POBOLJŠANA METODA TRI MODA ZA PROCJENU GUBITAKA U PRIJENOSNOJ MREŽI

Alibašić, Emir

Doctoral thesis / Disertacija

2021

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:200:596204

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE J. J. STROSSMAYERA U OSIJEKU
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek

Emir Alibašić

POBOLJŠANA METODA TRI MODA ZA PROCJENU GUBITAKA U PRIJENOSNOJ MREŽI

DOKTORSKI RAD

Osijek, 2020.

Doktorski rad je izrađen na Zavodu za elektroenergetiku Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Baus
Doktorski rad ima: 104 stranice
Doktorski rad br.: 79

SADRŽAJ

1. UVOD 6

1.1 Hipoteza 7

1.2 Organizacija i struktura doktorske disertacije 8

2. PREGLED LITERATURE I PODRUČJE ISTRAŽIVANJA 10

2.1 Funkcija i metoda procjene stanja 13

2.1.1 Funkcija procjene stanja 13

2.1.2 Metode procjene stanja 13

2.1.3 Procjena stanja bazirana na SCADA sustavu 14

2.2 Izračun gubitaka u stvarnom vremenu prema procjeni države u kombinaciji s Excelom .. 14

2.3 Metoda bazirana na tipičnom danu mjerenja stvarnih opterećenja i procjene stanja 15

2.3.1 Metoda izbora snage i količine električne energije 15

2.3.2 Analiza uklopnog stanja u stvarnom vremenu i dopuna parametara mrežnih shema ... 16

2.3.3 Prilagodba mjerene konfiguracije i analiza izračuna rezultata gubitaka 16

2.4 Teorijski izračun indeksa gubitaka voda za tri sveobuhvatne metode 17

2.5 Ekvivalentna metoda čvorova snaga za izračun gubitaka 17

2.6 Izračun gubitaka u prijenosnim mrežama baziran na Tri moda 17

3. VODOVI I GUBICI U ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA 19

3.1 Općenito o vodovima i podjele gubitaka u elektroenergetskim mrežama 19

3.1.1 Općenito o vodovima 19

3.1.2 Podjele gubitaka u elektroenergetskim mrežama 20

3.2 Vrste gubitaka u energetskim mrežama 22

3.2.1 Gubici djelatne i jalove snage 22

3.2.2 Korona 24

3.2.3 Skin efekt 27

3.3 Nadzemni vodovi 27

3.3.1 Općenito 27

3.3.2 Vodiči 28
3.4 Kompaktni nadzemni vodovi 32
3.5 Izbor stupova 33
3.6 Kompaktiranje dalekovoda 34
3.7 Utjecaj kompaktnih dalekovoda i nove generacije vodiča na gubitke u prijenosnim mrežama 36
3.7.1 Parametri voda ovisni o frekvenciji 37
4. UTJECAJ KOMPAKTIRANJA NA PARAMETRE DALEKOVODA 43
4.1 Utjecaj nove generacije vodiča na gubitke u prijenosnim mrežama 45
5. IZRAČUN GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE 47
5.1 Električni gubici u vodu i indeks gubitaka voda 47
5.2 Izračun i analize gubitaka u vodu 48
5.3 Izračun krivulja godišnjih gubitaka električne energije za planiranje i dizajniranje energetske mreže 51
5.4 Teorijski izračun gubitaka električne energije u elektroenergetskoj mrežni 54
5.4.1 Klasifikacija gubitaka električne energije 54
5.4.2 Izračun gubitaka elektroenergetskih nadzemnih vodova 55
5.4.3 Izračun gubitaka uzrokovanih koronom pogonskog voda 58
5.4.4 Izračun gubitaka toplinskog otpora nadzemnih vodova 59
6. IZRAČUN GUBITAKA U VISOKONAPONSKIM MREŽAMA 62
6.1 Metode mjerenja gubitaka u stvarnom vremenu 62
6.1.1 Metoda procjene stanja 62
6.1.2 Procjena stanja bazirana na SCADA sustavu 63
6.1.3 Izračun gubitaka kombiniranjem procjene stanja sa excelom 64
6.1.4 Metoda bazirana na tipičnom danu mjerenja stvarnih opterećenja i procjene stanja ... 64
6.1.5 Sveobuhvatna metoda analize gubitaka na temelju podataka sustava realnog vremena 66
6.1.6 Ekvivalentna metoda čvorova snaga za izračun gubitaka u visokonaponskim mrežama 68

6.1.7 Dvodimenzionalni red za izračun gubitaka u energetskim mrežama 68
6.1.8 Izračun gubitaka električne energije u mreži 68
6.2 Izračun gubitaka u prijenosnim mrežama baziran na Tri moda 70
6.3 Izračun gubitaka u prijenosnim mrežama baziran na poboljšanom metodom Tri moda 72
7. PRIMJERI PROCJENE GUBITAKA U PRIJENOSNOJ MREŽI 74
7.2 Izračun gubitaka u prijenosnoj mreži pomoću MATLAB alata 87
7.3 Algoritam za izračun gubitaka na prijenosnim mrežama zasnovan na metodu tri moda 89
8. ZAKLJUČAK 91
9. LITERATURA 93
References 93
POPIS SLIKA 99
POPIS TABLICA 100
SAŽETAK 101
ABSTRACT 102
ŽIVOTOPIS 103

1. UVOD

Gubici snage i energije u mrežama elektroenergetskog sustava postaju sve aktualniji i bitniji s obzirom na kontinuiran prirast potrošnje električne energije, prijenosne problematike i tržišnog odnosa u elektroenergetskom sektoru. Problematika gubitaka u prijenosnim i distributivnim mrežama uvijek je vrlo aktualna. Gubitak u prijenosnoj mreži je izravan trošak koji se pokriva iz profita koji ostvaruje tvrtka za prijenos električne energije. U razvijenim zemljama kao što je Njemačka, prijenosni vodovi su uglavnom preopterećeni, a samim tim i gubitci prijenosnim vodovima su veoma značajni. Interes za ostvarenjem što većeg profita u zadovoljavanju potreba potrošača, zadovoljavanje ekoloških i socijalnih zahtjeva, doveli su do potrebe za stalnim unaprjeđenjem prijenosnih vodova, posebice u smislu povećanja prijenosnih kapaciteta.

Suvremene tehnologije izrade dalekovodnih užadi koriste najnovije materijale kao vodljivi dio tako i za mehanički dio užeta (jezgru). Ekološki, imovinsko-pravni i financijski zahtjevi su strožiji i iziskuju nova tehničko-tehnološka rješenja izvedbe dalekovoda.

Jedno od rješenja zadovoljavanja ekoloških, estetskih i imovinsko-pravnih zahtjeva jeste i kompaktiranje dalekovodnih stupova, odnosno kompletnih prijenosnih vodova.

Vijek trajanja prijenosnih vodova je relativno dugačak, investicije za izgradnju novih prijenosnih vodova su vrlo velike pa samim time gubici koji se njima javljaju na zauzimaju posebnu pozornost. Veliki broj istraživača se bavi gubicima u mreži.

Teorijsko određivanje gubitaka u elektroenergetskom sustavu (EES) je važan ekonomski indikator za pripremu plana razvoja i upravljanja EES [1]. Stoga je vrlo važno razviti pouzdane i napredne metode proračuna gubitaka električne energije EES i prezentirati što točnije podatke o gubicima u EES.

U radu [2] prezentirane su poteškoće prilikom dobivanja potrebnih izmjerenih veličina za određivanje gubitaka.

U referencama [3] i [4] navedene su metode za izračun gubitaka u prijenosnim vodovima koje se najčešće koriste u praksi. Smanjenjem rizika za odabir pogrešnog parametra povećava se pouzdanost metoda.

Na gubitke u EES utječu mnogi čimbenici kao što su proizvodnja i potrošnja u nekom trenutku, vremenske prilike [5], geometrija voda [6] i sl., te se proračuni na vodovima u EES izvode za određeno razdoblje [3] i [4].

Gubici na dalekovodima ovise o naponu i struji. Odnos ovih gubitaka prezentiran je u radu [7].

Gubici ovisni o naponu ne ovise od opterećenja kao gubitci koji su ovisni o struji. Obje ove vrste gubitaka ovise o vremenskim prilikama [5].
U radovima [8] [9] [10] [11] obrađeni su načini minimizacije gubitaka na prijenosnim vodovima.
U fazi vođenja i upravljanja sustava opterećenja u mreži se mogu klasificirati u tri moda: maksimalni mod, minimalni modi i normalni radni mod [3] [12].
U ovom članku prikazana je modificirana metoda izračuna gubitaka u prijenosnim mrežama baziran na tri moda čiji su rezultati uspoređivani sa realnim izmjerenim vrijednostima gubitaka jednog prijenosnog područja.
Za potrebe analize korišten je softverski paket MATLAB u kome su programirani izvorna metoda izračuna gubitaka u prijenosnim mrežama baziran na tri moda prezentirana u [3] i modificirana metoda koja je korištena u ovom radu.

1.1 Hipoteza

Sve šira primjena obnovljivih izvora energije i izgradnja novih proizvodnih kapaciteta zahtijeva i razvoj prijenosne mreže, a posebice samih prijenosnih vodova (dalekovoda). Dalekovod, kao ključan element prijenosne mreže, neprestano se razvija u smislu izvedbenih tehnologija, njegovog nadzora i zahtjeva vezanih za okoliš.

Izvorni znanstveni doprinosi doktorskog rada su:

- Modificirana metoda za izračun gubitaka u prijenosnim mrežama zasnovana na algoritmu Tri moda,
- Algoritam za smanjenje pogreške izračuna gubitaka korištenjem podataka iz SCADA sustava,
- Utjecaj kompaktiranih dalekovoda i nove generacije vodiča na gubitke u prijenosnim mrežama.

U istraživanju su postavljena tri glavna cilja dokazivanja znanstvenih doprinosa ove doktorske disertacije.

Prvi cilj je razviti novu metodu koja će imati visoke performanse u pogledu brzine i točnosti rezultata. Ovom metodom bit će stavljen naglasak na nivo prijenosne mreže, opterećenje te na krivulju opterećenja. Također, bit će uzeta u obzir neodređenost opterećenja mreže.

Drugi cilj je postavljen u iskorištavanju podataka sa kojima se već raspolaže. S obzirom da je metoda relativno jednostavna i brzo se dolazi do rezultata, jednostavna je i implementacija na

računalu. U istraživanjima iznesenim u ovom radu dan je i algoritam metode koji može koristiti podatke iz SCADA sustava.

Treći cilj razmatra suvremene tehnologije izrade dalekovodnih užadi koji koriste najnovije materijale kako za vodljivi dio tako i za mehanički dio uzeta (jezgru). Ekološki, imovinsko-pravni i financijski zahtjevi su strožiji i iziskuju nova tehničko-tehnološka rješenja izvedbe dalekovoda.

Povećanje prijenosnih kapaciteta dalekovoda traži i trajni nadzor istih u svim vremenskim uvjetima kako bi se optimalno iskoristili prijenosi kapaciteti postojećih dalekovoda i mogućih budućih. Razvoj novih tehnologija iziskuje promjenu propisa i normativnih akata za prijenosne dalekovode.

1.2 Organizacija i struktura doktorske disertacije

Doktorska disertacija proistekla je iz istraživanja provedenim prema ciljevima koji su navedeni u hipotezi disertacije. Doktorska disertacija podijeljena je u osam sljedećih poglavlja:

Poglavlje 1. daje uvodni pregled u područje gubitaka električne energije sa osvrtom na povećanje kapaciteta prijenosne mreže, na nove materijale za izradu vodiča i nove tehnologije za izradu dalekovodnih stupova. Također, u ovome je poglavlju postavljena hipoteza doktorske disertacije s navedenim ciljevima istraživanja.

Poglavlje 2. predstavlja pregled većeg dijela dosadašnje literature koja obrađuje promatranu problematiku. Koncept pregleda literature prati postavljene ciljeve doktorske disertacije.

Poglavlje 3. sadrži općeniti pregled gubitaka u mrežama elektroenergetskog sustava. U ovom poglavlju dane su osnovne definicije i pojmovi vezani za vodove, gubitke i vrste gubitaka u elektroenergetskim mrežama. Zatim, dane su osnove o vodičima, novim izvedbama vodiča i kompaktiranim dalekovodnim stupovima.

Poglavlje 4. razmatra utjecaj kompaktiranja na parametre dalekovoda. Pored kompaktiranja razmatran je i utjecaj nove generacije vodiča na gubitke u prijenosnim mrežama.

Poglavlje 5. u ovom poglavlju predstavljeni su izračuni gubitaka električne energije s naglaskom na gubitke u dalekovodu. Dan je pregled analiza, odnosno metoda za izračun gubitaka.

Poglavlje 6. odnosi se na izračun gubitaka u visokonaponskim mrežama. Dan je pregled metoda koje se koriste za izračun gubitaka u visokonaponskim mrežama. Također, u ovom poglavlju prezentirana je modificirana metoda Tri moda.

Poglavlje 7. odnosi se na prezentiranje primjera, odnosno testiranje metode predložene u Poglavlju 6. Testiranje je provedeno kroz realne primjere i izvršen je izračun pomoću nekoliko metoda te je izvršena usporedba rezultata.

Poglavlje 8. je zaključak doktorske disertacije prezentirane u ovom doktorskom radu. U zaključku su navedene činjenice do kojih se došlo tijekom istraživanja. Ovo poglavlje je kratak opis cijele doktorske disertacije uz komentare i zapažanja do kojih se došlo tijekom istraživanja.

2. PREGLED LITERATURE I PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Problematika gubitaka električne energije u elektroenergetskim mrežama je dosta dobro obrađena u literaturi. Ova činjenica zasniva se u velikom broju literature posebice znanstvenih i stručnih radova koji su objavljeni u časopisima i na mnogobrojnim konferencijama. Uočljivo je znatno povećanje broja radova u posljednjih petnaestak godine. Ovo se može objasniti povećanom potrebom za iskorištenje dalekovodnih vodova, posebice u visokorazvijenim zemljama. Pregledom radova koji se bave gubicima električne energije u elektroenergetskim mrežama uočljiva je velika raznolikost u pristupima rješavanja ove problematike. Naime, problematika gubitaka električne energije u vodovima može se promatrati kroz nekoliko gledišta problema. U osnovi gubici su podijeljeni u:

- tehničke gubitke
- ne tehničke gubitke.

Dalje, tehnički gubici mogu se podijeliti na gubitke ovisne o struji i gubitke ovisne o naponu, dok ne tehnički gubitci mogu nastati iz nekih drugih razloga kao što su: neodržavanje, neispravni ili neodgovarajući mjerni uređaji, nesimetrično opterećenje i sl.
S obzirom na kompleksnost problema, vrlo je teško dati pregled literature koji će istodobno obuhvatiti sve gubitke na vodovima. S tim u vezi, ovdje će se dati prikaz dijela literature s naglaskom na ciljeve dane u hipotezi.

Četiri su parametra koji opisuju realne nadzemne vodove kao element elektroenergetskog sustava (EES). To su djelatni otpor, induktivitet, kapacitet i vodljivost. Ovi parametri su raspoređeni duž voda i zajedno čine seriju impedancije [1]. Konstante voda su karakteristične veličine pomoći kojih se definiraju električne prilike na vodu u svim pogonskim slučajevima [2], [3] i [5]. Kako bi se olakšala analiza i ispravno razmotrili različiti uzroci fenomena gubitaka moguće ih je podijeliti u dvije skupine, tehničke i ne tehničke gubitke, autori u radovima [5], [6], [13] i [14] dali su opis tehničkih i ne tehničkih gubitaka. Informacije gdje nastaju gubici na prijenosnom i/ili distribucijskom sustavu važno je za pravilno raspoređivanje troškova tih gubitaka na kupce i za maksimiziranje učinkovitosti rada sustava [15]. Ne tehnički gubici mogu nastati iz raznih razloga kao što neodržavanje, neispravni ili neodgovarajući mjerni uređaji, nesimetrično opterećenje [5], [14] i [16]. Gubici u prijenosnim mrežama manji su od onih u distribucijskim [17] i [18].

Poznato je da su konstante kod idealnog voda jednake nuli te za razliku od idealnog voda karakteristike realnog voda opisane su konstantama voda [1], [2], [5] i [19].

Korona je fenomen gdje električno polje u blizini vodiča dalekovoda može biti dovoljno jako da proizvede električno pražnjenje koje može ionizirati zrak, stvoriti plazmu i proizvesti ozon. Ovo električno pražnjenje obično je praćeno zvukom i radio smetnjama. Ionizirani naboji u blizini površine vodiča uzimaju energiju iz opskrbnog sustava i na taj način dolazi do gubitka energije zbog korone [20] i [21]. U slučaju protjecanja izmjenične struje kroz vodič gustoća struje je najmanja u sredini vodiča, a najveća blizu površine vodiča. Ta pojava se naziva skin efekt. Postoji mnogo izvrsnih radova koji se bave problematikom skin efekta i pražnjenja dalekovoda. Prema tome, inženjeri dobro razumiju ovaj problem te provode korake za smanjenje utjecaja na gubitke. Također to je jedan od primarnih čimbenika u projektiranju dalekovoda za visokonaponske dalekovode (obično iznad 200 kV), osobito u nepovoljnim vremenskim uvjetima ili na velikim nadmorskim visinama gdje smanjena gustoća zraka može imati štetan učinak. S tim u vezi autori su do detalja opisali skin efekt što između ostalog znači da pri snažnom skin efektu struja teče uglavnom ispod same vanjske površine vodiča, a gotovo nikad u sredini vodiča. U literaturi je dat način za smanjenje utjecaja skin efekta [5], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32] i [33].

Dobro je poznato da se za prijenos električne energije mogu se koristiti nadzemni vodovi, nadzemni kabeli i podzemni kabeli [1], [2], [3], [5], [15], [20], [24], [34] i [35]. U navedenoj literaturu detaljno su obrađeni vodiči, materijal od koji se vodiči izrađuju, čelična jezgra, izvedbe vodiča, itd. ACSR vodič sadrži čeličnu jezgru, dok ACCC vodič koristi hibridnu jezgru, jezgru sačinjenu od ugljika i staklenih vlakana koja nudi veću čvrstoću i manju masu u usporedbi s ostalim tipovima konstrukcijskih jezgri [36] i [37]. U posljednje vrijeme sve se više pažnje posvećuje novim tehnikama izrade vodiča. Glatke trapezoidne niti ACCC vodiča mogu znatno poboljšati performanse vodiča u usporedbi s okruglim dizajnom žice istog promjera. Moderna tehnologija izrade smola koje se može prilikom proizvodnje vodiča također poboljšavaju svojstva vodiča. Mnogo je autora i radova napisano na temu izrade novih vodiča u kojima su prednosti ACCC vodiča u odnosu na tradicionalni vodič prikazani su u radovima [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45] i [46].

Sve je češća potreba za kompaktiranjem nadzemnih vodova iz razloga što vremenom nailazimo na sve veće zahtjeve za dalekovodima kada je u pitanju prostorno planiranje i usklađivanje svih funkcija prostora na određenom području. U prostornim planovima promatranog područja i

elektroenergetske potrebe imaju važnu ulogu, što rezultira odgovarajućim koridorima za dalekovode [35]. Kompaktiranje dalekovoda je složen i multidisciplinaran proces kod kojih su u većini slučajeva vodiči bliži nego u slučaju tradicionalnih stupova [47], [48], [35], [49] i [50]. Ekološki, imovinsko-pravni i financijski zahtjevi za izbor stupova dalekovoda su sve strožiji i iziskuju nova tehničko-tehnološka rješenja izvedbe dalekovoda [2], [35], [37] i [51].

Kompaktiranje dalekovoda je rezultat strategije čuvanja prostora [52]. Glavna nastojanja usmjerena su na pronalaženje oblika i konstrukcija dalekovodnih stupova, kao i novih materijala za njihovu izradu te na pronalaženje novih rješenja za izolaciju vodiča [34], [35] i [52].

Gubici u dalekovodima su nezaobilazna pojava, bez obzira o kakvim se radi dalekovodima. Više je čimbenika koji utječu na gubitke u dalekovodima. U ovoj doktorskoj disertaciji razmatrani su parametri realnog voda i njihov utjecaj na gubitke. Mnogo je napisano radova vezano za ovisnost parametara o pojedinoj električnoj veličini. Autori u svojim radovima [53], [54], [55] i [56] prikazali su neke učinke frekventno ovisnih parametara voda u slučaju kompaktiranja dalekovoda.

Gubitak energije elektroenergetske mreže jedan je od ključnih čimbenika koji utječu na ekonomski rad elektroenergetskih sustava [57]. U mnogim slučajevima unutar nacionalnih kompanija gubici električne energije voda obično se izračunavaju oduzimanjem ukupne „predane količine snage“ od ukupnog „električnog napajanja“ [1], [5], [33], [37], [58] i [59]. Budući da se snaga potrošača mijenja tijekom dana, kako bi se dobio bolji uvid u gubitke mreže formira se krivulja opterećenja svakog važnog potrošača ili dijela mreže [60]. Određivanje gubitaka se provodi eksperimentalnim putem, ali je moguće na temelju mjerenih podataka izračunati gubitke korone prema Peekovoj formuli koja se isto temelji na eksperimentalnim radovima [61]. Općenito, gubici izazvani koronom bi trebali biti 10% manji u odnosu na gubitke uzrokovane toplinskim zagrijavanjem [5] i [62]. Autori u [5] prezentirali su korigiranu Peekovu formulu [61] i [63] koje bi se mogle koristiti za izračunavanje kritičnog intenziteta polja E_0 (kV/cm) prilikom nastajanja korone. Za izračunavanje gubitaka električne energije nadzemnih vodova, treba uzeti u obzir temperaturni porast izazvan strujom opterećenja i temperaturu okolnog zraka [5], [58], [64] i [65].

Za izračun gubitaka u visokonaponskim mrežama elektroenergetske tvrtke obično koriste 24 sata dnevno opterećenje. Koriste podatke o aktivnoj i reaktivnoj električnoj energiji svakog sata za izračunavanje prosječne aktivne snage (P_{av}) i jalove snage (Q_{av}), zatim računskim putem dobivaju se gubici električne energije u danu [66]. SCADA sustavi u dispečerskim centrima

nekih zemalja, u regionalnim mrežama vrše ažuriranje podataka potrebnih podataka u jedinici vremena [67]. Koriste se i matematičke metode za analize integracije tri vrijednosti, stoga se očekuju pouzdanije vrijednosti teorijskih gubitaka voda [68].
Metoda tri moda provodi praktičan i stvaran izračun vrijednosti izmjerenih tokova snaga i tipičnih opterećenja u tri točke krivulje trajanja opterećenja i dalje ga koristi ga za dobivanje odgovarajućih prosječnih gubitka snage pod tipičnim svakodnevnim opterećenjima [5], [12], [69] i [70].

U literaturi velika pozornost se posvećuje metodama mjerenja gubitaka u realnom vremenu. Metode računalnih izračuna opterećenja i tokova snaga koja je usvojena za izračun gubitaka električne energije u visokonaponskim mrežama i online proračun trebao bi se izvoditi sukladno mogućnostima obrade podataka. U većini metoda za izračun gubitaka prijenosne mreže potrebni su proračuni opterećenja pojedinih grana, a potrebni podaci se dobivaju iz SCADA sustava. U ovom poglavlju spomenut ćemo neke od metoda koje najčešće susrećemo u literaturi [5], a detaljno su opisane u poglavlju 6. ove doktorske disertacije:

2.1 Funkcija i metoda procjene stanja

2.1.1 Funkcija procjene stanja

Procjena stanja podrazumijeva procesuiranje podataka u realnom vremenu i to u vremenskoj sekciji promatranog sustava. Prilikom rada nekog elektroenergetskog sustava dio od promatranih, odnosno mjerenih veličina trebao bi da bude vrijednost napona čvora, fazni kut, snaga i drugi relevantni podaci značajnih komponenti sustava kao što su elektrane, trafostanice, itd. Veoma često primkom prikupljanja podataka iz sustava dobivaju se netočni podaci, oštećeni ili promijenjeni radi mnogih nepoželjnih utjecaja. Takve podatke potrebno je identificirati i isključiti iz daljnjih analiza.
Dakle, procjena stanja je metoda korištena za učenje sveobuhvatnih radnih uvjeta sustava unutar nekompletnih mjerenih podataka. To je vrsta digitalnog filtriranja podataka i mogućnost da predviđanja i ispravljanja netočnih varijabli ukoliko se ima odgovarajući broj točnih podataka pravilno raspoređenih u sustavu.

2.1.2 Metode procjene stanja

Razlika između algoritma procjene stanja i proračuna tokova stanja je u broju mjerenih točaka. Odnosno, broj mjernih točaka je viši u odnosu na sustavne varijable, a time je broj jednadžbi viši u odnosu na varijable koje se računaju. Zbog pogrešaka u mjerenju, ove jednadžbe su

međusobno nespojive i ne mogu izvesti definitivna rješenja. Procjena stanja usvaja optimizacijske metode procjene, a najčešće se koristi metoda najmanjih kvadrata koja ima za cilj da se minimalizira zbroj kvadrata pogrešaka u svim mjernim točkama, dobivajući tako skup optimalnih procjena varijabli stanja sustava. Rezultati dobiveni procjenom stanja precizniji su od prikupljenih vrijednosti izravnog mjerenja i smanjuju pogreške u mjerenju.

2.1.3 Procjena stanja bazirana na SCADA sustavu

Trenutačno većina SCADA sustava vrši očitavanje mjerenih podataka, svake tri sekunde koriste dva moda snimanja svakih pet minuta i svakih sat vremena. Učinkovita procjena stanja ostvaruje se u razdoblju snimanja u roku od pet minuta. To znači da se detektiraju pogrešni podaci u dopune podaci koji nedostaju. Posljednjih godina postignut je napredak u brzom procjenjivanju najmanje kvadrata i brzom PQ dekompozicijom procjene stanja koja se koristi za proračun procjene stanja.

2.2 Izračun gubitaka u stvarnom vremenu prema procjeni države u kombinaciji s Excelom

Početkom dvadeset prvog stoljeća neke zemlje gdje je razina primjene SCADA sustava bila visoka započele istraživati primjenu procjene stanja u mjerenju gubitaka u stvarnom vremenu, takve procjene svele su se na tri koraka:

1. Modifikacija softvera za procjenu stanja da omogućava izlaz koji će uključiti snagu na obje strane svake grane.
2. Uspostavljanje ACCESS baze podataka koja uključuje sljedeća polja podataka: (i) naziv grane (linije ili transformatora), (ii) vrijeme početka proračuna gubitka snage, (iii) vrijeme završetka proračuna gubitka snage, (iv) prenesena aktivna snaga, (v) posljednja prenesena aktivna snaga, (vi) proračun gubitaka na liniji i (vii) posljednji proračun gubitaka. Sedmo polje predstavlja alternativni gubitak snage u slučaju da se ne može izračunati procjena stanja ili se nalazi mnogo pogrešaka u očitavanim podacima.
3. Unos proračuna gubitka snage u ACCESS bazu podataka za analizu procesa gubitka snage za buduće analize. Usvojiti Excel obrazac sa funkcijama i formulama za pretvaranje električnih veličina u danom vremenu.

2.3 Metoda bazirana na tipičnom danu mjerenja stvarnih opterećenja i procjene stanja

Tipičan dan je dan u kojem su tipični način rada, dnevna opskrba električnom energijom, razina opterećenja, temperaturni uvjeti i drugi čimbenici koji utječu na gubitke. Međutim, način rada, raspodjela električnih veličina i temperaturni uvjeti nisu uvijek tipični za vrijeme mjerenja velikih opterećenja pa je potrebno razmotriti različite čimbenike za prilagođavanje parametara izračuna gubitaka i odabir posebne metode izračuna.

2.3.1 Metoda izbora snage i količine električne energije

1. *Izračun gubitaka metodom snage*

Struja i napon svake grane dobiju se kroz analizu mreže i izračun tokova aktivne i reaktivne snage na generiranoj i potrošačkoj strani, kao i napon sabirnica za jedan sat.

Ova metoda ima dvije prednosti: jedna je da se jalove snage tako da se raspodjela jalove snage i uvjeti napona mogu lako istodobno analizirati; drugi je način da se, zahvaljujući zapisima protoka opterećenja u stvarnom vremenu, izračunati gubici svake grane mogu lako provjeriti kako bi se izbjeglo prekomjerno izobličenje izračuna gubitaka uslijed bilo kakvih promjena u mreži mreže. Nedostatak ove metode je što se ne koristi izmjerena raspodjela električnih veličina za velika opterećenja sustava, a gubici električne energije ne mogu biti izravno povezani s električnim vrijednostima, što utječe na pouzdanost rezultata izračuna stope gubitaka za tipični dan.

2. *Izračun gubitaka metodom količine energije*

S prikazom raspodjela količine električne energije reprezentativnog dana i prikazom tipične krivulje opterećenja svakog opterećenja i čvorišta, uvodi se pojam koeficijenta izlazne raspodjele opterećenja. Pretpostavimo da postoji *n* opterećenja; maksimalna vrijednost tipične krivulje opterećenja svakog opterećenja i čvorišta, uvodi se pojam koeficijenta izlazne raspodjele opterećenja. Računajući ukupnu količinu energije cijele elektroenergetske mreže i koeficijenta izlazne raspodjele opterećenja računaju se gubici reprezentativnog dana metodom količine električne energije.

2.3.2 Analiza uklopnog stanja u stvarnom vremenu i dopuna parametara mrežnih shema

Metoda tipičnog dana treba 24-satni izračun tokova snaga, ali i povezanost elemenata mreže može varirati unutar 24 sata. Teorijski izračun gubitaka treba biti prikazan za gubitke uz uvjete sa najčešće povezivanom elementima mreže tako da mrežnu shemu usvojenu metodom tipičnog dana treba analizirati u realnom vremenu, uključujući ažuriranje podataka u stvarnom vremenu ovisno o načinu rada i automatskog dodjeljivanja svake nove formirane mreže sheme. Općenito, postoje tri koraka u navedenoj analizi kako slijedi:

1. *Analiza povezanosti elektroenergetskih čvorišta*

Prema već postojećim podacima o prekidačima i tablici uključenih i isključenih prekidača prikupljenih SCADA sustavom. Spojena čvorišta su sažeta u jedno čvorište, a trafostanice su u konačnici reducirane u svega nekoliko čvorišta.

2. *Analize mrežnih sustava*

Prema prethodno prikupljenim informacijama tablice grana i dopunjene tablice grana prikupljenih SCADA sustavom, povezivanje čvorišta na oba kraja izmjenjujući bazne grane po principu istog naziva veze. Povezana čvorišta su pojednostavljena u podsustavu. Rezultat analize sustava mreže je podijeliti povezana čvorišta u podsustave.

3. *Formiranje imena čvorišta*

Zajednička imena čvorišta su formirana za pojednostavljena čvorišta prikupljenih iz navedena dva koraka u cijeloj mreži i služi kao osnova parametara mrežnih struktura i operativnih podataka.

2.3.3 Prilagodba mjerene konfiguracije i analiza izračuna rezultata gubitaka

Za velike sustave s mnogo čvorišta, mjerni sustavi trebaju biti podijeljeni u podsustave dok se sva čvorišta svakog podsustava trebaju analizirati. Potrebno je utvrditi i ulaznu snagu čvorišta. Kada procjena stanja daje nepotpune ili pogrešne podatke, ona uzrokuje nedovoljne ulazne snage u više čvorišta podsustava, tada se tokovi snaga ovog podsustava ne mogu izračunati i njegove čvorišta treba rekonfigurirati.

U izračunu gubitaka 24-satnih tokova snaga rezultati izračuna se mogu usporediti s opterećenjem tokova snaga zabilježenih u realnom vremenu. Ako su približno jednaki, pod maksimalnim, minimalnim modom, rezultati proračuna metode bazirane na tipičnom danu se smatraju pouzdanijim. Ako je veća razlika u načinu rada, u stvarnom vremenu analiza mrežne sheme mora biti provedena ponovno kao i rezultati proračuna po stvarnim opterećenjima. Metoda

bazirana na tipičnom danu zahtijeva tipičnu analizu za povezivanje u mrežu. Ona pokazuje da 24-satni izračun tokova snaga na tipičnom danu ima utjecaj na tri načina rada, te nema poteškoća i nedostataka. Ako se mogu definirati dijelovi tri različita moda, izračun tokova snaga u tri točke nije problematičan.

2.4 Teorijski izračun indeksa gubitaka voda za tri sveobuhvatne metode

Ova metoda daje većinu informacija u realnom vremenu i sveobuhvatno nudi visoko pouzdane vrijednosti gubitaka u realnom vremenu na temelju izračuna tri teorijska indeksa gubitaka voda. Takvi se gubici procjenjuju kao dovoljno pouzdani iz perspektive matematičke obrade. Zaključno, ova metoda je učinkovita kratkoročno za teorijski izračun gubitaka voda u svrhu provjere no nije pogodna izračune gubitaka vodova u duljem razdoblju.

2.5 Ekvivalentna metoda čvorova snaga za izračun gubitaka

U proteklih 20 godina, ova metoda se naširoko koristi u elektroenergetskim sustavima.

2.5.1 Dvodimenzionalni red za izračun gubitaka u energetskim mrežama

Pretpostavimo da prijenosna mreža ima n jedinica izračuna gubitaka; obračunska razdoblja T; vremenski interval između mjerenja je t_0. Gubici najvećeg djela mreže unutar mjernog intervala T, mogu se dobiti sumiranjem gubitaka električne energije svake jedinicu unutar $i(T/t_0)$ intervalima T ili dobiti sumiranjem zbroja gubitaka električne energije svih jedinica u okviru svakog mjerenja intervala T.

2.5.2 Izračun gubitaka električne energije u mreži

Ako je razdoblje izračuna gubitaka električne energije jedan dan (tj 24 h), gubici električne energije u mreži mogu biti izračunati na sljedeća dva načina:

1. Pomnožimo prosječne gubitke snage svake obračunske jedinice s vremenom, a zatim ih sumiramo
2. Sumiranjem gubitaka električne energije u mreži unutar svakog sata.

2.6 Izračun gubitaka u prijenosnim mrežama baziran na Tri moda

Izračun tokova tipičnih opterećenja se provodi u tri točke, odnosno tri moda, za dobivanje odgovarajućih prosječnih gubitka snage pod tipičnim svakodnevnim opterećenjima. Očito, tri

vrste dnevnih prosjeka gubitaka radne snage mogu predstavljati ukupne gubitke energije unutar tri načina rada. Indeks gubitaka voda su na tri moda integrirani kako bi se dobio indeks gubitka unutar cijelog razdoblja, što je osnovni koncept izračuna gubitaka visokonaponskih mreža na temelju gubitaka snage u tri moda. Ukupni gubici podijeljeni u tri moda imaju različit stupanj utjecaja na ukupni indeks gubitaka: normalni način rada ima najveći utjecaj, iza toga slijedi sa minimalnim načinom rada i na koncu najmanji utjecaj maksimalnim načinom.

3. VODOVI I GUBICI U ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA

3.1 Općenito o vodovima i podjele gubitaka u elektroenergetskim mrežama

3.1.1 Općenito o vodovima

Četiri su parametra koji opisuju nadzemne vodove kao element elektroenergetskog sustava (EES). To su djelatni otpor, induktivitet, kapacitet i vodljivost. Ovi parametri su raspoređeni duž voda i zajedno čine seriju impedancije [1].

Ovi parametri nazivaju se konstantama voda. Konstante voda su karakteristične veličine pomoći kojih se definiraju električne prilike na vodu u svim pogonskim slučajevima [2].

Konstante voda su:

- djelatni otpor R [Ω]
- induktivitet L [H]
- kapacitet C [F]
- vodljivost G [S].

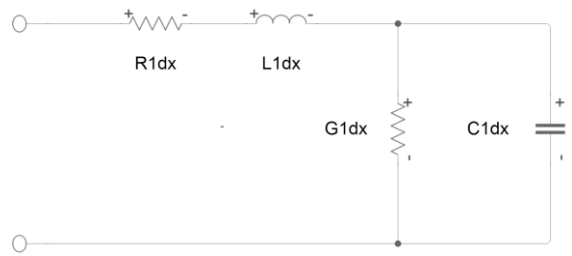
Konstante voda se navode po jedinici dužine voda, obično po kilometru i po jednoj fazi [2] pa zbog toga konstante voda označavamo kao:

- jedinični djelatni otpor R1 [Ω/ km]
- jedinični induktivitet L1 [H / km]
- jedinični kapacitet C1 [F / km]
- jedinična vodljivost G1 [S / km].

Konstante nadzemnih elektroenergetskih vodova ovise o:

- svojstvima materijala i karakteristikama opreme od koje je vod izgrađen (specifični otpor vodiča, vrsta materijala konstrukcije stupova, vrsta materijala vodiča, vrsta izolacije)
- geometrijskim svojstvima voda (dimenzije vodiča, uzdužnog profila voda, međusobna udaljenost i raspored vodiča)
- atmosferskim prilikama i sredinom u kojoj se vrši eksploatacija dalekovoda (temperatura, stupanj zaprljanosti atmosfere, kiša, itd.).

Položaj pojedinih konstanti jedne faze simetričnog trofaznog voda prikazan je na slici 1.



Slika 1. – Položaj konstanti voda duž dx [2].

Prema položaju u shemi voda [1], [2] i [5]:

- otpor i induktivitet su uzdužni parametri,
- vodljivost i kapacitet su poprečni parametri voda.

U zavisnosti od nazivnog napona voda parametri voda mogu imati različite vrijednosti. Ponekad neki od njih mogu se zanemariti u odnosu na vrijednost drugih parametara. U električnim proračunima često ne uzimaju sva četiri parametra [2] i [5]:

- Pri električnim proračunima nadzemnih vodova srednjih napona (10, 20 i 35 kV) uzima se u obzir otpor i induktivitet
- Pri električnom proračunu vodova napona 110 kV i višeg uzima se u obzir otpor, induktivitet i kapacitet, a u nekim proračunima i vodljivost
- Kod vodova najviših napona (400 kV i više) uzimaju se u obzir sva četiri parametra
- Kod vodova za prijenos električne energije se u određenim slučajevima, npr. pri proračunima električnih prilika u dugim vodovima, zanemaruju otpor i vodljivost, te se uzimaju u obzir samo induktivitet i kapacitet.

3.1.2 Podjele gubitaka u elektroenergetskim mrežama

Sa stajališta operatora mreže, gubici su neizbježan trošak prilikom prijenosa električne energije koji uzrokuje dodatno opterećenje elektroenergetskog sustava. Kako bi se olakšala analiza i ispravno razmotrili različiti uzroci fenomena gubitaka moguće ih je podijeliti u dvije skupine [5], [6], [13] i [14]:

- tehničke gubitke
- ne tehničke gubitke.

Tehnički gubici u komponentama elektroenergetskog sustava mogu se podijeliti na:

- gubitke ovisne o naponu
- gubitke ovisne o struji.

Informacije gdje nastaju gubici na prijenosnom i/ili distribucijskom sustavu važno je za

pravilno raspoređivanje troškova tih gubitaka na kupce i za maksimiziranje učinkovitosti rada sustava [15]. Gubici ovisni o naponu, odnosno stalni gubici, posljedica su održavanja elektroenergetskog sustava u stanju stalne pogonske pripravnosti za opskrbu kupaca električnom energijom. Ovdje pripadaju gubici u jezgrama transformatora, dielektrični gubici voda i kondenzatorskih baterija. Gubici ovisni o struji posljedica su protjecanja struje kroz komponente elektroenergetskog sustava i ovisni su o stupnju korištenja mreže, tj. o količini prenesene energije, odnosno ovisni su o kvadratu struje.

Ne tehničke gubitke definiramo kao razliku ukupnih gubitaka i tehničkih gubitaka električne energije. Ne tehnički gubici mogu nastati iz raznih razloga kao što neodržavanje, neispravni ili neodgovarajući mjerni uređaji, nesimetrično opterećenje [5], [14] i [16].

Gubici električne energije u prijenosnim mrežama mogu se podijeliti prema:

a) mjestu njihovog nastanaka (elementi prijenosne mreže) i

b) ovisnosti o opterećenju (gubici neovisni o opterećenju - stalni gubici, gubici ovisni o opterećenju - promjenljivi gubici).

Gubici u prijenosnim mrežama manji su od onih u distribucijskim [17].

Električni vodovi u pogonskom stanju su permanentni izvori topline u skladu s Jouleovim zakonom. Prije puštanja u pogon oni imaju temperaturu jednaku temperaturi svoga okoliša. Nakon puštanja u pogon, temperatura vodiča se povećava i počinje prijenos topline na okoliš. Prema zakonu termodinamike, prijenos je to intenzivniji što je temperaturna razlika između vodiča i okoliša veća. To prijelazno stanje traje sve dok se ne postigne tako visoka temperatura vodiča u vodu da novoproizvedena toplina postane jednaka toplini koja se prenese na okoliš. Ta ravnoteža se ne mijenja dok se ne promijeni struja u vodu, pa govorimo o radnoj (ili pogonskoj) temperaturi voda [5] i [18].

Gubici na dalekovodima uključuju [1], [2] i [5]:

- gubitke u vodičima
- gubici isijavanja/zračenja
- gubici zagrijavanja
- gubici na spojevima
- korona

Jedna od mjera za smanjenje gubitaka vodova je da se ili smanje duljine vodova ili da se poveća presjek voda. Gubici u vodovima ovise o frekvenciji, tj. o fenomenu kojeg nazivamo skin efekt, koji će poslije biti detaljnije objašnjen. Znamo da razlika potencijala između dva vodiča dalekovoda uzrokuje dielektrično zagrijavanje, te da se s povećanjem frekvencije povećavaju i toplinski gubici u vodovima. Gubici na spojevima se javljaju kada su dva dijela dalekovoda spojena na jednom mjestu. Također se javljaju kada se na spojevima spajaju dva različita materijala vodiča. Kada je vod u pogonu, na spojevima dolazi do zagrijavanja te i određenih gubitaka.

3.2 Vrste gubitaka u energetskim mrežama

3.2.1 Gubici djelatne i jalove snage

Poznato je da kod prijenosa električne energije od izvora do potrošača putem dalekovoda (mreže) i transformatorskih stanica, mora u svakom trenutku postojati ravnoteža između snage generatora i snage potrošača [5]. Pri tome na strani potrošnje moraju biti uključeni i gubici snage kod prijenosa. Karakteristike realnog voda opisane su konstantama voda [1], [2] i [5], [19]. Za primjer uzima se dio voda u kojem struja ne mijenja svoju veličinu (primjerice dio sheme između dva opterećenja ili dio sheme između dvije vodljivosti) slika 2.



Slika 2. – Nadomjesna shema dijela voda [5].

Ukupni gubici djelatne i jalove snage kod prijenosa se sastoje iz gubitaka u pojedinim dijelovima voda (mreže) [5].

Ako opterećenja izražavamo u snagama, izračun dalekovoda (mreže) se izvodi za zadanu nadomjesnu shemu prema pojedinim dijelovima.

Vrijedi da je:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \tag{3.1}$$

Gubici djelatne i jalove snage bit će:

$$\Delta P = 3 \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}\right) \cdot R \tag{3.2}$$

$$\Delta Q = 3 \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}\right) \cdot R \tag{3.3}$$

Za prividnu snagu vrijedi da je: $S^2 = P^2 + Q^2$.

Kada se prividna snaga uvrsti u formule za gubitke djelatne i jalove snage dobivamo:

$$\Delta P = \frac{\mathrm{P}^2 + \mathrm{Q}^2}{\pi^2} \cdot R \tag{3.4}$$

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{\pi^2} \cdot X \tag{3.5}$$

Četiri vrste gubitaka djelatne snage su uzrokovane u vodu:

1. Toplinski gubici $\Delta P_1(W)$

U izravnoj je proporciji s kvadratom struje, koja je:

$$\Delta P = I^2 \cdot R \tag{3.6}$$

gdje je:

I – struja koja prolazi jezgrom voda (A),

R – zbroj otpora obje jezgre voda (Ω)

2 . Gubici u odvodu ΔP_2 (W)

U izravnoj je proporciji s kvadratom napona, odnosno:

$$\Delta P^2 = U^2 \cdot G \tag{3.7}$$

$$G = \frac{2\pi \mathrm{l}}{ln\frac{\mathrm{r}^2}{\mathrm{r}^1}} \tag{3.8}$$

gdje je:

- U – napon između jezgre voda (V)
- G – propuštanje dielektrične vodljivosti (1/Ω)
- l – duljina voda (m)
- r1 – polumjer (radijus) jezgre voda (cm)
- r2 – unutarnji polumjer (radijus) voda (cm).

3 Gubici dielektričnog magnetiziranja $\Delta P3$ (W)

U izravnoj je proporciji s kvadratom struje i frekvencijom, odnosno:

$$\Delta P^3 = I^2 \omega L \tan\delta \tag{3.9}$$

$$L = \frac{l\mu}{2\pi} ln \frac{r^2}{r^1} \tag{3.10}$$

gdje je:

- ω – izmjenična kružna frekvencija (l/s)
- $L-$ induktivitet voda (Wb/A)
- μ – magnetska vodljivost(Ωs/m).

4 Gubici dielektrične polarizacije ΔP_4(W)

U izravnoj je proporciji s kvadratom napona i frekvencije, odnosno:

$$\Delta P^4 = U^2 \omega C \tan \delta \tag{3.11}$$

$$G = \varepsilon \frac{2\pi \mathrm{l}}{ln \frac{r^2}{r^1}} \tag{3.12}$$

gdje je:

- C – kapacitet voda (F)
- ε – dielektrična konstanta voda (F/m).

Navedene četiri vrste gubitaka djelatne snage predstavljaju osnovne vrste gubitaka djelatne snage u elektroenergetskom sustavu [5]. Pored navedenog u visokonaponskim vodovima mogu se pojaviti gubici izazvani koronom.

3.2.2 Korona

Ionizirani naboji u blizini površine vodiča uzimaju energiju iz opskrbnog sustava i na taj način dolazi do gubitka energije zbog korone [20]. Dakle, korona je posebna vrsta gubitaka djelatne snage zbog ionizacije dielektričnih čestica u neposrednoj blizini površine vodiča kada je intenzitet električnog polja previsok [21].

Matematičke jednadžbe koje opisuju bipolarno ionizirajuće polje u zraku su:

$$\nabla * \vec{E} = \frac{(\rho_+ - \rho_-)}{\varepsilon_0} \tag{3.13}$$

$$\nabla * \vec{J}_\pm = \frac{\mp R_{i\rho+\rho-}}{q_e} \tag{3.14}$$

$$\vec{J}_\pm = \mu \pm \rho \pm \vec{E} \mp D \pm \nabla\rho \pm \tag{3.15}$$

$$\vec{J} = \vec{J}_+ + \vec{J}_- \tag{3.16}$$

$$\nabla\vec{J} = 0 \tag{3.17}$$

$$\vec{E} = -\nabla\varphi \tag{3.18}$$

Jednadžbe 3.13 – 3.18 su Poissonova jednadžba, uvjet kontinuiteta struje $\vec{J}_\pm$, pozitivne i negativne vektori gustoće struje $\vec{J}_\pm$, vektor ukupne gustoće struje $\vec{J}$, uvjet kontinuiteta za $\vec{J}$, i jednadžba koja se odnosi na vezu električnog polja i potencijala. ε_0 je dielektrična konstanta slobodnog prostora i μ_+ i μ_- predstavlja mobilnost pozitivnih i negativnih iona. ρ_+ i ρ_- jesu vrijednosti gustoće pozitivnog i negativnog naboja prostora, D_+ i D_- su koeficijenti difuzije pozitivnih i negativnih iona, R_i je koeficijent ionske rekombinacije u zraku, i q_e je naboj elektrona. Ove parcijalne diferencijalne jednadžbe su nelinearno povezane u prirodi, dakle nemaju analitičko rješenje osim jednostavnih geometrija poput sfernih i koaksijalna konfiguracija [71].

Zrak, kao izolacija nadzemnih vodova, uvijek je djelomično ioniziran [5]. Pod djelovanjem električnog polja, ioni se ubrzano kreću i sudaraju se sa ne ioniziranim česticama, ali pri tom sudaru ne uspijevaju da stvore nove ionizirane čestice. Ukoliko je jačina električnog polja veća i gustoća zraka manja brzina će, a time i kinetička energija ioniziranih čestica biti veća. Pri određenoj brzini ioni imaju dovoljno kinetičke energije i uspijevaju da pri sudaru stvaraju nove ione [72]. Posljedica stvaranja novih iona je da zrak postaje vodljiv. S obzirom da je između vodiča nadzemnih vodova razmak velik, neće doći do proboja između vodiča. Umjesto proboja pojavit će se tinjavo pražnjenje (izbijanje) oko vodiča. Pri pojavi korone oko vodiča se stvara vijenac ljubičastog svjetla i tako je ime i dobiveno. Pri temperaturi od +25˚C i tlaku od 760 mmHg intenzivno ioniziranje zraka oko vodiča nastaje kod jačine električnog pola od 30 kV/cm [5]. Jačina električnog polja je najveća na površini vodiča, pa je i izbijanje u zraku najveće oko samog vodiča. Na većoj udaljenosti oko vodiča električno polje je slabije, zbog čega zrak uglavnom zadržava izolacijsko svojstvo.

Nastanak korone propraćen je karakterističnim zvukom (pucketanjem) i osjećajem mirisa ozona. Kao što je prethodno spomenuto, ioniziranje zraka se vrši na račun električne energije u vodu, zbog čega je korona popraćena gubicima djelatne snage i energije. Kada je promjena napona sinusna korona je prisutna, kada je trenutna vrijednost napona bliska maksimalnoj vrijednosti, a s tim u vezi tinjava pražnjenja stalno pale i gase. Ozon stvoren pojavom korone je štetan za sam

vodič. Štetan utjecaj ozona za vodi ogleda se u tome da nagriza materijal vodiča. Dakle, pored gubitaka energije štetna posljedica korone jeste i promjena mehaničkih osobina vodiča. Pojava korona je vrlo nepoželjna na nadzemnim vodovima. Vrijednost napona pri kojem se javlja korona naziva se kritični napon. Ako je pogonski napon manji od kritičnog napona, korona se ne može pojaviti. Ukoliko je pogonski napon veći od kritičnog napona korone, pojavit će se korona.

Kritični napon korone izračunavamo po empirijskoj formuli [5] i [20]:

$$U_{kr} = U_{pr}\sqrt{\frac{3}{2}} * m_p * m_v * \delta * r * ln\left(\frac{D}{r}\right)[kV] \tag{3.19}$$

$$\delta = \frac{p}{1,013} \cdot \frac{273 + 25}{273 + \upsilon(°C)} \tag{3.20}$$

gdje je:

- δ – koeficijent koji uzima u obzir odstupanje temperature i barometarskog tlaka odnosno promjenu relativne gustoće zraka
- m_p – faktor hrapavosti vodiča/ uzima u obzir stanje površine vodiča i njegovu izvedbu
- m_v – koeficijent koji uzima u obzir meteorološke uvjete
- D – razmak između vodiča (cm)
- r – polumjer vodiča (cm) .

Kod izračuna koeficijenta m_p za okrugle vodiče, odnosno vodiče s jednom žicom, uzimamo vrijednosti od 0,93 di 0,98. Za užad od 7 žica vrijednosti istog koeficijenta će biti od 0,83 do 0,87, te za užad sa više od 7 žica vrijednosti će biti od 0,80 do 0,83. Kod izračuna koeficijenta m_v kada je lijepo (suho i vedro) vrijeme uzimamo da nam je koeficijent nešto manji, m_V =0,8 za ružno vrijeme (magla, kiša, inje, led, snijeg) m_V =1.

Iz izraza slijedi da do povećanja kritičnog napona korone dolazi povećanjem razmaka između vodiča D kao i povećanjem polumjera r. Povećanje razmaka između vodiča nije ekonomično jer poskupljuje izgradnju dalekovoda. Povećanje polumjera vodiča je mnogo učinkovitije i ekonomičnije [5].

Kod visokonaponskih dalekovoda su se počeli primjenjivati šuplji vodiči radi smanjenja korone.

3.2.3 Skin efekt

Kada kroz vodič protječe izmjenična struja javlja se nejednolika raspodjela struje. Gustoća struje unutar vodiča je (A / mm^2). U slučaju proticanja izmjenične struje kroz vodič gustoća struje je najmanja u sredini vodiča, a najveća blizu površine vodiča. Ta pojava se naziva skin efekt. To znači da pri snažnom skin efektu struja teče uglavnom ispod same vanjske površine vodiča, a gotovo nikad u sredini vodiča [5], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32] i [33]. Utjecaj skin efekta je utoliko veći ukoliko je:

- veći presjek vodiča
- veća permeabilnost materijala vodiča
- veća frekvencija struje
- veći specifični otpor materijala vodiča.

Utjecaj skin efekta na povećanje otpora pri frekvenciji od 50 Hz je neznatan kod vodiča presjeka 150 mm^2 . Naime, kod vodiča presjeka od 150 mm^2 povećanje otpora uslijed skin efekta iznosi od 0,1 do 0,5 %. Međutim, kod vodiča većih presjeka utjecaj skin efekta na povećanje otpora je znatan i ne smije se zanemariti. Tako kod vodiča presjeka uslijed skin efekta iznosi do 2% [5].

3.3 Nadzemni vodovi

3.3.1 Općenito

Za prijenos električne energije mogu se koristiti nadzemni vodovi, nadzemni kabeli i podzemni kabeli [1], [2], [3], [5], [15], [20], [24], [34] i [35]. Po jedinici prenosne snage ili energije na određenu udaljenost, prijenos kabelima (računajući ukupne troškove izgradnje i eksploatacije) nekoliko puta skuplji od prijenosa dalekovodom, pa se zato kabeli upotrebljavaju samo u specifičnim prilikama, npr. pri povezivanju otoka s kopnom, u gradskim područjima, u blizini zračnih luka, itd. [5]. Osim toga popravka nadzemnih vodova je jednostavnija i jeftinija.

Sastavni dijelovi dalekovoda su:

- vodiči koji služe za prijenos energije

- stupovi koji služe za nošenje i zatezanje vodiča. Stupovi čine oko 40 procenata troškova prenosnog voda [2], [34] i [35]
- izolatori koji služe za električno izoliranje vodiča i stupa, pribor koji služi za pričvršćivanje izolatora za stup i vodiča za izolator
- zaštitno uže ili užad koja služe za zaštitu dalekovoda od atmosferskih pražnjenja
- uzemljenje koji služe za provođenje sigurnosnih mjera za živa bića koja se mogu naći u okolini stupova ili zaštitu dalekovoda.

3.3.2 Vodiči

Za izradu električnih vodiča nadzemnih vodova koriste se razni materijali [2] i [5]. Od njih se traži dobra električna vodljivost, velika mehanička čvrstoća, dobra mogućnost obrade, otpornost protiv oštećenja, starenja i korozije i prihvatljiva cijena. Sva navedena svojstva se ne mogu naći u jednom materijalu, pa se pribjegava i kombiniranim vodičima [2].

Bakar ima od ekonomski prihvatljivih materijala najbolja električna svojstva. Kod vodiča se primjenjuje u vidu tvrdo vučenog elektrolitičkog bakra. Kao materijal vrijedan za druge grane industrije uz sva dobra svojstva malo se upotrebljava za nadzemne vodove. Kod nas se pribjegava upotreba na nadzemnim vodovima osim u posebnim slučajevima (npr. kod kontaktne mreže za električnu vuču).

Aluminij danas prevladava kao materijal za izradu vodiča za nadzemne vodove. Po mnogim svojstvima zaostaje za bakrom, osim po težini.

Usporedimo konstantu materijala α za bakar prema aluminiju, gdje je α omjer specifične mase i specifične vodljivosti [2]:

$$\alpha_{cu} = \frac{8{,}9 \cdot 10^3}{56{,}8 \cdot 10^6} = 150 \cdot 10^{-6} \left|\frac{\Omega kg}{m^2}\right| \tag{3.21}$$

$$\alpha_{al} = \frac{2{,}7 \cdot 10^2}{34{,}8 \cdot 10^6} = 77 \cdot 10^{-6} \left|\frac{\Omega kg}{m^2}\right| \tag{3.22}$$

Vidi se da će aluminijski vodič istog jediničnog otpora kao bakreni biti otprilike za polovicu lakši, tj. približno svakom kilogramu bakra odgovara pola kilograma aluminija. Kako se omjer cijene po jedinici mase kreće otprilike 1:2 … 1:2,5 u korist aluminija, to je razlog da je aluminij praktički istisnuo bakar u gradnji nadzemnih vodova, ali u obliku slitina i kombiniranih vodiča, o kojima će biti riječ kasnije.

Aluminij je osjetljiv na mehanička oštećenja i lako korodira (problematika spojeva Al-Cu).

Čelik ima vrlo loša električna, ali odlična mehanička svojstva. Zbog magnetske permeabilnosti (skin-učinak) i magnetskog zasićenja, omski otpor čeličnih vodiča nelinearan i naglo raste sa strujnim opterećenjem. Zbog toga se čelik samo iznimno upotrebljava kao materijal za fazne vodiče (npr. za savladavanje velikih raspona), pa i onda se daje prednost kombinaciji čelika i aluminija. Čelični vodiči se često primjenjuju kao zaštitna užad, ali i ovdje vodiči sa boljom vodljivošću imaju prednost. Dobra svojstva čelika koriste se, međutim, kod kombiniranih vodiča. Od korozije se čelični vodiči (bilo homogeni, bilo u kombinacijama) štite pocinčavanjem ili pak oblaganjem aluminijem ili bakrom.

Bronza je slitina bakra, kositra i silicija u raznim omjerima, da se dobiju željena svojstva.

Za poboljšanje mehaničkih svojstava žrtvuje se nešto od dobre električne vodljivosti čistog bakra.

Aldrej je slitina aluminija sa malim dodacima mangana, silicija i željeza. Ima dobra mehanička svojstva. Kod nas se aldrej nije uvriježio.

Kombinirani vodiči sastoje se od raznih konstrukcijskih vezanih žica.

Alučel je vodič s jezgrom od čelične žice ili užeta i perifernim žicama od aluminija.

Čelik preuzima mehaničko opterećenje, a aluminij ima ulogu električnog vodiča. Uzima se čelik 120. Primjenjuju se vodiči najrazličitijeg omjera presjeka aluminij - čelik. Kod nas je standardni omjer 6:1, a po potrebi 4:1, 3:1, ili neki drugi. Oznaka Al/Č.

Primjenjuje se i kombinacija **aldrej - čelik**, ali ne i kod nas.

U Sjedinjenim Američkim Državama se primjenjuju čelične žice obložene bakrom (Copperweld) ili aluminijem (Alumoweld), pletene u uže, kao i vodiči u vidu užeta djelomično bakrenim, a djelomično brončanim žicama. U Europi se rijetko upotrebljava.

Izvedba vodiča. Vodič u obliku žice upotrebljava se samo na vodovima niskog napona za male presjeke i male raspone. Upotreba žice od aluminija i aldreja je zabranjena. Dopuštena je uporaba bakrene žice presjeka najviše 16mm², i to za raspone do 80 m.

Užeta su standardni oblik za vodiče električnih vodova. Gibljiva su i to im je prednost pred žicom istog presjeka. Normalno izvedeno uže smatra se ono uže kojemu su sve žice istog presjeka. U tom slučaju je broj žica u svakom sloju točno određen, a ukupni broj žica, n , iznosi:

$$n = 3\,x^2 - 3\,x + 1$$

gdje je x broj slojeva, računajući središnju žicu kao jedan sloj. Iz tog izlazi broj žica u užetu:

n = 1, 7, 19, 37, 61 itd. Za x = 1, 2, 3, 4, 5 itd . slojeva.

Zbog spiralnog sukanja dužina žice je za 2-3% veća od dužine užeta. Faktor punjenja iznosi 75-78%.

Presjeci užeta su normirani nizom 10, 16, 25, 35, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 300 mm^2 i više.

To su nazivni presjeci, a stvarni presjeci nešto odstupaju od navedenih vrijednosti, a uzimaju se iz tablica. Kod presjeka za AL/Č (alučel) misli se samo na presjek aluminijskog plašta, ali se redovito navodi i presjek čelične jezgre. Tako su npr. za AL/Č 6:1 normirani sljedeći nazivni presjeci:

16/2,5, 25/4, 35/6, 50/8, 70/12, 95/115, 150/25, 185/32, 210/40, 240/40, 300/50 ...

Zbog postizanja ranije navedenog uobičajenog omjera AL/Č 6:1 ne može promjer aluminijskih i čeličnih žica biti jednak, pa se zato užeta često prave od žica različitog promjera za aluminij od onih za čelik.

Postoji **antivibracijska** izvedba užeta, kod kojih je čelična jezgra slobodna u aluminijskom plaštu. Frekvencije vibracija su različite i time se vibracije prigušuju. Zbog problema spajanja, rijetko se upotrebljavaju.

Šuplji vodiči nalaze primjenu kod najviših napona. Proizvodnja im je složena. Ekonomični su, stoga što se uz potreban presjek postiže veliki promjer i time smanjuje pojava korone. Šuplji vodiči od bakra mogu se izvesti od sukanih segmenata, eventualno sa spiralnim umetcima.

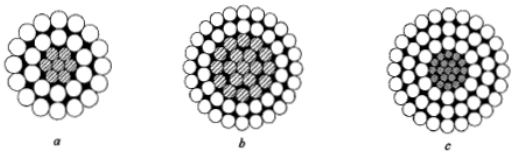
Kod vodiča od AL/Č promjer je sam po sebi dosta velik. U SAD se katkada primjenjuju vodiči s čeličnom jezgrom obloženom impregniranim papirom unutar aluminijskog plašta. To su tzv. **prošireni vodiči**. Kod visokih napona se promjer vodiča svake faze radije prividno povećava upotrebom snopova od 2, 3 i 4 užeta, čime se povećava prijenosna moć voda i ujedno sprečava korona.

Ako se uzmu u obzir sva navedena svojstva, imat ćemo s jedne strane užad od bakra, a s druge strane užad od aluminija, aluminijskih slitina i kombinacija s aluminijem. Uz jednako vrijednu vodljivost, vodič od bakra ima samo jednu prednost, a to je manja horizontalna sila uslijed manje površine izložene vjetru pa prema tome manje horizontalno opterećenje stupova u smjeru okomitom na trasu voda. Uzme li se još u obzir veća težina, dakle veća vertikalna komponenta sile na stup, proistječe da će otklon vodiča od bakra uslijed vjetra biti manji pa će i međusobni

razmak vodiča moći biti manji (ekonomičnija konstrukcija glave stupa). Ostala svojstva idu u prilog aluminijskoj grupi, čiji vodiči imaju manje vertikalne sile (jer su lakši), manje provjese (uslijed toga niži stupovi) i manju pojavu korone (jer su većeg promjera). Na slici od 1 do 8 prikazani su presjeci nekih tipičnih vodiča za nadzemne vodove.



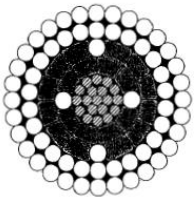
Slika 3. – Homogeno uže: a) sa 7 žica, b) s 19 žica



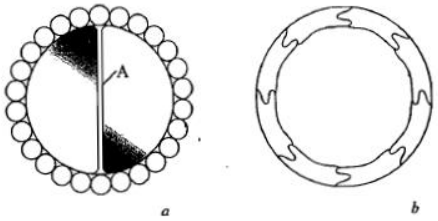
Slika 4. – AL/Č uže: a) 6:1, b) 2,2:1 c) 8:1



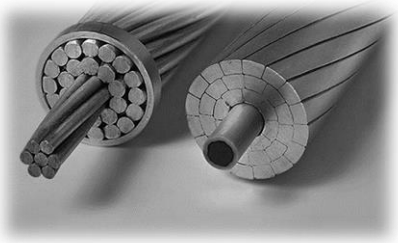
Slika 5. – Copperweld ili Alumoweld uže: a) sa 7 žica, b) sa 3 žica



Slika 6. – Expanded uže: segmentni umetci od použenog katraniziranog papira



Slika 7. – Šuplji vodiči: a) Anaconda A – usukani odstojnik b)HH



Slika 8. – Usporedba klasičnog ACSR vodiča i ACCC vodiča [37]

Daljnji se razvoj očituje u primjeni **crnih vodiča** za dalekovode [2]. To se postiže bojanjem Al/Č ili drugih užeta crnom bojom. Ponajprije to omogućuje razvoj boja otpornih na temperaturu i sve druge moguće utjecaje okoline (sunčevo zračenje, sol, agresivni plinovi) tijekom cijele životne dobi vodiča (40 godina i više). Zacrnjivanje vodiča koristi svojstvo zračenja crnog tijela, no kod utjecaja na toplinu crnog vodiča postoje dva suprotna utjecaja. Crni vodič više apsorbira toplinu sunčevog zračenja, ali bolje odaje toplinu nastalu uslijed gubitaka u vodiču.

Napretkom tehnologije i novih materijala razvijeni su novi vodiči koji su po karakteristikama bolji od svih do sada poznatih.

ACSR vodič sadrži čeličnu jezgru dok ACCC vodič koristi hibridnu jezgru, jezgru sačinjenu od ugljika i staklenih vlakana koja nudi veću čvrstoću i manju masu u usporedbi s ostalim tipovima konstrukcijskih jezgri [36]. Na slici 8. dat je prikaz ACSR i ACCC vodiča.

Lakša kompozitna jezgra omogućuje da se u ACCC vodič ugrađuje do 30 posto više aluminija bez povećanja promjera vodiča [37]. Dodani aluminijski sadržaj služi za smanjenje električnog otpora. Hibridna kompozitna jezgra ACCC vodiča također utječe na smanjenje temperature vodiča. ACCC vodič trenutačno nudi najbolju ukupnu učinkovitost u usporedbi s bilo kojim drugim vodičem na tržištu. Hibridna jezgra ACCC vodiča nije samo dvostruko čvršća od čelika, već je i 70% lakša.

Lakša jezgra omogućuje da ACCC vodič sadrži više aluminijima za ~ 28% bez da se poveća presjek vodiča ili masa. Kompaktne trapezoidne niti i glatka površina kompozitne jezgre su projektirane tako da eliminiraju vibracije prouzročene vjetrom.

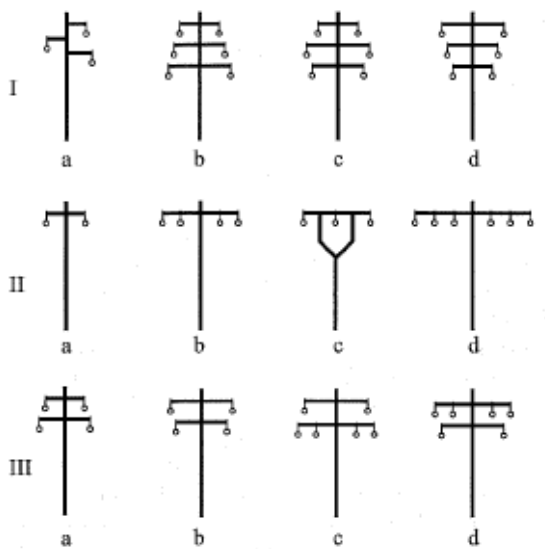
Niski koeficijent toplinske ekspanzije rezultira manjim provjesom vodiča pri velikom strujnom opterećenju. Iako je kompozitna jezgra u potpunosti elastična i neće se plastično deformirati kao uobičajene niti čeličnih vodiča, cjelokupni modul elastičnosti jezgre vodiča ACCC niži je od čelika. Nizak modul elastičnosti omogućuje ACCC vodiču mali stepen istezanja pri ekstremnim događajima opterećenja s ledom i vjetrom. Međutim, kada događaj prestane, kompozitna jezgra u potpunosti se vraća u svoje stanje koje je prethodno bilo i omogućuje aluminijskim nitima da se opuste. Prednosti ACCC vodiča u odnosu na tradicionalni vodič prikazani su u radovima [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45] i [46].

3.4 Kompaktni nadzemni vodovi

Prostorno planiranje nezaobilazni je sustav društvenog planiranja, kojim se usmjerava i osigurava usklađivanje svih funkcija u prostoru, radi ostvarivanja ciljeva i interesa društveno-ekonomskog razvoja određenog područja. U prostornim planovima promatranog područja i elektroenergetske potrebe imaju važnu ulogu, što rezultira odgovarajućim koridorima za dalekovode [35].

Udaljenost između vanjskih vodiča kod dalekovoda ovisi o naponu, odabranoj vrsti tupa i odabranom broju sustava vodiča (jedna, dvije ili više trojki), u slučaju kompaktnih dalekovoda vodiči su bliži nego u slučaju tradicionalnih stupova [47] i [48].

Širina koridora za dalekovode ovisi o naponu i širini dalekovoda, odnosno odabranoj vrsti stupa i građevine kojoj se približavanju, prelaze je ili su s njom paralelni [35] i [49].



Slika 9.– Različiti oblici glava stupova [35]

U našem području najčešće se primjenjuju stupovi, koji mogu imati glavu u obliku trokuta, jele, bačve, portala i „Y“. No u praksi su moguće razne modifikacije glava stupova kao i materijala od kojih se izrađuju stupovi (slika 9.) [2], [3] i [35]. Danas gradnja više sistemskih vodova s trojkama istog ili različitog naponskog nivoa ne predstavlja problem kako u gradnji, tako i u održavanju, a time se iskorištenje dragocjenog prostora u koridoru približava optimumu. To zahtijeva organiziraniji pristup planiranju i razradi prijenosne (110 kV i više) i distributivne (10-35 kV) mreže, te usklađivanje samo naizgled oprečnih interesa Operatora prijenosnog i distributivnog sustava unutar HEP-a [35].

U prolazima kroz naselja u pravilu se odstupa od navedenih širina koridora, već se traži zadovoljenje minimalnih propisanih udaljenosti između neotklonjenih vodiča i građevine-stambenog objekta. Time se koridor može suziti negdje i više od 50 posto [35]. Uporabom novih vodiča i smanjenjem provjesa pogoduje smanjenju dimenzija odnosno koridora prenosnih vodova [50].

3.5 Izbor stupova

Ekološki, imovinsko-pravni i financijski zahtjevi za izbor stupova dalekovoda su sve strožiji i iziskuju nova tehničko-tehnološka rješenja izvedbe dalekovoda [2], [35] i [51]. Izbor supova prisutan je pri rješavanju uklapanja u okoliš i tom je problemu do sada posvećena puna pozornost. Postoje praktična iskustva koja upućuju na izbor najpovoljnijeg rješenja ili pak na odbijanje nepovoljnog rješenja u određenoj kategoriji [35] i [37].

Postoje brojni oblici stupova (jednosustavni, dvosustavni s vertikalnim ili horizontalnim rasporedom vodiča, slobodno stojeći ili sa sidrom, od čeličnih profila ili čeličnih cijevi) koji prema ispitivanju ili praktičnim iskustvima udovoljavaju zahtjevu „neuočljivosti“ na određenim specifičnim terenima.

S tim u vezi već dulje vrijeme se govori o pojmu „estetike stupova“ kao elementu uklapanja dalekovoda u okoliš.

Prema općem mišljenju, na estetski izgled stupova utječe njihova ukupna visina, odnosno širina i visina pojedinih elemenata, prozirnost i oblici ispune, zatim simetričnost i boja konstrukcije.

Izolatorski lanac na stupu mogu pridonijeti ukupnoj estetici stupa. Tako npr. stakleni izolatorski članci u određenim okolnostima djeluju na stupu povoljnije nego porculanski.

Promjena oblika i materijala stupova, u odnosu na do sada primjenjivane za visokonaponske vodove, na koje su ljudi navikli, dobila je pozitivne ocjene. Tako je dobro prihvaćenja uporaba cijevnih poligonalnih stupova na prolazu dalekovoda kroz urbanizirane zone i naselja (slika 9, 10, 11 i 12).

Nužno je naglasiti da se sve navedeno o vizualnom utjecaju dalekovoda na okoliš treba shvatiti kao preporuke kojih se treba držati u onoj mjeri koliko je to u danoj situaciji realno provedivo.

3.6 Kompaktiranje dalekovoda

Uz nastojanja da se nađu bolja rješenja u okvirima uobičajenih tipova vodova, u tijeku su istražne studije kojima se žele pronaći nova rješenja, s ciljem da se smanje troškovi gradnje i održavanja uz ista ili poboljšana električka i mehanička svojstva. Uz ekonomske i tehničke kriterije u zadnje vrijeme se i ekološki problemi nameću kao čimbenik koji se ne može mimoići. Vodovi visokog napona svojim znatnim dimenzijama vizualno narušavaju prirodne ambijente i umanjuju uporabnu vrijednost širokih pojaseva zemljišta [2]. Dakle, kompaktiranje dalekovoda je rezultat strategije čuvanja prostora [52].

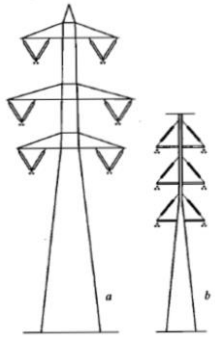
Glavna nastojanja usmjerena su na pronalaženje oblika i konstrukcija dalekovodnih stupova, kao i novih materijala za njihovu izradu, te na pronalaženje novih rješenja za izolaciju vodiča [34], [35] i [52].

Već dulje vrijeme se traže načini da se nadzemni vodovi kompaktiraju, tj.da se uz isti napon i prijenosnu moć smanje dimenzije stupova. Ta nastojanja imaju više ciljva: manja upadljivost vodova u okolišu, uži pojas vodom zauzetog zemljišta (koridora), a po mogućnosti i niža cijena voda. Ostvarenje kompaktiranja vodova moguće je na više načina. Ponajprije projektant može što je moguće više, svakako u okviru standarda i propisa, smanjiti sigurnosne razmake vodiča i dužinu izolatorskih lanaca pa time smanjiti i pojeftiniti stup, a tako i vod u cjelini [35].

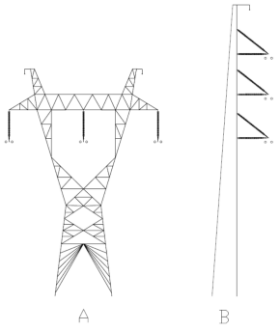
Nadalje, već ranije spomenuta konfiguracija nosnog lanca u obliku slova V (slika 11.) onemogućuje otklon nosnog lanca uslijed vjetra pa na taj način nešto umanjuje širinu zemljišta zauzetog dalekovodom.



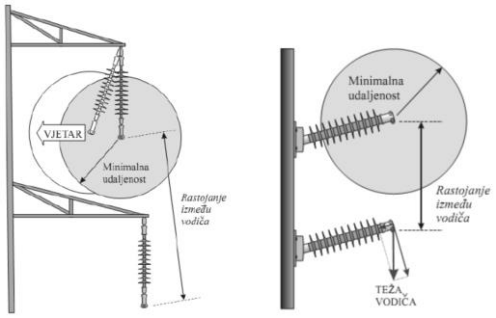
Slika 10. – Silueta vizualno i ekološki prihvatljivijeg oblika nosnog stupa



Slika 11. – Usporedba klasičnog nosnog stupa (a) i radikalno kompaktiranog stupa (b)



Slika 12. A – silueta nosnog stupa klasičnog 400 kV dalekovoda, B – silueta predloženog komapaktnog nosnog stupa 400 kV dalekovoda



Slika 13. – Rastojanja kod klasičnog voda (lijevo) i kod kompaktiranog voda (desno)

Prednosti kompaktiranih vodova su značajne:

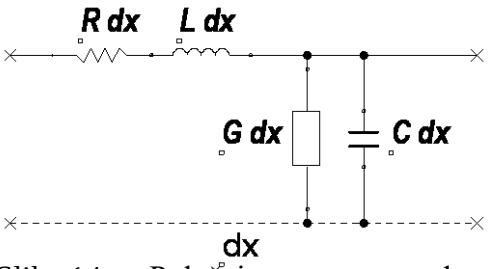
- vizualni izgled (heksagonalni stubovi, manje dimenzije, niti vod): mada je to više-manje subjektivna ocjena, prevladavaju pozitivne ocjene
- puno bolja iskorištenost prostora zbog smanjene širine trase: o tom okviru može se napomenuti mogućnost nadgradnje na viši naponski nivo, više naponskih sustava na jednom vodu i slično

- smanjenje elektromagnetskih polja (međusobno zbliženi vodiči): taj je problem zbog niskih zahtijevanih granica elektromagnetskog polja
- jednostavnija i brža gradnja (temeljenje, sastavljanje): tu je i značajan nedostatak povezan povećanom broju stupova
- veća otpornost na atmosferske prenapone: visina voda utječe na smanjenje udara u dalekovod, a i prenaponi su manji zbog smanjenog sklopnog faktora $K10$.

Što se tiče postizanja još većeg stupnja kompaktiranja nešto se može napraviti i samim izolatorima, na primjer raspodjelom električnog polja ugradnjom potencijalnih obruča, skraćivanjem kovinskih zaključaka ili boljom konstrukcijom samog izolatora. Ipak, najviše bi se moglo postići smanjenjem prenapona. Uz manju širinu voda još veći doprinos znači manji broj stupova zbog povećanja dopuštenih konzolnih opterećenja [35].

3.7 Utjecaj kompaktnih dalekovoda i nove generacije vodiča na gubitke u prijenosnim mrežama

Četiri parametra koji utiču na performanse vodova kao elementa nekog elektroenergetskog sustava (EES) su djelatni otpor voda, induktivitet, odvod voda i kapacitet voda [1]. Zbog svog položaja u elementu voda djelatni otpor i induktivitet nazivaju se uzdužnim, a odvod i kapacitet poprečnim parametrima [2]. Na slici 14. prikazan je položaj parametara voda u elementarnom dijelu jednofaznog voda dx. Dakle, navedena četiri parametra izravno ovise od geometrije prijenosnog voda.



Slika 14. – Položaj parametara voda u elementarnom dijelu voda [2].

Obično se parametri voda navode po jedinici dužine odnosno po kilometru i po jednoj fazi. Prema tome parametri voda su:

- Jedinični otpor voda: $R_1[\Omega/km]$
- Jedinični induktivitet: $L_1[H/km]$
- Jedinični kapacitet: $C_1[F/km]$
- Jedinični odvod: $G_1[S/km]$

3.7.1 Parametri voda ovisni o frekvenciji

U radovima [53] i [54] prikazani su neki učinci frekventno ovisnih parametara. Prema [2] frekventno ovisni parametri moguće je izraziti kao:

- Jedinični uzdužni induktivni otpor ili jedinična reaktancija:

$$X_1 = \omega L_1 \ [\Omega/km] \tag{3.23}$$

- Jedinična poprečna kapacitivna vodljivost ili jedinična susceptacija:

$$B_1 = \omega C_1 \ [S/km] \tag{3.24}$$

Parametri voda se mogu izraziti kao kompleksne simboličke vrijednosti:

- Jedinični uzdužni prividni otpor ili jedinična impedancija:

$$\bar{Z} = R_1 + jX_1 \ [\Omega/km] \tag{3.25}$$

- Jedinična poprečna prividna vodljivost ili jedinična admitancija:

$$\bar{Y_1} = G_1 + jB_1 \ [S/km] \tag{3.26}$$

U prijenosnim jednadžbama javljaju se još i izvedene karakteristične veličine:

- Konstanta prodiranja ili valna konstanta:

$$\gamma = \sqrt{\overline{Z_1}\overline{Y_1}} \ [1/km] \tag{3.27}$$

- Karakteristična impedancija:

$$\overline{Z_c} = \sqrt{\overline{Z_1}/\overline{Y_1}} \ [\Omega] \tag{3.28}$$

Za konkretan vod važna je njegova duljina *l*. Ako jednadžbe konstante voda pomnožimo s duljinom *l*, dobijemo:

- Djelatni otpor voda ili rezistenciju: R [Ω]
- Induktivni otpor voda i reaktanciju: X [Ω]
- Djelatni odvod voda ili konduktanciju: G [Ω]
- Kapacitivnu vodljivost voda ili susceptanciju: B [Ω]

Dakle, za vod može se napisati:

- Prividni otpor voda, ili impedancija:

$$\bar{Z} = R + jX \ [\Omega] \tag{3.29}$$

- Prividna vodljivost voda ili admitancija:

$$\bar{Y} = g + jB \ [S] \tag{3.30}$$

3.7.2 Djelatni otpor voda

Otpornost voda ovisi od sljedećih parametara [55]:

1. Spirala žica vodiča (Spiraling)
2. Temperature
3. Frekvencije (Skin efekt)
4. Amplitude struje.

Prema [55] razlikujemo otpornost koja nastaje uslijed proticanja istosmjerne struje i otpornost uslijed proticanja izmjenične struje.

Ukoliko kroz vodič protiče istosmjerna struja tada je djelatni otpor moguće izraziti prema sljedećem obrascu:

$$R_{dc.\ T} = \frac{\rho_T l}{A}\ [\Omega] \tag{3.31}$$

Gdje je:

ρ_T – specifična otpornost vodiča pri temperaturi T

l – dužina vodiča

A – površina poprečnog presjeka vodiča.

S obzirom da su vodiči načinjeni od više provodnika uvijenih u spiralu time je i dužina takvih vodiča veća od ravnih vodiča za 1 do 2 %. S tim u vezi otpornost vodiča je veća za iznos 1-2% nego je to izračunato sa obrascem (3.17).

Otpornost vodiča varira linearno u ovisnosti od temperature prema obrascu:

$$\rho_{T2} = \rho_{T1}\left(\frac{T_2 + T}{T_1 + T}\right) \tag{3.32}$$

Gdje je ρ_{T2} i ρ_{T1} – otpornost vodiča pri temperaturi T_2 i T_1 °C. Temperatura T je konstanta i zavisi od materijala vodiča i dana je tabelom 4.3 u [55].

Izmjenična otpornost vodiča ili efektivna otpornost dana je izrazom:

$$R_{ac} = \frac{P_{loss}}{|I|^2}\ [\Omega] \tag{3.33}$$

Gdje je P_{loss} realni gubitak snage u vatima, I je efektivna vrijednost struje.

U slučaju proticanja istosmjerne struje kroz vodič raspodjela struje kroz presjek vodiča je jednolika dok kod proticanja izmjenične struje kroz vodič raspodjela struje nije jednaka. Kako frekvencija raste gustoća struje se odaljava od centra i na taj način formira cilindar sa vrlo malom ili nikakvom vrijednosti struje u centru. Ovaj efekt se naziva *skin efekt*. Povećavanjem frekvencije raste i izmjenična otpornost vodiča. Prema [55] izmjenična otpornost pri frekvenciji od 60 Hz je nekoliko procenta viša od istosmjerne otpornosti.

3.7.3 Kapacitivnost

Kapacitivnost utječe na realne gubitke energije prijenosnog voda [55]. Kapacitet vodiča daje odnos između količine naboja na vodiču i visine napona na kojem se vodič nalazi [2]. jedinica za mjerenje kapaciteta je farad (F). Kapacitet od 1F ima onaj vodič kod kojeg povećanje napona za 1V dovede do povećanja naboja za 1 As.

$$1F = 1 \left|\frac{As}{V}\right| \tag{3.34}$$

Za prijenosne vodove koji se sastoje iz više vodiča, svi vodiči utiču na kapacitivnost voda. Razlike napona među vodičima i količine naboja na vodičima u čvrstoj su međusobnoj vezi [2].

3.7.4 Induktivitet voda

Induktivitet je svojstvo petlje da se opire promjeni struje jer svaka promjena struje izaziva promjenu obuhvatnog toka, koja inducira u petlji napon suprotnog smjera [2]. Jedinica za mjerenje induktiviteta je 1 henri (H). Induktivitet 1H ima onaj strujni krug u kojem se inducira napon 1V, ako se struja jednolično mijenja za amper u 1 sekundi:

$$1H = 1\frac{V}{\frac{A}{s}} = 1\frac{Vs}{A} \tag{3.35}$$

Kod vodova za prijenos električne energije redovito pretpostavljamo da je permeabilitet konstantan, tj. da su magnetska indukcija i jakost magnetskog polja međusobno proporcijalni. Tada ukupni magnetski tok može se računati kao sumu magnatskih tokova proizvedenih u raznim dijelovima strujnog kruga.

μ je permeabilitet sredine ili materijala H/m. Permeabilitet za vakuum iznosi:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \left[\frac{H}{m}\right] \; ili \; 4\pi 10^{-4} \left[\frac{H}{km}\right] \tag{3.36}$$

3.7.5 Odvod voda

Odvod po jedinici dužine voda G_1 definiran je kao omjer trofaznih djelatnih gubitaka po jedinici dužine zbog kliznih poprečnih struja i korone ΔP_0 *[W/m]* te zbog kvadrata linijskog napona *U[V]* [3].

$$G_1 = \frac{\Delta P_0}{U^2} \left[\frac{S}{m}\right] \tag{3.37}$$

Gornji izraz vrijedi za jednofazni prikaz voda, ako u obzir uzmemo gubitke jedne faze i fazni napon [3].

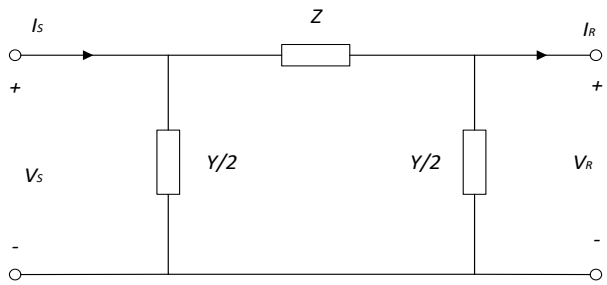
Prijenosom električne energije nadzemnim vodovima pojavljuje se gubici uzrokovani kliznim strujama i gubici uzrokovani koronom [1] i [55]. Gubici koje uzrokuju klizne struje ovise o čistoći površine izolatora i o klimatskim uvjetima [1] i [55].

3.7.6 Nadomjesne sheme voda

Vod određenih jediničnih konstanti i određene dužine se može prikazati pomoću nadomjesnog četveropola za direktni sustav i nadomjesnim četveropolom za nulti sustav. Elementi unutar četveropola moraju biti odabrani na takav način, da uz bilo koje odabrane prilike na ulazu, koje odgovaraju početku voda, prilike koje se dobiju na izlazu budu jednake prilikama na kraju voda [56]. Vodovi su najčešće homogeni pa će nadomjesni četveropol biti simetričan, a to znači da se u tom slučaju ulaz i izlaz bez posljedica mogu međusobno zamijeniti [56]. Pri računanju prilika pomoću četveropola pristupačni su nam ulaz i izlaz, što znači da se mogu određivati samo prilike na početku i kraju voda, dok prilike uzduž voda ne odgovaraju prilikama duž četveropola [56]. U praksi se elementi četveropola voda raspoređuju po Π ili po T-shemi [56].

3.7.7 Ekvivalentna Π shema voda

Mnogi kompjuterski programi u analizama i projektiranju prijenosnog sustava za predstavljanje komponenti kao što su prijenosni vodovi ili transformatori koriste ekvivalentne sheme [55].



Slika 15. – Nadomjesna Π shema voda [55]

U [2] i [55] predstavljena je ekvivalentna Π shema sa parametrima slika 15.

Prema [2] za grane Π sheme vrijedi:

$$\bar{Z} = R + jX \tag{3.38}$$

$$\frac{\bar{Y}}{2} = \frac{G}{2} + j\frac{B}{2} \tag{3.39}$$

Za poznate vrijednosti na kraju voda U_2, P_2 i Q_2 može se izračunati:

$$\bar{S_2} = P_2 + jQ_2 \tag{3.40}$$

$$\bar{S_2} = 3\bar{V_2}\bar{I_2} \Longrightarrow \bar{I_2} = \frac{P_2 - jQ_2}{3V_2} \tag{3.41}$$

$$\Delta\bar{I_2} = V_2\frac{\bar{Y}}{2} \tag{3.42}$$

$$\overline{I_{12}} = \bar{I_2} + \Delta\bar{I_2} \tag{3.43}$$

$$\bar{V_1} = V_2 + \Delta\bar{V} = V_2 + \overline{I_{12}}\bar{Z} \tag{3.44}$$

$$\Delta\bar{I_1} = \bar{V_1} + \frac{\bar{Y}}{2} \tag{3.45}$$

$$\bar{I_1} = \overline{I_{12}} + \Delta\bar{I_1} \tag{3.46}$$

Za poznate vrijednosti na početku voda U_1, P_1 i Q_1 može se izračunati:

$$\bar{S_1} = P_1 + jQ_1 \tag{3.47}$$

$$\bar{S_1} = 3\bar{V_1}\bar{I_1} \Longrightarrow \bar{I_1} = \frac{P_1 - jQ_1}{3V_1} \tag{3.48}$$

$$\Delta\bar{I_1} = V_1\frac{\bar{Y}}{2} \tag{3.49}$$

$$\overline{I_{12}} = \bar{I_1} - \Delta\bar{I_2} \tag{3.50}$$

$$\bar{V_2} = V_1 - \Delta\bar{V} = V_1 - \overline{I_{12}}\bar{Z} \tag{3.51}$$

$$\Delta\bar{I_2} = \bar{V_2} + \frac{\bar{Y}}{2} \tag{3.52}$$

$$\bar{I_2} = \overline{I_{12}} - \Delta\bar{I_2} \tag{3.53}$$

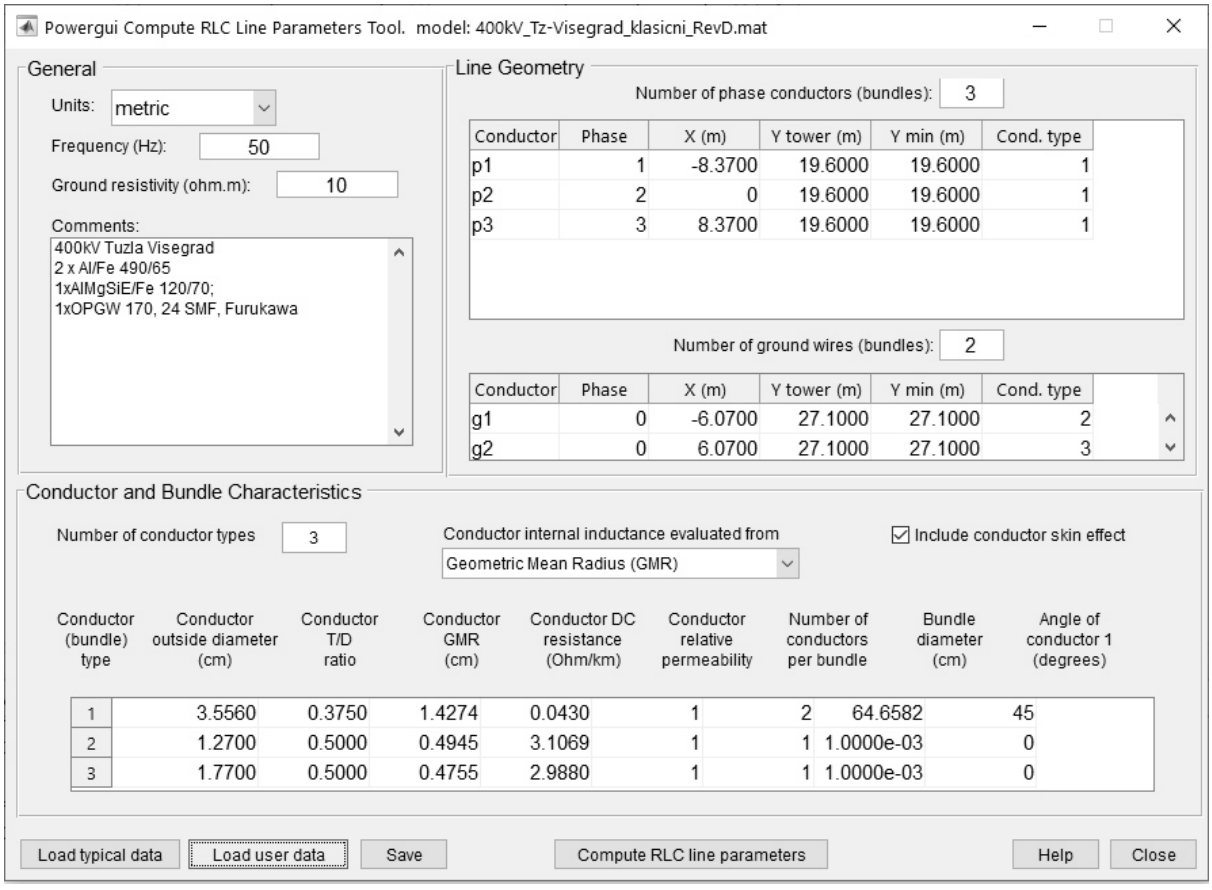
Gdje je:

- U1 i U2 – linijski naponi na početku i na kraju voda

- P1 i P2 – radna snaga na početku i na kraju voda
- Q1 i Q2 – jalova snaga na početku i na kraju voda
- V1 i V2 – fazni napon na početku i na kraju voda
- I1 i I2 – struja na početku i na kraju voda.

4. UTJECAJ KOMPAKTIRANJA NA PARAMETRE DALEKOVODA

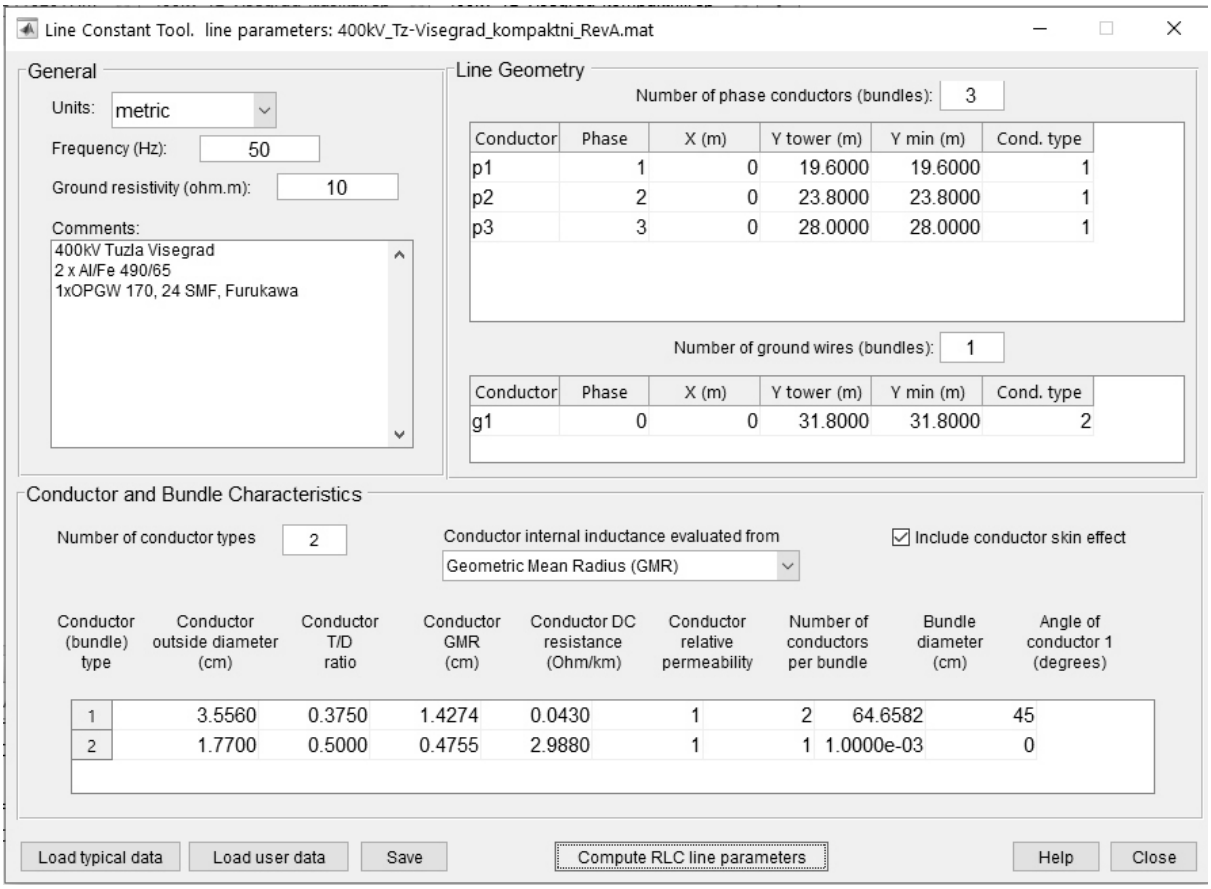
Razmatrani dalekovod je naponskog nivoa 400 kV i analiziran je pomoću softvera MATLAB. U MATLAB-u korišten je GUI koji računa električne parametre dalekovoda. Na slici 16. prikazan je prozor u koji se unose podaci kao što su geometrijske veličine stupova i vodiča. Nakon unosa podataka moguće je izračunati električne R, L, i C parametre dalekovoda. Dakle, razmatran je dalekovod sa različitom geometrijom stupova. Na slici 12. prikazan je nosni stup 400 kV dalekovoda u klasičnoj i kompaktiranoj izvedbi. Sa slike vidljiva je razlike u geometriji ove dvije izvedbe stupova. Unosom podataka o stupovima i instaliranim vodičima na predmetnom dalekovodu dobivaju se vrijednosti R, L i C parametara slika 16 i 17.



Slika 16. – Unos podataka o klasičnoj izvedbi dalekovoda u MATLAB programski paket

```
R, L, AND C LINE PARAMETERS:
Resistance matrix R_matrix (ohm/km):
0.0884   0.0671   0.0655
0.0671   0.0906   0.0672
0.0655   0.0672   0.0886
```

```
Inductance matrix L_matrix (H/km):
1.5711e-03  6.7504e-04  5.3841e-04
6.7504e-04  1.5671e-03  6.7482e-04
5.3841e-04  6.7482e-04  1.5707e-03
Capacitance matrix C_matrix (F/km):
1.0664e-08  -2.0813e-09  -6.7782e-10
-2.0813e-09  1.1133e-08  -2.0743e-09
-6.7782e-10  -2.0743e-09  1.0676e-08
Positive- & zero- sequence resistance [R1 Ro] (ohm/km):
[ 0.0226 , 0.2224 ]
Positive- & zero- sequence inductance [L1 Lo] (H/km):
[ 9.4023e-04 , 2.8285e-03 ]
Positive- & zero- sequence capacitance [C1 Co] (F/km):
[ 1.2435e-08 , 7.6021e-09 ]
```



Slika 17. – Unos podataka o kompaktranoj izvedbi dalekovoda u MATLAB programski paket

```
R, L, AND C LINE PARAMETERS:
Resistance matrix R_matrix (ohm/km):
0.0775  0.0565  0.0589
0.0565  0.0801  0.0608
0.0589  0.0608  0.0866
Inductance matrix L_matrix (H/km):
1.6014e-03  8.4479e-04  7.0466e-04
8.4479e-04  1.5996e-03  8.4226e-04
7.0466e-04  8.4226e-04  1.5949e-03
Capacitance matrix C_matrix (F/km):
1.1427e-08  -3.5794e-09  -1.4625e-09
-3.5794e-09  1.2262e-08  -3.4801e-09
```

```
-1.4625e-09  -3.4801e-09  1.1880e-08
Positive- & zero- sequence resistance [R1 Ro] (ohm/km):
[ 0.0227 , 0.1988 ]
Positive- & zero- sequence inductance [L1 Lo] (H/km):
[ 8.0139e-04 , 3.1931e-03 ]
Positive- & zero- sequence capacitance [C1 Co] (F/km):
[ 1.4697e-08 , 6.1748e-09 ]
```

Tablica 1. Usporedba parametara dalekovoda prije i poslije kompaktiranja

Para-metar	**Klasična izvedba dalekovoda**			**Komapaktirana izvedba dalekovoda**		
R	0.0884	0.0671	0.0655	0.0775	0.0565	0.0589
	0.0671	0.0906	0.0672	0.0565	0.0801	0.0608
	0.0655	0.0672	0.0886	0.0589	0.0608	0.0866
L	1.5711e-03	6.7504e-04	5.3841e-04	1.6014e-03	8.4479e-04	7.0466e-04
	6.7504e-04	1.5671e-03	6.7482e-04	8.4479e-04	1.5996e-03	8.4226e-04
	5.3841e-04	6.7482e-04	1.5707e-03	7.0466e-04	8.4226e-04	1.5949e-03
C	1.0664e-08	-2.0813e-09	-6.7782e-10	1.1427e-08	-3.5794e-09	-1.4625e-09
	-2.0813e-09	1.1133e-08	-2.0743e-09	-3.5794e-09	1.2262e-08	-3.4801e-09
	-6.7782e-10	-2.0743e-09	1.0676e-08	-1.4625e-09	-3.4801e-09	1.1880e-08

Korištenjem naprijed spomenutog softvera koji je sastavni dio MATLAB programskog paketa moguće je jednostavno analizirati pojedine parametre voda u zavisnosti od geometrije stupa. S tim u vezi utjecaj različitog rasporeda faza na pojedine vrijednosti parametara.

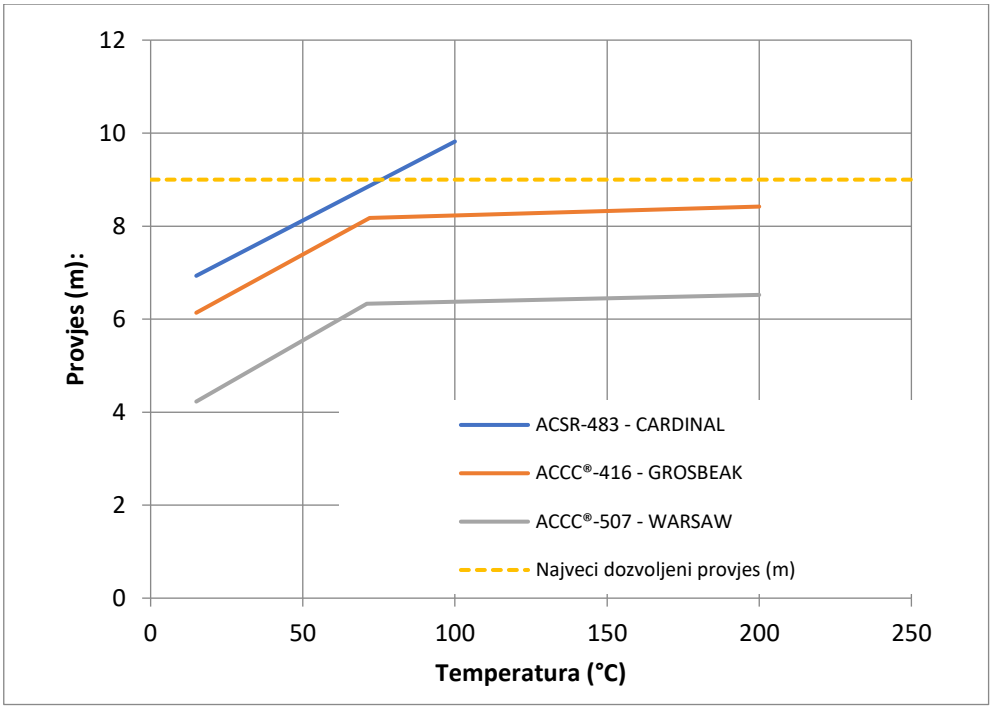
4.1 Utjecaj nove generacije vodiča na gubitke u prijenosnim mrežama

Kao što je navedeno u poglavlju 3. sve je češća uporaba novih vodiča za prijenos električne energije. Opravdanost upotrebe takvih vodiča ogleda se u tehničkim i ekonomskim benefitima. U svrhu prikaza utjecaja uporabe novih vodiča u prijenosnim vodovima izvršena je analiza klasičnog ACSR vodiča sa novim ACCC vodičem. Na tablici 1. prikazana je usporedba karakterističnih parametara pojedinog vodiča za određeni dalekovod. Na slici 18. dan je grafički prikaz usporedbe klasičnog ACSR vodiča i ACCC vodiča.

Tablica 2. Usporedba gubitaka ACSR i ACCC vodiča

Naziv vodiča (Tip):	ACSR	ACCC®	ACCC®
Veličina (mm² Al - Kodno ime):	483 - CARDINAL	416 - GROSBEAK	507 - WARSAW
Presjek aluminija (mm²):	483.4	416.2	507.5
Promjer (mm):	30.378	25.146	27.711
Nazivna prekidna sila (RTS (kN):	150.3	135.2	158.7

Masa (kg/km):	1,828.6	1,245.2	1,519.3
DC Otpor na 20°C (Ω/km):	0.05872	0.06717	0.05530
AC Otpor na 25°C (Ω/km):	0.06102	0.06922	0.05730
AC Otpor na 75°C (Ω/km):	0.07469	0.08289	0.06830
Trajna temperatura (°C) kod max pogonske struje:	86	97	84
Otpor kod max pogonske struje (Ω /km):	0.07770	0.08887	0.07028
Gubici na vodu u prvoj godini (MWh):	**144,411**	**165,172**	**130,621**
Max snaga za isporuku (20 h) (MWh):	23,329	39,459	45,331
Provjes kod početne temperature montaže (m):	6.93	6.14	4.23
Početna zatezna sila kod temperature montaže (kN):	30.1	23.1	40.9



Slika 18. – Usporedba klasičnog provjesa ACSR vodiča i ACCC vodiča [40].

5. IZRAČUN GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Gubitak energije elektroenergetske mreže jedan je od ključnih čimbenika koji utječu na ekonomski rad elektroenergetskih sustava [57]. Gubitak električne energije ΔA (kWh) je integral gubitka djelatne snage u vremenskom periodu [5], .

$$\Delta A = \int_0^T \Delta P(t)dt \times 10^{-3} \tag{5.1}$$

Za gubitke toplinske otpornosti prema prethodnoj formuli pišu se:

$$\Delta A = \int_0^T I^2(t)R(t)dt \times 10^{-3} \tag{5.2}$$

U razdoblju *T*, struja opterećenja i otpora vodiča može varirati, tako da je više komplicirano izračunavanje gubitaka električne energije od gubitaka djelatne snage [5]. Kada je razdoblje za izračun dugačko, teško je koristiti metodu *point by point* kvadratom akumulacije za izračun gubitaka električne energije. Ako se relevantnim parametrima strujne krivulje opterećenja *I(t)* ili djelatnom krivuljom opterećenja *P(t)* koriste za izračunavanje gubitaka električne energije, teško je dobiti zadovoljavajuće točne rezultate izračuna. To je problem koji bi trebao biti usmjeren kod proučavanja teorije i izračuna gubitaka električne energije pojedinim metodama.

5.1 Električni gubici u vodu i indeks gubitaka voda

Ukupnu količinu izgubljene energije u prijenosnim mrežama, elektroenergetskim postrojenjima i distribucijskim mrežama u određenom razdoblju (dan, mjesec, kvartal ili godina) definiramo kao gubitke električne energije u vodovima ili gubici voda [5]. Iako dio gubitaka električne energije voda mogu biti određeni teorijskim izračunom ili pak mogu biti izmjereni, ukupni gubici električne energije se ne mogu točno izmjeriti. Dakle, gubici električne energije voda obično se izračunavaju oduzimanjem ukupne „predane količine snage“ od ukupnog „električnog napajanja“ [1], [5], [33], [37] i [58].

Formula za izračunavanje opskrbe električnom energijom je:

$$A_{e.s} = A_{e.p} - A_{e.c} - A_{out} + A_{in} \tag{5.3}$$

gdje je:

- $A_{e.s}$ opskrba električnom energijom elektroenergetskim mrežama
- $A_{e.p}$ – proizvodnja električne energije iz elektrana na lokalnom području
- $A_{e.c}$ - potrošnja električne energije od elektrana
- A_{out} – izlazna električna energija u druge elektroenergetske mreže
- A_{in} – izlazna električna energija iz drugih elektroenergetskih mreža.

Postotak gubitaka električne energije voda od opskrbe nazivamo indeks gubitaka voda, a izračunavamo prema sljedećoj formuli [5]:

$$Indeks\ gubitaka\ voda(\%) = \frac{el.opskrba\ -kol.predane\ snage}{el.opskrba} \times 100 \qquad (5.4)$$

Tijekom eksploatacije elektroenergetskih mreža gubici električne energije u vodu dobivaju se oduzimanjem ukupne količine predane snage od ukupne opskrbe. Ovakve gubitke zovemo statističkim gubicima električne energije voda i odgovarajući indeks gubitka voda nazivamo statistički indeks gubitka voda. Dio statističkih gubitaka električne energije voda se ne može izbjeći tijekom prijenosa električne energije i određuje se prema uvjetima opterećenja energetske mreže i parametara za napajanje opreme. Takve gubitke električne energije nazivamo tehničkim gubicima električne energije i mogu biti dobiveni teorijskim izračunom. Dakle, također ih nazivamo teorijskim izračunom gubitaka voda i odgovarajući indeks gubitaka voda nazivamo teorijskim indeksom gubitaka voda.

5.2 Izračun i analize gubitaka u vodu

Planiranje i projektiranje elektroenergetske mreže odnosno svih elemenata u prijenosnom sustavu zahtijeva analizu i teorijski izračun gubitaka. U ovoj disertaciji fokus je dat na gubitke na vodu. Potrebna točnost za izračun gubitaka voda za vrijeme planiranja i projektiranja nije visoka, ali metode proračuna moraju biti jednostavne i praktične [5]. Stoga, prednost se daje tabličnim metodama i metode izračuna krivulja su poželjne. Teorijski izračuni gubitaka voda najčešće u našli primjenu za predviđanje prednosti nekih tehničkih mjera smanjenja gubitka te usporedba sa realnim izmjerenim vrijednostima gubitaka. Relativno sveobuhvatan i detaljan teorijski izračun gubitka voda može odrediti količinu i sastav gubitaka električne energije u

vodu, a također može otkriti odnos između tehničkih gubitaka električne energije u vodu i čimbenika kao što su razina pogonskog napona, indeks opterećenja i prosječni čimbenik snage kako bi se utvrdile tehničke mjere za smanjenje gubitaka [5]. Rezultati sveobuhvatnog teorijskog izračuna gubitka u vodu mogu također biti u odnosu sa statističkim gubicima. Naime, teorijsko razmatranje gubitaka daje količinu ili vrijednost gubitaka kao osnovu za upravljanje gubicima i iniciraju mjere za smanjenje gubitaka.

Analiza gubitaka s rezultatima teorijskog izračuna gubitka voda je važna za upravljanje gubicima. Tri vrste analize gubitaka voda su potrebne i to statistička analiza, analiza pokazatelja i ekonomska analiza [5].

a) Statistička analiza

Gubitak električne energije u dalekovodima i trafostanicama prijenosnog sustava naziva se gubitak električne mreže, a gubitak električne energije tijekom prijenosa, trafostanica i distribucije u regionalnim elektroenergetskim mrežama je naziva se gubitak regionalne mreže [5].

- *Analiza gubitaka u regionalnim vodovima*. Gubitke vodova u prijenosu i postrojenjima treba analizirati pomoću napona i samih vodova; gubitke vodova u distribuciji treba analizirati po regijama. Osim toga, gubitke praznog hoda i gubitke opterećenja u regionalnim energetskim mrežama treba analizirati odvojeno za izračunavanje indeks gubitaka voda bez opterećenja i indeks gubitaka opterećenih vodova.
- *Analiza strukture elektroenergetske mreže*. Indeks gubitka voda treba analizirati pomoću napona i opskrbe električne energije, kao i indeks gubitaka voda za različite strukture opskrbe električnom energijom koji također treba analizirati.
- *Analiza sastava predane količine snage*. Izlaz opskrbe električne energije u okolnu regiju će povećati gubitke voda u lokalnom području i utjecaj na prijenos opskrbe električne energije treba dodatno analizirati. Postotak količine predane snage bez gubitaka u ukupnoj količini predane snage izravno utječe na vrijednost statističkog indeks gubitka voda i također bi trebali biti analizirani.

Rezultate gore navedene tri vrste statističkih analiza treba usporediti s rezultatima teorijskih izračuna gubitaka voda, kako bi se utvrdilo gdje su gubici voda najveći u prijenosu, elektroenergetskim postrojenjima i distribucijskom sustavu i odrediti glavne mjere za smanjenje gubitaka.

b) Analiza pokazatelja indeks gubitaka

Analiza pokazatelja u osnovi uključuje usporedbu pokazatelja indeks gubitaka voda u tekućem razdoblju s onim u proteklom razdoblju te je usporedba razlike između statističke vrijednosti indeks gubitka voda u tekućem razdoblju i planirane vrijednosti u proteklom razdoblju. Analiza pokazatelja može slijediti pet razmatranja [5]:

- Povećanje/smanjenje u količini predaje snage i promjene u kategoriji korištenja električne energije i sastava napona
- Promjene u načinu rada elektroenergetskog sustava i struktura energetskih mreža
- Utjecaj na mjere za smanjenje gubitaka i izrade projekta
- Utjecaj novih velikih potrošača
- Utjecaj zamjene glavnih sustavnih jedinica.

c) Ekonomska analiza

Ekonomska analiza uglavnom uključuje dvije vrste, naime analizu smanjenja gubitaka ostvarenih kompenzacijskom opremom instaliranih u postrojenjima i kompenzacijskih uređaja raspršenih i instaliranih na vodovima i analiza prednosti postignuta u procjeni vrha čimbenika snage za velike potrošače [5].

Odredbe koje je 2004. godine izdala Kineska državna korporacija za mreže [59] utvrdile su sljedeće zahtjeve u sažetku godišnjeg izvješća i analizi gubitaka na liniji:

1. Evaluacija pokazatelja gubitka vodova.
2. Analiza sastava gubitka vodova prema sveobuhvatnoj stopi gubitka, stope gubitka i regionalnog gubitka stopa; analiza stope gubitka vodova prema razredu napona; analiza gubitka u liniji oduzimajući količinu prodaje električne energije bez gubitaka i količine prodaje velike količine.
3. Postojeći problemi i mjere; kvantitativna analiza razloga povećanja/smanjenja linije stopa gubitaka i stupanj utjecaja povećanja/smanjenja brzine gubitka u liniji.
4. Rješenja problema i ključne mjere naknadnog rada.

5.3 Izračun krivulja godišnjih gubitaka električne energije za planiranje i dizajniranje energetske mreže

Budući da se snaga potrošača mijenja tijekom dana kako bi se dobio bolji uvid u gubitke mreže formira se krivulja opterećenja svakog važnog potrošača ili dijela mreže [60]. Tijekom faze planiranja i dizajniranja energetskih mreža, godišnje gubitke električne energije i godišnje operativne troškove pojedinih jedinica (glavni transformatori, vodovi i sl.), potrebno je izračunati kako bi se usporedili tehnološki i ekonomski različiti programi te kako bi bili odabrani parametri električne opreme ili presjeci vodova. Budući da se izračun godišnjih gubitaka električne energije zasniva se na procjenama godišnjeg opterećenja krivulja, zahtjev o točnosti rezultata proračuna nije visok, ali metoda izračuna mora biti jednostavna i razumna. U daljnjem dijelu pod poglavlja biti će opisani izračuni krivulja godišnjih gubitaka električne energije za tri naponska nivoa [5].

a) Izračun krivulje godišnjih gubitaka električne energije 35 i 110 kV dalekovoda

Autori u [5] opisali su način na koji se prikupljaju se i analiziraju podaci o opterećenjima 35 kV i 110 kV dalekovoda kako bi utvrdili jesu li veća jalova opterećenja u srednje naponskim dalekovodima od predviđenih. U općim situacijama, dva faktora gubitaka takvih vodova su izračun se može izvesti iz sljedećih formula:

$$f_Q = 0{,}0456 + 0{,}9871 f_p \tag{5.5}$$

Uvrštavanjem prethodne formule u $f = \frac{1}{2}\left(f_p + f_Q tan\varphi_{max}\right)$, dobivamo formlu za indeks gubitaka godišnje ekvivalentne krivulje opterećenja:

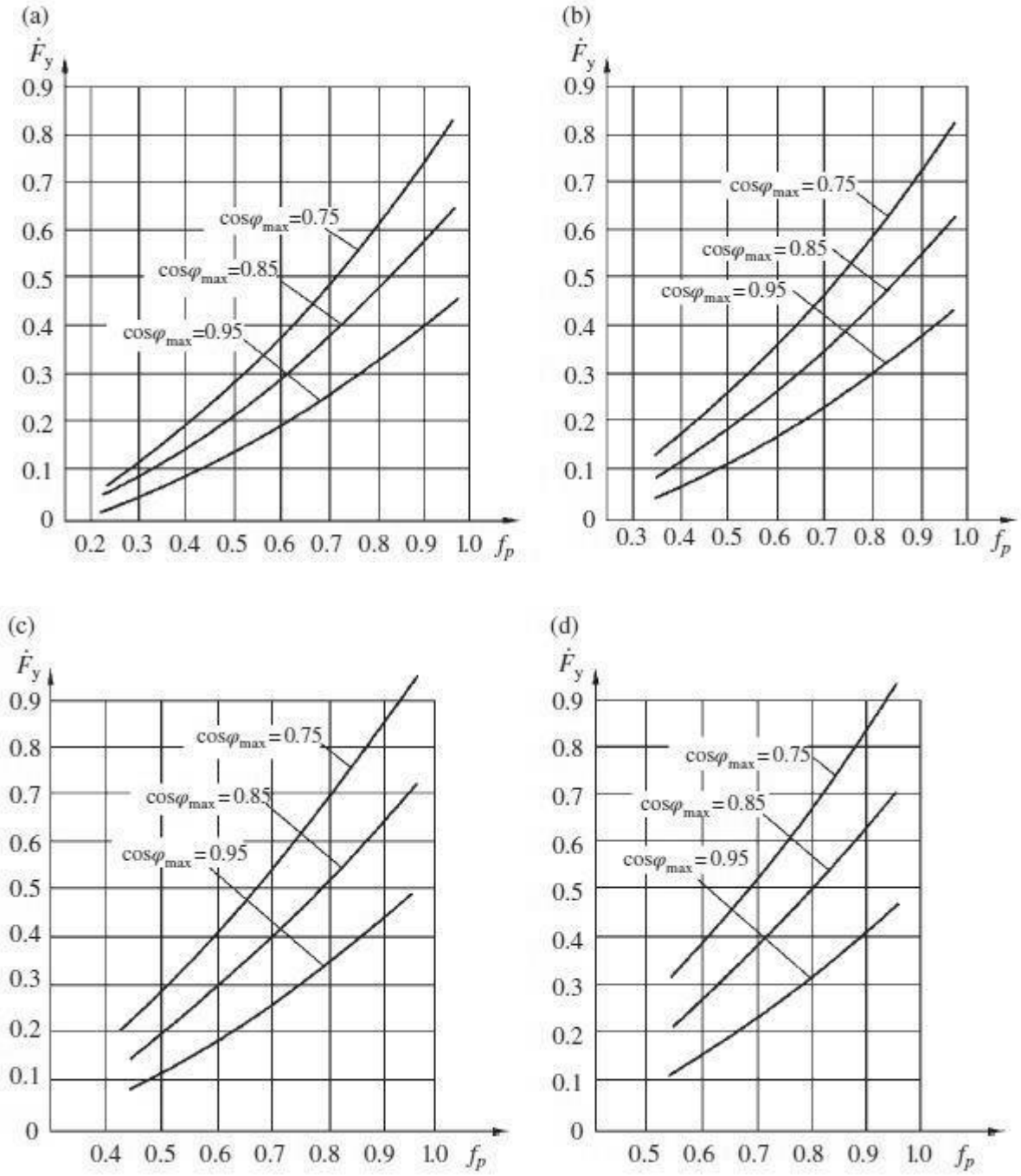
$$\dot{f}_y = f_p(0{,}5 + 0{,}4936 tan\phi_{max}) + 0{,}0228 tan\varphi_{max} \tag{5.6}$$

Uvrštavanjem prethodne formule u $\dot{F} = 0{,}639\dot{f}^2 + 0{,}361(\dot{f} + \dot{f}\dot{\beta} - \dot{\beta})$, dobivamo formulu za izračun faktora gubitaka godišnje ekvivalentne krivulje opterećenja:

$$\dot{F}_y = 0{,}639\dot{f}_y + 0{,}361\left(\dot{f}_y + \dot{f}_y\dot{\beta}_y - \dot{\beta}_y\right) \tag{5.7}$$

gdje je $\dot{\beta}_y$ minimalni indeks opterećenja godišnje ekvivalentne krivulje opterećenja.

Korištenjem godišnjeg faktora djelatnog opterećenja f_p, faktor snage maksimalnog opterećenja $cos\varphi_{max}$ i $\dot{\beta}_y$ su varijable za izračun $\dot{F}_y$.



Slika 19. – Izračun krivulje godišnjih gubitaka električne energije u iznosu od 35 do 110 kV dalekovoda: (a) βy= 0.20 ; (b) βy= 0.30 ; (c) βy= 0.40 ; (d) βy = 0,50 [5]

Prema navedenom, kada su f_p i $\cos\varphi_{max}$ određene vrijednosti, veća je razlika u $\dot{\beta_y}$ ukazuje na veću razliku u $\dot{F}_y$. Uzmimo za primjer, kada je f_p= 60, $\cos\varphi_{max}$ = 0,85, $\dot{\beta_y}$ na 0,2 i 0,5, $\dot{F_y}$ na 0, 3017 i 0, 2473, odnosno rizika dosegne 22%. To ukazuje na to da je potrebno uzeti u obzir minimalni indeks opterećenja $\dot{\beta_y}$, u izračunu godišnjih gubitaka električne energije.

b) Izračun krivulja godišnjih gubitaka električne energije 220 kV dalekovoda

Prije raznih izračuna, prikupljaju se podaci i analiziraju dnevno opterećenje, kvartalno opterećenje i godišnje opterećenje 220 kV dalekovoda, što ukazuje da je kompenzacijska oprema uvijek instalirana na krajevima takvog dalekovoda da prenosi više djelatne snage i smanjuje gubitke [5]. Dakle, manja jalova opterećenja teku 220 kV dalekovodom. Krivulje opterećenja imaju dvije karakteristike, važnim analizama i izračunu prikupljenih podataka:

$$f_Q = 0,7874 f_p - 0,0144 \tag{5.8}$$

Uvrštavanjem prethodne formule u $\dot{f} = \frac{1}{2}\left(f_p + f_Q tan\varphi_{max}\right)$, dobivamo formulu za izračun indeksa opterećenja od godišnje ekvivalentne krivulje opterećenja $\dot{f_y}$:

$$\dot{f_y} = f_p(0,5 + 0,3937 tan\varphi_{max}) - 0,0072 tan\varphi_{max} \tag{5.9}$$

Dano je β_Q = 0 , β_y = 0, pa je formula faktora gubitaka godišnje ekvivalentne krivulje opterećenja:

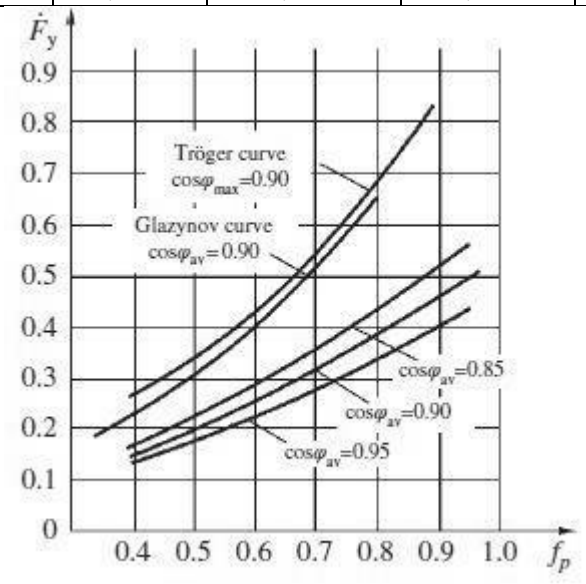
$$\dot{F_y} = 0,639\dot{f_y^2} + 0,361\dot{f_y} \tag{5.10}$$

Korištenje faktora godišnjeg djelatnog opterećenja f_p i faktora snage $\cos\varphi_{max}$ u vremenu maksimalnog opterećena kao izračunate varijable $\dot{F_y}$ prma formulama (5.9) i (5.10), prikazano je u tablici 2. Prema podacima iz tablice 2. izračun krivulja godišnjih gubitaka električne energije 220 kV-nog dalekovoda mogu biti prikazani na slici 20.

Tablica 3. Izračunate vrijednosti $\dot{F_y}$ 220kV dalekovoda

f_p / $\cos\varphi_{max}$	**0,40**	**0,45**	**0,50**	**0,55**	**0,60**	**0,65**
0,85	0,16007	0,1890	0,2190	0,2508	0,2843	0,3196
0,90	0,1460	0,1713	0,1980	0,2264	0,2562	0,2876
0,95	0,1298	0,1518	0,1751	0,1994	0,2255	0,2525
f_p / $\cos\varphi_{max}$	**0,70**	**0,75**	**0,80**	**0,85**	**0,90**	**0,95**

0,85	0,3567	0,3956	0,4362	0,4786	0,5228	0,5687
0,90	0,3205	0,3549	0,3908	0,4283	0,4673	0,5077
0,95	0,2809	0,3105	0,3415	0,3735	0,4070	0,4417



Slika 20. – Izračunate krivulje godišnjih gubitaka električne energije za 220 kV dalekovod [5]

Za usporedbu, slika 20. prikazuje krivulju gubitaka voda izračunate Troger metodom gdje je cosφ_{max} = 0,90 i krivulju gubitaka voda izračunate Glazynov metodom gdje je cosφ_{av} = 0,90 .

Prema usporedbi, manji izračunati gubici voda imaju veću vrijednost $\dot{F}_y$. U okviru godišnjeg raspona indeks opterećenja od 0,50-0,70, vrijednost može biti veća od 39-62%. Glazynov krivulje se ne trebaju koristiti za izračun gubitaka u vodovima u inženjerskom projektiranju visokonaponskih i urbanim energetskim mrežama.

5.4 Teorijski izračun gubitaka električne energije u elektroenergetskoj mrežni

Osnova dosadašnjeg razmatranja gubitaka u vodovima jeste krivulje opterećenja i faktor snage. U nastavku razmatat će se izračuni gubitaka električne energije u nadzemnim vodovima. U [5] autori su dali klasifikaciju gubitaka električne energije.

5.4.1 Klasifikacija gubitaka električne energije

- *Klasifikacija gubitaka električne energije sa teorijskim izvodima za izračun*
  - *Nepoznati gubici koji se teško računaju*. Takvi gubici se sastoje od nepoznatih upravljanih i nepoznatih tehničkih gubitaka. Nepoznati tehnički gubici uključuju propuštanje gubitaka uzrokovanih lošom izolacijom vodova i gubitke električne energije uzrokovane opremom uzemljenja ili grešaka kratkog spoja.

- *Tehnički gubici koji se mogu izračunati*. Ovi gubici se mogu dobiti teorijskim izračunom jer su oni poznati kao teorijski gubici voda. Tehnički gubici uključuju gubitke uzrokovane zagrijavanjem, gubitke dielektričnih magnetiziranja, gubitke dielektrične polarizacije i gubitke izazvane koronom.

- *Klasifikacija kalkuliranjem tehničkih gubitaka promjenom zakona*

  - *Gubici praznog hoda*. Takvi gubici ne ovise o struji koja prolazi mrežnim jedinicama, već su vezane uz napon mrežnih jedinica. Gubici praznog hoda se također nazivaju fiksnim gubicima.
  - *Gubici opterećenja.* Gubici opterećenja su u izravnom razmjeru s kvadratom snage opterećenja ili struje koja prolazi mrežnim jedinicama. Obično gubitke o nazivamo varijabilnim gubicima.

- *Klasifikacija gubitaka električne energije različitim mrežnim jedinicama*

  Gubici električne energije se mogu podijeliti na gubitke vodova, gubitke transformatora, i gubitke ostalih mrežnih jedinica.

  - Gubici voda uključuju gubitke nadzemnih vodova. Gubici nadzemnih vodova se sastoje od gubitaka prijenosnih vodova, gubitaka distribucijskih vodova i gubitaka niskonaponskih vodova.
  - Transformatorski gubici uključuju gubitke u glavnim i distribucijskim transformatorima. Gubici glavnih transformatora se sastoje od gubitaka dvonamotnih i tronamotnih transformatora.
  - Gubici ostalih mrežnih jedinica uključuju gubitke u opremi za kompenzaciju jalove energije (kondenzatorske baterije, sinkrone kompenzatore), jalove gubitke (visokonaponski i niskonaponski), transformatorske gubitke (strujni i naponski transformatori), gubitke u uklopnoj opremi i mjernim instrumentima.

5.4.2 Izračun gubitaka elektroenergetskih nadzemnih vodova

- *Izračun gubitaka uzrokovanih koronom na dalekovodima*

Gubitci uslijed korone se javljaju kada pogonski napon na dalekovodu ima vrijednosti veće od kritičnog, a posljedično tome dolazi do ionizacije zraka i gubitak energije. Određivanje gubitaka se provodi eksperimentalnim putem, ali je moguće na temelju mjerenih podataka izračunati

gubitke korone prema Peekovoj formuli koja se isto temelji na eksperimentalnim radovima [61].

Kao što je svima poznato, nepotpuno samopobuđeno koncentrično pražnjenje oko elektrode nazivamo korona [5]. Za nadzemne vodove, kad intenzitet rada električnog polja na površini visokonaponskog dalekovoda prijeđe određenu jačinu, nastaje pojava koju nazivamo korona. Korona povećava djelatnu snagu te gubitke električne energije. Rezultati izračuna gubitaka visokonaponskih dalekovoda izazvanih koronom su jako važni za uvid u ekonomičnost samog rada. Te provjere donose ne samo određenu apsolutnu vrijednost (kW/km) godišnjih prosječnih gubitaka snage po jedinici duljine, već i usporedbu između gubitaka izazvanih koronom i gubitaka izazvanih zagrijavanjem prilikom otpora u vodu. Općenito, gubici izazvani koronom bi trebali biti 10% manji u odnosu na gubitke uzrokovane toplinskim zagrijavanjem [5] i [62].

Kada je maksimalni intenzitet polja na površini vodiča manji od kritične jakosti polja koji uzrokuje korona, korona se neće dogoditi. Dakle, u fazi projektiranja voda, moraju se uzeti u razmatranje i meteorološki uvjeti u regijama gdje prolaze visokonaponski dalekovodi.

- *Izračun kritičnog intenziteta polja izazvanog nastajanjem korone.*

Autori u [5] prezentirali su korigiranu Peekovu formulu [61] i [63] koje bi se mogle koristiti za izračunavanje kritičnog intenziteta polja E_0 (kV/cm) prilikom nastajanja korone:

$$E_0 = 30{,}3M\sqrt{\delta}\left(1 + \frac{0{,}3}{\sqrt{r_0\delta}}\right) \tag{5.11}$$

gdje je:

-M – koeficijent hrapavosti površine vodiča

- r_0 – radius vodiča (cm)

- δ – relativna gustoća zraka.

Tablica 4. δ_h vrijednost na različitim visinama

H (m)	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
δ_h	1	0,955	0,9085	0,865	0,824	0,784	0,745	0,708

$$E_0 = 30{,}1M\sqrt{\delta}\left(1 + \frac{0{,}299}{\sqrt{r_0}}\right) \tag{5.12}$$

Sa atmosferskim tlakom p (MPa), temperature t *(°C)*, relativna gustoća zraka može se

izračunati prema sljedećoj formuli:

$$\delta_t = \frac{2892p}{273 + t} \tag{5.13}$$

Za regije na visinama, relativna gustoća zraka može se izračunati prema sljedećoj formuli:

$$\delta_h = \delta_0 \left(1 + \frac{\alpha H}{T_0}\right)^{4,26} \tag{5.14}$$

gdje je:

- δ_0 – relativna gustoća zraka pod standardnim uvjetima
- H – visina (m)
- α – temperaturni gradijent zraka, oko 0,0065 $^{\circ}C$ / m
- T_0 – apsolutna temperatura pod standardnim uvjetima T_0 =273+20=293(K).

- *Izračun presjeka voda maksimalnog intenziteta polja E_M(kV/cm)*

Za jednožilne vodove:

$$E_M = 0{,}0147 \frac{C_W U_M}{r} \tag{5.15}$$

Za višežilne vodove:

$$E_M = K \times 0{,}0147 \frac{C_W U_M}{nr} \tag{5.16}$$

Kad su višežilni vodovi složeni u poligonalni oblik:

$$K = 1 + \frac{2r}{a}(n-1) \times \sin\frac{\pi}{n} \tag{5.17}$$

$$C_{av} = \frac{24{,}1}{\tan\frac{D_{av}}{r_{eq}}} \tag{5.18}$$

$$D_{av} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}} \tag{5.19}$$

gdje je:

- U_m – stvarni maksimalni radni napon voda (za duljinu voda <100 km, uzima se 1,1 puta nazivni napon; za vodove duljine > 100 km, uzima se 1,1 puta nazivni napon u prijašnjem

poluodjeljku i 1,05 puta nazivni napon u drugoj polovici dijela)

- r – izračunati radijus vodiča (cm)
- C_W - radni kapacitet vodiča različitih faza (pF/m)
- C_W = l.03 C_{av} ; za srednje fazne žile, C_W = 1.10 C_{av}
- C_{av} – prosječni kapacitet trofaznog prijenosa dalekovoda
- D_{av} – geometrijska udaljenost između trofaznih vodiča
- D_{av} , D_{bc} , D_{ca} – udaljenosti između trofaznih vodiča
- r_{eq} –ekvivalentni polumjer vodiča svake faze

(za jednofazni: r_{eq} = r; za snop vodiča $r_{eq} = \sqrt[n]{r a_{av}^{n-1}}; cm)$

- a_{av} – geometrijska udaljenost između vodiča u snopu
- K– koeficijent koji se koristi u izračunu maksimalnog intenziteta površine polja vodiča u snopu
- a – razmak između vodiča u snopu (cm).

Tablica 5. Srednji geometrijski razmak između snopa vodiča (cm)

N	2	3	4	5	6
a	40	40	44,8	50,8	56

- *Usporedba kriterija*

Prema usporedbama između dizajna i rada visokonaponskih dalekovoda u visokim predjelima nekih zemalja, u pogledu izračuna prema formulama (3-45) , (3-49) ili (3-50), ako maksimalni intenzitet polja površine presjeka ne prelazi 85%, kritični intenzitet polja počinje izazivati koronu, uvjetom E_M / $E_0 \leq 0{,}85$ nema korone pa će se dogoditi u vodu pod normalnim vremenskim uvjetima [5].

5.4.3 Izračun gubitaka uzrokovanih koronom pogonskog voda

Postoje mnogi čimbenici koji utječu na gubitke uzrokovane koronom, dok točne formule za izračun nisu još teorijski izvedene. Empirijska formula izvedena iz izmjerenih podataka ispitivanja ili općih izračunatih krivulja normalno se koristi za približno izračunavanje. Neki instituti prikupljaju i analiziraju mehanizme za pražnjenje vodiča i izmjerene podatake iz jednožilnih i snopnih vodiča, time se crtaju krivulje gubitaka uzrokovanih koronom koji su

podjeljeni u četiri kategorije sa različitim klimatskim uvjetima: (I.) ledeni i snježni dani, uključujući i inja; (II.) kišni dani; (III.) magloviti dani; (IV.) lijepi dani, osim gore navedene tri vrste. Gubitak snage svakog vodiča po fazi ima funkcionalnu vezu s relativnom gustoćom zraka, izračunatim polumjerom vodiča r i maksimalnim intezitetom električnog polja površine vodiča:

$$P_t = \frac{\Delta P_c}{n} = f \quad \left(\delta, r, \frac{E_M}{\delta_t}\right) \tag{5.20}$$

gdje je:

- P_t ili $\frac{\Delta P_c}{n}$ – gubici uzrokovani koronom svake faze vodiča i kilometra po različitim vremenskim uvjetima (kW)
- δ_t – relativna gustoća zraka, računa se po foruli (5.13)
- n – broj snopnih vodiča.

Kada su trofazni vodiči horizontalno raspoređeni, gubici električne energije korone ΔA_c(kW·h) unutar mjernog razdoblja mogu se izračunati prema sljedćoj formuli :

$$\Delta A_c = n\left[2\sum(P_{lt}T_t) + \sum(P_{2t}T_t)\right]L \tag{5.21}$$

gdje je:

- n – broj žila u snopu
- T_t – trajanje vremenske prilike
- L – duljina vodiča (km)
- P_{lt} – gubici snage svake faze i svakog kilometra po vremenskim uvjetima
- P_{2t} – gubici snage svakog vodiča po srednjoj fazi i po kilometru vremenskog uvjeta.

5.4.4 Izračun gubitaka toplinskog otpora nadzemnih vodova

- *Ispravljanje izračuna otpora*

Za izračunavanje gubitaka električne energije nadzemnih vodova, treba uzeti u obzir temperaturni porast izazvan strujom opterećenja i temperaturu okolnog zraka [5], [58], [64] i [65]. Prema [5] izračun otpora R(Ω) je nužno ispraviti:

$$R = R_{20}(1 + \beta_1 + \beta_2) \tag{5.22}$$

$$\beta_1 = 0{,}2\left(\frac{I_{rms}}{I_{ad}}\right)^2 \tag{5.23}$$

$$\beta_2 = \alpha(T_{av} - 20) \tag{5.24}$$

gdje je:

- R_{20} – otpor žile po fazi na $20^{\circ}C$ (Ω)
- β_1 – korekcijski koeficijent s obzirom na utjecaj porasta temperature žile na otpor
- I_{ad} - dopuštena konstantna struja kada vodiči dostignu dopuštenu temperaturu unutar ambijente temperature zraka 20° C (A)
- β_2 – korekcijski koeficijent s obzirom na utjecaj okolne temperature zraka prilikom otpora
- T_{av} – prosječna okolna temperatura u mjernom razdoblju kod gubitaka voda (°C)
- α – temperaturni koeficijent otpora žile (za aluminijske žice ili šuplje-čelične žice, α = 0,004).

Prema formuli (5.24), kada temperatura u ljeto prelazi 32,5 °*C*, ispravljeni gubici toplinskog otpora s obzirom na utjecaj temperature okoline su za 5% veći od onih koji nisu ispravljeni. Kada temperatura po zimi prelazi 7.5° C, gubici zbog toplinskog otpora su ispravljeni s obzirom na utjecaj temperature okoline i manji su za 5% od onih koji nisu ispravljeni. Općenito, kada je temperatura između 12 - 28°C bez obzira na utjecaj temperature okoline izračunava se otpornost [5].

- *Izračun gubitaka toplinske otpornosti od izdvojenih vodova*

Ako su dobiveni operativni podaci u mjernom razdoblju, formula (5.24) se može koristiti za izračun gubitaka koji se događaju zbog zagrijavanja prilikom otpornosti ΔA ($kW\,h$) [5]:

$$\Delta A = 3I_{rms}^2\, RT \times 10^{-3} \tag{5.24}$$

gdje je:

- I_{rms}– rms struja u mjernom razdoblju (A),ž
- R – izračunata otpornost od no-branch vodova, koja je ispravljena s obzirom na sve faktore (Ω)
- T – mjerno razdoblje (h).

Kada je efektivna vrijednost struje (RMS) izračunata na temelju zapisa podataka struje u

tipičnom danu, potrebno je ispraviti formulu kvadratnim omjerom između prosječne dnevne električne opskrbe unutar mjernog razdoblja i električne opskrbe nekog tipičnog dana.

Ako su dobiveni unutar mjernog razdoblja minimalna struja, maksimalna struja i faktor opterećenja, faktor gubitaka *F* se može izračunati prema formuli za faktor gubitaka:

$$F = 0{,}639f^2 + 0{,}361(f + f\beta - \beta) \tag{5.25}$$

i gubitke nastale prilikom otpornosti zbog topline ΔA (kWh) se mogu izračunati prema formuli:

$$\Delta A = 3I_{max}^2 FRT \times 10^{-3} \tag{5.26}$$

Ako su unutar mjernog razdoblja dobiveni djelatna energija, jalova energija, prosječni napon, maksimalna struja i minimalna struja, prosječna struja I_{av} unutar mjernog perioda može biti prva izračunata, a tada i faktor opterećenja f i minimalni indeks opterećenja β će biti izračunati. Faktor gubitaka se može računati prema formuli (5.25), a gubici nastali zbog toplinske otpornosti će biti konačno izračunati po sljedećoj formuli:

$$\Delta A = 3I_{av}^2 \frac{F}{f^2} RT \times 10^{-3} \tag{5.27}$$

$$I_{av} = \frac{\sqrt{A_p^2 + A_Q^2}}{\sqrt{3}U_{av}T} \tag{5.28}$$

$$f = \frac{I_{av}}{I_{max}} \tag{5.29}$$

6. IZRAČUN GUBITAKA U VISOKONAPONSKIM MREŽAMA

6.1 Metode mjerenja gubitaka u stvarnom vremenu

Online monitoring (mrežno praćenje) i mjerenje gubitaka energije je vrlo važna za upravljanje elektroenergetskog sustava nekog područja. Trenutačno postoji mnogo metoda teoretskog računanja gubitaka, ali svaka ima određena ograničenja poput promjene krivulje opterećenja. *Online* računanja treba provoditi uvijek ukoliko to dopuštaju uvjeti. Kao rezultat velikog proračunskog opterećenja i volumena operativnih podataka izračunavanje regionalnih gubitaka elektroenergetske mreže često se izvode unutar dispečerskih odjela.

Trenutačno elektroenergetske tvrtke obično koriste 24 sata dnevno opterećenje. Koriste podatke o aktivnoj i reaktivnoj električnoj energiji svakog sata za izračunavanje prosječne aktivne snage (P_{av}) i jalove snage (Q_{av}), zatim računskim putem dobivaju se gubici električne energije u danu [66].

Dispečerske službe nekih zemalja uglavnom su uspostavile nadzornu kontrolu i sustave za prikupljanje podataka (SCADA) još u 1990-ima. Kroz godine praktičnog rada operatori računaju u stvarnom vremenu gubitka električne energije za određeni kratki period. Napredne aplikacije dispečerskog sustava za automatizaciju, zahtijevaju kontinuirano, cjelovito i ispravne podatke u stvarnom vremenu [5].

6.1.1 Metoda procjene stanja

Procjena stanja znači u realnom vremenu obradu količine telemetrijskih podataka i informacija u vremenskom dijelu sustava. Prilikom mjerenja veličina na daljinu postoji rizik da dobivene informacije nisu točne, odnosno sadržavaju manje smetnje u različitim vezama prijenosa, što rezultira slučajne pogreške, a ponekad podliježu velikim preprekama (kvarovi opreme), što dovodi do velikih pogrešaka i loših podataka. Procjena stanja je metoda koja se koristi za istraživanje sveobuhvatnih uvjeta rada sustava pod nepotpunim uvjetima mjerenja. To je neka vrsta digitalnog filtriranja i mogućnosti predviđanja varijable stanja sustava od strane matematičkih metoda pod uvjetom da su mjerne točke raspoređene razumno i imaju određenu redundanciju (broj mjernih točaka je veći od broja varijabli stanja sustava), čime se dobiju podaci za cijeli pogonski sustav. Ako je mjerenje redundancije dovoljno veliko, moguće je otkriti uzrok loših podataka, pa čak i prepoznati bilo koju mjernu točku s lošim podacima i

stupanj pogreške i time ispraviti loše podatke.

Razlika između algoritma procjene stanja i izračuna protoka opterećenja je ta da je broj mjernih točaka veći od broja sustava varijabli stanja, tj. da je broj jednadžbi veći od broja izračunatih varijabli. Takve jednadžbe nazivaju se statički neodređene jednadžbe. Zbog pogreške u mjerenju, ove jednadžbe su međusobno neuskladive i ne mogu se izvesti određena rješenja.

Procjena stanja poprima optimizirane procjene metode, a najčešće se koristi metoda najmanjih kvadrata koja ima za cilj kako bi se smanjio zbroj kvadrata pogrešaka na svim mjernim mjestima, čime se dobije set optimalnih procjena sistemskih varijabli stanja. Rezultati dobiveni iz procjene stanja su točniji od mjerenja izravno prikupljenih vrijednosti i smanjene mjerne pogreške [5].

6.1.2 Procjena stanja bazirana na SCADA sustavu

SCADA sustavi u dispečerskim centrima nekih zemalja, u regionalnim mrežama vrše ažuriranje podataka potrebnih podataka u jedinici vremena [67]. Učinkovita procjena stanja se ostvaruje u vremenu snimanja podataka (5 min), što znači otkrivanje loših podataka i nadopunjavanje podataka koji nedostaju [5]. U posljednjih nekoliko godina, postignut je napredak procjene najmanjih kvadrata i brza PQ dekompozicija procjene stanja koje se koriste u procjeni stanja elektroenergetske mreže.

Za električnu mrežu sa sedam opterećenih točaka i jednim ekvivalentnim generatorom, kada je mjerna redundancija (omjer između broja mjernih vektorskih dimenzija m i broj procijenjenih dimenzija n) 1,40, ako razlika napona služi kao konvergencijski kriterij i pogreška je 10^{-4}~10^{-6} od referentnog napona, onda se konvergencija može uraditi kroz šest do osam proračuna tokova snaga uz brz pad PQ procjene stanja koji treba ukupno vrijeme od oko 5,6 ms [5].

Prema tim izračunima, ako se broj čvorova povećava za n puta, onda je broj potrebnih iteracija konvergencije općenito manje od n puta. Ako broj čvorova mreže dosegne opću veličinu prave regionalne mreže, broj potrebnih iteracija je gotovo 50 i ukupno vrijeme općenito ne više od 50.0 ms. Dakle, u postojećem uzrokovanju i spremanju uvjetima od SCADA sustava, brza procjena stanja algoritma može proizvesti potpuno i točno stanje sustava podataka i na taj način realizirati izračun gubitaka u realnom vremenu.

6.1.3 Izračun gubitaka kombiniranjem procjene stanja sa excelom

Početkom 21. stoljeća, neke zemlje u kojima je razina SCADA sustava bila visoka, počele su istraživati primjenu procjene stanja mjerenjem gubitaka u stvarnom vremenu, slijedeći ova tri koraka:

- Modificirati softver za procjenu stanja kako bi dopustio izlazu snagu na obje strane svake grane.
- Uspostaviti prilagođenu ACCESS bazu podataka koja uključuje sljedeće baze podataka: (1) ime grane (voda ili transformatora), (2) vrijeme pokretanja izračuna gubitaka, (3) konačno vrijeme izračuna gubitaka, (4) prenesena djelatna (radna) snaga, (5) konačna prenesena djelatna (radna) snaga, (6) izračunati gubici u vodu i (7) konačni izračun gubitaka u vodu. Sedmo polje se ponaša kao alternativa u slučaju neuspjeha divergencije procjene stanja, uzrokovanim mnogim pogreškama u telemetrijskim podacima.
- Poslati podatke gubitaka u vodu izračunate u ACCESS bazi podataka, za proces analize podataka u gubicima na daljnju analizu. U svrhu slojevite i sveobuhvatne analize gubitaka, provođenje klasificirane statistike o vodovima i glavnih transformatora i usvojiti oblik Excela s moćnim funkcijama za preračunavanje snage u električnim veličinama u vrijeme uzimanja uzoraka za akumulacije. Uvesti bitna polja iz Excel oblika i postaviti ih u okolici akumuliranih gubitaka, kako bi mogli prikladno i automatski izračunati i prikazati gubitke.

Jedno od učinkovitijih tehničkih pomagala koji bi jamčili istodobnost mjerenja je GPS (Global Positioning System), koji radi pri frekvenciji od 1,5 GHz i maksimalna pogreška u pulsiranju po sekundi je 10 ns; GPS može obraditi sinkrone uzorke pogonskih električnih veličina elektrana i trafostanica u dalekovodima i pribilježiti vremenske oznake u svim prikupljenim podacima. U GPS poruci s izmjerenim podacima, vremenska oznaka se koristi kao polje za prijenos imena količine uzoraka i izmjerenih vrijednosti u ACCESS bazu podataka i na taj način se ostvaruje računska operacija istovremenih vrijednosti snaga te se tako dovršava izračun gubitaka u stvarnom vremenu [5].

6.1.4 Metoda bazirana na tipičnom danu mjerenja stvarnih opterećenja i procjene stanja

Kako bi se došlo do razumijevanja maksimalnih opterećenja i distribucije električne energije u regiji te odgovornog aranžmana izvora napajanja i prijenosa snage, razni analitičari i stručnjaci su proveli testiranje rada na velikim opterećenjima u posljednjih nekoliko godina. Dakle, dispečerski odjeli koriste stvarne mjerne podatke testova na velikim opterećenjima, metode estimacije stanja i opterećenja krivulje metodom za izračun gubitaka temeljene na tipičnom

danu.

Međutim, način rada, količina prijenosa i distribucije električne energije te temperaturni uvjeti nisu uvijek tipični za mjerno razdoblje velikih opterećenja, tako da razne čimbenike treba uzeti u obzir te prilagoditi parametre izračuna gubitaka, ali i odabrati određenu metodu za izračun.

Metoda izbora snage i količine električne energije

1. *Izračun gubitaka metodom snage*

Analizama prijenosne mreže i izračunima tokova opterećenja djelatne i jalove snage dobivaju se struje i naponi svake grane. Dakle, gubici djelatne i jalove snage mogu biti izračunati unutar jednog sata s obzirom na parametre snage mreže. Tako izračunati gubici električne energije će se akumulirati unutar 24 sata te se nazvati gubicima jednog reprezentativnog dana. Prednost ove metode je u tome da se gubici jalove snage dobiju u vremenu distribucije iste, tako da se mogu lako analizirati naponski uvjeti kao i raspodjela jalove snage. Također, još jedna od prednosti ove metode je ta da se izračunati gubici svake grane mogu lako provjeriti zahvaljujući zapisima tokova snaga u realnom vremenu. Nedostatak ove metode je da se ne koristi izmjerena raspodjela količine električne energije kod velikih opterećenja, s tim u vezi gubici električne energije nisu izravno proporcionalni u odnosu na količinu električne energije [5].

2. *Izračun gubitaka metodom količine električne energije*

Da bismo održali raspodjelu električnih veličina reprezentativnog dana i odrazili tipičnost krivulja svakog opterećenja i čvorišta, uvodi se koncept koeficijenta izlazne distribucije, odnosno raspodjele opterećenja. Pretpostavimo da postoje *n* opterećenja; maksimalna vrijednost tipične krivulje opterećenja $p_{i.max}$; opterećenje po satu je p_{ij} (j= 1- 24); količina dnevne električne energije je A_i ; ukupna količina električne energije mreže je $A_{\Sigma.}$

Koeficijent izlazne raspodjele opterećenja može se izračunati prema sljedećoj formuli:

$$K_{ij} = \frac{A_\Sigma \, p_{ij}}{\sum_{i=l}^{n} A_i \, p_{i.max}} = k_A f_{ij} \qquad (6.1)$$

gdje je:

- $f_{ij} = p_{ij} / p_{i.max}$ – trenutni faktor opterećenja *i*
- $k_A = \frac{A_\Sigma}{\sum_{i=l}^{n} A_i}$ – gdje je k_A omjer ukupne količine električne energije cijele mreže

reprezentativnog dana i zbroja količine električne energije od n opterećenja tipičnog dana krivulje opterećenja.

Za izračun gubitaka reprezentativnog dana metodom količine električne energije, opterećenja svakog opterećenog čvorišta za 24 sata mogu biti izračunati prema sljedećoj formuli:

$$\overline{p_{ij}} = k_{ij} p_{ij} (i = 1 \approx n, j = 1 \approx 24) \quad (6.2)$$

6.1.5 Sveobuhvatna metoda analize gubitaka na temelju podataka sustava realnog vremena

Napretkom informacijskih tehnologija i aplikacija koje primjenjuju podatke prikupljene u realnom vremenu dispečerski sustav pored upravljanja informacijskim sustavom upravlja i električnim sustavom mjerenja energije. Na taj način može se dobiti nekoliko vrijednosti za teorijske gubitke u vodu. Dakle, neki autori predlažu opremanje sustava automatizacije i informacijskog sustava za upravljanje koji se temelje na teorijskim vrijednostima gubitaka voda i bazirani su na tokovima opterećenja, teorijskim vrijednostima gubitaka voda baziranih na procjeni stanja i vrijednostima statističkih gubitaka voda baziranih na mjerenju električne energije.

Koriste se i matematičke metode za analize integracije tri vrijednosti, stoga se očekuju pouzdanije vrijednosti teorijskih gubitaka voda [68].

- *Tri teorijske vrste gubitaka bazirane na podacima dobivenih u realnom vremenu*

  Autori u [5] opisali su tri vrste gubitaka bazirane na podacima dobivene u realnom vremenskom razdoblju.

  - Izračun gubitaka voda u stvarnom vremenu baziranih na tokovima opterećenja. Podaci se dobivaju iz SCADA sustava u stvarnom vremenu te na temelju tih podataka provodi se proračun.
  - Teorijski izračun gubitka voda temeljen na procjeni stanja. Procjena stanja je jedan od naprednih softverskih programa u sustavu upravljanja energijom (EMS). Kao što je već spomenuto, procjena stanja je u mogućnosti identificirati i eliminirati loše podatke baze podataka u SCADA sustavu u stvarnom vremenu. Teoretska vrijednost gubitka voda bazirana na procjeni se može dobiti istim postupkom kao što je objašnjen izračun gubitaka baziranih na tokovima opterećenja. U slučaju ne-konvergencije protoka opterećenja ili loših podataka, podaci procjene stanja mogu se referencirati. Ako točnost podataka dobivenih

procjenom stanja nije visoka, podaci za izračun protoka opterećenja se mogu koristiti za provjeru.

- Statistički izračun gubitka u vodu temeljen na sustavu mjerenja električne energije. *Online* statistika se može u realnom vremenu provesti prema podacima sustava daljinskog očitanja brojila. Bilo koja pogreška u mjernom sustavu dovodi do fluktuacije kod stope gubitaka u vodu. Uslijed upravljanja gubicima u vodovima i drugih razloga za upravljanje, statistička pogreška stope gubitaka voda dobivene ovdje može biti veća nego u prethodna dva izračuna.

- *Teorijski izračun vrijednosti indeksa gubitaka voda za tri opsežne metode*

  Tri opsežne vrijednosti indeks gubitaka voda X koja se može izračunati prema sljedećoj formuli:

$$X = W_1X_1 + W_2X_2 + W_3X_3 \tag{6.3}$$

  gdje je:

  - X_1, X_2, X_3 – teorijski indeks gubitaka voda koji se temelji na protoku opterećenja, teorijski indeks gubitka voda temeljen na procjeni stanja i statistička indeks gubitaka voda koji se temelji na sustavu mjerenja električne energije;
  - W_1, W_2, W_3 – značenje tri stope gubitaka voda, koje se mogu dobiti slijedećim uvjetima:

    Ciljna funkcija $a^2W_1^{2+}b^2W_2^{2+}c^2W_3^2 = \min$

    Ograničeno stanje $W_1 + W_2 + W_3 = 1$, i $W_1, W_2, W_3 \geq 0$.

A, b, c su razlike (relativna vrijednost) između triju stopa gubitka voda posljednjeg dana, odnosno tekućeg dana. Nakon što se postigne važnost W_1, W_2, W_3, sveobuhvatna stopa gubitaka voda X može se biti izračunavati po formuli (6.3) i to je teorijski postotak gubitaka voda čija je pouzdanost veća od bilo koje stope gubitaka voda. Sveobuhvatni postotak stope gubitaka voda izračunava se ovom metodom i djeluje kao točna vrijednost i stopa gubitaka voda iz tri izvora uspoređuje se s točnim vrijednostima izračunatim na zbroj srednjih kvadratnih pogrešaka određeni broj dana. Ispada da je ukupno značenje kvadrata pogreške u izračunatoj stopi gubitaka voda metodom toka opterećenja najniža, te uzastopno slijedi da je statistički postotak gubitka voda i da je stopa gubitaka voda izračunata procjenom stanja. To pokazuje da je stopa gubitaka izračunata metodom tokova snaga najviše blizu stvarnoj vrijednosti u normalnim okolnostima [5].

6.1.6 Ekvivalentna metoda čvorova snaga za izračun gubitaka u visokonaponskim mrežama

U proteklih nekoliko godina ova metoda se naširoko koristi u elektroenergetskim sustavima raznih zemalja.

6.1.7 Dvodimenzionalni red za izračun gubitaka u energetskim mrežama

Pretpostavimo da prijenosna mreža ima *n* izračuna jedinica gubitaka; obračunska razdoblja, T; vremenski interval između mjerenja je t_0. Gubici najvećeg dijela mreže unutar mjernog interval T, mogu se dobiti zbrajanjem gubitaka električne energije svake jedinice unutar $i(T/t_0)$ intervala *T* ili dobiti zbrajanjem gubitaka električne energije svih jedinica u okviru svakog mjerenja intervala *T*.

Izraz dvodimenzionalnog reda glasi:

	Jedinica (n) →			
Vrijeme (i) ↓	ΔA_{11}	ΔA_{12}	…	ΔA_{1j}
	⋮			
	ΔAi_1	ΔA_{i2}	…	ΔA_{ij}

Gubici za prijenosnu mrežu unutar intervala mogu se izračunati po sljedećoj formuli:

$$\Delta A_{\Sigma}\Big|_{0}^{T} = \sum_{j=1}^{n}\left[\sum_{i=1}^{i=\frac{T}{t_0}}\left(\Delta A_{ij}\right)\right] = \sum_{i=1}^{i=\frac{T}{t_0}}\left[\sum_{j=1}^{n}\left(\Delta A_{ij}\right)\right] \tag{6.4}$$

gdje je:

- ΔA_{Σ} – ukupni gubici električne energije
- $\sum_{j=l}^{n}\left(\Delta A_{ij}\right)$ – ukupna količina električne energije n opterećenja.

6.1.8 Izračun gubitaka električne energije u mreži

Ako je razdoblje izračuna gubitaka električne energije jedan dan (tj. 24 h), gubici električne

energije u mreži mogu biti izračunati na sljedeća dva načina:

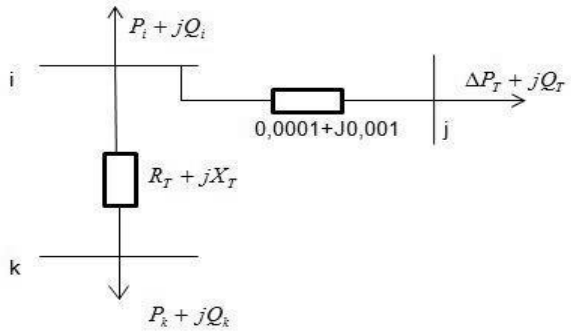
- Pomnožimo prosječne gubitke snage svake obračunske jedinice s vremenom, a zatim ih zbrojimo:

$$\Delta A = \sum_{i=1}^{n} \Delta\left(P_{ij}\right)_j T \tag{6.5}$$

gdje je:

- ΔA – gubici električne energije
- P_{ij} – prosječni gubici snage
- T – razdoblje izračuna gubitaka električne energije.

Na slici 21. dan je prikaz čvorišta transformatorskog opterećenja i opterećenja bez gubitaka.



Slika 21. – Čvorište transformatorskog opterećenja i opterećenja bez gubitaka

- Zbrajanjem gubitaka električne energije u mreži unutar svakog sata je:

$$\Delta A = \sum_{i=1}^{24}\left(\Delta A_{ij}\right) = \sum_{i=1}^{24}\left(\sum_{j=1}^{n} \Delta P_{av} T\right) \tag{6.6}$$

gdje je:

- ΔA– gubici električne energije
- P_{av} – prosječna djelatna snaga
- A_{ij}– prosječni gubici električne energije.

U skladu sa prvom metodom količina energije u mreži je:

$$A = \left(\sum_{j=1}^{n} P_{av}\right) T + \Delta A = \sum_{j=1}^{n} (P_{av} T) + \sum_{j=1}^{n} (\Delta P_{av})_j T = \left[\sum_{j=1}^{n} P_{av} + \Delta P_{av})\right] T \qquad (6.7)$$

gdje je:

- P_{av} – prosječna djelatna snaga
- T – razdoblje izračuna gubitaka električne energije
- ΔA – gubici električne energije.

Tada je indeks gubitka voda:

$$\Delta A\% = \sum_{j=1}^{n} \frac{(\Delta P_{av})_j T}{T\left[\sum_{j=1}^{n} (P_{av} + \Delta P_{av})\right]} = \frac{\sum_{j=1}^{n} \Delta P_{av}}{\sum_{j=1}^{n} (P_{av} + \Delta P_{av})_j} \qquad (6.8)$$

gdje je:

- $\Delta A\%$ - indeks gubitaka voda
- P_{av} – prosječna djelatna snaga
- ΔP_{av} – prosječni gubici radne snage.

6.2 Izračun gubitaka u prijenosnim mrežama baziran na Tri moda

Ova metoda udovi podjelu krive opterećenja na tri dijela pod određenim uvjetima te pomoću vrijednosti dobivene tri vrijednosti dobiva se vrijednost gubitaka cijelog perioda. Izračun tokova tipičnih opterećenja se provodi u tri točke, odnosno tri moda, za dobivanje odgovarajućih prosječnih gubitka snage pod tipičnim svakodnevnim opterećenjima. Očito, tri vrste dnevnih prosjeka gubitaka radne snage mogu predstavljati ukupne gubitke energije unutar tri načina rada. Indeks gubitaka voda su na tri moda integrirani kako bi se dobio indeks gubitka unutar cijelog perioda, što je osnovni koncept izračuna gubitaka visokonaponskih mreža na temelju gubitaka snage u tri moda [5].

Teorijski izračun gubitaka za dugačko razdoblje služi kao provjera i opisana je sljedećim koracima:

1. Primjena dugog razdoblja određena iz količine energije kako bi se dobila prosječna opterećenja i primjena izmjerenih maksimalnih opterećenja za dobivanje dugog razdoblja djelatnog opterećenja f_p i minimalnog indeksa opterećenja β_p , čime se dobiva indeks promjene 1/λ.
2. Dopuštene srednje snage za tri načina odabrane su P_{1*}, P_{2*}, P_{3*} a zatim $P_{1*}=(\beta_p+P_{s.m})$,

$P_{2*}=f_p$, $P_{3*}=(P_{m.b}+1,0)/2$.

3. Potrebno je odabrati tipične krivulje dnevnog opterećenja za tri moda i omogućiti im dnevni maksimum opterećenja, odnosno P_{1max}, P_{2max}, P_{3max}. Također je potrebno pomnožiti stvarno maksimalno opterećenje za cijelo razdoblje do vrijednosti po jedinici prosječne snage. Usporediti dnevni maksimum opterećenja s produktom i uzeti $(P_{\Sigma.max}P_{1\bullet})/P_{1max}$, $(P_{\Sigma.max}P_{2\bullet})/P_{2max}$, $(P_{\Sigma.max}P_{3\bullet})/P_{3max}$ kao koeficijente proporcionalnosti za podešavanje, čime se dobiva nova raspodjela tri načina tipičnih dnevnih opterećenja.
4. Provođenjem izračuna 24-satnih tokova snaga prilagođenom raspodjelom tri moda tipičnih svakodnevnih opterećenja, za dobivanje prosječnih dnevnih gubitaka energije $\Delta P_1\%, \Delta P_2\%\ i\ \Delta P_3\%$.
5. Korištenje tipične krivulje dnevnog opterećenja mreže na tri načina za izračun koeficijenata K_1, K_2, K_3 i korištenjem formule (4 - 4) izračunavamo indeks gubitaka $\Delta A_1\%, \Delta A_2\%\ i\ \Delta A_3\%$ prema tri načina podjele.
6. Kao kombinacije koeficijenata niskog faktora opterećenja pojavljuju se u većini dugih razdoblja, prema slici 21. dobijemo omjer između električnih veličina na tri načina A_1: A_2 : A_3 i izračunamo omjer električnih veličina na tri načina podjele ukupne količine električne energije $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3$.
7. Izračunavanje indeksa gubitaka cijelog razdoblja računa se po sljedećoj formuli:

$$\Delta A_\Sigma\% = \frac{\Delta A_\Sigma}{A} = \frac{\Delta A_1\% A_1 + \Delta A_2\% A_2 + \Delta A_3\% A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \tag{6.9}$$

gdje je:

- $\Delta A_\Sigma\%$ - indeks gubitaka cijelog razdoblja
- ΔA_Σ – ukupni gubici električne energije
- $\Delta A_1, \Delta A_2, \Delta A_3$ – indeksi gubitaka za tri načina podjele.

Zamjenom omjera prosječnog opterećenja dobivamo:

$$\Delta A_\Sigma\% = 0{,}233\Delta A_1\% + 0{,}660\Delta A_2\% + 0{,}107\Delta A_3\% \tag{6.10}$$

gdje je:

- $\Delta A_\Sigma\%$ - indeks gubitaka cijelog razdoblja
- $\Delta A_1\%, \Delta A_2\%, \Delta A_3\%$ - indeksi gubitaka pojedinačnog.

6.3 Izračun gubitaka u prijenosnim mrežama baziran na poboljšanom metodom Tri moda

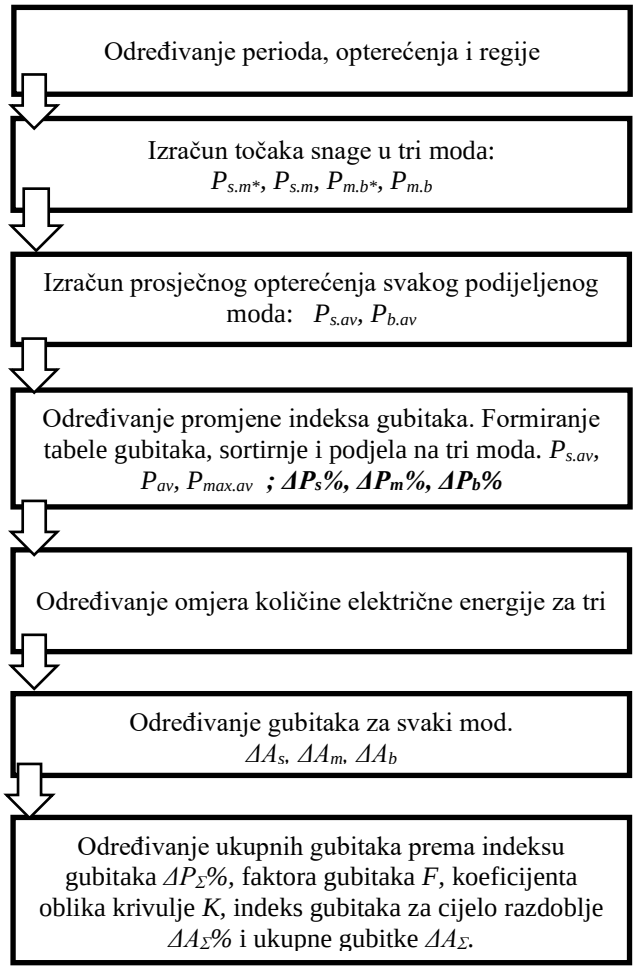
Metoda tri moda provodi praktičan i stvaran izračun vrijednosti izmjerenih tokova snaga i tipičnih opterećenja u tri točke krivulje trajanja opterećenja i dalje ga koristi ga za dobivanje odgovarajućih prosječnih gubitka snage pod tipičnim svakodnevnim opterećenjima [12], [69].

U teoriji i praksi se pokazalo da tri vrste dnevnih prosječnih gubitaka radne snage mogu predstavljati ukupne gubitke energije [5], [69]. Sa tri moda predstavljena su tri karakteristična opterećenja, odnosno točke krivulje. Cilj korištenja metode tri moda je određivanje indeksa gubitaka unutar cijelog razdoblja. Ukupan indeks gubitaka dobije se na način da se integriraju pojedinačni indeksi gubitaka sva tri moda.

U referenci [5] opisani su koraci izračuna gubitaka električne energije baziran na tri moda.

Metoda predložena u ovom radu koja predstavlja poboljšani pristup u odnosu na metodu opisanu u [5] razlikuje se u stvarnom određivanju vrijednosti opterećenja za minimalni, maksimalni i normalni mod.

Na slici 22. dan je dijagram toka i prikaz nove korištene metode izračuna gubitaka.



Slika 22. – Dijagram toka nove metode izračuna gubitaka

Izračun indeks gubitaka cijelog razdoblja dobiva se po sljedećoj formuli:

$$\Delta A_{\Sigma}\% = \frac{\Delta A_{\Sigma}}{A} = \frac{\Delta A_1 \% A_1 + \Delta A_2 \% A_2 + \Delta A_3 \% A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \tag{6.11}$$

gdje su $\Delta A_1, \Delta A_2\ i\ \Delta A_3$ indeksi gubitaka podijeljeni u tri moda.

Zamjenom omjera prosječnog opterećenja dobiva se:

$$\Delta A_{\Sigma}\% = 0{,}233\Delta A_1 + 0{,}660\Delta A_2\% + 0{,}107\Delta A_3\% \tag{6.12}$$

Prema formuli (6.12), ukupni gubici podijeljeni u tri moda imaju različit stupanj utjecaja na ukupni indeks gubitaka: normalni način rada ima najveći utjecaj, iza toga slijedi sa minimalnim načinom rada i na koncu najmanji utjecaj maksimalnim načinom.

7. PRIMJERI PROCJENE GUBITAKA U PRIJENOSNOJ MREŽI

7.1 Primjer izračuna gubitaka u prijenosnoj mreži

U prethodnim poglavljima dat je pregled utjecaja kompaktiranja dalekovoda i instalacije novih vodiča na gubitke u prenosnim vodovima. Kompaktiranje je u snovi je smanjenje dimenzija stupa i/ili glave stupa da se postigne bolje iskorištenje prostora i materijala i zadovolje zahtjevi proizašli iz EM utjecaja. Prednosti upotrebe ACCC vodiča dati su u poglavlju 4.1.

Komapktiranje dalekovoda i ugradnja novih ACCC vodiča nema značajan utjecaj na grešku Poboljšanog metoda Tri moda. Potrebno je voditi računa o izboru tipičnog dana. Dakle, u svrhu dobivanja što točnijih rezultata izračuna nakon ugradnje novih vodiča ili kompaktiranja dalekovoda potrebno je odrediti tipičan dan opterećenja. Ovo vrijede za kako za novu izgradnji tako i za rekonstrukciju dalekovoda.

U svrhu prikaza utjecaja kompatiranja dalekovoda i ugradnje ACCC vodiča na grešku u Poboljšanoj metodi Tri moda razmatran je realan dalekovod naponskog nivoa 110 kV kod kojeg je izvršena rekonstrukcija, odnosno zamjena postojećeg vodiča sa novim ACCC vodičima.

Utjecaj zamjene novih starih Al/Č vodičima sa novim ACCC vodičima na metodu prikazani su kroz realan primjer.

Dakle, na postojećem dalekovodu izvršena je zamjena starih i instalirani su novi ACCC vodiči. Vlasnik dalekovoda posjeduje povijesne podatke prije i poslije rekonstrukcije dalekovoda:

U nastavku razmatrana su dva slučaja:

a) Izračun gubitaka prije rekonstrukcije dalekovoda sa starim Al/Č vodičima,
b) Izračun gubitaka poslije rekonstrukcije dalekovoda sa novim ACCC vodičima,

7.1.1 Usporedba stvarnih gubitaka i gubitaka izračuna po Poboljšanoj metodi tri moda na dalekovodu prije i poslije rekonstrukcije

Razmatrani dalekovod prije rekonstrukcije imao je dnevni dijagram opterećenje prikazan u sljedećoj tabeli:

Tablica 6. Prikaz izmjerenih i opterećenja i gubitaka jednog dalekovoda prije rekostrukcije

Sat	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Opterećenje (kW)	30.229	27.524	26.337	25.348	24.425	22.644	23.041	27.464
Gubici (kW)	330	264	198	264	132	264	198	198
Sat	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**
Opterećenje (kW)	30.237	29.644	31.097	32.220	32.485	30.176	30.045	29.386
Gubici (kW)	330	330	330	396	330	330	330	264
Sat	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
Opterećenje (kW)	29.123	27.540	26.749	28.334	29.259	32.428	33.155	29.064
Gubici (kW)	264	264	264	330	264	330	396	198

Ukupno opterećenje (kW)	**687.954**
Ukupno gubici (kW)	**6.798**

Rezultati proračuna koristeći MATLAB i Poboljšanu metodu tri moda:

Suma svih gubitaka u toku 24 sata: 6.80 MW
Suma svih opterećenja u toku 24 sata: 687.95 MW

Faktor opterećenja: 0.86

Nominalni index opterećenja: 0.68

Index promjene opterećenja: 0.75

Gubici u minimalnom modu: 0.72 MW

Gubici u normalnom modu: 3.86 MW

Gubici u maksimalnom modu: 2.22 MW

Ukupni gubici izračunato po metodi tri moda: 6.80 MW

Ukupni gubici mjereno: 6.80 MW

Faktor gubitaka izračunat pomoću koeficijenta f i beta: 0.76

Koeficijent oblika krivulje ukupnih opterećenja je: 1.006

Indeks gubitaka za puno razdoblje: 0.01

Ukupni gubici metodom pogreške: 6.84 MW

Razmatrani dalekovod poslije rekonstrukcije imao je dnevni dijagram opterećenje prikazan u sljedećoj tabeli:

Tablica 7. Prikaz izmjerenih i opterećenja i gubitaka jednog dalekovoda poslije rekonstrukcije

Sat	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Opterećenje (kW)	19.669	15.974	13.203	12.346	11.489	12.546	12.547	18.488
Gubici (kW)	126	102	85	79	74	80	80	118

Sat	9	10	11	12	13	14	15	16
Opterećenje (kW)	21.129	21.592	23.111	25.554	26.809	27.470	27.999	26.416
Gubici (kW)	135	138	148	164	172	176	179	169
Sat	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
Opterećenje (kW)	25.889	19.884	12.229	10.250	13.155	15.928	19.163	20.418
Gubici (kW)	166	127	78	66	84	102	123	131

Ukupno opterećenje (kW)	**453.258**
Ukupno gubici (kW)	**2.904**

Rezultati proračuna koristeći MATLAB i Poboljšanu metodu tri moda:

Suma svih gubitaka u toku 24 sata: 2.90 MW

Suma svih opterećenja u toku 24 sata: 453.26 MW

Faktor opterećenja: 0.67

Nominalni index opterećenja: 0.37

Index promjene opterećenja: 1.06

Gubici u minimalnom modu: 0.63 MW

Gubici u normalnom modu: 1.75 MW

Gubici u maksimalnom modu: 0.91 MW

Ukupni gubici izračunato po metodi tri moda: 3.29 MW

Ukupni gubici mjereno: 2.90 MW

Faktor gubitaka izračunat pomoću koeficijenta f i beta: 0.49

Koeficijent oblika krivulje ukupnih opterećenja je: 1.039

Indeks gubitaka za puno razdoblje: 0.01

Ukupni gubici metodom pogreške: 3.02 MW

U svrhu lakšeg uspoređenja rezultata, koristeći relativnu vrijednost gubitaka, kreiran je dnevni dijagram opterećenja za dalekovod sa instaliranim Al/Č vodičima i opterećenjima koji su dati u gornjoj tablici.

Tablica 8. Prikaz opterećenja i gubitaka jednog dalekovoda za vrijednosti opterećenja iz tablice 4. i Al/Č vodiče

Sat	1	2	3	4	5	6	7	8
Opterećenje (kW)	19.669	15.974	13.203	12.346	11.489	12.546	12.547	18.488
Gubici (kW)	194	158	130	122	114	124	124	183
Sat	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**

Opterećenje (kW)	21.129	21.592	23.111	25.554	26.809	27.470	27.999	26.416
Gubici (kW)	209	213	228	253	265	271	277	261
Sat	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
Opterećenje (kW)	25.889	19.884	12.229	10.250	13.155	15.928	19.163	20.418
Gubici (kW)	256	196	121	101	130	157	189	202

Ukupno opterećenje (kW)	**453.258**
Ukupno gubici (kW)	**4.479**

Rezultati proračuna koristeći MATLAB i Poboljšanu metodu tri moda:

Suma svih gubitaka u toku 24 sata: 4.48 MW

Suma svih opterećenja u toku 24 sata: 453.26 MW

Faktor opterećenja: 0.67

Nominalni index opterećenja: 0.37

Index promjene opterećenja: 1.06

Gubici u minimalnom modu: 0.97 MW

Gubici u normalnom modu: 2.69 MW

Gubici u maksimalnom modu: 1.40 MW

Ukupni gubici izračunato po metodi tri moda: 5.07 MW

Ukupni gubici mjereno: 4.48 MW

Faktor gubitaka izračunat pomoću koeficijenta f i beta: 0.49

Koeficijent oblika krivulje ukupnih opterećenja je: 1.039

Indeks gubitaka za puno razdoblje: 0.01

Ukupni gubici metodom pogreške: 4.65 MW

Tablica 9. Usporedba izračunatih vrijednosti opterećenja i gubitaka jednog dalekovoda prije i poslije rekonstrukcije dalekovoda

Naziv izračunate vrijednosti	**Dalekovod sa ACCC vodičima**	**Dalekovod sa Al/Č vodičima -izračunato**	**Dalekovod sa Al/Č vodičima - izmjereno**
Suma svih gubitaka u toku 24 sata:	2.90 MW	4.48 MW	6.80 MW
Suma svih opterećenja u toku 24 sata:	453.26 MW	453.26 MW	687.95 MW
Faktor opterećenja:	0.67	0.67	0.86
Nominalni index opterećenja:	0.37	0.37	0.68
Index promjene opterećenja:	1.06	1.06	0.75
Gubici u minimalnom modu:	0.63 MW	0.97 MW	0.72 MW

Gubici u normalnom modu:	1.75 MW	2.69 MW	3.86 MW
Gubici u maksimalnom modu:	0.91 MW	1.40 MW	2.22 MW
Ukupni gubici izračunato po metodi tri moda:	**3.29 MW**	**5.07 MW**	**6.80 MW**
Ukupni gubici mjereno:	**2.90 MW**	**4.48 MW**	**6.80 MW**
Faktor gubitaka izračunat pomoću koeficijenta f i beta:	0.49	0.49	0.76
Koeficijent oblika krivulje ukupnih opterećenja je:	1.039	1.039	1.006
Indeks gubitaka za puno razdoblje:	0.01	0.01	0.01
Ukupni gubici metodom pogreške:	**3.02 MW**	**4.65 MW**	**6.84 MW**

Gornja tablica prikazuje usporedbu rezultata za pojedine slučajeve prije i poslije rekonstrukcije dalekovoda, odnosno instalacije novih ACCC vodiča. Iz priloženih podataka vidljivo je da Poboljšani metoda Tri moda daje zadovoljavajuće rezultate i nakon podizanja performansi dalekovoda.

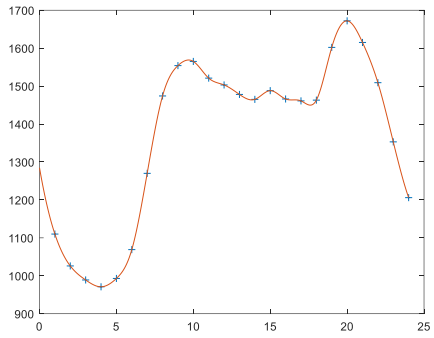
7.1.2 Primjer izračuna gubitaka u prijenosnoj mreži metodom baziranom na tri moda

Za prezentaciju metoda izračuna gubitaka u tri moda i modificirane metode proračuna gubitaka u tri moda korišteni su stvarni podaci iz realne mreže dostupni na internetskoj stranici NOS BiH - Nezavisni operator sistema u Bosni i Hercegovini www.nosbih.ba. Rezultati su uzeti za područje Bosne i Hercegovine za jedan tipičan dan i dani su u tablici 10.

Tablica 10. Rezultati mjerenja gubitaka u jednoj regiji za jedan tipičan dan

Sat	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Opterećenje (MW)	1.110	1.026	989	**971**	993	1.069	1.270	1.474
Gubici (MW)	36	34	36	35	33	31	27	32
Sat	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**
Opterećenje (MW)	1.554	1.565	1.521	1.503	1.478	1.465	1.488	1.466
Gubici (MW)	35	42	40	41	37	40	41	36
Sat	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
Opterećenje (MW)	1.461	1.463	1.602	**1.672**	1.615	1.509	1.353	1.206
Gubici (MW)	35	32	34	37	39	42	44	38
Ukupno opterećenje (MW)	**32.823**							
Ukupno gubici (MW)	**877**							

Na slici 23. dan je prikaz dnevnog dijagrama opterećenja konzuma analizirane regije korištene u ovom primjeru.



Slika 23. – Dnevni dijagram opterećenja analizirane regije

Izračunavanje parametara krivulje ukupnih opterećenja. Točke opterećenja su:

$$A = \sum_{1}^{24} P_i\, t = 32823\ MW \tag{7.1}$$

$$P_{av} = \frac{A}{24} = 1367{,}62MW, P_{max}, P_{min} \tag{7.2}$$

$$f = \frac{P_{av}}{P_{max}} \tag{7.3}$$

$$\beta = \frac{P_{min}}{P_{max} = 0{,}58} \tag{7.4}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{(1-f)}{(f-\beta)} = 0{,}765 \tag{7.5}$$

gdje su:

f - faktor opterećenja

β - minimalni indeks opterećenja

$\frac{1}{\lambda}$ - indeks promjene opterećenja.

Indeks dnevnih gubitaka snage je:

$$\Delta P\% = \frac{(\sum \Delta P_t)}{A} = \frac{877}{32823} = 2{,}672\% \tag{7.6}$$

Izračun točaka snage u tri moda:

$$f = 0{,}818$$

Korištenjem formula za kombinaciju visokog faktora opterećenja dobivamo:

$$P_{s.m*} = 0{,}008\ (1/\lambda)^2 - 0{,}1266\ (1/\lambda) + 0{,}9043 = 0{,}812133 \tag{7.7}$$

$$P_{s.m} = P_{sm*} \times P_{max} \ = 0{,}812133 \times 1672 \times 10^6 = 1357{,}88\ MW \tag{7.8}$$

$$P_{m.b*} = 0{,}0052\ (1/\lambda)^2 - 0{,}0456\ (1/\lambda) + 0{,}9918 = 0{,}95996 \tag{7.9}$$

$$P_{m.b} = P_{mb*} \times P_{max} \ = 0{,}95996 \times 1672 \times 10^6 = 1605{,}05\ MW \tag{7.10}$$

Izračun prosječnog opterećenja svakog podijeljenog moda.

Minimalni mod

$$P_{s.av} = \frac{(\beta + P_{sm*})}{2} \times P\,\frac{(0{,}58 + 0{,}812133)^6}{2}_{max} = 1163{,}82\ MW \tag{7.11}$$

Maksimalni mod

$$P_{b.av} = \frac{(P_{m.1} + 1)}{2} \times P\,\frac{0{,}95996 + 1^6}{2}_{max} = 1638{,}53MW \tag{7.12}$$

Promjena indeksa gubitaka snage koja odgovara prosječnom opterećenju u tri moda

$P_{s.av}$ pri minimalnim modu rada odgovara snazi u četiri sata, a promjena indeks gubitaka snage je:

$$\Delta P_s\% = \Delta P_{4_*}\% \times (P_{s.av}/P_{4*})^2 = 5{,}04\% \tag{7.13}$$

gdje su:

ΔP_{3_*}- omjer gubitaka snage i opterećenja u četiri sata

$P_{s.av}$ -prosječno opterećenje minimalnog moda

P_{3*} - izmjereno opterećenja u četiri sata.

P_{av} pri normalnom modu rada odgovara snazi u osam sati, pa slijedi:

$$\Delta P_m\% = \Delta P_{8_*}\% \times (P_{av}/P_{8*})^2 = 1{,}87\% \tag{7.14}$$

gdje su:

ΔP_{8_*}- omjer gubitaka snage i opterećenja u osam sati

P_{8*}- izmjereno opterećenje u osam sati

$P_{max.av}$ pri maksimalnim modu rada odgovara snazi u 15.00 sati, pa slijedi:

$$\Delta P_b\% = \Delta P_{20_*}\% \times \left(\frac{P_{b.av}}{P_{20*}}\right)^2 = 2{,}12\% \tag{7.15}$$

gdje su:

$P_{b.av}$ - prosječno opterećenje maksimalnog moda

P_{15*}- izmjereno opterećenje u 20.00 sati.

Izračun omjera količine električne energije za tri moda. Prema integralnoj operaciji iz krivulja opterećenja za kombinaciju parametara indeksa visokog opterećenja kad je 1/λ = 0,6 omjer količine električne energije za tri moda *Tablica 3.4* iz literature [5] je $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 1 : 4{,}526 : 1{,}655$; kada je 1/λ=0,8 $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 1 : 4{,}80 : 2{,}33$. Prema izračunu korištenjem interpolacije kad je 1/λ = 0,765 omjer količine električne energije tri moda $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 1 : 4{,}75 : 2{,}19$.

Izračun gubitaka električne energije dijelimo na tri moda.

Minimalni mod:

$$\Delta A_S = \frac{A_\Sigma \times \alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \Delta P_s\% = 208{,}76\ MWh \tag{7.16}$$

Normalni mod:

$$\Delta A_m = \frac{A_\Sigma \times \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \Delta P_m\% = 367{,}20\ MWh \tag{7.17}$$

Maksimalni mod:

$$\Delta A_b = \frac{A_\Sigma \times \alpha_3}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \Delta P_b\% = 191{,}93\ MWh \tag{7.18}$$

gdje su:

$\Delta P_s\%$, $\Delta P_m\%$ i $\Delta P_b\%$ - indeksi gubitaka snage pri minimalnom modu, normalnom i maksimalnom modu.

Izračun ukupnih gubitaka prema indeksu gubitka za cijelo razdoblje.

Indeks gubitka snage za cijelo razdoblje je:

$$\Delta P_\Sigma\% = \frac{877}{32823} = 2{,}672\% \tag{7.19}$$

Faktor gubitka izračunavamo pomoću koeficijenata f i β

$$F = 0{,}639 f^2 + 0{,}361\ (f + f\beta - \beta) = 0.6848 \tag{7.20}$$

Koeficijent oblika krivulje ukupnih opterećenja je:

$$K = \frac{\sqrt{F}}{f} = \frac{\sqrt{0{,}6848}}{0{,}818} = 1{,}012 \tag{7.21}$$

Korištenjem formule za izračunavanje indeks gubitaka električne energije za puno razdoblje dobivamo:

$$\Delta A_{\Sigma}\% = K\Delta P_{\Sigma}\% = 1{,}012 \times 2{,}672\% = 2{,}704\ \% \tag{7.22}$$

$$\Delta A_{\Sigma} = A\Delta A_{\Sigma}\% = 32823 \times 10^{6} \times 2{,}704\% = 887{,}53\ MWh \tag{7.23}$$

Izračun metodom pogreške. Došlo je do pogreške između gubitaka električne energije podjelom na tri moda i dobivenih rezultata mjerenjem indeksa gubitka, te slijedi

$$\Delta A_{\Sigma}^{'} = \Delta A_{s} + \Delta A_{m} + \Delta A_{b} = 767{,}89\ MWh \tag{7.24}$$

gdje su ΔA_s, ΔA_m, ΔA_b-gubici električne energije minimalnog, normalnog i maksimalnog moda.

Relativna pogreška je:

$$\delta\Delta A_{\Sigma} = \frac{\Delta A_{\Sigma} - \Delta A_{\Sigma}^{'}}{\Delta A_{\Sigma}} \times 100\% = 13{,}48\ \% \tag{7.25}$$

gdje je $\Delta A_{\Sigma}'$-ukupni gubici električne energije podijeljeni na tri moda.

7.1.3 Primjer izračuna gubitaka u prijenosnoj mreži poboljšanom metodom tri moda

U tablici 10 su navedena opterećenja te izmjereni gubici prikazani po satima jednog tipičnog dana u jednoj regiji.

I. Izračunavanje parametara krivulje ukupnih opterećenja. Točke opterećenja su:

$$A = \sum_{1}^{24} P_i\, t = 32823\ MW \tag{7.26}$$

$$P_{av} = \frac{A}{24} = 1367{,}62MW, P_{max}, P_{min} \tag{7.27}$$

$$f = \frac{P_{av}}{P_{max}} \tag{7.28}$$

$$\beta = \frac{P_{min}}{P_{max}} = 0{,}58 \tag{7.29}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{(1-f)}{(f-\beta)} = 0{,}765 \tag{7.30}$$

gdje su:

f - faktor opterećenja

β - minimalni indeks opterećenja

$\frac{1}{\lambda}$ - indeks promjene opterećenja.

Indeks dnevnih gubitaka snage je:

$$\Delta P\% = \frac{(\sum \Delta P_t)}{A} = \frac{877}{32823} = 2{,}672\% \tag{7.31}$$

II. Izračun točaka snage u tri moda:

$$f = 0{,}818$$

Korištenjem formula za kombinaciju visokog faktora opterećenja dobivamo:

$$P_{s.m*} = 0{,}008\ (1/\lambda)^2 - 0{,}1266\ (1/\lambda) + 0{,}9043 = 0{,}812133 \tag{7.32}$$

$$P_{s.m} = P_{sm*} \times P_{max} = 0{,}812133 \times 1672 \times 10^6 = 1357{,}88\ MW \tag{7.33}$$

$$P_{m.b*} = 0{,}0052\ (1/\lambda)^2 - 0{,}0456\ (1/\lambda) + 0{,}9918 = 0{,}95996 \tag{7.34}$$

$$P_{m.b} = P_{mb*} \times P_{max} \tag{7.35}$$

Koeficijenti u izrazima 7.32 i 7.34 dati su za krivulje opterećenja kraćeg vremenskog razdoblja s visokim faktorom opterećenja *f*. Dakle, izračunati rezultati prikazani u Tabeli 3.4 literature [5] koristite za dobivanje formula.

III. Izračun prosječnog opterećenja svakog podijeljenog moda.

Minimalni mod

$$P_{s.av} = \frac{(\beta + P_{sm}\ *)}{2} \times P_{max} = 1163{,}82\ MW \tag{7.36}$$

Maksimalni mod

$$P_{b.av} = \frac{(P_{m.1}\ * + 1)}{2} \times P_{max} = 1638{,}53\ MW \tag{7.37}$$

IV. Promjena indeksa gubitaka snage koja odgovara prosječnom opterećenju u tri moda.

Za određivanje snage koja odgovara pojedinom modu (minimalni, normalni i maksimalni) iz Tablice 5. formiramo Tablicu 6. na način da se izvrši sortiranje vrijednosti opterećenja od najmanjeg prema najvećem.

Tablica 11. Prikaz gubitaka u jednoj regiji sortirani po opterećenju, izračunati prosjeci vrijednosti gubitaka i opterećenja koji odgovaraju pojedinom modu

Sat	Gubici [MW]	Opterećenje [MW]	Gubici - prosjek [MW]	Opterećenje - prosjek [MW]	Mod
4	35	971	**33,75**	**1079,25**	**Minimalan mod**
3	36	989			
5	33	993			
2	34	1026			
6	31	1069			
1	36	1110			
24	38	1206			
7	27	1270			
23	44	1353	**37,125**	**1456**	**Normalan mod**
17	35	1461			
18	32	1463			
14	40	1465			
16	36	1466			
8	32	1474			
13	37	1478			
15	41	1488			
12	41	1503	**38,75**	**1567,625**	**Maksimalan mod**
22	42	1509			
11	40	1521			
9	35	1554			
10	42	1565			
19	34	1602			
21	39	1615			
20	37	1672			

$P_{s.av}$ pri minimalnim modu rada odgovara vrijednost snage 1079,25 MW, a promjena indeks gubitaka snage je:

$$\Delta P_s\% = \Delta P_{min*}\% \times (P_{sav}/P_{min*})^2 \tag{7.38}$$

gdje su:

$\Delta P *_{min}$- omjer gubitaka snage i opterećenja pri minimalnim modu

$P_{s.av}$-prosječno opterećenje minimalnog moda

P_{min*} - prosjek opterećenja koji odgovara minimalnom modu prema tablici 2.

P_{av} pri normalnom modu rada odgovara snazi u vrijednosti od 1456 mW, pa slijedi:

$$\Delta P_m\% = \Delta P_{norm_*}\% \times (P_{av}/P_{norm*})^2 = 2{,}25\% \tag{7.39}$$

gdje su:

ΔP_{norm_*}- omjer gubitaka snage i opterećenja određenog za normalni mod prema tablici 6.

P_{norm*}- opterećenje određeno za normalni mod prema tablici 6

$P_{max.av}$ pri maksimalnim modu rada odgovara snazi u iznosu od 1567,625 MW, pa slijedi:

$$\Delta P_b\% = \Delta P_{max*}\% \times \left(\frac{P_{b.av}}{P_{max*}}\right)^2 \tag{7.40}$$

gdje su:

ΔP_{max*}- omjer gubitaka snage i opterećenja određenog za maksimalni mod prema tablici 6.

$P_{b.av}$ - prosječno opterećenje maksimalnog moda

P_{max*}- opterećenje određeno za maksimalni mod prema tablici 6.

Izračun omjera količine električne energije za tri moda. Prema integralnoj operaciji iz krivulja opterećenja za kombinaciju parametara indeksa visokog opterećenja kad je 1/λ = 0,6 omjer količine električne energije za tri moda *Tablica 3.4* iz literature [5] je $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 1 : 4{,}526 : 1{,}655$; kada je 1/λ=0,8 $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 1 : 4{,}80 : 2{,}33$. Prema izračunu korištenjem interpolacije kad je 1/λ = 0,765 omjer količine električne energije tri moda $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 1 : 4{,}75 : 2{,}19$.

Izračun gubitaka električne energije dijelimo na tri moda.

Minimalni mod:

$$\Delta A_S = \frac{A_\Sigma \times \alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \Delta P_s\% = 149{,}65\ MWh \tag{7.41}$$

Normalni mod:

$$\Delta A_m = \frac{A_\Sigma \times \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \Delta P_m\% = 441{,}81\ MWh \tag{7.42}$$

Maksimalni mod:

$$\Delta A_b = \frac{A_\Sigma \times \alpha_3}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \Delta P_b\% = 244{,}44\ MWh \tag{7.43}$$

gdje su:

$\Delta P_s\%$, $\Delta P_m\%$ i $\Delta P_b\%$ - indeksi gubitaka snage pri minimalnom modu, normalnom i maksimalnom modu.

Izračun ukupnih gubitaka prema indeksu gubitka za cijelo razdoblje.

Indeks gubitka snage za cijelo razdoblje je:

$$\Delta P_{\Sigma}\% = \frac{877}{32823} = 2{,}672\% \tag{7.44}$$

Faktor gubitka izračunavamo pomoću koeficijenata f i β

$$F = 0{,}639f^2 + 0{,}361\ (f + f\beta - \beta) = 0.6848 \tag{7.45}$$

Koeficijent oblika krivulje ukupnih opterećenja je:

$$K = \frac{\sqrt{F}}{f} = \frac{\sqrt{0{,}6848}}{0{,}818} = 1{,}012 \tag{7.46}$$

Korištenjem formule za izračunavanje indeks gubitaka električne energije za puno razdoblje dobivamo:

$$\Delta A_{\Sigma}\% = K\Delta P_{\Sigma}\% = 1{,}012 \times 2{,}672\% = 2{,}704\ \% \tag{7.47}$$

$$\Delta A_{\Sigma} = A\Delta A_{\Sigma}\% = 32823 \times 10^6 \times 2{,}704\% = 887{,}53\ MWh \tag{7.48}$$

Izračun metodom pogreške. Došlo je do pogreške između gubitaka električne energije podjelom na tri moda i dobivenih rezultata mjerenjem indeksa gubitka, te slijedi

$$\Delta A_{\Sigma}^{'} = \Delta A_s + \Delta A_m + \Delta A_b = 835{,}90\ MWh \tag{7.49}$$

gdje su ΔA_s, ΔA_m, ΔA_b-gubici električne energije minimalnog, normalnog i maksimalnog moda.

Relativna pogreška je:

$$\delta\Delta A_{\Sigma} = \frac{\Delta A_{\Sigma} - \Delta A_{\Sigma}^{'}}{\Delta A_{\Sigma}} \times 100\% = 5{,}817\ \% \tag{7.50}$$

gdje je $\Delta A_{\Sigma}^{'}$ - ukupni gubici električne energije podijeljeni na tri moda.

Predložena metoda znatno smanjuje pogreška u odnosu na prethodno prikazanu što predstavlja izvorni doprinos ovog rada. Vidljivo jest da u jednačeni broj 27. metode tri moda relativna pogreška iznosi 13,47 % dok predloženoj modificiranoj metodi tri moda relativna pogreška iznosi 5,817 %, jednadžba broj (7.50).

Ovom predloženom metodom proračuni se provode uz znatno niže vrijednosti pogreške.

7.2 Izračun gubitaka u prijenosnoj mreži pomoću MATLAB alata

Za potrebe ovog rada i verifikaciju predloženog poboljšanja metoda korišten je MATLAB programski paket verzije R2017b. Metoda je programiran kao „m“ *file* i izvršen je proračun za nekoliko tipičnih dana nekih regija.

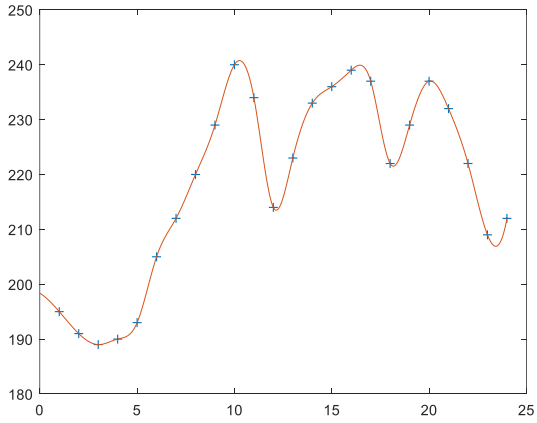
Primjer

Za prvi slučaj uzet je predstavljeni primjer u radu [70], a prikazan je u nastavku u tablici 7.

Tablica 12. Rezultati mjerenja gubitaka u jednoj regiji – Prikaz dnevnog dijagrama opterećenja konzuma analizirane regije korištene u ovom slučaju dan je na slici 24

Sat	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Opterećenje (MW)	195	191	189	190	193	205	212	220
Gubici (MW)	1,35	1,25	1,25	1,25	1,30	1,55	1,65	1,85
Sat	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**
Opterećenje (MW)	229	240	234	214	223	233	236	239
Gubici (MW)	2,15	2,50	2,45	1,75	2,00	2,30	2,40	2,50
Sat	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
Opterećenje (MW)	237	222	229	237	232	222	209	212
Gubici (MW)	2,47	1,97	2,17	2,45	2,25	1,95	1,65	1,30

Ukupno opterećenje (MW)	**5.243**
Ukupno gubici (MW)	**45,71**



Slika 24. – Dijagram dnevnom opterećenja jedne regije prezentirane u radu [70]

Za pravilno vrednovanje i valoriziranje podataka potrebno je usporediti rezultata po dvije navedene metode. U tablici 8 dan je prikaz značajki metoda i usporedbe rezultata.

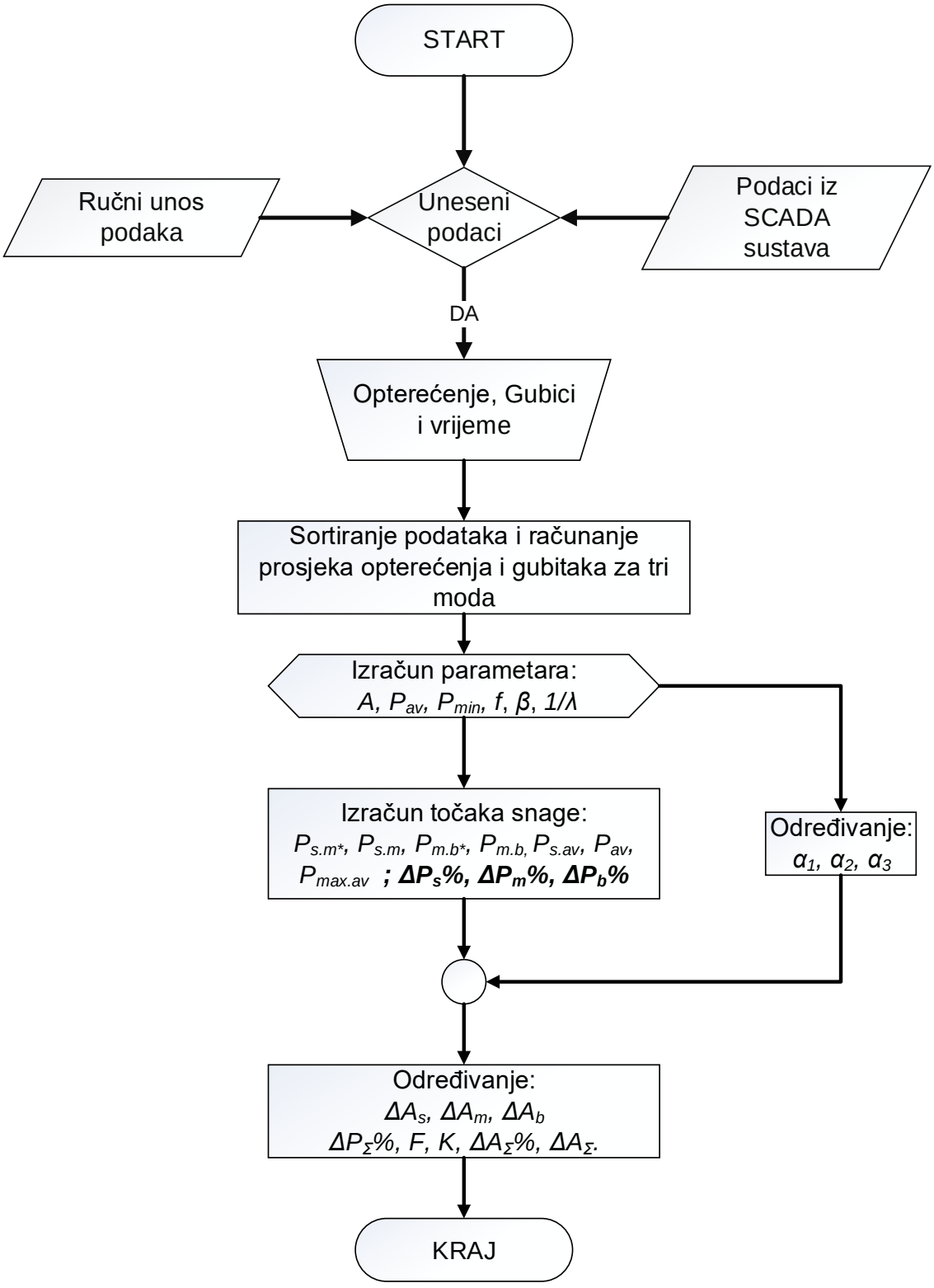
Tablica 13. Usporedba rezultata primjera prezentiranom u radu [70] i rezultata dobivenih modificiraj metodom tri moda za jednu regiju

Veličina – naziv	**Rezultati prezentirani u radu** [70]	**Rezultati dobiveni modificiranom metodom**
Promjena indeksa gubitaka kod minimalnog moda	0,686 %	0,672 %
Promjena indeksa gubitaka kod normalnog moda	0,8295 %	0,831 %
Promjena indeksa gubitaka kod maksimalnog moda	0,98 %	1,020 %
Izračun ukupnih gubitaka prema indeksu gubitaka za cijelo razdoblje	45.771,39 kWh	45.771,39 kWh
Izračun gubitaka energije podjelom u tri moda	44.637,00 kWh	45.263,82 kWh
Relativna pogreška	2,480 %	1,109 %

Iz tablice je uočljivo da kod prve metode relativna pogreška izračuna gubitaka iznosi 2,48 %, a da relativna pogreške kod modificirane metode izračuna rezultata gubitaka znatno manji i iznose približno 1.11%.

7.3 Algoritam za izračun gubitaka na prijenosnim mrežama zasnovan na metodu tri moda

Na slici 25. dan je dijagramu toka i prikaz nove korištene metode izračuna gubitaka.



Slika 25. – Dijagram toka modificirane metode Tri moda izračuna gubitaka

Metoda opisana u ovom radu je jednostavna, programibilna i brza. Za njenu realizaciju ne zahtijeva značajnu hardversku infrastrukturu samim tim moguće je implementirati u postojeće sustave.

U dijagramu toka prikazanom na slici 25. ulazne podatke moguće je unositi ručno i automatski. Automatski unos podataka namijenjen je za preuzimanje/dohvaćanje podataka iz drugih sustava kao što je SCADA sustav.

Koristeći postojeću tehnologiju aplikativnih servisa moguće je razviti sustav za predviđanje gubitaka na osnovu očitanih podataka iz drugih sustava u realnom vremenu.

8. ZAKLJUČAK

Novi pristupi proračuna gubitaka visokonaponskih vodova prijenosne mreže izraženi su kroz niz prednosti. Stalni prirast konzuma energije i fizička ograničenja prijenosnih vodova inicira potrebu za razvojem novih metoda i alata za određivanje gubitaka na prijenosnoj mreži.
Rezultati analize prezentirani u ovom radu dobiveni su na temelju mjerenih veličina u praksi i rezultata izračuna metodom tri moda i modificiranom metodom tri moda. Verifikacija metoda u ovom radu provedena je kroz dva primjera. U doktorskom radu koristili su se dva primjera. Prvi primjer je prijenosna mreža Bosne i Hercegovine, a drugi primjer je korišten iz rada [71]. Korištenjem predloženog pristupa za određivanje indeksa gubitaka prema Poboljšanoj metodi Tri moda značajno smanjujemo relativnu pogrešku izvorne metode. Pored smanjenja relativne pogreške prednost ovog pristupa ogleda se i u povećanju pouzdanosti metode što predstavlja izvorni doprinos ovog pristupa. Predloženi pristup eliminira rizike subjektivnog odlučivanja za jedan vrlo osjetljiv ulazni parametar, a time i pogrešku prilikom njegovog određivanja. Ovo je vrlo važno za programiranje i razvoj aplikativnih rješenja gubitaka u prijenosnoj mreži metodom tri moda.

Algoritam za poboljšane metode Tri moda za smanjenje pogreške predviđanja gubitaka predstavljen u ovom radu prikazuje jasan proces i korake pri računalnoj implementaciji metode. Ovaj algoritam eliminira pogrešku koja se može dogoditi pri subjektivnom određivanju granice između modova. Metoda je prikladna za kratke i duge vremenske intervale. U ovom radu prikazan je primjer računanja gubitaka jedne regije korištenjem modificirane metode Tri moda. Dakle, uzet je kratak vremenski interval (24 satno opterećenje). Podaci za dano opterećenje uneseni su u MATLAB softver u kojem je programirana metoda. Rezultati proračuna prikazuju relativnu pogrešku od 4.83 MW što je ispod 0,5 % ukupnih gubitaka.

Promjenom geometrije stupova mijenjaju se i parametri prijenosnog voda što izravno utječe na gubitke koji nastaju prilikom prijenosa električne energije. Sam koncept kompaktiranja stupova podrazumijeva promjenu geometrije stupova, odnosno smanjenje dimenzija supova. Nove izvedbe izolatora omogućavaju da se dimenzije stupova smanje u tolikoj mjeri dokle dopušta minimalna električna udaljenost između vodiča i konstrukcije i između dva vodiča. Promjena geometrije stupova ne utječe na točnost predložene metode u ovom doktorskom radu.

U razmatranom prijenosnom vodu naponskog nivoa 400 kV prilikom kompaktiranja izabrani su stupovi sa vertikalnim rasporedom vodiča, dok su postojeći stupovi Y tipa sa horizontalnim rasporedom vodiča. Prednosti ovakve izvedbe dalekovoda su manje zauzimanje prostora, osobito ukoliko je dalekovod prolazi kroz naseljena područja. Potrebno je jedno zaštitno uže umjesto dva, jednostavnije održavanje, postizanje većeg električnog raspona kod dalekovoda.

Dodatna iskoristivost i pouzdanost dalekovoda postiže se koristeći modernih vodiča na samom dalekovodu. Izborom novih vodiča značajno se mijenjaju karakteristike voda i to ne samo u električnom smislu, odnosno u pogledu prijenosa električne energije već i u mehaničkom. Danas ACCC vodiči su najmoderniji koji se mogu naći na tržištu. Takvi vodiči ne sadrže čeličnu jezgru kao što je to slučaj kod ACSR vodiča.

Gledano u cjelini uočljive su značajno bolje mehaničke i električne karakteristike ACCC vodiča u odnosu na ACSR. ACCC vodiči su lakši, mogu se više mehanički opteretiti, provjes u odnosu na ACSR vodiče na istoj temperaturi vodiča su znatno manji. Gubici na ACCC vodiču su manji u odnosu na ACSR vodič. U razmatranom 400 kV dalekovodu ukoliko bi se postojeći vodiči zamijenili sa novim ACCC vodičima približnog presjeka gubici bi se smanjili za cca 9,5% pri struji koja je približna maksimalno trajnoj dopuštenoj (I_{max} = 1920 A).

9. LITERATURA

References

[1] D. P. Kothari i I. J. Nagrath, Modern Power System Analysis Third Edition, Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2003, 1989, 1980.

[2] M. Ožegović i K. Ožegović, Električne energetske mreže I, Split, 1996.

[3] L. Jozsa, Nadzemni vodovi, Osijek, 2001.

[4] Y. M. Ghugal i U. S. Salunkhe, »Analysis and Design of Three and Four Legged 400KV Steel Transmission Line Towers,« *International Journal of Earth Sciences and Engineering,* pp. 691-694, October 2011.

[5] A. Wu i B. Ni., Line loss analysis and calculation of electric power systems, 2016.

[6] M. C. Anumaka, »Analysis Of Technical Losses In Electrical Power System (Nigerian 330kv Network As A Case Study),« *IJRRAS,* August 2012.

[7] Al-Hamouz i M. Zakariya, »CORONA POWER LOSS VERSUS OHMIC POWER LOSS IN HVDC TRANSMISSION LINES,« u *Dhahran 31261,* Saudi Arabia.

[8] L. Ramesh, P. C. S, S. Chowdhury, A. N. A i T. G. C, »Minimization of power loss in distribution networks by different techniques,« *International Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering,* pp. 1-6, 2009.

[9] N. R. a. S. Sirisumrannukul, »Feeder reconfiguration for lossreduction in distribution system with distributed generators by Tabu Search,« *GMSARN International Journal, vol. 3,* p. 47–54, 2009.

[10] U. L. K. a. T. K. N. Sinsuphun, »Loss minimization using optimal power flow based on swarm intelligences,« *Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications, vol. 9, no. 1,* p. 212–222, 2011.

[11] O. M. Bamigbola, M. A. M i O. O. M, »Mathematical modeling of electric power flow and the minimization of power losses on power transmission lines«.

[12] A. Wu, »Three-mode division of loads under multiplying probability assumption and its application. Distribution and Utilization 28(2),« 2011.

[13] C. A. D. a. R. Nadira, »The Loss That is Unknown is No Loss At All: A Top-Down/Bottom-Up Approach for Estimating Distribution Losses,« *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 20, NO. 2,* Maj 2005.

[14] F. F. D. J. M. E. P. a. C. L. T. R. Nadira, »Bulk transmission system loss analysis,« *IEEE Trans. Power Syst.,* pp. vol. 8, no. 2, pp. 405–416,, Maj 1993.

[15] J. B. M.W. Gustafson, »Transmission loss evaluation for electric systems,« *IEEE Trans. Power Syst., vol. 3, no. 3,* p. pp. 1026–1032, August 1988.

[16] Baylor, Gustafson, W. M i S. J, »Approximating the system losses equation,« *IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, no. 3,* p. pp. 850–855, August 1989.

[17] D. Sun, S. Abe, R. Shoults, M. Chen, P. Kichenberger i D. Farris, »Calculation of energy losses in a distribution system,« *IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-99,* p. pp. 1347–1356, July 1980.

[18] O. S. N. a. B. C. Pal, »Quantitative Evaluation Of Actual Loss Reduction Benefits of a Renewable Heavy DG Distribution Network,« *IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, VOL. 9, NO. 3,* July 2018.

[19] T. Göne, Electrical Power Transmission System Engineering Analysis and Design Third Edition, NW: CRC Press, 2014.

[20] C. L. Wadwah, Electric Power System, Chennai: New Age International. Publisher Ltd, 2006.

[21] K. Tonmitra, T. Ratanabunthab, N. Tonmitrc i E. Kanekod, »Reduction of power loss from corona phenomena in high voltage transmission line 115 and 230 kV,« u *International Electrical Engineering Congress, iEECON2016,* Chiang Mai, Thailand, 2016.

[22] K. . Hashimoto, K. . Kohno, Y. . Akiyama, C. . Ueda i K. . Otsuka, »Fundamental study of direct current resistance effect on transmission line characteristics,« , 2012. [Mrežno]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/iel7/6520952/6523374/06523470.pdf. [Pokušaj pristupa 8 12 2019].

[23] C.-S. . Yen, Z. . Fazarinc i R. . Wheeler, »Time-domain skin-effect model for transient analysis of lossy transmission lines,« , 1982. [Mrežno]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/1456649. [Pokušaj pristupa 8 12 2019].

[24] Y. D. S. Dawoud i D. . Linton, »Skin effect modelling of the non-linear transmisssion line,« , 1995. [Mrežno]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/document/4137355. [Pokušaj pristupa 8 12 2019].

[25] K. S. Oh, »Accurate transient simulation of transmission lines with the skin effect,« *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems,* svez. 19, br. 3, pp. 389-396, 2000.

[26] S. . Kurokawa, J. . Pissolato, M. C. D. Tavares, C. . Portela i A. . Prado, »A new procedure to derive transmission-line parameters: applications and restrictions,« *IEEE Transactions on Power Delivery,* svez. 21, br. 1, pp. 492-498, 2006.

[27] L. L.-W. Chow, Z. . Wang, B. D. Jensen, K. . Saitou, J. L. Volakis i K. . Kurabayashi, »Skin-Effect Self-Heating in Air-Suspended RF MEMS Transmission-Line Structures,« *IEEE\/ASME Journal of Microelectromechanical Systems,* svez. 15, br. 6, pp. 1622-1631,

2006.

[28] T. . Kuriyama i 敏. . 栗山, »High-frequency transmission line,« , 2005. [Mrežno]. Available: https://patents.google.com/patent/jp2006352347a/en. [Pokušaj pristupa 8 12 2019].

[29] A. . Tsuchiya i H. . Onodera, »Impact of skin effect on loss modeling of on-chip transmission-line for terahertz integrated circuits,« , 2013. [Mrežno]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/6602261. [Pokušaj pristupa 8 12 2019].

[30] Q. . Yu i O. . Wing, »Computational models of transmission lines with skin effects and dielectric loss,« *IEEE Transactions on Circuits and Systems I-regular Papers*, svez. 41, br. 2, pp. 107-119, 1994.

[31] A. . Bhadauria, »A New Equivalent Circuit Model for MIS Interconnects in Skin Effect Mode in High Speed Integrated Circuits on Lossy Substrate,« *International Journal of Advancements in Technology*, svez. 1, br. 2, pp. 262-269, 2010.

[32] M. . Tabibzadeh i M. . Mirzaie, »Modeling and transient analysis of overhead transmission lines considering corona phenomenon and skin effect,« , 2015. [Mrežno]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/document/7436120. [Pokušaj pristupa 8 12 2019].

[33] N. . Ari, »Lossy transmission line excited by an external electromagnetic field,« , 1983. [Mrežno]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/xpl/articledetails.jsp?reload=true&arnumber=1456931&count=20&index=6. [Pokušaj pristupa 8 12 2019].

[34] E. Kiessling, P. Nefzger, J. Nolasco i U. Kaintzyk, Overhead Power Lines Planning, Design, Construction, Berlin: Springer, 2003.

[35] G. Mirošević i F. Vidaković, Projektiranje građenje i održavanje dalekovoda, Zagreb: KIGEN, 2008.

[36] Y. . Youcan i D. . Yugang, »A finite element method of modelling and designing of an ACCC conductor,« , 2018. [Mrežno]. Available: https://matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2018/12/matecconf_icmme2018_01005.pdf. [Pokušaj pristupa 8 12 2019].

[37] E. Alibašić i Z. Baus, »UTJECAJ KOMPAKTNIH DALEKOVODA I NOVE GENERACIJE VODIČA NA GUBITKE U PRIJENOSNIM MREŽAMA,« u *14. SAVJETOVANJE BH K/O CIGRÉ*, Neum, 2019.

[38] B. . Burks, D. . Armentrout i M. . Kumosa, »Failure prediction analysis of an ACCC conductor subjected to thermal and mechanical stresses,« *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, svez. 17, br. 2, pp. 588-596, 2010.

[39] . . Rashmi, G. . Shivashankar i . . Poornima, »Overview of different overhead transmission line conductors,« *Materials Today: Proceedings*, svez. 4, br. 10, pp. 11318-11324, 2017.

[40] C. . Global, Engineering Transmission Lines With High-Capacity, Low-Sag ACCC Conductor, ur., svez. , , : , 2011, p. .

[41] S. . Gupta i S. K. Vij, »Transmission Line Sag Calculation with Ampacities of Different Conductors,« , 2018. [Mrežno]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-2035-4_19. [Pokušaj pristupa 8 12 2019].

[42] E. . Hakansson, P. . Predecki i M. . Kumosa, »Galvanic Corrosion of High Temperature Low Sag Aluminum Conductor Composite Core and Conventional Aluminum Conductor Steel Reinforced Overhead High Voltage Conductors,« *IEEE Transactions on Reliability*, svez. 64, br. 3, pp. 928-934, 2015.

[43] T. S. Lessa, D. S. Lopes, P. S. F. Antunes, S. M. Filho, M. Z. Fortes, V. H. Ferreira i G. G. Sotelo, »Evaluation of Carbon Fiber Cables in Transmission Lines,« *Electric Power Components and Systems*, svez. 46, br. 5, pp. 544-559, 2018.

[44] S. . Kumar, G. . Pal i T. . Shah, »High performance overhead power lines with carbon nanostructures for transmission and distribution of electricity from renewable sources,« *Journal of Cleaner Production*, svez. 145, br. , pp. 180-187, 2017.

[45] J. . Hoffman, J. . Middleton i M. . Kumosa, »Effect of a surface coating on flexural performance of thermally aged hybrid glass/carbon epoxy composite rods,« *Composites Science and Technology*, svez. 106, br. , pp. 141-148, 2015.

[46] Y. . Du, W. . Cao i X. H. Zhang, »Analysis of ACCC Applied in the Capacity Expansion Reformation of Electric Transmission Lines in East China Power Grid,« *Advanced Materials Research*, svez. , br. , pp. 1866-1871, 2012.

[47] X. . Gong, H. . Wang, Z. . Zhang, J. . Wang, J. . Wang i Y. . Yuan, »Tests on the first 500 kV compact transmission line in China,« , 2000. [Mrežno]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=900051. [Pokušaj pristupa 8 12 2019].

[48] G. . Antonini i G. . Ferri, »Compact transmission line representation,« , 2004. [Mrežno]. Available: https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-smt_20040092. [Pokušaj pristupa 8 12 2019].

[49] T. . Landers, R. . Richeda, E. . Krizanskas, J. . Stewart i R. . Brown, »High phase order economics: constructing a new transmission line,« *IEEE Transactions on Power Delivery*, svez. 13, br. 4, pp. 1521-1526, 1998.

[50] B. J. Pierre i G. . Heydt, »Increased ratings of overhead transmission circuits using HTLS and compact designs,« , 2012. [Mrežno]. Available: http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.ieee-000006336311. [Pokušaj pristupa 8 12 2019].

[51] S. . Wei, L. . Qingmin, Z. . Liang, Z. . Li i L. . Xinchang, »Research on lightning performance of AC/DC hybrid transmission lines on the same tower,« *Iet Generation Transmission & Distribution*, svez. 7, br. 2, pp. 166-174, 2013.

[52] »Compact Overhead Transmission Lines - Power Line,« POWER LINE, [Mrežno]. Available: http://www.power-line.bg/en/products/compact-overhead-transmission-lines.

[53] S. J. D. N. M. K. P. J. R. M.J. Battisson, »Some effects of the frequency dependence of transmission-line parameters,« *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, IET,* svez. 116, br. 7, July 1969.

[54] A. Budner, »Introduction of Frequency-Dependent Line Parameters into an Electromagnetic Transients Program,« *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,* Sves. %1 od %2PAS-89, br. 1, 1970.

[55] M. T. J.D.Glover, POWER SYSTEM Analysis and Design Forth Edition, Thomson Learning part of the Thomson Corporation, 2008.

[56] O. K. Ožegović M., Električne mreže III, Split: Sveučilište u Splitu, 1977.

[57] B. . Ruan, T. . Hou, Y. . Li, Z. . Mei i J. . Huang, »An Improved Method of the Energy Loss Calculation Considering the Volatility of Wind Power Generation,« *Energy and Power Engineering,* svez. 09, br. 4, pp. 281-291, 2017.

[58] E. T. L, N. M. O, E. A. O i C. . Jonah, »Overview Of Losses And Solutions In Power Transmission Lines,« *Network and Complex Systems,* svez. 4, br. 8, pp. 24-31, 2014.

[59] State Grid Corporation of China (2004), »Provisions of State Grid Corporation of China on the Management of Electric,« State Grid Corporation of China, Beijing, 2004.

[60] H. L. Willis, Power Distribution Planning Reference Book, Second Edition, NEW YORK: MARCEL DEKKER, INC., 2004.

[61] I. I. I. Š. B. A. M. M. Ivan Pavičić, »PRAĆENJE GUBITAKA ZA VODOVE PRIJENOSNE MREŽE,« u *HRVATSKI OGRANAK MEĐUNARODNOG VIJEĆAZA VELIKE ELEKTROENERGETSKE SUSTAVE –CIGRÉ 13. simpozij o sustavu vođenja EES-a*, Rovinj, 2018.

[62] X. Y. Z. X. Yu W., Analysis of technical losses of power grids and, 2006.

[63] H. Q., »Discussion of conductor selection by corona effect for 330 kV line in high attitude area,« u *Electric Power Technology*, 1992.

[64] V. . Bakulevskiy, »Research into the influence of climatic factors on the losses of electric energy in overhead power transmission lines,« *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* svez. 5, br. , pp. 4-8, 2016.

[65] L. . Cradden i G. . Harrison, »Adapting overhead lines to climate change: Are dynamic ratings the answer?,« *Energy Policy,* svez. 63, br. , pp. 197-206, 2013.

[66] J. . Wu, M. . Li, B.-h. . Zhang, B. . Ruan i D. . Yu, »Distribution network energy loss calculation method considering wind power integration,« , 2015. [Mrežno]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/7432335. [Pokušaj pristupa 4 2 2020].

[67] M. . Regula, A. . Otcenasova, M. . Roch, R. . Bodnar i M. . Repak, »SCADA system with power quality monitoring in Smart Grid model,« , 2016. [Mrežno]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/7555577. [Pokušaj pristupa 4 2 2020].

[68] D. X. L. X. e. a. Li C., »Analysis method of comprehensive line losses of power grids based on real-time system data and its application,« *Electric Power Automation Equipment 25(3): 47–50.*, 2005.

[69] Z. B. M. T. Emir Alibašić, »ALGORITAM ZA SMANJENJE POGREŠKE IZRAČUNA GUBITAKA U ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA KORIŠTENJEM PODATAKA IZ SCADA SUSTAVA,« u *CIGRE*, Neum, 2019.

[70] F. M. Z. B. S. N. I. Petrović, »A new approach for the analysis of losses calculation in high-voltage transmission networks,« *Tehnički vjesnik,* svez. Vol. 25 No. 5, 2018..

[71] Z. M. Al-Hamouz, »Corona Power Loss, Electric Field, and Current Density Profiles in Bundled Horizontal and Vertical Bipolar Conductors,« *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, svez. 38, br. 5, p. 1182, 2002.

[72] H.Parekh i K.D.Srivastava, »Effect of Avalanche Space Charge Field on the Calculation of Corona Onset Voltage,« *IEEE Transaction on Electrical Insulation*, Sves. %1 od %2Vol.EI-14., pp. 181-192, 1979.

POPIS SLIKA

Slika 1. – Položaj konstanti voda duž dx [2]. 20
Slika 2. – Nadomjesna shema dijela voda [5]. 22
Slika 3. – Homogeno uže: a) sa 7 žica, b) s 19 žica 31
Slika 4. – AL/Č uže: a) 6:1, b) 2,2:1 c) 8:1 31
Slika 5. – Copperweld ili Alumoweld uže: a) sa 7 žica, b) sa 3 žica 31
Slika 6. – Expanded uže: segmentni umetci od použenog katraniziranog papira 31
Slika 7. – Šuplji vodiči: a) Anaconda A – usukani odstojnik b)HH 31
Slika 8. – Usporedba klasičnog ACSR vodiča i ACCC vodiča [37] 31
Slika 9.– Različiti oblici glava stupova [35] 33
Slika 10. – Silueta vizualno i ekološki prihvatljivijeg oblika nosnog stupa 35
Slika 11. – Usporedba klasičnog nosnog stupa (a) i radikalno kompaktiranog stupa (b) 35
Slika 12. A – silueta nosnog stupa klasičnog 400 kV dalekovoda, B – silueta predloženog komapaktnog nosnog stupa 400 kV dalekovoda 35
Slika 13. – Rastojanja kod klasičnog voda (lijevo) i kod kompaktiranog voda (desno) 35
Slika 14. – Položaj parametara voda u elementarnom dijelu voda [2]. 36
Slika 15. – Nadomjesna Π shema voda [55] 40
Slika 16. – Unos podataka o klasičnoj izvedbi dalekovoda u MATLAB programski paket 43
Slika 17. – Unos podataka o kompaktranoj izvedbi dalekovoda u MATLAB programski paket. 44
Slika 18. – Usporedba klasičnog provjesa ACSR vodiča i ACCC vodiča [40]. 46
Slika 19. – Izračun krivulje godišnjih gubitaka električne energije u iznosu od 35 do 110 kV dalekovoda: (a) βy= 0.20 ; (b) βy= 0.30 ; (c) βy= 0.40 ; (d) βy = 0,50 [5] 52
Slika 20. – Izračunate krivulje godišnjih gubitaka električne energije za 220 kV dalekovod [5] 54
Slika 21. – Čvorište transformatorskog opterećenja i opterećenja bez gubitaka 69
Slika 22. – Dijagram toka nove metode izračuna gubitaka 72
Slika 23. – Dnevni dijagram opterećenja analizirane regije 79
Slika 24. – Dijagram dnevnom opterećenja jedne regije prezentirane u radu [70] 87
Slika 25. – Dijagram toka modificirane metode Tri moda izračuna gubitaka 89

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba parametara dalekovoda prije i poslije kompaktiranja 45
Tablica 2. Usporedba gubitaka ACSR i ACCC vodiča 45
Tablica 3. Izračunate vrijednosti Fy 220kV dalekovoda 53
Tablica 4. δ_h vrijednost na različitim visinama 56
Tablica 5. Srednji geometrijski razmak između snopa vodiča (cm) 58
Tablica 6. Prikaz izmjerenih i opterećenja i gubitaka jednog dalekovoda prije rekostrukcije 75
Tablica 7. Prikaz izmjerenih i opterećenja i gubitaka jednog dalekovoda poslije rekonstrukcije 75
Tablica 8. Prikaz opterećenja i gubitaka jednog dalekovoda za vrijednosti opterećenja iz tablice 4. i Al/Č vodiče 76
Tablica 9. Usporedba izračunatih vrijednosti opterećenja i gubitaka jednog dalekovoda prije i poslije rekonstrukcije dalekovoda 77
Tablica 10. Rezultati mjerenja gubitaka u jednoj regiji za jedan tipičan dan 78
Tablica 11. Prikaz gubitaka u jednoj regiji sortirani po opterećenju, izračunati prosjeci vrijednosti gubitaka i opterećenja koji odgovaraju pojedinom modu 84
Tablica 12. Rezultati mjerenja gubitaka u jednoj regiji – Prikaz dnevnog dijagrama opterećenja konzuma analizirane regije korištene u ovom slučaju dan je na slici 24 87
Tablica 13. Usporedba rezultata primjera prezentiranom u radu [70] i rezultata dobivenih modificiraj metodom tri moda za jednu regiju 88

SAŽETAK

Povećanje energetske učinkovitosti elektroenergetskog sektora je opredjeljenje svih nacionalnih prijenosnih operatera. Jedan od temeljnih ciljeva je smanjenje gubitka u elektroenergetskim mrežama. Električne mreže su jedan od najvažnijih dijelova elektroenergetskog sustava. Pouzdanost isporuke te kvaliteta električne energije neposredno ovisi o vrsti i izgrađenosti elektroenergetske mreže. Poznato je da se gubici u prijenosnoj mreži mogu definirati kao razlike preuzete i predane električne energije. Određivanje gubitaka na vodovima ima nekoliko temeljnih zadaća. Prva zadaća jeste odrediti razliku između izračunatih gubitaka i stvarnih gubitaka te odrediti razlog za tu razliku i da pokaže neophodne smjernice za poduzimanje mjera za smanjenje gubitaka. Drugi zadaća je procjena indeksa gubitaka za planiranje i formulaciju različitih planova.

U ovom rada je prikazan novi pristup za smanjenje pogreške između izračunatih i stvarnih gubitaka korištenjem nove metode koja se bazira na tri modificirana moda, odnosno sasvim novim pristupom za izračun indeksa gubitaka.

U ovom doktorskom radu predložena metoda znatno smanjuje pogrešku u odnosu na klasičnu metodu na tri moda. Također, razvijen je algoritam koji opisuje korake za implementaciju metode.

Ključne riječi: gubici; snaga; proračun; metoda tri moda

Improved method of Three modes for the estimation of losses in the transmission network

ABSTRACT

Increasing the energy efficiency of the electricity sector is the commitment of all national transmission operators. One of the main goals is to reduce losses in electrical networks. Electrical networks are one of the most important parts of the electric grid. Delivery reliability and the quality of electricity directly depend on the electrical networks. It is well known that losses in the transmission network can be defined as the difference between the electricity taken and delivered. Determining the losses in overhead power lines has several basic tasks. One task is to determine the difference between calculated losses and actual losses, to determine the reason for the difference between calculated and actual losses, and to present the necessary data for taking measures to reduce losses. The second task is an estimation of the loss index for planning and formulation of various plans.

The purpose of this paper is to present a new approach to reduce the difference between calculated and actual losses by modifying the method in three modes, or a new approach to calculating the loss index.

The proposed method in this doctoral thesis significantly reduces the error in relation to the classic three-mode method. Also, an algorithm has been developed that describes the steps for implementing the method.

Keywords: losses; power; calculation; method of three modes

ŽIVOTOPIS

Rođen sam 12. ožujka 1982. godine u Tuzli, Bosna i Hercegovina. Oženjen sam i otac troje djece. Osnovnu i srednju elektrotehničku školu završio sam u Živinicama. Nakon završetka srednje škole stekao sam srednju stručnu spremu - elektrotehničar energetike. Nakon završetka srednje škole upisao sam I. godinu elektrotehničkog sveučilišnog studija Fakulteta elektrotehniku u Tuzli. Tijekom studiranja sudjelovao sam na mnogim seminarima i edukacijama koji su bili organizirani na Univerzitetu u Tuzli ili od strane drugih institucija. Tijekom studiranja na edukaciji poduzetnika koju je organiziralo Ministarstvo vanjskih poslova Republike Austrije i Univerzitet u Tuzli pobijedio sam u natječaju poslovnih planova i osvojio novčanu nagradu. Moj „Sistem daljinskog poslovanja" je nagrađen zlatnom medaljom na izložbi inovacija u Osijeku (Hrvatska) 2007. godine. Tijekom studiranja, između ostalog, bavio sam se i programiranjem te kao student radio sam londonski „The Times" i „The Sun". Godine 2005. osnovao sam tvrtku pod nazivom Agencija Inform kojoj je temeljna djelatnost programiranje i razvoj aplikacija. U razdoblju 2008. - 2016. godina radim u tvrtki Umel-dalekovodmontaža d. o. o. Tuzla na poziciji projektanta, *Project Managera* i *Site Managera*. Godine 2010. položio sam stručni ispit, a 2011. završio sam obuku za montažu, popravku, nadzor, upravljanje i održavanje VN prekidača (SIEMENS) u Berlinu. Tijekom razdoblja dok sam radio u Umel-dalekovodmontaži d. o. o. Tuzla sudjelovao sam u mnogim značajnim energetskim projektima u regiji kao projektant/*Project Manager/Site Manager* od kojih bih istakao:

- *Project manager* i odgovorni inženjer za elektromontažne radove na 2x400 kV BERIČEVO - KRŠKO(SLOVENIJA)
- rukovoditelj radilišta i odgovorni inženjer za elektromontažne radove na 220 kV DIVAČA - KLEČE (SLOVENIJA)
- rukovoditelj dijela radilišta na 400kV DV PRIŠTINA – TIRANA
- *site manager* na TS 400/110 kV, 300MVA Ferizaj
- *site manager* na TS 400/110 kV, Peja 3
- rukovoditelj radilišta i odgovorni inženjer za elektromontaže radove i nadzorni inženjer građevinske i montažne radove na DV 400 kV Ferizaj 2, DV 2x400 kV ulaz - izlaz, DV 2x110 kV Bibaj 2 - Ferizaj 2, DV 110 kV Ferizaj 2 - Gnjilan 5
- Sudionik u pripremi ponude te realizaciji projekta rekonstrukcija niskonaponske mreže, srednjenaponskih vodova i trafostanica pod nazivom Electric Power Reconstruction II -

Credit No. 23.871 (BA) Supply and Installation of Plant and Equipment Distribution Component for EPBIH No. EPBiH-ECSEE-APL3-D3/10-EIB

- Odgovorni rukovoditelj elektromontažnih radova na projektu REKONSTRUKCIJA DV 35 kV TE TUZLA-TS 35/10/6 kV „Brana Modrac“ i TS 35/6 kV „Cementara“
- Sudionik u realizaciji projekta PROŠIRENJE AMM SISTEMA U DISTRIBUTIVNIM PODRUŽNICAMA JP ELEKTROPRIVREDA BiH d.d. SARAJEVO,

Godine 2016. zaposlio sam se u Zavodu zdravstvenog osiguranja Tuzlanske županije na funkciji pomoćnika direktora za IT sustav, gdje sam vodio ili implementirao nekoliko značajnih projekata i uspostavio vrlo važne poslovne procese. U istoj godini postajem stalni član tehničkog komiteta BAS/TC 1 Informaciona tehnologija - Instituta za standardizaciju Bosna i Hercegovina. 2017. godine stječem certifikat za vodećeg auditora za standard ISO 27001:2013 uključujući i 31000:2009 i GDPR, te 2018. godine vodeći auditor za standard ISO 9001:2015.

U razdoblju od 2006. do 2008. godine angažiran sam kao predavač lekcija iz oblasti informacijske tehnologije u Finconsult d. o. o. Tuzla.

Od 2016. godine angažiran sam kao predmetni asistent na predmetu Poslovna informatika na Visokoj školi za finansije i računovodstvo FINra Tuzla.

Godine 2012. upisujem doktorski studij na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Hrvatska.

Tijekom doktorskog studija objavio sam 14 radova, od kojih je jedan u časopisu A kategorije, a šest u časopisima B kategorije.