Slika 6.29. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 110 μs za α = 10

Korišteni simulacijski pristup daje brzu procjenu otpornosti namota na naponsko naprezanje. Dakle, poznavanjem svojstvenih vrijednosti vektora napona čvorova namota koji ujedno predstavljaju fazne napone prema zemlji olakšava se relativna usporedba otpornosti distributivnih transformatora na sklopne prenapone. Dakako, do proboja izolacije može doći na bilo kojem zavoju. Opasnost proboja postoji ne samo za prve zavoje namota nego i za posljednje. Vidi se da strmina čela pogoduje visokofrekventnim oscilacijama, odnosno što strmije čelo to će maksimalne visokofrekvencijske oscilacije biti više, a duljina hrpta pogoduje niskofrekventnim oscilacijama. Za pretpostaviti je da očekivana naponska razina vala ovisi o iznosu faktora alfa i ukupnom induktivitetu namota. Vidimo također da će u slučaju izoliranog zvjezdišta namota prijelazna pojava biti najburnija. Najveći gradijenti napona se mogu pojaviti na različitim dijelovima namota. S druge pak strane, oscilacije napona odvijaju se u granicama određenim krivuljama prema slici 6.4. Dakle, što kraći hrbat to će maksimalne niskofrekventne oscilacije biti kraće. Najnepovoljniji slučaj je prenapon oblika step funkcije. Kod step testnog prenapona frekvencija teži u beskonačno. Stvarna će se raspodjela u uzemljenom namotu prenapona odvijati u značajno užem području od raspodjele prenapona u izoliranom namotu. Područja oscilacije prenapona su bitno šira kod izoliranog namota što je glavni nedostatak sustava sa izoliranim zvjezdištem. Karakteristike oscilacija za različita tretiranja zvjezdišta se razlikuju po veličini gradijenta napona i trenutka postizanja prve maksimalne vrijednosti prenapona. U slučajevima sa uzemljenim zvjezdištem prvi maksimum se postiže neposredno nakon početne raspodjele i događa se na samom početku sklopne pojave. U ovim situacijama napon početne raspodjele je viši od napona konačne

raspodjele. U slučajevima sa izoliranim zvjezdištem prvi maksimum se postiže otprilike u prvoj poluperiodi titranja.

Po svemu sudeći kod sklopnih prenapona modeli prigušenja oscilacija unutar namota transformatora nisu presudni za početnu raspodjelu prenapona. Iz toga razloga njihovo istraživanje i načini simulacijskog modeliranja nisu toliko napredovali u odnosu na ostala područja dinamike. Međutim kako se najviše vrijednosti prenapona dobivaju u samom početku sklopne pojave, prigušenja na njih imaju minoran učinak ili se čak mogu zanemariti. Prema tome, prigušenja su rezultat gubitaka nastalih u djelatnim otporima izolacije i ostalim vodljivim dijelovima koja ovdje nisu uzeta u obzir. Većina autora pojedine efekte prigušenja u analizi u vremenskoj domeni modeliraju kao konstantne vrijednosti. Kod analize u frekvencijskoj domeni uzimaju u obzir i skin – efekt.

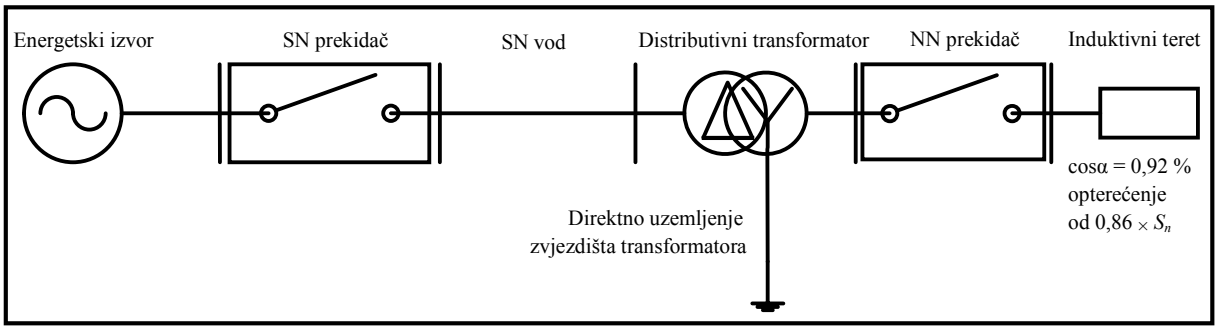
Također u narednim istraživanjima bi bilo zanimljivo analizirati učinak odrezanog standardnog udarnog prenapona na početnu i krajnju raspodjelu prenapona. Odrezani testni val slijedi isti oblik udarnog prenapona u početnom trenutku pojave. Karakterizira ga vrijeme rezanja, maksimalni dozvoljeni prelet nakon prorade odvodnika prenapona te vrijeme pada. Stoga, stvarna raspodjela punog i odrezanog prenapona u namotima transformatora uvelike ovisi o utjecaju dominantnih elemenata ukupne impedancija transformatora. Koji će element prevagnuti ovisi o frekvenciji sklopnoga prenapona. Dobivene rezultate istraživanja potrebno je iskazati u obliku trenutka nastanka prvog maksimuma i vrijednost napona u tom trenutku te ih usporediti s pokazateljima dobivenim pri punom udarnom prenaponu. Naime, odrezani prenapon je posljedica djelovanja odvodnika prenapona. Štoviše, odrezani udarni prenapon se podešava karakteristikom odvodnika prenapona. Isto tako bi bilo pogodno analizirati učinak pridodanih SN vrsta zaštitnih kompenzacijskih namota na početnu i krajnju raspodjelu prenapona. U svrhu pojašnjavanja vrsta kompenzacijskih namota koristiti se patentiranim topologijama namota koje se dostupne i koje se najviše koriste u primjeni. Prilikom konfiguriranja simulacijskog postupka potrebno je uzeti u obzir i nelinearnost karakteristike odvodnika prenapona.

6.1.5. Utjecaj promjene veličine nazivne snage distributivnih transformatora na karakteristiku sklopnog prenapona za slučaj isklopa radno - induktivnog tereta

U naredno istraživanim sklopnim slučajevima na razvijenoj testnoj distribucijskoj mreži bit će provedeni numerički proračuni u kojima se analizira odabir optimalne konfiguracije NN

sekundarne transformatorske mreže s obzirom na oblik karakteristike sklopnoga prenapona. Da bi se procijenila visina sklopnog prenapona u određenoj točki koristi se faktor prenapona. Maksimalni faktori prenapona javljaju se na različitim pogonskim fazama ovisno o trenutnim faznim kutovima napona mreže. Iz toga razloga, pri analizi direktnih i indirektnih utjecaja potrebno je na odgovarajući način upravljati trenutkom prorade SN prekidača u cilju kontrole visine faktora prenapona. Dakle, prikladno dizajniranom konfiguracijskom mrežom moguće je predviđati, a time ograničiti visinu i trajanje sklopnog prenapona.

Pojedinačni vremenski korak numeričkog proračuna i ukupan broj koraka numeričkog proračuna potrebno je uskladiti s trajanjem simulacijskog postupka. Ukoliko je odabrana veličina koraka mala, za isti broj koraka bit će potrebno kraće vrijeme, a ako je odabrani korak prevelik, postoji mogućnost da za mali broj koraka ishod simulacijskog procesa ne bude registriran. Postoji opcija i da simulacijski program sam optimalno odredi korak proračuna, pri čemu je korisniku ostavljeno samo da podesi trajanje vremenskog intervala u kojem se promatra sklopni prenapon. Složeni numerički proračuni isklopa SN prekidača gdje se programski vrši promjena faznog kuta isključenja istog neće biti razmatrani.



Slika 6.30. Jednofazna mrežna konfiguracija sustava za slučaj isklopa induktivnoga tereta uz stupanj opterećenja 0,86 × S_n i faktor snage od 0,92 %

U ovome podpoglavlju za predhodno odabrana tri distributivna transformatora izvodit će se zasebne simulacije. Pri unaprijed poznatom stupnju i vrsti opterećenja distributivnog transformatora simulirat će se utjecaj trenutka isklopa radno – induktivnoga trošila na oblik i visinu sklopnog prenapona. Početni kut isklopa sekundarnoga napona se proračunava za fazu L1, dok su ostale faze pozitivno sekvencijalno pomaknute za +120°. Jedan pol SN prekidača se isključuje pri vrijednosti minimalne elektromotorne sile da bi se izbjegli visoki sklopni prenaponi. Analogno tome, znatno veći iznosi sklopnog prenapona se mogu očekivati pri vrijednosti elektromotorne sile u trenutku $\varphi = 90°$. Oblik karakteristike sklopnoga prenapona u nastavku će biti prikazan samo za prvu fazu. Na taj se način međufazni kapaciteti SN i NN namota transformatora mogu zanemariti. Proračun ulaznih koncetriranih parametara VF

modela transformatora realiziran je uz pomoć razvijenih m – skripti koje uzimaju u obzir nazivne ulazne podatke transformatora. Kratki proračuni preostalih potrebnih ulaznih koncentriranih parametara direktno su uneseni u model komponente. Primjer jedne takve razvijene m - skripte za potrebe proračuna istih prikazuje slika 6.31.

Editor - C:\Doktorski rad\Simulacijski modeli - Doktorski rad\Analitički modeli - Evaluacija\PTrafo4aaa\PTrafo4aaa.m

PTrafo4aaa.m | Analitika_400kVA.m | Trafo5aaa.m | Primarnivod.m | KapacitetTRAFO.m

```
% Podaci - Nadomjesna shema transformatora

Z0 = Uln/I0;  % Impedancija praznog hoda - po fazi

S0n = sqrt(3)*Uln*I0; % Prividna snaga u praznom hodu
cosfi0 = P0/S0n; % faktor snage u praznom hodu
fi0 = acos(cosfi0); % Fazni kut u praznom hodu
Rm = Z0/cos(fi0);  % Magnetski otpor
Ikf = Iln/sqrt(3);%Struja iz pokusa K.S. jednaka je nazivnoj - fazna
Rk = Pk/(3*Ikf^2);  % Ukupni otpor pimarnog i sekundarnog namota
R1 = Rk/2;        % Otpor primarnog kruga
R2r = R1;         % Reducirani sekundarni otpor na primarnu stranu
k = Uln/U2n;      % Prijenosni omjer
R2 = (1/k)^2*R2r;  % Sekundarni otpor
Zk = Uk/Ikf;       % Kratko spojena ukupna impedancija po fazi
Xk = sqrt(Zk^2-Rk^2); % Kratko spojena impedancija po fazi
X1 = Xk/2;          % Reaktancija primarnog namota
X2r = X1;           % Reaktancija sekundarnog namota reducirana na primar
X2 = (1/k)^2*X2r;   % Reaktancija sekundarnog namota
L1 = X1/omega;      % Induktivitet primarnog namota
L2 = X2/omega;      % Induktivitet sekundarnog namota
X1m = R1*tan(fi0);%Zbroj glavne reaktancije i rasipne reaktancije primara
Xm = X1m-X1;          % Glavna reaktancija
```

Slika 6.31. Proračun koncentriranih parametara VF modela transformatora pomoću m – skripte

Tablice 6.34. , 6.35. i 6.36. prikazuju vrijednosti direktnih i indirektnih lokalnih varijabli koji su pomoću m - skripti pridjeljeni odgovarajućoj komponenti simulacijskoga modela.

Tablica 6.34. Konfiguracija za istraživanje sekundarnoga NN kruga transformatora

Komponente	**Konfiguracija**		
	A	B	C
Pogonski napon	10 / 0,4 kV	10 / 0,4 kV	10 / 0,4 kV
SN prekidač	SN prekidač	SN prekidač	SN prekidač
NN prekidač	NN prekidač	NN prekidač	NN prekidač
Transformator	50 kVA Direktno uzemljenje Yyn5	250 kVA Direktno uzemljenje Dyn5	400 kVA Direktno uzemljenje Dyn5
SN vod	Al/Fe 5 km 3×95 mm^2	Al/Fe 5 km 3×95 mm^2	Al/Fe 5 km 3×95 mm^2
Teret	400 V 40 kW 25 kVAr -8 kVAr Y - spoj	400 V 200 kW 125 kVAr -40 kVAr Y - spoj	400 V 320 kW 200 kVAr -64 kVAr Y - spoj

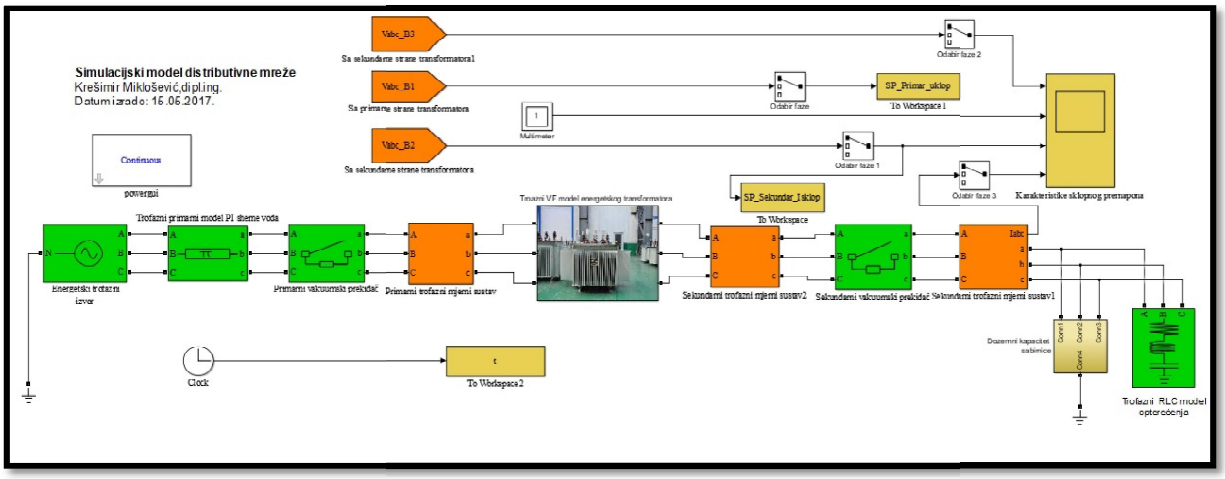
Tablica 6.35. Ulazni i proračunati koncentrirani parametri modela komponenti za istraživanje sekundarnoga NN kruga transformatora

Komponente	**Konfiguracija**		
	A	B	C
Pogonski naponi	10 / 0,4 kV	10 / 0,4 kV	10 / 0,4 kV
SN prekidač	R_{on} = 0,01 Ω $t_{p\ uklopa}$ = 5 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno	R_{on} = 0,01 Ω $t_{p\ uklopa}$ = 5 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno	R_{on} = 0,01 Ω $t_{p\ uklopa}$ = 5 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno
NN prekidač	R_{on} = 0,01 Ω t_{s_uklopa} = 20 ms $t_{s_isklopa}$ = 25 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno	R_{on} = 0,01 Ω t_{s_uklopa} = 20 ms $t_{s_isklopa}$ = 25 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno	R_{on} = 0,01 Ω t_{s_uklopa} = 20 ms $t_{s_isklopa}$ = 25 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno
Transformator	R_1 = 21,80 Ω L_1 = 0,0971242 H R_2 = 0,0349 Ω L_2 = 0,0001554 H R_m = 476190,476 Ω L_m = 0,41867 H	R_1 = 8,64 Ω L_1 = 0,0783948 H R_2 = 0,0138 Ω L_2 = 0,0001254 H R_m = 254713,354 Ω L_m = 0,08103 H	R_1 = 4,8281 Ω L_1 = 0,0495978 H R_2 = 0,0077 Ω L_2 = 0,0000794 H R_m = 182321,138 Ω L_m = 0,41867 H
SN vod	R_{11} = 0,31 Ω / km L_{11} = 1,36 mH / km R_{10} = 0,4556 Ω / km L_{10} = 5,1 mH / km l_0 = 5 km	R_{11} = 0,31 Ω / km L_{11} = 1,36 mH / km R_{10} = 0,4556 Ω / km L_{10} = 5,1 mH / km l_0 = 5 km	R_{11} = 0,31 Ω / km L_{11} = 1,36 mH / km R_{10} = 0,4556 Ω / km L_{10} = 5,1 mH / km l_0 = 5 km

Tablica 6.36. Simetrični ekvivalentni koncentrirani kapaciteti po fazi

Komponente	**Konfiguracija**		
	A	B	C
SN vod	C_{11} = 8,57 nF / km C_{10} = 4,3 nF / km	C_{11} = 8,57 nF / km C_{10} = 4,3 nF / km	C_{11} = 8,57 nF / km C_{10} = 4,3 nF / km
Transformator	C_{p0} = 6,6 pF C_{s0} = 19,8 pF C_{ps1} = 26,4 pF C_{p12} = 3 pF C_{s12} = 1 pF	C_{p0} = 6,6 pF C_{s0} = 23,8 pF C_{ps1} = 26,4 pF C_{p12} = 3 pF C_{s12} = 1 pF	C_{p0} = 6,6 pF C_{s0} = 24,8 pF C_{ps1} = 26,4 pF C_{p12} = 3 pF C_{s12} = 1 pF
Teret	C_{dozt} = 6 pF	C_{dozt} = 6 pF	C_{dozt} = 6 pF

Simulacijski model razvijen u Matlab - SimPowerSystemsu za potrebe numeričkoga proračuna karakteristike sklopnoga prenapona prikazuje slika 6.32. Stupanj opterećenja je proračunat i podešen na 86 % nazivne snage transformatora, a faktor snage pri ovoj razini operećenja iznosi 0,92.



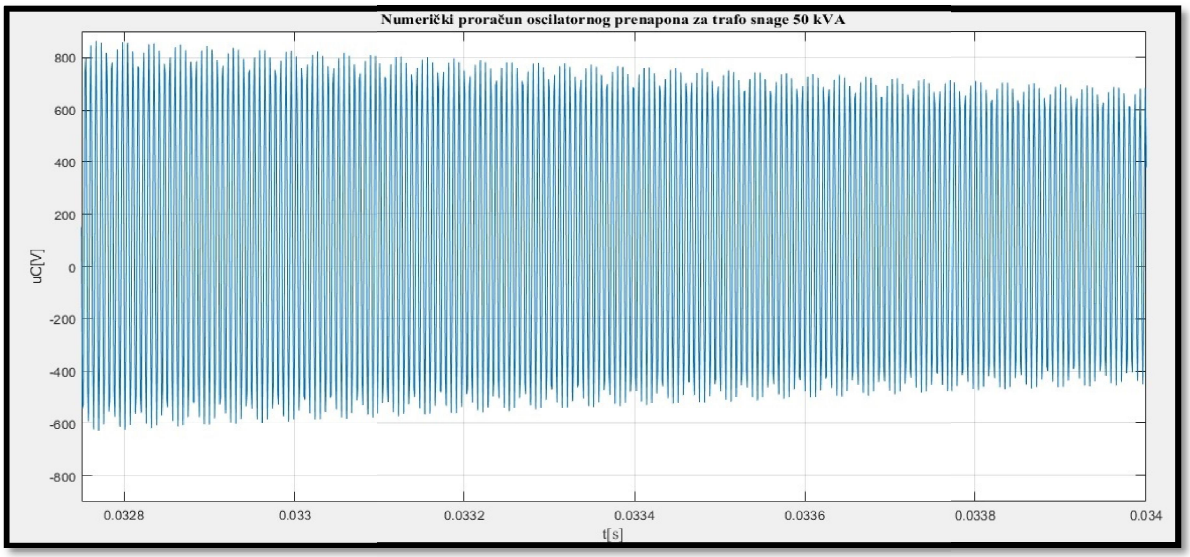
Slika 6.32. Simulacijski model distributivne mreže razvijen u Matlab – SimPowerSystemsu

U svrhu dobivanja odgovarajućeg numeričkog rješenja, u tablici 6.37. su prikazani odabrani konfiguracijski parametri simulacije za analizu utjecaja promjene nazivne snage transformatora na visinu i oblik karakteristike sklopnog prenapona.

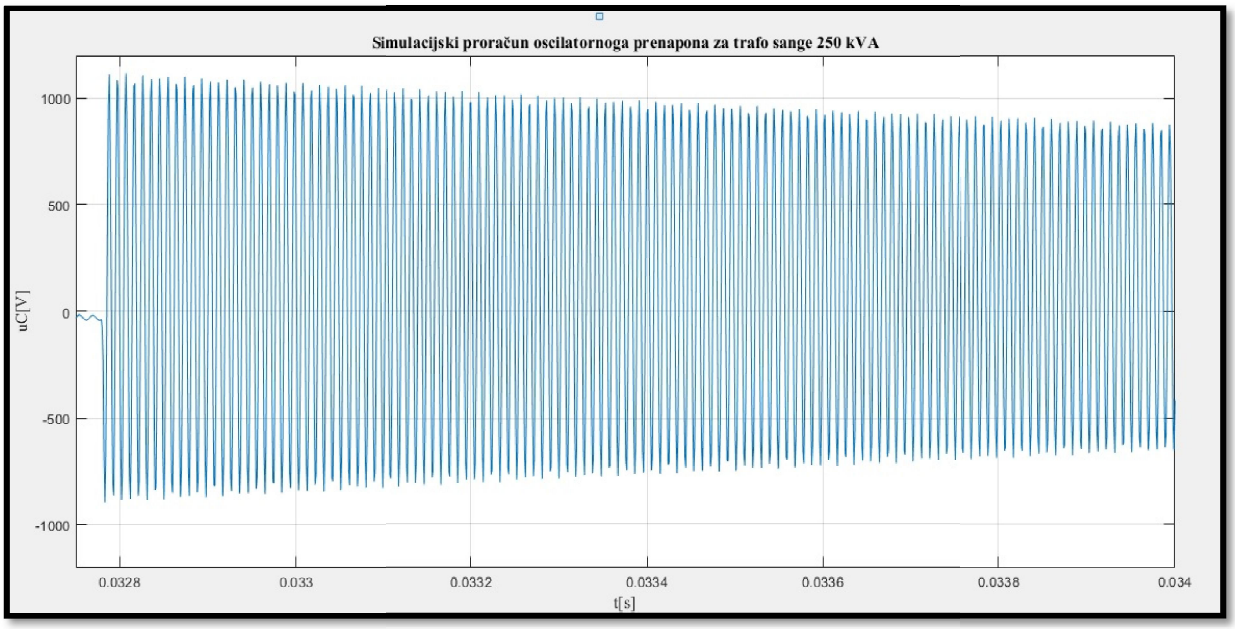
Tablica 6.37. Konfiguracijski parametri simulacije

Konfiguracijski parametri simulacije
Trajanje simulacije: 40 ms
Numerička metoda: Trapezoidna robusna metoda (ode 23tb)
Tip numeričke metode: Diskretni korak simulacije
Relativna tolerancija: 1 exp(-4)
Korak simulacije: 1 exp(-6)

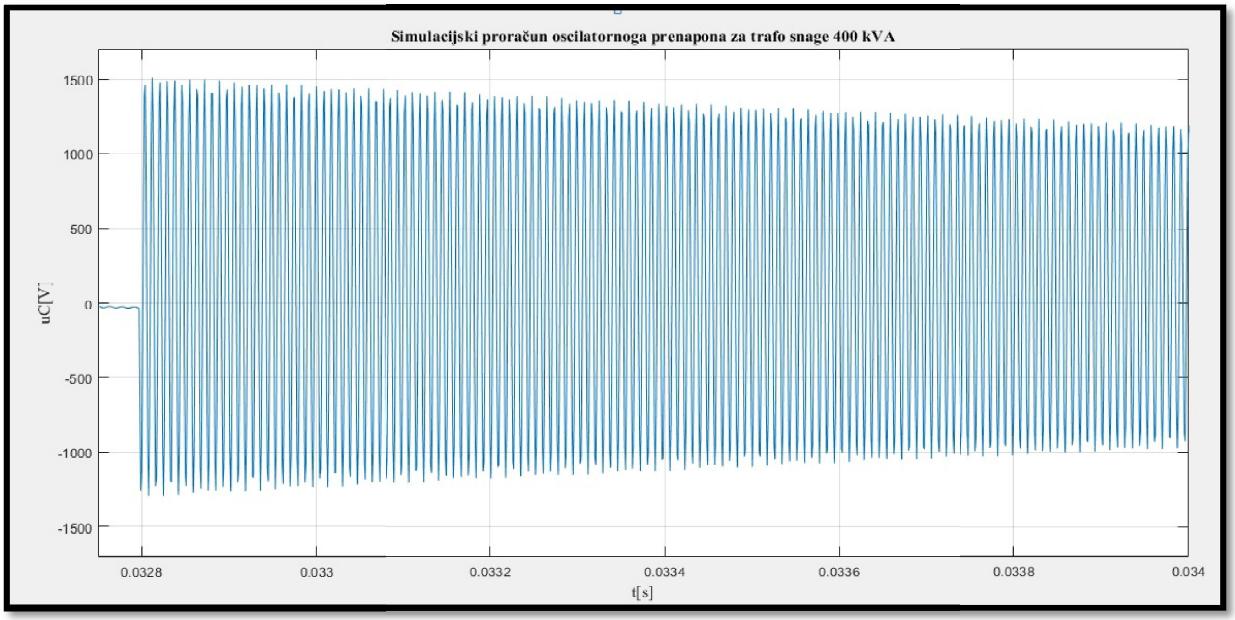
Dobiveni oblici karakteristike sklopnoga prenapona za sva tri konfiguracijska slučaja sekundarne NN mreže prikazani su sljedećim redoslijedom:



Slika 6.33. Sklopni prenapon faze L1 za transformator snage 50 kVA



Slika 6.34. Sklopni prenapon faze L1 za transformator snage 250 kVA



Slika 6.35. Sklopni prenapon faze L1 za transformator snage 400 kVA

Tablica 6.38. Numerički proračunate maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} u odnosu na vršnu vrijednost faznog napona U za slučaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa NN prekidača

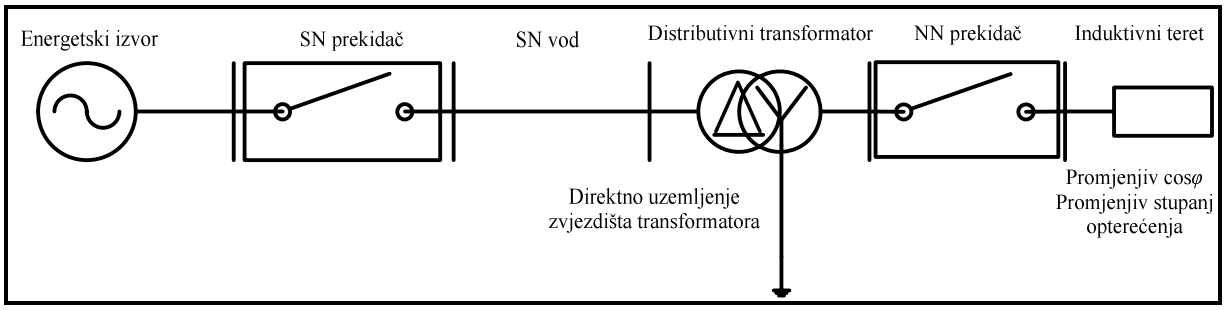
S	U	U_{max}	K_P
[kVA]	[V]	[V]	[-]
50	339,41	890,36	2,605
250	339,41	1185,72	3,502
400	339,41	1505,70	4,412

Simulacijskim istraživanjem odabrane konfiguracije sekundarne NN mreže pokazalo se da glavni magnetski tok nema nikakvog utjecaja na karakteristiku sklopnog prenapona. Nešto detaljnija simulacijska testiranja su pokazala da su rasipni tokovi i električne veze između namota iste faze, električne veze između namota različitih faza te električne veze prema zemlji najznačajniji ulazni parametri visokofrekvencijskog modela trofaznoga dvonamotnog modela transformatora. Dakle, to nas navodi na zaključak da što je promatrana sklopna pojava brža to se utjecaj petlje histereze može zanemariti.

Nadalje, iz tablice 6.38. može se vidjeti da se najveći faktor prenapona iznosa 4,412 dobije za transformator snage 400 kVA. Za transformatore nižih snaga faktori prenapona su osjetno manji. S obzirom na tablicu 2.12. vidimo da se faktori prenapona kreću u očekivanim granicama. Iznos amplitude sklopnoga prenapona ovisi o trenutku isklopa prekidača s jedne strane te karakteristikama sekundarnoga kruga NN transformatora s druge strane. Mogući različiti iznosi simuliranih sklopnih prenapona posljedica su podešavanja trenutka isklopa prekidača s jedne strane te jakosti prekidane struje radno - induktivnog tereta s druge strane. Pomicanjem trenutka isklopa prekidača od 0° pa do 90° maksimalni fazni napon raste, a time i faktor prenapona. Sigurno će sklopni prenapon biti veći što je veća struja prekidanja. Po svemu sudeći oni prekidači koji intenzivnije gase električni luk na način da umjetno deformiraju prirodnu krivulju struje izazvat će veće sklopne prenapone. Jednom razvijeni simulacijski model može se dalje jednostavno koristiti da bi se što preciznije razjasnio rizik od pojave sklopnih prenapona. Odluku o tome koju vrstu zaštite od sklopnoga prenapona instalirati na navedeni krug ovisit će o predviđanim vrijednostima. Moderni simulatori mogu pomoći u predviđanju tih vrijednosti za određenu konfiguraciju kruga opterećenja.

6.1.6. Utjecaj promjene stupnja i faktora snage opterećenja na karakteristiku sklopnog prenapona za slučaj isklopa radno - induktivnog tereta

Cilj ove simulacije je utvrditi maksimalni sklopni prenapon dobiven na sekundarnoj NN strani transformatora. Pri tome se stupanj opterećenja radno - induktivnog tereta mijenja u odgovarajućim granicama. U drugome dijelu simulacije mijenja se faktor snage opterećenja te se analizira dostignuta visina maksimalne vrijednosti faznog napona. Kao u prethodnom sklopnom slučaju vrijednost maksimalnog faznog napona funkcija je sklopnog trenutka. Faktor prenapona proračunat će se za najnepovoljniji trenutak isklopa prekidača. Jednofazna mrežna konfiguracija sustava za slučaj isklopa radno – induktivnog tereta uz promjenu stupnja opterećenja i faktora snage prikazana je na slici 6.36.



Slika 6.36. Jednofazna mrežna konfiguracija sustava za slučaj isklopa radno - induktivnog tereta uz promjenu stupnja opterećenja i faktora snage

Za odabrana tri distributivna transformatora izvodit će se zasebne simulacije. Pri unaprijed poznatom stupnju i vrsti opterećenja distributivnoga transformatora simulirat će se utjecaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa radno – induktivnoga trošila na oblik i visinu sklopnog prenapona. Oblik karakteristike sklopnoga prenapona u nastavku će biti prikazan samo za prvu fazu. S obzirom da se prikazuje samo prva faza može se zanemariti električna veza određena međufaznim kapacitetima SN i NN namota transformatora. Električna veza između primarnog namota spojenog u trokut te sekudarnog namota spojenog u zvijezdu je osigurana posredstvom dozemnih kapaciteta. Proračuni koncentriranih ulaznih parametara vrše se pomoću m – skripti. Tablice 6.39. , 6.40. i 6.41. prikazuju vrijednosti direktnih i indirektnih lokalnih varijabli koji su pomoću m - skripti pridijeljeni odgovarajućoj komponenti simulacijskog modela. Konfiguracija simulacijskog modela razvijenog u MATLAB – SimPowerSystemsu je prikazana na slici 6.31.

Tablica 6.39. Konfiguracija za istraživanje sekundarnoga NN kruga transformatora uz promjenjive uvjete opterećenja na teretu

Komponente	**Konfiguracija**		
	A	B	C
Pogonski napon	10 / 0,4 kV	10 / 0,4 kV	10 / 0,4 kV
SN prekidač	SN prekidač	SN prekidač	SN prekidač
NN prekidač	NN prekidač	NN prekidač	NN prekidač
Transformator	50 kVA Direktno uzemljenje Yyn5	250 kVA Direktno uzemljenje Dyn5	400 kVA Direktno uzemljenje Dyn5
SN vod	Al/Fe 5 km 3×95 mm^2	Al/Fe 5 km 3×95 mm^2	Al/Fe 5 km 3×95 mm^2
Teret	400 V cosφ = 0,5 do 0,92 opterećenje = 0,5 do 0,80 Y - spoj	400 V cosφ = 0,5 do 0,92 opterećenje = 0,5 do 0,80 Y - spoj	400 V cosφ = 0,5 do 0,92 opterećenje = 0,5 do 0,80 Y - spoj

Tablica 6.40. Ulazni i proračunati koncentrirani parametri modela komponenti za istraživanje sekundarnog NN kruga transformatora

Komponente	**Konfiguracija**		
	A	B	C
Pogonski naponi	10 / 0,4 kV	10 / 0,4 kV	10 / 0,4 kV
SN prekidač	R_{on} = 0,01 Ω $t_{p\ uklopa}$ = 5 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno	R_{on} = 0,01 Ω $t_{p\ uklopa}$ = 5 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno	R_{on} = 0,01 Ω $t_{p\ uklopa}$ = 5 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno
NN prekidač	R_{on} = 0,01 Ω t_{s_uklopa} = 20 ms $t_{s_isklopa}$ = 25 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno	R_{on} = 0,01 Ω t_{s_uklopa} = 20 ms $t_{s_isklopa}$ = 25 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno	R_{on} = 0,01 Ω t_{s_uklopa} = 20 ms $t_{s_isklopa}$ = 25 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno
Transformator	R_1 = 21,80 Ω L_1 = 0,0971242 H R_2 = 0,0349 Ω L_2 = 0,0001554 H R_m = 476190,476 Ω L_m = 0,41867 H	R_1 = 8,64 Ω L_1 = 0,0783948 H R_2 = 0,0138 Ω L_2 = 0,0001254 H R_m = 254713,354 Ω L_m = 0,08103 H	R_1 = 4,8281 Ω L_1 = 0,0495978 H R_2 = 0,0077 Ω L_2 = 0,0000794 H R_m = 182321,138 Ω L_m = 0,41867 H
SN vod	R_{11} = 0,31 Ω / km L_{11} = 1,36 mH / km R_{10} = 0,4556 Ω / km L_{10} = 5,1 mH / km l_0 = 5 km	R_{11} = 0,31 Ω / km L_{11} = 1,36 mH / km R_{10} = 0,4556 Ω / km L_{10} = 5,1 mH / km l_0 = 5 km	R_{11} = 0,31 Ω / km L_{11} = 1,36 mH / km R_{10} = 0,4556 Ω / km L_{10} = 5,1 mH / km l_0 = 5 km

Tablica 6.41. Simetrični ekvivalentni koncentrirani kapaciteti po fazi

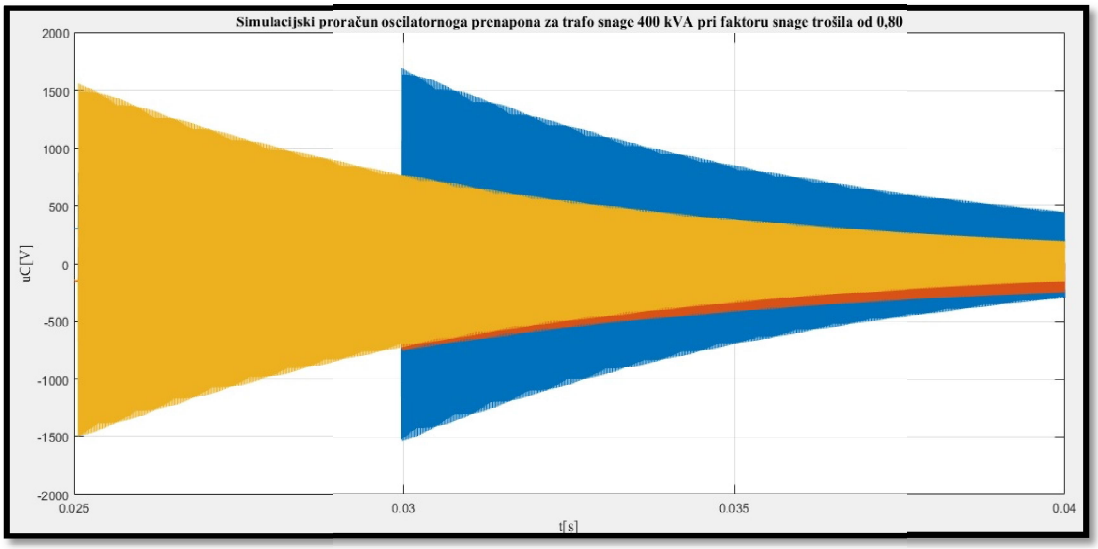
Komponente	**Konfiguracija**		
	A	B	C
SN vod	C_{11} = 8,57 nF / km C_{10} = 4,3 nF / km	C_{11} = 8,57 nF / km C_{10} = 4,3 nF / km	C_{11} = 8,57 nF / km C_{10} = 4,3 nF / km
Transformator	C_{p0} = 6,6 pF C_{s0} = 19,8 pF C_{ps1} = 26,4 pF C_{p12} = 3 pF C_{s12} = 1 pF	C_{p0} = 6,6 pF C_{s0} = 23,8 pF C_{ps1} = 26,4 pF C_{p12} = 3 pF C_{s12} = 1 pF	C_{p0} = 6,6 pF C_{s0} = 24,8 pF C_{ps1} = 26,4 pF C_{p12} = 3 pF C_{s12} = 1 pF
Teret	C_{dozt} = 6 pF	C_{dozt} = 6 pF	C_{dozt} = 6 pF

U svrhu dobivanja optimalnog numeričkog rješenja, u tablici 6.42. su prikazani odabrani konfiguracijski parametri simulacije za analizu utjecaja promjene faktora snage i stupnja opterećenja na visinu i oblik karakteristike sklopnog prenapona.

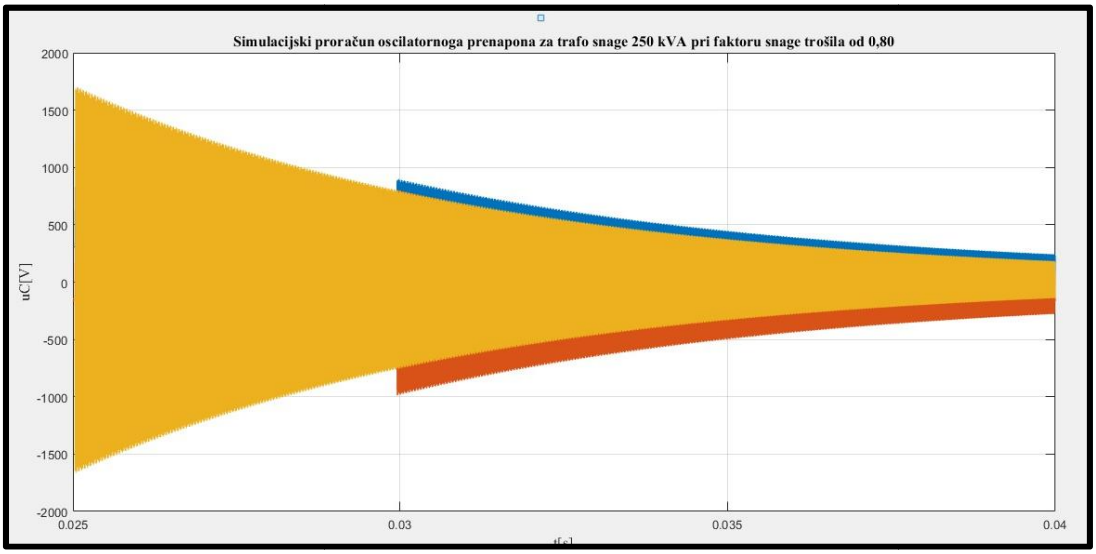
Tablica 6.42. Konfiguracijski parametri simulacije

Konfiguracijski parametri simulacije
Trajanje simulacije: 40 ms
Numerička metoda: Tustin
Tip numeričke metode: Diskretni korak simulacije
Relativna tolerancija: 1 exp(-4)
Korak simulacije: 1 exp(-6)

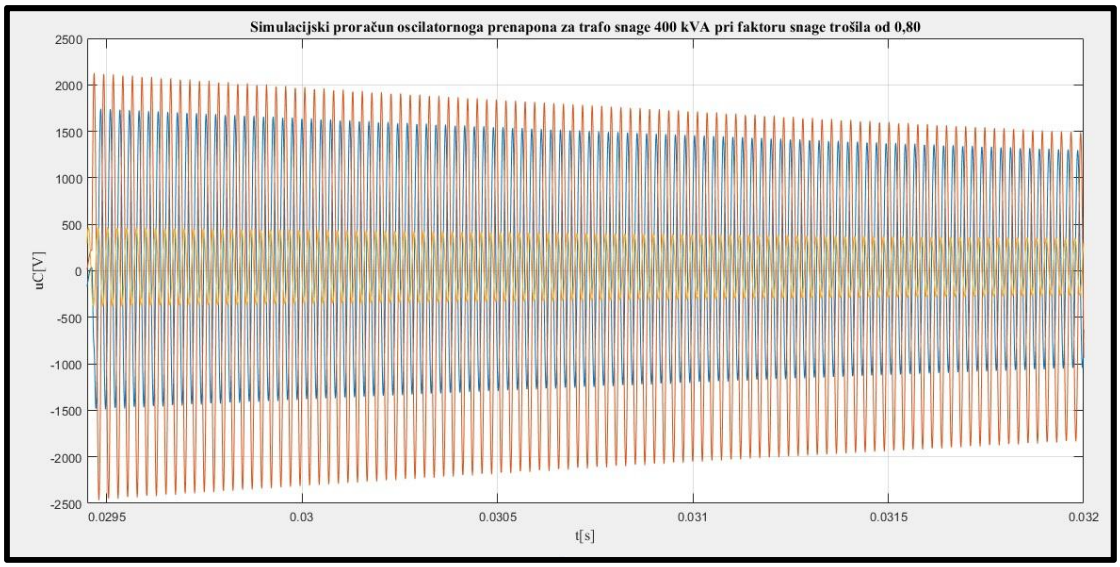
U nastavku su prikazani oblici karakteristike sklopnoga prenapona za sve tri snage transformatora pri faktoru snage trošila od 0,80 te su prikazani sljedećim redoslijedom:



Slika 6.37. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 400 kVA pri faktoru snage trošila od 0,80



Slika 6.38. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 250 kVA pri faktoru snage trošila od 0,80



Slika 6.39. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 50 kVA pri faktoru snage trošila od 0,80

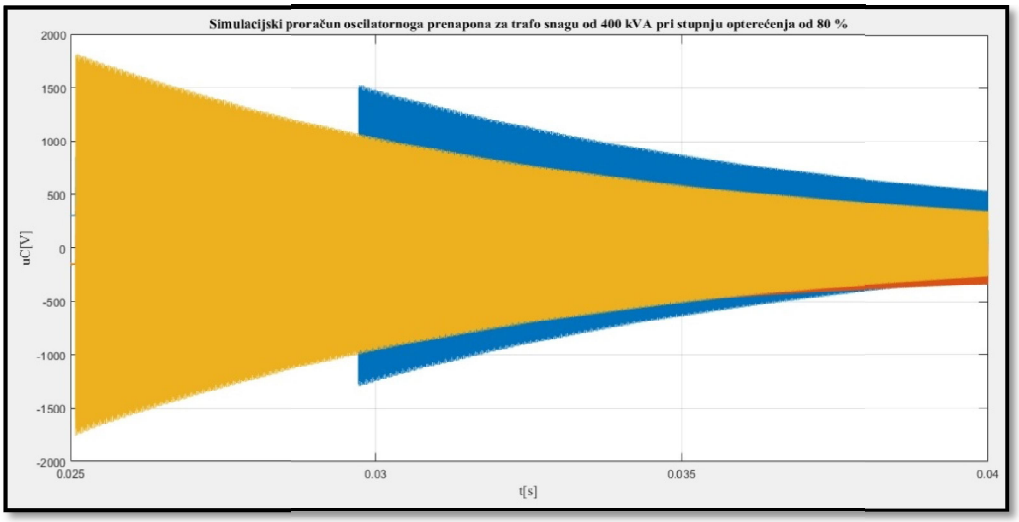
Tablica 6.43. Numerički proračunate maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} za slučaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa NN prekidača pri promjenjivom faktoru snage tereta

Transformator:	**50 kVA**	**Direktno uzemljenje**	**Yyn5**
cos φ	*U*	U_{max}	K_P
[kVA]	[V]	[V]	[-]
0,50	339,41	1945,50	5,732
0,60	339,41	1620,00	4,773
0,70	339,41	1499,30	4,417
0,80	339,41	1143,30	3,368
Transformator:	**250 kVA**	**Direktno uzemljenje**	**Dyn5**
cos φ	*U*	U_{max}	K_P
[kVA]	[V]	[V]	[-]
0,50	339,41	1817,00	5,353
0,60	339,41	1808,80	5,329
0,70	339,41	1793,50	5,284
0,80	339,41	1701,20	5,012
Transformator:	**400 kVA**	**Direktno uzemljenje**	**Dyn5**
cos φ	*U*	U_{max}	K_P
[kVA]	[V]	[V]	[-]
0,50	339,41	2365,30	6,968
0,60	339,41	2132,80	6,284
0,70	339,41	1967,70	5,797
0,80	339,41	1693,30	4,989

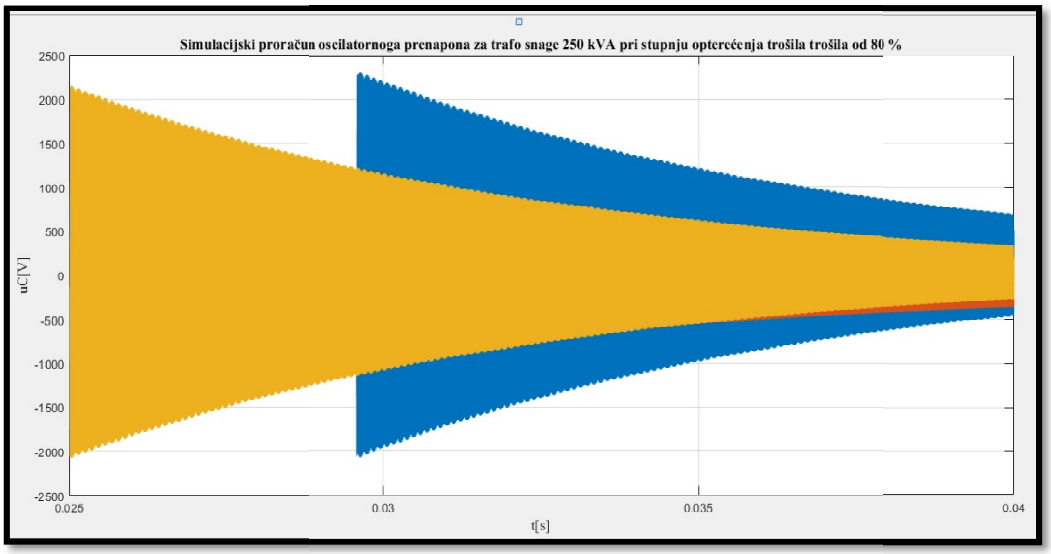
Tablice 6.43. i 6.44. prikazuju preostale numerički proračunate maksimalne fazne vrijednosti sklopnoga prenapona pri promjenjivom faktoru snage i stupnju opterećenja za slučaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa NN prekidača.

Tablica 6.44. Numerički proračunate maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} za slučaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa NN prekidača pri promjenjivom stupnju opterećenja tereta

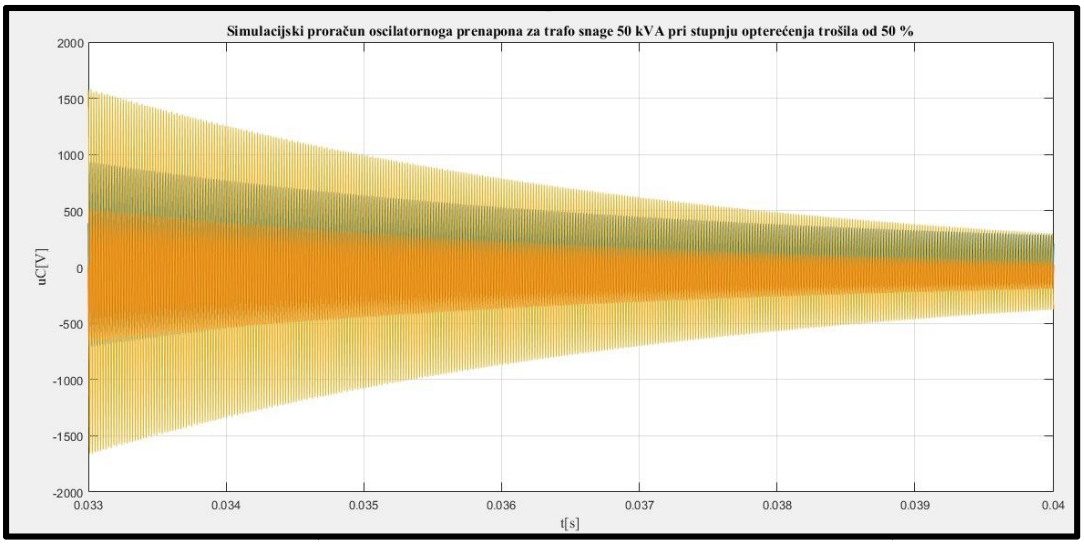
Transformator:	**50 kVA**	**Direktno uzemljenje**	**Yyn5**
Stupanj opterećenja	U	U_{max}	K_P
[kVA]	[V]	[V]	[-]
$0{,}50 \times S_n$	339,41	2434,30	7,172
$0{,}60 \times S_n$	339,41	1986,70	5,853
$0{,}70 \times S_n$	339,41	1866,90	5,500
$0{,}80 \times S_n$	339,41	1781,30	5,248
Transformator:	**250 kVA**	**Direktno uzemljenje**	**Dyn5**
Stupanj opterećenja	U	U_{max}	K_P
[kVA]	[V]	[V]	[-]
$0{,}50 \times S_n$	339,41	2623,10	7,728
$0{,}60 \times S_n$	339,41	2409,50	7,099
$0{,}70 \times S_n$	339,41	2039,30	6,008
$0{,}80 \times S_n$	339,41	1648,10	4,856
Transformator:	**4000 kVA**	**Direktno uzemljenje**	**Dyn5**
Stupanj opterećenja	U	U_{max}	K_P
[kVA]	[V]	[V]	[-]
$0{,}50 \times S_n$	339,41	2265,10	6,673
$0{,}60 \times S_n$	339,41	2117,10	6,237
$0{,}70 \times S_n$	339,41	2082,10	6,134
$0{,}80 \times S_n$	339,41	1819,30	5,360



Slika 6.40. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 400 kVA pri stupnju opterećenja trošila od $0{,}80 \times S_n$



Slika 6.41. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 250 kVA pri stupnju opterećenja trošila od 0,80 × S_n



Slika 6.42. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 50 kVA pri stupnju opterećenja trošila od 0,80 × S_n

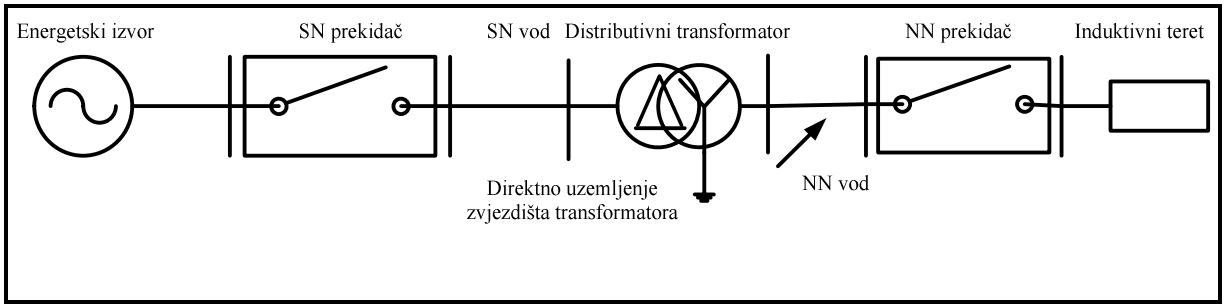
Karakteristike sklopnih prenapona za tri odabrana transformatora pri stupnju opterećenja trošila od 0,80 × S_n prikazani su na gornjim slikama. Za svaki transformator su napravljena dva različita tipa simulacije. Za prvi tip simulacije faktor snage radno – induktivnoga tereta se mijenjao u rasponu od 0,50 do 0,86. Drugi tip simulacije napravljen je uz promjenu stupnja opterećenja radno – induktivnoga tereta. Stupanj opterećenja tereta se mijenjao u granicama od 50 % do 92 % nazivne snage transformatora. Rezultati simulacije koji su prikazani u tablici 6.43. i tablici 6.44. jasno pokazuju da će faktor prenapona biti još veći gdje je faktor snage manji od nazivnoga. Isto tako, nešto su izraženiji maksimalni fazni naponi kod

promjene stupnja opterećenja radno - induktivnog tereta. Razlog dosta veće maksimalne fazne vrijednosti napona u odnosu na nominalno opterećenje je zbog vrijednosti dozemnoga kapaciteta NN namota transformatora te dozemnog kapaciteta radno - induktivnog tereta. Dodatnim simulacijskim testiranjem se može dokazati da dozemni kapaciteti SN i NN namota transformatora igraju najznačajniju ulogu pri analizi brzih sklopnih pojava. Nešto manju ulogu imaju međunamotni kapaciteti SN i NN namota transformatora. Dobiveni sklopni prenaponi se nalaze unutar μs područja što se može vidjeti na prikazanim slikama. Tranzijentno ponašanje VF modela transformatora sve do frekvencije od nekoliko desetaka kHz dominatno je ovisno o magnetskim poljima transformatora. Kako je sklopna pojava unutar MHz područja vidi se da najveći utjecaj na izlazni sklopni prenapon imaju namotni i dozemni kapaciteti transformatora. Često su u industrijskim primjenama kada se radi sa sekundarnim NN krugovima opterećenja (npr. motorna opterećenja) nadomjesni efektivni kapaciteti transformatora uglavnom su nepoznati. U takvim slučajevima, utjecaj dozemnih, međufaznih i međunamotnih kapaciteta VF modela transformatora na simulacijski rezultat bi trebalo provjeriti metodom varijacije parametara. Osim toga pokazalo se metodom varijacije, da za razliku od rasipnih induktiviteta, glavni induktivitet transformatora nema nikakvog utjecaja na karakteristiku sklopnoga prenapona u MHz području. Po svemu sudeći i grupa spoja transformatora ima značajan utjecaj na zaštitu sekundarnog NN kruga opterećenja. Naime, odabirom odgovarajuće grupe spoja transformatora osigurava se prenaponska zaštita sekundarnoga NN kruga transformatora. Odziv VF simulacijskog modela transformatora na brzu sklopnu pobudu (misli se na step ili impulsnu pobudu) generiranu sa primarne strane transformatora pokazuje mali napon na sekundarnoj strani transformatora. Brzi sklopni tranzijenti skoro su u potpunosti prigušeni od samoga transformatora. Simulacijskim dodatnim istraživanjem to će se i u budućim istraživanjima prikazati i dokazati.

6.1.7. Utjecaj promjene duljine sekundarnoga NN voda na karakteristiku sklopnog prenapona za slučaj isklopa radno - induktivnog tereta

Cilj ove simulacije je utvrditi iznos sklopnoga prenapona dobivenog na strani radno - induktivnog tereta u uvjetima promjene duljine sekundarnoga NN voda. Duljina voda se mijenja u granicama od 0,1 km do 1 km. Simulacija će se provoditi na transformatoru snage 400 kVA. Kao u prethodnom sklopnom slučaju vrijednost maksimalnog faznog napona funkcija je sklopnog trenutka. Faktor prenapona proračunat će se za najnepovoljniji trenutak

isklopa prekidača. Jednofazna mrežna konfiguracija sustava za slučaj isklopa radno - induktivnog tereta uz promjenu duljine NN voda prikazana je na slici 6.43.



Slika 6.43. Jednofazna mrežna konfiguracija sustava za slučaj isklopa radno - induktivnog tereta uz promjenu duljine NN voda

Tablice 6.45., 6.46. i 6.47. prikazuju vrijednosti direktnih i indirektnih lokalnih varijabli koji su pomoću m - skripti pridijeljeni odgovarajućoj komponenti simulacijskoga modela. Konfiguracija simulacijskoga modela razvijenog u MATLAB – SimPowerSystemsu je prikazana na slici 6.43.

Tablica 6.45. Konfiguracija za istraživanje sekundarnoga kruga transformatora uz promjenu duljine NN voda

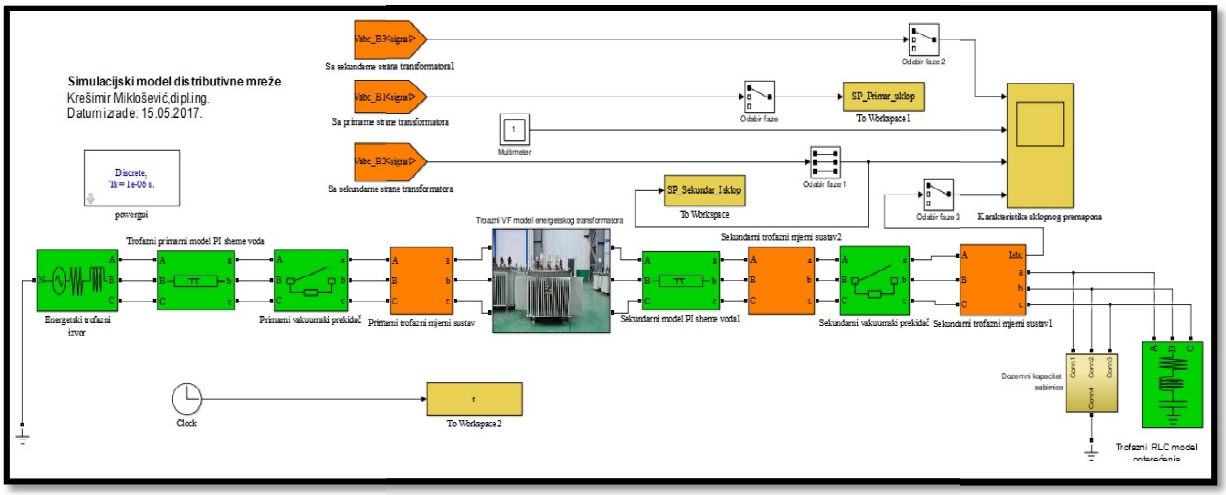
Komponente	**Konfiguracija**
	A
Pogonski napon	10 / 0,4 kV
SN prekidač	SN prekidač
NN prekidač	NN prekidač
Transformator	400 kVA Direktno uzemljenje Dyn5
SN vod	Al/Fe 5 km 3×95 mm^2
Teret	400 V cosφ = 0,92 Stupanj opterećenja = 0,86 × S_n Y - spoj

Tablica 6.46. Ulazni i proračunati koncentrirani parametri modela komponenti za istraživanje sekundarnoga NN kruga transformatora

Komponente	Konfiguracija
	A
Pogonski naponi	10 / 0,4 kV
SN prekidač	R_{on} = 0,01 Ω t_{p_uklopa} = 5 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno
NN prekidač	R_{on} = 0,01 Ω t_{s_uklopa} = 20 ms $t_{s_isklopa}$ = 25 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno
Transformator	R_1 = 4,8281 Ω L_1 = 0,0495978 H R_2 = 0,0077 Ω L_2 = 0,0000794 H R_m = 182321,138 Ω L_m = 0,41867 H
SN vod	R_{11} = 0,31 Ω / km L_{11} = 1,36 mH / km R_{10} = 0,4556 Ω / km L_{10} = 5,1 mH / km l_0 = 5 km
NN vod	R_{11} = 0,31 Ω / km L_{11} = 1,36 mH / km R_{10} = 0,4556 Ω / km L_{10} = 5,1 mH / km l_0 = od 0,1 km do 1 km

Tablica 6.47. Simetrični ekvivalentni koncentrirani kapaciteti po fazi

Komponente	Konfiguracija
	A
SN vod	C_{11} = 8,57 nF / km C_{10} = 4,3 nF / km
Transformator	C_{p0} = 6,6 pF C_{s0} = 24,8 pF C_{ps1} = 26,4 pF C_{p12} = 3 pF C_{s12} = 1 Pf
Teret	C_{dozt} = 6 pF
NN vod	C_{11} = 8,57 nF / km C_{10} = 4,3 nF / km



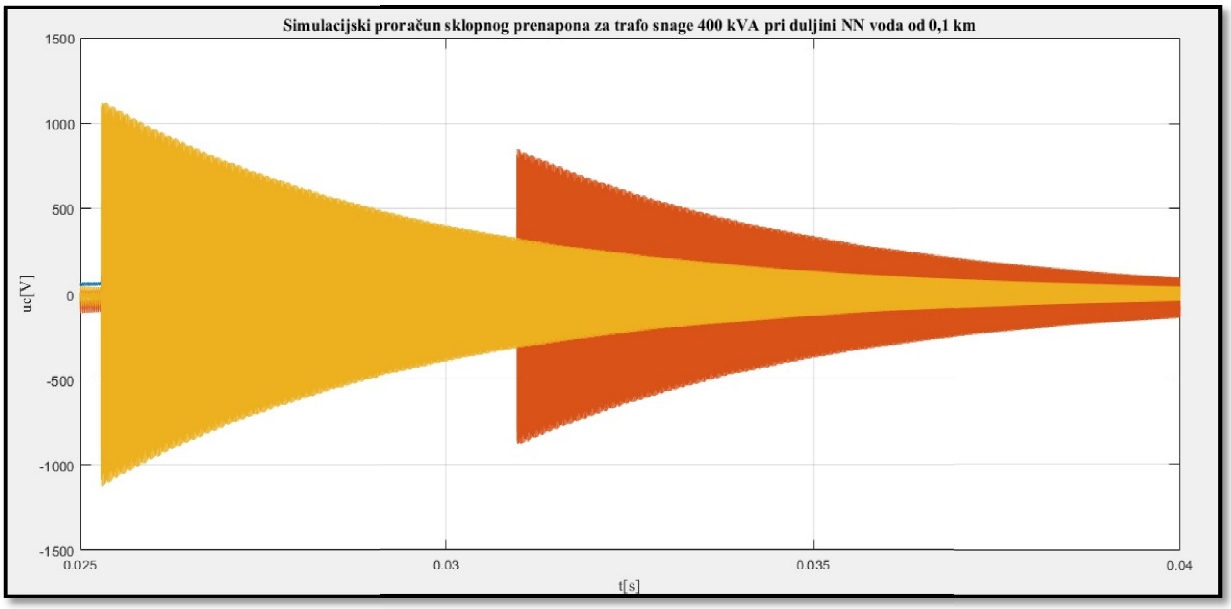
Slika 6.44. Simulacijski model distributivne mreže razvijen u Matlab – SimPowerSystemsu

U svrhu dobivanja odgovarajućeg numeričkog rješenja, u tablici 6.48. su prikazani odabrani konfiguracijski parametri simulacije za analizu utjecaja promjene duljine NN voda na visinu i oblik karakteristike sklopnog prenapona.

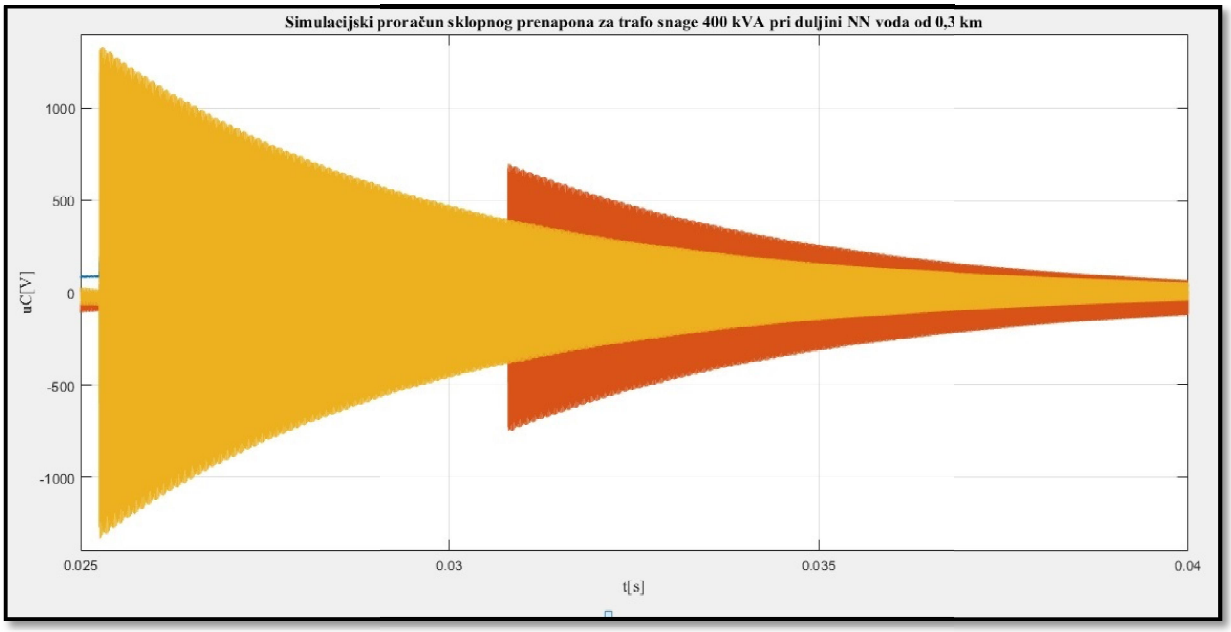
Tablica 6.48. Konfiguracijski parametri simulacije

Konfiguracijski parametri simulacije
Trajanje simulacije: 40 ms
Numerička metoda: Trapezoidna robusna metoda (ode 23tb)
Tip numeričke metode: Diskretni korak simulacije
Relativna tolerancija: 1 exp(-4)
Korak simulacije: 1 exp(-6)

Karakteristike sklopnoga prenapona za slučaj duljine sekundarnog NN voda od 0,1 km i 0,3 km prikazana je na slici 6.45. odnosno 6.46.



Slika 6.45. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 400 kVA pri duljini NN voda od 0,1 km



Slika 6.46. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 400 kVA pri duljini NN voda od 0,3 km

Tablica 6.49. Numerički proračunate maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} za slučaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa NN prekidača

l_0	S	U	U_{max}	K_P
[km]	[kVA]	[V]	[V]	[-]
0,1	400	339,41	1012,30	2,983
0,2	400	339,41	1193,20	3,516
0,3	400	339,41	1331,30	3,922
0,7	400	339,41	1354,10	3,989
1,0	400	339,41	1426,70	4,204

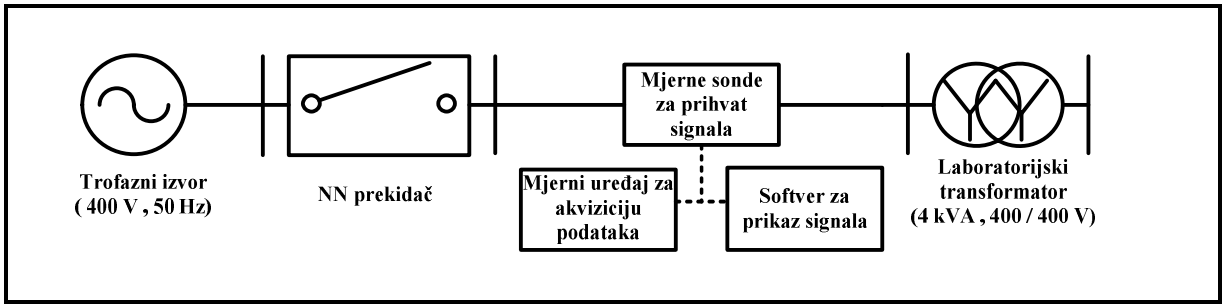
Isklop prekidača na sekundarnoj NN strani transformatora generirat će sklopni prenapon u vrlo kratkom vremenu. Dodavanjem kratkog NN voda u slučaju najnepovoljnijeg isklopa prekidača prouzokovat će jači sklopni učinak nego slučaj bez sekundarnoga NN voda. Prema tablici 6.49. vidi se da što je NN vod kraći to je maksimalna fazna vrijednost napona manja. Najveća maksimalna vrijednost napona prema tablici 6.49. iznosi 1426,70 V i dobije se pri dužini NN voda od 1 km. Dodavanjem NN voda dozemni kapaciteti najviše su utjecali na povišenje napona. Da se dodatno verificira simulacijska konfiguracija, potrebno je provesti na ovoj simulacijskoj konfiguraciji dodatne simulacijske studije. Često se u različitim primjenama kada se radi s radno – induktivnim opterećenjima umjesto NN voda koristi se kabel s ciljem povećanja pouzdanosti sekundarnoga NN kruga transformatora. Simulacijski model kabela se može vrlo jednostavno spojiti na novu topologiju sekundarnoga NN kruga tereta. U takvim slučajevima, dozemni kapaciteti kabela zbog svoje nešto izraženije kapacitivne komponente mogu utjecati na visinu sklopnoga prenapona. Usporedbom nove konfiguracije s provedenim prethodnim simulacijskim istraživanjem može se utvrditi na koji način kabel utječe na karakteristiku sklopnoga prenapona. Kakvi odnosi visine i trajanja sklopnoga prenapona prevladavaju. Nadalje, navedena simulacija će razjasniti rizik od pojave sklopnih prenapona u odnosu na standardne konfiguracije kruga opterećenja.

7. Eksperimentalni laboratorijski sustav za mjerenje sklopnih prenapona

Cilj ovog poglavlja je definirati ključne karakteristike eksperimentalnoga mjernog postava i objasniti njegovu primjenu pri mjerenju sklopnog prenapona u laboratorijskim uvjetima. Nadalje, bit će opisan dizajn energetskog i mjernog sustava. Također će bit prikazane osnovne specifikacije korištenih analognih i digitalnih uređaja. Dapače, bit će odabrana potrebna mjerna oprema za dobivanje kvalitetnih mjernih uzoraka. Štoviše, na taj način dobiveni kvalitetni mjerni uzorci i dijagrami bit će korišteni prilikom verifikacije simulacijskog laboratorijskog postava. Glavni cilj je osmisliti realni mjerni sustav za prikaz VF sklopnih prenapona prilikom isklopa laboratorijskog transformatora u praznom hodu. Na kraju, će se provesti postupak identificiranja snimljenih sklopnih karakteristika te ukazati na prednosti i nedostatke eksperimentalnog mjernog postava.

7.1. Konfiguracija energetskog i mjernog sustava za mjerenje sklopnog prenapona u laboratorijskim uvjetima

Konfiguracija energetskog i mjernog sustava za slučaj isklopa neopterećenog laboratorijskog transformatora snage 4 kVA prikazana je na slici 7.1.

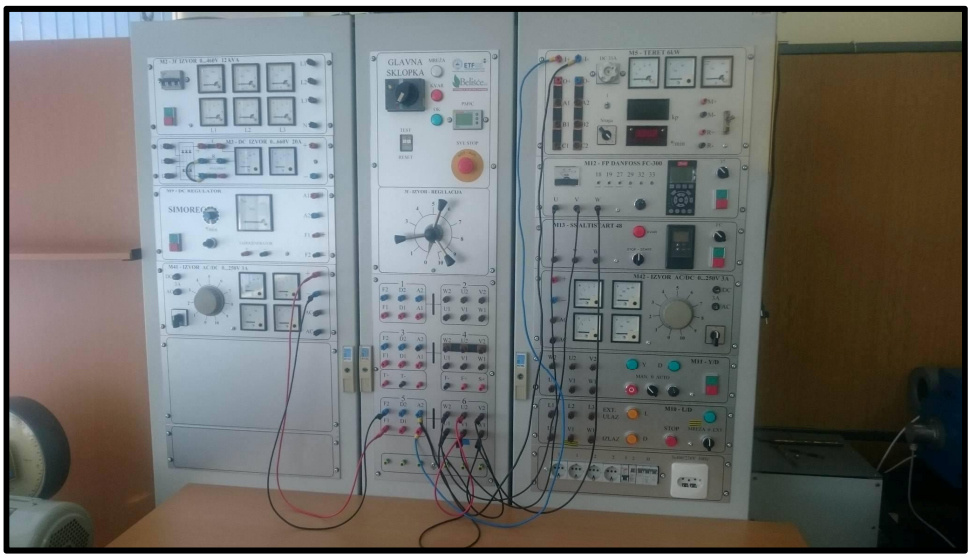


Slika 7.1. Dizajn energetskog i mjernog sustava korištena pri isklopu neopterećenog transformatora

Energetski sustav korišten pri isklopu neopterećenog transformatora sastoji se od simetričnog trofaznog izvora snage 12 kVA. Niskonaponski prekidač zajedno sa simetričnim trofaznim izvorom napona smješten je unutar ispitne stanice (slika 7.3.). Tablica 7.1. prikazuje nazivne podatke trofaznog izvora.

Tablica 7.1. Nazivni podatci simetričnoga trofaznog izvora napona

Podatci energetskog izvora			
Nazivni napon	Nazivna prividna snaga	Nazivna frekvencija	Način uzemljenja
400 V	12 kVA	50 Hz	Direktno



Slika 7.2. Prikaz ispitne stanice sa integriranim energetskim izvorom i NN prekidačem

Tablica 7.2. prikazuje nazivne podatke testiranog laboratorijskog transformatora. Također u istoj tablici su prikazani izmjereni i proračunati podatci laboratorijskoga transformatora. Izmjereni podatci dobiveni su propisanim standardnim mjernim postupcima. Pokusom praznoga hoda izmjereni su struja praznoga hoda (I_0), gubici praznoga hoda (P_0). Faktor snage ($\cos\varphi_0$) je proračunat na temelju struje i snage praznoga hoda. Pokusom kratkoga spoja izmjeren je napon kratkoga spoja (U_k) i gubici kratkoga spoja (P_k). Na temelju mjernih podataka dobivenih praznim hodom i kratkim spojem transformatora proračunati su preostali parametri nadomjesne sheme laboratorijskog transformatora. Misli se na ukupni nadomjesni radni i induktivni otpor (R_k, X_k). Ulazna impedancija kratkoga spoja Z_k iznosi 0,891 Ω. Za potrebe konačne verifikacije fizičkog modela transformatora proračunati su koncentrirani parametri laboratorijskog transformatora. Prvi par podataka (R_1, R_2) predstavlja djelatne otpore primarnog i sekundarnog NN namota po fazi. Drugi par podataka ($X_{\sigma 1}$, $X_{\sigma 2}$) predstavlja rasipne induktivne reaktancije primarnog i sekundarnog namota po fazi. Treći par podataka (R_m, X_m) predstavlja željeznu jezgru.

Pomoću NN prekidača kontrolira se vrijeme uklopa i isklopa prekidača. Štoviše, odabir trenutka isklopa NN prekidača je kontroliran ručno. Korištena je statistička metoda isklopa prekidača. Prilikom snimanja sklopnih prenapona odabrana su četiri slučajna

trenutaka isklopa. Identifikacija trenutka isklopa NN prekidača obavlja se posredstvom dobivenih valnih oblika sklopnih prenapona.

Tablica 7.2. Podatci testiranog laboratorijskog transformatora

Nazivni podatci testiranog laboratorijskog transformatora							
S_n	U_{1n}	U_{2n}	I_{1f}	I_{2f}	U_{1f}	U_{2f}	Spoj
[kVA]	[V]	[V]	[A]	[A]	[V]	[V]	
4	400	400	7,8	7,8	231	231	Yy0
Izmjereni i proračunati podatci testiranog laboratorijskog transformatora							
I_0	P_0	$\cos\varphi_0$	P_j	P_k	U_k	R_k	X_k
[A]	[W]	[]	[W]	[W]	[V]	[Ω]	[Ω]
0,723	47,39	0,095	498,88	152,40	6,99	0,824	0,338
Koncentrirani proračunati parametri laboratorijskog transformatora							
R_1	R_2	$X_{\sigma 1}$	$X_{\sigma 2}$	P_j	R_m	X_m	Z_k
[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[W]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
0,363	*0,461*	0,169	0,169	498,88	3376,26	317,68	0,891

Organizirati mjerenje karakteristike sklopnoga prenapona u kontroliranim uvjetima te odabrati kvalitetnu mjernu opremu za prihvat mjernih signala predstavljao je izazov. Odabrana je konfiguracija mjernoga sustava prikazana prema slici 7.2. Struktura mjernog sustava sastoji se od mjernih sondi za prihvat naponskih i strujnih signala, mjernih uređaja za akviziciju mjernih uzoraka te sofvera za prikaz karakteristike sklopnoga prenapona. Komunikacija između računala i mjernog uređaja za akviziciju podataka realizirana je posredstvom paralelnog porta. Osnovne karakteristike mjernog sustava prikazuje tablica 7.3.

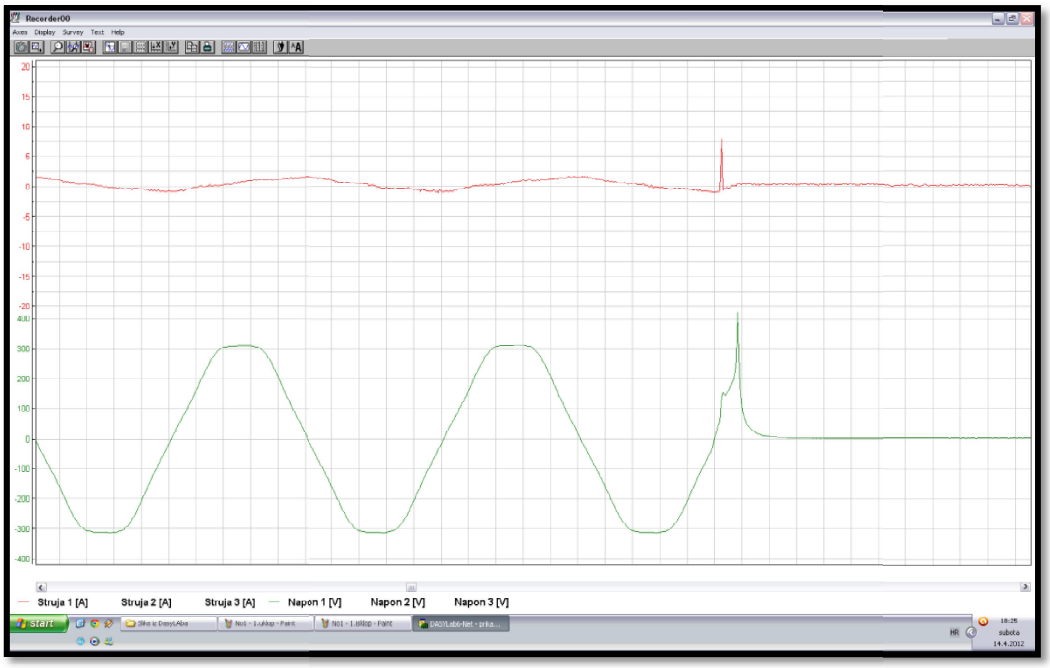
Tablica 7.3. Specifikacija komponenti mjernoga sustava

Komponente	**Osnovne specifikacije**
	A
Strujna sonda	PR 430 40 / 400 A Rezolucija ± 10 / 100 mA
Naponski adapter	Diferencijalni signali 1000 V
Mjerni sustav za akviziciju podataka	Iotech Wavebook 512 8 kanala 4 diferencijala kanala 1 MHz 1 μs / kanalu
Softver za prikaz signala	DasyLab

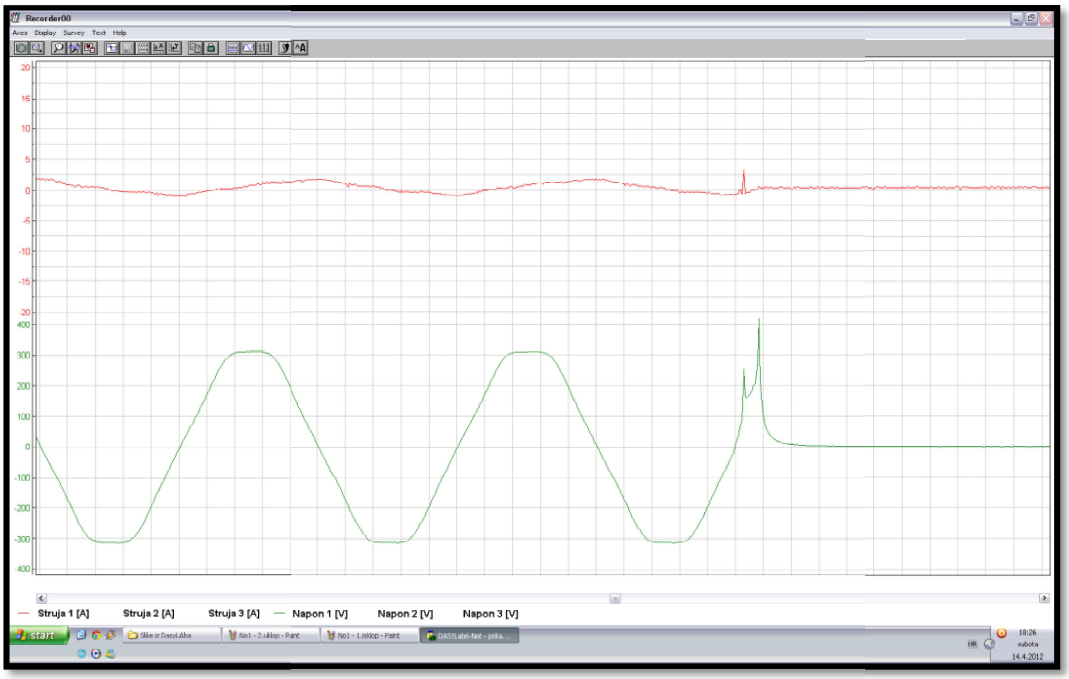
7.2. Isklop neopterećenog laboratorijskog transformatora

Tijekom mjerenja korišteno je šest kanala. Tri kanala su korištena za snimanje struje isklopa dok su preostala tri kanala korištena za snimanje napona. Korištene su strujne sonde od 40 A čija se osjetljivost kreće u rasponu od ± 10 mA. Kako se naponski mjerni signal dobiva temeljem izmjerene struje odabran je adapter s omjerom od 10 mV / A. Svaki kanal posjeduje serijski otpor od 10 MΩ. Naponske sonde su skalirane na omjer 200 : 1 te mogu podnijeti napone do 1000 V i mjeriti brze tranzijentne frekvencijske pojave sve do 1 MHz. Tri naponske sonde su postavljene na transformatorsku NN stranu prekidača. Na isto mjesto su postavljenje i preostale tri strujne sonde.

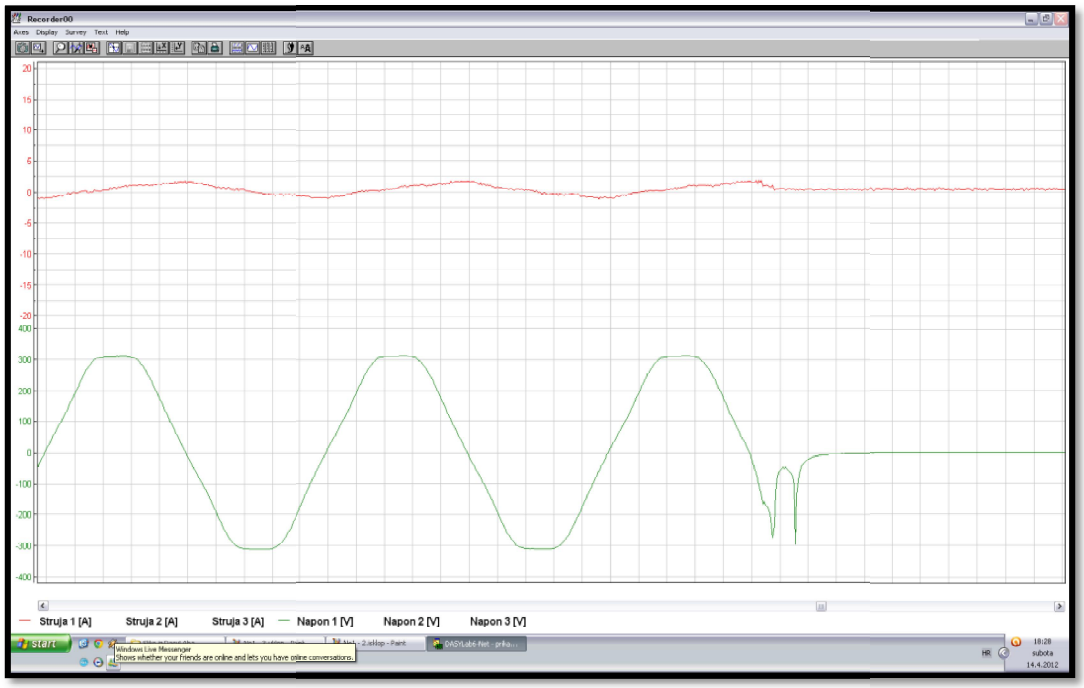
Za prikaz, obradu i spremanje mjernih signala korišten je sofver DasyLab. DasyLab uzorkuje mjerne signale u stvarnom vremenu te omogućuje stvaranje prilagođenih grafičkih korisničkih sučelja. Pruža virtualne mjerne alate i funkcije za jednostavno razvijanje složenih aplikacija za mjerenje. Jednostavno se umetnu odgovarajući grafički model blokovi u radni prozor DasyLab-a te se na odgovarajući način povežu. U nastavku je prikazana izmjerena karakteristika sklopnoga prenapona za jednu fazu. Štoviše, prikazane su sva četiri slučaja isklopa neoptrećenog transformatora.



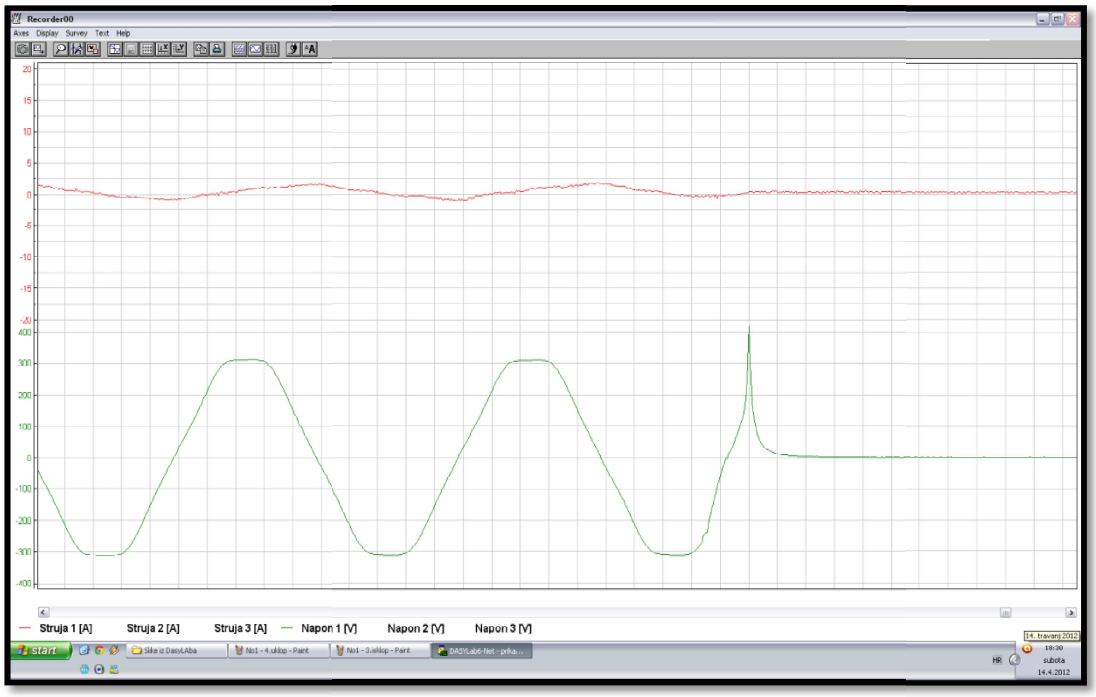
Slika 7.3. Oblik karakteristike sklopnog prenapona za 1. trenutak isklopa laboratorijskog transformatora u praznom hodu



Slika 7.4. Oblik karakteristike sklopnog prenapona za 2. trenutak isklopa laboratorijskog transformatora u praznom hodu



Slika 7.5. Oblik karakteristike sklopnog prenapona za 3. trenutak isklopa laboratorijskog transformatora u praznom hodu



Slika 7.6. Oblik karakteristike sklopnog prenapona za 4. trenutak isklopa laboratorijskog transformatora u praznom hodu

Očitane maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona za četiri različita trenutka isklopa neopterećenog transformatora prikazuje tablica 7.4. Na temelju očitanih vršnih vrijednosti proračunati su faktori prenapona te uneseni u tablicu 7.4.

Tablica 7.4. Numerički proračunate maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} pri slučajnim trenutcima isklopa NN prekidača

n	U	U_{max}	K_P
[]	[V]	[V]	[-]
1	310,20	420,00	1,354
2	310,20	430,00	1,386
3	310,20	300,00	0,967
4	310,20	420,00	1,354

Iz dobivenih odziva se mogu odrediti dosegnuti iznosi maksimalnih faznih vrijednosti napona te sam oblik karakteristike sklopnog prenapona. Izmjerenu sklopnu karakteristiku pod slikom 7.5., karakterizira trenutak isklopa koji se slučajno poklapa s točkom zasićenja transformatora. Nasuprot tome, sva četiri slučajno odabrana trenutka isklopa laboratorijskog transformatora generiraju sklopnu karakteristiku koja se prema dobivenom obliku može svrstati u impulsne sklopne prenapone. Dakle, prigušenje sklopne karakteristike je relativno brzo. S obzirom na to da laboratorijski ispitni transformator je ujedno i izolacijski, jednakih

prijenosnih omjera, za pretpostaviti je da su vremenske konstante nešto drugačije od klasičnih distributivnih transformatora pa se zbog toga nedobiju oscilatorni nego impulsni prenaponi. Maksimalna fazna vrijednost sklopnog prenapona dobije se u trenutku 2. isklopa neopterećenog transformatora. Faktor prenapona poprima vrijednost 1,386. Oblik dobivene karakteristike je impulsnog oblika s vrlo kratkim vremenom prigušenja.

8. Dijagnostika i monitoring visokonaponskog rasklopnog postrojenja

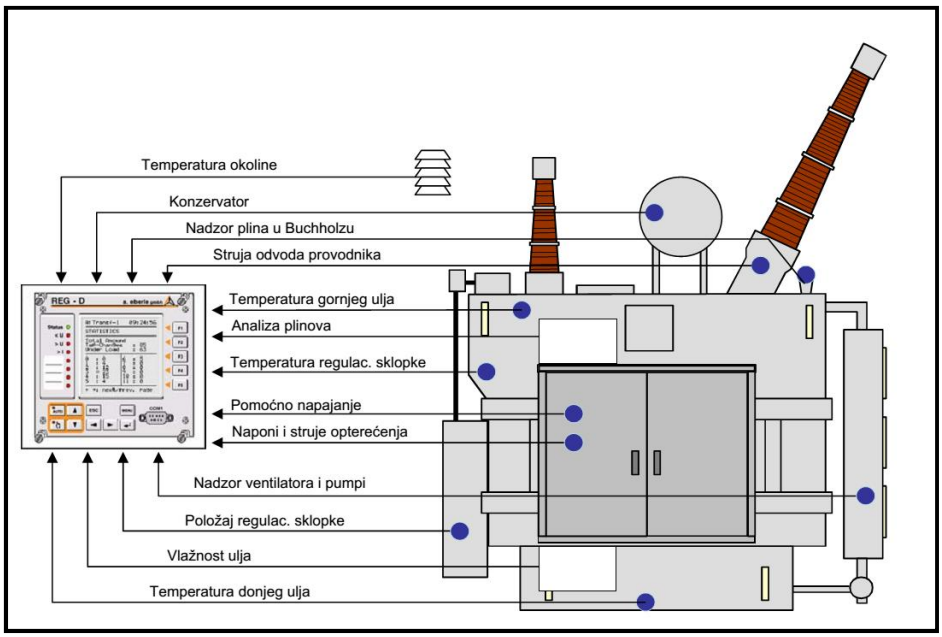
U ovom poglavlju će biti prikazani primjeri suvremenih rješenja monitoringa rasklopnog postrojenja te integralnog dijagnostičkog mjernog podsustava koji služi za utvrđivanje sklopnih prenapona. Svrha kontinuiranog nadzora elektroenergetske komponente je smanjenje troškova pogona i povećanje raspoloživosti postrojenja. Poboljšanje tehnologije i konstrukcije VN prekidača (SF_6) i energetskih transformatora omogućio je razvoj inteligentnih nadzornih i dijagnostičkih sustava kod elektroenergetskih i industrijskih organizacija. Zahvaljujući poboljšanju u dijelu tehnika prekidanja struje i optimiranja dizajna prekidne komore prekidača značajno je reduciran broj ugrađenih komponenata, a time i potrošnja pogonskog mehanizma prekidača. Različitom realizacijom i principom rada prekidnih komora iskorištava se termička energija luka za vrijeme prekidanja. Energija luka mora pri tome biti dostatna za stvaranje visokog tlaka u prekidnoj komori. Na taj se način energija pogonskog mehanizma kontakata znatno smanjila. Različitim tehnikama prednabijanja tlaka u višelučnim komorama te s tim povezani razvoj tehnologije višestupnjevitog kontaktnog sustava utječe se na strujno – naponsku karakteristiku sklapanja prekidača. Sustavi za dijagnostiku i monitoring određenih fizikalnih veličina tada su pridodani već postojećim funkcijama kontrole rada VN prekidača i energetskih transformatora. Time je omogućeno mjerenje i arhiviranje mjernih fizikalnih veličina. Rezultati kontinuiranog nadzora mogu biti informacije i preporuke na temelju usporedbe izmjerenih veličina i veličina dobivenih simulacijom. Povratne informacije se senzorima kontroliraju, filtriraju te analiziraju softverski. Na ovaj je način moguće pravovremeno otkrivanje potencijalnih sklopnih prenapona. Prekidač namijenjen kontroliranom sklapanju reagira na bazi informacija sa različitih senzora. Kontrolni modul konvertira originalni operacijski signal u signal za kontrolirano sklapanje. Signal za kontrolirano sklapanje se rekonstruira sa odgovarajućim kašnjenjem. Vrijeme kašnjenja se definira na temelju trenutnih vrijednosti napona na obje strane prekidača, trenutne vrijednosti struje kroz prekidač i proračunatom vremenu mehaničke operacije kontakata. Dodatni parametri su temperatura okoline, upravljački napon i tlak plina. Na ovaj način je moguće djelomično ili u potpunosti eliminirati strujna i naponska naprezanja transformatora. Sve ovisi o konfiguraciji originalne mreže gdje se vrši sklapanje. Taj razvojni pristup je omogućio mjerenje i estimiranje ulaznih parametara blok simulacijskog modela energetske komponente. Dakle, otkrivanje i sprečavanje neželjenih stanja distribucijskog

sustava u nastanku smanjuje posljedice kvarova. Detaljnu analizu uzroka kvara je moguće postići ugradnjom kontinuiranog sustava motrenja. Prema istraživanju opisanom u [73] sklopni kvarovi u namotima predstavljaju 25 % ukupnih kvarova. U odnosu na ostale kvarove ovaj kvar pripada u oblik kvara s većom učestalosti pojavljivanja te se shodno tome više i istražuju dijagnostičke metode. Kako smo mogli vidjeti u ispitivanjima utjecaja konfiguracije mreže na visinu sklopnog prenapona vidimo da su jedan od značajnih razloga pojave kvarova u SN namotima sklopni prenaponi. Više o stanjima i trendovima razvoja tehnologije i konstrukcije visokonaponskih sklopnih aparata može se pročitati u [34]. Također, više o implementiranim dijagnostičkim metodama energetskih transformatora može se pročitati u [12], [75].

Integrirani kontinuirani sustavi nadzora SN prekidača i energetskih transformatora postaju sastavni dio postojećih sekundarnih rasklopnih sustava. Ovakvo stanje tehnologije je omogućilo razvoj posebnih komercijalnih rješenja kontinuiranog nadzora distributivnih energetskih prekidača i transformatora.

8.1. Primjeri suvremenih rješenja monitoringa distributivnih energetskih prekidača i transformatora

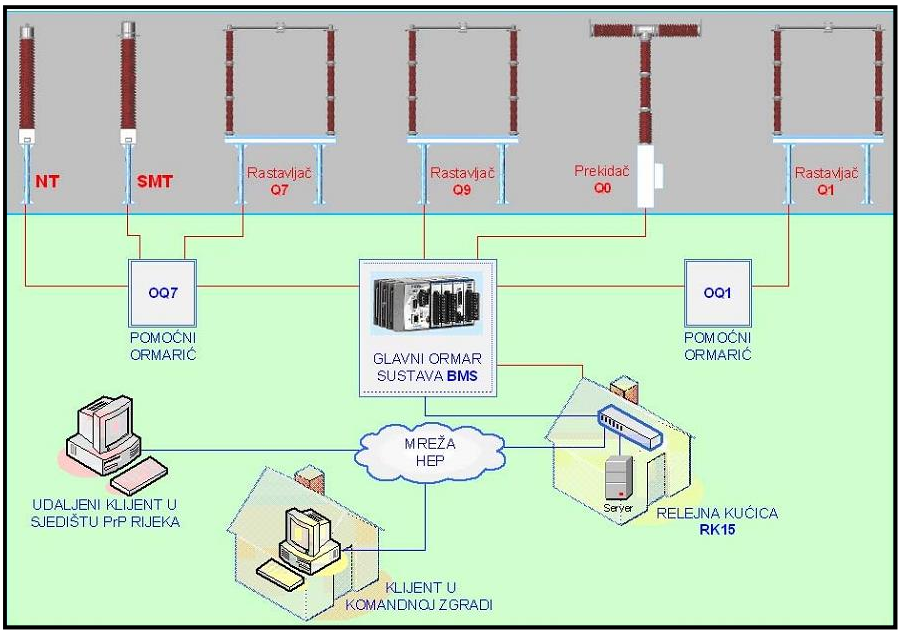
Suvremeni dijagnostički i monitoring sustavi pronašli su svoju primjenu u gospodarenju rasklopnim i industrijskim sustavima. Slika 8.1. ilustrira primjer integriranih monitoring sustava energetskog transformatora.



Slika 8.1. Integrirani dijagnostički i monitoring podsustavi energetskog transformatora [75]

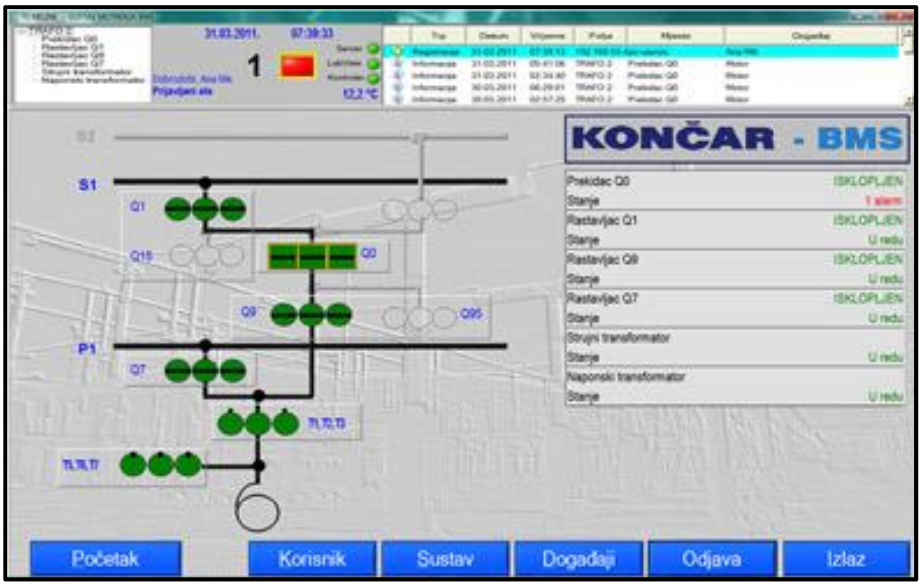
Senzori za nadzor plina su opremljeni analognim ulazima. Spajanjem podsustava za mjerenje plina na regulator napona omogućava se A / D pretvorba. Korištenjem posebne aplikacije na staničnom računalu na grafičkom sučelju korisnika se mogu prikazati trendovi u realnom vremenu. Registrira se trend prekomjernih koncentracija plina u ulju. U kombinaciji sa Buchholz relejom može se mjeriti brzina razvijanja izdvojenih plinova. Moguće je postići veliku osjetljivost na širokom rasponu brzina generiranja plina. Naravno, da lokaciju izvora plina nije moguće detektirati ovom dijagnostičkom metodom. Podsustav starenja izolacije namota transformatora u realnim uvjetima pogona je iznimno složen proces. Predstavlja proces međudjelovanja temperature, vlage, kisika, uvjeta pogona, tehnologije proizvodnje i ugrađenih izolacijskih materijala. Prihvatljiv model starenja je u fazi istraživanja [12]. Pojedini istraživači koriste i digitalnu termosliku za razvoj modela starenja izolacije. Ovaj podsustav u novije vrijeme bazira se na digitalnoj termoslici koja ima vešeznačnu interpretaciju u području mjerenja, simulaciji, upravljanju i zaštiti. Postoje pokušaji da se u model implementira mjerenje sadržaja furana u ulju i stupanj polimerizacije papira namota transformatora. Slika 8.2. prikazuje primjer razvodnog ormara sustava motrenja Končar – TMS.

Slika 8.2. Razvodni ormar sustava motrenja Končar - TMS [76]



Slika 8.3. Integrirani sustav monitoringa rasklopnog postrojenja KONČAR - BMS [12]

Slika 8.3 prikazuje primjer prototipa sustava monitoringa rasklopnog postrojenja. Kontinuirano prikupljanje, obrada i vizualizacija mjernih veličina, stanja i događaja prikazuje slika 8.4. U skladu s brojem i tipovima signala s modela rasklopnog postrojenja definirani su digitalni, mjereni i estimirani signali za svaku pojedinu energetsku komponentu. To je bila osnova za izradu kontrolnog sustava BMS. Optimalna frekvencija uzorkovanja za svaki pojedini signal je posebno razmatrana. Sva stanja i događaji se spremaju u bazu te se mogu naknadno analizirati ili se mogu pratiti trendovi. Sustav prati mjerene veličine te kad vrijednosti prijeđu granicu dojavljuje i daje pripadajuću indikaciju. Sustav prepoznaje događaje kao što su preklapanje prekidača, prorada motora opruge, uklop ili isklop rastavljača. Svi događaji spremaju se u bazu prema odgovarajućem vremenu ali sa svim podatcima vezanim za taj događaj. Može se prikazati dijagram puta kontakata, oblik struje isklopnog svitka te početak i kraj naloga za sklapanje. U numeričkom obliku se može vidjeti ostvareni hod i brzina kontakata, vrijeme isklopa te potrošnja tlaka, temperatura rosišta plina i slično. Ukoliko neka od veličina odstupa, također je moguća indikacija. Algoritmi izračuna estimiranih parametara su osjetljivi na pogrešne mjerne podatke. Podatci se iz toga razloga filtriraju prije nego što se dalje koriste. Instalirani monitoring sustav je prilagodljiv raznim konfiguracijama rasklopnog postrojenja. Zbog mogućnost pojave sklopnih prenapona u signalnim krugovima korišteni su prepleteni, oklopljeni signalni kabeli te je na sve kabele postavljena prenaponska zaštita. Adekvatna frekvencija uzorkovanja temperature je dobivena posredstvom posebnog temperaturnog modula.



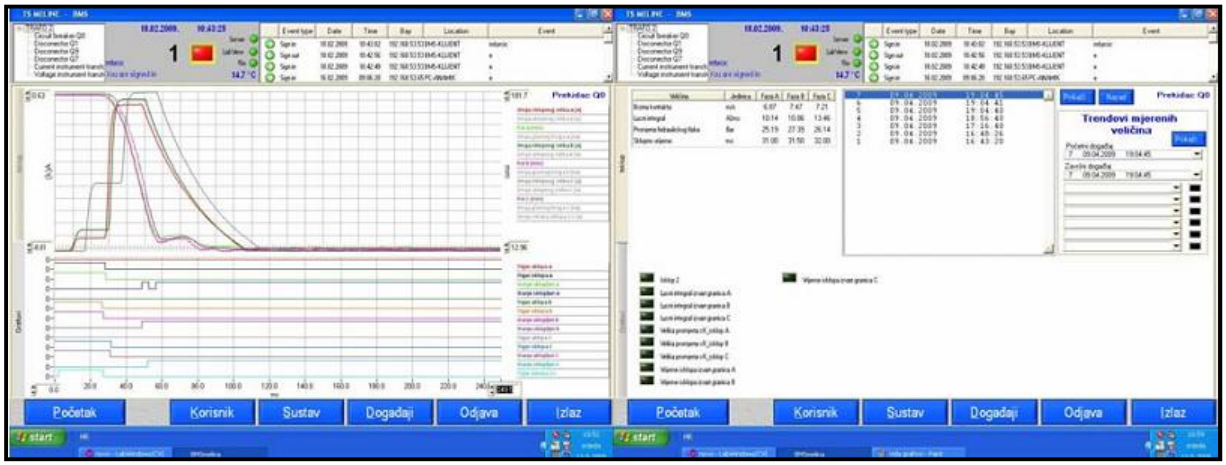
Slika 8.4. Korisničko sučelje KONČAR – BMS rasklopnog postrojenja [12]

8.2. Dijagnostički mjerni podsustavi energetskog transformatora za predviđanje negativnih posljedica pojave sklopnog prenapona

Kako bi se dijagnostičkim mjernim podsustavima na vrijeme detektirali opasno povišenje napona u trenutku nastajanja, potrebno je poznavati mehanizme koji dovode do proboja u SN namotu transformatora. Kao što znamo, svaki se mehanizam manifestira na specifičan način koji se može detektirati promjenom fizikalne veličine. Električna veličina se mjeri ugrađenim senzorima koji rade na različitom principima ili se estimira upotrebom odgovarajućeg matematičkog modela. Uslijed povećanog toplinskog i električnog naprezanja u blizini izolacijskog materijala dolazi do degradacije izolacijskih svojstava materijala, raspadanja celuloze pri čemu dolazi do pojave plinova u ulju, vlage te drugih produkata. Povećanje temperature ulja i namota, pojava parcijalnih izbijanja, promjena serijskih i dozemnih kapaciteta i faktora dielektričnih gubitaka namota. Promjena opisanih parametra postaje pouzdan indikator u dijagnosticiranju mehanizma pojave sklopnog prenapona koji može dovesti do kvarova. Najčešće korištene dijagnostičke metode se baziraju na mjerenju najtoplije točke namota i analiziranju plinova i vlage otopljenih u transformatorskom ulju. Razvojem senzora za on – line mjerenje koncentracije plinova u ulju s jedne strane te posebnih svjetlovodnih termometara koji mjere temperaturu u jednoj ili više točki namota omogućilo je integraciju dijagnostičkih podsustava za predikciju pojave povišenih prenapona u namotu. Senzori za mjerenje koncentracije više različitih plinova pojedinačno su dostupni. Osam ključnih plinova se identificira posredstvom akustičke spektroskopije. Najčešće su to

plinovi vodik, etilen, etan, metan, acetilen, kisik, ugljični monoksid, ugljični dioksid. Spomenuti senzori mjere i vlagu otopljenu u ulju. Poznato je da malo povećanje koncentracije vlage znatno smanjuje prekidnu čvrstoću izolacije transformatora. Najčešće se temperatura najtoplijeg mjesta procjenjuje nekim od IEC ili IEEE matematičkih modela. Parcijalna izbijanja se također mogu pojaviti kao posljedica povišenja napona, a s tim povezana oštećenja izolacije. Povećanje parcijalnih izbijanja u izolaciji transformatora znak je slabljenja izolacijskih svojstava materijala te je moguć proboj izolacije. Parcijalna izbijanja mogu biti i posljedica povećane vlage i oštećenja izolacije te otopljenih mjehurića plinova u ulju. Za detekciju koriste se električne i akustičke dijagnostičke metode. Akustički senzor se ugrađuje u transformator ili se postavlja na kotao. Ova metoda vrlo brzo locira mjesto parcijalnog izbijanja unutar samog transformatora primjenom adekvatnog algoritma i dobrim razmještajem senzora. Problem su smetnje na koje treba paziti. Ukoliko dođe do parcijalnog izbijanja u ulju doći će do povećanje koncentracije vodika što se može detektirati nekim od senzora plinova utopljenih u ulje.

Za ograničavanje sklopnih prenapona u SN prekidačima koriste se supravodljivi ograničivači struje. Postojeća tradicionalna rješenja kao što su ugradnja prigušnih VN kondenzatora i uklopnih otpornika na prekidaču više nisu dominantna. Sve se više ugrađuju tzv. moduli za kontrolirano sklapanje. Integrirani moduli za kontrolirano sklapanje sinkroniziraju trenutak sklapanja pojedinih kontakata prekidača sa trenutnim faznim kutom napona ili struje [75].



Slika 8.5. Grafičko korisničko sučelje SF_6 prekidača sa podacima u grafičkom i numeričkom obliku [12]

Najčešće spominjane dijagnostičke tehnike u estimiranju karakteristike sklopnih prenapona su neuronske mreže, ekspertni sustavi te neizrazita logika i dr. Uglavnom se koriste

za interpretaciju rezultata mjerenja plinova otopljenih u ulju te za proračun najtoplijeg mjesta u transformatoru. Neuronske mreže su se pokazale kao odličan dijagnostički alat za klasifikaciju uzroka i predviđanje kvara kao i za estimaciju ulaznih parametara u simulacijski model. Ekspertni sustavi se temelje na višegodišnjem iskustvu u dijagnostici i znanju stručnjaka koji posjeduju znanje o kvarovima. To se znanje pretvara u poopćena pravila koja se kasnije koriste u dizajnu računalnim programima. Odlika neizrazite logike je mogućnost procesiranja veličina koja nisu izrazito precizna. Pruža mogućnost kombiniranja ekspertnih sustava i neuronskih mreža. Više o kombiniranim on – line dijagnostičkim alatima se može pročitati u [76]. On – line pomoćna dijagnostika je suvremeni pristup dijagnosticiranju kvarova. Najvećim djelom je u fazi istraživanja i tek se treba potvrditi. Konzultacije sa ovakvim alatima još uvijek nisu okidač za donošenje odluka, već samo pomoćni alat. Izbor i uvođenje dijagnostičkih podsustava baziranim na određenim mehanizmima je opsežan zadatak za koji je neophodno formirati određeni stručni tim. Pri tome od velike koristi mogu biti saznanja stečena višegodišnjim istraživanjima, razvojem i primjenom dijagnostičkih metoda na terenu i u laboratoriju. Što preciznije tumačenje mehanizma nastajanja kvara dovodi do veće razine pouzdanosti dijagnostičkih metoda.

9. Evaluacijski okvir

Znanstveno – istraživački ishodi su verificirani i potvrđeni kombinacijom analitičkog i numeričkog proračuna te standardnim testnim mjerenjem. Ovakvi pristupi verifikaciji pripadaju u standardne inženjerske pristupe. Pri tome, razvijene numeričke metode su testirane na različitim konfiguracijama modela testne mreže koje imaju za cilj estimiranje karakteristike sklopnog prenapona. Razvijena testna distributivna simulacijska mreža temeljena je na prikladnim reprezentativnim nadomjesnim impedancijama korištenih energetskih komponenata. Dakle, primarni cilj je vrednovati simulacijske slučajeve prema frekvencijskom i amplitudnom okviru sklopnog prenapona. Iste određuju pokazatelji karakteristike sklopnog prenapona kao što je faktor prenapona. Sekundarni cilj je predložiti testni simulacijski model i integrirane digitalne funkcije za analizu osjetljivosti karakteristike sklopnog prenapona na promjenu konfiguracije mreže. Pri tome treba istaknuti pozitivne i negativne strane. Naglasak je na identifikaciji sklopne karakteristike povezane s uzrokom sklopne pojave. Pri tome je korišten deterministički simulacijski postupak.

9.1. Analitička verifikacija

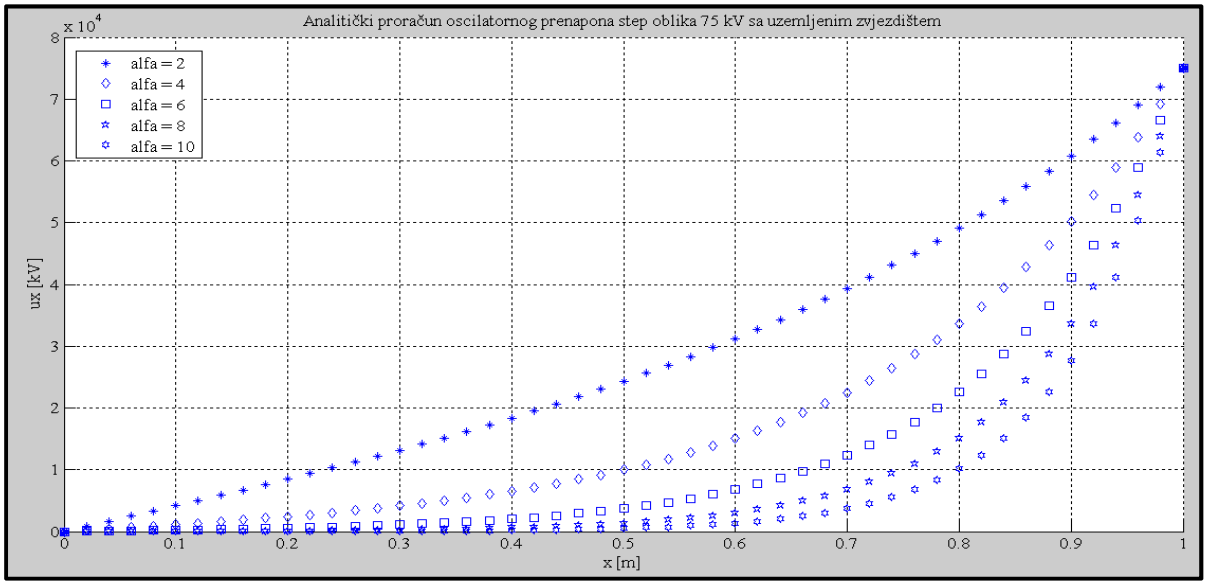
9.1.1. Usporedba razvijenog simulacijskog modela VN namota za početnu raspodjelu sa analitičkim proračunom početne raspodjele sklopnog prenapona

Primjenjivost simulacijskog modela početne raspodjele sklopnog prenapona je verificirana i potvrđena analitičkim pristupom pri zadanim referentnim početnim uvjetima. Početni uvjeti raspodjele sklopnog prenapona predstavljaju inicijalnu operacijsku točku gledišta za distributivni transformator snage 50 kVA i prijenosnog omjera 10 / 0,4 kV. Prilikom verifikacije simulacijskog modela upotrijebljena je analitička podloga opisana u odjeljku 2.4.2. Pri tome je korištena statistička metoda vrednovanja. Analiziran je i verificiran najnepovoljniji slučaj. Za potrebe analitičkog proračuna kreirana je m – skripta (slika 9.1.) koja kao rezultat prikazuje karakteristiku početne raspodjele sklopnog prenapona za različite vrijednosti faktora α.

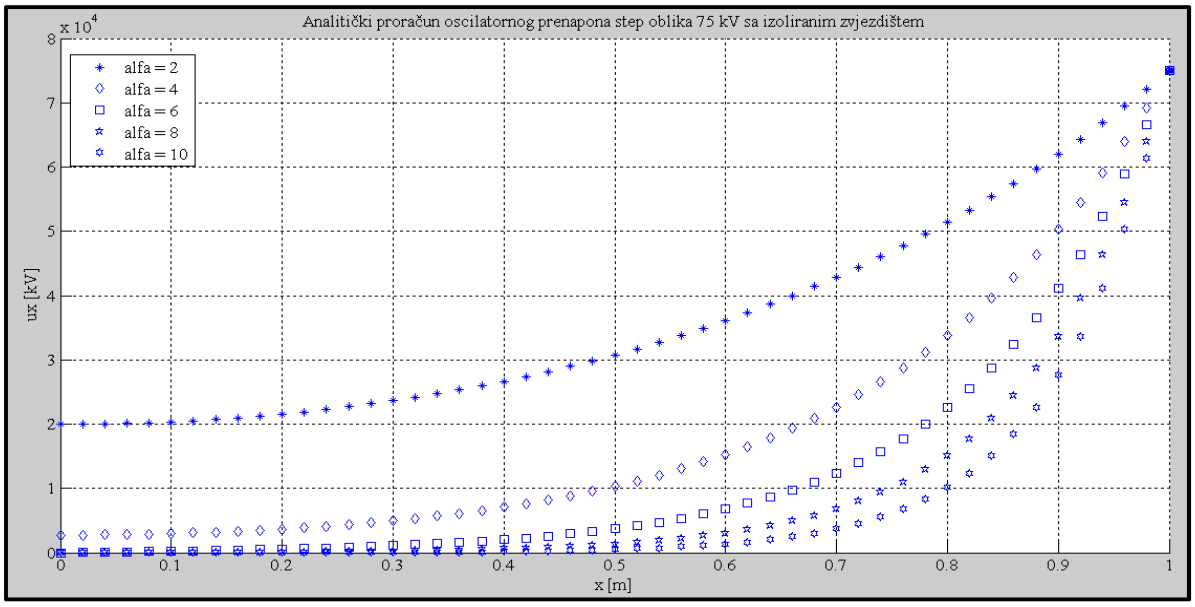
```
% Analitički proračun početne raspodjele sklopnog prenapona sa izoliranim
% zvjezdištem


uA=75e3;
x=0:0.02:1;
alfa=2;
L=1;
A=exp(alfa)+exp(-alfa);
K=1/A;
ux=uA*K*[exp(alfa*x/L)+exp(-alfa*x/L)];
hold on
grid;
title('Analitički proračun oscilatornog prenapona step oblika 75 kV sa izoliranim zvjezdištem');
xlabel('x [m]');
ylabel('ux [kV]')
plot(x,ux,'b*');
alfa=4;
A=exp(alfa)+exp(-alfa);
K=1/A;
ux=uA*K*[exp(alfa*x/L)+exp(-alfa*x/L)];
plot(x,ux,'bd');
alfa=6;
A=exp(alfa)+exp(-alfa);
K=1/A;
ux=uA*K*[exp(alfa*x/L)-exp(-alfa*x/L)];
plot(x,ux,'bs');
alfa=8;
A=exp(alfa)+exp(-alfa);
K=1/A;
ux=uA*K*[exp(alfa*x/L)+exp(-alfa*x/L)];
plot(x,ux,'bp');
alfa=10;
A=exp(alfa)+exp(-alfa);
K=1/A;
ux=uA*K*[exp(alfa*x/L)+exp(-alfa*x/L)];
plot(x,ux,'bh');
```

Slika 9.1. Primjer analitičkog proračuna početne raspodjele sklopnog prenapona za slučaj izoliranog zvjezdišta

Karakteristike sklopnog prenapona uz promjenu faktora α i vrste uzemljenja prikazane su na slici 9.2. i 9.3.



Slika 9.2. Analitički odziv početne raspodjele sklopnog prenapona step oblika 75 kV sa uzemljenim zvjezdištem



Slika 9.3. Analitički odziv početne raspodjele sklopnog prenapona step oblika 75 kV sa izoliranim zvjezdištem

Tako dobivene karakteristike početne raspodjele sklopnog prenapona uspoređene su sa simulacijskim odzivima dobivenim u podpoglavljima 6.1.2. i 6.1.3. Vrednovanje i usporedba dobivenih rezultata prikazana je u tablici 9.1. i 9.2.

Tablica 9.1. Usporedba rezultata proračuna vremenski i parametarski ovisnog sklopnog prenapona za slučaj uzemljenog zvjezdišta uz step pobudu 75 kV i koeficijent $\alpha = 2$

x	$u_{xanalitički}$	$u_{xnumerički}$	Razlika
[]	[kV]	[kV]	[%]
1,0	75,00	75,00	0,00 %
0,9	60,95	60,52	0,71 %
0,8	49,15	48,63	1,07 %
0,7	39,25	38,82	1,11 %
0,6	31,12	31,72	-1,89 %
0,5	24,15	24,92	-3,09 %
0,4	18,23	18,22	0,06 %
0,3	12,91	13,32	-3,08 %
0,2	8,64	8,15	6,01 %
0,1	4,12	3,80	8,42 %
0	0,02	-0,01	4,00 %

Tablica 9.2. Usporedba rezultata proračuna vremenski i parametarski ovisnog sklopnog prenapona za slučaj izoliranog zvjezdišta uz step pobudu 75 kV i koeficijent $\alpha = 2$

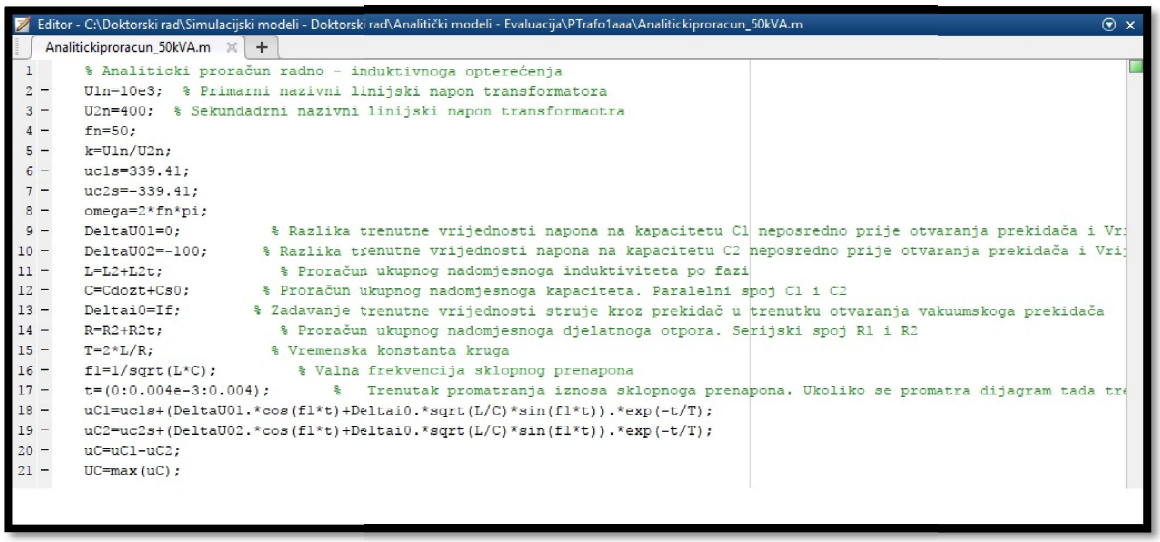
x	$u_{xanalitički}$	$u_{xnumerički}$	Razlika
[]	[kV]	[kV]	[%]
1,0	75,00	75,00	0,00 %
0,9	62,10	61,92	0,29 %
0,8	51,75	50,88	1,71 %
0,7	43,16	42,35	1,91 %
0,6	36,23	36,25	-0,06 %
0,5	30,84	30,15	2,29 %
0,4	26,18	26,32	-0,53 %
0,3	23,98	23,21	3,31 %
0,2	22,43	20,85	7,58 %
0,1	21,05	18,86	11,61 %
0	20,01	18,05	10,86 %

Rezultati digitalne simulacije početne raspodjele sklopnog prenapona u odnosu na analitički proračun predstavljaju dobru reprezentaciju simulacijskog modela namota distributivnog transformatora sa distribuiranim parametrima. Dobivene karakteristike u početnom trenutku sklopne pojave s dosta dobrom točnošću se preklapaju s proračunatim analitičkim pristupom. Što je koeficijent α veći to je razlika gradijenta sklopnog prenapona između izoliranog i uzemljenog zvjezdišta sve manja. Ovakvi simulacijski modeli rezultiraju s prilično preciznim vrijednostima veličine sklopnog prenapona što nameće sve veću potrebu korištenja numeričkoga pristupa. Rezultati dobiveni analitičkim pristupom pokazuju nešto veće odstupanje pri većem usitnjavanju SN namota. Čak i u slučaju vrlo grube diskretizacije namota distributivnog transformatora (manji broj serijskih i paralelnih kondenzatora) simulacijska istraživanja pokazuju dosta dobru točnost te se preporuča njihova primjena. Usitnjavanje podjele SN namota u odnosu na grubu podjelu neće bitno poboljšati točnost rezultata. Moguće je jedino da neke visokofrekvencijske komponente karakteristike sklopnog prenapona ne budu zastupljene što može dovesti do vrlo skupih grešaka. Za više saznanja o ovome fenomenu potrebno je izvršiti dodatna istraživanja. S druge pak strane, osjetljivijom diskretizacijom SN namota dobije se složeniji i zahtjevniji numerički proračun. Pri tome ne treba zaboraviti da magnetski tok ne prodire u željeznu jezgru u prvim trenutcima promatranja sklopne pojave te se sukladno tome zanemaruje utjecaj jezgre na SN namot transformatora. Može se primijetiti prosječno veći iznos početnog prenapona kod izoliranog zvjezdišta za otprilike 20 % do vremena od 50 μs. Unatoč uvedenim zanemarivanjima, karakteristika sklopnog prenapona je prihvatljiva unutar promatranog vremenskog okvira. Ukoliko se želi

preciznije estimirati karakteristika, nužno je razviti blok simulacijskog modela trofaznog dvonamotnog transformatora sa distribuiranim parametrima te izvršiti dodatna simulacijska istraživanja. Na taj način dobivene rezultate istraživanja potom treba usporediti sa prethodnim rezultatima.

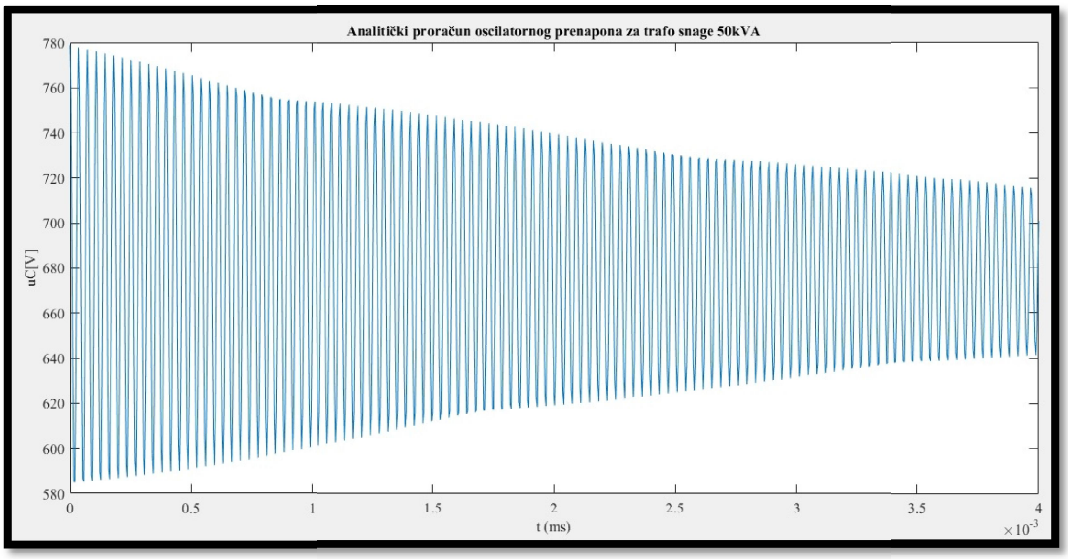
9.1.2. Usporedba razvijenog simulacijskog modela mreže sa analitičkim proračunom pri isklopu radno - induktivnog tereta

Primjenjivost razvijenog simulacijskog modela mreže korištenog za slučaj isklopa radno - induktivnog tereta je verificirana i potvrđena analitičkim proračunom. Analiziran je i verificiran slučaj isklopa radno – induktivnog tereta za tri zasebna distributivna transformatora. Pri tome analitička verifikacija se za sva tri slučaja odvijala u uvjetima jednakih stupnjeva opterećenja te istih faktora snage trošila. Prilikom verifikacije razvijenog simulacijskog modela upotrijebljena je analitička podloga detaljno opisana u poglavlju 2.4.4. Za potrebe analitičkog proračuna kreirana je m – skripta (slika 9.4.) koja uzima u obzir analitičku podlogu opisanu u poglavlju 2.4.4., a kao rezultat prikazuje oblik i maksimalnu faznu vrijednost sklopnog prenapona. Kratki analitički proračuni koncentriranih i nazivnih parametara transformatora te preostali odabrani parametri potrebni za cijeloviti analitički proračun uzeti su u obzir posredstvom posebno razvijene m – skripte (npr. dozemni kapaciteti transformatora i prigušnice). Za potrebe analitičke verifikacije iznose odabranih i proračunatih koncentriranih ulaznih parametara prikazuje tablica 6.2. u poglavlju 7.3.3.

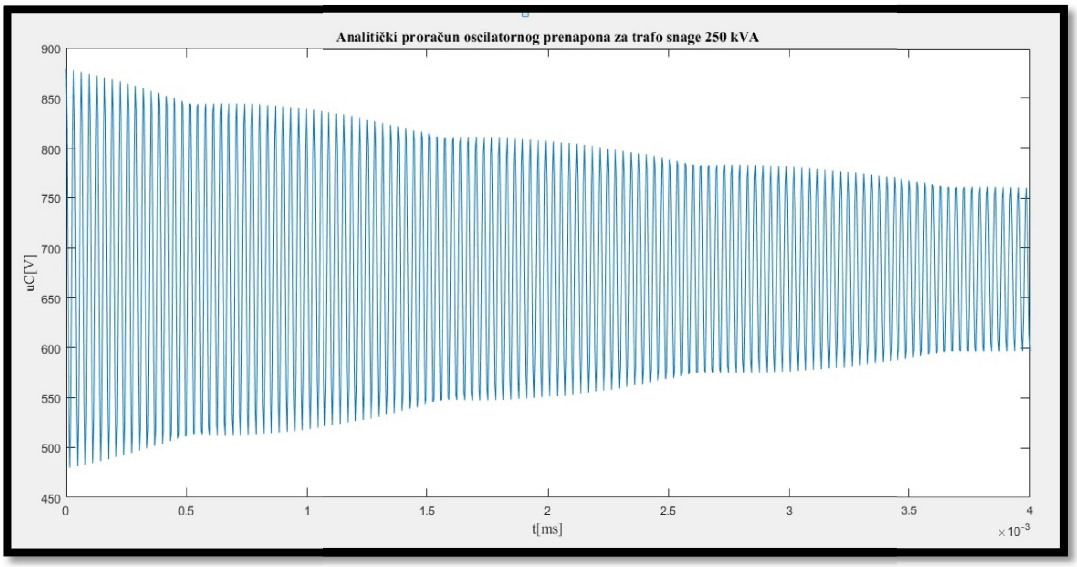


Slika 9.4. Analitički proračun sklopnoga prenapona korišten pri isklopu radno – induktivnoga tereta

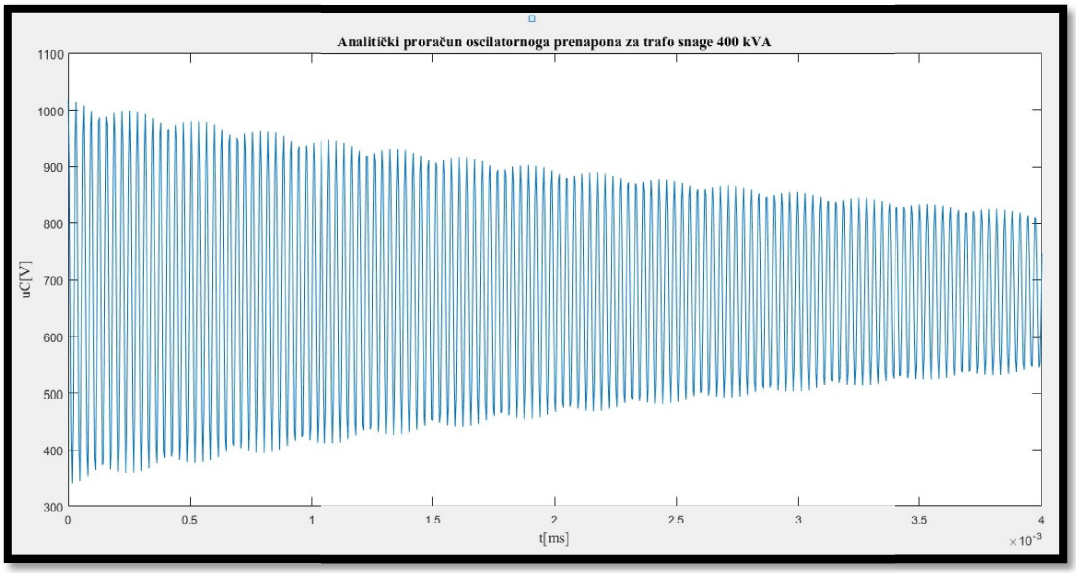
Dobivene karakteristike sklopnog prenapona za sva tri odabrana SN tipa distributivnog transformatora prikazane su na slikama 9.5., 9.6 i 9.7.



Slika 9.5. Analitički odziv sklopnog prenapona faze L1 za transformator snage 50 kVA



Slika 9.6. Analitički odziv sklopnog prenapona faze L1 za transformator snage 250 kVA



Slika 9.7. Analitički odziv sklopnog prenapona faze L1 za transformator snage 400 kVA

Slično kao u prethodnoj evaluaciji korištena je statistička metoda vrednovanja. Tablica 9.3. uspoređuje iznos maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona za najnepovoljniji trenutak isklopa sekundarnog NN prekidača.

Tablica 9.3. Analitički proračunate maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} za slučaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa sekundarnog NN prekidača

S	*U*	U_{max}	K_P
[kVA]	[V]	[V]	[-]
50	339,41	778,82	2,290
250	339,41	878,82	2,586
400	339,41	1018,20	3,003

Tablica 9.4. Statistička metoda vrednovanja maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} za slučaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa sekundarnog NN prekidača

S	U_{max}	U_{max}	*Razlika*
	Analitika	Simulacija	
[kVA]	[V]	[V]	[%]
50	778,82	890,36	12,30
250	878,82	1185,72	25,88
400	1018,20	1505,70	32,37

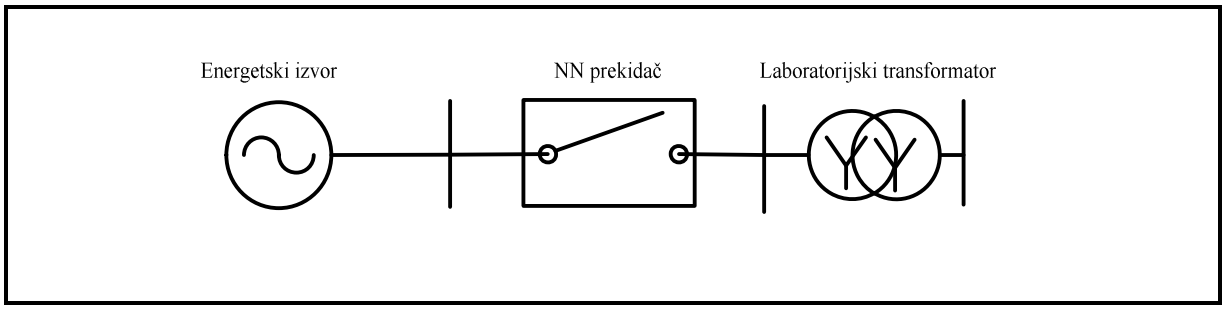
Dobiveni rezultati simulacije isklopa radno - induktivnog tereta vrlo dobro reprezentiraju simulacijski model distributivne mreže. Nešto veća odstupanja maksimalnih faznih vrijednosti napona dobivenih numeričkim proračunom posljedica su isključivo načina

odabira dozemnih kapaciteta transformatora i trošila. Nešto manje utječe odabrana numerička metoda proračuna. Nezanemarivi utjecaj na visinu i karakteristiku sklopnoga prenapona pokazalo se da osim dozemnih kapaciteta imaju i međunamotni kapaciteti između SN i NN namota transformatora. Dobivena nešto veća odstupanja maksimalne vrijednosti faznoga napona od očekivanih vrijednosti posljedica su upravo načina odabira vrijednosti dozemnih, međunamotnih i međufaznih efektivnih kapaciteta. Unatoč uvedenim zanemarivanjima, dobivene karakteristike sklopnoga prenapona su reprezentativne unutar promatranog vremenskog ili frekvencijskog okvira. Ukoliko se želi preciznije simulirati karakteristika sklopnog prenapona, nužno je razviti simulacijski blok model trofaznog dvonamotnog transformatora s distribuiranim parametrima te izvršiti dodatna simulacijska istraživanja. Na taj način dobivene rezultate istraživanja potom treba usporediti sa prethodnim rezultatima.

9.2. Eksperimentalna verifikacija

9.2.1. Usporedba razvijenog simulacijskog modela isklopa neopterećenog laboratorijskoga transformatora sa laboratorijskim fizičkim modelom

U ovome podpoglavlju je prikazana usporedba rezultata numeričkoga proračuna i mjerenja. Verifikacijom simulacijskoga modela mjerenjem, provjerava se da li simulacijski model daje valjane rezultate. Time se simulacijski model potvrđuje ili opovrgava, te se na temelju rezultata mjerenja može optimirati. Provedena je verifikacija s obzirom na iznos maksimalne fazne vrijednosti sklopnoga prenapona s jedne strane i faktora prenapona sa druge strane. Za referentnu vrijednost uzima se rezultat dobiven mjerenjem. Uspoređeni iznosi maksimalne vrijednosti napona su dobiveni za slučajan trenutak isklopa NN prekidača. Na taj način dobiveni rezultati verifikacije pokazuju koliko je odstupanje numeričke vrijednosti maksimalnoga faznoga napona u odnosu na egzaktnu izmjerenu vrijednost. Na kraju ovoga podpoglavlja izvršit će se dodatna usporedba s analitičkim proračunom isklopa neopterećenog transformatora koji je opisan detaljno u podpoglavlju (2.4.4). Cilj ove simulacije je utvrditi maksimalni sklopni prenapon dobiven prilikom isklopa male induktivne struje na primarnoj strani transformatora. Kao i u svim prethodnim sklopnim slučajevima vrijednost maksimalnog faznog napona funkcija je sklopnog trenutka. Faktor prenapona proračunat je za četiri slučajna trenutka isklopa prekidača. Jednofazna mrežna konfiguracija sustava za slučaj isklopa malih induktivnih struja prikazana je na slici 9.8.



Slika 9.8. Jednofazna mrežna konfiguracija sustava za slučaj isklopa malih induktivnih struja

Tablice 9.5 , 9.6. i 9.7. prikazuju vrijednosti direktnih i indirektnih lokalnih varijabli koji su pomoću m - skripti pridijeljeni odgovarajućoj komponenti simulacijskoga blok modela. Konfiguracija simulacijskoga blok modela razvijenog u MATLAB – SimPowerSystemsu je prikazana na slici 9.9.

Tablica 9.5. Konfiguracija za istraživanje primarnog NN kruga transformatora

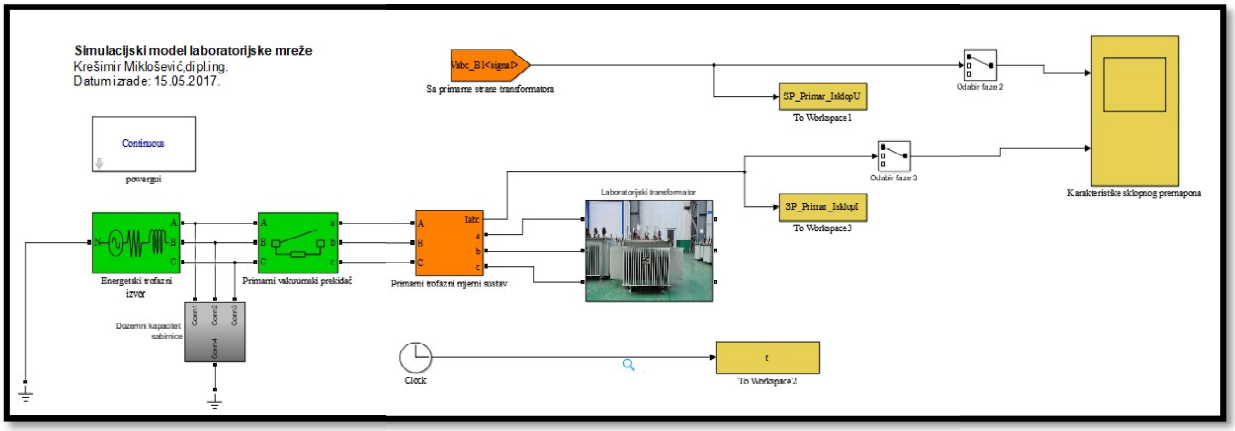
Komponente	**Konfiguracija**
	A
Pogonski napon	400 V
NN prekidač	Laboratorijski NN prekidač
Laboratorijski transformator	4 kVA Izolirano zvjezdište Yy0

Tablica 9.6. Ulazni i proračunati koncentrirani parametri modela komponenti za istraživanje primarnoga NN kruga transformatora

Komponente	**Konfiguracija**
	A
NN prekidač	R_{on} = 0,01 Ω t_{p_uklopa} = 0 ms R_p = 100×10^6 Ω C_P = beskonačno
Laboratorijski transformator	R_1 = 0,363 Ω L_1 = 0,000535719 H R_2 = 0,46137 Ω L_2 = 0,000535719 H R_m = 3376,23971 Ω L_m = 1,0211815 H

Tablica 9. 7. Simetrični ekvivalentni koncentrirani kapaciteti po fazi

Komponente	Konfiguracija
	A
Laboratorijski transformator	C_{p0} = 6,6 nF C_{s0} = 26,75 nF C_{ps1} = 1,39 nF C_{p12} = 0,1 pF C_{s12} = 0,1 pF
Energetski izvor	C_{dozt} = 1,3 nF



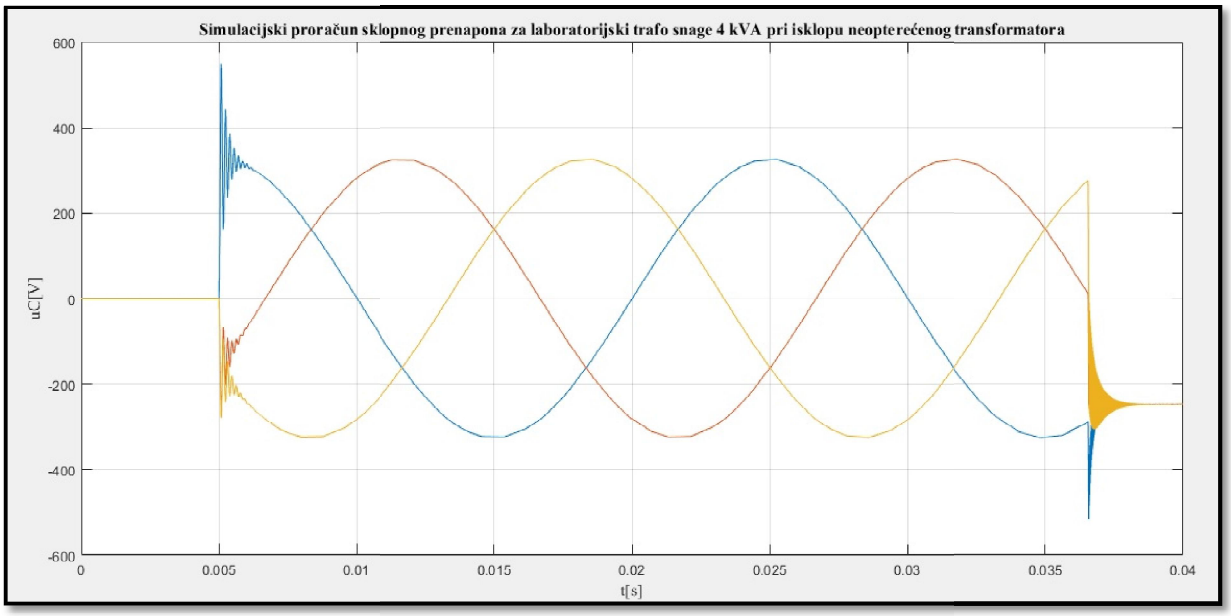
Slika 9.9. Simulacijski model laboratorijske mreže razvijen u Matlab – SimPowerSystemsu

U svrhu dobivanja odgovarajućeg numeričkog rješenja, u tablici 9.8. su prikazani odabrani konfiguracijski parametri simulacije za analizu isklopa neopterećenog transformatora na visinu i oblik karakteristike sklopnog prenapona.

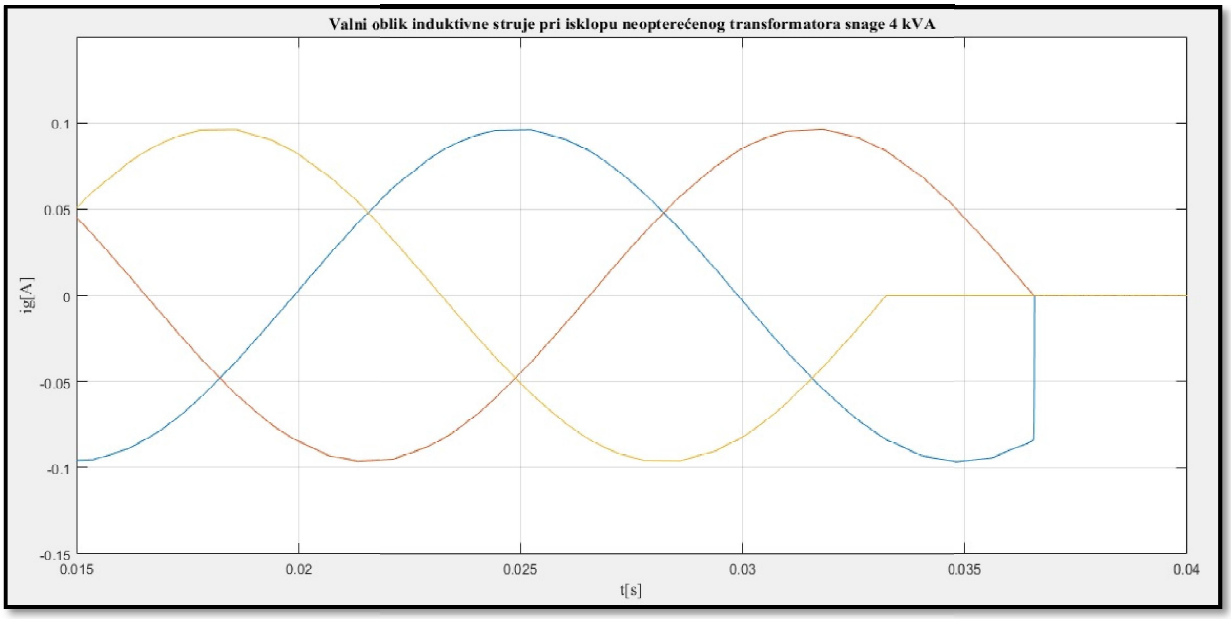
Tablica 9.8. Konfiguracijski parametri simulacije

Konfiguracijski parametri simulacije
Trajanje simulacije: 40 ms
Numerička metoda: Trapezoidna robusna metoda (ode 23tb)
Tip numeričke metode: Varijabilni korak simulacije
Relativna tolerancija: 1 exp(-4)

Karakteristika sklopnog prenapona za slučaj isklopa malih induktivnih struja prikazana je na slici 9.10. Slika 9.11. prikazuje oblik induktivne struje za slučajan trenutak isklopa.



Slika 9.10. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za laboratorijski transformator snage 4 kVA pri isklopu malih induktivnih struja



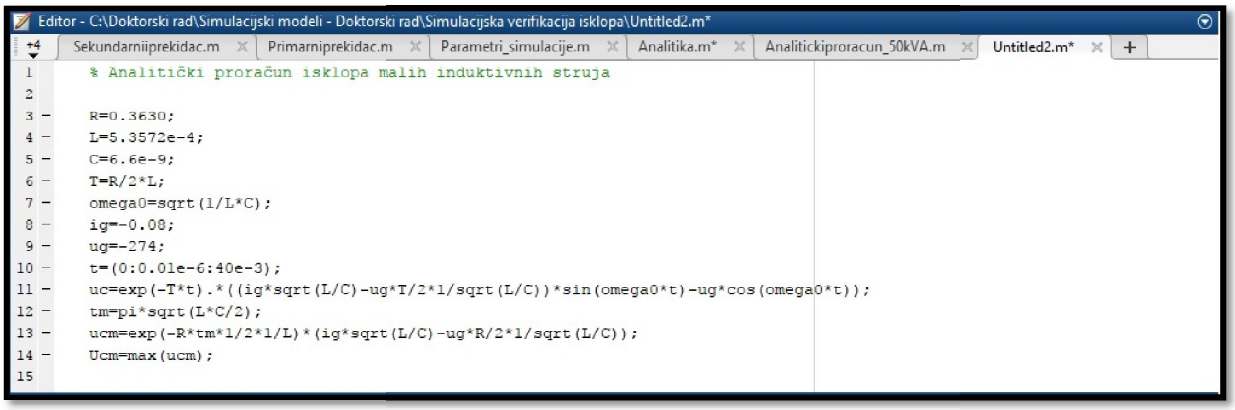
Slika 9.11. Oblik induktivne struje pri isklopu neopterećenog transformatora snage 4 kVA

Tako dobivena karakteristika sklopnog prenapona uspoređena je sa mjernim odzivima dobivenim u poglavlju 7.2. i očitanim vrijednostima u tablici 6.1.3. Vrednovanje i usporedba dobivenih rezultata prikazana je u tablici 9.9.

Tablica 9. 9. Usporedba simulacijskog i analitičkog modela s eksperimentalnim modelom

n	*U*	U_{max}	K_P	*Odstupanje*
[-]	[V]	[V]	[-]	[%]
Eksperimentalni model				
1	310,20	420,00	1,354	11,67 %
2	310,20	430,00	1,386	9,58 %
3	310,20	300,00	0,967	36,92 %
4	310,20	420,00	1,354	11,67 %
		Prosječna pogreška mjerenja:		17,46 %
Simulacijski model				
1	308,20	472,35	1,533	21,16 %
Analitički model				
1	310,20	274,00	1,183	- 6,95 %

Na kraju treba kratkom evaluacijom dodatno potvrditi ili opovrgnuti da li odabrani simulacijski model posjeduje dovoljnu kvalitetu kako bi bio primjenjiv za proračune na drugim sličnim simulacijskim konfiguracijama. Tijekom postupka evaluacije prikupljeni ulazni analitički i numerički podaci se statistički obrade nakon čega se daje procijena pogreške. Statistička pogreška se zatim uspoređuje s unaprijed zadanim analitičkim ciljevima. Prilikom analitičke verifikacije razvijenog simulacijskog modela upotrijebljena je analitička podloga detaljno opisana u poglavlju 2.4.3. Za potrebe analitičkog proračuna kreirana je m – skripta (slika 9.12.) koja uzima u obzir analitičku podlogu opisanu u poglavlju 2.4.3., a kao rezultat prikazuje maksimalnu faznu vrijednost sklopnog prenapona. Vrijednosti koncentriranih parametara transformatora potrebnih za analitički proračun uzeti su u obzir posredstvom iste m – skripte (npr. ukupan kapacitet i otpor petlje). Iznosi trenutno prekinute induktivne struje i_g i napona u_g jednoznačno su određeni slikama 9.10 i 9.11. Za potrebe izračuna maksimalnog faznog napona korišten je analitički izraz prikazan pod rednim brojem (2-35).



Slika 9.12. Proračun maksimalnog prenapona korišten pri isklopu male induktivne struje

U ovom se pogonskom slučaju radi o prekidanju malih induktivnih struja neopterećenoga transformatora. Prekidanje znatno napreže sklopne aparate jer se na njima javlja visoki povratni napon. Naime, zbog male energije kruga luk se gasi prije prolaska struje kroz nulu. To se vidi na slici 9.11. gdje struja rezanja od neke trenutne vrijednosti *ig* brzo pada na nulu. Trenutna promjena struje prouzrokuje sklopni prenapon u strujnom krugu (vidi sliku 9.10.). Porast napona na kapacitetu će biti to veći i brži što je veća struja gašenja električnog luka. Maksimalan iznos sklopnog prenapona ovisi o ukupnom induktivitetu i kapacitetu primarnog NN kruga laboratorijskog transformatora. U ekstremnim uvjetima maksimalan iznos sklopnog prenapona može poprimiti visoke vrijednosti te izazvati povratni napon na prekidaču koji je rezultat superpozicije prenapona i napona izvora. Dobivena nešto veća odstupanja maksimalne vrijednosti faznog napona od očekivanih vrijednosti (oko 36 %) posljedica su upravo načina odabira vrijednosti dozemnih, međunamotnih i međufaznih efektivnih kapaciteta laboratorijskog ispitnog transformatora.

10. Zaključak

Sklopni prenaponi u elektroenergetskim mrežama su neizbježni pratilac raznih događanja kao što je isklop neopterećenog transformatora, isklop realnog tereta, uklop sklopnih aparata u normalnim ili havarijskim uvjetima, razni kratki spojevi ili naglo rasterećenje transformatora. U tim situacijama generiraju se sklopni prenaponi koji dovode do maksimalnih naprezanja, što u najvećoj mjeri utječe na pouzdanost rada opreme i postrojenja u cjelini. Mogu poprimiti takve iznose koje pak dovode do oštećenja niskonaponske mjerne opreme i izolacije transformatora ukoliko se na vrijeme ne prepoznaju.

Doktorska disertacija temelji se na analitičkom, simulacijskom i eksperimentalnom pristupu. Polazište analitičkog istraživanja početne raspodjele sklopnoga prenapona uzduž VN namota transformatora, isklopa realnog tereta i isklopa male induktivne struje je spoznaja da različite sklopne manipulacije imaju za posljedicu stvaranje visokofrekvencijskih prijelaznih pojava na priključnicama VF modela transformatora. Frekvencija sklopnog prenapona ovisi o parametrima promatranog kruga u kojima sklopni prenapon nastaje. To su vrijednosti od nekoliko kHz pa do nekoliko desetaka MHz ovisno o prirodi nastanka sklopnog prenapona. Po svemu sudeći najdominantniji parametri koji najviše utječu na karakteristiku sklopnog prenapona su koncentrirani dozemni, međunamotni i međufazni kapaciteti. Maksimalne vrijednosti faznog napona u najnepovoljnijim trenutcima isklopa radno – induktivnoga opterećenja mogu poprimiti takve vrijednosti koje su i do četiri puta veće od nominalnog faznog napona ovisno o konfiguraciji analizirane mreže te trenutku isklopa prekidača sa druge strane. Štoviše, promjena faktora snage i stupnja opterećenja faktor prenapona dodatno podiže. Na razvijenoj simulacijskoj mreži provedene su zasebne analize za najnepovoljniji trenutak isklopa prekidača. Primjerice, detaljno su analizirani simulacijski sklopni događaji: uklop izoliranog i direktno uzemljenog SN namota, isklop realnog tereta te isklop male induktivne struje. Simulacijski su ispitani utjecaji povećanja nazivne snage distributivnih transformatora na iznos i oblik karakteristike sklopnog prenapona. Dodatno su simulirani utjecaji promjene duljine sekundarnog voda transformatora te promjene faktora snage i stupnja opterećenja na oblik i iznos karakteristike sklopnog prenapona. Također je analiziran utjecaj promjene poprečnog i uzdužnog kapaciteta SN namota transformatora na oblik karakteristike početne raspodjele prenapona. Tako su provedene simulacije utjecaja načina uzemljenja i vrste sklopnih pobuda na oblik početne raspodjele sklopnog prenapona. Između ostaloga, razvijeni simulacijski model omogućava generiranje standardnih vrsta pobuda s ciljem ispitivanja utjecaja na početnu raspodjelu sklopnog prenapona u namotu

transformatora. Model omogućava praćenje brzine prostiranja sklopnog vala unutar primarnog SN namota. Potrebno je na odgovarajući način spojiti karakterističnu ispitnu sklopnu pobude s ciljem analize utjecaja na brzinu i oblik prodora vala duž SN namota. Korišteni simulacijski pristup daje brzu procjenu otpornosti namota na karakteristični prenapon. Numeričkim proračunom svojstvenih vrijednosti vektora napona čvorova namota koji ujedno predstavljaju maksimalne fazne napone prema zemlji olakšava se relativna usporedba otpornosti distributivnih transformatora na prenapone. S ciljem predviđanja brzine i oblika početne raspodjele sklopnoga prenapona, analiziran je utjecaj promjene omjera međunamotnog i dozemnoga kapaciteta na oblik početne raspodjele sklopnoga prenapona u uzemljenom i izoliranom namotu VF modela transformatora. Utjecaj željezne jezgre je zanemaren zbog frekvencijskog spektra sklopnog prenapona.

Štoviše, za slučaj laboratorijskoga transformatora snage 4 kVA izmjeren je oblik karakteristike sklopnog prenapona u laboratorijskim uvjetima. Iz dobivenih mjerenja isklopa malih induktivnih struja može se identificirati iznos i oblik karakteristike sklopnog prenapona. Maksimalna fazna vrijednost sklopnog prenapona dobije se pri 2. slučajnom trenutku isklopa neopterećenog transformatora. Faktor prenapona poprima vrijednost 1,386. Oblik dobivene karakteristike je impulsnog oblika s kratkim vremenom opadanja. Stoga, u okviru doktorske disertacije predlaže se mjerni sustav za snimanje sklopnih prenapona. Dodatni doprinos doktorske disertacije je kreiranje realnog mjernog sustava za mjerenje sklopnih prenapona dobivenih isklopom laboratorijskog neopterećenog transformatora.

Također, za bilo koju konfiguraciju primarnog i sekundarnog kruga distributivnog transformatora moguće je implementirati simulacijske scenarije koji su uvjetovani različitim tipovima sklopnih slučajeva. Dan je prijedlog razvojne strukture grafičkog korisničkog sučelja simulirane mreže za analizu osjetljivosti različitih utjecaja na visinu i trajanje sklopnog prenapona. Opisane su prednosti i mogućnosti daljnje nadogradnje grafičkog korisničkog sučelja u analizi prijelaznih pojava s naznakom na primjenu u energetskim mrežama. U doktorskoj disertaciji je osmišljena svrhovita baza proračunatih koncetriranih podataka za inicijalizaciju ulaznih parametara u VF model energetskih transformatora. Korišteni simulacijski model za potrebe doktorske disertacije omogućavaju uklop / isklop VF modela transformatora u najnepovoljnijem trenutku kako bi se mogla odrediti najveća moguća maksimalna fazna vrijednost prenapona koja se može pojaviti na priključnicama ispitivanog transformatora. Grafičko sučelje omogućava praćenje oblika i brzine sklopnog prenapona duž primarne i sekundarne strane VF modela transformatora. VF simulacijski modeli su izgrađeni s ciljem da se omogući ispitivanje trofaznih VF modela transformatora za različite naponske

razine i različite načine utjecaja uzemljenja transformatora. Grafičko sučelje za početnu raspodjelu prenapona omogućava prikaz raspodjele prenapona duž SN namota. S druge pak strane omogućava mijenjanje trenutka uklopa / isklopa prekidača s ciljem predlaganja mjera za smanjenje negativnih utjecaja pojave sklopnih prenapona. Najčešća mjera koja se u novije vrijeme koristi je kontrolirano simultano sklapanje prekidača. U doktorskoj disertaciji predložene su mjere i aktivnosti koje je moguće poduzeti da bi se smanjio utjecaj brzine prekida struje prekidača na visinu sklopnog prenapona. Za detaljniju analizu karakteristike sklopnih prenapona koriste se algoritmi razvijeni u Matlabovom programskom jeziku. Svakom simulacijskom blok modelu pripadni proračunati koncentrirani podatci se pridjeljuju pomoću Matlabovih m - skripti ili m - funkcija. Da bi se to ostvarilo korištena je baza podataka proračunatih koncetriranih parametara. Doktorska disertacija sadržava opis izrade, opis programske strukture te opis funkcija korištenih u aplikaciji.

Iz dobivenih rezultata simulacije utjecaja promjene omjera ukupnoga poprečnoga i uzdužnoga kapaciteta VF modela namota transformatora na oblik karakteristike početne raspodjele sklopnog prenapona vidi se da naprezanje unutar distributivnog transformatora (nazivne snage 50 kVA) raste s povećanjem poprečnog kapaciteta prema zemlji, odnosno pada sa većim serijskim kapacitetom svitka. Promjena razmaka između namota kao mjera smanjenja sklopnoga prenapona dovodi do skupljeg transformatora. Sklopna pojava će biti intenzivnija što je razlika između početne i konačne raspodjele prenapona veća. Dakle, omjer nadomjesnog koeficijenta potrebno je mjenjati u smjeru što manje vrijednosti. Potrebno je povećati ukupni uzdužni kapacitet namota. Kapacitete prema zemlji je potrebno kompenzirati do te mjere da ih se poništi. To se postiže konstrukcijom dodatnih SN namota. Moraju biti tako izvedeni da povećaju ukupni uzdužni dio kapaciteta. Najčešće se koriste koncentrični namoti sastavljenom od niza slojeva gdje kapaciteti između slojeva znatno premašuju kapacitet prema zemlji te se time smanjuje omjer uzdužnih i poprečnih kapaciteta SN namota. Najčešće se koriste isprepleteni, interpolirani namoti, namoti s pasivnim vodičima ili namoti bez radijalnih kanala. Navedene konfiguracije SN pridodanih namota povećavaju serijski kapacitet. Ovakva izvedba pokazala se prihvatljivim rješenjem. Kao testni prenapon korišten je standardni ispitni prenapon sljedećih karakteristika U_m = 75 kV, 1,2 / 50 μs. Utjecaj pridodanih SN kompenzacijskih namota na početnu i konačnu raspodjelu sklopnih prenapona unutar distributivnog transformatora nadilazi temu doktorske disertacije. Ako se promatra samo granični slučaj na transformatoru (50 kVA, 10 / 0,4 kV) s uzemljenim zvjezdištem vrijednost napona je jednaka linearnoj raspodjeli napona u stacionarnom stanju, za razliku od izoliranoga zvjezdišta na kojem postoji linijski napon mreže. Usporede li se svi simulirani

podslučajevi za transformator snage 50 kVA može se vidjeti da je u početnom trenutku vrijednost prenapona na priključnim stezaljkama transformatora za slučaj uzemljenog i izoliranog zvjezdišta praktički jednaka. Pokazalo se da je razlika jedino u brzini promjene prenapona. Simulacije su dalje pokazale da je brzina promjene prenapona izraženija kod izoliranog zvijezdišta. Kao testni prenapon korišten je standardni ispitni prenapon sljedećih karakteristika U_m = 75 kV, 1,2 / 50 μs.

Iz dobivenih rezultata simulacije utjecaja načina uzemljenja SN namota transformatora može se vidjeti da je kod izoliranog namota početna raspodjela sklopnog prenapona nešto izraženija nego kod transformatora s uzemljenim zvjezdištem. U slučaju kada je nadomjesni koeficijent veći ili jednak 3 početne se raspodjele u uzemljenom i izoliranom namotu praktički ne razlikuju. Projektiranjem pridodanog kompenzacijskoga SN namota moguće je negativne učinke sklopnog prenapona u slučaju izoliranog namota neutralizirati.

Iz dobivenih rezultata utjecaja vrste testne pobude na oblik karakterisitike početne raspodjele sklopnoga prenapona vidi se da je početna raspodjela prenapona u transformatoru u slučaju izoliranog namota jednaka kao kod transformatora s uzemljenim zvjezdištem. Brzina opadanja početnog prenapona je kod sklopne pobude U_m = 75 kV, 250 / 2000 μs nešto povoljnija. Može se također opaziti da je najveći početni napon na ulaznom djelu namota za slučaj step pobude U_m = 75 kV. Brzina opadanja početnog prenapona kod impulsne pobude oblika U_m = 75 kV, 1,2 / 50 μs je između step i sklopne pobude. Također vidimo da ukoliko je nadomjesni koeficijent veći od 4 početne se raspodjele u uzemljenom i izoliranom namotu praktički preklapaju.

Iz dobivenih rezultata utjecaja promjene koeficijenta α na oblik karakterisitike raspodjele sklopnog prenapona vidi se da do proboja izolacije SN namota može doći na bilo kojem mjestu u namotu ili svitku odnosno zavoju. Može se također vidjeti da strmina vala povećava visokofrekvencijske oscilacije dok duljina hrpta pridonosi niskofrekventnim oscilacijama. Postignuta naponska razina prenapona ovisi o omjeru uzdužnog i poprečnog kapaciteta s jedne strane te induktiviteta namota sa druge strane. Štoviše, u slučaju izoliranog zvjezdišta sklopni prenapon je snažniji. Najveći maksimalni fazni prenapon se može pojaviti na bilo kojem mjestu u namotu. Simulacije su pokazale da se karakteristike oscilacija za različite načine spoja zvjezdišta razlikuju po veličini gradijenta napona i trenutka postizanja prve maksimalne vrijednosti prenapona. U slučajevima s uzemljenim zvjezdištem prvi maksimum se postiže neposredno nakon početne raspodjele i događa se na samom početku sklopne pojave. U slučajevima s izoliranim zvjezdištem prvi maksimum se postiže otprilike u prvoj poluperiodi titranja. Najnepovoljnija raspodjela prenapona se dobije prilikom impulsne testne

pobude. Doktorska disertacija ne uzima u obzir modele prigušenja namota jer po svemu sudeći nisu presudni za raspodjelu sklopnoga prenapona. Prigušenja s obzirom na brzinu promjene sklopnoga prenapona imaju minoran učinak te se mogu zanemariti. Posljedica su gubitaka nastalih u djelatnim otporima izolacije i ostalim vodljivim djelovima.

Iz dobivenih rezultata utjecaja promjene nazivne snage transformatora za slučaj isklopa tereta pokazalo se da glavni magnetski tok nema nikakvog utjecaja na karakteristiku sklopnog prenapona. Doista, što je promatrani sklopni prenapon brži to se utjecaj petlje histereze može više zanemariti. Nadalje, može se također vidjeti da su rasipni tokovi i električne veze između namota iste faze, električne veze između namota različitih faza te električne veze prema zemlji najznačajniji ulazni parametri VF modela trofaznoga dvonamotnog modela transformatora. Međufazne električne veze SN i NN modela namota transformatora, ukoliko se promatra samo prva faza, mogu se zanemariti čime se pojednostavljuje VF simulacijski model transformatora. Najveći faktor prenapona dobije se za transformator snage 400 kVA i iznosi 4,413. Kod preostalih simuliranih distributivnih transformatora nižih snaga, faktori prenapona su osjetno manji.

Iz dobivenih rezultata utjecaja promjene stupnja opterećenja i faktora snage za tri različita transformatora za slučaj isklopa radno – induktivnog tereta pokazalo se da će faktor prenapona biti još veći ukoliko se smanjuje faktor snage trošila. Nešto izraženiji maksimalni fazni naponi su kod promjene stupnja opterećenja realnog tereta. Na svakom transformatoru napravljena je zasebna simulacija. Za prvi tip simulacije faktor snage radno – induktivnog tereta se mijenjao u rasponu od 0,50 do 0,86. Drugi tip simulacije napravljen je uz promjenu stupnja opterećenja radno – induktivnog tereta. Stupanj opterećenja se mijenjao u granicama od 50 % do 92 % nazivne prividne snage. Vrijednosti nadomjesnih efektivnih kapaciteta transformatora korišteni za potrebe doktorske disertacije su preuzeti iz dostupne znanstvene i stručne literature. Štoviše, poznati su isključivo rasponi vrijednosti s obzirom na pogonsku snagu ili napon. Iz tog razloga doktorska disertacija koristi metodu varijacije vrijednosti dozemnih i međunamotnih efektivnih kapaciteta s ciljem analiziranja utjecaja na iznos maksimalne fazne vrijednosti prenapona. Osim toga pokazalo se da metodom varijacije za razliku od rasipnih induktiviteta, glavni induktivitet transformatora nema nikakvog utjecaja na karakteristiku sklopnog prenapona u MHz području.

Iz dobivenih rezultata utjecaja promjene duljine NN voda za transformator snage 400 kVA, (10 / 0,4 kV, spoj Yyn5) u slučaju isklopa nazivno opterećenog realnog tereta generirat će se sklopni prenapon u vrlo kratkome vremenu. Postojanje NN voda na sekundarnoj strani u slučaju najnepovoljnijeg isklopa prekidača prouzokovat će veću vrijednost maksimalnog

faznog napona nego slučaj bez NN voda. Provedenim simulacijskim istraživanjem vidi se da što je sekundarni NN vod kraći to je maksimalna fazna vrijednost napona manja. Najveća maksimalna vrijednost napona iznosi 1426,70 V i dobije se pri dužini sekundarnog NN od 1 km. Povećanju maksimalnog napona primjenom metode varijacije najviše je pridonio dozemni kapacitet kratkog NN voda.

Doktorskom disertacijom provedena je evaluacija metodom usporedbe simulacijskog modela SN namota za početnu raspodjelu s analitičkim proračunom početne raspodjele sklopnog prenapona za slučaj uzemljenog zvjezdišta. Nadalje, provedena je evaluacija metodom usporedbe razvijenog simulacijskog modela mreže sa analitičkim proračunom pri isklopu realnog tereta. Na kraju je dana eksperimentalna verifikacija laboratorijskog modela mreže isklopa neopterećenog transformatora s laboratorijskim mjerenjem. Metoda vrednovanja laboratorijskog modela osmišljena je na temelju usporedbe s rezultatima simulacije i rezultatima analitičkog proračuna. Za referentnu vrijednost uzima se rezultat dobiven mjerenjem. U sva tri slučaja evaluacije uspoređeni su iznosi maksimalne vrijednosti napona nastali u najnepovoljnijem trenutku isklopa NN prekidača. Na taj način dobiveni rezultati verifikacije pokazuju koliko je odstupanje analitičke ili numeričke vrijednosti maksimalnog faznoga napona u odnosu na egzaktnu izmjerenu vrijednost.

Simulacijski model početne raspodjele sklopnog prenapona u odnosu na analitički model prema provedenoj evaluaciji predstavlja dobru reprezentaciju simulacijskog modela namota distributivnog transformatora s distribuiranim parametrima. Dobivene maksimalne fazne vrijednosti prenapona u početnom trenutku sklopne pojave sa dosta dobrom točnošću se preklapaju s proračunatim analitičkim modelom (11%). Rezultati dobiveni simulacijskim pristupom pokazuju nešto manje odstupanje (6%). Može se primijetiti prosječno veći iznos početnog prenapona kod izoliranog zvjezdišta za otprilike 20 % do vremena od 50 μs. Unatoč uvedenim zanemarivanjima, karakteristika sklopnog prenapona je prihvatljiva unutar promatranog vremenskog okvira. Sva odstupanja su ispod 40 % što je prema dostupnoj literaturi najveće moguće odstupanje analitičkih metoda proračuna u odnosu na rezultate dobivene mjerenjem ili simulacijom.

Simulacijski model testne mreže u odnosu na analitički model prema provedenoj evaluaciji predstavljaju dobru reprezentaciju simulacijskog modela testne mreže. Nešto veća odstupanja maksimalnih faznih vrijednosti napona dobivenih numeričkim proračunom posljedica su isključivo načina odabira dozemnih kapaciteta transformatora i trošila. Nešto manje utječe odabrana numerička metoda proračuna. Nezanemarivi utjecaj na visinu i karakteristiku sklopnog prenapona pokazalo se da osim dozemnih kapaciteta imaju i

međunamotni kapaciteti između SN i NN namota transformatora. Statistička metoda vrednovanja za ovaj slučaj pokazuje da maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} za slučaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa sekundarnog NN prekidača odstupaju 32,37 %. Pri nazivnim snagama od 50 kVA i 250 kVA odstupanja su 12 % odnosno 23,2 %.

Treći način vrednovanja simulacijskog modela za analizu sklopnog prenapona je usporedba s rezultatima dobivenim mjerenjem na laboratorijskom transformatoru snage 4 kVA (400 / 400 V, spoj : Yyn0). Mogućnosti i način snimanja karakteristike sklopnog prenapona opisan je u poglavlju 7.1. Usporedbom rezultata dobivenih simulacijom i rezultata dobivenih mjerenjem dobije se pogreška od 21,16 %. Ako se uzme u obzir da analitičke metode imaju moguće odstupanja od (± 40 %) te, ako se zanemari slučaj 3. slučajnog isklopa transformatora, odstupanje se dobije kod analitičkog proračuna u iznosu od -6,95 %.

Razvijeni VF modeli transformatora te proračunate baze ulaznih koncentriranih parametara koji su nastali u okviru doktorske disertacije poslužit će daljnjim istraživanjima. Između ostalog analizirat će se učinak odrezanog standardnog udarnog prenapona koji je posljedica prorade odvodnika prenapona na raspodjelu sklopnog prenapona na priključnicama transformatora. Pri tome je potrebno poznavati nelinearnu karakteristiku odvodnika prenapona. Trenutak prorade odvodnika prenapona u kombinaciji s njegovom karakteristikom jednoznačno određuje oblik odrezanog standardnog udarnog prenapona. Na taj način dobivena raspodjela punog i odrezanog prenapona u namotima transformatora uvelike ovisi o utjecaju međufaznih, međunamotnih, dozemnih kapaciteta te rasipnih induktiviteta. Koji će dominatni element prevagnuti ovisi o frekvenciji sklopne oscilacije. Rezultate istraživanja u obliku trenutka nastanka prvog maksimuma i vrijednost maksimalnog faznog napona u tom trenutku poželjno je usporediti s pokazateljima dobivenim pri punom standardnom udarnom prenaponu. Jednom razvijeni simulacijski model može se dalje jednostavno nadograđivati i koristiti da bi se što preciznije razjasnio rizik od pojave sklopnih prenapona pri određenoj topologiji primarnog SN i sekundarnog NN kruga. Odluku o tome koju mjeru primijeniti u svrhu zaštite od sklopnog prenapona ovisit će o simuliranim vrijednostima. Model koji je razvijen za potrebe doktorske disertacije može za određenu konfiguraciju kruga opterećenja pomoći u predviđanju tih očekivanih vrijednosti. Po svemu sudeći određene grupe spoja transformatora imaju značajan utjecaj na zaštitu sekundarnog kruga opterećenja. U narednim istraživanja to će se uzeti u obzir. Utjecaj različitih metoda i tehnika isklopa prekidača također će se detaljnije istražiti. Često se u različitim primjenama kada se radi s radno – induktivnim opterećenjima umjesto električnoga voda koristi električni kabel s ciljem povećanja pouzdanosti NN kruga transformatora. Simulacijski model kabela se može vrlo jednostavno

spojiti na novu topologiju NN kruga opterećenja te na taj način simulirati utjecaj na oblik i karakteristiku sklopnog prenapona. U takvim slučajevima, dozemni kapaciteti kabela zbog svoje nešto izraženije kapacitivne komponente mogu utjecati na visinu sklopnog prenapona. Usporedbom nove konfiguracije s provedenim prethodnim simulacijskim istraživanjem može se utvrditi na koji način kabel utječe na karakteristiku sklopnog prenapona. Nadalje, navedena simulacija će razjasniti rizik od pojave sklopnih prenapona u odnosu na standardne konfiguracije NN kruga opterećenja.

Popis literature

[1] Mik A.; Babić M.; Delimar M.; Meštrović K.; Šojat Z. (2011): *Influence of the Overvoltages on the Low Voltage Electronic Equipment in the 400 kV Switchgear*, 10 savjetovanje HRO CIGRE, Cavtat, 2011.

[2] Poljak M. (1999): *Transient Overvoltages in the Instrument Transformers Secundary Circuits*, 4. savjetovanje CRO CIGRE, Cavtat, 1999.

[3] Bollen M.; Yu-Hua Gou I. (2007): *On the Analysis of Voltage and Current Transients in Three-Phase Power Systems*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 2, No. 22, pp. 1194-1202, April 2007.

[4] Florkowski M.; Furgal J.; Piotr P. (2012): *Analysis of Fast Transient Voltage Distributions in Transformer Windings under Different Insulation Conditions,* IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, No. 6, pp. 1991-1998, 2012.

[5] Popov M.; Van Der Sluis L.; Paap G. C.; De Herdt H. (2005): *Computation of Very Fast Transient Overvoltages in Transformer Windings*, International Conference on Power Systems, Montreal, 2005.

[6] Popov M.; Van Der Sluiss L.; Smeets S. M. (2007): *Complete analysis of Very Fast Transients in Layer-type Transformer Windings*, International Conference on Power Systems Transients, Lyon, 2007.

[7] Skueltic S.; Radulovic V. (2004): *Possibility for Fast and Easy Calculations and Analysis of Switching Overvoltages*, Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International, Bristol, 2004.

[8] *Shunt Capacitors Bank Switching Transients,* A Tutorial and Case Study, 2008.

[9] De Leon F.; Semlyen A. (1994): *Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients*, *IEEE Transactions on Power Delivery,* br. 9, pp. 231-239, January 1994.

[10] Belin B. (1978): *Uvod u teoriju električnih sklopnih aparata*, Školska knjiga, Zagreb, 1978, p. 299.

[11] Bollen M.; Styvaktakis E.; Gu I. (2005): *Categorization and Analysis of Power System*

Transients, IEEE Transactions on Power Delivery, br. 20, pp. 2298-2306, 2005.

[12] Furčić M.; Maras I.; Mik A. (2009): *High Voltage Switchgear Bay Monitoring System - Development*, Mounting, Trial Operation, 9. savjetovanje CRO CIGRE, Cavtat, 2009.

[13] Kiusalaas J. (2005): *Numerical Methods in Engineering with Matlab*, Cambridge University Press, New York, p. 435., 2005.

[14] Moor H. (2012): *MATLAB for Engineers-Third Edition*, New Jearsey: Pearson Education, p. 732., 2012.

[15] De Leon F.; Semlyen A. (1992): *Reduced Order Model for Transformer Transients*, Transactions on Power Delivery, br. 7, pp. 361-370, January 1992.

[16] Shinohara Y.; Fukui K.; Nomoto S.; Matsubara H. (2008): *Measurement of Switching Overvoltages at Substations and on Transmission Lines in Extra High Voltage Systems*, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, 2008.

[17] Schweitzer E.; Togawa K.; Schloesser T.; Monti A. (2015): *A Matlab GUI for the Generation of Distribution Grid Models*, International ETG Congress 2015, Die Energiewende - Blueprints for the New Energy Age, Bonn, 2015.

[18] Yu D. C.; Jamal N.; Wenbiao W.; Zang X. G.; Brandt J. R. (1994): *A Graphical User Interface for Design*, *Simulation and Analysis of Power Plant Electrical Auxiliary Systems,* IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 2, pp. 263-270, 1994.

[19] Griscom S. B.; Skoglund S. W.; Hileman A. R. (1958): *Analytical Studies of Overvoltages Caused by Disconnecting-Switch Operation*, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III: Power Apparatus and Systems, Vol. 78, No. 3, pp. 833-838, 1958.

[20] Kelemen T. (1995): *Tehnička enciklopedija*, Školska knjiga, 1995.

[21] Komen V. (2012): *Tehničke mjere sigurnosti u izvedbi elektroenergetskih postrojenja, dalekovoda i instalacija*, Zagreb, 2012.

[22] Garzon D. E. (2002): *High Voltage Circuit breakers*, Marcel Deker Inc., New York, 2002.

[23] Savić M. S. (2004): *Visokonaponski rasklopni aparati*, Akademska misao, Beograd, p. 281., 2004.

[24] Dugan R. C.; McGranaghan M. F.; Beaty H. W. (1996): *Electric Power System Quality*, McGraw-Hill, New York, 1996.

[25] Keyhani A.; Tsai H.; Sebo S. (1989): *Modelling and Parameter Estimation of Power Transformers for the Study of High Frequency System Transients*, Circuits and Systems, Proceedings of the 32nd Midwest Symposium, Chanpaign, 1989.

[26] Berth M.; Kung L.; Limbek E. (2001): *Switching Overvoltages in Motor Circuits*, IEEE Transcations on Industry Applications, Vol. 37, No. 6, pp. 1582-1589, 2001.

[27] Maljkovic Z.; Gasparac I.; Mirosevic M. (2015): *Overvoltages and Power Oscillations in Hydro Generators*, Clean Electrical Power (ICCEP), 2015 International Conference, Taormina, 2015.

[28] Šimić J.; Meštrović K.; Tičinović S. (2001): *Electromagnetic Compability of Electronic and Power Equipment in HPP Zakučac*, 5. savjetovanje CRO CIGRE, Cavtat, 2001.

[29] Shipp D. D.; Dionise T. J.; Lorch V.; MacFarlane B. G. (2011): *Transformer Failure Due to Circuit-Breaker-Induced Switching Transients*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, pp. 707-718, 2011.

[30] Shipp D. D.; Dionise T. J.; Lorch V. (2013): *Transformer Failure Due to Circuit Breaker Induced Switching Transients Appplicable to the Cement Industry*, 2013 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference, Orlando, 2013.

[31] Mitra P.; Ghosh A.; Ghosh S.; De A.; Chakrabarti A. (2012): *Analysis of Harmonics in Switching Transients of an Integrated Steel Plant - A Case Study*, Kochi, 2012.

[32] Guardado J. L.; Venegas V.; Melgoza E., Cornick K. J.; Naredo J. L. (1999): *Transient Overvoltages in Electrical Motors During Sequential Pole Closure*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp. 1057-1064, 1999.

[33] Assala P. D.; Chen H.; Ji T. (2013): *Power System Overvoltage Detection Based on a Morphological Filtering Algorithm*, 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancuver, 2013.

[34] Meštrović K. (2001): *High Voltage Switching Equipment State of Art and Development Trends in the World*, 5. savjetovanje CRO CIGRE, Cavtat, 2001.

[35] *IEC standardi* (2005), 6.-3. I. 60071-1/1, 2005.

[36] Kelemena I. (1996): *Enciklopedija*, Školska knjiga, 1996.

[37] Martinez J. A.; Goldsworthy D.; Horton R. (2014): *Switching Overvoltage Measurements and Simulations-Part I: Field Test Overvoltage Measurements*, IEEE Transactions Power Delivery, pp. 1-8, 2014.

[38] McDermit D.; Shipp D. D.; Dionise T. J.; Lorech V. (2012): *Medium Voltage Switching Transient Induced Potential Transformer Failures; Prediction, Measurement and*

Practical Solutions, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32, No. 3, p. 11, 2012.

[39] Uglešić I. (2016): *Prenaponi u prijenosnim mrežama,* FER - Prezentacije sa predavanja, Zagreb, 2016.

[40] Meštrović K.; Poljak M.; Šimić J.; Baronica D.; Gardijan R.; Gazivoda S.; Gross S.; Tičinović S.; Mandić M.; Marušić I. (2001): *Measuring of the Switching Overvoltages in 110 and 220 kV Switchgear in HE Zakučac*, Peto savjetovanje, Cavtat, 2001.

[41] Balaž Z.; Lucić R.; Vujević S. (2008): *Problems Associated With Power Supply of Sveti Rok Tunel*, 1. savjetovanje, Šibenik, 2008.

[42] Tectra d.d., www.tectra.hr., [Datum pristupanja: 21. kolovoz 2016.]

[43] Končar d.d., www.koncar.hr., [Datum pristupanja: 21. kolovoz 2016.]

[44] Malewski R.; Poulin B. (1988): *Impulse Testing of Power Transformers Using the Transfer Function Method*, IEEE Transaction on Power Delivery, br. 3, pp. 476-489, 1988.

[45] *IEC standardi* (2002): I. 60076-4, Power Transformers-Part 4: Guide to the Lightning Impulse and Switching Impulse Testing - Power Transformers and Reactors, Techinical Committee 14 - Power Transformers, 2002.

[46] Kannan S. R.; Narayana R. (1973): *Prediction of the Parametars of an Impulse Generator for Transformer Testing*, Proc. of IEEE, 1973.

[47] Ćurčić A.; Simonović A. (2015): *Analiza rezultata ispitivanja energetskih transformatora udarnim naponom*, Infoteh-Jahorina, pp. 126-130, 2015.

[48] Čaršimanović S.; Bajramović Z.; Hadžić O.; Čaršimanović A. (2005): *Modeling and Calculating of Switching Overvoltages in 400kV Electrical Networks*, EUROCON 2005, Belgrade, 2005.

[49] Indulkar C. S.; Thomas M. S.; Bijwe P. R. (1992): *Switching Overvoltages in a Three-phase Transformer*, Circuits and Systems, Proceedings of the 35th Midwest Symposium, Washigton, 1992.

[50] *Arc Model Blockset for use with MATLAB Simulink and Power System Blockset,* Delft University of Technology, p. 18., 2001.

[51] Schavemaker P. H; Van Der Sluis L. (2002): *The arc model blockset*, Proceedings of the Second IASTED International Conference, Crete, 2002.

[52] Mashajan N. S.; Patal K. R.; Shembekar S. M. (2013): *Electric Arc Model for High Voltage Circuit Breakers Based on MATLAB-Simulink*, International Journal of Science,

Business and Technology (IJSBT), 2013.

[53] Meštrović K. (2001): *High Voltage Switching Equipment State of Art and Development Trends in the World*, 5. savjetovanje CRO CIGRE, Cavtat, 2001.

[54] Seyedi H.; Golabi S.; Abam Z. (2010): *Limitation of Transmission Line Switching Overvoltages*, Power and Energy (PECon), 2010 IEEE International Conference, Kuala Lumpur, 2010.

[55] Dunsmore D. M.; Taylor E. R.; Wirtz B. F.; Yanchula T. L. (1992): *Magnification of Transients Voltages in Multi-Voltage-Level Circuits*, Shunt Capacitor Circuits, IEEE Transaction Power Delivery, pp. 644-673, 1992.

[56] Berth M.; Kung L.; Limbek E. (2001): *Switching Overvoltages in Motor Circuits*, IEEE Transcations on Industry Applications, Vol. 37, No. 6, pp. 1582-1589, 2001.

[57] Hileman A. R. (2000): *Insulation Coordination for Power Systems*, Marcel Dekker Inc., New York, 2000.

[58] Dalud M. Z. (2009): *Transient Behaviour Modelling of Underground High Voltage Cable Systems,* Master of Engineering, University of Wollongong, p. 121., Wollongong, 2009.

[59] Bjerkan E. (2005): *High Frequency Modeling of Power Transformer,* Doctoral Thesis University of Science and Technology, Department for Electrical Power Engineering, p. 268., Trondheim, 2005.

[60] Vanderstockt V. (1990): *Use of Statistical and Systematic Switches*, EMTP News, No. 4, pp. 12-30, 1990.

[61] ABB d.d., www.abb.com., [Datum pristupanja: 9 rujan 2016.]

[62] Moore R. (1960): *Travelling-Wave Engineering*, McGraw Hill, New York, 1960.

[63] Dommel H. W.; Marti J. R. (1985): *Overhead Line Parameters from Handbook Formulas and Computer Programs*, IEEE Transaction PAS, br. 2, pp. 366-372, 1985.

[64] *Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients*, 1990.

[65] Tavakoli H. (2009): *A High Frequency Transformer Winding Model for FRA Applications,* Doctoral Thesis, Division of Electromagnetic Engineering, Stockholm, p. 64., 2009.

[66] Papadias B. C.; Hatziargyriou N. D.; Prousalidis J. M. (1993): *Transformer Modelling for Switching Overvoltages*, Athens Power Tech, APT 93. Proceedings, Joint

International Power Conference, Atena, 1993.

[67] Dallago E.; Sassone G.; Venchi G. (1997): *High-frequency Power Transformer Model for Circuit Simulation*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 12, No. 4, pp. 664-670, 1997.

[68] Miklos D.; Handl P.; Raisz D. (2005): *Comparasion of Simulation Tools ATP-EMTP and MATLAB - Simulink for Time Domain Power System Transient Studies,* Bundapest, 2005.

[69] Župan T. (2010): *Modeliranje namota energetskog transformatora pri visokim frekvencijama*, Zagreb, 2010.

[70] Wang X.; Wilson P.; Zhou J. (2005): *Transient Recovery Voltage Investigation in the Application of 15 kV Circuit Breaker Failure*, International Conference on Power Systems Transients, Montreal, 2005.

[71] Schneider Electric.d.d., www.schnaider-electric.hr., [Datum pristupanja: 9 rujan 2016.]

[72] Florkowski M.; Klys P.; Furgal J.; Kuniewski M. (2014): *Propagation of High Frequency Overvoltages in Transformers*, High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2014 International Conference, Poznan, 2014.

[73] Greenwood A. (1991): *Electrical Transients in Power Systems*, Second Edition, John Wiley Inc., 1991.

[74] Shao J.; Rao N. D.; Zhang Y. (1991): *An Expert System for Secundary Distribution System Design*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, pp. 1607-1616, 1991.

[75] Fernežir D.; Ivanković I.; Čerina Z. (2006): *Integred System for Tap Changer Control and Monitoring*, Simpozij o sustavu vođenja EES-a, Cavtat, 2006.

[76] Keitoue S. (2009): *Motrenje energetskih transformatora*, Zagreb, 2009..

Sažetak

Iako je dosad uloženo mnogo truda u traženju i razvoju izvornog VF simulacijskog modela transformatora, još uvijek nema jasnog dogovora koji je simulacijski model adekvatan pri analizi sklopnih fenomena. Najvažnije poteškoće oko kojih nema jedinstvenog pristupa tiču se kako dizajnirati model željezne jezgre transformatora s modeliranim svim efektima, nelinearnim i frekvencijsko ovisnim ponašanjem mnogih koncentriranih parametara transformatora te neadekvatno utvrđivanje mnogih ulaznih koncentriranih parametara. U doktorskoj disertaciji su istraživani i prikazani matematički modeli idealnog prekidača te visokofrekvencijskog distributivnog transformatora različitih snaga i grupe spoja. Osim toga, a i ne manje bitni, prikazani su i preostali matematički modeli električnih vodova i trošila koji su potrebni za istraživanu konfiguraciju simulacijskog modela.

Doktorska disertacija daje argumentirane odgovore na najbitnija pitanja vezana za modeliranje visokofrekvencijskog energetskog transformatora koji se primjenjuje pri simulaciji visokofrekvencijskih prijelaznih prenapona. Na odgovarajući i originalni način prezentira razvoj VF modela transformatora te u Matlab – SimPowerSystemsu analizira dobivene simulacijske rezultate za istraživane sklopne slučajeve. Procjena primjenjivosti razvijenog frekvencijski ovisnog simulacijskog modela transformatora je također prezentirana i raspravljana na dva primjera. Prvo na isklopu tereta nazivnom snagom te zatim na isklopu neopterećenog transformatora. Simulacijsko testiranje je pokazalo da karakteristika sklopnog prenapona stvorena sklopnom operacijom prekidača jako ovisi o topologiji simulirane mreže. Nadalje, pokazano je kako se mijenja iznos sklopnog prenapona s obzirom na trenutak isklopa prekidača. Osim toga u okviru doktorske disertacije razvijen je model za analizu početne razdiobe prijelaznih prenapona u SN namotu transformatora. Štoviše, izraziti doprinos ovom radu je grafičko korisničko sučelje koje omogućava generiranje različitih oblika karakteristika prijelaznih prenapona s ciljem analize utjecaja na početnu razdiobu prijelaznog prenapona na transformatorima različitih snaga. Nadalje, simulirani su različiti utjecaji promjene konfiguracije primarnog SN i sekundarnog NN kruga transformatora na visinu i oblik karakteristike sklopnog prenapona. Posebno su simulirani utjecaji promjene omjera dozemnih kapaciteta u odnosu na inuktivitet primarnog SN namota s ciljem analize utjecaja na oblik karakteristike početne raspodjele prijelaznog prenapona. Posebno su za odabrane sklopne događaje analizirani utjecaji dozemnih, međufaznih i međunamotnih kapaciteta na karakteristiku sklopnog prenapona. Između ostaloga, cilj doktorske disertacije je detaljno opisati postupak prikupljanja i određivanja koncentriranih parametara VF modela

transformatora koji su neophodni za opisivanje i korištenje istoga. Korištenjem ovoga pristupa razvija se i proširuje baza različitih simuliranih sklopnih utjecaja, a time i sve preciznija analiza prikupljenih koncentriranih parametara konfiguracijske mreže. Paralelno sa tim razvija se grafičko korisničko sučelje s ciljem simuliranja različitih sklopnih događaja. Doktorskom disertacijom posebno su opisane mjere i načini za smanjenje negativnih utjecaja sklopnih prenapona.

Cilj doktorske disertacije je dijelom poboljšati postojeći razvijeni model transformatora u Matlab – SimPowerSystemsu, a dijelom taj poboljšani model eksperimentalno i analitički verificirati u laboratorijskim uvjetima. U svrhu realizacije preostalih znanstvenih doprinosa osmišljen je laboratorijski postav. Simulacijski model laboratorijskog transformatora je osmišljen s ciljem eksperimetalne verifikacije na primjeru isklopa male induktivne struje. Laboratorijski postav se sastoji od laboratorijskog transformatora, NN prekidača i kapacitivnog tereta. Dobiveni mjerni rezultati pokazuju pojavu brzoga impulsnog tranzijenta s karakterstičnom sklopnom karakteristikom. Za potrebe evaluacije korišteni su i analitički modeli isklopa male induktivne struje te isklopa realne prigušnice. Pokazalo se da korišteni analitički modeli isklopa prigušnice i isklopa male induktivne struje s očekivanom preciznošću reflektiraju eksperimentalne i simulacijske rezultate.

Ključne riječi: Energetski transformator, Visokofrekvencijski model, Predviđanje, Sklopni prenaponi, Trenutak uklopa, Digitalna simulacija, Prekidač, Efektivni kapaciteti, Vrednovanje modela, Mjerenje sklopnih prenapona

Abstract

Improved Analysis and Prediction of Switching Overvoltages in Power Grid by Development of Grafical Interface

Although much effort has been invested so far in the search and development of the original VF simulation transformer model, there is still no clear agreement which simulation model is adequate for the analysis of switching phenomena. The most important difficulties around which there is no unified approach are how to design a transformer core model with modeled all effects, nonlinear and frequency dependent behavior of many concentrated transformer parameters and inadequate determination of many input concentrating parameters. The mathematical models of the ideal HV switch and the high frequency distributive transformer of various forces and group of compounds were explored and presented in the dissertation. In addition, and not lees important, the remaining mathematical models of electrical power lines and loads required for the researched configuration of the simulation model are shown.

The doctoral dissertation gives arguments on the most important issues related to the modeling of a high frequency energy transformer applied in the simulation of high frequency transient surges. In the appropriate and original way it presents the development of the VF transformer model and in Matlab - SimPowerSystems it analyzes the obtained simulation results for research switching cases. The assessment of the applicability of the developed frequency - dependent simulation transformer model is also presented and discussed in two examples. First, when the real coil is loaded with nominal power and secuund when the unloaded transformer switch off. Simulation testing has shown that the circuit breaker characteristic created by the circuit breaker operation is heavily dependent on the topology of the simulated network. Furthermore, it is shown how the amount of overvoltage switches is changed with considering to the switch - off moment. In addition, a model for analyzing the initial distribution of transient overvoltage in the HV transformer coil has been developed within the PhD dissertation.

Moreover, the contribution to this paper is a graphical user interface that enables the generation of different form overvoltage characteristics with the purpose of analyzing the impact on the initial distribution of transient overvoltages on transformers of different rated power. Furthermore, different impacts of changing the configuration of the primary HV and secondary LV circuits to the value and shape of the switching overvoltage are simulated.

Especially simulated effects of changing the ratio of total capacities to the primary HV winding inductance with the value of analyzing the influence on the shape characteristics of the initial distribution of the transient overvoltage. Especially for the selected switching cases, the effects of total, interphase and interwinding capacities on the switching overvoltage characteristic are analyzed. Among other things, the aim of the doctoral dissertation is to describe in detail the procedure for collecting and determining concentrated HF transformer parameters that are necessary for describing and using it. By using this approach, the basis for various simulated switching impacts is developed and expanded, and thus more precise analysis of the compiled configuration parameters of the configuration network. Parallel with this, a graphical user interface is developed to simulate different switch cases. The doctoral dissertation specifically describes measures and ways to reduce the negative effects of switching overvoltage.

The aim of the dissertation is partly to improve the existing developed model of transformers in Matlab - SimPowerSystems, and partly to improve this model experimentally and analytically in laboratory conditions. For the purpose of realizing the remaining scientific contributions, a laboratory setup was designed. The simulator model of the laboratory transformer was designed with the aim of experimental verification on the example of a small inductance current. The laboratory setup consists of a laboratory transformer, a rapid LV switch, and a capacitive load. The obtained measurement results show the occurrence of a fast transient with a switching characteristic. For the purposes of the evaluation, the analytical models of the low inductance current circuit breaker and the real damper disconnection were used. It has been shown that the analytical models of the load shutdown and the low inductance current cuts with the expected accuracy reflect the experimental and simulation results.

Keywords: Power Transformer, High Frequency Model, Prediction, Switching Overvoltages, Closing Time, Digital Simulation, Electromagnetic Transient, Circuit Breaker, Effective Capacitance, Model Validation, Switching Overvoltages Measurement.

Životopis

Krešimir Miklošević rođen je 23.2.1980. u Vinkovcima. Dodiplomski studij završio je na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku 2007. godine i stekao zvanje dipl. ing. elektrotehnike. Od 2005. do 2007. zaposlen je u srednjoj tehničkoj školi gdje predaje elektroskupinu predmeta. U tome periodu upisuje te uspješno završava ECDL akademiju. Na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku od 2007. godine radi kao asistent. Nastavu predaje na preddiplomskim, diplomskim i stručnim studijima. Na preddiplomskim i stručnim studijima smjera Elektroenergetika predaje auditorne vježbe iz temeljnih kolegija kao što su Osnove elektrotehnike 1 i 2. Na diplomskom studiju smjera Elektroenergetika predaje auditorne i laboratorijske vježbe. Asistent je na redovnim i izbornim kolegijima koji se bave stručnom problematikom vezano za Električne strojeve i pogone. Sumentor je na velikom broju završnih i diplomskih radova. Organizator je mnogih stručnih posjeta industrijskim pogonima. Od 2008. polaznik je poslijediplomskog doktorskog studija smjera elektroenergetika. Područja njegovog znanstvenog i stručnog interesa su električni strojevi i pogoni, dinamika industrijskih sustava te upravljanje i dijagnostika električnih strojeva. Posebno područje interesa i istraživanja su Prenaponi u elektroenergetskim mrežama. Autor je i koautor znanstvenih radova u časopisima i zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom. Održao je nekoliko izlaganja na međunarodnim konferencijama. Dobitnik je priznanja za najbolji znanstveni rad na međunarodnoj konferenciji DAAAM 2008. godine u kategoriji mladi znanstveni istraživači. Sudjeluje na mnogim stručnim seminarima i radionicama. Suradnik je na sveučilišnom projektu pod naslov Primjena metode mekog računarstva za strojeve i uređaje. U svome dosadašnjem radu bavi se sustavima za daljinsko učenje. Od 2010. godine posjeduje certifikat E-learning Course Design. Voditelj je edukacije asistenata čiji je glavni cilj uvođenje e-učenja. Od 2010. zaposlen je kao asistent na Zavodu za industrijska postrojenja i automatizaciju. Nakon 2012. izabran je u nastavno zvanje predavač na Zavodu elektrostrojarstvo. Posjeduje certifikat o pedagoško – psihološkoj i metodičko – didaktičkoj naobrazbi. Član je IEEE organizacije i član sekcija Power & Energy Society i Energy Conversion od 2011. Član je DAAAM International Viena, Austrija od 2008.

Popis i opis uporabljenih slika

Slika 2.1. Ilustracija identificiranih kratkotrajnih prijelaznih pojava 6
Slika 2.2. Ilustracija korištenih vrsta mreža 8
Slika 2.3. Sklopni prenapon dobiven EMTP simulacijom uklopa transformatora u uvjetima tzv. *Block outa* gdje je napon iskazan u p.u. (u odnosu na nominalni fazni napon) [37] 12
Slika 2.4. Sklopni prenapon dobiven EMTP simulacijom uklopa dugog voda gdje je napon iskazan u p.u. [37] 12
Slika 2.5. Klasifikacija prenapona prema faktoru i vremenu trajanja prenapona [39] 14
Slika 2.6. Klasifikacija prenapona prema faktoru prenapona i vrsti unutarnje izolacije 14
Slika 2.7. Izvedba generatora za ispitivanje udarnim naponima [42] 17
Slika 2.8. Primjer izvedbe energetskog transformatora firme Končar – energetski transformatori [43] 17
Slika 2.9. Karakteristični oblik sklopnog prenapona [35] 18
Slika 2.10. Usporedba sklopnog prenapona 450 kV, 250 / 2000 μs i prenapona oblika skokovite funkcije dobiven simulacijom u Matlab - u 18
Slika 2.11. Marxov višerazinski impulsni generator udarnog napona 20
Slika 2.12. Simulacijski model za generiranje udarnih prenapona 21
Slika 2.13. Simulacijski podsustav za generiranje udarnih sklopnog prenapona 21
Slika 2.14. Grafičko sučelje ispitnog prenapona 125 kV, 250 / 2000 μs i ispitnog prenapona oblika jedinične funkcije 125 kV 22
Slika 2.15. Karakteristični vremenski odzivi prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ i posljednjeg $u_c(t)$ stupnja sklopnog generatora uz uvjet jednakog trenutka prorade iskrišta i maksimalne tjemene vrijednosti prenapona U_m 23
Slika 2.16. Usporedba sklopnog prenapona $u_c(t)$ 125 kV, 250 / 2000 μs i prenapona $u_0(t)$ 125 kV oblika skokovite funkcije 23
Slika 2.17. Usporedba karakterističnih vremenskih odziva prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ stupnja sklopnog generatora uz uvjet različitih trenutaka sinkrone prorade iskrišta i maksimalne tjemene vrijednosti prenapona U_m 24
Slika 2.18. Usporedba generiranog sklopnog prenapona $u_c(t)$ sa referentnom funkcijom $u_0(t)$ uz uvjet različitih trenutaka sinkrone prorade iskrišta i maksimalne tjemene vrijednosti prenapona U_m 24

Slika 2.19. Karakteristični vremenski odzivi prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ i posljednjeg $u_c(t)$ stupnja sklopnog generatora uz uvjet sinkronog trenutka prorade iskrišta i 75 % tjemene vrijednosti prenapona U_m 25
Slika 2.20. Usporedba sklopnog prenapona $u_c(t)$ 93,75 kV, 250 / 2000 μs i prenapona $u_0(t)$ 93,75 kV oblika skokovite funkcije 25
Slika 2.21. Usporedba karakterističnih vremenskih odziva prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ stupnja sklopnog generatora uz uvjet različitih trenutaka prorade iskrišta i 75 % tjemene vrijednosti prenapona U_m 26
Slika 2.22. Usporedba generiranog sklopnog prenapona $u_c(t)$ sa referentnom funkcijom $u_0(t)$ uz uvjet različitih trenutaka sinkrone prorade iskrišta i 75 % tjemene vrijednosti prenapona U_m 26
Slika 2.23. Karakteristični vremenski odzivi prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ i posljednjeg $u_c(t)$ stupnja sklopnog generatora uz uvjet sinkronog trenutka prorade iskrišta i 50 % tjemene vrijednosti prenapona U_m 27
Slika 2.24. Karakteristični vremenski odzivi prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ i posljednjeg $u_c(t)$ stupnja sklopnog generatora uz uvjet sinkronog trenutka prorade iskrišta i 50 % tjemene vrijednosti prenapona U_m 28
Slika 2.25. Usporedba sklopnog prenapona $u_c(t)$ 62,5 kV, 250 / 2000 μs i prenapona $u_0(t)$ 62,5 kV oblika skokovite funkcije 27
Slika 2.26. Karakteristični vremenski odzivi prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ i posljednjeg $u_c(t)$ stupnja sklopnog generatora uz uvjet asinkronog trenutka prorade iskrišta i 100 % tjemene vrijednosti prenapona U_m 29
Slika 2.27. Usporedba generiranog sklopnog prenapona $u_c(t)$ sa referentnom funkcijom $u_0(t)$ uz uvjet različitih trenutaka sinkrone prorade iskrišta i 50 % tjemene vrijednosti prenapona U_m 28
Slika 2.28. Karakteristični vremenski odzivi prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ i posljednjeg $u_c(t)$ stupnja sklopnog generatora uz uvjet asinkronog trenutka prorade iskrišta i 75 % tjemene vrijednosti prenapona U_m 30
Slika 2.29. Usporedba sklopnog prenapona $u_c(t)$ 125 kV, 250 / 2000 μs i prenapona $u_0(t)$ 125 kV oblika skokovite funkcije 29
Slika 2.30. Usporedba sklopnog prenapona $u_c(t)$ 93,1 kV, 250 / 2000 μs i prenapona $u_0(t)$ 93,1 kV oblika skokovite funkcije 30
Slika 2.31. Karakteristični vremenski odzivi prvog $u_{c1}(t)$, drugog $u_{c2}(t)$, trećeg $u_{c3}(t)$ i posljednjeg $u_c(t)$ stupnja sklopnog generatora uz uvjet asinkronog trenutka prorade iskrišta i 50 % tjemene vrijednosti prenapona U_m 31

Slika 2.32. Usporedba sklopnog prenapona $u_c(t)$ 63,1, 250 / 2000 μs i prenapona $u_0(t)$ 63,1 kV oblika skokovite funkcije 32
Slika 2.33. Primjer idealnog naponskog prenapona i struje odvoda pri a) sniženom i b) punom naponu [47] 33
Slika 2.34. Primjer proboja izolacije od epoksidne smole između namota energetskog transformatora snage 250 kVA [47] 33
Slika 2.35. Sustav za simulaciju promjene napona tijekom uklopa kondenzatora [11] 37
Slika 2.36. Dijagrami sklopnih prenapona u p.u. i frekvencijskog spektra u dB sklopnog prenapona tijekom uklopa kondenzatora [11] 37
Slika 2.37. Dijagram sklopnog prenapona tijekom uklopa voda iskazan u p.u., a) na strani izvora, b) na kraju voda [11] 37
Slika 2.38. Dijagram sklopnog prenapona iskazan u voltima tijekom pokretanja električnog motora [32] 38
Slika 2.39. Uklop idealnog prekidača na RL krug 40
Slika 2.40. Pojednostavljena nadomjesna shema namota 43
Slika 2.41. Nadomjesna kapacitivna shema namota 44
Slika 2.42. Nadomjesna shema isklopa neopterećenog transformatora 46
Slika 2.43. Nadomjesna shema energetskog transformatora opterećenog prigušnicom 49
Slika 3.1. Simulacijsko modeliranje elektroenergetske mreže 51
Slika 3.2. Theveninov nadomjesni model izvora 53
Slika 3.3. Nadomjesni model impedancije odvodnika 53
Slika 3.4. Nadomjesni model impedancije kondenzatora 54
Slika 3.5. Nadomjesni model realnog tereta za visokofrekvencijske sklopne događaje 54
Slika 3.6. Primjer ABB – ovog $E_{max}2$ upravljivog suvremenog prekidača [61] 56
Slika 3.7. π model sekcije voda 56
Slika 3.8. Nadomjesni prikaz modela jedne faze dvonamotnog energetskog transformatora 58
Slika 3.9. Ekvivalentni model tereta energetske mreže za simulaciju sklopnih prenapona 61
Slika 4.1. Konfiguracijski parametri simulacijskog postupka 63
Slika 4.2. Simulacijski model namota energetskog transformatora jedne faze za početnu raspodjelu sklopnog prenapona 64
Slika 4.3. Ilustracija kapacitivnih veza namota 65
Slika 4.4. Kapacitivne veze VN koncentriranog namota 69
Slika 4.5. Simulacijsko modeliranje nadomjesne sheme namota transformatora za početnu raspodjelu sklopnog prenapona 70

Slika 4.6. Simulacijsko modeliranje pojednostavljenje nadomjesne sheme namota transformatora 71
Slika 4.7. Grupirani i maskirani pojednostavljeni simulacijski model VN namota distributivnog transformatora za raspodjelu prenapona 72
Slika 4.8. Ulazni parametri u pojednostavljeni simulacijski model distributivnog transformatora za raspodjelu sklopnog prenapona 72
Slika 4.9. Jednofazni dijagram za istraživanje utjecaja primarnog i sekundarnog kruga transformatora na karakteristiku sklopnog prenapona 75
Slika 4.10. Jednofazna ekvivalentna mreža za istraživane utjecaja konfiguracije primarnih i sekundarnih krugova transformatora na karakteristiku sklopnog prenapona 76
Slika 4.11. Simulacijsko parametriranje i konfiguriranje bloka Powergui 78
Slika 4.12. Podešavanje parametara i opcija simulacijskog postupka posredstvom bloka Powergui 78
Slika 4.13. Grafičko sučelje za frekvencijsku analizu nadomjesnih mjerenih i simulacijskih impedancija komponente 79
Slika 4.14. Grafičko sučelje za FFT analizu karakteristike sklopnog prenapona 80
Slika 4.15. Grafičko sučelje za dizajn petlje histereze modeliranog transformatora 80
Slika 4.16. Blok simulacijskog modela energetskog izvora 81
Slika 4.17. Ulazni parametri energetskog izvora, a) izravno parametriranje, b) neizravno parametriranje, c) parametriranje načina rada trofaznog izvora 82
Slika 4.18. Blok simulacijskog modela trofaznog prekidača 84
Slika 4.19. Parametriranje trofaznog prekidača 84
Slika 4.20. Nadomjesna mreža simulacijskog modela voda 86
Slika 4.21. Blok simulacijskog modela SN / NN voda 87
Slika 4.22. Parametriranje SN / NN voda 87
Slika 4.23. Blok simulacijskog modela dvonamotnog trofaznog transformatora 89
Slika 4.24. Konfiguracija namota i petlje histereze trofaznog dvonamotnog transformatora 89
Slika 4.25. Parametriranje namota i petlje histereze trofaznog dvonamotnog transformatora 90
Slika 4.26. Blok simulacijskog modela trofazne električne grane 92
Slika 4.27. Parametriranje simulacijskog bloka paralelne trofazne električne veze 92
Slika 4.28. Blok simulacijskog modela nadomjesnog trofaznog opterećenja 93
Slika 4.29. Parametriranje simulacijskog bloka parametri nadomjesnog trofaznog opterećenja. 94
Slika 4.30. Parametriranje simulacijskog bloka tokovi snaga nadomjesnog trofaznog opterećenja 95

Slika 5.1. Grafičko sučelje tokovi snaga za prikaz stacionarnih varijabli stanja u polarnom obliku 103
Slika 5.2. Struktura razvijenog grafičko korisničkog sučelja za predviđanje sklopnih prenapona 104
Slika 5.3. Prikaz dijagrama toka za grafičko korisničko sučelje 105
Slika 5.4. Razvoj digitalne baze proračunatih koncentriranih i distributivnih parametara 105
Slika 5.5. Razvoj digitalne baze slučajeva sklopnih prenapona 105
Slika 5.6. Dizajn simulacijskog modela testne distributivne mreže SmtdmGUI2.fig. 106
Slika 5.7. Utvrđivanje početnih vrijednosti električnih veličina simulacijskog modela testne distributivne mreže 107
Slika 5.8. Grafičko sučelje za proračun *RLC* parametara prijenosnog voda 108
Slika 5.9. Proračunati ulazni distribuirani parametri SN voda u obliku matrice stanja……...108

Slika 6.1. Pojednostavljeni simulacijski model jedne faze SN namota distributivnog transformatora 112
Slika 6.2. Grupirani i maskirani pojednostavljeni simulacijski model SN namota distributivnog transformatora za početnu raspodjelu prenapona 112
Slika 6.3. Ulazni parametri u pojednostavljeni simulacijski model distributivnog transformatora za početnu raspodjelu sklopnog prenapona 112
Slika 6.4. Granični rubni slučajevi početne raspodjele prenapona 113
Slika 6.5. Simulacijski okoliš za pisanje m - skripte 116
Slika 6.6. Početna raspodjela prenapona na uzemljenom namotu za različite vrijednosti koeficijenta α 116
Slika 6.7. Simulacijski okoliš za kreiranje m - skripte 119
Slika 6.8. Početna raspodjela prenapona na izoliranom namotu za različite vrijednosti koeficijenta α 119
Slika 6.9. Usporedba početne raspodjele prenapona u uzemljenom i izoliranom namotu za različite vrijednosti koeficijenta α 120
Slika 6.10. Usporedba različitih vrsta testne pobude na oblik početne raspodjele sklopnog prenapona u uzemljenom i izoliranom VN namotu 121
Slika 6.11. Prikaz oblika tri generirane testne pobude 121
Slika 6.12. Usporedba različitih vrsta testne pobude na oblik početne raspodjele sklopnog prenapona u izoliranom namotu uz $\alpha = 10$ 123

Slika 6.13. Usporedba različitih vrsta testne pobude na oblik početne raspodjele sklopnog prenapona u uzemljenom namotu uz $\alpha = 10$ 125
Slika 6.14. Proračun ekvivalentnog induktiviteta L_e namota distributivnog transformatora 10 / 0,4 kV 126
Slika 6.15. Proračunate vrijednosti nadomjesnih parametara distributivnog transformatora 10 / 0,4 kV 127
Slika 6.16. Simulacijski model za analizu utjecaja promjene koeficijenta α na oblik raspodjele sklopnog prenapona u uzemljenom i izoliranom namotu 127
Slika 6.17. Primjer razvijene skriptne datoteke 128
Slika 6.18. Raspodjela prenapona oblika step pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele ($t = 0$ μs) do $t = 50$ μs za $\alpha = 2$ 129
Slika 6.19. Raspodjela prenapona oblika step pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele ($t = 0$ μs) do $t = 110$ μs za $\alpha = 2$ 131
Slika 6.20. Raspodjela prenapona oblika step pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele ($t = 0$ μs) do $t = 50$ μs za $\alpha = 10$ 132
Slika 6.21. Raspodjela prenapona oblika step pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele ($t = 0$ μs) do $t = 110$ μs za $\alpha = 10$ 133
Slika 6.22. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele ($t = 0$ μs) do $t = 50$ μs za $\alpha = 2$ 134
Slika 6.23. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele ($t = 0$ μs) do $t = 110$ μs za $\alpha = 2$ 135
Slika 6.24. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele ($t = 0$ μs) do $t = 50$ μs za $\alpha = 10$ 136
Slika 6.25. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele ($t = 0$ μs) do $t = 110$ μs za $\alpha = 10$ 137
Slika 6.26. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele ($t = 0$ μs) do $t = 2000$ μs za $\alpha = 2$ 138
Slika 6.27. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele ($t = 0$ μs) do $t = 2000$ μs za $\alpha = 2$ 139
Slika 6.28. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele ($t = 0$ μs) do $t = 2000$ μs za $\alpha = 10$ 140
Slika 6.29. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele ($t = 0$ μs) do $t = 110$ μs za $\alpha = 10$ 141

Slika 6.30. Jednofazna mrežna konfiguracija sustava za slučaj isklopa radno – induktivnog tereta uz stupanj opterećenja 0,86 × S_n i faktor snage od 0,92 %..... 143
Slika 6.31. Proračun koncentriranih parametara VF modela transformatora pomoću m – skripte 144
Slika 6.32. Simulacijski model distributivne mreže razvijen u Matlab – SimPowerSystemsu . 146
Slika 6.33. Sklopni prenapon faze L1 za transformator snage 50 kVA 146
Slika 6.34. Sklopni prenapon faze L1 za transformator snage 250 kVA 146
Slika 6.35. Sklopni prenapon faze L1 za transformator snage 400 kVA 147
Slika 6.36. Jednofazna mrežna konfiguracija sustava za slučaj isklopa radno – induktivnog tereta uz promjenu stupnja opterećenja i faktora snage..... 149
Slika 6.37. Simulacijski odziv skloponog prenapona za transformator snage 400 kVA pri faktoru snage trošila od 0,80..... 151
Slika 6.38. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 250 kVA pri faktoru snage trošila od 0,80..... 151
Slika 6.39. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 50 kVA pri faktoru snage trošila od 0,80..... 152
Slika 6.40. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 400 kVA pri stupnju opterećenja trošila od 0,80 × S_n..... 153
Slika 6.41. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 250 kVA pri stupnju opterećenja trošila od 0,80 × S_n..... 154
Slika 6.42. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 50 kVA pri stupnju opterećenja trošila od 0,80 × S_n..... 154
Slika 6.43. Jednofazna mrežna konfiguracija sustava za slučaj isklopa radno – induktivnog tereta uz promjenu duljine NN voda..... 156
Slika 6.44. Simulacijski model distributivne mreže razvijen u Matlab – SimPowerSystemsu . 158
Slika 6.45. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 400 kVA pri duljini NN voda od 0,1 km..... 159
Slika 6.46. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za transformator snage 400 kVA pri duljini NN voda od 0,3 km..... 159
Slika 7.1. Dizajn energetskoga i mjernoga sustava korištena pri isklopu neopterećenoga transformatora 161
Slika 7.2. Prikaz ispitne stanice sa integriranim energetskim izvorom i NN prekidačem 162
Slika 7.3. Oblik karakteristike sklopnoga prenapona za 1. trenutak isklopa laboratorijskoga transformatora u praznom hodu..... 164

Slika 7.4. Oblik karakteristike sklopnoga prenapona za 2. trenutak isklopa laboratorijskoga transformatora u praznom hodu 165
Slika 7.5. Oblik karakteristike sklopnoga prenapona za 3. trenutak isklopa laboratorijskoga transformatora u praznom hodu 165
Slika 7.6. Oblik karakteristike sklopnoga prenapona za 4. trenutak isklopa laboratorijskoga transformatora u praznom hodu 166
Slika 8.1. Integrirani dijagnostički i monitoring podsustavi energetskog transformatora [75].. 169
Slika 8.2. Razvodni ormar sustava motrenja Končar - TMS [76] 170
Slika 8.3. Integrirani sustav monitoringa rasklopnog postrojenja KONČAR - BMS [12] 171
Slika 8.4. Korisničko sučelje KONČAR – BMS rasklopnog postrojenja [12] 172
Slika 8.5. Grafičko korisničko sučelje SF_6 prekidača sa podacima u grafičkom i numeričkom obliku [12] 173
Slika 9.1. Primjer analitičkog proračuna početne raspodjele sklopnog prenapona za slučaj izoliranog zvjezdišta 176
Slika 9.2. Analitički odziv početne raspodjele sklopnog prenapona step oblika 75 kV sa uzemljenim zvjezdištem 176
Slika 9.3. Analitički odziv početne raspodjele sklopnog prenapona step oblika 75 kV sa izoliranim zvjezdištem 177
Slika 9.4. Analitički proračun sklopnoga prenapona korišten pri isklopu radno – induktivnoga tereta 179
Slika 9.5. Analitički odziv sklopnog prenapona faze L1 za transformator snage 50 kVA 180
Slika 9.6. Analitički odziv sklopnog prenapona faze L1 za transformator snage 250 kVA 180
Slika 9.7. Analitički odziv sklopnog prenapona faze L1 za transformator snage 400 kVA 181
Slika 9.8. Jednofazna mrežna konfiguracija sustava za slučaj isklopa malih induktivnih struja 183
Slika 9.9. Simulacijski model laboratorijske mreže razvijen u Matlab – SimPowerSystemsu.. 184
Slika 9.10. Simulacijski odziv sklopnog prenapona za laboratorijski transformator snage 4 kVA pri isklopu malih induktivnih struja 185
Slika 9.11. Valni oblik induktivne struje pri isklopu neopterećenog transformatora snage 4 kVA 185
Slika 9.12. Analitički proračun maksimalnoga faznoga prenapona korišten pri isklopu male induktivne struje……..186

Popis i opis uporabljenih tablica

Tablica 2.1. Relativna usporedba dinamičkih i elektromagnetskih pojava prema trajanju 7
Tablica 2.2. Podjela prema vrsti, obliku i trajanju prenapona [35] 10
Tablica 2.3. Podnosivi udarni naponi prema IEC standardu [35] 16
Tablica 2.4. Karakteristični parametri udarnog generatora za dobivanje impulsnog prenapona 75 kV, 1,2 / 50 μs i oscilatornog prenapona 125 kV, 250 / 2000 μs 22
Tablica 2.5. Simulacijski pokazatelji sklopnog prenapona uz uvjet jednakih sinkronih trenutaka prorade iskrišta i maksimalne tjemene vrijednosti prenapona 23
Tablica 2.6. Simulacijski pokazatelji prenapona uz uvjet sinkronih trenutaka prorade iskrišta i 75 % tjemene vrijednosti prenapona..... 24
Tablica 2.7. Simulacijski pokazatelji prenapona uz uvjet jednakih sinkronih trenutaka prorade iskrišta i 50 % tjemene vrijednosti prenapona..... 26
Tablica 2.8. Simulacijski pokazatelji prenapona uz uvjet asinkrone prorade iskrišta i 100 % tjemene vrijednosti prenapona 29
Tablica 2.9. Simulacijski pokazatelji prenapona uz uvjet asinkrone prorade iskrišta i 75 % tjemene vrijednosti prenapona 30
Tablica 2.10. Simulacijski pokazatelji prenapona uz uvjet asinkrone prorade iskrišta i 50 % maksimalne tjemene vrijednosti prenapona 31
Tablica 2.11. Primjer klasifikacije prema dostupnim analiziranim slučajevima 34
Tablica 2.12. Relativna usporedba slučajeva pojavnosti sklopnog prenapona s visinom faktora prenapona 34
Tablica 2.13. Relativna usporedba izvora pojavnosti sklopnog prenapona s frekvencijskim rasponom 35
Tablica 3.1. Nadomjesne sheme za prijelazne pojave u transformatorima..... 58
Tablica 4.1. Referentne vrijednosti efektivnih kapaciteta energetskog transformatora..... 69
Tablica 4.2. Ulazni parametri nadomjesnog izvora..... 81
Tablica 4.3. Ulazni koncentrirani parametri trofaznog prekidača..... 84
Tablica 4.4. Ulazni parametri SN / NN voda 87
Tablica 4.5. Proračunati koncentrirani parametri SN / NN voda 88
Tablica 4.6. Ulazni parametri trofaznog dvonamotnog transformatora..... 91
Tablica 4.7. Proračunati koncentrirani parametri trofaznog dvonamotnog transformatora..... 91
Tablica 4.8. Ulazni koncentrirani parametri pridodanih električnih grana transformatora..... 92

Tablica 4.9. Ulazni parametri simulacijskog blok modela opterećenja NN sabirnice 96
Tablica 6.1. Nazivni parametri istraživanog distributivnog transformatora 111
Tablica 6.2. Serijski i paralelni nadomjesni parametri zavoja SN namota za prvi granični slučaj ($C_{ekv} = C_1 \cdot n$) 113
Tablica 6.3. Serijski i paralelni nadomjesni parametri zavoja SN namota za drugi granični slučaj ($C_{ekv} = K_1 / n$) 113
Tablica 6.4. Tablica proračunatih koeficijenta α *i* ekvivalentnih kapaciteta C_{ekv} namota distributivnog transformatora 10 / 0,4 kV 114
Tablica 6.5. Konfiguracijski parametri simulacije 115
Tablica 6.6. Početna raspodjela prenapona na uzemljenom namotu za $\alpha = 2$ 115
Tablica 6.7. Početna raspodjela prenapona na uzemljenom namotu za $\alpha = 6$ 115
Tablica 6.8. Početna raspodjela prenapona na uzemljenom namotu za $\alpha = 10$ 115
Tablica 6. 9. Konfiguracijski parametri simulacije 118
Tablica 6.10. Početna raspodjela prenapona na izoliranom namotu za $\alpha = 2$ 118
Tablica 6.11. Početna raspodjela prenapona na izoliranom namotu za $\alpha = 6$ 118
Tablica 6.12. Početna raspodjela prenapona na izoliranim namotu za $\alpha = 10$ 118
Tablica 6.13. Konfiguracijski parametri simulacije 122
Tablica 6.14. Početna raspodjela prenapona (oblika step funkcije) u izoliranom namotu za $t = 0$ μs i $\alpha = 10$ 122
Tablica 6.15. Početna raspodjela prenapona (oblika udarne funkcije) u izoliranom namotu za $t = 0$ μs i $\alpha = 10$ 122
Tablica 6.16. Početna raspodjela prenapona (oblika sklopne funkcije) u izoliranom namotu za $t = 0$ μs i $\alpha = 10$ 123
Tablica 6.17. Početna raspodjela prenapona (oblika step funkcije) u uzemljenom namotu za $t = 0$ μs i $\alpha = 10$ 124
Tablica 6.18. Početna raspodjela prenapona (oblika udarne funkcije) u uzemljenom namotu za t = 0 μs i α = 10 124
Tablica 6.19. Početna raspodjela prenapona (oblika sklopne funkcije) u uzemljenom namotu za $t = 0$ μs i $\alpha = 10$ 124
Tablica 6.20. Tablica proračunatih koeficijenta α i nadomjesnih elementarnih kapaciteta C_e i induktiviteta L_e svitka distributivnog transformatora 10 / 0,4 kV 126
Tablica 6.21. Konfiguracijski parametri simulacije 128
Tablica 6.22. Raspodjela prenapona oblika step pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele ($t = 0$ μs) do $t = 50$ μs za $\alpha = 2$ 129

Tablica 6.23. Raspodjela prenapona oblika step pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 50 μs za α = 2 130
Tablica 6.24. Raspodjela prenapona oblika step pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 50 μs za α = 10 131
Tablica 6.25. Raspodjela prenapona oblika step pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 110 μs za α = 10 132
Tablica 6.26. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 50 μs za α = 2 133
Tablica 6.27. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 110 μs za α = 2 134
Tablica 6.28. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 50 μs za α = 10 135
Tablica 6.29. Raspodjela prenapona oblika impulsne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 110 μs za α = 10 136
Tablica 6.30. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 2000 μs za α = 2 137
Tablica 6.31. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 2000 μs za α = 2 138
Tablica 6.32. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u direktno uzemljenom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 2000 μs za α = 10 139
Tablica 6.33. Raspodjela prenapona oblika sklopne pobude u izoliranom namotu u rasponu od početne raspodjele (t = 0 μs) do t = 110 μs za α = 10 140
Tablica 6.34. Konfiguracija za istraživanje sekundarnoga NN kruga transformatora 144
Tablica 6.35. Ulazni i proračunati koncentrirani parametri modela komponenti za istraživanje sekundarnoga NN kruga transformatora 145
Tablica 6.36. Simetrični ekvivalentni koncentrirani kapaciteti po fazi 145
Tablica 6.37. Konfiguracijski parametri simulacije 146
Tablica 6.38. Numerički proračunate maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} u odnosu na vršnu vrijednost faznog napona U za slučaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa NN prekidača 147
Tablica 6.39. Konfiguracija za istraživanje sekundarnoga NN kruga transformatora uz promjenjive uvjete opterećenja na teretu 149
Tablica 6.40. Ulazni i proračunati koncentrirani parametri modela komponenti za istraživanje sekundarnoga NN kruga transformatora 150

Tablica 6.41. Simetrični ekvivalentni koncentrirani kapaciteti po fazi 150
Tablica 6.42. Konfiguracijski parametri simulacije 151
Tablica 6.43. Numerički proračunate maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} za slučaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa NN prekidača pri promjenjivom faktoru snage tereta 152
Tablica 6.44. Numerički proračunate maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} za slučaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa NN prekidača pri promjenjivom stupnju opterećenja tereta……..153
Tablica 6.45. Konfiguracija za istraživanje sekundarnoga kruga transformatora uz promjenu duljine NN voda 156
Tablica 6.46. Ulazni i proračunati koncentrirani parametri modela komponenti za istraživanje NN kruga transformatora 157
Tablica 6.47. Simetrični ekvivalentni koncentrirani kapaciteti po fazi 157
Tablica 6.48. Konfiguracijski parametri simulacije 158
Tablica 6.49. Numerički proračunate maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} za slučaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa NN prekidača 160
Tablica 7.1. Nazivni podatci simetričnoga trofaznoga izvora napona 162
Tablica 7.2. Podatci testiranoga laboratorijskoga transformatora 163
Tablica 7.3. Specifikacija komponenti mjernoga sustava 163
Tablica 7.4. Numerički proračunate maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} pri slučajnim trenutcima isklopa NN prekidača 166
Tablica 9.1. Usporedba rezultata proračuna vremenski i parametarski ovisnog sklopnog prenapona za slučaj uzemljenog zvjezdišta uz step pobudu 75 kV i koeficijent $\alpha = 2$ 177
Tablica 9.2. Usporedba rezultata proračuna vremenski i parametarski ovisnog sklopnog prenapona za slučaj izoliranog zvjezdišta uz step pobudu 75 kV i koeficijent $\alpha = 2$ 178
Tablica 9.3. Analitički proračunate maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} za slučaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa NN prekidača 181
Tablica 9.4. Statistička metoda vrednovanja maksimalne fazne vrijednosti sklopnog prenapona U_{max} za slučaj najnepovoljnijeg trenutka isklopa NN prekidača 181
Tablica 9.5. Konfiguracija za istraživanje NN kruga laboratorijskog transformator 183
Tablica 9.6. Ulazni i proračunati koncentrirani parametri modela komponenti za istraživanje primarnog NN kruga transformatora 183
Tablica 9.7. Simetrični ekvivalentni koncentrirani kapaciteti po fazi 184
Tablica 9.8. Konfiguracijski parametri simulacije 184
Tablica 9.9. Usporedba simulacijskog i fizičkog modela s analitičkim modelom 186

Popis upisanih i položenih kolegija

Za potrebe postupka prihvaćanja teme doktorske disertacije prilažem sljedeći popis položenih ispita na poslijediplomskom doktorskom studiju elektrotehnike:

1. **Vjerojatnost i statistika – primjena**
2. **Management tehničkih sustava**
3. **Suvremeni elektrotehnički materijali**
4. **Procesna mjerenja**
5. **Nadzor i kvaliteta električne energije**
6. **Optimiranje elektroenergetskog sustava**
7. **Pouzdanost elektroenergetskog sustava**
8. **Prijelazne pojave u elektroenergetskim mrežama**
9. **Stabilnost elektroenergetskog sustava**
10. **Automatizirani elektromotorni pogoni**

Popis znanstvenih publikacija

Za potrebe postupka prihvaćanja teme doktorske disertacije prilažem sljedeći popis objavljenih znanstvenih radova:

1. Barukčić, Marinko; Ćorluka, Venco; **Miklošević, Krešimir**, The irradiance and temperature dependent mathematical model for estimation of photovoltaic panel performances. // *Energy conversion and management*. **101** (2015) ; 229-238 (članak, znanstveni).

2. Hederić, Željko; Barukčić, Marinko; **Miklošević, Krešimir**, Analitički proračun osovinskih struja kod motora sa homogenim jarmom. // *Energija : časopis Hrvatske elektroprivrede*. **58** (2009) , 01; 56-75 (članak, znanstveni).

3. Hederić, Željko; Mehmedović, Muharem; **Miklošević, Krešimir,** Točniji proračun magnetskih gubitaka u asinkronom motoru. // *Energija : časopis Hrvatske elektroprivrede*. **58** (2009) , 03; 290-307 (članak, znanstveni).

4. Barukčić, Marinko; Hederić, Željko; **Miklošević, Krešimir**, Multi Objective Optimization for Energy Production of Distributed Generation in Distribution Feeder //*Proceedings EnergyCon 2014 - IEEE International Energy Conference* / Kuzle, Igor ; Capuder, Tomislav ; Pandžić, Hrvoje (ur.).Red Hook, NY 12571 USA : Curran Associates, Inc., 2014. 1325-1333 (predavanje,međunarodna recenzija,objavljeni rad,znanstveni).

5. Spoljaric, Zeljko; **Miklosevic, Kresimir**; Jerkovic Stil, Vedrana; Hederic, Zeljko, Transformer Inrush Current Problems and Solutions // *31 st International Conference Science in Practice 2013* / Sören, Peik (ur.).Bremen : Bremen University of Applied Sciences, 2013. (predavanje,međunarodna recenzija,objavljeni rad,znanstveni).

6. Jerković, Vedrana; **Miklošević, Krešimir**; Špoljarić Željko, Excitation System Models of Synchronous Generator // *SiP 2010 28th International Conference Science in Practice* / Mester, Gyula (ur.).Subotica : Subotica Tech - College of Applied Sciences, 2010. 77-82 (predavanje,međunarodna recenzija,objavljeni rad,znanstveni).

7. Špoljarić, Željko; **Miklošević, Krešimir**; Jerković, Vedrana, Synchronous Generator Modeling Using Matlab // *SiP 2010 28th International Conference Science in Practice* / Mester, Gyula (ur.).Subotica : Subotica Tech - College of Applied Sciences, 2010. 147-154 (predavanje,međunarodna recenzija,objavljeni rad,znanstveni).

8. **Miklošević, Krešimir**; Špoljarić, Željko; Jerković, Vedrana, Analysis of Electric DC Drive Using Matlab Simulink and SimPower Systems // *Science in Practice* / Kvasznicza Zoltan ; Peter Megyer ; George Elmer (ur.).Pecs : University of Pecs Pollack Mihaly Faculty of Engineering, 2009. (predavanje,međunarodna recenzija,objavljeni rad,znanstveni).

9. Špoljarić, Željko; **Miklošević, Krešimir**; Valter, Zdravko, Analysis of Synchronous Motor Drive Using SimPowerSystems // *Annals of Daaam for 2009 & PROCEEDINGS* / Katalinić, Branko (ur.).Beč : DAAAM International Vienna, 2009. 1133-1135 (predavanje,međunarodna recenzija,objavljeni rad,znanstveni).

10. Jerković, Vedrana; Špoljarić, Željko; **Miklošević, Krešimir;** Valter, Zdravko, Comparison of Different Motor Control Principles Using Frequency Converter // *Science in Practice* / Galić, Radoslav ; Martinović, Goran ; Ivanović,Milan(ur.).Osijek: Elektrotehnički fakultet Osijek, 2008. 53-56 (predavanje,međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

11. **Miklošević, Krešimir**; Špoljarić, Željko; Valter, Zdravko, Modeling and Simulation of Induction Motor for Dynamic Behaviour Testing Using Specified Load // *Annals of Daaam for 2008 & PROCEEDINGS* / Katalinić,Branko(ur.).Beč : DAAAM International Vienna, 2008. 861-862 (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

Prilog1 (Ispitni list transformatora 50 kVA, Yzn5)