PROCJENA STANJA TEŠKIH ELEKTROMOTORNIH POGONA S VISOKONAPONSKIM ASINKRONIM KAVEZNIM MOTORIMA PRIMJENOM NUMERIČKIH RELEJA

Jahić, Adamir

Doctoral thesis / Disertacija

2022

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:200:807061

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

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

Adamir Jahić

PROCJENA STANJA TEŠKIH ELEKTROMOTORNIH POGONA S VISOKONAPONSKIM ASINKRONIM KAVEZNIM MOTORIMA PRIMJENOM NUMERIČKIH RELEJA

Doktorska disertacija

Osijek, 2022.godina

Doktorska disertacija izrađena je na:

Zavodu za elektrostrojarstvo,

Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek,

Sveučilišta J.J. Strossmayera Osijek.

Mentor:

prof.dr.sc. Željko Hederić, redoviti profesor

Disertacija ima 136 stranica

Doktorski rad br.: 85

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Željku Hederiću, redovitom profesoru Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek,Sveučilišta J.J. Strossmayera Osijek na ukazanoj pomoći u toku izrade ove doktorske disertacije.

Posvećujem svojoj majci.

ŽIVOTOPIS

mr. sc. Adamir Jahić, dipl.el.ing.

Adamir Jahić je rođen 21. 01. 1963. godine u Tuzli, gdje i sada živi. Osnovnu i srednju školu završio u Tuzli nakon čega upisuje studij na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Tuzli, smjer elektroenergetski koji uspješno završava 1989. godine.

Nakon diplomiranja, zasnovao je 1989. godine radni odnos u IP "Krivaja" Zavidovići, gdje je u periodu od 1989. do 1996. godine radio na poslovima rukovodioca gradilišta i samostalnog elektro projektanta.

Od 1996. godine do danas u stalnom je radnom odnosu u JP Elektroprivreda BiH d.d. Sarajevo Podružnica "Elektrodistribucija Tuzla" u Tuzli. Radio je na poslovima vodećeg inženjera za zaštitu, automatiku i mjerenja, te rukovodioca službe za održavanje transformatora i rukovodioca službe za održavanje mreža i postrojenja. Trenutno radi na mjestu rukovodioca sektora za održavanje mreža i postrojenja. U istoj firmi angažovan je na poslovima održavanja elektroenergetskih objekata 35 kV i 10 kV naponskog nivoa.

Pored redovnog održavanja učestvuje u pripremi, izradi tehničke dokumentacije, nadzoru na izgradnji i sanaciji te realizaciji velikog broja značajnih investicionih projekta koje izvodi "Elektrodistribucije Tuzla".

Kao vodeći stručnjak u oblasti zaštite elektroenergetskih postrojenja u firmi u kojoj radi, učestvovao je u otklanjanju i sanaciji svih većih kvarova na električnim postrojenjima i mrežama, koje su u nadležnosti "Elektrodistribucije Tuzla" u Tuzli.
Završio je nekoliko stručnih specijalističkih obuka iz oblasti relejne zaštite i lokacije kvarova na elektroenergetskim kablovima.

Postdiplomski studij je upisao 2008. godine na Fakultetu elektrotehnike Univerziteta u Tuzli - odsjek Energetska elektrotehnika. Postdiplomski studij je uspješno okončao 2009. godine.

Područje interesa su mu relejna zaštita, elektromotorni pogoni, te elektroenrgetske mreže i postrojenja. Četiri godine je bio predsjednik studiskog komiteta B-5 CIGRE BiH. Ima više objavljenih radova u stručnim časopisima i međunarodnim konferencijama.

Sadržaj

1. UVOD 1

2. TEŠKI EMP U DINAMIČKOM REŽIMU RADA 8

2.1. Osnove dinamičkog stanja EMP 11

2.2. Dinamika EMP pri isklopu asinkronog motora sa električne mreže 16

2.3. Direktni isklop i ponovni uklop asinkronog motora 17

2.4. Nagle promjene opterećenja - udarci tereta 23

2.5. Dinamička stanja teških EMP sa asinkronim motorima 24

2.6. Analiza i usporedba rezultata istraživanja 28

2.6.1. Opravdanosti ulaganja u osuvremenjivanje relejnih zaštita VN teških EMP 29

2.6.2. Analiza primjene disturbance recordera u dijagnostičke svrhe 30

2.6.3. Analiza dobivenih rezultata na realnom EMP 30

3. MEĐUSOBNI UTJECAJI ELEKTRIČNE MREŽE I POGONSKIH ASINKRONIH KAVEZNIH MOTORA KOD TEŠKIH EMP 32

3.1. Utjecaj napojne mreže na rad EMP 32

3.1.1. Smetnje zbog promjenljive visine napona napajanja 33

3.1.2. Smetnje zbog nestandardnog oblika napona 35

3.1.3. Smetnje zbog nesimetrije trofazne mreže 37

3.1.4. Smetnje zbog prenapona u mreži 44

3.1.5. Utjecaj promjene frekvencije mreže na rad pogonskih motora 47

3.1.6. Utjecaj viših harmonika na rad pogonskih motora 47

3.1.7. Prolazni kvarovi iz mreže – brza automatska prekapčanja VN elektromotora 51

3.2. Utjecaj teških EMP sa asinkronim motorom na napojnu mrežu 55

3.2.1. Utjecaj teških EMP na propade napona 55

3.2.2. Nastanak prenapona pri uključenju i isključenju teških EMP za ASKM 6k 57

3.3. Opasna pogonska stanja kod VN asinkronih kaveznih motora 58

4. ZAŠTITA TEŠKIH ELEKTROMOTORNIH POGONA SA VISOKONAPONSKIM ASINKRONIM KAVEZNIM MOTORIMA 60

4.1. Razvoj zaštita EMP 60

4.2. Principi zaštite VN kaveznih strojeva koji rade u teškim pogonima sa osvrtom na konvencionalne metode štićenja 62

4.2.1. Primjena analognih masa za termičku sliku asinkronih motora 69

4.2.2. Zagrijavanje i zaštita asinkronih strojeva po modelu homogenog tijela 69

4.2.3. Ostali modeli zagrijavanja asinkronih motora 73

4.3. Suvremene zaštite teških EMP 74

4.3.1. Zaštita VN motora u složenim sustavima 74

4.3.2. Funkcije zaštite 74

4.3.3. Koncept zaštite VN strojeva primjenom mikroprocesora 75

4.3.4. Primjer zaštite velikog EMP 78

4.3.5. Dodatne funkcije numeričkih releja 83

4.3.6. Temelji primjene suvremenih zaštita teških EMP 88

5. DIJAGNOSTIČKE METODE ZA OTKLANJANJE KVAROVA NA ROTORU VN ASINKRONIH KAVEZNIH MOTORA 89

5.1. Kvarovi VN asinkronih kaveznih motora 90

5.2. Dijagnostika kvarova i nadzor VN asinkronih motora sa kaveznim rotorom 97

5.2.1. Off-line metode dijagnostike 99

5.2.2. On line metode dijagnostike 102

6. SPEKTRALNA ANALIZA STRUJE STATORA MOTORA 108

6.1. Spektralna analiza struje statora motora 108

6.2. Frekventne komponente struje statora 113

7. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA 118

7.1. Istraživanja na malom trofaznom NN asinkronom kaveznom stroju 118

7.2. Istraživanja na teškom EMP mlina 6. bloka 6. TE Tuzla 124

8. ZAKLJUČAK 135

LITERATURA 137

SAŽETAK 142

ABSTRACT 143

PRILOZI

1. UVOD

Asinkroni električni strojevi velikih snaga najčešće su i glavni pogonski strojevi raznih elektromotornih pogona (EMP) koji se nalaze u rudnicima, termoelektranama, kemijskim industrijskim postrojenjima, postrojenjima za drobljenje i slično. Spomenuti EMP imaju teške uvjete pokretanja zbog toga što njihovi radni mehanizmi (tereti) imaju velike zamašne mase, tj. velike momente inercije. Pojam "teški" EMP nije strogo definiran, ali se uglavnom veže za odnos zamašnih masa radnog mehanizma i rotora motora. Pogoni kod kojih je zamašna rotirajuća masa radnog mehanizma 10-20 puta veća od momenta inercije mase rotora stroja zovu se "teški" EMP. U pravilu se radi o pogonima robusne konstrukcije, projektiranih da mogu izdržati velika termička naprezanja. Pokretanje kod ovakvih EMP traje veoma dugo i do 100 sekundi, čime se smanjuju mehanička naprezanja konstrukcije pri zaletu [1, 2, 3].

Ovisno o tipu radnih mehanizama, uvjetima rada EMP i slično, pogonski asinkroni motori mogu biti sa kaveznim rotorom (namot čine štapovi i kratkospojni prstenovi) ili danas rjeđe korišteni kliznokolutni asinkroni motori (namot rotora izveden je kao i na statoru sa izvedenim krajevima preko kliznih prstenova). Uporaba jednih i drugih zavisi od mnoštva faktora, a najznačajniji faktor je način i težina pokretanja pogona, odnosno radnog mehanizma [4]. U općem slučaju to znači da u pogonima kod kojih je otežano pokretanje, da li zbog toga što kreću opterećeni ili zbog toga što imaju velike zamašne mase, obično se koriste kliznokolutni asinkroni motori. Međutim, to je povijesno nasljeđe iz vremena kada još nisu bili razvijeni elektronički sustavi pokretanja kaveznih motora, te se kontrola smanjenja struje pokretanja postizala povećanjem otpora rotorskog namota. No iz razloga velike cijene zamjene te ispravnosti i kvalitete izrade u brojnim teškim EMP još postoje rješenja sa kliznokolutnim asinkronim motorima, koji imaju bitnu prednost u skoro dvostruko većem poteznom momentu za isti gabarit motora i iznosa poteznih struja.

Viskonaponski (VN) asinkroni kavezni motori (AKM) danas predstavljaju najrasprostranjenije rješenje u suvremenim industrijskim pogonima u kojima se pojavljuju teški EMP. Ispadi takvih motora zbog kvarova mogu prouzročiti dugoročne zastoje u bitnim tehnološkim procesima sa nesagledivim posljedicama. U toku svog rada VN AKM kao pogonski motori bitnih elektromotornih pogona nailazi na razne smetnje, koje u osnovi potiču od radnog mehanizma, a rjeđe od napojne električne mreže. Zbog neželjenih utjecaja svih tih smetnji asinkroni stroj kao osnova EPM može biti teže oštećen ili potpuno uništen, odnosno nastavak rada EMP zahtjeva novi motor što u pravilu znači dugo vrijeme isporuke i montaže te stoga

velike troškove zastoja procesa. Ranim otkrivanjem, kvarova na vitalnim dijelovima EMP, prije svega samog pogonskog stroja, izbjegavaju se potencijalne prijetnje nastanka većih kvarova. Najčešći kvarovi pojavljuju se kao mehanička puknuća na štapovima i prstenovima kaveznog rotora, koji onda predstavljaju izvor električne i magnetske nesimetrije asinkronog stroja, odnosno mehanički kvar rotorskog namota dovodi do uvjeta povećanog elektromagnetskog naprezanja i pojave povišenog termičkog naprezanja stroja [3].

Projektiranje pogonskog motora teških EMP ima određene limite, odnosno praktično je nemoguće predvidjeti sve moguće oblike nepredviđenih kvarova (električnih i mehaničkih kvarova), koji i uz pažljivu montažu i održavanje moraju imati rizik od pojave kvara, odnosno racionalizacija troškova proizvodnje elektromotora vrlo često ide nauštrb dostatnog dimenzioniranja stroja da bi mogao izdržati sve oblike naprezanja. Praktična iskustva (kao i ekonomski trendovi) u prvi plan su postavila preventivno održavanje (eng. *condition monitoring*) koja onda omogućavaju uštede u gabaritima EMP koji rade na graničnim opterećenjima [5].

Drugi tip problema predstavlja njihanje napona mreže što je posljedica topologije napajanja cijelog postrojenja koje u pravilu ima više teških EPM, te njihov nesinkronizirani rad utječe na tokove energije i s time vezanim padovima napona napajanja. Promjene napona napajanja (visokonaponska mreža), previsoki ili preniski napon na stezaljkama motora, mogu uzrokovati znatna strujna preopterećenja kod stroja. Dakako da se ne smiju zaboraviti i razne prijelazne pojave u mreži koje također mogu izazvati različita opasna pogonska stanja stroja.

Mehanička oštećenja izolacije namota mogu nastupiti i uslijed nepropisno osiguranih uvjeta rada stroja, odnosno pojave ulaska u stroj oštrih mehaničkih tijela, čestica ili vodljive prašine sa rashladnim zrakom što može dovesti do proboja izolacije na nekim mjestima, pa treba zaštititi stroj od daljnjeg širenja takvog kvara [6].

Nedostatak energije, odnosno električne energije kao pokretača industrijskih pogona, u svijetu aktualizira problematiku povećanja energetske efikasnosti i stabilnosti u radu elektroenergetskog postrojenja, odnosno EMP. Pored toga, poznato je da je bit tržišnog poslovanja smanjenje cijene konačnog proizvoda, što podrazumijeva između ostalog osuvremenjivanje tehnoloških procesa, podizanje nivoa automatizacije pogona što ima za posljedicu smanjenje troškova proizvodnje, primjenu suvremenih uređaja energetske elektronike i suvremenih metoda upravljanja i zaštite, smanjenje troškova održavanja, dobre kvalitete napojne električne mreže, smanjenja troškova osiguranja itd. Izbor optimalnog rješenja kombinacije prethodno navedenih pojedinačnih rješenja je na kraju najbitniji [7].

Kod EMP, bitnih za proizvodni proces, neželjeni prekid rada EMP, koji najčešće znači i prekid kompletnog procesa, može dovesti do velikih materijalnih šteta koje znaju biti znatno veće od vrijednosti samog stroja. U takvim slučajevima, sustav detekcije kvara i zaštite postrojenja se podešava najčešće da omogućava produženi rad stroja nakon detekcije kvara ili nedozvoljenog preopterećenja. Posljedično to može značiti čak i potpuno uništenje motora ako se bitno produžava period rada postrojenja dok se ne uključi rezervni pogon ili ne poduzme neka druga slična mjera. Takva potreba se posebno ispoljava kada prekid pogona proizvodnog procesa može ugroziti sigurnost i živote ljudi [5].

Ekspertni sustavi održavanja EMP deklariraju različita nenormalna opasna pogonska stanja kao početak kvara, djelomično ili potpuno uništenje motora ili cijelog EMP-a. Pri analizi utjecaja smetnji iz raznih izvora na parametre i rad EMP potrebno je razlikovati smetnje koje nastupaju u statičkim stanjima (u trajnom radu) od onih koje su povezane s dinamičkim stanjima (pri prijelaznim pojavama).

Jedan od značajnih faktora održavanja kontinuiteta proizvodnog procesa predstavlja i zaštita EMP, odnosno zaštita pogonskih strojeva. Zaštita EMP, predstavlja dio sveobuhvatne zaštite postrojenja i proizvodnog procesa, a sastoji se od niza mjera koje je potrebno poduzimati kako u eksploataciji tako i u toku same gradnje EMP . Definicija zaštite EMP obuhvata mnoga kompleksna tehnička, a u osnovi i ekonomska pitanja izgradnje pogonskih rezervi, višestrukog osiguranja napajanja električnom energijom, itd. Razmatra li se zaštita EMP u užem smislu te riječi može se reći da ona predstavlja zaštitu protiv predvidivih uzroka uništenja ili oštećenja njegovog elektromotora. Pri tome se ne smije zaboraviti da i ova definicija zaštite EMP vodi računa o ekonomskoj važnosti konkretnog EMP, te stoga zaštita treba da štiti elektromotor na način koji najbolje odgovara cjelini proizvodnog procesa.

Više je faktora koji utiču na izbor i podešavanja zaštita EMP. Rotor elektromotora predstavlja element u kome se vrši konverzija električne energije u mehaničku i to je glavni razlog zašto je taj dio stroja posebno izložen kako mehaničkim tako i termičkim naprezanjima. To je posebno izraženo kod kaveznih asinkronih strojeva [8]. Dinamički režimi rada teških EMP sa VN AKM su sa stanovišta zaštite najopasniji iz razloga što je potrebno osigurati višestruko veća električna i magnetska naprezanja od onih u nazivnoj radnoj točki, a sustav zaštite ih ne smije prepoznati kao kvarno stanje, iako se vrlo malo razlikuju od naprezanja kod stvarnog kvarnog stanja u nazivnoj točki. Stoga je bitno kod projektiranja posebno obratiti pažnju na slučajeve prijelaznih pojava kod takvih EMP. To podrazumijeva analizu i kvalitativni prikaz ponašanja pogonskog motora u procesu pokretanja, kočenja, kao i automatskog preklapanja u mreži. Prevelike struje koje

nastaju u tim režimima rada u pravilu dovode do oštećenja namota uslijed prevelikih struja te je bitno provesti ograničenje ovih struja na dozvoljenu vrijednost, odnosno isključenje motora da bi se izbjegle deformacije namota. U posljednje vrijeme proizvođači VN AKM ovom problemu prilaze sa posebnom obazrivošću primjenom posebnih tehnologije izrade i učvršćenja namota.

Oprema u VN mrežama koje napajaju VN EMP sa AKM kao pogonskim motorima je izložena čestim kvarovima uslijed dinamičkih naprezanja. U cilju utvrđivanja njihovih uzroka provedena su brojna eksperimentalna istraživanja prijelaznih naponskih i strujnih režima, kao i međusobni utjecaj EMP i napojne mreže koja ga napaja. Istraživani su prijelazni naponi i struje pri operacijama sklopnih aparata i pri pojavama zemljospoja. Problemi koji se sreću u industrijskim mrežama napona 6 kV koje napajaju teške EMP su mnogo veći nego problemi u ostalim mrežama viših naponskih nivoa. Češći su prekidi napajanja pojedinih trošila ili pak dijelova mreža, kao i broj kvarova opreme u VN mrežama napajanja proizvodnih procesa. Promjene opterećenja u kratkim periodima vremena mogu da budu izuzetno velike, posljedično uzrokovano zahtjevima dinamike pogona i postrojenja, što se u novim industrijskim postrojenjima nastoji izbjeći korištenjem suvremenijih metoda obrade proizvoda u procesu proizvodnje [9]. Međutim, u većini postrojenja prevladavaju stariji tehnološki procesi koji uvjetuju česte manipulacije sklopnim aparatima. Sa pojedinim sklopnim aparatima se upravlja višekratno tijekom dana, što je za VN sklopnu tehniku izuzetno termičko i mehaničko naprezanje. Primjer takvih postrojenja su: teški industrijski procesi, površinski kopovi rudnika, vlastita potrošnja termoelektrana i hidroelektrana te se za takav tip postrojenja u literaturi može primijetiti brojna istraživanja i ispitivanja uzroka ispada, kvarova, posebno onih koji dovode do potpunog uništenja motora. Rezultati tih istraživanja predlažu mjere i sredstva za povećanje pouzdanosti rada, uvođenja novih vrsta i tipova sklopnih aparata i zaštita koje pomažu operateru da se uoči potencijalno opasno dinamičko stanje rada.

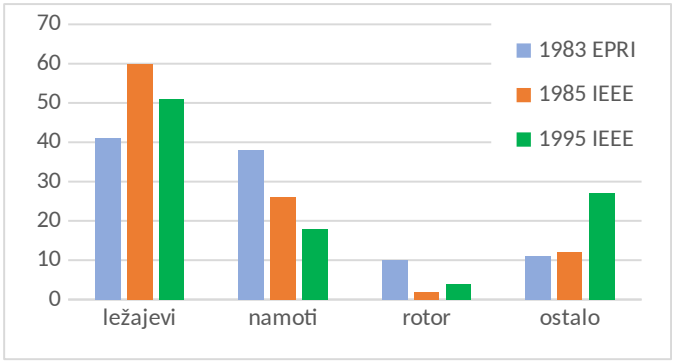
Dijagnosticiranje kvarova na električnim strojevima, odnosno EMP u cjelini u prediktivnom režimu nije nikakva inovacija, jer takva tendencija postoji od početka korištenja VN EPM. Povijesno gledano, inovacije su pratile razvoj upravljačke energetske elektronike, odnosno uporabu računala u sustavu upravljanja.

Danas se metode dijagnostike kvarova na VN AKM mogu svrstati u dvije kategorije: *off-line* i *on-line* metode. U ovom radu će se uglavnom baviti *on-line* metodama dijagnostike kvarova na AKM. Danas razvijene metode on-line dijagnostike [10] ne daju uvijek u potpunosti pouzdane rezultate te se iz praktičnih razloga vrši kombiniranje više ovih metoda radi povećanja

pouzdanosti, što ne treba dovoditi u sumnju potrebu za ovakvim načinom monitoringa i pouzdanost dijagnoze kvarova strojeva.

Pomoću sustava neprekidnog nadzora dobivaju se informacije o stanju električnih strojeva ili pogona u cjelini. Podaci dobiveni od sustava nadzora su korisni kako za osoblje iz održavanja EMP tako i za projektante pogonskih strojeva. Ovdje treba naglasiti klasičnu teoriju pouzdanosti i tzv. „*krivulju kade"* koja životni vijek rada proizvodnog procesa i nisku pouzdanost daje na početku i na kraju životnog vijeka, gdje početni kvarovi mogu biti eliminirani prateći ekspertne podatke održavanja sa terena, dok krajnju nisku pouzdanost se povezuje sa uštedama materijala u proizvodnji strojeva u proizvodnom pogonu [8].

Informacije o nastalim kvarovima u početnoj fazi koji ne predstavljaju neposrednu opasnost za funkcioniranje sustava u cjelini ne mogu se razmatrati bez sistemskog mjerenja električnih i mehaničkih parametara. Za greške u funkcioniranju kompletnog sustava u pravilu saznajemo putem praćenja sekundarnih parametara (povećano zagrijavanje, buka i vibracije, promjene u brzini vrtnje itd.) koji nam pomažu u prediktivnom načinu praćenja održavanja rada postrojenja. Zanimljivo je usporediti studije renomiranih svjetskih udruženja provedene na bazi znanstvenih radova publiciranih u njihovim časopisima [05]. Prva studija koja se može danas prozvati kao najviše citirana u znanstvenim radovima je napravljena od strane Electric Power Research Institute (EPRI), a druga je od također renomiranog udruženja - IEEE Transactions on Industry Applications. U grupi od skoro 5000 promatranih AKM u različitim industrijskim postrojenjima 90% uočenih kvarova se dešavalo u samo 17% promatranih postrojenja. To dovodi do zaključka da u većem dijelu postrojenja zapravo nije adekvatno vršena prediktivna dijagnostika, kao niti analiza uzroka nakon dešavanja kvara. Druga zanimljiva konstatacija je ponavljanje kvarova kod repariranih motora koja predstavlja manje od 20%, što ukazuje na bitnu razliku između serijske proizvodnje i manufakturnog pristupa pri reparaciji motora, odnosno veći broj kvarova na novim motorima je posljedica pogrešaka u procesu proizvodnje motora. Zaključak studija je da čak 50% uzroka kvarova nije detektirano (posljedica ne postojanja jednostavnog dijagnostičkog alata), a čak 34,1% kvarova je post-analizom procijenjeno kao krivom procjenom (posljedica utjecaja ljudskog faktora u izradi izvješća bazirano na vlastitom iskustvu umjesto korištenjem dijagnostičkog alata). Slijedeća zanimljiva konstatacija koja slijedi iz usporedbe provedenih studija je da se kvarovi rotora ne promatraju kao kvar motora, odnosno potvrđuju da kvar rotora (mehanički prekid štapova ili prstena) ne dovodi do prekida rada motora, već (ako nije detektirano prediktivnom dijagnostikom) nastavak rada motora sa takvim oštećenjem uzrokuje posljedično veći terminalni kvar.



Slika 1.1. *Usporedba analize kvarova AKM i njihova raspodjela prema uzroku na osnovu studija različitih svjetskih udruženja (EPRI, IEEE) [05]*

Može se uočiti da studija iz 1995 godine, u odnosu na prethodne, ukazuje na promjene u uzrocima kvarova kroz uvođenje praćenja temperature i vibracija - smanjuje se broj kvarova namota, odnosno uvođenjem dijagnostičkog alata povećala se razina detekcije kvarova koji zapravo izvor imaju u kvarovima prekida štapova i kratkospojnih prstenova. Jasno da to ima korelaciju sa razinom održavanja i dijagnostikom detekcije kvarova što je prikazano u Tab. 1.1. Posljedično, može se zaključiti da razina održavanja ovisi o korištenju dijagnostičkih alata, ali i o njihovoj jednostavnosti praktične primjene od strane radnika na održavanju, kao i od radnika koji rade na EMP u proizvodnom procesu. Pravilna razina održavanja pogona neće spriječiti nastanak kvara uslijed grešaka u proizvodnji stroja ili uslijed otežanih radnih uvjeta motora, ali će u procesu remonta (planiranih obustava proizvodnje radi održavanja) ukloniti kvarove i time produljiti radni vijek EPM tijekom procesa proizvodnje.

Tablica 1.1. *Korelacija razine održavanja u pogonu, učestalost detekcije kvara i utjecaja na zastoj proizvodnje [05]*

razina održavanja kroz godinu rada	učestalost detekcije kvara	utjecaj kvara na broj sati zastoja proizvodnje
izvrsna	0,1115	8
prosječna	0,0872	16
nedovoljna	0,0563	96

Tipični kvarovi, koji se javljaju kod asinkronih strojeva većih snaga i za koje ima smisla uraditi dijagnostiku prema literaturi [8] uključuju:

- prekinute rotorske štapove ili kratkospojne prstenove, koji posljedično mogu uzrokovati kvar statorskog namota. U blizini mjesta kvara dolazi do prekomjernog zagrijavanja te se javljaju oscilacije momenta i brzine vrtnje.
- ekscentričnost zračnog raspora, koja posljedično dovodi do mehaničkog dodira rotora i statora, koja uzrokuje štete na izolaciji statorskog namotaja i povećani nivo vibracija.
- greške na izolaciji koje nastaju kao posljedica starenja izolacije, zagađenosti sredine, prenapona i prekomjernih vibracija.
- kvarovi mehaničkih dijelova stroja (ležaji, osovina).

Ranim otkrivanjem kvarova na vitalnim dijelovima EMP, prije svega samog pogonskog motora, izbjegavaju se potencijalne prijetnje nastanka većih kvarova ili se planiraju popravke (planirani remont u periodu pauze proizvodnje) kako kvarovi ne bi dostigli veće razmjere. Dijagnostika stanja EMP na osnovu mjernih parametara i usporedba istih sa rezultatima simulacijskih testova doprinosi sigurnosti i pouzdanosti, što je ključni faktor za mnoge industrijske pogone (vjetroelektrane, željezare, naftna i kemijska industrija itd.) [5].

Zadatak i cilj ovog doktorskog rada je prije svega procjena stanja teških EMP sa asinkronim VN kaveznim motorima korištenjem numeričkih zaštitnih releja kao već postojećih kontrolnih uređaja kojim se može aktivirati i dodatna prediktivna zaštitna uloga čime se povećava pouzdanost sustava uz zanemarivo ulaganje u infrastrukturu postojećeg postrojenja. U radu su date teorijske postavke dinamičkih režima rada teških EMP sa asinkronim VN kaveznim motorima, zatim interakcije električne mreže i teških EMP sa asinkronim kaveznim motorima, kao i neka iskustva dobivena iz prakse i istraživanja kvarova i prijelaznih naponskih i strujnih režima u industrijskim mrežama napona 6 kV koje napajaju elektromotorne pogone. Također, dat je presjek dijagnostičkih metoda za lociranje kvarova VN asinkronih kaveznih motora sa teškim uvjetima pokretanja sa posebnim osvrtom na on-line metode, te ulozi numeričkih releja u dijagnostici stanja VN asinkronih kaveznih motora. U tom smislu u radu je kroz kritički osvrt dat prikaz suvremenih metoda dijagnostike stanja motora, te primjene zaštitnih numeričkih releja u te svrhe.

2. TEŠKI EMP U DINAMIČKOM REŽIMU RADA

Analiza dinamičkih stanja elektromotornih pogona sa asinkronim motorima manje je usmjerena prema analizi struja napajanja motora, a više prema utvrđivanju trajanja prijelaznih pojava s posebnim naglaskom na probleme zagrijavanja motora teških EMP s kaveznim motorima. Takav pristup je opravdano koristiti u slučajevima teških EMP jer se u pravilu ne zahtjeva regulacija brzine vrtnje motora sa preciznim određivanjem brzine, čime je osjetljivost EMP manja na pojave velikih struja. To je ujedno i glavni razlog što se VN AKM najviše koriste u procesima sa teškim EMP [5].

Opća dinamička stanja EMP sa asinkronim motorima teško je analitički matematičkim modelima prikazati iz razloga širokog raspona tipova tereta koji se pojavljuju u praktičnim situacijama, koji su ponekad vrlo fizikalno različiti. Temeljna jednadžba koja opisuje mehaničku ravnotežu momenata data je izrazom:

$$M_m = M_u + M_t \tag{2-1}$$

U izrazu je : M_m - moment motora koji on daje na osovinu,

M_u - moment ubrzanja,

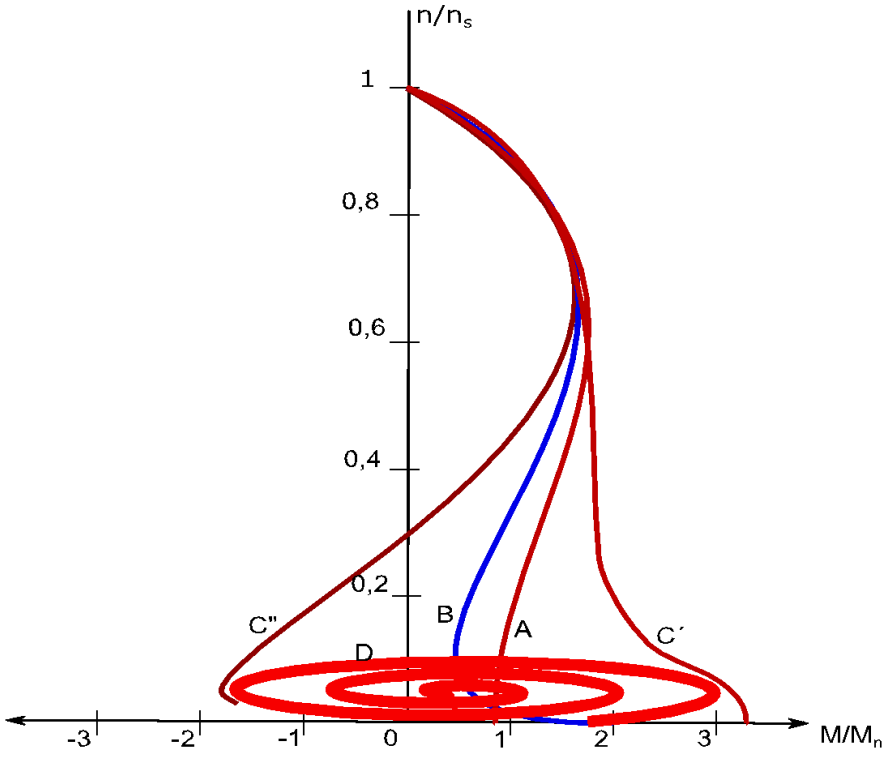
M_t - moment tereta kojim radni mehanizam djeluje na osovinu.

Naročito je izražen problem kod definiranja električnih jednadžbi u dinamičkim stanjima, pogotovo kada se povezuju električni i mehanički izrazi obzirom na složenost izražavanja trenutne vrijednosti momenta motora. Dodatni problem predstavlja činjenica da su mehaničke vremenske konstante pogona uobičajeno višestruko veće od električnih vremenskih konstanti čime je točna analiza dinamičkih stanja elektromotornih pogona sa asinkronim motorima nemoguća u općem obliku: pojavljuju se u dodatni članovi u sustavima jednadžbi kod kaveznih rotora zbog većeg broja rotorskih faza, kod kliznokolutnih rotora dodatni rotorski otpor ima vremensku konstantu promjene koja ovisi o vanjskim utjecajima sustava upravljanja, radni mehanizmi teških EMP imaju višekratne zamašne mase koje nisu uvijek fizički konzistentne, pa je dinamika tereta nelinearna krivulja sa brojnim vanjskim parametrima koje definira proces proizvodnje u kojima sudjeluje EMP. Za veće motore bi se kao problem zbog potiskivanja struje pojavila i ovisnost rotorskih aktivnih otpora i samoinduktiviteta o brzini vrtnje (frekvenciji rotora).

Suvremeno rješavanje takvog tipa složenih sustava se rješava korištenjem numeričkih metoda za određena dinamička stanja u konkretnim pogonskim situacijama, naravno uz pomoć računala sa odgovarajućim programskim paketima, nužno uz korištenje potrebnih podataka o elektromotornom pogonu i početnim uvjetima dinamičkog stanja. Potrebne veličine se tada izračunavaju korak po korak, što u konačnici omogućava dobivanje izlaznih karakteristika motora i EMP: ovisnost brzine vrtnje, momenta motora, gubitaka energije o vremenu, itd. [9,10,11].

U praksi se često opća dinamička analiza elektromotornih pogona svodi na samo mehaničku dinamičku analizu, zbog navedenih poteškoća, uz koju se pretpostavlja da se i u dinamičkim stanjima moment motora M_m ponaša kao statički moment motora, to jest da za njega vrijede statičke mehaničke karakteristike. Takva pretpostavka omogućuje računanje trajanja pojedinih prijelaznih pojava, energetske gubitke u namotima u prijelaznim pojavama i slično. Da li će odstupanja proračuna matematičkog modela od stvarnog stanja biti u zadovoljavajućim granicama ovisi uvijek od konkretnog slučaja (zbog prethodno navedenih problema promjena parametara). Sasvim je jasno da će se dinamička karakteristika momenta motora to više približiti statičkoj budu li se mehaničke prijelazne pojave odvijale izrazito sporije (za red veličina) od električnih. U tom slučaju se može smatrati da se električne prijelazne pojave odvijaju skokovito (relativno gledajući u odnosu na promjene mehaničkih veličina), pa je nakon toga promjena mehaničkih prijelaznih pojava u skladu sa statičkom mehaničkom karakteristikom. Može se zaključiti da se u tim slučajevima zapravo promatraju pojave pri teškim EMP, kada su mehaničke tromosti elektromotornog pogona (ukupni moment inercije) znatno veće od električnih tromosti, što posljedično znači znatno veće vremenske konstante mehaničkog sustava od onih u električnim strujnim krugovima. Jasno da će u suprotnoj situaciji, kada nije ispunjen uvjet teškog EMP, ovakav pristup rješavanja na osnovu statičke mehaničke karakteristike dati veća odstupanja rezultata [12].

Na slici 2.1. prikazan je primjer obrađen na računalu kao ilustracija osnove zbog koje nastupaju razlike. Prikazan je zalet pogona koji ima neznatni moment inercije radnog mehanizma, te su stoga razlike između dinamičkog i statičkog momenta motora znatne. Usprkos tome odstupanja B od A , odnosno srednje vrijednosti dinamičkog od statičkog momenta, ipak nisu tolike te se sa statičkim momentom kao temeljom računa može ići u proračun. U načelu treba očekivati veća odstupanja u procjeni energetskih gubitaka u namotima zbog velikih pulzacija struja i magnetskih tokova, te posljedično i pulzacija momenta motora, nego u procjeni trajanja prijelaznih pojava [13].



Slika 2.1. *Usporedba statičkog i dinamičkog momenta motora jednog konkretnog pogona*

Na slici 2.1. su prikazane slijedeće karakteristike:

A – statički mehanički moment motora

B – srednja vrijednost dinamičkog momenta motora u toku zaleta

C' C" – granice maksimalne i minimalne vrijednosti dinamičkog momenta motora u toku zaleta

D – trenutna vrijednost dinamičkog momenta motora u toku zaleta

Neka dinamička stanja kao što su valoviti moment tereta, udarci tereta, rasterećenja itd., pri kojima se brzina vrtnje znatnije ne mijenja mogu se ipak prikladnim aproksimacijama obraditi bolje nego na osnovu statičke karakteristike momenta. Ako se za osnovu proračuna uzme statička mehanička karakteristika momenta motora, kod analitičke obrade mehaničkih dinamičkih stanja EMP sa asinkronim motorima nailazi se na poteškoće kada ta karakteristika nije analitička funkcija. To naročito vrijedi za kavezne motore većih gabarita, kojima se mehanička karakteristika, osim u uskom području brzine vrtnje oko sinkronizma, ne može analitički jednostavno prikazati. Grafičko, odnosno grafoanalitičko rješavanje nekih dinamičkih stanja kod asinkronih motora razvijeno je u vrijeme prije računala, ali i danas je ponekada nužna potreba.

2.1. Osnove dinamičkog stanja EMP

EMP može biti oštećen ili potpuno uništen u toku svoga rada kao posljedica dešavanja pri različitim pogonskim stanjima. Uzroci nastanka takvih opasnih stanja EMP mogu biti:

- kvar na radnom mehanizmu,
- nagla opterećenja,
- izvor napajanja,
- djelovanje okoline ili tehnološke sredine i dr.

Smetnje koje nastupaju u statičkim stanjima tokom trajnog rada su različite od onih koje su povezane s dinamičkim stanjima.

Pošto je tema ovog rada usko vezana za dinamičko stanje EMP potrebno je obraditi problematiku prijelaznih pojava kod EMP. To podrazumijeva kvalitativni prikaz ponašanja pogonskog motora kod uključenja, isključenja i brzog automatskog preklapanja u mreži. Također, potrebno je napomenuti da kada se govori o smetnjama koje štetno utiču na motor EMP misli se gotovo uvijek na trofazne kavezne asinkrone motore (koji danas prevladavaju u postrojenjima) i zbog toga će se u ovom radu, vršiti analiza EMP sa asinkronim kaveznim motorom. U svakom elektromotornom pogonu javljaju se sljedeće veličine:

- mehaničke (brzina vrtnje, moment tereta, moment motora itd.),
- električne (struje, naponi, otpori, induktiviteti i dr.),
- magnetske (magnetski tokovi, indukcije itd.) i
- toplinske (temperatura, zagrijavanje, količina toplote i dr.).

Kada za vrijeme pogona ne nastaju vremenske promjene tih veličina, riječ je o stacionarnom pogonskom stanju EMP (statički pogon). Mijenjaju li se neke ili, čak i sve te fizikalne veličine, to je dinamičko pogonsko stanje EMP (dinamički pogon). U literaturi se to često zove i prijelaznom pojavom.

Promjene svih tih fizikalnih veličina vezane su jedna za drugu i međusobno se uzrokuju. Na primjer, povećanje momenta tereta M_t radnog mehanizma na osovini asinkronog motora dovodi do opadanja brzine vrtnje. To dovodi do porasta induciranog napona rotora (jer dolazi do povećanja klizanja s koje je direktno proporcionalno naponu rotora E_2), te izaziva povećanje struje u namotima i momenta motora. Povećanje struje uzrokuje veće gubitke, pa nastupa porast temperature namota itd. Gdje god je moguće, pokušava se radi jednostavnosti, prijelazne pojave promatrati odvojeno po vrstama (električne, mehaničke prijelazne pojave itd.), jer se pri kompleksnom promatranju (fazorski, vektorski) nailazi na velike poteškoće. Često se toplinske

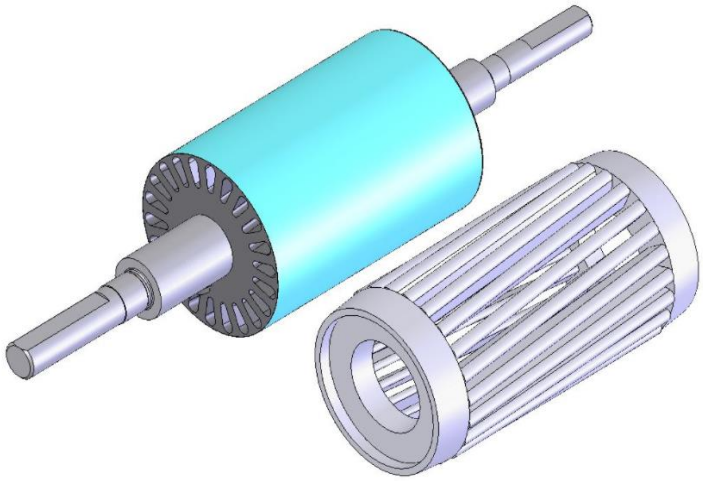
prijelazne pojave odvijaju znatno sporije od ostalih, pa se tad temperatura još dugo vremena mijenja nakon što su mehaničke i električne veličine postale konstantne. Jednako tako je moguća i pojava da su vremenske promjene elektromagnetskih veličina, s jedne strane, i mehaničkih veličina s druge strane, vrlo različitog trajanja, pa tad na njih možemo primijeniti promatranja u dvije vremenske faze. Tako dolazimo do mogućnosti da kod EMP promatramo dinamičko stanje fizikalnih veličina samo jedne vrste. Kraćem ili dužem trajanju promjena fizikalnih veličina u elektromotornom pogonu uzrok je prirodna pojava efekta tromosti koji se protivi promjeni stanja. Tako se svakoj promjeni brzine vrtnje opire mehanički moment tromosti J.

Kada se neko kruto tijelo oblika valjka vrti oko vlastite osi u prostoru (rotor motora promatramo kao puno tijelo oblika valjka), moment inercije se računa kao:

$$J = \int_V r^2 \, \mathrm{d}m \tag{2-2}$$

pri čemu je: J - mehanički moment tromosti

r - radijus diferencijala mase dm



Slika 2.2. *Prikaz konstrukcije rotora kaveznog asinkronog motora za koji se proračunava moment inercije*

Na sličan način tromost magnetskog polja Φ se opire svakoj promjeni struje u nekom strujnom krugu (induktivitet strujnog kruga L). Promjeni temperature nekog tijela opire se njegova toplinska masa (toplinski kapacitet). Zbog tih prirodnih pojava dolazi do određenog trajanja prijelaznih pojava i nastupa dinamičko stanje koje traje izvjesno vrijeme.

EMP u svom radu karakteriziraju određene vremenske konstante. Postoje tri osnovna tipa tih vremenskih konstanti bitnih za elektromotorne pogone [14]:

a) Električna ili elektromagnetska vremenska konstanta:

$$T_{el} = \frac{L}{R} \text{ (s)} \tag{2-3}$$

u izrazu je : R - radni otpor (V/A),

L - induktivitet strujnog kruga (Vs/A).

b) Toplinska vremenska konstanta predstavlja omjer toplinskog kapaciteta tijela i toplinske vodljivosti tijela:

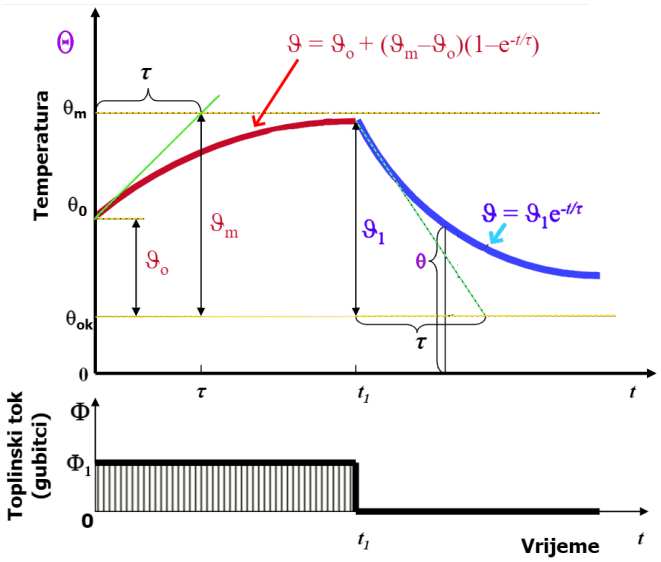
$$T_t = \frac{m \cdot c}{s \cdot h} \text{ (s)} \tag{2-4}$$

u izrazu je : m - masa (kg),

c - specifična toplina (Ws/K kg),

s - površina (m^2),

h - koeficijent odvođenja toplote (Ws/K m^2s)



Slika 2.3. *Prikaz zagrijavanja i hlađenja tijela motora pri konstantnom dovodu topline u cilju prikaza toplinskih vremenskih konstanti (Θ - temperatura, ϑ - nadtemperatura, τ- toplinska vremenska konstanta) [9]*

c) Mehanička vremenska konstanta:

$$T_m = \frac{J \cdot \omega_n}{M_n} \text{ (s)} \tag{2-5}$$

u izrazu je : J - moment inercije (kg m^2),

ω_n - nominalna kutna brzina vrtnje (1/s),

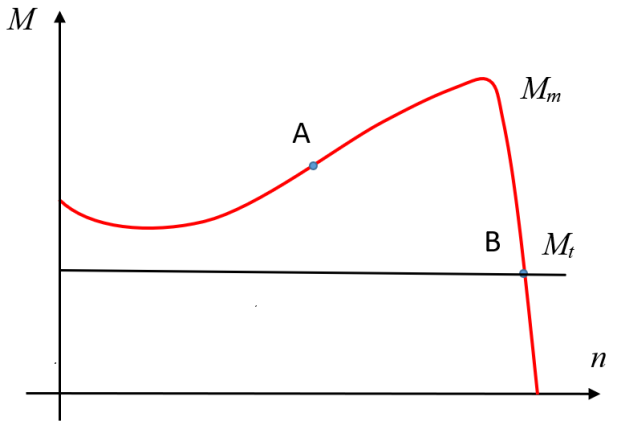
M_n - nominalni moment motora (Nm).

Ako se umjesto momenta inercije J uvrsti izraz za šuplji valjak kao oblik rotora, a umjesto kutne brzine ω_n, brzina vrtnje motora n_n, dobiva se izraz za mehaničku vremensku konstantu koji se češće koristi u praksi:

$$T_m = \frac{m \cdot D^2}{38,2} \cdot \frac{n_n}{M_n} \text{ (s)} \tag{2-6}$$

Mehanička vremenska konstanta pokazuje vrijeme za koje bi EMP postigao nominalnu brzinu vrtnje uz moment ubrzanja trajno jednak nazivnom momentu motora.

Iz relacije 2.1. slijedi pravilo za svaki EMP (pravilo ravnoteže momenata), da se u svakom trenutku poništava zbroj svih mehaničkih momenata na osovini elektromotora i radnog mehanizma na račun momenta ubrzavanja (ili usporavanja) kojim se definira prijelazno stanje ili stacionarno stanje. Na slici 2.4. prikazane su mehanička karakteristika motora M_m i karakteristika momenta tereta M_t = konst. Točka A predstavlja točku prijelazne pojave (nestabilno nestacionarno stanje $M_m \neq M_t$), a točka B je točka stacionarnog stanja ($M_m = M_t$).



Slika 2.4. *Mehanička karakteristika momenta motora i momenta tereta*

Dinamičko stanje EMP nastupa u slučaju kada nije ispunjen uvjet međusobne jednakosti momenta motora M_m i momenta tereta M_t , odnosno pri trajanju prijelazne pojave:

$$M_m \neq M_t \tag{2-7}$$

Nejednakost momenta motora i momenta tereta uravnotežuje moment ubrzanja M_u, koji nastaje upravo zbog viška ili momenta motora ili momenta tereta na spoju elektromotora i radnog

mehanizma. Negativni predznak tog momenta podrazumijeva usporavanje. Moment ubrzanja pri tome je po iznosu jednak razlici momenata:

$$M_u = M_m - M_t \tag{2-8}$$

i on uzrokuje promjenu brzine vrtnje :

$$n \neq const. \tag{2-9}$$

koja se to više mijenja što je moment ubrzanja veći, odnosno:

$$\frac{dn}{dt} = f\left(M_u\right) \neq 0. \tag{2-10}$$

Ove četiri posljednje jednadžbe karakteristične su za dinamičko stanje EMP u mehaničkom smislu.

Stacionarno stanje u općem smislu podrazumijeva konstantnost svih fizikalnih veličina, a ne samo mehaničkih [15]. Potrebno je naglasiti da je nemoguće određeni EMP dovesti u bilo koje stacionarno stanje (osim apsolutnog mirovanja, koje i nije "pogon"), a da se ne prođe kroz dinamičko stanje, kao što ga je nemoguće izvesti iz tog stanja bez prijelazne pojave koja vlada između dva stacionarna stanja.

Za moment ubrzanja vrijedi da je:

$$M_u = m \cdot \rho^2 \frac{d\omega}{dt} = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{mD^2}{4} \cdot \frac{d\omega}{dt} \left[Nm\right] \tag{2-11}$$

odnosno, uzme li se brzina vrtnje *n* umjesto kutne brzine vrtnje ($60\,\omega = 2\pi n$) slijedi izraz koji se može povezati sa općim izrazom za mehaničku vremensku konstantu (jednadžba 2-6):

$$M_u = m \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{D \cdot \pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{mD^2}{38,2} \cdot \frac{dn}{dt} \left[Nm\right] \tag{2-12}$$

Trajanje prijelazne pojave između dvaju kutnih brzina vrtnje ω_1 i ω_2 može se izvesti iz izraza koji vezuje moment, promjenu kutne brzine (jednadžba 2-11):

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M_u} = \frac{mD^2}{4} \int_{\omega 1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M_u} \left[s\right] \tag{2-13}$$

Analogno slijedi i za izračun trajanja prijelazne pojave ako se promatraju početna i konačna brzina prijelazne pojave (jednadžba 2-12):

$$t = \frac{mD^2}{38,2}\int_{n1}^{n_2}\frac{dn}{M_u}\,[s] \tag{2-14}$$

Granice je u nekim slučajevima elektromotornog pogona (s asinkronim motorom) lakše izražavati pomoću klizanja *s* kao varijable (jer povezuje prijelaznu pojavu sa frekvencijom) umjesto brzine vrtnje *n*, odnosno kutne brzine vrtnje *ω.* Po definiciji brzina vrtnje je povezana sa sinkronom brzinom okretnog magnetskog polja $n=n_s(1-s)$, a slično vrijedi i za kutnu brzinu vrtnje $\omega=\omega_s(1-s)$.

Za njihove vremenske derivacije vrijedi:

$$\frac{dn}{dt} = -n_s \cdot \frac{ds}{dt}, \qquad \frac{d\omega}{dt} = -\omega_s \cdot \frac{ds}{dt} \tag{2-15}$$

Primjeni li se jednadžba (2-15) na izraze (2-13),(2-14), dobiva se za izraz za trajanje prijelazne pojave kao funkcije klizanja - između klizanja s_1 (početnog) i s_2 (završnog):

$$t = J\omega_s\int_{s_2}^{s_1}\frac{ds}{M_u} = \frac{mD^2\cdot\omega_s}{4}\int_{s_2}^{s_1}\frac{ds}{M_u} = \frac{mD^2\cdot n_s}{38,2}\int_{s_2}^{s_1}\frac{ds}{M_u} \tag{2-16}$$

Trajanje mehaničke prijelazne pojave proporcionalno je momentu inercije, a obrnuto je proporcionalno momentu ubrzanja.

2.2. Dinamika EMP pri isklopu asinkronog motora sa električne mreže

Prijelazni proces općenito se definira kao proces prijelaza iz jedne točke stacionarnog stanja u drugu točku stacionarnog stanja, pa isto vrijedi i za prijelazni proces EMP.

U trenucima direktnog uklopa ili isklopa VN pogonskih motora mogu se javiti opasnosti koje su veoma bitne s aspekta sigurnosti samih motora. Najveće struje koje mogu proteći u normalnom pogonu EMP bez direktnog isklapanja i ponovnog uklapanja izmjeničnog motora definiraju se kao udarne struje kratkog spoja I_{ksu} za koje se motori i dizajniraju. Napretkom tehnologije sklopnih aparata povijesno se u praksi pojavljuje i direktni uklop i isklop VN AKM, pri čemu se radi o velikim tokovima energije i tada su se počeli pojavljivati i novi tipovi problema u EMP. [8]

Motori se oštećuju zbog prevelikih struja koje nastupaju u tim pojavama. Sile na namot motora proporcionalne su kvadratu struja, a deformacije namota zbog pojave tih sila ovise o geometrijskoj konfiguraciji glava namota (dulje glave s manjim mehaničkim momentom otpora izložene su većim deformacijama). U tablici 2.1. je prikazana podjela motora prema osjetljivosti na deformacije zbog velikih struja. [6]

Tablica 1.1. *Grupe manje i više osjetljivih motora*

Manje osjetljivi motori	**Više osjetljivi motori**
mali motori	veliki motori
sporohodni motori	brzohodni motori
niskonaponski motori	visokonaponski motori
impregnirani motori (u vakuumu)	neimpregnirani motori
novi motori s boljom tehnologijom namota	stariji motori s lošijom tehnologijom namota

Važno je pri tome da struje koje protječu namotima motora ne prekorače granicu koja termički, a zatim i mehanički izaziva plastične deformacije namota (termičko naprezanje omekšava izolaciju koja onda slabije podnosi mehanička naprezanja, a pri hlađenju se ne vraća u prvobitno stanje). Za takav tip kvara tipično je da nastaje postepeno. Velike struje u prijelaznim pojavama traju relativno kratko, pa je rad koji uzrokuje deformacije mali, usprkos velikim silama. Obično je potreban veći broj takvih kratkotrajnih termičkih (pri tome i mehaničkih) naprezanja da se deformacija poveća do pucanja izolacije, što onda uzrokuje pad izolacijskog otpora i dovodi do pojave kratkog spoja među namotima te daljnjih oštećenja. Oštećeni motori pokazuju tipično "skupljanje" svitaka kroz koje protiču struje iste faze i "razmicanje" svitaka kroz koje protiču struje različitih faza (elementarno djelovanje sila paralelnih vodiča). Ovo je je tip kvara koji je i posljedica zanemarivanja pri projektiranju motora, jer se prvenstveno dimenzioniranje vrši za nominalni rad, a ekscesni događaji se uzimaju sa određenim faktorom istovremenosti (uračunato smanjenje utroška materijala nauštrb smanjenja pouzdanosti).

2.3. Direktni isklop i ponovni uklop asinkronog motora

Ako u stacionarnom stanju EMP sa jednim motorom koji je normalno opterećen dođe do direktnog isklapanja motora sa mreže, istovremeno nastaju dvije prijelazne pojave koja svaka zasebno ima svoje vremenske konstante:

- električna – prigušenje magnetskog toka u motoru zbog izostanka uzbude
- mehanička - usporavanje EMP uslijed kočenja momentom tereta na osovini.

Nakon direktnog isklopa motora sa mreže, prekida se trenutno tok električnih struja napajanja (zanemaruje se vrijeme trajanje luka), no motor i dalje rotira. Rotaciju podržava kinetička energija masa koje su se zatekle u vrtnji u času isklapanja (moment inercije rotirajućih masa), a usporava ju moment tereta na osovini, kao i vlastito trenje u ležajima i trenje ventilacije koje se uglavnom može zanemariti. Tako nastaje proces kočenje do trenutka zaustavljanja i taj proces je karakteriziran mehaničkom vremenskom konstantom T_m i momentom tereta M_t kao funkcijom brzine. Trenutak zaustavljanja određen je samim EMP i procesom proizvodnje, te se u nekim slučajevima ugrađuje dodatna mehanička kočnica koja osigurava da se EMP zaustavi, odnosno da teret ne povuče EMP u vrtnju suprotnog smjera. Vremenska konstanta slijedi iz jednadžbe (2-6).

$$T_m = \frac{mD^2}{38,2} \cdot \frac{n_s}{M_t} \tag{2-17}$$

Moment tereta kao funkcija brzine vrtnje $M_t(n)$ ili klizanja $M_t(s)$ u praktičnoj primjeni može biti vrlo raznovrstan: konstantan, linearno ili kvadratno ovisan o brzini vrtnje, izrazito nelinearan ili čak takve ovisnosti koja se ne može jednostavno analitički prikazati. Generalno se može definirati da se EMP to sporije zaustavlja što mu je mehanička vremenska konstanta veća i što mu je moment tereta manji. Budući da se ove dvije prijelazne pojave istovremeno događaju, to magnetski tok rotira brzinom koju definira zaustavljanje, pri čemu se u namotu statora inducira napon proporcionalan trenutnom iznosu magnetskog toka i trenutnoj brzini vrtnje.

Pretpostavimo idealno, da brzina vrtnje ne pada s vremenom. Tada i maksimalna udarna struja uklopa može u nepovoljnim uvjetima biti proporcionalna tako definiranom naponu, pa ako ju želimo ograničiti na neku vrijednost treba osigurati da se ponovni uklop dešava kad je razlika napona određena slijedećim izrazom zanemarivo mala:

$$U = E_1 - E_r \tag{2-18}$$

gdje je: E_1 - inducirani napon koji bi izazvalo okretno polje napajanja mreže,

E_r - rezidualni inducirani napon zbog rezidualnog magnetskog toka.

Pitanje koje se nameće je kolika se struja može dopustiti kao osnova za kriterij pri uklopu. Obično se za nove velike motore klasične gradnje dopušta 140% I_{ks} (gotovo dvostruke sile

naprezanja), ali to pravilo neće moći izdržati stariji motori čija je izolacija već ostarila i izgubila početna svojstva.

Dijelom iskustvom, dijelom istraživanjem, praktična iskustva su ipak pokazala praćenjem kvarova da motori snage manje od 100 kW sigurno izdrže bilo kakve uvjete (što je posljedica većeg mogućeg prostora za namot u konstrukciji, pa time i pojačanoj izolaciji). Logično, ta je granica kod niskonaponskih motora viša (oko 200 kW za brzohodne, a 300 kW za sporohodne). Međutim, praktična iskustva pokazuju da se VN AKM grade za veće snage od navedenih, pa ih zapravo sve svrstavamo u grupu motora "osjetljivih" na uklapanje u nepovoljnim uvjetima, te je potrebno osigurati kontrolu i povećanu zaštitu. Posebno su osjetljivi veliki brzohodni AKM priključnog napona većeg od 3 kV.

Pojačani uvjeti zaštite definiraju i okvir dopuštenih vrijednosti udarne struje kod ponovnog uklopa koja ne bi trebala da prekorači dopuštenu vrijednost (120-140% udarne struje u kratkom spoju):

$$I'_{ksu} \leq (1,2-1,4) I_{ksu} \tag{2-19}$$

Time se posljedično ograničava i napon u trenutku ponovnog uklapanja u idealnom slučaju:

$$U = E_1 - E_r \leq (1,2-1,4) E_1 \tag{2-20}$$

Budući da vrijednost udarne struje određuje zapravo stanje glavnog magnetskog toka, to je iznos rezidualnog magnetskog toka (a ne zaostalog napona) mjerodavan kad se smije ili ne smije opet uključiti motor. Stoga bi približno, u skladu sa navedenim, naponska relacija trebala biti korigirana za omjer brzine vrtnje motora i sinkrone brzine:

$$U \approx E_1 - E_r \cdot \frac{n}{n_s} \leq (1,2-1,4) E_1 \tag{2-21}$$

Odgovarajući fiktivni rezidualni napon koji bi bio mjerodavan za veličinu udarne struje bi se onda mogao definirati izrazom:

$$E'_r = E_r \cdot \frac{n}{n_s} \tag{2-22}$$

Točno ponašanje struje se, takvim pristupom modeliranja, dobiva upravo uz pretpostavku da se rezidualni napon ne smanjuje zbog opadanja brzine vrtnje.

Teorijski postoje tri mogućnosti ponovnog uklapanja [1], bez opasnosti za sam pogonski motor:

- ponovo se uklapa motor u vremenu t_k (*kratko vrijeme ponovnog uklopa*).
- ponovno se uklapa u vremenu t_d, koje nastupa poslije smanjenja iznosa napon $E`_r$ na vrijednost $(0,2\text{-}0,4)E_1$ odnosno vrijeme ograničenja da napon u trenutku ponovnog uklapanja U ne prelazi 60% E_1 (*dugo vrijeme ponovnog uklopa*)
- uklop u trenutku kada su rezidualni napon motora i mrežni napon barem približno u fazi (*kao pri sinkronizaciji*).

Praksa pokazuje da se preklapanje ili ponovni uklop u mreži zbog raznovrsnih razloga ne može izvesti brzo (*kratko vrijeme ponovnog uklopa*). U tom se vremenu, relativno vrlo kratkom, ipak kod velike većine osjetljivih motora u stvarnim EMP, fazori napona $\bar{E}_1$ i $\bar{E}_r$ razmaknu fazno za više od 90 električnih stupnjeva, tj. ne smije se uklapati u kratkom vremenu t_k iz razloga što definirani zaštitni kontrolni napon u trenutku ponovnog uklapanja (U) u realnosti je fazor i predstavlja razliku fazora napona, te za potrebe minimizacije funkcije osim što mora biti ispunjena relacija (2-18) po iznosima, moraju se promatrani fazori napona poklapati što više i u fazi.

$$\underline{U} = \underline{E}_1 - \underline{E}_r \tag{2-23}$$

Realno je očekivati tek za vrlo velike motore, snaga većih od 1000 kW, da će se moći koristiti opcijom kratkog vremena ponovnog uklopa, i to samo kad su relativno neopterećeni, pa praktički ne gube brzinu vrtnje.

Ostalim osjetljivim motorima ostaje druga mogućnost, tj. da se ponovo uklapanje izvrši nakon dugog vremena uklapanja t_d.

Treća mogućnost uklapanja "u fazi" zastupljena je obično prilikom grubog preklapanja sabirnica, npr. kod pomoćnih pogona u elektranama. Tad sabirnice valja opremiti posebnim uređajima koji uspoređuju "faze" iskopčane sabirnice s fazama mreže na koju se uklapaju. Kako su te pojave veoma brze, to i sklopni aparati i mjerni uređaji moraju biti jako brzi. Tehnički to je vrlo skupo rješenje, te se ekonomski isplati samo za velike grupne pogone, gdje je dodatno i održavanje pogona posebno bitno.

Grupni pogon više motora na istim sabirnicama ima prednost i u tome što se iskopčana sabirnica neko vrijeme drži u "sinkronizmu" kao posljedicu da svi motori u grupi nakon isklopa imaju izvjesnu individualnu količinu kinetičke energije, akumulirane u zamašnim masama, i magnetske energije, akumulirane u magnetskim poljima. U mrežama s automatskim ponovnim

uklapanjem osjetljivi se motori moraju individualno štititi. Prijeko je potrebno, kad iz bilo kojeg razloga proradi mrežna sklopka s automatskim ponovnim uklapanjem, da se i svaki osjetljivi motor grupe trenutno isključi vlastitom sklopkom. Ovime se vrši zaštita od slučaja da pojedini motori grupe veće uskladištene energije (moment inercije) ne postanu generator napajanja preko zajedničke sabirnice preostalim motorima manje inercije, čime se mogu pojaviti neželjene struje i produljiti zaustavno vrijeme pogona. Nakon toga se svaki motor individualno ponovo uklapa, vrlo rijetko s "kratkim", a većina s "dugim" vremenom uklapanja. Opći je uvjet pri tome da se nijedan motor iz grupe ne uklopi prije nego je opet uklopljena mrežna sklopka, čime se osiguravaju tokovi energije i zaštita opreme.

"Kratka" i "duga" vremena uklapanja (t_k , t_d) moraju se točno proračunavati, jer o tome ovisi ispravnost zaštite, ali to je praktično vrlo kompliciran problem. Zbog toga se u praksi za "dugo" vrijeme uklopa odabire konstanta električne prijelazne pojave (najkraća prijelazna pojava sustava):

$$t_d \approx T_{el} \tag{2-24}$$

Međutim, tu nije kraj problemima inženjera na terenu. Naime, vrlo često se dešava da nema podataka iz kojih bi se moglo dobiti električna vremenska konstanta, većina proizvođača to nije spremno dati (što zbog zadržavanja pozicije angažmana, što zbog osiguranja u slučaju štete), a posebno je to istaknuto u slučajevima „starijih“ pogona gdje se vrlo često zagubi dokumentacija. Tada se sa vrlo dobrom točnošću može računati sa teorijskim izrazom elementarnog nadomjesnog sklopa asinkronog motora:

$$T_{el} = \frac{L}{R} = \frac{X_\mu + X'_2}{2\pi \cdot f \cdot R'_2} \tag{2-25}$$

gdje je: $X\mu$ - induktivni otpor koji predstavlja glavni magnetski tok,

X'_2 - rasipni induktivni otpor faze rotora sveden na stator,

R'_2 - radni otpor faze rotora sveden na stator,

f - frekvencija mreže (stator).

Budući da je u teorijskom modelu asinkronog motora (T shema dvoprilaza transformatora) glavni magnetski tok definiran strujom magnetiziranja, tj. pripadajuća reaktancija predstavlja omjer induciranog napona i struje magnetiziranja ($X_\mu = E_1/I_\mu$), uz zanemarenje reaktancije namota rotora ($X_\mu >> X'_2$), slijedi izraz:

$$T_{el} = \frac{E_1}{I_\mu} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot R'_2} \tag{2-26}$$

Pri tome je vrijednost T_{e1} prema izrazu (2-26) samo neznatno manja od stvarne vrijednosti praktično provjerene na nizu primjera.

Ovakav izraz još nije praktično primjenjiv zbog nepoznavanja napona E_1, te ovisnosti o stvarnoj brzini rotora. Zato je izraz (2-26) potrebno prilagoditi veličinama koje su stvarno mjerljive na terenu. Uvođenjem nazivne struje rotora koja je reducirana na stator, ako se brojnik i nazivnik u toj relaciji pomnože s I'^2_{2n} , gdje je I'_{2n} nazivna struja rotora svedena na primar, dobiva se izraz koji se može prilagoditi poznatim parametrima:

$$T_{el} = \frac{E_1}{I_\mu} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot R'_2} \cdot \frac{I'^2_{2n}}{I'^2_{2n}} \cdot \frac{3}{3} \tag{2-27}$$

U trenutku isklopa, struja magnetiziranja jednaka je reduciranoj struji rotora, a prema teorijskim postavkama modela motora omjer snaga rotora i gubitaka u rotoru u trenutku isklopa jednak je omjeru nazivne snage i nazivnih gubitaka u bakru uz uračunavanje klizanja kod rotorskog otpora:

$$T_{el} = \frac{E_1}{I_\mu} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot R'_2} \cdot \frac{I'^2_{2n}}{I'^2_{2n}} \cdot \frac{3}{3} = \frac{3I'_{2n}E_1}{3I'^2_{2n}R'_2\frac{s}{s}} \cdot \frac{I'_{2n}}{2\pi \cdot f \cdot I_\mu} = \frac{3I'_{2n}E_1}{3I'^2_{2n}\frac{R'_2}{s}} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{I_{1n}}{2\pi \cdot f \cdot I_0} \tag{2-28}$$

Konačno, skraćivanjem relativno jednakih veličina dolazi se do konačnog izraza koji je praktično primjenjiv:

$$T_{el} = \frac{I_{1n}}{I_0} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot s_n} \tag{2-29}$$

gdje je: I_{1n} - nazivna struja (podatak sa natpisne pločice motora),

I_0 - struja praznog hoda (dobiva se ili od proizvođača ili ispitivanjem),

f - frekvencija mreže,

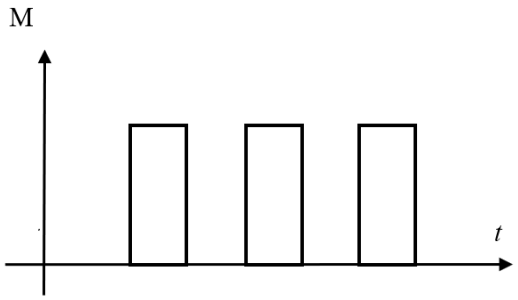
s_n - nazivno klizanje.

Nazivno klizanje se računa iz podataka o nazivnoj brzini vrtnje sa natpisne pločice, ali je taj podatak vrlo nesiguran zbog zaokruživanja podataka nazivne brzine vrtnje. Zato je bolje da se točan podatak o nazivnom klizanju zahtijeva od isporučioca motora.

2.4. Nagle promjene opterećenja - udarci tereta

Pri radu nekih radnih mehanizama moguće su pojave naglog opterećenja ili rasterećenja. Najčešći su ipak radni mehanizmi sa kratkotrajnim udarnim opterećenjima. Takva opterećenja česta su kod nekih važnih elektromotornih pogona, kao npr. u željezarama, kod valjaonica metala i sl. Problemi nastaju kod održavanja brzine vrtnje ili njene regulacije, a negdje su to udarci snage na priključnoj mreži, pogotovo kad su udarni tereti veliki (konkretno u valjaonicama moment tereta može dostignuti vrijednost i do $3M_n$ momenta motora), kad je priključna mreža slaba ili kad su vremenske konstante takve da je EMP sklon njihanju ($T_{em} < 4T_{el}$). Upravo je česta pojava (valjaonice) da je moment inercije takvih radnih mehanizama relativno malen prema momentu inercije rotora pogonskog motora.

Principijelni vremenski tok za takav radni mehanizam prikazuje slika 2.5. U određenim vremenskim intervalima pogonski motor je potpuno rasterećen, a u određenim vremenskim intervalima je potpuno opterećen. Ovakav pogon se može rješavati kao niz naglih udarnih opterećenja i rasterećenja koja se naizmjenično smjenjuju. Pri tom je veoma važno kolika su trajanja opterećenja i rasterećenja. Kad su ovi periodi toliko dugi da se prijelazna pojava u njima završi, a brzina vrtnje i moment motora praktično poprime stacionarne vrijednosti, onda se takve pojave mogu računati kako je prethodno opisano. Kada su periodi opterećenja i rasterećenja kratki, i to toliko da unutar perioda prijelazne pojave ne završe, već prelaze na drugi period, tj. drugu prijelaznu pojavu, onda se vremenski tok brzine vrtnje i momenta motora može pratiti samo tako da se računa sa općim jednadžbama stanja. Pri tome se za svaki početak novog perioda moraju uzeti novi početni uvjeti, tj. konkretne vrijednosti za varijable s kojima se završava prethodni period te se sa njima za svaki period moraju računati nove, posebne konstante integracije.



Slika 2.5. *Primjer udarnih opterećenja*

Za svaki period se dakle moraju razvijati posebni oblici algebarskih jednadžbi, što je mukotrpan posao. Izuzetak je slučaj kad je $T_{em} >> T_{el}$, tj. kada je elektromehanička vremenska

konstanta elektromotornog pogona toliko velika prema električnoj konstanti motora da se električna konstanta može zanemariti.

Tada se diferencijalne jednadžbe za naglo opterećenje i naglo rasterećenje jednostavno rješavaju, jer su im dovoljni početni uvjeti za brzinu vrtnje i za struju, odnosno moment motora te ne treba određivati početne vrijednosti derivacija brzine i struje po vremenu.

Udarci tereta neugodni su u pogonu iz više razloga, posebno ako su veliki, a često su i znatno veći od nominalnog momenta pogonskog motora. Uz neprekidno mehaničko i električno naprezanje elektromotora i spojke nastaju i padovi (kolebanja) brzine vrtnje, što se većinom negativno odražava na tehnološki proces. Posebno su neugodni udarci u elektromotornim pogonima koji su sposobni da prigušeno titraju, tj. u kojima je $T_{em} < T_{el}$, jer su stvarni udarci struje i snage u mreži veći od mehaničkog udarca tereta. Zbog toga se često umjetno povećava elektromehanička konstanta u elektromotornim pogonima s kontinuiranom brzinom vrtnje (nereverzibilne valjaonice, čekići, drobilice itd.). Naime, što je ta konstanta veća, to veći dio tereta preuzimaju zamašne mase, odnosno rasterećuje se motor, a preko njega i mreža. Posljedično je EMP manje podložan udarcima, a i promjene brzine vrtnje su manje.

2.5. Dinamička stanja teških EMP sa asinkronim motorima

Trajanje nekog dinamičkog stanja proporcionalno je ukupnim zamašnim masama EMP što se i vidi iz slijedeće relacije koja slijedi iz (2-13):

$$t = \frac{m \cdot D^2}{4} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M_u} = \frac{m \cdot D^2}{4} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M_u - M_t} \tag{2-30}$$

Također su i energetski gubici u bakru rotora proporcionalni ukupnoj zamašnoj masi EMP (izraz se dobiva umnažanjem vremena trajanja prijelazne pojave (2-30) sa snagom kao umnoškom momenta i kutne brzine. Slijedi:

$$A_{Cu_2} = \frac{m \cdot D^2}{4} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{M_m}{M_m - M_t} \left(\omega_s - \omega\right) \cdot d\omega \tag{2-31}$$

Kod ocjene valjanosti ovih dvaju relacija pri općem dinamičkom stanju EMP postoji, međutim, osnovna razlika. Relacija (2-30) vrijedi općenito za dinamičko stanje, uz pretpostavku da nije riječ o stacionarnom stanju ($M_m - M_t \neq 0$). Relacija (2-31) izvedena je za statičko stanje i vrijedi samo onda kada u dinamičkom stanju nema razlika između statičkog i dinamičkog momenta tereta, a to znači da vrijedi samo kada je mehanička tromost znatno veća od električne.

Ranije je već rečeno da je matematička analiza dinamičkih stanja jako teško provediva analitički, pa tako i analiza struja i momenata. Numerička analiza konkretnih slučajeva, izvedena pomoću računala, pokazuje se znatno jednostavnijom. Sve numeričke analize uz pretpostavku velike dodatne zamašne mase dovode do toga da se rezultat točnije poklapa sa onim dobivenim iz relacije (2-31). To znači da se za EMP, kojima je moment inercije radnog mehanizma velik u usporedbi sa onim kod motora, mogu dobiti točnije vrijednosti.

Zamašne mase radnog mehanizma mogu biti od slučaja do slučaja vrlo različite. Obično ih uspoređujemo sa zamašnom masom motora, pa ima EMP gdje zamašna masa radnog mehanizma iznosi svega 10%, ali i onih gdje je 100 puta veća od zamašne mase motora. Kod dva EMP s jednakim motorima može se, dogoditi da im se ukupne zamašne mase odnose 1:100, pa će se taj odnos pojaviti i kod trajanja njihovih dinamičkih stanja u izrazima (2-30) i (2-31). Sigurno je da će se uz veliku masu pojaviti i znatna zagrijavanja namota motora u dinamičkim stanjima. To je osobito bitno kod EMP većih snaga, sa zamašnom masom radnog mehanizma mnogostruko većom od zamašne mase motora.

Tako provođenom analizom dolazi se do stanja kada svega jedan zalet na sat "potroši" cijelu sposobnost toplinskog opterećenja motora, odnosno dolazi se do tehničkog pojma "teški" EMP. Pod ovim pojmom se podrazumijeva pogon veće snage, kod koga su zamašne mase radnog mehanizma 10-20 puta veće od zamašnih masa samog motora. Pošto ima mnogo "teških" EMP koji rade u veoma teškim uvjetima (pogoni mlinova, drobilica , pogoni teških ventilatora ...), a često je važna pogonska sigurnost i jednostavnost upravljanja, najjeftiniji i najneosjetljiviji je kavezni asinkroni motor. Robusne je konstrukcije i ima manje potencijalnih izvora kvara.

Prema tim karakteristikama kavezni asinkroni motor bi bio idealan da nema problema zagrijavanja u pokretanju. Naime, kod njega se sva električna energija koja se izgubi za vrijeme zaleta u rotorskom krugu pretvori u toplinu u samom rotoru. Zbog toga se za takve EMP nastoji pažljivo odabrati kavezni motor koji može izdržati predviđena termička naprezanja. Sam zalet kod ovakvih EMP može trajati od 15 do 100 sekundi.

Gubici rotora u zaletu se mogu iz (2-31) izvesti uz pomoć klizanja kao izrazito promjenjive veličine karakteristične za zalet:

$$A_{Cu_2} = \frac{m \cdot D^2 \cdot n_s^2}{365} \int_{s_n}^{1} \frac{M_m}{M_m - M_t} \cdot s \cdot ds \qquad (2\text{-}32)$$

Za proračun gubitaka u statoru za vrijeme zaleta može se krenuti od izraza za trenutne gubitke snage u bakru namota statora:

$$P_{Cu_1} \cdot dt = 3 \cdot I_1^2(t) \cdot R_1 \cdot dt \tag{2-33}$$

$$dt = \frac{m \cdot D^2}{4} \cdot \frac{d\omega}{M_u} = \frac{m \cdot D^2}{38,2} \cdot \frac{dn}{M_u} = -\frac{m \cdot D^2 \cdot n_s}{38,2} \cdot \frac{ds}{M_m - M_t} \tag{2-34}$$

Uvrstimo li izraz (2-34) u (2-33) slijedi:

$$P_{Cu_1} \cdot dt = -3 \cdot I_1^2(s) \cdot R_1 \cdot \frac{m \cdot D^2 \cdot n_s \cdot ds}{38,2 \cdot (M_m - M_t)} \tag{2-35}$$

Integracijom lijeve strane (P_{Cu1}) od početka do kraja prijelazne pojave sumiraju se gubici snage, tj. dobivaju se ukupni gubici energije u bakru statora za vrijeme prijelazne pojave :

$$A_{Cu_1} = 3 \cdot R_1 \cdot \frac{m \cdot D^2 \cdot n_s}{38,2} \int_{s_2}^{s_1} \frac{I_1^2(s)}{M_m - M_t} \cdot ds \tag{2-36}$$

Uz pretpostavku da se zbog relativno kratkog trajanja prijelazne pojave namoti neće uspjeti ohladiti i da se praktički svi gubici pretvaraju u toplinu, dobiva se izraz za zagrijavanje rotora:

$$\Delta\vartheta_2 = \frac{m \cdot D^2 \cdot n_s^2}{365 \cdot c_2 \cdot m_2} \int_{s_n}^{1} \frac{M_m}{M_m - M_t} \cdot s \cdot ds \left[C^0\right] \tag{2-37}$$

Analogno se izvodi izraz za stator:

$$\Delta\vartheta_1 = 3 \cdot R_1 \cdot \frac{m \cdot D^2 \cdot n_s}{365 \cdot c_1 \cdot m_1} \int_{s_n}^{1} \frac{I_1^2(s)}{M_m - M_t} \cdot ds \left[C^0\right] \tag{2-38}$$

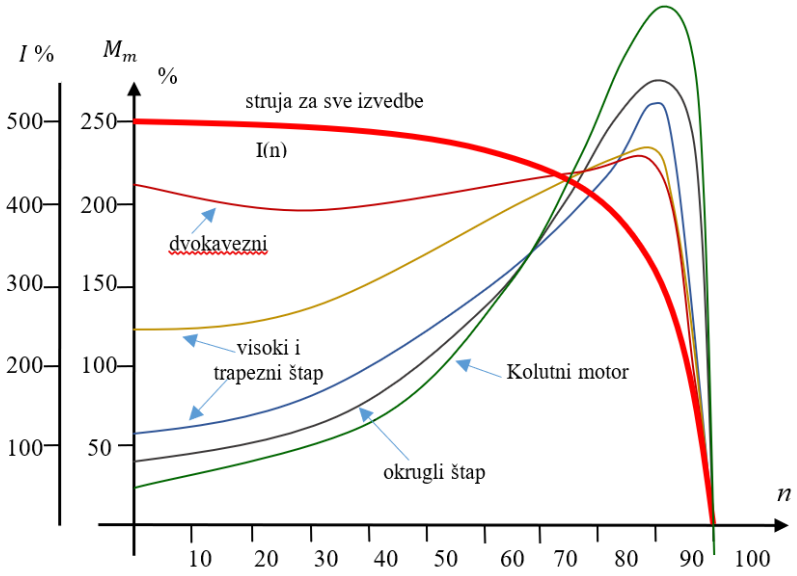
gdje su: $\Delta\vartheta_1$ i $\Delta\vartheta_2$ - zagrijavanja zbog zaleta, za stator i rotor,

c_1 i c_2 - specifične topline namota,

m_1 i m_2 - mase vodiča,

R_1 i I_1 - otpor i struja faze statorskog namota.

Smanjenje zagrijavanja statora može se postići povećavanjem mase namota m_1, čime ujedno i pada vrijednost otpora R_1, što spada u uobičajene konstruktivne zahvate u takvom slučaju. Prilikom odabira motora potrebno je voditi računa da motor ima što veći moment M_m te što manju struju pri zaletu I_1 čime se postiže da vrijednost integrala iz jednadžbi (2-37) i (2-38) bude što manja. Slika 2.6. prikazuje prirodne karakteristike $M_m(n)$ i $I_1(n)$ za velike asinkrone motore [5].



Slika 2.6. *Razni oblici vanjskih karakteristika kaveznih asinkronih motora veće snage za različite izvedbe rotora*

U teškim pogonima velika je razlika pokreću li se oni iz hladnog ili toplog pogonskog stanja elektromotora. Iz hladnog se stanja temperatura njegovih namota tek kreće prema dopuštenoj vrijednosti. Iz toplog se stanja kreće od dopuštene vrijednosti, ili nešto ispod nje ako motor ima izvjesne rezerve u normalnom radu. To znači da pri pokretanju teškog EMP sa kaveznim motorom iz toplog stanja, uopćeno nastupaju termička preopterećenja, posebno kod vrlo teških EMP. Da se izbjegne utjecaj takvih preopterećenja na životni vijek motora u teškim EMP s nešto češćim pokretanjem (jednom dnevno ili češće), nužno je odabrati snagu elektromotora 15-30% veću od one koju zahtijeva radni mehanizam, kako bi se period povećanog trošenja životne dobi zbog dinamičkih stanja kompenzirao periodom smanjenog trošenja životne dobi u trajnom radu [16,17,18,19].

Prema literaturi [16] ispitivanja su pokazala, da pri pokretanju motora u trajanju oko 1 minute, dvokavezni namot uspije predati okolini svega do 15%, a trapezni čak i više od 60% stvorene topline, što dovodi do zaključka o boljem sustavu odvođenja topline, odnosno izvedba VN AKM s jednokaveznim rotorom i trapeznim štapovima je termički najpovoljnija izvedba za teške elektromotorne pogone. To ne umanjuje prednost dvokaveznih motora koji imaju bolji odnos između razvijenog momenta i statorske struje.

U zadnje vrijeme proizvođači motora sve više prelaze na proizvodnju motora koji mogu izdržati preklapanja u bilo kakvim uvjetima. Razvile su se tehnologije izrade i učvršćenja namota motora svih snaga, izvedbi i napona koji mogu izdržati i višekratne udarne struje kratkog spoja.

Pitanje je tehno ekonomske analize, hoće li se odabrati skuplji motor bez zaštite od povratnog uklopa ili jeftiniji sa zaštitom. No, u uvjetima čestog automatskog ponovnog uklapanja u mrežama ipak će prednost ići prema skupljim, a otpornijim motorima.

Uvjeti rada motora mogu biti vrlo različiti u ovisnosti od okoline u kojoj se nalaze. Neki uvjeti mogu utjecati na posebna konstruktivna rješenja na motorima koja opet mogu bitno utjecati na gabarite motora. Na primjer zatvorene vrste motora gdje je spriječen pristup stranim tijelima i vodi, u unutrašnjost, onemogućen je pristup i rashladnom zraku, pa je hlađenje takvih motora najčešće posredno, tj. toplota se ne odvodi sa površine aktivnih dijelova već sa vanjske površine motora. Takav se motor znatno slabije hladi od otvorenoga pa su mu zbog potrebe da se smanje gubici i dimenzije veće. Verzija sa vodenim hlađenjem je u odnosu na navedena rješenja puno ekonomski skuplja i zahtjevniji za održavanje [20,21].

Radni uvjeti motora moraju biti posebno analizirani prije postavljanja motora, jer se zaštitne mjere velikim dijelom definiraju tijekom procesa konstrukcije i izrade motora, koji se za te dimenzije rade po narudžbi. Rani kvarovi na motorima mogu biti posljedica neprovođenja spomenutih utjecaja. Nominalni parametri motora, dobiveni od proizvođača u obliku pisanih parametara ili parametara datih na natpisnoj pločici motora, sa zahtjevima radnog mehanizma i uvjetima rada čine temelj za izbor i podešavanje zaštita. Za svaki od nominalnih parametara najčešće sam proizvođač daje i izvjesnu toleranciju.

2.6. Analiza i usporedba rezultata istraživanja

Gledano kroz povijest razvoj teških EMP sa VN asinkronim kaveznim strojevima može se reći da su prvobitni kavezni strojevi bili gotovo uvijek predimenzionirani. Napretkom tehnologije i konkurencijom na tržištu razvoj ovih EMP išao je u smjeru povećanja snage po jedinici volumena stroja. To je imalo za posljedicu smanjenje vremenske konstante zagrijavanja stroja. Naime, poznato je da vremenska konstantna zagrijavanja zavisi od mase i specifične toplote zagrijavanja stroja a obrnuto je proporcionalna odvođenju toplote gubitaka. Strojevi sa malim vremenskim konstantama su izuzetno osjetljivi na preopterećenje. U tom smislu konstruktori strojeva su sve veću pažnju posvećivali izolaciji namotaja i kvalitetnom odvođenju toplote iz stroja, dok su proizvođači relejnih zaštita dali akcenat na razvoj releja koji će omogućiti sveobuhvatnu zaštitu stroja.

Asinkroni kavezni stroj nije ništa izgubio na značaju niti nakon više od pola stoljeća od njegovog otkrića. Razvoj i relativno niska cijena frekventnih regulatora eliminirali su njegov najveći nedostatak, tj. nemogućnost regulacije brzine. U suvremenim industrijskim pogonima, po

nekim statistikama, više od 95 % strojeva su kavezni asinkroni strojevi, što je svakako posljedica njihove gotovo savršene jednostavnosti. Ova činjenica je svakako najviše utjecala na to zašto se u posljednje vrijeme poklanja sve veća pažnja zaštiti EMP sa ovim strojevima [22].

Prvobitni teški EMP su bili nedovoljno štićeni. Uglavnom se zaštita svodila na zaštitu od preopterećenja i kratkih spojeva. Zaštita strojeva u toku zaleta rješavala se na različite načine, nerijetko i premoštavanjem zaštita (mrtva zona štićenja). Svakako treba napomenuti da se još uvijek veoma veliki broj teških EMP u industriji na našim područjima štiti na ovaj način, bez obzira na činjenicu da su veoma često takvi pogoni od vitalnog značaja za proizvodni proces. [23]

2.6.1. Opravdanosti ulaganja u osuvremenjivanje relejnih zaštita VN teških EMP

Primjena numeričkih releja pored ostalog i u svrhu dijagnosticiranja kvarova na strojevima svakako doprinosi opravdanosti ulaganja u osuvremenjivanje relejnih zaštita važnih EMP. Uvažavajući sve aspekte primijenjenih rješenja kao i razvojem metodologije koja će uvažiti sve uticaje, problem se može svesti na kriterij ekonomske isplativosti primijenjenog rešenja, odnosno na kriterij vremena vraćanja uloženih sredstava, koji je, uz sagledavanje tehničkih prednosti primijenjenog rešenja svakako dovoljan za donošenje odluka.

Kada se govori o tehno ekonomskoj analizi opravdanosti ulaganja u osuvremenjivanje zaštita EMP, gotovo uvijek je u pitanju kompromis između veličine iznosa uloženih sredstava i brzine povratka tih sredstava. Analizom trenutnog tržišta, da se primijetiti da u ponudi gotovo i da nema drugih zaštita (elektromehaničkih, statičkih i sl.) osim numeričkih.

Gotovo sve numeričke zaštite su koncipirane kao zaštite sa mnoštvom funkcija, kako zaštitnih tako i kontrolnih, upravljačkih i signalnih. Veoma često je upitna potreba za nekom od njih (npr. opseg podešavanja vremena zatezanja kratkospojne zaštite npr. od 0-300s). Proizvođači se pravdaju tipizacijom ugrađenih integriranih sklopova koji obavljaju te funkcije. Neke pak funkcije djeluju na nas impresivno kao npr. zapisi "događaja" (prorada odgovarajućih zaštita, ispadi i sl.) koji nam pružaju mogućnosti analize istih a sve u cilju što bolje i svrsishodnije zaštite strojeva.

Pošto su VN teški EMP u pravilu glavni pogoni važnih industrijskih procesa to svakako doprinosi lakšoj odluci u osuvremenjivanje relejnih zaštita. Ova doktorska disertacija je u svakom slučaju dala doprinos objašnjenju opravdanosti tih ulaganja i pokazala da se numerički releji pored svoje osnovne zadaće mogu iskoristiti i u svrhu ranog dijagnosticiranja kvarova na EMP i njihovog preventivnog održavanja a sve u cilju bespotrebnih i skupih zastoja čitavih industrijskih procesa.

2.6.2. Analiza primjene disturbance recordera u dijagnostičke svrhe

Poglavlje 7.1. ove disertacije se bavi istraživanjima na malom trofaznom NN asinkronom kaveznom stroju koje je imalo za cilj da dokaže uporabu disturbance recordera numeričkog releja i u dijagnostičke svrhe. Na koncu se mogu izvesti slijedeći zaključci:

- Numerički relej se može koristiti za uzimanje uzoraka (snimaka struja statora u stacionarnom režimu rada) koji se poslije mogu koristiti kao ulazni parametri kod software-skih paketa za dijagnostiku stanja strojeva,

- Frekvencija uzorkovanja signala sa analognih ulaza numeričkih releja je daleko veća od minimalno potrebne a prema Nyquistovom kriteriju, koji kaže da se snimanje mora izvršiti najmanje dvostrukom frekvencijom najviše frekvencije koju želimo analizirati. U konkretnom slučaju ona je iznosila 2 kHz.

- Dokumenti sa snimcima imaju COMTRADE format (IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchenge for Power Systems) koji predstavlja standard odnosno COMTRADE file-ovi se mogu pregledati sa komercijalnim programima.

- Ispitivanja u ovoj disertaciji, odnosno izrada snimaka je istovremeno rađena na numeričkom releju i analizatoru MI 7111 (uređaj velike preciznosti). Vršena su poređenja dobivenih rezultata na taj način što je napravljena Matlab skripta pomoću koje je rađena FFT analiza struja statora motora snimljenih pomoću instrumenta MI 7111 i numeričkog releja REF 541. Matlab skripta vrši pretvorbu podataka iz vremenske u frekventnu domenu a u svrhu bolje prezentacije dobivenih rezultata. Dobiveni rezultati su opravdali uporabu disturbance recordera u dijagnostičke svrhe.

2.6.3. Analiza dobivenih rezultata na realnom EMP

Nakon obavljenih testnih ispitivanja na stroju male snage obavljena su i ispitivanja na realnom EMP na Bloku 6. TE Tuzla. Zbog važnosti EMP testni relej REF 541 je spojen neovisno o postojećem releju u pogonu (struje grane su spojene u seriju sa strujama na postojećem releju u pogonu, dok su naponi paralelno spojeni na analogne ulaze testnog releja).

Testni relej je podešen za uzimanje uzoraka struja i napona i to za slučajeve:

- Starta EMP
- Stacionarnog režima rada EMP

Start (zalet) EMP je bitan iz razloga što stroj koji ima kvar, pa bilo to da se radi o kvaru u začeću, ima produžen zalet. Ta činjenica pruža mogućnost rane dijagnoze kvara stroja.

Snimci struja statora u stacionarnom režimu rada pak pružaju dovoljno informacija o postojanju subharmonijskih komponenti koje su mjerodavne da se korištenjem frekventne analize statorske struje može otkriti kvar na stroju u ranoj fazi.

Predstavljeni model je ugrađen na ćeliji stroja Mlina 5, bloka 6 TE Tuzla.

Blok 6 TE Tuzla je uvezan u SCADA sustav daljinskog nadzora i upravljanja (SDNiU). Ta činjenica se svakako treba iskoristiti u cilju sistemskog uzimanja uzoraka struja stacionarnog režima rada kao i struja i napona kod zaleta svih EMP koji su u sustavu. Uz odgovarajuća podešavanja disturbance recoredera zaštitnih releja na svim ćelijama EMP inženjer na održavanju zadužen za relejnu zaštitu bi mogao periodično sa dispečerskog centra upravljanja preuzimati snimke sa releja neophodne za analizu stanja strojeva u sklopu EMP.

Model bi se mogao potpuno automatizirati, međutim iskustva iz svjetskih literatura ukazuju da ipak inženjer na održavanju treba donijeti konačnu odluku o stanju stroja, odnosno da li stroj treba zaustaviti i poduzeti mjere na provjeri i popravci.

3. MEĐUSOBNI UTJECAJI ELEKTRIČNE MREŽE I POGONSKIH ASINKRONIH KAVEZNIH MOTORA KOD TEŠKIH EMP

Kada se govori o međusobnom utjecaju električne mreže i EMP ne može se razmatrati odvojeno utjecaj napojne mreže na rad teških EMP, a zatim utjecaj teških EMP na napojnu mrežu iz jednostavnog razloga što su ti utjecaji isprepletani, odnosno postoje brojne uzročno posljedične povratne veze.

U ovom poglavlju će se obraditi teorijske postavke međusobnog utjecaja električne mreže i teških EMP sa asinkronim kaveznim motorom, kao i neki pokazatelji dobivene iz prakse te istraživanja kvarova i prijelaznih naponskih i strujnih procesa u industrijskim mrežama napona 6 kV koje napajaju teške elektromotorne pogone. Visok ili nizak napon mreže, veoma često može biti uzrok smetnjama, koje mogu prouzročiti nastanak značajnih strujnih preopterećenja u pojedinim vrstama motora. Izvor smetnji za motore predstavljaju također i određene prijelazne pojave u mreži. Značajne dodatne gubitke u motoru mogu prouzročiti i promjene oblika izmjeničnog sinusnog napona napojne mreže. Pri analizi utjecaja smetnji iz raznih izvora na parametre i rad elektromotornog pogona potrebno je razlikovati smetnje koje nastupaju u statičkim stanjima kod trajnog pogona od onih koje su povezane s dinamičkim stanjima [24].

3.1. Utjecaj napojne mreže na rad EMP

Asinkroni strojevi kao sastavni dio EMP veoma često rade pod uvjetima koji su različiti od onih za koje su ovi strojevi projektirani što posljedično može predstavljati inicijalni uzrok raznih kvarova asinkronih strojeva. Smetnje iz napojne mreže koje mogu utjecati na normalan rad asinkronih strojeva su:

- promjenjiv iznos napona napajanja
- nestandardni oblik napona
- nesimetrija trofazne mreže
- prenaponi
- promjena frekvencije napojne mreže
- viši harmonici
- prolazni kvarovi u mreži - APU

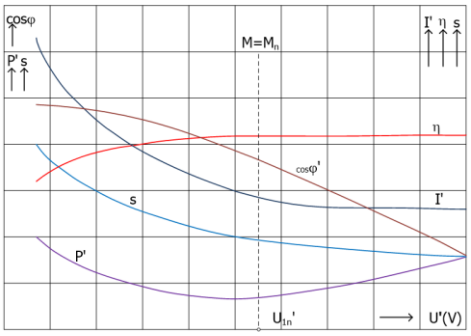
Kada se govori o smetnjama u napojnoj mreži koje mogu štetno utjecati na pogonski motor elektromotornog pogona, misli se u pravilu na trofaznu mrežu i trofazne asinkrone motore

(određeni tipovi višefaznih pogona obično se rade izolirano). Pošto je asinkroni kavezni motor predmet izučavanja u ovoj disertaciji, o njemu će biti nešto više riječi nego o ostalim vrstama.

3.1.1. Smetnje zbog promjenljive visine napona napajanja

Za izmjenične mreže propisane su vrijednosti visine napona i stalnosti frekvencije. U načelu su svi motori građeni tako da trajno izdrže određena odstupanja od parametara mreže. Propisi zahtijevaju da strojevi bez štetnih posljedica izdrže promjenu frekvencije i priključnog napona u iznosu od nekoliko postotaka, obično ± 5 % za napon te ± 1 % za frekvenciju. Pojedini propisi za određen specifični EMP su u pogledu frekvencije još i znatno strožoj te promjena frekvencije u pogonu (osigurana kroz zaštitne uređaje kontrole frekvencije) obično je toliko mala da ne izaziva poteškoće. Na VN strani distributivnih transformatora propisi o visini napona redovito se poštuju i napon se drži u propisanim granicama. Međutim, sa NN strane transformatora, pad napona može biti i veći od dopuštenog. Naročito se to može desiti kod prostorno dugih distributivnih mreža (česta pojava povećanog pada napona na vodu uslijed raspodjele potrošača) gdje napon može biti neko duže vrijeme van dozvoljenih okvira što može imati za posljedicu i stradanje motora.

Kod SN mreža na koje su spojeni asinkroni kavezni motori koji su predmet izučavanja ove disertacije rijetko može doći do promjena u visini priključnog napona mada takva situacija nije isključena. Upravo zbog toga se neće ulaziti u dublju analizu ovakvih smetnji na rad motora. Na slici 3.1. prikazane su ovisnosti nekih veličina o promjeni visine napona pri stalnoj vrijednosti momenta tereta (M_n=M=*const.*).

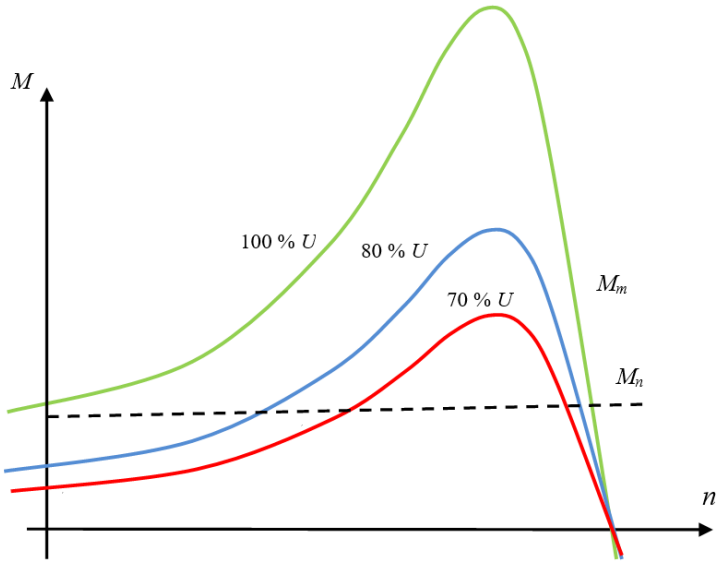


Slika 3.1. *Prikaz kako se mijenjaju veličine motora sa porastom napona pri konstantnom okretnom momentu*

Analizom promjene parametara sa slike 3.1. zbog kolebanja napona na rad asinkronog motora naročito dolaze do izražaja sljedeći faktori [8]:

- Mijenja se magnetno zasićenje motora što uzrokuje promjenu struje magnetiziranja koja raste brže nego napon. Magnetsko zasićenje utječe i na induktivitete uslijed rasipanja, koji se smanjuju pri povećanju zasićenja.
- Okretni moment motora mijenja se proporcionalno kvadratu napona, ali i djelomično ovisi i o promjeni magnetskog zasićenja, odnosno promjeni rasipnih induktiviteta koji ovise o promjeni napona.

U praksi su moguće dvije kombinacije uzroka. Prva mogućnost je da napon bude mnogo niži od nazivnog (70-80 %) (Slika 3.2.).



Slika 3.2. *Ponašanje asinkronog motora pri smanjenom pogonskom naponu*

Asinkroni motori dobro reagiraju na ovu pojavu, odnosno osobina asinkronog motora je da mu se pri manjim opterećenjima i pri smanjivanju napona faktor snage povećava. Pri kratkotrajnim smanjivanjima napona mreže za vrijeme od nekoliko sekundi, na primjer u slučaju kratkog spoja u mreži, nastaje u jako opterećenim asinkronim motorima naglo povećanje struje i klizanja (kao na slici 3.1.), koje je prouzrokovano nastojanjem motora da i pri sniženom naponu savlada raniji moment opterećenja na osovini. U tim slučajevima često djeluje zaštita od preopterećenja i isključuje motor sa mreže. Pri postepenom smanjivanju napona u mreži, znatnijeg iznosa, može se motor i sasvim zaustaviti.

Općenito, pri kolebanju napona, uz nepromjenljivo opterećenje, sniženje napona kod asinkronih kaveznih motora izaziva:

- poboljšanje faktora snage,
- malo opadanje brzine okretanja,

- smanjenje stupnja iskorištenja,
- smanjenje momenta,
- povećanje ukupnih gubitaka,
- smanjenje struje magnetiziranja i gubitaka u željezu,
- povećanje struje statora i rotora.

Druga je mogućnost, kada je napon napojne mreže mnogo viši u odnosu na nazivni (120-130 %). Tada bi asinkroni motori trebali biti strujno rasterećeni uz nešto povećane gubitke u željezu. Zbog visokog napona dolazi do povećanja magnetskog toka, pa uz isti moment tereta treba manja radna struja. Može se ponekad dogoditi da u slučaju jako zasićenih motora dođe do značajnog porasta struje magnetiziranja što posljedično ipak dovede do porasta statorskih struja. To je npr. pojava kod sporohodnih motora manje snage, kojima je struja magnetiziranja prirodno velika. Pozitivno je da zaštita od strujnog ili termičkog preopterećenja efikasno djeluje u takvim slučajevima porasta struje s naponom.

Generalno gledano sa stanovišta teorijskog modela asinkronog kaveznog motora povećanje napona povlači za sobom:

- pogoršanje faktora snage,
- malo povećanje brzine vrtnje,
- stupanj iskorištenja se praktično ne mijenja,
- povećanje okretnog momenta,
- povećanje potezne struje,
- povećanje struje magnetiziranja i gubitaka u željezu.

U svakom slučaju, može se zaključiti i potvrditi iskustvenim podacima, pri osciliranju napona u granicama $\pm 5\%$ asinkroni motor treba davati nominalnu snagu.

3.1.2. Smetnje zbog nestandardnog oblika napona

Oblik napona u izmjeničnoj mreži veoma često odstupa od sinusnog zbog cijelog niza problema topologije mreže i priključenih trošila. Propisi dopuštaju samo neznatna odstupanja od sinusnog oblika, obično ne više od 5 %, i taj se zahtjev održava u većini slučajeva na strani gornjeg (višeg) napona transformatora u prijenosnoj ili distributivnoj mreži. Na strani donjeg (nižeg) napona u distributivnim mrežama propisima dopuštene granice odstupanja vrlo se često

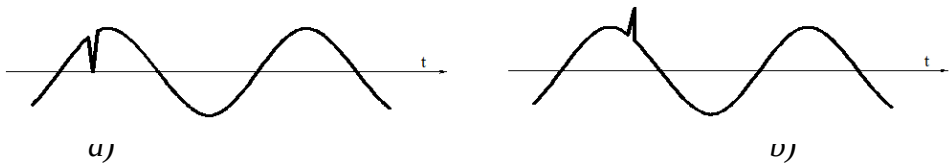
premašuju, a sadržaj viših harmonika zna biti i znatno veći. Tome je u novije vrijeme ponajviše uzrok i sve veći broj pogona napajanih korištenjem statičkih pretvarača napona, kao što su tiristorski mostovi i statički pretvarači frekvencije koji povratno uzrokuju pojavu velikog broja viših harmonika u mrežama, i već se gotovo udomaćio naziv da takvi pogoni "zagađuju mrežu".

U matematičkim proračunima ovakav vid napajanja asinkronog kaveznog motora modelira se kao da postoji čitav niz motora na zajedničkoj osovini koji se okreću zajedničkom brzinom *n*, ali čiji se statori napajaju iz mreže različitim naponima: U_1, U_3, ...,U_n i različitim frekvencijama, višekratnicima osnovne frekvencije (harmonicima): $f_1, f_3, \ldots, f_n = n \cdot f_1$. Navedenim naponima pridružuju se i pripadajuće struje: $I_1, I_3, \ldots, I_n$.. Kako su struje posljedica povratnog utjecaja na mrežu, u pravilu imaju reaktivni karakter. Sukladno tome može se definirati da promjene napona u svijetlu matematičkog modela ekvivalentno povećavaju induktivne otpore. Slijedi, prema obrazloženju iz prethodnog poglavlja, da u ovom slučaju dolazi do smanjenja maksimalnog momenta, faktora snage i stupnja iskorištenja.

Brojne studije pokazuju da je utjecaj nesinusoidalnog napona relativno velik čak i u slučajevima kad oblik napona neznatno odstupa od sinusoide. [8,25,26]

Izmjenični motori priključeni na takvu mrežu ne samo da gube na efikasnosti zbog pojave parazitskih momenata, već se u njihovim namotima i aktivnom željezu pojavljuju dodatni gubici, odnosno, motori se više zagrijavaju. Budući da su efektivne vrijednosti struja motora u takvoj mreži samo neznatno povećane, posljedično uobičajeni sustavi zaštite prekostrujnim ili bimetalnim relejima ne pruža nikakvu zaštitu. U tom slučaju ostaje jedino termička zaštita kojom se može uspješno štititi motor od utjecaja prouzrokovanog jakim iskrivljenjima oblika napona u napojnoj mreži.

U slabim izmjeničnim mrežama, posebno tamo gdje su potrošači velike snage, nastaje još jedan fenomen, takozvani flikeri, slika 3.3. Flikeri nastaju kao rezultat viših harmonijskih članova izazvanih u pogonima napajanim preko ispravljača, ali također uzrokovanih i pojavama pri isklapanju i uklapanju potrošača većih snaga, a oboje je vezano za eventualne pojave rezonancije između induktiviteta i kapaciteta mreže (izrazito u kablovskim mrežama) [27].



Slika 3.3. *Smetnje uslijed naglih: a)padova napona, b) porasta napona*

Ti snažni trenutni padovi napona (propadi), kao onaj na slici 3.3.a, odnosno snažni porasti napona, kao onaj na slici 3.3.b, obično su toliko kratkotrajni da ne remete rad motora (velike inercijalne mase). Na slici 3.3. su širine naponskih udara zbog ilustracije namjerno uvećane. One traju znatno kraće i ne izobličuju same po sebi oblik napona preko dopuštenih granica. Za relejnu zaštitu oni su i suviše kratki da bi zaštita djelovala, tj. isključila motor, što i nije potrebno.

Udari prouzrokovani flikerima sami po sebi obično ne mogu uništiti odnosno probiti izolaciju namota jer ekstremno kratko traju. Niz takvih udara koji se uzastopno pojavljuju u nekom dužem vremenskom trajanju pogona "nagriza" izolaciju. To djelovanje se obično akumulira na najslabijim točkama izolacije i konačno nastaje proboj (spoj na masu, između zavoja namota ili među fazama namota). Protiv takvog djelovanja nema zaštite koja bi bila dovoljno efikasna, već se u takvoj mreži moraju ukloniti uzroci.

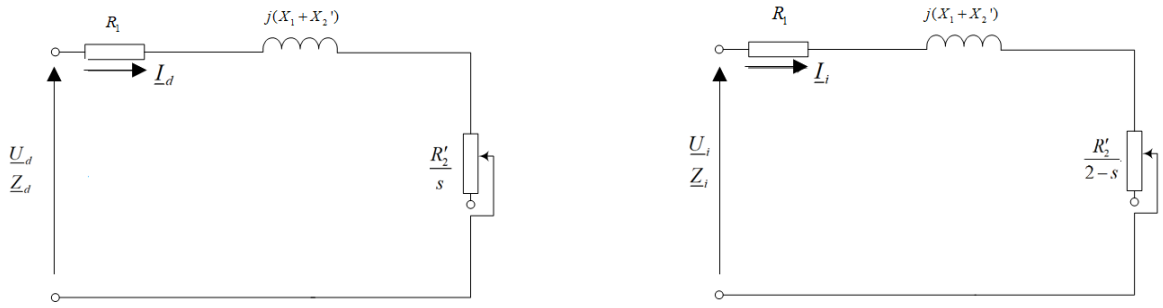
3.1.3. Smetnje zbog nesimetrije trofazne mreže

Priključkom asinkronog motora na trofazni nesimetričan sustav napona izvora napajanja javljaju se dva obrtna polja [28]:

- polje pobuđeno direktnom komponentom struje glavnog harmonika (I_d) , stvara okretno magnetsko polje u pozitivnom smjeru okretanja rotora, uz klizanje (s) i rad motora u motornom režimu

- polje suprotnog smjera okretanja pobuđeno inverznom komponentom struje (I_i) čiji sustav zbog nesimetrije nije jednak nuli, stvara okretno magnetsko polje smjera suprotnog pozitivnom smjeru okretanja rotora, klizanja (2-s) i rad motora u kočionom režimu

Pojednostavljena ekvivalentna shema asinkronog motora za direktan i inverzan sustav u kojoj je zanemarena grana magnetiziranja prikazana je na slici 3.4. Ohmski otpori R_1 i R_2' predstavljaju gubitke u namotu po fazi namota statora i rotora, a reaktancije X_1 i X_2' odgovarajuće induktivne otpore, odnosno magnetska polja [1,29]. Otpori direktnog i inverznog sustava rotora svedeni su na statorsku stranu, a promjenjivi otpornik na slikama a) i b) je matematički model pogonskog stanja motora koji je određen klizanjem (s). Pri tome se impedancija $\underline{Z}_d$ u potpunosti poklapa sa ekvivalentnom impedancijom pri normalnom radu motora uz simetrično napajanje.



a) Direktni sustav *b) Inverzni sustav*

Slika 3.4. *Ekvivalentna shema asinkronog motora napajanog iz nesimetričnog sustava napajanja*

U stanju mirovanja (*s=1*) direktna i inverzna impedancija su jednake ($\underline{Z}_d = \underline{Z}_i$), dok se povećanjem brzine okretaja motora $\underline{Z}_d$ mnogostruko povećava, a $\underline{Z}_i$ vrlo malo, pa se kod normalnih brzina može pretpostaviti njena stalna vrijednost [17]:

$$\left.\frac{Z_d}{Z_i}\right|_{s=s_n} \approx \frac{U/I_n}{U/I_p} = \frac{I_p}{I_n} \tag{3-1}$$

u izrazu je: I_p – struja pokretanja;

I_n – nominalna struja.

Prema tome, za praktične svrhe, inverzna komponenta struje I_i može se izračunati korištenjem pojednostavljenog izraza:

$$I_i = \frac{U_i}{Z_i} = \frac{U_i}{Z_d} \cdot \frac{I_p}{I_n} \tag{3-2}$$

Ako definiramo omjer iznosa inverznog i direktnog napona nadomjesnog modela kao mjeru za nesimetriju izvora napajanja *K*:

$$K = \frac{U_i}{U_d} \tag{3-3}$$

slijedi praktični izraz za određivanje iznosa struje inverznog sustava:

$$I_i = K \cdot \frac{I_p}{I_n} \cdot I_d \tag{3-4}$$

Na osnovu toga može se izvesti zaključak potkrijepljen primjerima iz prakse: za motor sa strujnim odnosom $I_p / I_n = 6$, kod nesimetrije napona izvora od 5%, inverzna komponenta struje iznosi čak 30% direktne, odnosno kod nesimetrije napona izvora od 16,7% inverzna komponenta struje postaje jednaka direktnoj, pa je i njezin utjecaj u zaustavljanju vrtnje rotora znatan [17].

Dalje, gubici kod nesimetričnog napona napajanja su:

$$P_g = 3 \cdot \left(I_d^2 + I_i^2 \right) \cdot R_1 \tag{3-5}$$

dok kod simetričnog napajanja iznose:

$$P_g = 3 \cdot I_d^2 \cdot R_1 \tag{3-6}$$

Iz izraza (3-5) i (3-6) slijedi da se kod nesimetrije gubici u statoru povećaju u odnosu:

$$\frac{P_G}{P_{Gd}} = 1 + \left(\frac{I_i}{I_d} \right)^2 \tag{3-7}$$

Povećanje gubitka nije zanemarivo, jer se može pokazati da se za odnos $Z_d / Z_i = 6$, već kod normalnih nesimetrija napona od 5% gubici u bakru statora povećavaju za 9%. Iz toga se lako zaključuje da već i male nesimetrije izazivaju termička preopterećenja motora, pri čemu se u cilju zaštite moraju uzeti i obzir nejednaka strujna opterećenja po fazama. Zato u pogonima gdje se očekuje takva nesimetrija treba izvršiti redukciju nazivne snage, kako bi se sačuvao životni vijek [13,19].

Teorijski gledano, rotor će se simetrično zagrijavati unatoč nesimetriji napajanja iz razloga stalne izmjene "faza" rotora u odnosu na stator (razlika vremenskih konstanti električne promjene u odnosu na raspodjelu topline). Ipak, kod rotora treba uzeti u obzir pojavu i promjene otpora sa frekvencijom, zbog efekta visokofrekventnih struja rotora. U rotoru se uslijed direktnog polja induciraju struje frekvencije $f_d'' = s \cdot f$, a uslijed inverznog okretnog polja sa frekvencijom $f_i'' = (2 - s) \cdot f$. Veličine tih frekvencija za osnovni harmonik $f = 50Hz$ i nominalno klizanje $s = 5\%$ (0,05), odnosno za normalno opterećen motor u stacionarnom režimu rada, iznose: $s \cdot f = 2{,}5Hz$, $(2 - s) \cdot f = 97{,}5Hz$.

Zagrijavanje rotora uslijed inverzne struje proporcionalno je otporu $R = k_{se} \cdot R_S$, gdje se sa k_{se} uzima u obzir utjecaj skin efekta, a prosječno se kreće u granicama 1,25÷6 prema [4]. Iz toga slijedi da zagrijavanje uslijed inverzne komponente struje može da bude i do 6 puta veće nego

uslijed direktne komponente struje. Jednadžba koja daje povećanje gubitaka u rotoru uslijed inverzne komponente struje izgleda ovako:

$$\frac{P_{Gr}}{P_{Gdr}} = 1 + k_{se}\left(\frac{I_{ir}}{I_{dr}}\right)^2 \tag{3-8}$$

Dakle, ukupni srednji gubici mogu da se povećaju čak i 12-15%, već pri normalnim nesimetrijama napona od 5%. Kao zaključak nameće se da nesimetrija kod asinkronog motora:

- povećava zagrijavanja statora i rotora,
- prouzrokuje neravnomjerna zagrijavanja namota statora (pri jednofaznom radu),
- povećava gubitke u željezu,
- izaziva povećana relativna zagrijavanja namota rotora kod inverznih struja u odnosu na direktne, uslijed efekta potiskivanja,
- ne utiče mnogo na promjenu obrtnog momenta [8]

Prethodno navedeno može se matematički prikazati kao:

$$\frac{M_i}{M_d} = \frac{\frac{s_{pr}}{s} + \frac{s}{s_{pr}}}{\frac{s_{pr}}{2-s} + \frac{2-s}{s_{pr}}} \cdot \left(\frac{U_i}{U_d}\right)^2 \tag{3-9}$$

Pri nesimetrijama od 20%, inverzni moment je zanemariv prema direktnom, kod svih pogona koji rade u stacionarnom režimu rada.

Navedeni faktori predstavljaju osnovne kriterije za zaštitu od nesimetrije. Opasnost po motor rezultira prvenstveno iz povećanog zagrijavanja zbog porasta struje faze namota, ali i uslijed vrtložnih struja u rotoru nastalih uslijed frekvencije polja. Takvo povećanje topline u motoru nije moguće pratiti isključivo nadziranjem zagrijavanja u statoru, pa čak i ako se nadziru sve tri fazne struje. Jedina mjerodavna veličina koja ukazuje na smetnju nesimetrije jeste inverzna komponenta struje I_i, koju se jednostavno može nadzirati ugrađenim relejom koji radi na principu njenog otkrivanja i mjerenja.

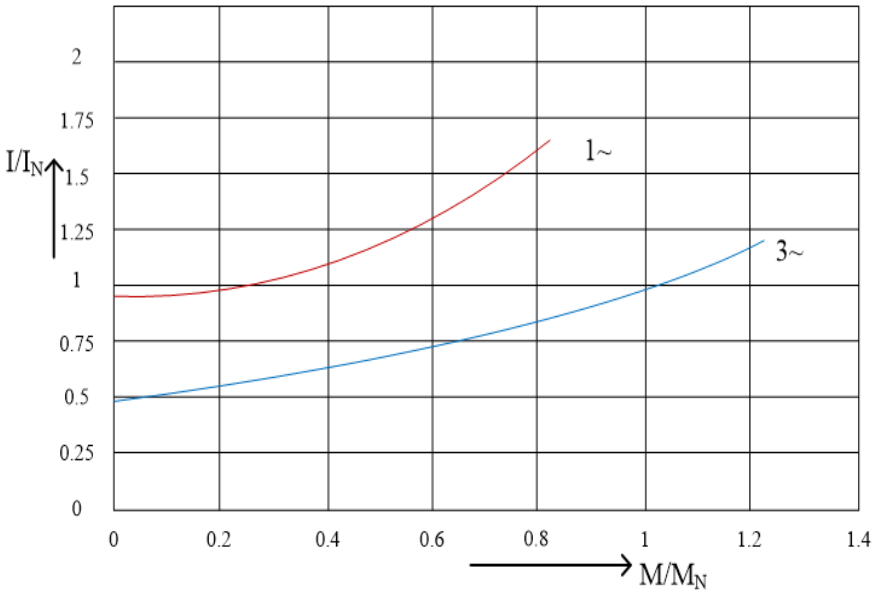
Ispad faze predstavlja najteži oblik nesimetrije. Motor u tom slučaju sa trofaznog prelazi na dvofazni režim rada. Taj slučaj zahtjeva detaljno objašnjenje. Motor se u tom slučaju tretira kao jednofazni [30].

Preporuča se da se namoti u spoju trokut štite tako da su releji spojeni u seriju sa namotom pojedine faze. Za izbor i podešavanje releja mjerodavna je nominalna fazna struja, što je za motore

čiji je namot u spoju trokut *0,58* I_N. Od ovog uvjeta se može odustati ako se ispitivanjima dokaže da je vrijeme isključenja releja smještenih u mrežne dovode (t_A) za vrijednost *0,88* I_A/I_N štićenog motora, manje od dozvoljenog vremena t_E. Vrijeme t_E predstavlja vrijeme potrebno da polazna struja zagrije namotaj motora od temperature u radu pri nominalnom opterećenju (ϑ_n) na najvišoj temperaturi okoline (40°) do granične temperature (ϑ_{max}). Ovo vrijeme se češće zove maksimalnim dozvoljenim vremenom zagrijavanja motora zbog kvara (zakočeni rotor). U slučaju da se releji postavljaju samo u mrežne dovode, i da nije ispunjen ovaj uvjet poželjno je da postoji zaštita od ispada jedne faze motora. Naime, prilikom ispada jedne faze, i s tim u vezi nesimetričnim pogonom, relej pod izvjesnim okolnostima može kasno proraditi, što dovodi do opasnog pregrijavanja [31].

Često se ovoj pojavi ne daje potrebna pažnja te se navedene preporuke površno razmatraju u dizajnu sustava zaštite. Za to nema pravog objašnjenja, odnosno u praksi se vrši dizajn sustava zaštite bez analize ponašanja asinkronih motora pri ispadu jedne faze [32].

Uslijed prekida jedne faze struja u dva preostala linijska vodiča se povećava približno 20% ÷100% u odnosu na normalni rad što se vidi iz slike 3.5. gdje je prikazana ovisnost struje opterećenja ukoliko motor ostane u pogonu nakon ispada jedne faze. Veličina promjene ne ovisi od veličine i konstrukcije motora, niti od stupnja iskorištenja.



Slika 3.5. *Relativna linijska struja (I/I_N) pri promjenjivom opterećenju (M/M_N) sa i bez prekida jedne faze napajanja*

Za razliku od rada bez prekida jedne faze, struja u dva preostala linijska vodiča (vodiči u kojima se u procesu proračuna ne simulira događaj prekida, jednofazni priključak) nije mjera zagrijavanja motora iz više razloga:

- U spoju trokut prijenos struje u mrežnom dovodu odstupa od normalnog odnosa (odnosi linijske i radne struje)

  Rad bez prekida faze 1: $1/\sqrt{3} = 1 : 0,58$;

  Rad sa prekidom faze 1: $2/3 = 1 : 0,67$;

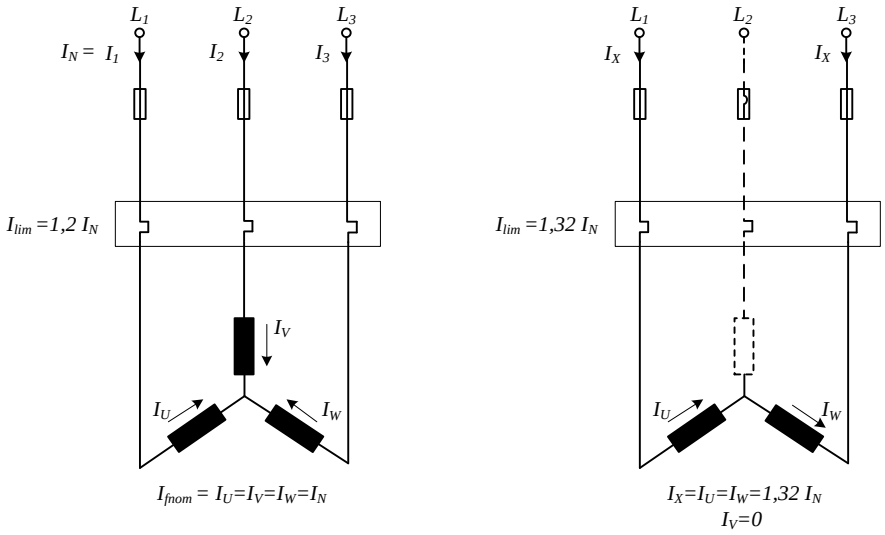
- Inverzno okretno polje stvara dodatne gubitke u rotoru, tako da temperatura rotora može da poraste za dvostruku vrijednost porasta temperature u nominalnom radu, ili čak više, naročito kod velikih motora. Temperature rotora zagrijavaju i namotaje statora, naročito kod zatvorenih strojeva sa površinskim hlađenjem. Dakle, nije moguće davati generalne zaključke u vezi sa temperaturom namota u jednofaznom radu. Namotaji u spoju zvijezda ne bi bili u opasnosti ako bi prekostrujni relej mogao da spriječi rast struje iznad utvrđene vrijednosti.

Nadalje će se pojasniti razlika spoja namota (zvijezda, trokut) u korelaciji sa efikasnosti relejne zaštite kod ispada faze.

❖ Motor u spoju zvijezda (Y)

Kod motora u spoju zvijezda releji spojeni na linijske vodiče napajanja motora su u seriji sa pratećim faznim namotajima, te tako direktno prate struju sa kojom je proporcionalno zagrijavanje statora (prikaz spoja na slici 3.6). U praksi se pokazalo da te struje, koje u najgorem slučaju mogu biti do 32% veće od nazivnih vrijednosti, nemaju veliki rizik za pregrijavanje namota.

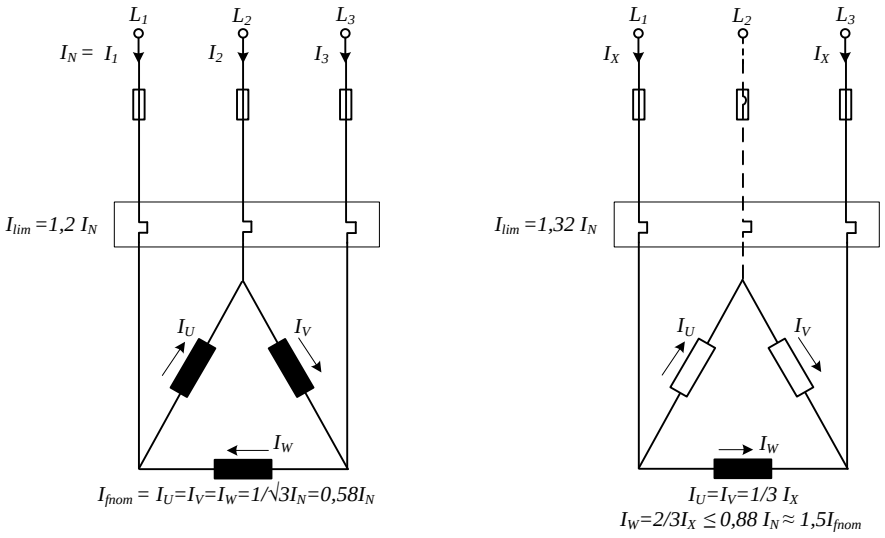
Ukupni gubici u bakru namota statora u tom slučaju (prekid jedne faze) mogu se računati prema izrazu: $2 \cdot R_1 \cdot (1,32 \cdot I_n)^2 = 3,4 \cdot R_1 \cdot I_n^2$, što predstavlja povećanje gubitka od 13% u odnosu na nominalne gubitke. Iako, računski gledano, dolazi do pregrijavanja dvije faze 70% većeg od nazivnog, kroz jednu fazu ne protječe struja i ona iz razloga konstrukcije i prepleta sa drugim namotima može da apsorbira značajne količine topline, te je posljedično maksimalno termičko opterećenje namota ispod dozvoljene maksimalne projektirane vrijednosti.



Slika 3.6. *Fazne struje i struje podešavanja releja u trofaznom radu te pri ispadu faze u spoju zvijezda*

❖ Motor u spoju trokut (Δ)

U cilju smanjenja troškova te pojednostavljenja spojnih veza i kod namota spojenog u trokut zaštitni uređaj se spaja samo u mrežne dovode (linijske vodiče) kao i kod spoja zvijezda [20]. Ako u spoju trokut dođe do prekidu na jednom linijskom vodu, jedan fazni namotaj ostaje na punom naponu dok druga dva namota dobivaju samo ½ U_{nom}. Prema tome, podjela struje u dvije grane ima sljedeći odnos: *(2 : 1)* ili (*2/3*I_N *: 1/3* I_N). Čak i ako se zaštitni relej podesi na struju I_N, moguća je kontinuirana struja u ugroženom faznom namotu od *2/3* I_N, što ne predstavlja problem jer namotaj može da podnese samo *1/√3* I_N = *0,58* I_N.



Slika 3.7. *Fazne struje i struje podešavanja releja u trofaznom radu pri ispadu faze u spoju trokut*

Naime, radna struja od $1{,}32\ I_N$ može da teče pri ispadu faze, tj. do $1{,}32 \times 0{,}67\ I_N = 0{,}88\ I_N$, odnosno može da teče u ugroženom faznom namotu bez reagiranja releja. Fazni namotaj je tako opterećen sa *1,5* puta, dozvoljena nominalna fazna struja je $(0{,}88 / 0{,}58 = 1{,}5)$, slika 3.7. To je velika opasnost, čak i ako postoji dobar toplotni izmjenjivač (jer su druge dvije faze opterećene do *75%* svojih nominalnih vrijednosti : $(1{,}32 \times 0{,}33\ I_N) / 0{,}58 = 0{,}75 I_{f\,nom}$.

Iako je struja u druga dva namota nešto manja, ukupni gubici u bakru namota statora su povećani približno 3,4 puta tj. sada iznose: $2 \cdot R_1 \cdot 0{,}75^2 + R_1 \cdot 1{,}5^2 = 1{,}125 + 2{,}25 = 3{,}375$.

Dakle, kod veze u trokut dvije faze se griju sa $0{,}75^2 I_n$, pa je njihov toplotni kapacitet tj. mogućnost apsorbiranja manja nego kod zvijezde jer je jedna faza potpuno hladna. S druge strane, kritična faza ima čak *125%* veće gubitke u bakru, odnosno grijanje.

Iz ove analize je sasvim jasno da ako se motori kod spoja u trokutu štite sa relejima samo u mrežnim dovodima, ispitivanjima se mora dokazati da je odabrano vrijeme reagiranja zaštitnog uređaja dobro sa aspekta sigurnosti motora.

Poželjno je za bitne motore poduzeti sve mjere predostrožnosti da se spriječi rad trofaznog motora po gubitku jedne faze. Takvu zaštitu omogućuju numerički releji i oni imaju mogućnost reagiranja na otkaz faze. U slučaju bilo kakve nesimetrije motora oni isključuju momentalno. Osjetljivost na nesimetriju ovih releja je podesiva, dok kod preopterećenja ovi releji reagiraju prema karakteristici reakcije.

U raznim literaturama je naznačeno da se treba baviti svojstvima motora sa vezom namota u trokut u slučajevima gubitka jedne faze. Za razliku kod motora u spoju zvijezda , gubitak jedne faza kod motora sa spojem u trokut ne mora uvijek da se otkrije, a naročito ako do toga dođe u toku rada. Posljedica je neuravnoteženost struje u linijama koje napajaju motor i povećano zagrijavanje motora. Motor sa namotajem u trokut sa malim polaznim momentom može i da starta u režimima kada je došlo do ovog otkaza, pa zato taj otkaz može ostati neotkriven duži period. Zbog toga je nužna zaštita od neuravnoteženih faza kod motora sa namotajem u trokut. Takva zaštita bi otkrila neuravnoteženosti mašine prije nego što dođe do velikog pregrijavanja.

3.1.4. Smetnje zbog prenapona u mreži

Djelovanje udara groma, kvarovi, kao i različite sklopne manipulacije unutar elektroenergetske mreže generiraju tranzijente struje čije su posljedice prenaponi unutar elektroenergetskog sustava.

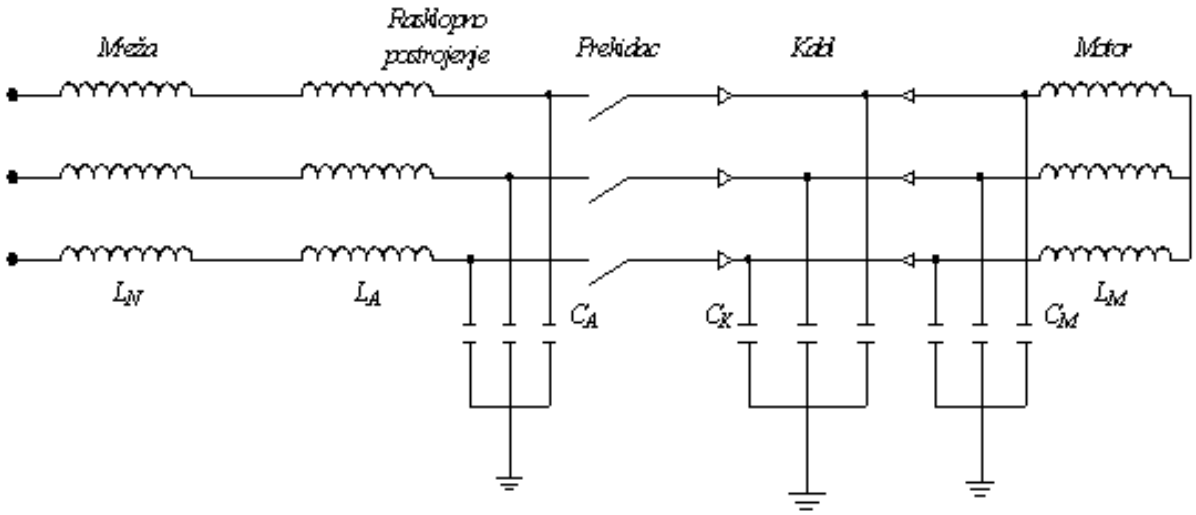
U ovisnosti o vrijednostima amplituda, dužini trajanja i valnom obliku ovi prenaponi mogu imati neznatan utjecaj na normalan rad elemenata elektroenergetskog sustava ili mogu prouzročiti njihovo pogrešno funkcioniranje, kvarove i potpune ispade sa napojne mreže. Prenapon je definiran, prema IEC 71-1 standardu na sljedeći način: "Prenapon je bilo koji napon između faznog provodnika i zemlje ili između faznih provodnika a koji ima vršnu vrijednost koja premašuje odgovarajuću najveću dozvoljenu vršnu vrijednost propisanu za električnu opremu". U okviru ovog standarda, prenaponi se klasificiraju prema njihovom obliku i dužini trajanja [26]. Prema tome prenaponi se dijele u sljedeće grupe:

- Privremeni, prolazni prenapon (*temporary*) je prenapon pogonske frekvencije (*pf*) i relativno dugog vremena trajanja. Može biti neprigušen ili slabo prigušen. U nekim slučajevima njegova frekvencija može biti nekoliko puta manja ili veća od pogonske frekvencije.
- Tranzijentni, prijelazni prenapon *(transient)* je kratkotrajni prenapon od svega nekoliko milisekundi ili manje, oscilatornog ili neoscilatornog karaktera i obično je jako prigušen. Tranzijentni prenaponi su kombinirani (privremeni prenapon, prenapon sporog uspona čela, prenapon brzog uspona čela, prenapon veoma brzog uspona čela) prenapon koji se sastoji od dva ili više komponentnih prenapona istovremeno, a koji opterećuje izolaciju opreme priključenu između faze i zemlje. Realno, svi prenaponi su ustvari kombinirani prenaponi. Modeliranje komponenti elektroenergetskog sustava u širokom spektru frekvencija je praktički nemoguće. Zbog toga, te zbog naročitih svojstava specifičnih elemenata elektroenergetske mreže koji igraju značajne uloge u analiziranom prelaznom procesu, potrebno je u zasebnim frekventnim područjima načiniti odgovarajuće modele elemenata.

U biti može se reći da se od atmosferskih prenapona postrojenje štiti kao cjelina odvodnicima prenapona te se stoga ova problematika neće dalje razmatrati.

Komutacioni prenaponi su mogući u normalnom radu pri naglim promjenama režima rada u napojnoj mreži, na primjer isključenje i uključenje prekidača. Ekvivalentna shema koja se može koristiti za procjenu komutacionih prenapona data je na slici 3.8.

Prilikom isključenja prekidača u krugu motora ukupne induktivnosti $L_a=L_M$ i kapacitivnosti $C_a=C_k+C_M$ dolazi do oscilatornog prelaznog stanja. Vrijednost prenapona zavisi od preostale magnetne energije, odnosno veličine prekinute struje I_p.



Slika 3.8. *Ekvivalentna shema za procjenu prenapona*

Koeficijent doprinosa prenapona se može definirati kao:

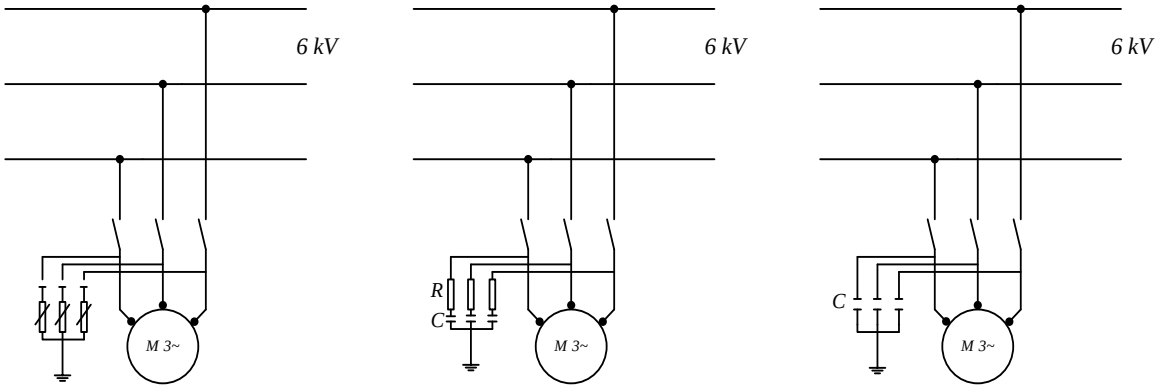
$$K = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\hat{U}_{\max}}{U_n} \tag{3-10}$$

u izrazu je: $\hat{U}_{\max} = I_p \cdot \sqrt{\frac{L_a}{C_a}}$ - iznos prenapona.

Ovaj koeficijent je najveći kod kontaktora sa magnetnim gašenjem luka ($K \approx 2,5$) a znatno veći je kod malouljnih prekidača, jer prekidači mogu da prekinu struju i prije njenog prolaska kroz nulu ($K \approx 4$). Naročito veliki prenaponi dobivaju se u s1učaju prelaznog procesa pri višestrukom paljenju luka. Taj slučaj je, kada je svojstvene frekvencija $fa = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{L_a \cdot C_a}$ suviše velika tj. strmina napona slobodnih oscilacija prelazi brzinu uspostavljanja zapornih svojstava prekidača.

Zaštita od komutacionih prenapona se izvodi:

- Vezivanjem odvodnika prenapona sa ZnO varistorom, proradnog napona 15-16 kV za mrežu od 6 kV (slika 3.9.a.),
- RC kombinacijom za prigušenje (0,25 μF; 50-100 Ω) (slika 3.9.b.), ili
- vezivanjem kondenzatora radi smanjenja frekvencije slobodnih oscilacija u cilju sprječavanja ponovnog paljenja luka (slika 3.9.c.).



a) *b)* *c)*

Slika 3.9. *Metode zaštite od komutacionih prenapona*

3.1.5. Utjecaj promjene frekvencije mreže na rad pogonskih motora

U pogonu se često opažaju oscilacije frekvencije mreže. Ova kolebanja su obično mala, ali pri raznim kvarovima mogu dostići i veće vrijednosti. Ukoliko ova odstupanja od nominalne frekvencije nisu veća od ±1% njihov utjecaj na rad asinkronih motora je relativno mali.

Općenito se može reći da snižavanje frekvencije utiče na asinkroni motor slično kao povišenje napona, dok povećanje frekvencije ima isti utjecaj kao i sniženje napona. Snaga motora mijenja se približno proporcionalno sa frekvencijom, međutim, kod manjih frekvencija nešto brže opada zbog slabijeg hlađenja.

Motori predviđeni za frekvencije više od 50 Hz, na primjer 60 Hz, ne mogu se upotrebiti u mreži čija je frekvencija 50 Hz, dok se motori predviđeni za rad u mreži sa frekvencijom nižom od 50 Hz, na primjer 42 Hz, mogu upotrebiti u mreži čija je frekvencija 50 Hz.

3.1.6. Utjecaj viših harmonika na rad pogonskih motora

Krajem pedesetih i tokom šezdesetih godina došlo je do naglog razvoja snažnih poluprovodničkih komponenata kao npr. tiristora i snažnih bipolarnih tranzistora. Javljaju se poluprovodnički energetski elektronički pretvarači, koji u potpunosti potiskuju one sa vakumskim elementima. Većinu energetskih elektronskih pretvarača čine oni koji se vezuju na izmjeničnu mrežu (ispravljači, mrežom komutirani invertori, regulatori izmjeničnog napona, ciklokonvertori). Zbog svoje prekidačke prirode rada oni predstavljaju nelinearne potrošače za mrežu i izazivaju pojavu izobličenja valnog oblika struje i napona.

Ovi izobličeni oblici mogu se predstaviti nizom sinusnih funkcija različitih frekvencija, korištenjem Fourierovih redova. Te frekvencije su cjelobrojni umnožak osnovne frekvencije analiziranog signala i nazivaju se viši harmonici.

Danas se poluprovodnički energetski pretvarači izrađuju za snage od nekoliko desetina vata pa do reda megavata. Pored elektrolučnih i indukcionih peći, zasićenih električnih mašina i drugih klasičnih izvora, oni čine značajan izvor viših harmonika u mreži. Komponente energetskog sustava, kao i potrošači koji se priključuju na njega, podrazumijevaju sinusne oblike napona i struje, pa svaka pojava viših harmonika donosi negativne efekte. Najvažniji negativni efekti viših harmonika iz mreže na asinkrone motore koji su sastavni dio EMP su dodatni gubici u motoru, a također se ne smije zanemariti i njihov utjecaj na zaštitne uređaje koji između ostalog štite i elektromotore.

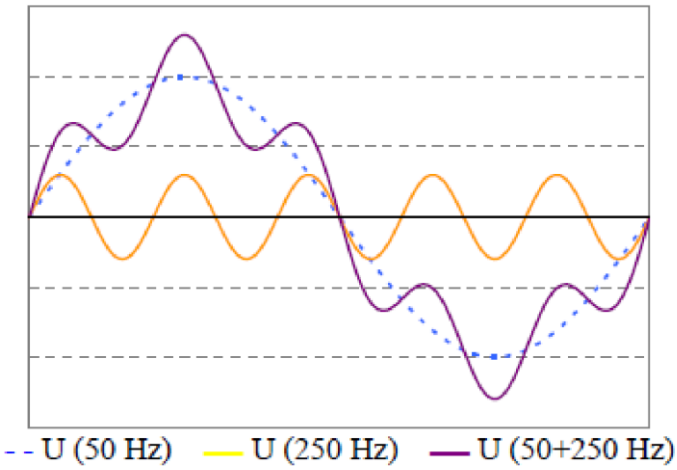
Ukupna i individualna harmonijska distorzija napona ili struje su činioci kojima se vrjednuju viši harmonici. Individualna harmonijska distorzija (HDn) se definira kao odnos efektivnih vrjednosti n-tog harmonika i osnovnog (50 Hz ili 60 Hz), gdje je *n* red harmonika. Ona se izražava u procentima:

$$HDU_n = \frac{U_n}{U}100\% \qquad HDI_n = \frac{I_n}{I}100\% \tag{3-11}$$

Ukupna harmonijska distorzija (THD) se definira kao kvadratni korijen odnosa sume kvadrata efektivnih vrijednosti pojedinačnih harmonijskih komponenti i efektivne vrijednosti osnovnog harmonika i također se izražava u procentima:

$$THDI = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \cdot 100\% \qquad THDU = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1^2}} \cdot 100\% \tag{3-12}$$

Uobičajeno je da se za kvalitetan rad uređaja podrazumijeva da je nivo ukupne harmonijske distorzije napona napajanja manji od 5 - 8 %, a nivo ukupne harmonijske distorzije struje manji od 5 -20 % u zavisnosti od snage kratkog spoja mreže i snage samog potrošača.



Slika 3.10. *Primjer harmonika izobličenog naponskog vala*

Analiza viših harmonika se bazira na postulatu francuskog matematičara J.B.J. Fourier-a (1768-1830g.) da se bilo koja kontinuirana funkcija sa periodom ponavljanja T može predstaviti sumom osnovne sinusoidalne komponente i niza harmonijskih sinusoidalnih komponenti višeg reda sa frekvencijama, koje su cjelobrojni umnožak osnovne frekvencije. Harmonijska analiza je proces izračunavanja veličine i faze osnovnog i harmonika višeg reda.

U elektroenergetskom sustavu harmonici se javljaju u postupku proizvodnje električne energije, kao posljedica rada sinkronih generatora, zatim u prijenosu, kao posljedica komutacija u mreži, kvarova, atmosferskih neprilika i sl., i na kraju u domenu potrošnje, kao posljedica rada nelinearnih potrošača. Najčešći nelinearni potrošači su energetski elektronski pretvarači. To su pretvarači energetske elektronike, koji se karakteriziraju prekidačkim načinom rada snažnih elektronskih komponenti. Pored energetskih elektronskih pretvarača u mreži postoje još nekoliko značajnih "zagađivača" a to su energetski transformatori, rotirajuće električne mašine, elektrolučne peći i fluorescentne sijalice.

Danas, skoro da ne postoji industrijsko poduzeće ili industrijski pogon u kome se ne koristi jedan od ili više spomenutih harmonijskih izvora. Promatrano sa strane mreže, takvo poduzeće ili pogon predstavlja izvor harmonika, koji "zagađuje" mrežu. Poseban problem tj. problem samog industrijskog poduzeća je da je i mreža unutar poduzeća "zagađena" - često mnogo jače nego prema spolja. Primjeri takvih industrijskih poduzeća su brojni, a najznačajniji su elektrolize, livnice, valjaonice, fabrike tekstilne industrije, fabrike papira, željezare itd.

Obzirom na vrlo čestu uporabu frekventnog upravljanja i uređaja (VFD - variable frequncy drives) koji se u tom smislu koriste za napajanje električnih motora, bitno je napomenuti sljedeće.

Sa aspekta izvedbe VFD uređaji su elektronički sklopovi koje karakterizira mnoštvo nelinearnih komponenti i samim time naponi i struje koje VFD uređaj šalje u motor su "bogate" višim harmonicima.

Kod elektromotora se javljaju dva efekta uslijed prisustva viših harmonika:

- povećani gubici
- parazitni momenti.

Gubici uslijed prisustva viših harmonika se javljaju i u rotorskom i u statorskom kolu, kao i u feromagneticima. U rotorskim i statorskim provodnicima ti gubici mogu biti veći od gubitaka uslijed otpornosti, zbog vrtložnih struja i skin efekta.

Pomoću narinutog napona na motor stvara se magnetsko polje, a kao posljedica toga javljaju se i gubici u željezu. Histerezne i vrtložne struje su dio tih gubitaka u željezu i ovisne su o frekvenciji. Histerezni gubici su proporcionalni frekvenciji a vrtložne struje se mijenjaju sa kvadratom frekvencije. Zbog toga, više harmonijske komponente napona proizvode dodatne gubitke što se manifestira kroz povećanu temperaturu motora a time i namota u motoru. Nesinusni naponi narinuti na motor uzrokuju proticanje nesinusnih struja kroz namotaje motora. Gubici u namotajima su proporcionalni kvadratu struje koja protiče kroz namot, a za struju važe sljedeće:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \ldots} \tag{3-13}$$

u izrazi je : I – efektivna vrijednost struje koja protiče kroz namot

I_v - efektivna vrijednost ν-tog harmonika struje

Uslijed skin efekta stvarni gubici su i veći od proračunatih. I svi ostali gubici u motoru (gubici uslijed lutajućih struja, gubici uslijed vrtložnih struja u namotu itd.) su povećani uslijed viših harmonika struja i napona. Postoji i jedan zanimljiv fenomen tzv. torzione oscilacije osovine motora, koji nije u potpunosti razjašnjen i ovaj fenomen osoblje zaposleno u postrojenjima sa pogonskim motorima često zanemaruje. Moment motora je proizveden uslijed interakcije magnetskog polja u zračnom rasporu i induciranih struja u rotoru. Kada se motor napaja nesinusnim naponima i strujama, tada magnetsko polje u zračnom rasporu i rotorske struje sadrže više harmonijske komponente. Harmonici su grupirani u pozitivne (+), negativne (-) i nulte (0) komponente. Pozitivna sekvenca harmonika (1,4,7,10,13-ti, itd.) proizvodi magnetska polja i struje koje rotiraju u istom smjeru kao i osnovni harmonik. Negativna sekvenca harmonika (2,5,8,11,14-ti itd.) proizvodi magnetska polja i struje koje rotiraju u suprotnom smjeru u odnosu na pozitivnu sekvencu harmonika. Nulta sekvenca harmonika (3,9,15,21-vi, itd.) ne razvija

koristan moment, nego samo proizvode dodatne gubitke u mašini. Interakcija između pozitivne i negativne sekvence magnetskih polja i struja proizvodi torzione oscilacije u osovini motora. Ako se frekvencija oscilacija podudari sa prirodnom mehaničkom frekvencijom osovine, vibracije se višestruko pojačavaju i mogu ozbiljno oštetiti osovinu motora.

Veoma je važno da se za velike elektromotorne pogone napajane preko VFD uređaja izvrši analiza harmonika kako bi se odredio nivo harmonika i kako bi se procijenio njihov utjecaj na motor.

3.1.7. Prolazni kvarovi iz mreže – brza automatska prekapčanja VN elektromotora

EMP sa asinkronim motorima često uvjetuju relativno veliki broj uključenja, isključenja ili prekapčanja. Karakteristični primjeri za to su:

- brza automatska prekapčanja VN elektromotora sa jedne sabirnice na drugu, koja su neophodna u cilju osiguranja kontinuiteta pogona u slučaju nestanka napona,
- prekapčanja polova kod velikih višebrzinskih motora itd.

U navedenim prijelaznim procesima motori su izloženi različitim mehaničkim i električnim naprezanjima. Velike elektromagnetske sile, koje su posljedice prevelikih tranzijentnih struja, kod namota mogu prouzročiti trajne deformacije, koje se na kraju ispoljavaju u vidu oštećenja motora. Često, kao prateća pojava, kod isključenja i uključenja motora uz pomoć kablovskih dovoda, u razvodnom postrojenju i na priključcima motora pojavljuju se razni komutacijski prenaponi, takve vrijednosti, koji u ekstremnim slučajevima mogu prouzročiti oštećenje. Praksa je pokazala da u pogledu mogućnosti pojave deformacije u prijelaznim procesima najviše su osjetljivi VN motori, i veliki brzohodni motori sa lošijom impregnacijom. Zbog toga ovi motori od strane proizvođača moraju biti tako dimenzionirani da kritični dijelovi motora kao što su namotaji statora i kavez rotora izdrže naprezanja, koja su od strane projektanata očekivane u najnepovoljnijim slučajevima.

Pri sagledavanju nastajanja naprezanja kod velikih električnih mašina, naročito su interesantni prijelazni procesi, koji se dešavaju u mašini u slučajevima brzog prebacivanja mašine sa jedne sabirnice na drugu sabirnicu, odnosno u slučajevima brzog automatskog ponovnog uključenja (APU). Lakše se razmatra situacija u pogledu mogućnosti brzog ponovnog uključenja ako se trenutne vrijednosti razlike priključnog i rezidualnog napona prikazuju u funkciji vremena [20].

Razmatranje najpogodnijeg trenutka za izbor ponovnog uključenja je naravno bezpredmetno, kada motor može da izdrži naprezanja i u najkritičnijim situacijama. To je slučaj kod brzohodnih odnosno sporohodnih niskonaponskih motora snage do 200kW. Kod velikih i VN električnih motora situacija je drugačija. Ovdje se kao kriterij uzima u obzir ona struja, koju još motor može da izdrži kod ponovnog uključenja bez nastupanja trajne deformacije u namotajima. Praksa je pokazala da novi veliki motori, koji su proizvedeni u klasičnoj gradnji, u najnepovoljnijim slučajevima ponovnog uključenja mogu izdržati oko 140 % udarne struje što predstavlja skoro dvostruko naprezanje u odnosu na udarno naprezanje u kratkom spoju.

Pošto izdržljivost motora prema naprezanjima sa vremenom blago opada, proizvođači kod osjetljivih elektromotora klasične gradnje ponovna uključenja najčešće su uvjetovali zahtjevom da kod istih, udarne struje (I_u) nipošto ne prekorače dopuštenu vrijednost od 120-140 % udarne struje u kratkom spoju (I_{ku})

Matematska analiza prijelaznih pojava kod elektromotora uvjetovana je rješavanjem sustava diferencijalnih jednadžbi. Ukoliko kod motora u toku prijelaznih procesa brzina obrtaja ostaje konstantna, ili se može smatrati približno konstantnom, onda se proces svodi na rješavanje sustava linearnih diferencijalnih jednadžbi, koje se u zatvorenom obliku relativno jednostavno rješavaju.

Nasuprot tome, ukoliko se u toku prijelaznih procesa promjenu brzine obrtaja ne može zanemariti, susreće se sa problemom rješavanja nelinearnih diferencijalnih jednadžbi. Takav je slučaj npr. analiza upuštanja asinkronih motora sa velikim ubrzanjima. U tom slučaju problem se rješava uz primjenu programibilnih elektronskih računara uporabom neke od približnih numeričkih metoda, npr. RungeKutta metoda.

Kod analize procesa upuštanja, isključenja i ponovnog uključenja VN asinkronih elektromotora koriste se poznati vektorski oblici diferencijalnih jednadžbi, napisanih u koordinatnom sustavu, koji rotira sinkronom kutnom brzinom ω_s prema slijedećim:

Naponskim jednadžbama:

$$\overline{U_s} = R_s \overline{i_s} + j\omega_s \overline{\psi_s} + \frac{d\overline{\psi_s}}{dt} \tag{3-14}$$

$$\overline{U_r} = R_r \overline{i_r} + j(\omega_s - \omega)\overline{\psi_r} + \frac{d\overline{\psi_r}}{dt} \tag{3-15}$$

Jednadžbi kretanja:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} + M_m = \frac{3}{2} \cdot \mathrm{I_m}(\overline{\psi_s} \cdot \overline{i_s}) \tag{3-16}$$

u jednadžbama su : $\overline{U_s}$, $\overline{i_s}$ i $\overline{\psi_s}$ - vektori statorskog napona, struje i toka,

$\overline{U_r}$, $\overline{i_r}$ i $\overline{\psi_r}$ - vektori rotorskog napona, struje i toka,

ω - kutna brzina rotora,

J - zbir momenata inercije svih masa uključujući i masu rotora, koju treba ubrzanjem ubrzati,

M_m - mehanički otporni moment pogonjene radne mašine

Dakako da u toku eksploatacije, a naročito tokom prijelaznih procesa dolazi do znatnih naprezanja namota motora. Praksa je naime pokazala da su se i pored uvođenja nove tehnologije izrade, namotaji pokazali kao najkritičniji dijelovi i kao takvi najviše uvjetuju životni vijek motora.

Naprezanja, koja ugrožavaju statorske i rotorske namotaje motora u prijelaznim procesima, moguće je svrstati u dvije kategorije :

- Mehanička naprezanja koja se ispoljavaju u vidu djelovanja različitih elektromagnetnih sila
- Električna naprezanja, koja ugrožavaju sustav izolacije namota u vidu pojave različitih prenapona.

Mehanička naprezanja se javljaju kao prateća nuspojava kod prijelaznih procesa u vidu djelovanja različitih mehaničkih sila na pojedine dijelove namota. Ove sile su većinom elektromagnetne prirode, koje su prouzrokovane djelovanjem velikih rasipnih tokova na provodnik sa strujom. Naprezanja se naravno mogu pojaviti i uslijed različitog toplotnog širenja pojedinih dijelova namota, ali su ove sile obzirom na toplotne inercije u pogledu ugrožavanja namota manje značajne.

Na dijelove namota, koji se nalaze u žljebovima u toku eksploatacije djeluju dvije elektromagnetne sile i to u tangencionalnom i u radijalnom pravcu. Tangencionalne sile pritiskaju kaleme namota na bočnu površinu žljebova i za njih možemo reći da su u pogledu ugroženosti namota praktično bezopasne. Drugačiji je slučaj sa radijalnim silama koje potječu od utorskih rasipnih tokova statora i rotora. Ove sile su značajnijeg iznosa. Može se primijetiti da su rezultantne radijalne sile manje u onim statorskim žlijebovima u kojima su smješteni provodnici,

koji pripadaju različitim fazama. Inače u oba slučaja se radi o naizmjeničnim silama, koje variraju dvostrukom mrežnom frekvencijom. Što se rotorskih žljebova tiče, provodnici u njima su također izloženi radijalnim silama. Razlika u odnosu na statorske žlijebove je u tome što ovdje sile tokom zaleta i opterećenja variraju sa varijabilnom frekvencijom, koja odgovara dvostrukoj frekvenciji rotora $(\omega_r = 2\pi f_2)$.

Kod velikih kaveznih motora, ove radijalne siIe, koje napadaju provodnike rotora u prijelaznim procesima zaleta i ponovnog uključenja mogu poprimati prilično velike vrijednosti (reda veličina 5 -10 kN). One naizmjenično pritiskaju provodnike sa dna žlijebova, te su provodnici u žlijebovima izloženi jednosmjerno promjenljivim i naizmjenično promjenljivim opterećenjima, koja u ekstremnim slučajevima mogu dovesti i do loma provodnika. Zbog svega navedenog, kalemovi u žljebovima trebaju biti smješteni tako da uslijed navedene sile ne mogu nastupati oscilacije. Kod velikih elektromotora sa naročitom pažnjom treba konstruirati rotorske kaveze. Kod kaveznih namota naime, štapovi sa dna žlijebova mogu biti podignuti uslijed toplotnog širenja kratkospojenih prstenova. To omogućuje uslijed djelovanja radijalne sile nastajanje oscilacija koje na kraju mogu dovesti do loma, odnosno prekida štapova.

Naprezanja, kojima su izloženi pojedini dijelovi glave namota, također su posljedica djelovanja rasipnih tokova na provodnike sa strujom. Glave namota kod velikih elektromotora su zadnjih godina bile predmetom proučavanja mnogih autora. Razlog tome je činjenica da je u pitanju najosjetljiviji dio namota i kao takav najčešće je uzrok kvarova. Teorijska izučavanja su pomogla konstruktorima da kod izvedbi glave iznalaze takva rješenja koja su najmanje sklona deformacijama uslijed djelovanja naizmjeničnih promjenjivih naprezanja koja su najintenzivnija u prijelaznim procesima.

Na pojedine dijelove glave namota u toku eksploatacije djeluje veliki broj sila. Ove sile se obzirom na mjesta njihovih nastajanja i djelovanja svrstavaju u grupe unutarnjih i vanjskih sila.

U grupu unutarnjih sila spadaju one sile, koje nastaju kao posljedica privlačnog ili odbojnog djelovanja provodnika sa strujom unutar glave namota. Ove sile u glavama namota javljaju se kao naizmjenične sile, koje u ovisnosti od toga da li se radi o statorskoj ili rotorskoj strani variraju sa dvostrukom statorskom frekvencijom. Uslijed njihovog djelovanja dijelovi glava kalemova su izloženi naizmjenično promjenjivim naprezanjima, koja u slučaju lošeg ukrućenja može dovesti do loma.

U grupu vanjskih sila spadaju one sile, koja su posljedica privlačnog ili odbojnog djelovanja strujnih provodnika unutar glave namota sa strujnim provodnicima, koji se nalaze izvan

promatrane glave namota. Njihovo kvantitativno određivanje provodnik po provodnik uslijed složene matematske operacije također je povezano sa poteškoćama. Ova problematika se uz zadovoljavajuću točnost može znatno pojednostaviti uvođenjem ekvivalent-provodnika kao zamjene za grupu pojedinačnih provodnika u glavama namota.

Prema [8] pri jednom prosječnom trajanju zaleta od 10 sekundi, glava namota je napadnuta sa oko 1000 amplituda sile. Naprezanja se integriraju i nakon nekoliko godina kod glave namota može da dođe do prekoračenja trajno dozvoljenog naizmjeničnog naprezanja.

Promatranja u pogonu dala su rezultat da već poslije 1000-1500 uključenja može da nastupi prekid provodnika i da dovede do značajnog opadanja dielektrične čvrstoće izolacije na izlasku kalemova iz žljebova. Zbog svega navedenog proizvođači motora izvedbama glave namota daju sve veći značaj. Na osnovu teoretskih razmatranja i promatranja različitih izvedbi glave namota u pogonu, danas većina proizvođača već raspolaže sa takvim rješenjima koja su u stanju da trajno izdrža naprezanja čak i u najkritičnijim pogonskim uvjetima.

3.2. Utjecaj teških EMP sa asinkronim motorom na napojnu mrežu

Ranije je već rečeno, da kada se govori o utjecaju električne mreže i EMP nemože se razmatrati razdvojeno posebno utjecaj napojne mreže na rad teških EMP, a zatim utjecaj teških EMP na napojnu mrežu iz jednostavnog razloga što su ti utjecaji jednostavno isprepleteni. Međutim radi pojednostavljenja i lakšeg objašnjenja problematike posebno su objašnjeni ti utjecaji. U ranijim poglavljima već je poprilično rečeno o utjecajima teških EMP sa asinkronim motorom na napojnu mrežu. U ovom poglavlju dati će se akcenat na utjecaj teških EMP na propade napona u napojnoj mreži.

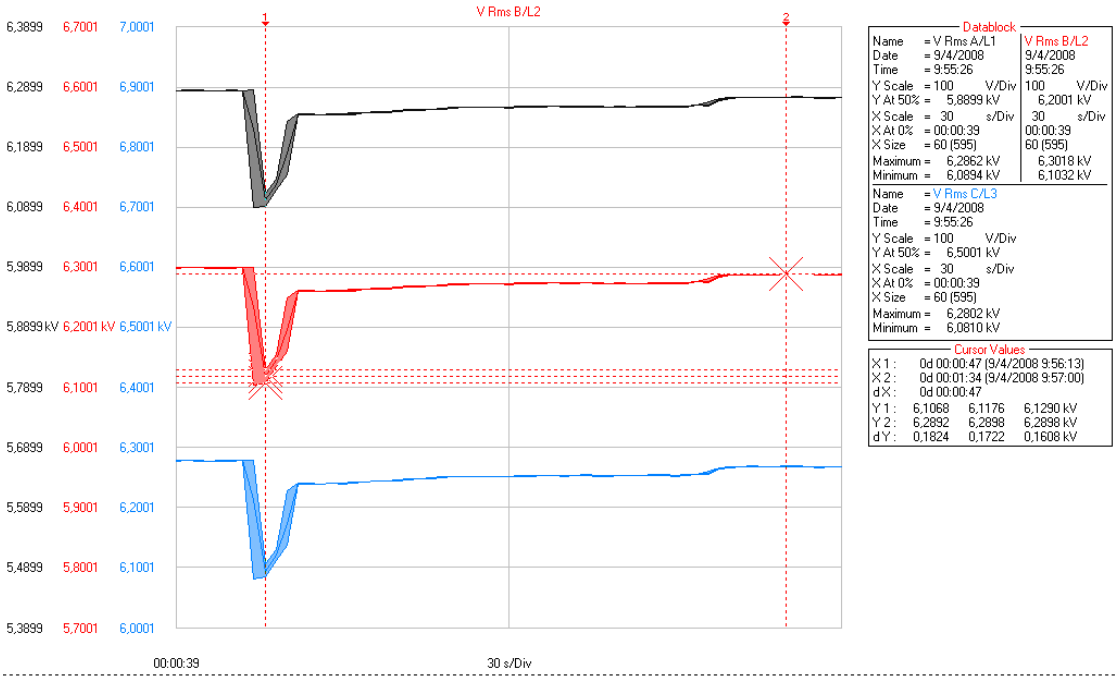
3.2.1. Utjecaj teških EMP na propade napona

Zalet velikih motora predstavlja značajan uzrok i može da izazove pojavu propada napona. Ovakvi propadi javljaju se u industrijskim mrežama ili na sabirnicama trafostanica velikih industrijskih potrošača. Oni su obično dužeg trajanja (duže od 60 perioda) i karakterističnog su oblika. Najčešće sniženje amplitude, koje se pri tome dešava nije toliko veliko, ali u pojedinim situacijama može da bude itekako ozbiljno. Na slici 3.16. prikazan je tok promjene napona na 6kV sabirnici pri zaletu pogonskog asinkronog motora (800 kW), mlina uglja u TE Tuzla.

Posljedice pojave propada napona naročito su nepovoljne za složene industrijske tehnološke procese, koji imaju veliki broj reguliranih EMP.

Otkaz može da se javi na dva mjesta:

- u upravljačko - regulacionim kolima, koja su izvedena na bazi elektronike ili mikroprocesora,
- u kolima relejne zaštite.



Slika 3.16 *Propad napona kod zaleta asinkronog motora snage 800 kW mlina 2. bloka 6 u TE Tuzla*

U tim slučajevima dolazi do reagiranja elektronske zaštite u regulacionim kolima pogona, koja rezultira isključenjem pogona, odnosno prekidom procesa. Također, može da dođe do otpuštanja elektromagneta u relejima, kontaktorima i drugim sličnim uređajima relejne zaštite i njihovog ispada. Pri tome nastaju velike štete, koje se ogledaju ne samo u zastoju u proizvodnji, nego i u potrebi da se proizvodna linija oslobodi od nastalog škarta i očisti od mogućih zagušenja. Velika složenost suvremenih EMP uvjetuje i njihovu izuzetnu osjetljivost na propade napona. Sposobnost industrijskog procesa da neometano radi pri pojavi propada zavisi od svake komponente pogona. Pri analizi osjetljivosti pogona uglavnom se vodi računa o prestanku rada uslijed pojave smetnji u mreži, ali je potrebno proučiti i mogućnost smanjenja ili eliminiranja varijacija u brzini, jer je to veoma bitno u određenim industrijskim granama.

Suvremeni EMP najčešće se sastoje iz:

- motora i radne mašine,
- pretvarača energetske elektronike,

- upravljačke elektronike,
- zaštitnih releja,
- kontaktora.

Zaštita čitavog pogona od efekata propada napona podrazumijeva zaštitu svake komponente pogona ponasob ili zaštitu čitavog pogona. Pojava propada napona u elektroenergetskom sustavu je neminovnost, koja se ne može izbjeći. Zato je potrebno u najvećoj mogućoj mjeri istražiti njihov utjecaj na razne vrste električnih uređaja. Također je potrebno istražiti mogućnost predviđanja pojave naponskih propada na osnovu podataka dobivenih dugogodišnjim praćenjem njihovog pojavljivanja u određenim dijelovima elektroenergetskog sustava. Ovi naponski propadi znatno utječu na pravilan rad elektromotornih pogona i mogu da nanesu velike štete industrijskoj proizvodnji time što izazivaju prestanak rada određenog pogona, a ponovno pokretanje proizvodnje je povezano sa velikim materijalnim izdacima.

3.2.2. Nastanak prenapona pri uključenju i isključenju teških EMP za ASKM 6kV

U svrhu procjene dielektričkih, termičkih i dinamičkih naprezanja opreme veoma često se rade analize prijelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju VN motora u mrežama 6 kV.

Ovo je naročito bitno iz razloga provjere izabrane izolacione opreme. Tokom uključenja i isključenja teških EMP sa asinkronim kaveznim motorom 6 kV uglavnom dolazi do:

- Nastanka pojave faznih prenapona a da pri tome nije bilo prethodnih paljenja dielektričnog luka u prekidaču.
- Kod isključenja VN motora po završetku procesa zaleta dolazi također do nastanka prenapona. Ovo je vjerojatno posljedica sječenja struje prije njenog prirodnog prolaska kroz nulu.
- Kod isključenja VN motora u toku procesa zaleta dolazi do visokih prenapona.
- Zadržavanja visokih vrijednosti struja dok traje zalet motora i onda vrlo brzo padaju na stalnu vrijednost. Kod nekih motora su i do petnaest puta veće od vršne vrijednosti struje u stalnom režimu rada.
- Ispada motora kod uključenja motora zbog djelovanja prekostrujne zaštite.

Na koncu može se konstatirati da se u pojedinim konfiguracijama mreže i pri pojedinim operacijama sklopnih aparata mogu pojaviti visoki prenaponi i velike struje i da mogu izazvati značajna naprezanja opreme.

3.3. Opasna pogonska stanja kod VN asinkronih kaveznih motora

Izolacija elektromotora izložena je u pogonu najraznovrsnijim mehaničkim, termičkim, hemijskim i električnim naprezanjima. Proboji izolacije imaju za posljedicu:

- višepolne kratke spojeve u statorskom namotu
- zemljospojeve statorskog namota
- zemljospojeve uzbudnog namota kod asinkronih motora

Osim kvarova motori su podvrgnuti i pogonskim stanjima koja mogu dovesti do proboja ili pregaranja namota, ako se ne bi na vrijeme eliminirala.

Opasna pogonska stanja su:

- Preopterećenje motora
- Nestanak i ponovni povratak napona
- Inverzni redoslijed faza
- Rad trofaznih motora na dvije faze
- Predug zalet
- Nedozvoljen broj uzastopnih zaleta
- Blokirani (ukočeni) rotor

Preopterećenje motora zbog preopterećenja gonjenog pogona, vrlo teških uvjeta ili neuspješnog upuštanja motora, preniskog napona mreže na koju je motor priključen, prekida jedne faze motora ili mreže, zbog dodatnog kočenja rotora kod kvara na gonjenom pogonu ili ležaju motora. U preopterećenje se može svrstati i prevelika učestalost uključivanja motora namijenjenih za kratkotrajni ili intermitirani pogon. Kao posljedica svih ovih preopterećenja javlja se nedozvoljeno zagrijavanje namota motora.

Nestanak i ponovni povratak napona mogao bi imati teške posljedice za pogonski motor i pogonsko osoblje, ukoliko bi se motori kod nestanka napona zaustavili, a kod ponovne pojave napona sami ponovno krenuli. Kod motora sa teškim uvjetima za upuštanje moglo bi doći do neuspješnog upuštanja i nedozvoljeno visokih udaraca u mreži.

Inverzni redoslijed faza asinkronih motora može se pojaviti kod rekonstrukcije postrojenja, priključka novih postrojenja ili radova u mreži. Posljedica je promjena smjera obrtanja motora, što u nekim pogonima može izazvati velike materijalne štete.

Rad trofaznih motora na dvije faze u slučaju pregaranja osigurača u jednoj fazi ili lošeg kontakta na sklopci ili prekidaču. Posebna zaštita se rjeđe primjenjuje, jer ovakav rad ima za posljedicu preopterećenje motora.

Predugi zalet: Zbog povišene potrošnje struje za vrijeme zaleta, povećavaju se gubici u bakru i to kvadratno prema struji. Temperatura u namotu praktično raste za vrijeme relativno kratkog trajanja zaleta (ovaj rast je linearan), jer se presporo odvija prelaz toplote u limeni paket preko izolacije. Ako zalet traje predugo uslijed premale snage mreže ili zbog prevelikog momenta tereta tada dolazi do termičkog preopterećenja namota. Proizvođač najčešće naznači dozvoljeno trajanje zaleta u odnosu na poznato opterećenje. Proizvođač se u svakom slučaju mora osloniti na najnepovoljniji slučaj, dakle na maksimalnu temperaturu okoline i motor koji je zagrijan tokom rada. Da bi se motor zaštitio od termičkog naprezanja pri predugom zaletu treba da zagrijavanje za vrijeme starta bez odavanja toplote, uđe u termičku sliku, tako da je motor ovim potpuno zaštićen.

Nedozvoljen broj uzastopnih zaleta: Zbog češćeg pokretanja sa malim vremenskim pauzama, prisutna je opasnost od akumulacije proizvedene toplote, a time i zagrijavanja, a pored toga javljaju se i velika mehanička naprezanja motora. Broj dozvoljenih startanja iz hladnog, odnosno toplog stanja, propisuje i ograničava proizvođač motora a u skladu sa vrstom teškog EMP. Pošto hlađenje rotora koji ne radi protiče sporije , jer nema ventilacije nego zagrijevanje u rotirajućem stanju, termička slika koja se temelji na nepromjenljivoj vremenskoj konstanti nemože pravilno obuhvatiti akumulaciju toplote kod ponovljenih zaleta. Konvencionalni termički relej koji radi sa istom vremenskom konstantom, kako za hlađenje tako i za zagrijavanje, mogu samo netočno da reproducira termičke procese u motoru, koji je imao više zaleta u kratkim vremenskim razmacima, pa se danas u svrhu zaštite uglavnom koriste numerički releji.

Blokirani (ukočeni) rotor: Ako motor prilikom uključenja ne savlada zakretni moment pri pokretanju sa mjesta, on tada ostaje u stanju mirovanja, teče struja kratkog spoja, a da nije prisutno hlađenje, pa temperatura statora i rotora brzo raste i uskoro dostiže opasne vrijednosti. Proizvođač mora dati dozvoljeno vrijeme kod ukočenog rotora. Zaštita u ovom slučaju se sastoji iz prekostrujnog releja sa odrađenim vremenskim zatezanjem.

4. ZAŠTITA TEŠKIH ELEKTROMOTORNIH POGONA SA VISOKONAPONSKIM ASINKRONIM KAVEZNIM MOTORIMA

Zaštita industrijskih postrojenja može se definirati kao zaštita od predvidivih uzroka uništenja ili oštećenja elemenata postrojenja, tj. transformatora, elektromotora i sl.

4.1. Razvoj zaštita EMP

Asinkroni motori, ranijih izvedbi su obično bili predimenzionirani, pa relativno velika preopterećenja ili čak zakočenja rotora nisu mogli izazvati preveliko grijanje. Upravo zato sva zaštita svodila se na prekostrujnu zaštitu, kao zaštitu od kratkih spojeva na statorskom namotu [23,32, 33,34].

Termičke zaštite su se počele primjenjivati odmah poslije prvih pokušaja smanjenja dimenzija stroja, tj. štednje na bakru, željezu i izolaciji. Tu ulogu su u početku preuzele bimetalne trake, koje su grijane direktno ili pomoću strujnih mjernih transformatora smanjenom strujom stroja. Zbog velikih razlika u termičkim karakteristikama bimetalnih traka i asinkronih motora oni su bili slabo iskorišteni, a nepažljivim odabiranjem bimetalnih traka i nedovoljnim poznavanjem termičkih svojstava pojedinih asinkronih strojeva mogle su uzrokovati velike štete.

Međutim, razvojem tehnologije, vremenom je postizana sve veća snaga po jedinici volumena, što je dovodilo do:

- smanjenja termičke konstante, tj. da se u nenormalnim uvjetima motor brže zagrijava.
- smanjenja vijeka trajanja kada se prekorače granice tolerancije.

Tokom rada motora, uslijed djelovanja pogonskih i povišenih napona, postoji uvijek manje ili veće naprezanje izolacije. Da bi se ostvario dovoljan stupanj sigurnosti, kako pogona tako i okoline, izolacija VN motora mora biti ispravno dimenzionirana i na odgovarajući način zaštićena.

Usprkos ispravnog projektiranja i dimenzioniranja izolacije i ostalih dijelova električnih postrojenja, kao i pažljive montaže i održavanja, u pogonu se mora računati sa mogućnošću pojave kvara na gotovo svakom dijelu električnog postrojenja, a samim tim i na samom električnom motoru. Iz ekonomskih razloga, nemože se dimenzionirati izolacija stroja tako da izdrži sva moguća električna naprezanja koja mogu da se pojave u toku rada. Zbog mehaničkih, termičkih i hemijskih utjecaja izolacija je osim toga izložena starenju, tako da s vremenom gubi svoja svojstva i može da probije i kod naprezanja neznatno viših od normalnih [35].

Činjenica da su strojevi glavna pokretačka snaga za sve mašine i uređaje i industrijskim postrojenjima izazvala je potrebu za kompleksnom i raznovrsnom, a samim tim i sigurnom zaštitom električnih strojeva. Brzim isključenjem oštećenog stroja iz pogona i njegovim odvajanjem od ostalog, zdravog, sustava može se izbjeći oštećenje istog. Znači, vrlo je važno od čega i na koji način treba štititi električne motore, posebno one koji pokreću vrlo važna i osjetljiva industrijska postrojenja, čiji bi zastoj izazvao velike materijalne štete. Na slici 4.1. dat je prikaz natpisne pločice na ćeliji iz koje se napaja 220 kW stroj EMP na Separaciji Rudnika mrkog uglja Banovići kao i elektromehanički zaštitni relej tipa RIB 41-2 koji štiti već spomenuti stroj.



Slika 4.1. *Prikaz 6 kV ćelije primarne centrifuge 220 kW i pripadajuće elektromehaničke zaštite kojom se štiti u Rudniku Banovići*

Relej RIB 41-2 sa slike 4.1. bio je jedan od prvih sekundarnih zaštitnih releja za zaštitu električnih motora dvopolne izvedbe, te se primjenjivao kao strujno-vremenski zavisni zaštitni

element za zaštitu prije svega VN strojeva od preopterećenja sa zatezanjem vremena koje je zavisno od iznosa struje, dok kod velikih struja (kratkih spojeva) djeluje bez vremenskog zatezanja. Ovaj relej je namijenjen za zaštitu strojeva sa teškim zaletom. Izbor tipa releja zavisi od struje zaleta stroja, što se može uskladiti sa karakteristikama releja. Produženje vremena zaleta postignuto je pomoću zasićenih strujnih među transformatora koji se nalaze u releju.

Naveden je primjer jednog elektromehaničkog releja iz razloga da se pokaže koliko je bila kompleksna konstrukcija ovih releja. Također se može primijetiti da su ovi releji imali više podtipova (zavisno od struje zaleta motora) što ukazuje na to da se kod naručivanja releja moralo striktno voditi računa o vrsti i tipu releja.

4.2. Principi zaštite VN kaveznih strojeva koji rade u teškim pogonima sa osvrtom na konvencionalne metode štićenja

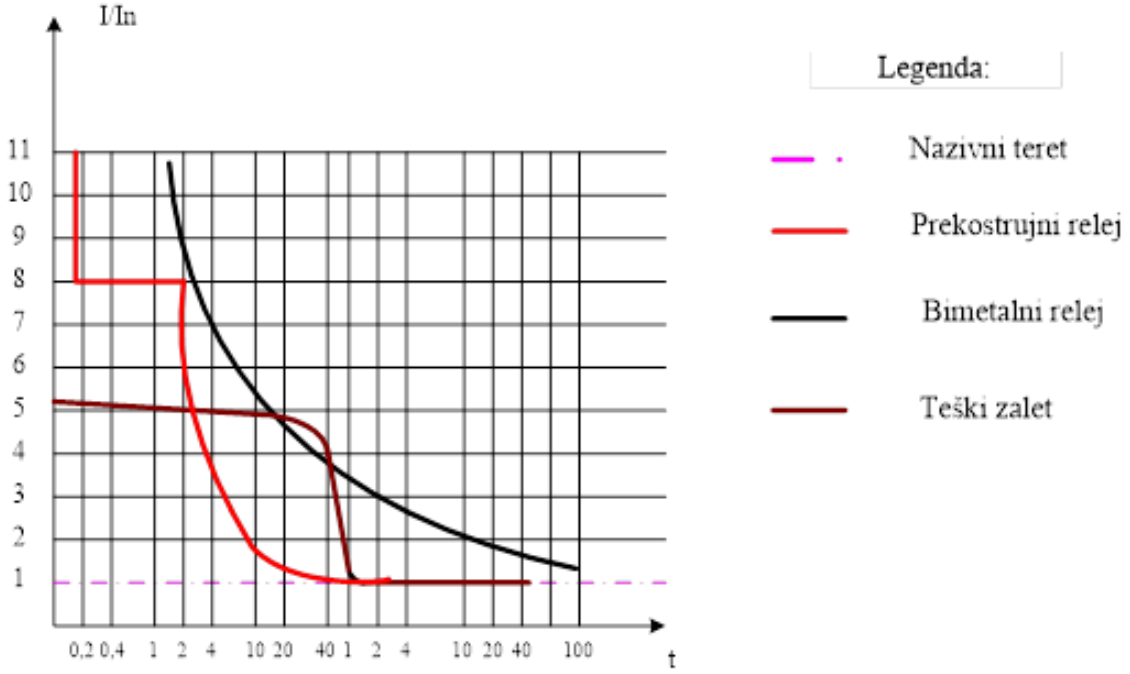
Gotovo u pravilu se VN motori prave za velike snage. Električni motori sa relativno malim momentom inercije i sa statičkim režimom opterećenja su se uglavnom štitili bimetalnim ili prekostrujnim relejima ugrađenim u sekundarni krug strujnih mjernih transformatora i ta zaštita sasvim zadovoljava, međutim ako je takav, pretežno statički pogon, imao veliki moment inercije, tada za njega kažemo da je teški i on se štitio kombinacijom prekostrujnog releja i dodatnog vremenskog releja koji isključuje zaštitu za vrijeme zaleta ili se zaštitni relej spaja preko zasićenog strujnog transformatora. Ovdje se uočava već jedan problem a to je "mrtva zona" tj. period u kome relej ne štiti motor. Ovo je bio jedan od momenata koji je ukazivao u kom smjeru treba da ide razvoj zaštita električnih strojeva [36].

Na slici 4.2. dat je prikaz karakteristika vremenske ovisnosti struje preopterećenja i vremena iskapčanja kod bimetalnih releja i prekostrujnih releja.

Za EMP sa VN motorom koji radi u režimu sa čestim dinamičkim promjenama ovakav način štićenja motora nije bio dovoljan. Štićenje ovakvih pogona također nije bilo moguće sa zaštitama pomoću termičkih mjerača temperature (bimetalne sonde, poluvodički otpornici sa pozitivnim PTC i negativnim NTC temperaturnim koeficijentom) iz slijedećih razloga:

- Izolacija VN namota je dosta velika, također i temperaturni mjerači se moraju dodatno izolirati te u tom slučaju zaštita više nije vjerodostojna
- temperatura mjerača kasni za temperaturom namota stroja a to je naročito izraženo kod kratkih spojeva u stroju

• pošto termičke mjerače treba ugraditi uz sam namot, tj. u glave namota, prije konačne impregnacije, a samim tim i prije VN ispitivanja stroja, to se kod samih ispitivanja može desiti da dođe do promjene svojstava temperaturnih mjerača zbog njihove osjetljivosti na snažna električna polja, tj. naponska čvrstoća im je niska [37].



Slika 4.2. *Karakteristike vremenske ovisnosti struje preopterećenja i vremena isklopa kod bimetalnih i prekostrujnih releja*

Doduše postojala je mogućnost ugradnje termičke zaštite sa otporničkim termometrima koji se ugrađuju u utor, najčešće u izolacijski distancioni uložak između gornjeg i donjeg sloja dvoslojnog namota stroja. To je obični linearni otpornik, oblikovan u spljoštenu spiralu, osjetljiv na temperaturu (ima veliki temperaturni koeficijent) i spojen u posebni pomoćni strujni krug. I ova zaštita nije bila adekvatna i dovoljno efikasna kod dinamičkih režima jer temperatura termičkih mjerača značajno kasni za stvarnom temperaturom namota pri naglim promjenama. Ovo se može smatrati slijedećim problemom koji je ukazivao na pravac razvoja zaštita VN motora koji rade u teškim uvjetima.

Svo dosadašnje obrazloženje ima za cilj samo jedno, a to je da detektira problem a problem je, to je sasvim jasno, dinamički režim rada motora. Naime zaštita motora u njegovom dinamičkom režimu mora da zadovolji određene kriterije. Već je ranije pokazano da se kod statičkih stanja EMP proces zagrijavanja električnih motora odvija po eksponencijalnom zakonu sa vremenskom konstantom T koja približno odgovara homogenom tijelu. U dinamičkim režimima taj proces je

znatno brži, toplota relativno sporo prelazi sa bakra namota na željezo stroja i okolni prostor, te se u tom slučaju zagrijavanje motora odvija po zakonu nešto drugačijem od onog u statičkom režimu motora [38]. Naime toplotne pojave u motoru se odvijaju:

- sporo (kada su struje u motoru manje od približno 2In)
- brzo (kada su struje u motoru veće od 4In)
- postepeno (kada su struje u motoru između 2In i 4In)

Zaštitni uređaji koji su radili na do sada opisanim principima, tj. koji su se mogli koristiti za visokonaponske motore, nisu se mogli koristiti u ovom slučaju jer nemaju odgovarajuću toplinsku karakteristiku koja daje vjernu sliku dinamičkog režima. Pored toga i vremenska karakteristika promjene temperature zaštitnog uređaja bi morala točno odgovarati vremenskoj karakteristici promjene temperature stroja koji se želi štititi. Na slici 4.3. prikazana je vremenska karakteristika jednog konkretnog motora, tj. postizanje dopuštene temperature ovisno o strujnom preopterećenju.

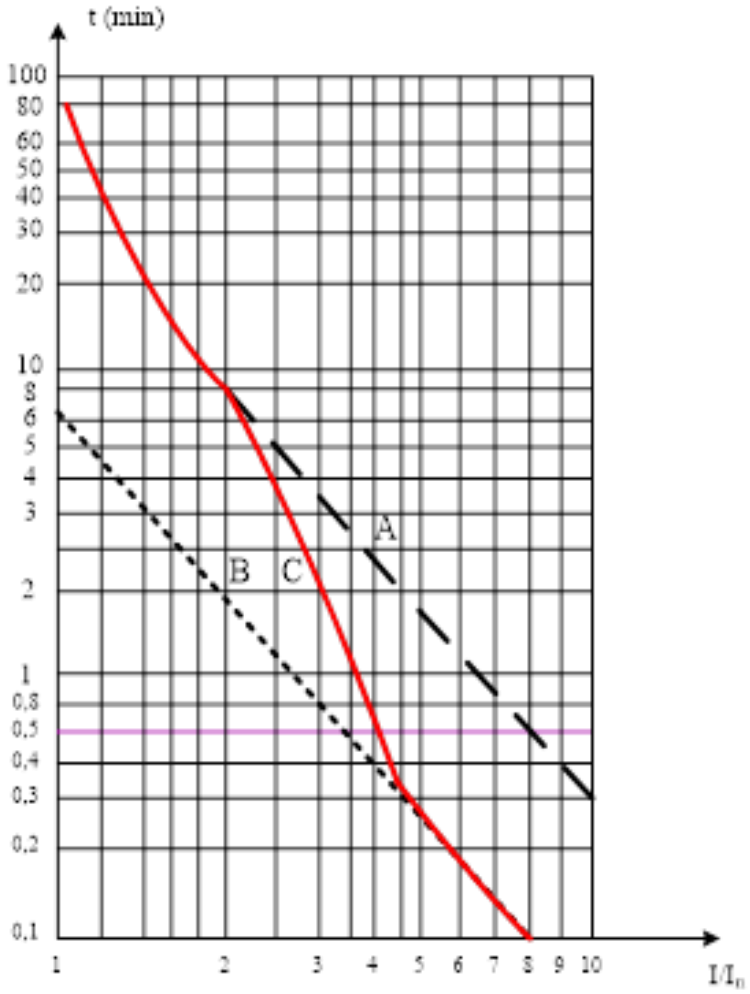
Zaključak je da je moguće izraditi takav bimatalni relej sa potpuno identičnom temperaturnom karakteristikom za određeni konkretni motor ili kako se kaže biće vjerna toplinska slika motora. Takav relej bi svakako potpuno štitio konkretni stroj. Njegov temeljni nedostatak ogleda se u tome što bi bio veoma skup jer mu se svaki detalj izrađuje za određeni motor a također potpuna termička slika se nikada ne da točno proračunati već se manje više eksperimentom dolazi do prave karakteristike. Ovakva zaštita je veoma rijetka u praksi i primjenjuje se samo kod veoma skupih motora.

Na slici 4.3. stvarna karakteristika je izvučena punom crvenom crtom. Na slici je:

A - zagrijavanje prema toplinskoj vremenskoj konstanti motora

B - zagrijavanje kada se stroj ne hladi

C - prelazak sa jedne na drugu karakteristiku



Slika 4.3. *Vremenska karakteristika postizanja dopuštene temperature počev od hladnog stanja jednog konkretnog motora ovisno o strujnom preopterećenju*

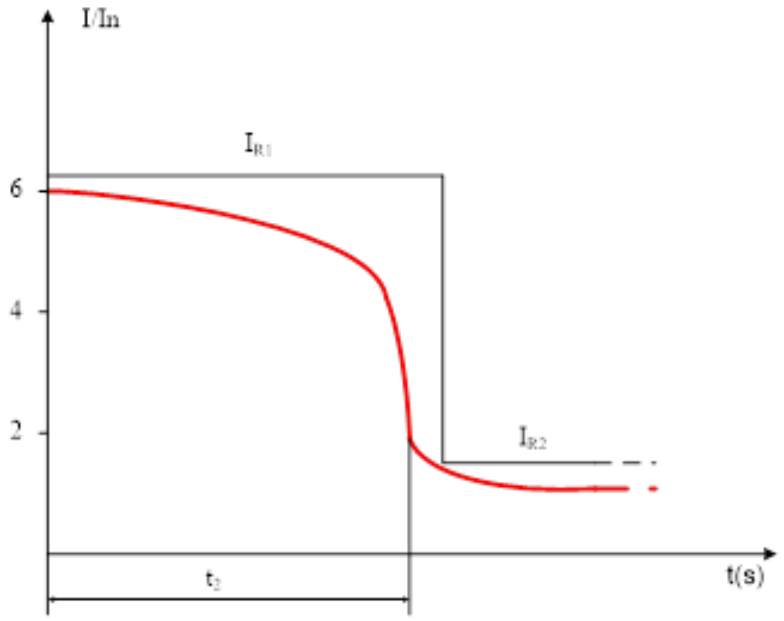
Generalno gledano i kod konvencionalnog načina štićenja i kod štićenja numeričkim zaštitama teških EMP nekoliko činilaca u manjoj ili većoj mjeri utiče na izbor zaštite:

- snaga električnog motora
- vrsta električne mreže
- način uzemljenja zvjezdišta mreže
- važnost električnog motora u postrojenju
- očekivane vrste poremećaja
- ekonomičnost uporabe

Pored toga kao glavni problemi kod zaštite ovih motora mogu se navesti:

- teški zalet
- kontrola temperature rotora

Za slučaj zaleta teških EMP sa kaveznim asinkronim motorom kod konvencijalnog tipa zaštita koriste se dvostepene prekostrujne zaštite sa automatskim nadzorom broja okretaja, vremena zaleta i struje zaleta [39]. Ova zaštita radi na principu metode promjene nivoa prorade prema slici 4.4. Kod motora manjih snaga (ispod 100 kW) problem zaleta se rješavao tako što se prekostrujni relej u vrijeme zaleta jednostavno premosti, što opet u slučaju kvara u toku zaleta može prouzročiti ogromnu štetu. Ovakvo premoštavanje zaštite tokom zaleta motora isključivo je bilo dozvoljeno ako se tokom vremena zaleta motora, motor nadzire od strane stručne osobe, koja ima zadatak da isključi motor ukoliko primijeti bilo kakve neželjene pojave tokom zaleta.



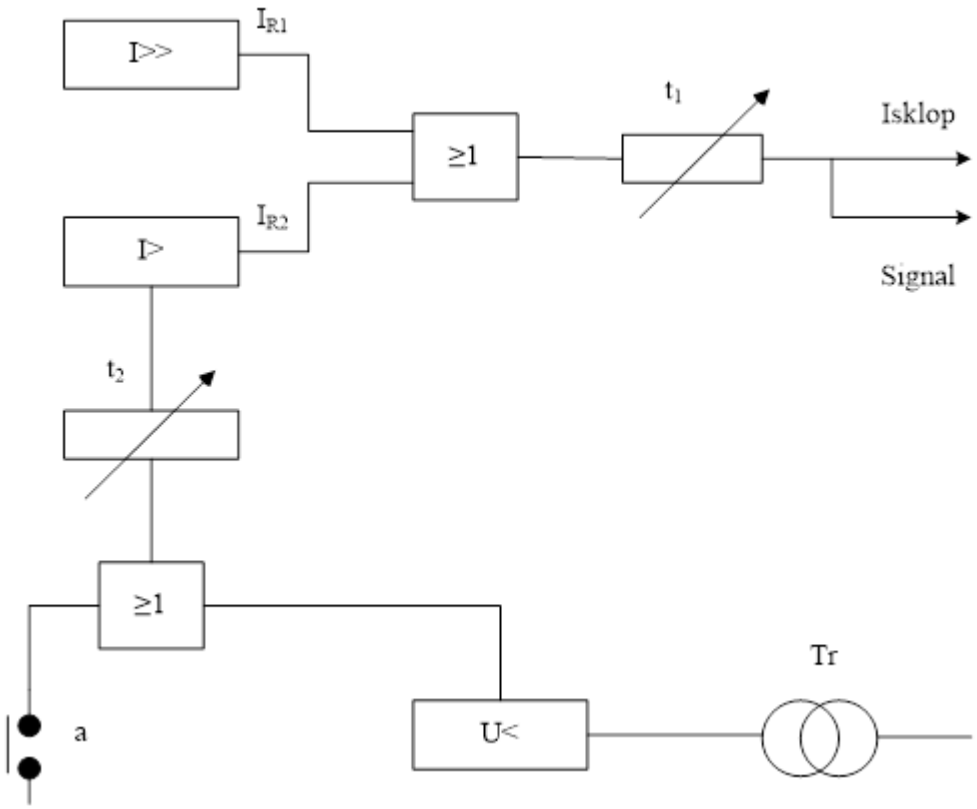
Slika 4.4. *Podešavanje dvostepene prekostrujne zaštite*

Ovakav tip zaštite se izvodio prema shemi prikazanoj na slici 4.5 i sastoji se od 2 prekostrujna releja, 2 vremenska releja i jednog podnaponskog releja [17].

Princip rada je sljedeći:

Jedan prekostrujni relej se podesi na struju I_{R1} a drugi na I_{R2}. Sa vremenskim relejom t_2 blokira se rad prekostrujnog releja podešenog na I_{R2} za čitavo vrijeme starta motora, pri čemu se podatak o trajanju zaleta dobiva od podnaponskog releja. Izlaz i jednog i drugog prekostrujnog releja vremenski se zateže relejom t_1. Kod naročito velikih postrojenja predviđaju se za velike jedinice posebni zaletni sklopovi. Za nadzor temperature kaveza rotora kod ovog tipa zaštita koristio se za jedinice snage preko 2 MW sustav zaštite kontrolom brzine vrtnje koji se sastoji od tahogeneratora i frekventno neovisnog naponskog releja priključenog na napon tahogeneratora. Područje rada naponskog releja podesi se između $s = 0$ i $s = s$. U slučaju da je $s > s_{pr}$, okidni član naponskog

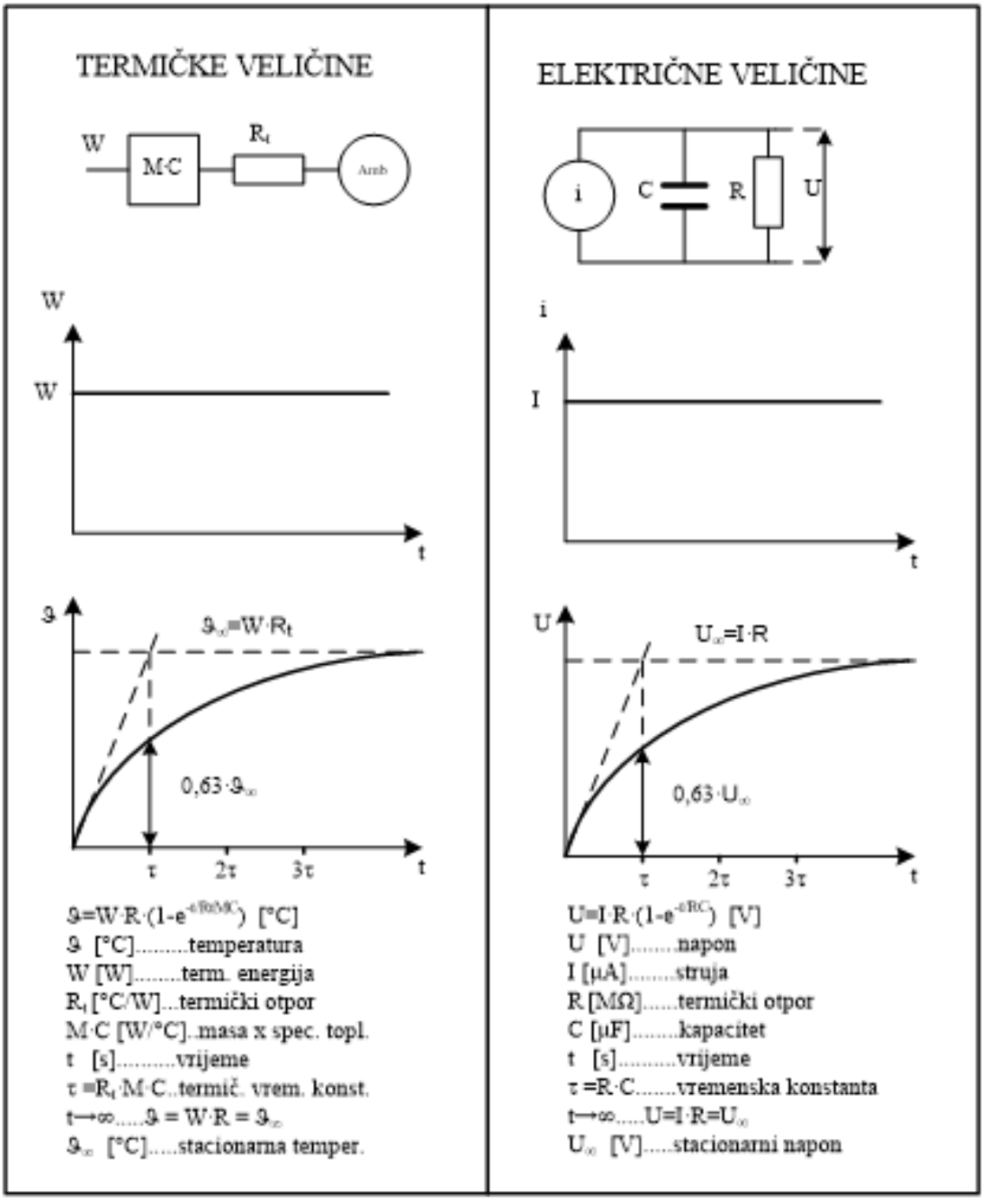
releja isključuje stroj iz mreže. Naponski relej, vremenski je zatezan za slučaj da je preopterećenje prolaznog karaktera.



Slika 4.5. *Shematski prikaz izvedbe prekostrujne zaštite promjenom proradnog nivoa*

Općenito se za zaštitu od preopterećenja za motore snaga preko 100 kW koristila sekundarna termička zaštita sa više toplinskih vremenskih konstanti koje se mijenjaju ovisno o stupnju opterećenja motora (npr. za $I = 0$; *za* $I < 2In$, za $I > (2\text{-}3)In$). Ovakva zaštita oponaša toplinske pojave na motoru, ovisno o stupnju opterećenja, a radi na principu ekvivalentiranja termičkih i električnih veličina prema slici 4.6.

To praktično znači da se raznim električnim sklopovima simulira stvarna krivulja zagrijavanja motora u raznim pogonskim stanjima u cilju električnog oslikavanja toplinske slike motora, a zaštita bazirana na ovoj metodi tim je bolja, ukoliko se datim električnim sklopom električna vremenska konstanta određenog pogonskog stanja uspije približiti stvarnoj toplinskoj konstanti motora koji štiti.



Slika 4.6.. *Ekvivalentiranje termičkih i električnih veličina*

Iz dosadašnjeg izlaganja u ovom poglavlju može se uočiti najbitniji problem koji je najviše uticao na tendenciju razvoja zaštitnih releja a to je problem zagrijavanja motora, odnosno prikaza što vjernije slike tog zagrijavanja.

U tom smislu i proizvođači motora i proizvođači releja razvijali su određene modele koji su imali zadatak da što vjernije daju sliku zagrijavanja stroja. Tu su dakako nailazili na čitav niz problema, te su stoga nastajale brojne metode, odnosno modeli procesa zagrijavanja.

Neke od poznatijih metoda su:

- Metoda primjene analognih masa za termičku sliku asinkronih strojeva,
- Zagrijavanje i zaštita asinkronih strojeva po modelu homogenog tijela,
- Poboljšani model zagrijavanja asinkronih motora
- Sintetičke metode 3K i 4K zagrijavanja asinkronih strojeva velikih snaga.

Da bi se shvatila bit problema ukratko će se opisati neke od ovih metoda. Iz opisa ovih metoda jasno će se vidjeti u kom je pravcu išao razvoj termičke zaštite velikih asinkronih strojeva, a naročito kaveznih.

4.2.1. Primjena analognih masa za termičku sliku asinkronih motora

Da bi bili asinkroni motori iskorišteni što bolje, počelo se traganje za elementima, čije bi termičke karakteristike bile što bliže termičkim svojstvima asinkronih motora. Tako su nastale prve termičke slike asinkronih motora, koje su bile građene na principu zagrijavanja analognih masa strujom stroja. Zbog dobrih početnih rezultata one su se razvijale relativno dug period da bi se konačno dobile zaista dobre slike termičkih događaja u asinkronim motorima [40].

Naravno, ova metoda ima i svoje slabe strane. Iz sasvim praktičkih razloga nemoguće je izrađivati analogne mase, koje bi imale sasvim jednake termičke karakteristike kao pojedini asinkroni motori. Isto tako je nemoguće razdvojiti termička svojstva statora i rotora motora. Mana ove metode ogleda se u tome što ona ne daje vjerodostojnu sliku zagrijavanja rotora motora. Zbog relativno velike termičke tromosti svih masa kod ovog tipa zaštita, za zaštitu od kratkih spojeva još uvijek su potrebni prekostrujni releji.

4.2.2. Zagrijavanje i zaštita asinkronih strojeva po modelu homogenog tijela

Ako se promatra tijelo koje se ravnomjerno zagrijava konstantnom snagom uz konstantan odvod toplote, poznat je izraz porasta nadtemperature u odnosu na okolinu [18]:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\max}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \tag{4-1}$$

u izrazu je: $\Delta\vartheta$ - nadtemperatura tijela u trenutku t (°C)

$\Delta\vartheta_{\max}$ - granična nadtemperatura za t=∞ (°C)

T - termička vremenska konstanta zagrijavanja (s)

Za graničnu temperaturu slijedi izraz:

$$\Delta\vartheta_{\max} = \frac{P_t}{P \cdot S} \tag{4-2}$$

dok za termička vremenska konstanta zagrijavanja:

$$T = \frac{m \cdot c}{P \cdot S} \tag{4-3}$$

u izrazu je: m - masa tijela (kg)

c - specifična toplota tijela (J/kg°C)

S - površina tijela sa koje se odaje toplota (m^2)

P - jedinična snaga odvođenja toplote ($W/m^2°C$)

P_t - snaga gubitaka koji se pretvaraju u toplotu (W)

Statorski namot u ovakvom pristupu, uključujući i njegov rashladni sustav, smatramo takvim tijelom.

Pod pretpostavkom da toplotni gubici zavise od kvadrata struje, moguće je mjerenjem struja i po nešto modificiranom izrazu (4-1) pratiti zagrijavanje motora. Od svih faznih struja se detektira najveća vrijednost i sa njom se računa zagrijavanje. Zagrijavanje se obično računa u relativnom iznosu, u procentima neke bazne nadtemperature dostignute u normalnom pogonu pri odgovarajućoj baznoj vrijednosti struje koja u stvari predstavlja zaštitni nivo. Ako se kod programiranja zaštitnog releja postavi bazna struja I_B na nominalnu vrijednosti struje motora, bazna nadtemperatura će praktično biti maksimalna dozvoljena temperatura za primijenjenu izolaciju. Dostizanjem 100% iznosa bazne temperature relej isključi motor sa mreže.

Računanje relativnog zagrijavanja se može izvesti po jednostavnom modelu zagrijavanja homogenog tijela i intervalima između uzorkovanja vrijednosti struje od strane zaštitnog mikroprocesorskog (numeričkog) uređaja, kada se korigira snaga gubitaka u skladu sa promjenom struje opterećenja [20]:

$$\Delta\vartheta(t+\Delta t) = \Delta\vartheta(t) + \left[\left(\frac{I(t)}{I_B}\right)^2 \cdot \frac{T}{T'} - \Delta\vartheta(t)\right] \cdot \left(1 - e^{\frac{\Delta t}{T}}\right) \qquad (4\text{-}4)$$

u izrazu je: $\Delta\vartheta(t)$ - nadtemperatura iz prethodnog perioda uzorkovanja

$\Delta\vartheta(t+\Delta t)$ - nadtemperatura u slijedećem periodu uzorkovanja

Δt - interval uzorkovanja mikropocesorske zaštite

T - aktualna vremenska konstanta zagrijavanja

T' - vremenska konstanta zagrijavanja za male promjene opterećenja u okolici nominalnog opterećenja

$I(t)$ - maksimalna struja u fazama

I_B - bazna vrijednost struje - zaštitni nivo uređaja

Očigledna je jednostavnost ovakvog pristupa jer ne zahtijeva puno računanja, odnosno ne troši puno procesorskog vremena. Ovakva zaštita radi na principu uzimanja uzorka struje i izračunavanja za svaki naredni interval temperature i u slučaju dobivanja maksimalne tj. bazne dozvoljene nadtemperature vrši isključenje motora prije nego se ona uopće uspostavi u motoru. To klasične zaštite ne mogu da postignu i u slučaju naglog porasta temperature, postoji mogućnost da dođe do pregrijavanja namota motora zbog toga što termički senzori reagiraju sporo. Dakle klasična zaštita reagira na realno prekoračenje temperature dok mikroprocesorska zaštita reagira već na sam uzrok povećanja zagrijavanja i ako proračun pokaže da će biti dosegnut maksimum nadtemperature do slijedećeg uzorkovanja, vrši isključenje stroja, mada taj maksimum nije stvarno dosegnut. Iz ovoga se uočava važnost predviđanja toka zagrijavanja.

I pored toga ovakav model ima i svoje nedostatke. U stvarnosti zagrijavanje statora je određeno sa dvije vremenske konstante. Jedna određuje prijenos toplote između provodnika statora i jezgre, a druga između jezgre i okoline. To dovodi do toga da pri malim promjenama opterećenja, zagrijavanje ide po nekoj vremenskoj konstanti zagrijavanja T' koja se koristi u praćenju zagrijavanja u normalnom radu. U slučaju intenzivnog zagrijavanja, na primjer u statoru, toplota statorskog namota nema više vremena da se disipira u okolinu na isti način. Vremenska konstanta

koja se tada uzima u obzir ima znatno manju vrijednost (vremenska konstanta kratkog spoja) ili se čak ide na proračun adijabatskog zagrijavanja što daje manje točan ali sigurniji proračun [41].

U slučaju hlađenja u mirovanju nema prinudne ventilacije, što znači da će zbog smanjenog odvođenja toplote i vremenska konstanta hlađenja T' biti veća. Da bi se svi ovi slučajevi uklopili u jednostavan model zagrijavanja dat izrazom (4-4) uveden je član T/T' koji unosi korekciju maksimalne temperature u intervalima uzorkovanja izazvane različitim uvjetima zagrijavanja, odnosno hlađenja.

Prelazak na simulaciju sa drugom vremenskom konstantom se izvodi na bazi nekog kriterija povezanog sa jačinom struje opterećenja, npr:

- u opsegu $0{,}2I_B < I < 2I_B$ - normalan rad, simulacija zagrijavanja sa $T = T'$
- u opsegu $I < 0{,}2I_B$ - stroj isključen, simulacija hlađenja sa $T < T'$
- u opsegu $I > 2I_B$ - preopterećenje, simulacija adijabatskog zagrijavanja $T = \infty$.

gdje je I_B - bazna struja , zaštitni nivo uređaja.

Nedostatak ovog modela je taj što po njemu rotor praktično ostaje bez zaštite. Naime, prava termička slika rotora se ne može dobiti na bazi praćenja temperature statora. Rotor sam po sebi predstavlja zaseban termički sustav odvojen od statora zračnim zazorom. Zagrijavanje rotora se stoga odvija po drugoj vremenskoj konstanti. Pored toga kod kaveznih rotora postoji utjecaj skin efekta na zagrijavanje. Konstruirati zaštitu, po do sada navedenim principima, koja bi potpuno štitila i rotor gotovo je nemoguće. Zato se uvode posebna ograničenja koja se realiziraju posredstvom zaštitnog numeričkog releja. Ta ograničenja su:

- zaštite od blokade rotora,
- zaštita od predugog zaleta i
- zaštita od velikog broja uzastopnih zaleta.

Uz ova ograničenja koja se postavljaju u procesu programiranja numeričkog releja u vidu maksimalnih vremena trajanja tih kritičnih stanja, smatra se da će i rotor biti odgovarajuće zaštićen.

4.2.3. Ostali modeli zagrijavanja asinkronih motora

Sljedeći model bi bio „Poboljšani model zagrijavanja asinkronog motora“ međutim ovaj model se neće posebno razmatrati samo će se ukratko reći sljedeće. Ovaj model se formira tako da se sa njim mogu simulirati električne i termičke pojave u asinkronom motoru sa znatno većom točnošću od one koju daje klasični model motora promatran kao homogeno tijelo. Zahtijeva znatno veći proračun i znatno više ulaznih podataka koji veoma često nisu dostupni jer ih proizvođači motora jednostavno ne daju uz dokumentaciju motora. Pored toga ovaj model podrazumijeva odvojeno promatranje rotora i statora a ima i neke prednosti [20]:

- Stator se simulira kao sustav drugog reda što ima za posljedicu vjerno praćenje zagrijavanja statorskih provodnika neovisno od intenziteta zagrijavanja,
- Termička slika rotora se dobiva na osnovu rješavanja rotorskog modela prvog reda a ne na osnovu praćenja statorske temperature,
- Rotorski parametri se uzimaju zavisno od klizanja, tako da je uračunat i skin efekt i povećano zagrijavanje kod malih brzina stroja,
- Ima mogućnost direktne zaštite rotora, te nisu potrebna neka dodatna ograničenja u pogledu dužine starta, prema karakteristikama radne mašine, broja uzastopnih pokretanja itd.,
- Prati zagrijavanje izazvano nesimetričnim radom stroja.

Kao nedostatak ovog modela može se navesti znatno veći proračun što uzrokuje veći angažman procesora a samom tim i više utrošenog procesorskog vremena.

Ostaje da se spomenu još i „Sintetičke metode 3K i 4K“ koje spadaju u grupu indirektnih metoda i uglavnom ih koriste proizvođači stroja. S obzirom da po pravilu, mogućnosti proizvodnje nadmašuju osposobljenost za ispitivanje [21], to su ove indirektne metode nužne u tehničko ekonomskom smislu.

4.3. Suvremene zaštite teških EMP

Konvencionalni uređaji za zaštitu VN asinkronih strojeva osiguravaju automatsku zaštitu od blokiranja rotora, fazne nesimetrije, preopterećenja i zemnog spoja. Međutim, u uvjetima rada složenih tehnoloških procesa, sa elektromotornim pogonom, u kojima električni strojevi pokreću mašine, pumpe, ventilatore i dr. javljaju se varijacije opterećenja, koje za posljedicu imaju: promjenu momenta, frekvencije pokretanja, privremene fazne nesimetrije i druge sa aspekta zaštite granične pojave, koje moraju biti tolerirane. Projektiranje klasične zaštitne sheme za te uvjete eksploatacije, primjenom konvencionalnih releja je veoma teško a katkad i nemoguće.

4.3.1. Zaštita VN motora u složenim sustavima

U suvremenom sustavu, reguliranih i iz jednog centra upravljanih elektromotornih pogona, primjenom računala, konvencionalni uređaji za zaštitu ne udovoljavaju svim zahtjevima za pouzdan rad sustava. U složenim sustavima potreban je veći broj relevantnih informacija o trenutnim pogonskim stanjima svih električnih mašina, a pogotovu VN motora, a ne samo zaštita od havarija isključivanjem VN strojeva u slučaju nenormalnih uvjeta bez pravovremene prethodne informacije sustava o tome.

U slučaju havarijskog isključivanja aktiviranjem relejne zaštite, potrebna je informacija o pogonskoj spremnosti za ponovno uključivanje električnih motora i niza drugih, za automatski rad sustava, bitnih informacija.

4.3.2. Funkcije zaštite

Zaštita VN motora sprovodi se na bazi algoritma kontrolnih i zaštitnih funkcija. Funkcije zaštite i kontrole mogu se integrirati jer su u tijesnoj sprezi i veoma često su realizirani istim tehničkim sredstvima automatike. Neke integrirane funkcije zaštite i kontrole, pored promjenljivih, čije se granične vrijednosti kontroliraju, sadrže i vremenske članove sa funkcijom kašnjenja djelovanja zaštitne i kontrolne funkcije. Između pojedinih funkcija postoje logičke veze, koje se moraju uzeti u obzir pri formiranju integriranih funkcija zaštite i signalizacije.

Primjena mikroelektronskih komponenata i mikroprocesora u gradnji uređaja za automatsku zaštitu VN strojeva omogućava realizaciju i najsloženijih algoritama zaštite, koji su primjenom klasičnih zaštitnih releja nisu mogli realizirati. Međutim, primjena mikroprocesorskog uređaja za

zaštitu zahtijeva i novi pristup realizaciji automatske kontrole. Automatska kontrola realizira se mjerenjem struja u pojedinim fazama.

Najvažnije zaštitne i kontrolne funkcije VN strojeva su:

$I>$ - zaštita od preopterećenja

$I>>$ - zaštita od kratkog spoja

$I_o>$ - zaštita od zemnog spoja

I_S, N_{to}, N_{hl} - zaštita od predugog zaleta i nedozvoljenog broja uzastopnih zaleta

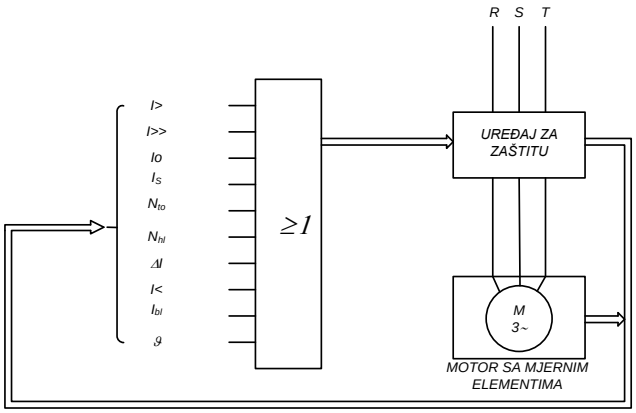
ΔI - zaštita od strujne nesimetrije

$I<$ - zaštita od pada vrijednosti struje ispod određenog praga

$\vartheta>$ - zaštita od termičkog preopterećenja

T_L - kontrola temperature ležajeva, statora i dr.

Na slici 4.7. prikazana je principijelna shema djelovanja zaštitnih i kontrolnih funkcija VN motora.

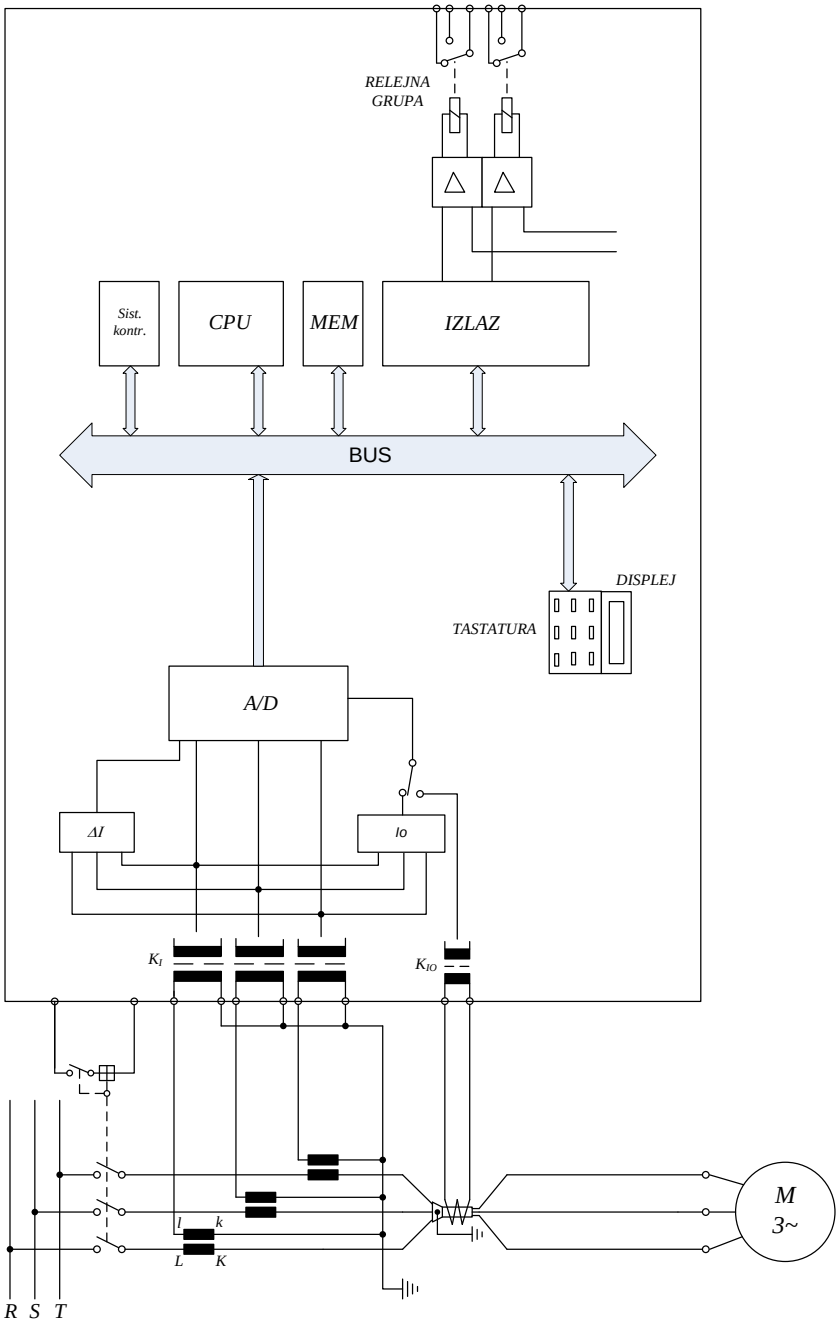


Slika 4.7. *Principijelna shema djelovanja zaštitnih i kontrolnih funkcija VN motora*

4.3.3. Koncept zaštite VN strojeva primjenom mikroprocesora

Postizanje nove kvalitete u zaštiti i automatskoj kontroli VN motora omogućuje primjena mikroprocesora u gradnji uređaja za automatsku zaštitu. Mikroprocesor osigurava veliku pouzdanost i fleksibilnost uređajima zaštite. Također omogućava programirano povezivanje raznih kontrolnih i zaštitnih funkcija i donošenje programom predviđene odluke u kritičnim trenucima eksploatacije motora. Postavljanje svih parametara i unošenje programa zaštite i kontrole je veoma jednostavno i može se realizirati uz veoma veliku točnost.

Pored funkcije zaštite mikroprocesorski uređaj omogućuje dobivanje pravovremene informacije o svim bitnijim parametrima i operativnim vrijednostima sustava. Informacije se pojavljuju na lokalnom monitoru, displeju, LED indikatoru, ili se prenose u centar za automatsko upravljanje preko komunikacionog interfejsa. Ovako koncipiran uređaj omogućuje pored ostalog, dobivanje informacije npr. o rezervnom termičkom kapacitetu VN motora, vremenu preostalom do iskorištenja 100% termičkog kapaciteta u slučaju preopterećenja, odnosno potrebnom vremenu za ponovni start pregrijanog motora u slučaju ispada.



Slika 4.8. *Principijelna shema mikroprocesorke zaštite*

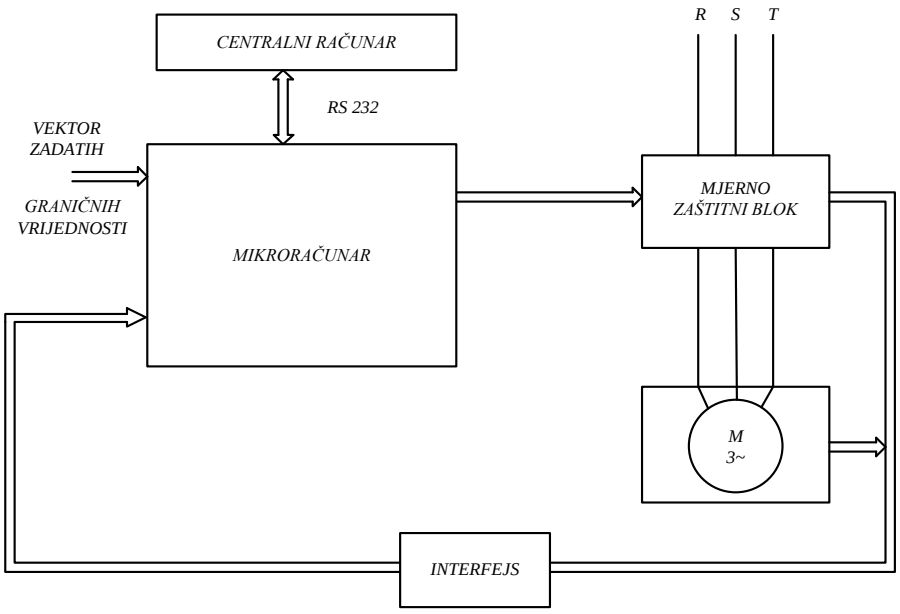
Veliku pouzdanost u radu osigurava mogućnost samotestiranja uređaja i trenutna informacija o eventualnom otkazu hardware-a ili software-a mikroprocesorskog uređaja za zaštitu. Principijelna blok shema mikroprocesorskog uređaja za automatsku zaštitu prikazana je na slici 4.8. Informacije o stanjima u pojedinim fazama prenose se u uređaj sa sekundara glavnih strujnih transformatora. Na ulazu uređaja se vrši galvansko odvajanje primjenom strujnih transformatora.

Na sumatoru I_o formira se vektorska suma faznih struja, ili se ona separatno unosi. Nakon formiranja odgovarajućih oblika ulaznih signala vrši se A/D konverzija, formiranje algoritma zaštite, memoriranje i dalja obrada informacije primjenom mikroprocesora.

Tastatura i displej omogućuju unos programa i relevantnih parametara i očitavanje informacija bitnih za rad sustava. Preko izlaznog interfejsa upravljački signali zaštite se dovode na pojedine releje zaštite i signalizacije.

Funkcije blokiranja je moguće realizirati putem posebnog bloka, koji direktno djeluje na releje zaštite. Prikazana mikroprocesorska struktura daje mogućnost za realizaciju fleksibilnog uređaja za automatsku zaštitu VN stroja, sa kvalitativno novim mogućnostima u odnosu na klasičan relej zaštite.

Strukturna blok shema zaštite VN motora primjenom mikroprocesorskog uređaja za zaštitu prikazana je na slici 4.9.



Slika 4.9. *Strukturna blok shema mikroprocesorske zaštite VN strojeva*

Strukturna shema se sastoji od VN stroja sa ugrađenim mjernim elementima temperature namota i ležaja; mjerno zaštitnog bloka koji sadrži strujne mjerne transformatore i prekidačke elemente za uključivanje i isključivanje motora; interfejsa za prilagođavanje i galvansko odvajanje ulaznih signala; mikroračunala za obradu signala i realizaciju programom predviđenih funkcija zaštite i po potrebi sa mogućnošću serijske komunikacije sa centralnim računalom za upravljanje procesom.

Prije puštanja u rad uređaja za zaštitu, potrebno je unijeti vektor zadanih graničnih vrijednosti motora koji se štiti. Potrebne podatke za motor daje proizvođač motora, dok se ostali podaci formiraju na temelju eksploatacijskih karakteristika sustava.

Na kraju se može konstatirati da se realizacija optimalne zaštite i dobivanje povremenih informacija o pogonskom stanju VN stroja može sprovesti primjenom mikroprocesorskog uređaja za zaštitu. Velika sigurnost i pouzdanost u radu ovog uređaja osigurava pouzdanu i fleksibilnu zaštitu kako stroja tako i cijelog pogonskog sustava.

4.3.4. Primjer zaštite velikog EMP

Zbog svog dinamičkog karaktera štićenje električnih motora i elektromotornih pogona prilično je zahtijevna zadaća. Cjelovito štićenje električnih motora stoga mora sadržavati sljedeće elemente:

1) Električni motor se mora osigurati od prekomjernog zagrijavanja. Pri tome je potrebno da uređaj koji ima zadaću štićenja na temelju struje koju motor uzima iz mreže zaključi o temperaturi štićenog elementa. Ova je zadaća teška jer zagrijavanje tijela ovisi o mnogo faktora kao što su:
    - veličina struje opterećenja motora,
    - režim rada motora koji može biti trajan, intermitiran, prekidajući itd.,
    - mD^2 tereta,
    - početna udarna struja motora,
    - nesimetrija pogonskog napona,
    - napajanje preko uređaja energetske elektronike i niz drugih.

Osnovna zaštita, koja stroj treba zaštiti od pregrijavanja je zaštita od preopterećenja. Ova zaštita u osnovi funkcionira na temelju teorije o zagrijavanju homogenog tijela prema kojoj je vrijeme t potrebno da tijelo dosegne graničnu temperaturu ϑ_{max} u ovisnosti o trenutnoj i prethodnoj struji

tereta:

$$t = T \cdot \ln \frac{I^2 - I_0^2}{I^2 - I_n^2} \tag{4-5}$$

u izrazu je :

I_0 - struja kojom je stroj bio prethodno opterećen

I_n - nazivna struja stroja

T - termička konstanta

Tada je vrijeme t ujedno i vrijeme do isključenja stroja. Granične temperature stroja definiraju se toplinskim klasama izolacije (tablica 4.1.):

Tablica 4.1. *Granične temperature stroja prema toplinskim klasama izolacije*

Klasa izolacije	Najveća dopuštena temperatura, ϑ_{max} (°C)
A	105
B	130
F	155
H	180

Uobičajeno su svi noviji električni motori građeni od materijala klase F, ali su projektirani tako da temperaturni prirast ne prelazi onaj za klasu B. Time je znatno produljen životni vijek izolacije stroja. Ako zaštita štiti motor ovakvih karakteristika zadaća joj je da ne dopusti da temperatura izolacije ni u jednoj točki ne prijeđe vrijednost od 130 °C.

Iz ovog je vidljivo da postoji rezerva u toplinskom kapacitetu motora, ukoliko se odreknemo ove rezerve stroj je moguće preopteretiti a da se prilikom trajnog pogona temperatura izolacije ne podigne iznad granične temperature za izolaciju klase F. Faktor koji dopušta određeno preopterećenje stroja naziva se faktor preopterećenja i uzima se u obzir standardnim krivuljama dopuštenog preopterećenja stroja standardom IEC60255-8. Upotreba ovog faktora omogućava bolje iskorištenje toplinskog kapaciteta stroja, ali znatno smanjuje životni vijek.

Za motore kojima proizvođač nije jasno definirao uvjete rada s faktorom preopterećenja i za sve starije motore bolje je računati s faktorom 1. Na slici 4.10. prikazani su dijagrami dopuštenog preopterećenja motora prema IEC60255-8.

Na slici 4.10. A. prikazani su dijagrami za slučaj da motor prethodno nije bio opterećen, a na slici 4.10. B uz pretpostavku da je motor već bio opterećen sa 90% nazivne snage.

Karakteristiku isključenja s predopterećenjem valja koristiti kod motora koji rade u prekidajućem režimu, a za one koji su u trajnom pogonu poput onih koji pogone pumpe i ventilatore valja koristiti karakteristiku isključenja bez predopterećenja. Ova karakteristika može se pojednostavljeno prikazati izrazom:

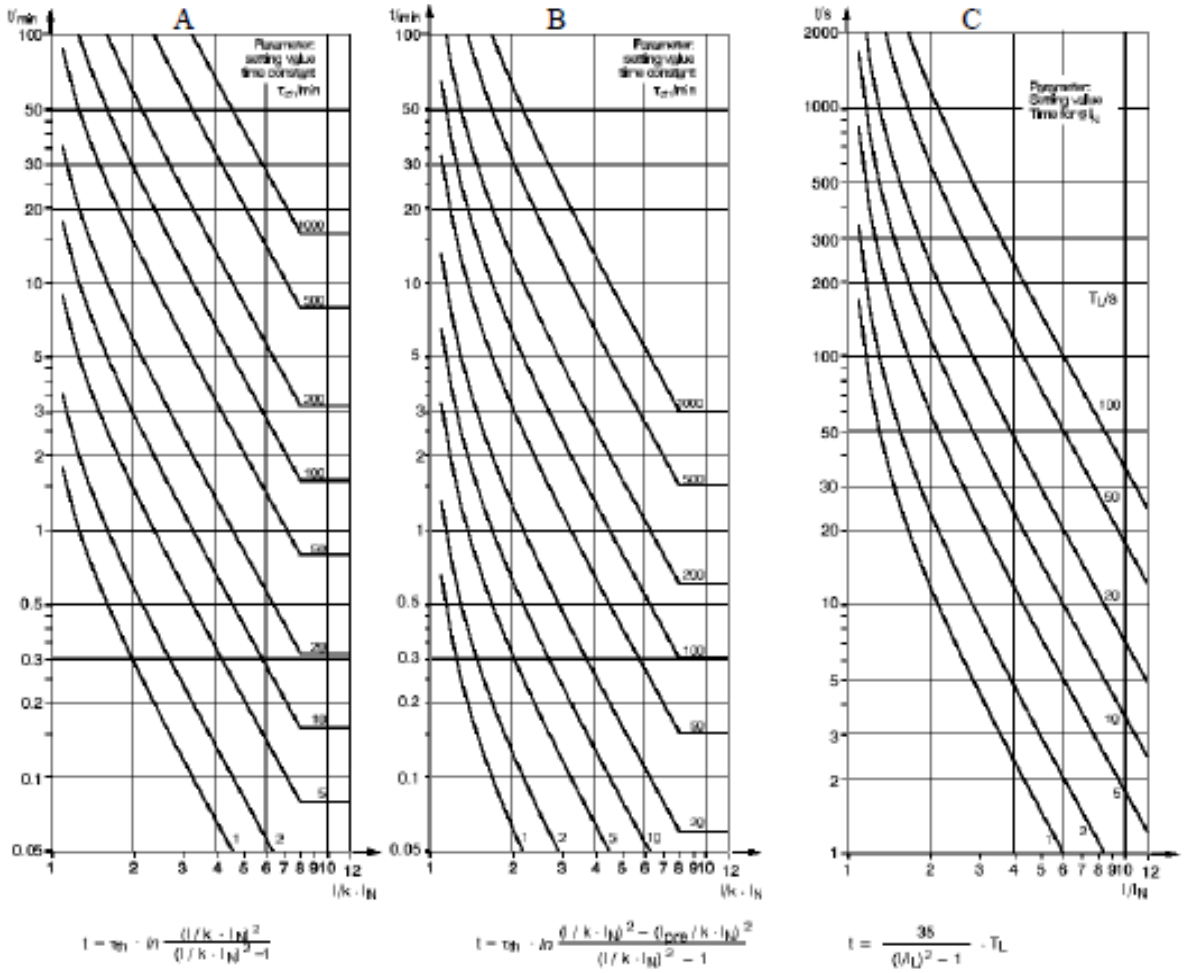
$$t = \frac{35}{\left(\frac{I}{I_L}\right)^2 - 1} \cdot t_L \tag{4-6}$$

u izrazu je: t_L - dopušteno trajanje šestostruke nazivne struje motora

Ovaj podatak proizvođači motora najčešće i navode.

Ukoliko je umjesto ovog podataka navedena vremenska konstanta motora *T*, t_L se može izračunati prema sljedećem izrazu:

$$t_L(s) = \frac{T(s)}{36} \tag{4-7}$$



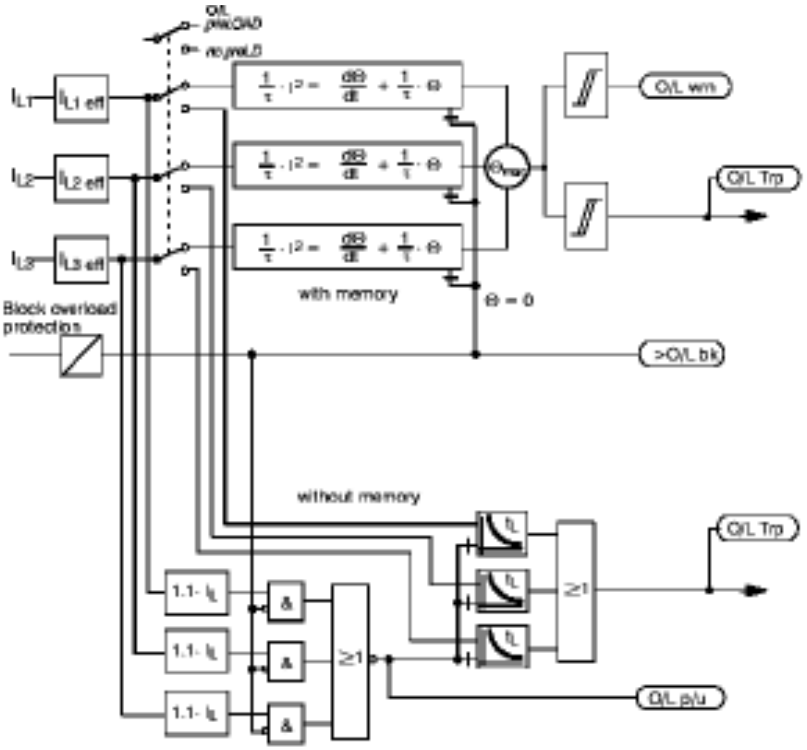
Slika 4.10. *Krivulje isključenja zbog preopterećenja prema IEC60255-8*

A-preopterećenje bez predopterećenja

B-preopterećenje s 90%-tnim predopterećenjem

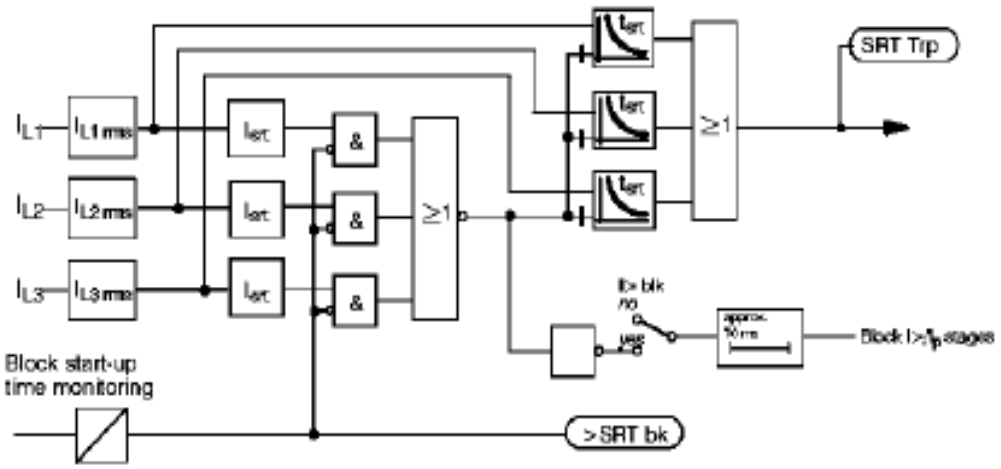
C-preopterećenje bez predopterećenja (T_L kao parametar)

Logički dijagram numeričke zaštite od preopterećenja prikazan je na slici 4.11.



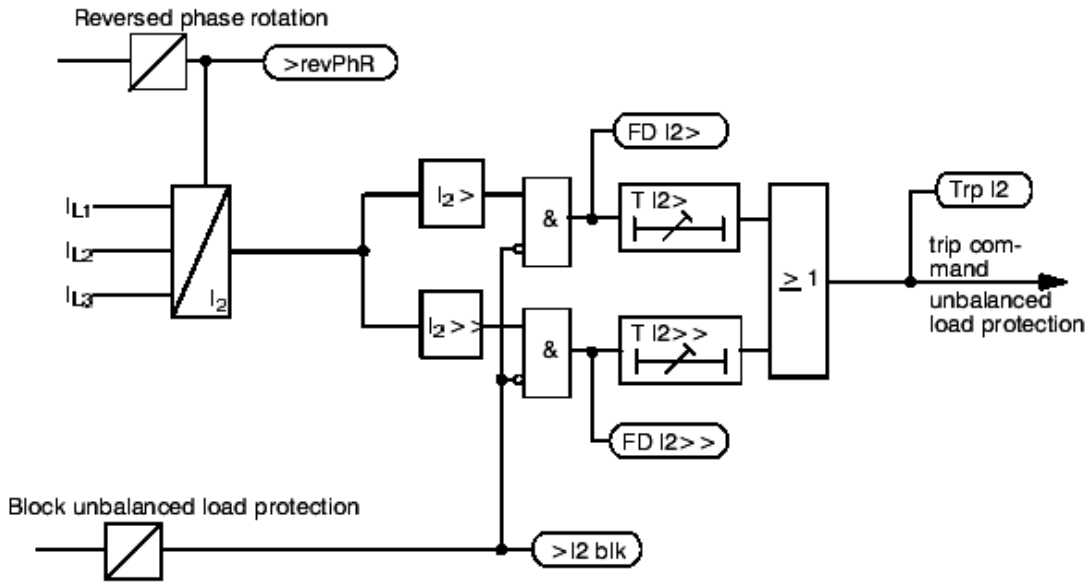
Slika 4.11. *Logički dijagram numeričke zaštite od preopterećenja*

2) Električni motor je potrebno zaštititi i od zagrijavanja koje može nastati prilikom pretjerano dugog starta odnosno blokiranog rotora. U tom slučaju ventilacija motora je reducirana zbog zaustavljanja ventilatora. Zaštita od ovakvog stanja može se izvesti mjerenjem vremena tokom kojeg je pobuđena zaštita od predugog zaleta. Pobuda ove zaštite radi sigurnosti obično se postavlja na polovicu vrijednosti početne struje motora. Ukoliko se zaštita ne resetira unutar definiranog intervala slijedi nalog za isklop motora. Zaštita funkcionira prema dijagramu na slici 4.12.



Slika 4.12. *Logički dijagram zaštite od predugog zaleta*

Zaštita od nesimetričnog pogona motora značajna je jer uslijed pojave inverzne komponente u struji dolazi do preopterećenja u radu motora. Nesimetrija struje može biti posljedica prekida faze, loših priključaka na motoru, parcijalnih kratkih spojeva u samom motoru kao i posljedica nesimetrije u samom napojnom naponu. Zbog toga se često koristi metoda mjerenja inverzne komponente struje čija je pojava posljedica bilo kojeg od navedenih kvarova. Takvi releji najčešće se podešavaju da detektiraju inverznu struju koja je veća od 20 % direktne komponente struje pri štićenju motora.



Slika 4.13. *Logički dijagram zaštite od nesimetričnog pogona*

Zaštita od zemljospoja statora, važna je jer sprječava širenje kvara na susjedne namote i pojavu kratkih spojeva. Kratke spojeve potrebno je naročito izbjegavati jer velike struje mogu oštetiti jezgru namota i nanijeti velike štete. Štete na jezgri mogu nastati već i kod malih struja zemljospoja kada može doći do parcijalnih kratkih spojeva između limova jezgre koji utječu na dodatno zagrijavanje motora u normalnom pogonu. Zbog toga je kod motora koji rade u izoliranoj mreži (6 kV mreža) poželjno imati zemljospojnu zaštitu kablovskog izvoda s kojeg se napaja motor.

4.3.5. Dodatne funkcije numeričkih releja

Filozofija svih numeričkih zaštitnih releja ogleda se u mogućnosti njihovog korištenja uz zadovoljenje specifičnih zahtijeva različitih energetskih sustava, ali također i stvaranje povjerenje kod raznih korisnika. Glavna svrha releja za zaštitu sustava je prepoznati bilo koje nenormalno

stanje elektroenergetskog sustava, ili nenormalne komponente operacijskog sustava. Na temelju prikupljenih podataka, sustav zaštite će pokrenuti korektivne akcije koje vraćaju sustav u normalno radno stanje. Ovo pruža sigurno okruženje za sve. Zaštitni releji se aktiviraju kad se nešto nenormalno dogodi u elektroenergetskom sustavu. Odabir pravih funkcija zaštite i metoda poboljšava performanse i pouzdanost sustava zaštite, čime se smanjuje utjecaji kvarova na mrežu i sprečavaju širenja poremećaja na zdrave dijelove mreže.

Posebnu pozornost treba dati na brzinu rada, osjetljivost, selektivnost i pouzdanost sustava zaštite. Postoji snažna korelacija između brzine rada sustava zaštite i štete, te opasnosti utjecaja greške na ostali sustav. Osuvremenjivanje transformatorskih stanica i EMP automatizacijom omogućen je pored ostalog i daljinski nadzor i upravljanje, kojim se ubrzava lociranje grešaka te obnova napajanja.

Osjetljivost zaštite mora biti odgovarajuća zbog otkrivanja zemljospojeva relativno visokih otpornosti te kratkih spojeva na najudaljenijim dijelovima mreže.

Selektivnost sustava zaštite je bitno zbog ograničenja kvara na što manji dio mreže koji je pod kvarom odnosno u svrhu pouzdanog lociranja kvara. To omogućuje brzo vraćanje pod napon zdravih dijelova mrežnog sustava.

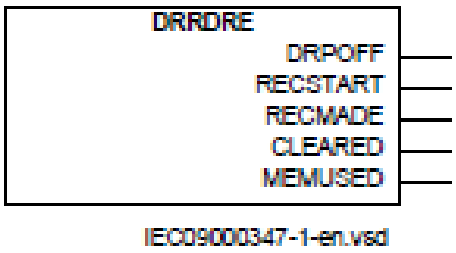
Sustav zaštite također mora imati visok stupanj pouzdanosti. To znači da ukoliko je recimo na primjer prekidač u kvaru, back-up zaštita će očistiti grešku. Automatizacija trafostanica i EMP omogućuje operateru potpunu kontrolu nad postrojenjem. SCADA sustav donosi sve prednosti digitalne tehnologije u zaštiti i kontroli mreža i postrojenja..

Relejni sustavi su pored toga dizajnirani tako da mogu provoditi temeljne vrijednosti standarda IEC 61850. Potpuna provedba IEC 61850 standarda obuhvaća i vertikalnu i horizontalnu razmjenu informacija između zaštitnih releja i vanjskih sustava. Numerička tehnologija zaštitnih releja omogućuje pored ostalog globalnu primjenu znanja i iskustava u području gdje se primjenjuje te je također vodeća snaga na putu ka postavljanju budućih trendove u području sustava zaštite i kontrole.

Jedan od funkcionalnih blokova numeričkih zaštitnih releja koji je korišten u ovom radu je disturbance recorder.

Disturbance rekorder (Snimač poremećaja)

Potpune i pouzdane informacije o poremećajima sustava zajedno sa kontinuiranim zapisom događaja se vrši od strane disturbance rekordera. Disturbance rekorder je uvijek uključen te vrši kontinuirano uzorkovanje podataka od svih izabranih analognog i binarnih ulaza, kojih može biti do nekoliko desetina. Slika 4.14. daje prikaz funkcionalnog bloka ABB-ovog disturbance recordera [16].



Slika 4.14. *Funkcionalni blok ABB-ovog disturbance recordera*

Disturbance recorder je zajednički naziv za nekoliko funkcija za opskrbu operatera ili inženjera koji analiziraju poremećaj, s dovoljno informacija o događajima iz sustava:

- popis događaja,
- indikaciju,
- snimač događaja,
- snimač vrijednosti parametara koje aktiviraju rekorder,
- snimač poremećaja

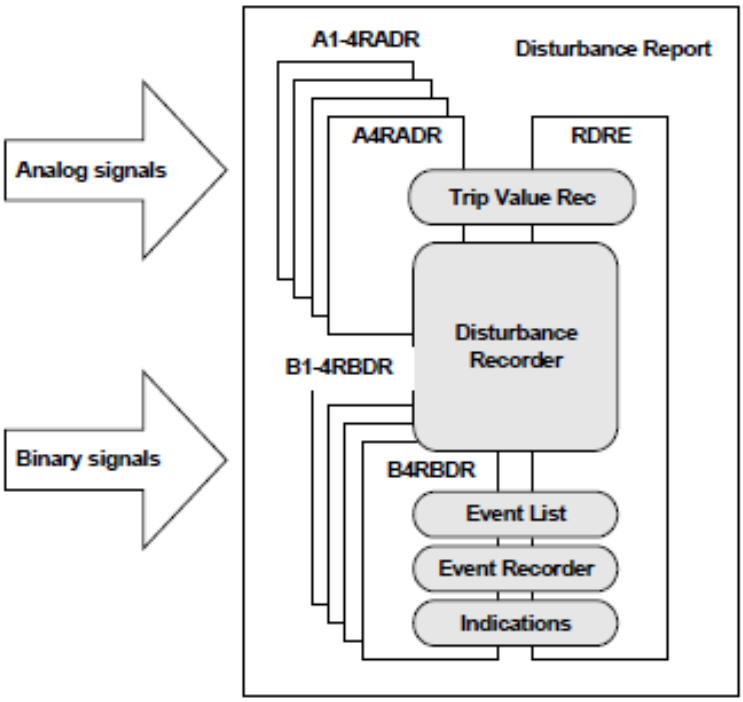
Disturbance recorder se odlikuje:

- velikom fleksibilnošću konfiguracije,
- raznolikošću uvjeta za njegovo startanje,
- velikim vremenom snimanja,
- velikim kapacitetom memorije.

Funkcija snimanja se definira aktiviranjem ulaza na funkcionalnom bloku koji su postavljeni za startanje rekordera. Svi signali od početnog vremena (prije samog događaja ili kvara) pa do kraja vremena su uključeni u snimanje, izuzev ukoliko se drugačije ne podesi na releju. Svaki snimak događaja ili poremećaja se čuva u standardnom comtrade formatu. Izvještajne datoteke mogu biti postavljene na software za dalju analizu događaja-poremećaja korištenjem prigodnih alata.

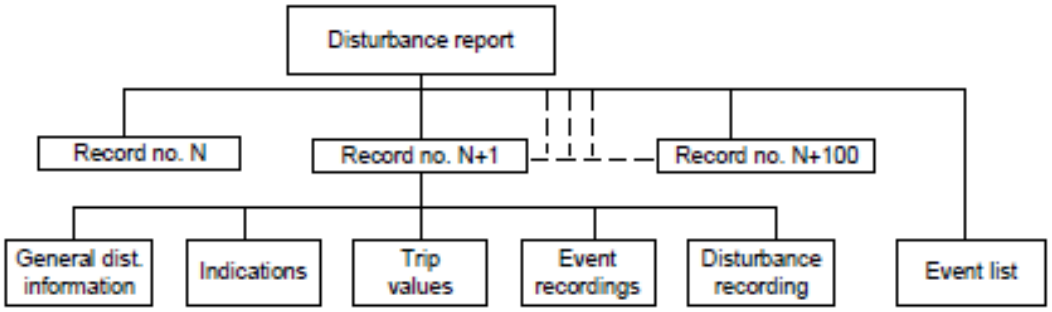
Princip rada

Slika 4.15. [16] prikazuje relacije između izvještaja o poremećaj, uključenih funkcija i funkcijskih blokova za ABB-ov relej REF 630. Popis događaja, sami događaji i indikatori događaja koriste informacije iz ulaznih funkcijskih binarnih blokova (BxRBDR). Za tip vrijednosti snimač koristi analogne podatke iz analognih ulaznih funkcijskih blokova (AxRADR).



Slika 4.15. *Funkcije izvještaja o poremećaju i srodnih funkcijskih blokova[16].*

Rekorder poremećaja (događaja) DRRDRE preuzima podatke iz oba AxRADR i BxRBDR. U izvještaju – listi događaja mogu biti sadržane informacije o poremećajima-događajima za veliki broj snimaka. Funkcija snimanja kontinuirano radi, neovisno od nastanka poremećaja. Svaki izvještaj dobije identifikacijski broj u intervalu 0-999.



Slika 4.16. *Struktura izvještaja o poremećajima [16]*

U memoriju može biti pohranjeno do 100 izvještaja o poremećajima [16]. Sve informacije u izvještaju poremećaja se čuvaju po principu, kada se napuni kompletna memorija da novi događaj briše najstariji događaj. Ukupan kapacitet snimača zavisi o frekvenciji uzorkovanja, broju analognih i binarnih ulaza i vremenu snimanja. U sustavima sa frekvencijom sustava od 50 Hz moguće je snimiti 100 događaja, uz maksimalno vrijeme snimanja od 3.4 sekunde. Ograničenje memorije ne utječe na ostatak izvještaja o poremećajima (spisak događaja, snimač događaja, indikacije i tip vrijednosti snimača). Maksimalni broj snimaka ovisi o svakom snimku ponaosob te ukupnom vremenu snimanja. Dugo vrijeme snimanja smanjuje broj snimaka na manje od 100. U ovisnosti od tipa kao i od proizvođača releja ovi podaci variraju. Za dobivanje kompletnog izvještaja o poremećaju, koristiti se računalo i software.

Treba još napomenuti da izvještaj o poremećaju bilježi podatke o poremećajima u toku podesivih vremenskih okvira. Vrijeme snimanja važi za cijeli izvještaj o poremećaju. Snimač poremećaja, snimač događaja i funkcija indikacije registra poremećaja i događaja čine ukupno vrijeme snimanja. Ukupno vrijeme snimanja (tRecording) snimljenog poremećaja može se prikazati kao:

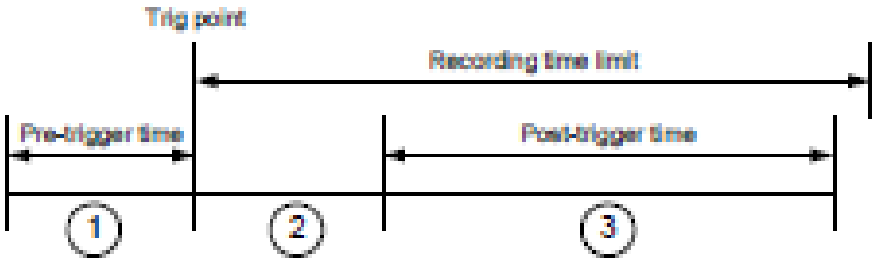
$$tRecording\ vrijeme = Pre\text{-}trigger\ + tFault + Post\text{-}trigger\ vrijeme$$

ili

$$tRecording\ vrijeme = Pre\text{-}trigger + vrijeme\ snimanja$$

(ovisno o tome koji kriterij zaustavlja snimanje trenutnog poremećaja).

Grafički je to prikazano na slici 4.17.



Slika 4.17. *Definirano vrijeme snimanja*

Od broja analognih i digitalnih ulaza-signala koji se prate ovisi i dužina snimka. U konkretnom slučaju koji je obrađen u ovoj disertaciji dužina snimka je veoma bitna iz razloga što povećanje vremena snimanja automatski daje bolju rezoluciju, uz uvjet da se osigura konstantnost mjerene veličine tijekom cijelog snimanja. U tom slučaju analiza spektralnom analizom statorske struje,

korištenjem brze Fourierove transformacije (FFT) se provodi izrezivanjem dijela spektra koji je zanimljiv (tzv. *ZOOM FFT*).

Start snimka se može ostvariti na tri načina:

- Ručno okidanje
- Pomoću binarnog signala (logika 1 ili logika 0)
- Pomoću analognog signala (prekoračenjem gornje ili donje granice neke analogne veličine)

Ispunjenjem bilo kojeg od navedenih okidača otpočinje snimak na rekorderu. Važno je odabrati pravi signale kao uvjet okidanju. U konkretnom slučaju korišten je ručni trigger i trigger pomoću analognog signala.

Disturbance rekorder je u ispitivanjima obavljenim u ovoj disertaciji korišten u svrhu:

- pravljenja snimaka stacionarnog režima rada VN EMP-a (jedne statorske struje) za potrebe metode spektralne analize statorske struje,
- pravljenja snimaka zaleta VN AKM (sve 3 struje i sva 3 napona),
- pravljenja snimaka prorade odgovarajućih zaštita.

4.3.6. Temelji primjene suvremenih zaštita teških EMP

Osuvremenjivanjem postrojenja i ugradnjom numeričkih releja ostvaruju se slijedeći ciljevi:

- pouzdano funkcioniranje postrojenja,
- poboljšanje funkcije električnih zaštita u pogledu pouzdanosti i selektivnosti,
- povećanje stupnja sigurnosti pogonskog osoblja pri rukovanju postrojenjem u skladu sa tehničkim normama,
- znatno smanjenje obima održavanja i troškova eksploatacije,
- upravljanje postrojenjem sa jednog mjesta korištenjem SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) sustava daljinskog nadzora i upravljanja,
- Korištenje numeričkih releja u postrojenjima EMP u dijagnostičke svrhe

5. DIJAGNOSTIČKE METODE ZA OTKLANJANJE KVAROVA NA ROTORU VN ASINKRONIH KAVEZNIH MOTORA

Trofazni asinkroni motori su daleko najrasprostranjeniji u električnim pogonima u industriji. Prema broju ugrađenih jedinica u svijetu danas, premašuju sve ostale električne motore. Mnogi od njih se upotrebljavaju u značajnim i veoma osjetljivim pogonima u elektranama, rudnicima, kemijskoj industriji, cementarama, željezarama itd. Razvojem uređaja energetske elektronike učinjen je značajan napredak i u pogledu poboljšanja upravljačkih karakteristika ovih motora. Neželjena pojava kvara pogonskog motora može prouzročiti velike materijalne štete i zastoje procesa različitih vrsta.

U pravilu su ovi motori izloženi raznim električnim, mehaničkim i termičkim naprezanja. To je najčešće slučaj zbog brojnih pokretanja i zaustavljanja, ili pak rada motora pod različitim uvjetima opterećenja, što dovodi do proticanja ogromne struje u kolu rotora. To ima za posljedicu nastanak raznih poroznosti u rotoru. Poroznost je jedan od nedostataka koji je nevidljiv golim okom. To predstavlja početnu fazu lomljenja štapova koji se nalaze u rotorskom lim paketu. Određeni nivo poroznosti se može tolerirati, ali ako se poroznost akumulira na jednom mjestu onda to može dovesti do stvaranja pukotina i na koncu oštećenja štapova [40].

To ima za posljedicu nastanak asimetričnog rotorskog magnetskog polje i izaziva pulsiranje u brzini vrtnje i u brzini obrtnog momenta. Kao rezultat nastaju velike vibracije, velika buka i prekomjerno grijanje u motoru. To može također rezultirati nastankom oštećenja ležaja motora, oštećenja rubova rotora i statora, uzrokujući potencijalno oštećenje rotorske jezgre kao i statorske izolacije. Obzirom da oštećeni rotorski štapovi spadaju u je tzv. nevidljive greške i da te greške ne izazivaju nikakve neposredne štete na motorima, identifikacija i dijagnoza kvara na izolaciji predstavlja izazovan zadatak za inženjere koji rade na održavanju. Da bi se to postiglo, potreban je jednostavan, isplativ i pouzdan sustav za praćenje stanja motora.

Istraživanja kvarova na motorima daju podatak da se na greške koje se odnose na rotor motora, koje je sproveo IEEE odnosi 8%, (Električni Institut za istraživanje Power (EPRI) 9%. Oba istraživanja su usmjerena na motore srednjih veličina. Za velike AKM srednjeg i visokog napona taj postotaka ide i do 13% [42]. Kvarovi na rotoru su izraženiji kod srednjih i velikih strojeva nego kod malih strojeva. To je tako zbog činjenice da se motori ove kategorije obično koriste tamo gdje su potrebni veliki zamašni momenti i gdje su uvjeti rada teški, gdje su velika termička naprezanja gdje su velike struje pokretanja i time su i šanse za grešku rotora veće. Zbog

svega toga stalni nadzor ovih mašina pomaže da se izbjegne nastanak preranog kvara. U konvencionalne metode koje su se koristile u prošlosti za otkrivanje kvarova na rotorskim štapovima AKM spadaju:

- mjerenje temperature,
- infracrvena snimanja,
- mjerenje aksijalnog toka,
- mjerenje brzine,
- mjerenje radio frekvencijom (RF) za praćenje emisije,
- zvučne metode itd.

Detekcija kvarova na osnovu ovih konvencionalnih metoda je invazivna, dugotrajna, skupa i manje pouzdana.

Korištenjem sustava neprekidnog (on-line) nadzora mogu se dobiti podrobne informacije o stanju električnog motora, odnosno cjelokupnog EMP. Ovi sustavi su korisni naročito za službe koje se bave održavanjem pogona mada se u zadnje vrijeme uvode i u proizvodne linije motora kao segment završne kontrole motora. Razvoj na ovom polju u svijetu je zadnjih godina znatno inteziviran. Naime postoje više različitih metoda kojima je moguće ustanoviti čitav niz kvarova električnih motora.

Ne treba zanemariti činjenicu postojanja čitavog niza, u najmanju ruku, sumnjivih i netočnih eksperimentalnih rezultata u svjetskoj literaturi koja sigurno nisu polučila dobre rezultate sukladno sa teoretskim razmatranjima. U tom smislu potrebno je dati kritički osvrt na ovakva istraživanje uz zahtjev provjere dobivenih rezultata [40,43,44,45].

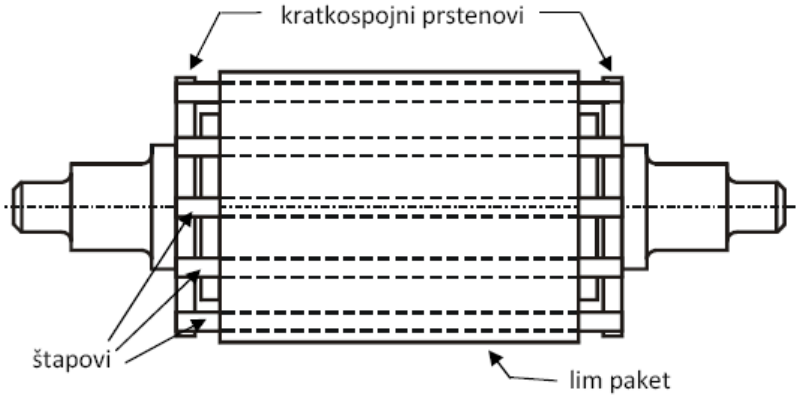
Sve to ukazuje da su ove metode još u „povoju“ i da se dobri i efikasni rezultati ovih metoda tek očekuju u skorijoj budućnosti.

5.1. Kvarovi VN asinkronih kaveznih motora

Kavezni asinkroni motori, zbog svoje robusne i veoma jednostavne izvedbe predstavljaju temelj većine modernih elektromotornih pogona. Uporabom suvremenih frekventnih pretvarača koji se rade već i za velike snage, riješen je dugogodišnji problem veoma skupog upravljanja brzinom vrtnje ovih motora. VN AKM predstavljaju najčešće pogonske motore najvažnijih EMP čiji bi ispad izazvao ogromne posljedice za kompletne procese rada. Također uporabom kompaktnog sustava izolacije za namote statora postignuta je velika sigurnost u radu i gotovo su isključene mogućnosti kvarova na statorskim namotima asinkronih kaveznih 6 kV motora.

Navedenim sustavom izolacije postignuta je velika mehanička čvrstoća glava namota te stoga nema bojazni nastanka kvara čak i kod ekstremnih uvjeta upuštanja motora. Pri teškim uvjetima pokretanja najviše su izloženi oštećenjima i kvarovima namoti rotora kaveznih motora jer se veliki iznosi gubitaka energije u namotu rotora pretvaraju u toplotnu što ima za posljedicu prekomjerno zagrijavanje [46,47,48,49].

I pored toga što na prvi pogled izgleda da su kavezni rotori (slika 5.1.) tako robusni i da ne postoji mogućnost njihovog oštećenja ipak to nije slučaj. Iako proizvođači elektromotora isporučuju asinkrone motore sa kvalitetnim rotorima, kako u mehaničkom tako i u električnom pogledu, često se u pogonu javljaju oštećenja kaveznih rotora, posebno kod velikih asinkronih motora. Zbog toga je potrebno kontrolirati kvalitetu kaveznih rotora i posvetiti veliku pažnju tome, jer u protivnom može doći do vrlo teških oštećenja cijelog motora.



Slika 5.1. *Pojednostavljeni prikaz kaveznog rotora*

U slijedećih par rečenica će se analizirati rotor asinkronih VN kaveznih motora. Osnovni dijelovi kaveznih rotora su: osovina, željezni lim paket, kavezni namot (štapovi i kratkospojni prstenovi) i dva ventilatora.

Osovina je izrađena sa jednim ili dva slobodna kraja za spajanje sa radnim mehanizmom. Dimenzije osovine odabiru se prema veličini zakretnog momenta koji prenosi, uzimajući u obzir i naprezanja u kratkom spoju. Lim paket rotora sastoji se od dinamo limova debljine 0,5 ili 0,63 mm. Rotorski limovi (lamele) su uvijek jednodijelni. Pri proizvodnji ili popravci rotorski lim paket se presuje u uređaju za paketiranje pomoću dva prstena. Prstenovi na vanjskom rubu imaju tlačne prste koji prenose pritisak na zube limova. Posebno je važno da limovi budu dobro presovani jer se na taj način sprečavaju vibracije limova i zubi i tako se znatno smanjuje buka motora. Na vanjskom dijelu limova nalaze se utori u koje se ulažu štapovi. Kod velikih motora

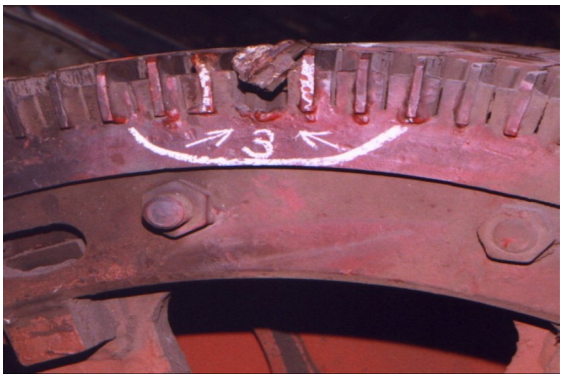
na unutarnjem dijelu rotora izrezan je utor u koji se postavlja klin za učvršćenje željeznog lim paketa na osovinu.

Na velikim rotorima skoro uvijek postoje rupe za aksijalno strujanje zraka, kao i procjepi (otvori) između segmenata lim paketa koji služe za radijalno strujanje zraka. U otvore na vanjskom rubu lim paketa ulažu se štapovi i tvrdo se leme za kratkospojne prstenove. Općenito je kavez napravljen iz vučenih bakarnih profila. Pri posebnim, teškim električnim i mehaničkim uslovima rada, npr. pri teškim zaletima, za izradu kaveza primjenjuje se materijal koji ima visoke zahtjeve, kao što je bronca ili mesing. S obje strane lim paketa rotora pričvršćeni su aksijalni ventilatori. Oni mogu biti izrađeni za oba smjera vrtnje ili samo za jedan smjer vrtnje.

Najčešći uzroci oštećenja i kvarova namota rotora kod kaveznih asinkronih motora nastaju pri teškim uvjetima pokretanja. Općenito može se reći da svi zaleti koji traju duže od 10 sekundi su teški zaleti. Uslijed velikog naprezanja materijala kod teških zaleta dolazi do oštećenja nekvalitetnih i nepravilno dimenzioniranih kaveznih rotora. Kavezni namot trofaznih asinkronih motora izložen je djelovanju centrifugalnih, termičkih i elektromagnetnih sila. Termička naprezanja materijala od kojeg je izrađen kavez igraju pri tome presudnu ulogu [28].

Za vrijeme pokretanja pojedini dijelovi namota rotora se različito zagrijavaju. U zavisnosti od izvedbe namota rotora, koji su većinom sa dubokim rotorskim štapovima radi postizanja određenih karakteristika momenta motora za vrijeme pokretanja nastaju veća ili manja potiskivanja struje u štapovima rotorskog kaveza. Potiskivanje struje će se mijenjati od svog maksimalnog iznosa kod klizanja $s=1$ do zanemarivog iznosa kod nominalnog klizanja s_n. Želi li se to slikovito prikazati, to bi bilo kao da je za vrijeme pokretanja radni otpor vanjskih dijelova štapova veći, a veći otpor je uzrok većeg zagrijavanja. Gledajući štapove po dužini, veća zagrijavanja vanjskih strana štapova ima za posljedicu savijanje štapa. Ova savijanja dalje uzrokuju naprezanja, što može imati za posljedicu pucanja i oštećenja [47,50,51]. Najčešća oštećenja su na mjestima spojeva štapova sa kratkospojnim prstenovima (slika 5.2.) jer se na tim mjestima superponiraju i naprezanja nastala povećanjem prečnika prstena uslijed zagrijavanja. Ovakva oštećenja i kvarovi rotora su naročito izraženi kod motora sa dvokaveznim rotorima a pogotovu ako su oba kaveza spojena jednim kratkospojnim prstenom. Gornji štapovi su, kod dvokaveznih rotora, u pravilu tanki i napravljeni od materijala velikog specifičnog otpora. Ovakva konstrukcija je nužna zbog postizanja što manje struje kratkog spoja i što većeg poteznog momenta. Kod pokretanja važno je djelovanje gornjeg kaveza, a kako on ima malu masu to će biti veliko zagrijavanje njegovih štapova. Problem je još veći ako znamo da su štapovi uloženi, te da je time odvođenje toplote sa štapova na željezo paketa rotora otežano.

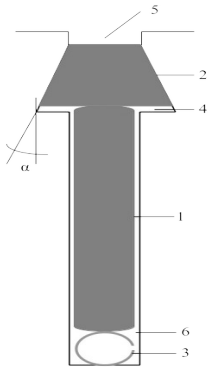
Primjer oštećenja kaveza jednog VN motora prikazan je na slici 5.2. (autentična slika napravljena u Remontnoj radionici „Elektroremont“ – Banovići).



Slika 5.2. *Oštećenje kaveznog rotora*

Proizvođači na razne načine sprečavaju oštećenja i kvarove na rotorskom namotu kaveznog 6 kV motora. Mjere za sprečavanje nastanka uzroka oštećenja svode se na smanjenje zagrijavanja ili razlika u zagrijavanjima pojedinih dijelova rotorskog namota. Također se nastoji omogućiti što veća elastičnost spojeva na kritičnim mjestima gdje najčešće dolazi do pucanja i oštećenja (spojevi štapova sa prstenovima i izlasci štapova iz paketa). Oblicima rotorskih štapova i utora postiže se smanjenje razlike u zagrijavanju pojedinih dijelova kaveznog namota. Ukoliko rotorski štapovi dobro naliježu na željezo rotorskog paketa tada postoji dobro odvođenje toplote a samim tim i manje zagrijavanje štapova. Iz tih razloga izrađuju se trapezni štapovi koji dobro naliježu na željezo. Inače se zbog efekta potiskivanja struje koji je već ranije objašnjen više zagrijava gornji dio štapa. Elastičnost štapa od paketa do kratkospojnog prstena se postiže proširenjem utora na krajevima paketa. Potpunu elastičnost štapa je također moguće postići pomoću pletenica, međutim to je veoma skupo rješenje i veoma komplicirano. Zbog toga se danas izrađuju rotori, jednostavni za izradu kod kojih je problem oštećenja sveden na minimum [51,52].

Primjena kaveznih motora kod teških pogona može se između ostalog ostvariti primjenom rotora specijalne izvedbe sa "slobodnim" gornjim kavezom. Na slici 5.3. prikazan je presjek oblika utora rotora sa "slobodnim" kavezom.



Slika 5.3. *Presjek oblika utora sa „slobodnim“ kavezom*

Donji (radni) kavez (1) odgovara u potpunosti kavezu normalne izvedbe. Oblik utora rotora je nešto izmijenjen. Donji dio utora (6) je pravokutnog oblika i u njega je smješten štap (1) donjeg kaveza i elastično pero (3) za potiskivanje štapa gornjeg kaveza (2). Gornji dio utora je trapeznog oblika i u njega je smješten štap gornjeg kaveza (2) koji je također trapeznog oblika. Kose stranice utora i štapa imaju isti ugao α zbog boljeg odvođenja toplote sa štapa na paket i što manjeg prijelaznog otpora poprečnim strujama. Visina trapeznog dijela utora je za nekoliko milimetara veća od visine trapeznog štapa radi lakšeg ulaganja štapova. Otvor utora (5) je u pravilu jednak širini donjeg pravokutnog dijela utora (6) radi jednostavnijeg ulaganja donjih štapova. Štapovi se nakon ulaganja učvršćuju elastičnim perima (3) koja su smještena ispod donjih štapova a mogu također biti i između štapova. Gornji štapovi nisu spojeni sa kratkospojnim prstenima i predstavljaju „slobodni“ kavez i kroz njih teku vrtložne i poprečne struje. Vrtložne struje teku samo u štapovima dok se poprečne struje zatvaraju preko limova paketa rotora [47].

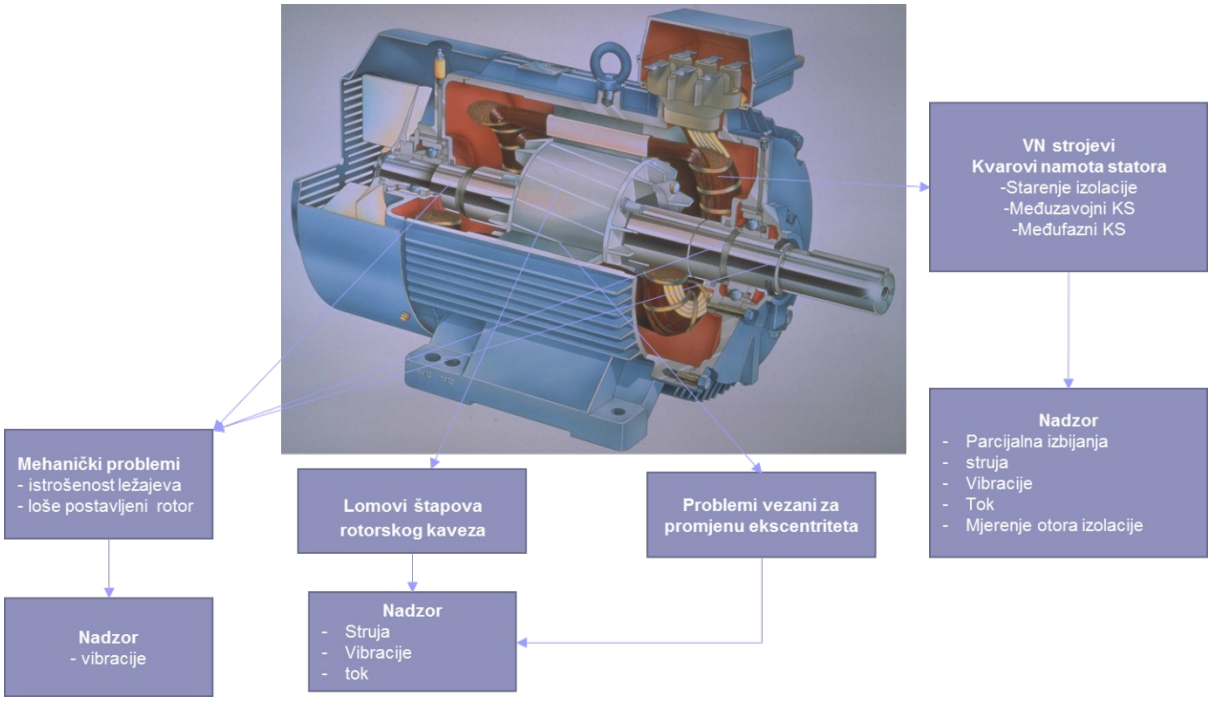
Kod normalne izvedbe rotora karakteristike momenata i struje postiže se određenim međusobnim omjerom dimenzija utora i štapova rotora. Kod specijalne izvedbe rotora proširena je mogućnost podešavanja karakteristika uporabom raznih materijala za gornje štapove i promjenama smještaja donjih štapova.

Glavni uzrok naprezanja materijala uzrokovanog toplinskim silama je nejednoliko zagrijavanje pojedinih dijelova kaveza. Prsten i štapovi zagrijavaju se za vrijeme zaleta motora nejednoliko, jer samo dijelovi štapova koji se nalaze u željeznom lim paketu predaju svoju toplinu dalje na željezni lim paket. Međutim, oni dijelovi štapova koji se ne nalaze u lim paketu, neposredno uz kratkospojni prsten, nemaju kome predati svoju stvorenu toplinu, osim okolnom zraku. Pošto je taj dio štapova slabije hlađen nego dio štapova koji su u lim paketu, tako nastaje nejednako istezanje u aksijalnom smjeru koje ima za posljedicu slabljenje rotorskog lim paketa i pucanja štapova ili njihovog odvajanja od prstena. Pogotovo su termička naprezanja na

krajevima štapova izražena kod dobro učvršćenih kaveza. Promatrano u radijalnom smjeru prstenovi i željezni lim paket sa štapovima zagrijavaju se nejednoliko, uslijed čega nastaju termička naprezanja na krajevima štapova i u kratkospojnim prstenovima. Ako željezni lim paket nije dobro složen i učvršćen, te ako štapovi nisu ugrađeni s najvećom pažnjom može, posebno kod brzohodnih motora, doći do pucanja ili deformiranja krajnjih limova u dnu zuba. Otrgnuti komadići lima udaraju velikom brzinom u statorski namot uslijed čega dolazi do oštećenja namota statora. Kod tvrdo lemljenih kaveza može biti također jako izražena korozija. Oba materijala, materijal kaveza i materijal za lemljenje nisu postojani pod utjecajem agresivne okoline. Posebno kod motora koji imaju unutarnje hlađenje mogu hemijski agresivne supstance ili plinovi utjecati na rotor i oštetiti zalemljena mjesta na kavezu. Vrlo su opasni amonijski produkti, oksidne kiseline, sumpor, sulfidi i mnogi organski spojevi [42].

I pored robusne konstrukcije tijekom eksploatacije VN AKM može doći do njihovog kvara. Obzirom na važnost ovih motora kao glavnih dijelova najčešće teških EMP kvarove je nužno otkriti u najkraćem mogućem vremenu. Pregled najčešćih kvarova dat je na slici 5.4.

Kao najčešći uzroci kvarova asinkronih strojeva pojavljuju se: mogućnost pojave ekscentriciteta, nepravilnosti rotorskog kaveza, velike struje i sile pri pokretanjima, te problemi učvršćenja statorskih namota. Mehanički i električki gledano, u radu motora najteža su prelazna stanja. Za vrijeme pokretanja ili u intermitiranom radu, motor je izložen povećanim električkim, termičkim i mehaničkim naprezanjima. Upravo su to trenuci najčešćeg nastanka kvarova.



Slika 5.4. *Pregled kvarova i metoda dijagnostike*

Težište ove disertacije biti će na dijagnostici kvarova asinkronog motora, posebno kvarova rotorskog kaveza. Većina kvarova kod asinkronih kaveznih motora mogu se svrstati u dvije glavne grupe:

- greške na izolaciji i
- mehaničke kvarove .

Greške na izolaciji se obično manifestiraju kratkim spojevima statorskih namota, dok su mehaničke greške uglavnom povezane sa rotorom ili oštećenjima rotora [53].

Najčešći mehanički kvarovi su: prekinuti rotorski štapovi i prstenovi, oštećenja ležajeva, nepravilni zračni raspor (statički i dinamički ekscentritet), debalans, problemi u rashladnom sustavu, itd.

Različiti su podaci o kvarovima na asinkronim motorima, čak su ponekada i kontradiktorni. U biti, na VN asinkronim motorima najdominantniji su kvarovi u namotu rotora što je i logično obzirom da je to mjesto pretvorbe električne energije u mehanički rad. Analiza kvarova asinkronih motora na 180 motora u stvarnim pogonima dalo je prema [54] slijedeću raspodjelu prema vrsti kvara (tablica 5.1.).

Tablica 5.1. *Postotci kvarova asinkronih motora prema mjestu nastanka*

kvar	% ukupnih kvarova
namota statora	26.50
namota rotora	31.65
paketa statora	9.34
paketa rotora	13.25
vratila i ležajeva	12.94
ostalo	6.32

Kada se govori o kvarovima na rotoru dva su glavni razloga za pojavu električke nesimetrije kratkospojnog kaveza:

- greška u procesu proizvodnje samih kaveza motora. (nečistoće legura)
- oštećenje kratkospojnog kaveza (starenje i zamor materijala, mehanička i toplinska preopterećenja stroja).

Kako je iz teorije poznato konverzija električne energije u mehaničku u elektromotoru vrši se u samom rotoru. Zato je taj dio motora posebno izložen kako mehaničkim tako i termičkim naprezanjima. Ova naprezanja nisu toliko opasna kod lakih pogona, ali kod teških pogona ova

naprezanja mogu izazvati jako velika oštećenja na samom rotoru elektromotora. To je posebno izraženo kod kaveznih asinkronih elektromotora.

Pomenuti EMP imaju teške uvjete pokretanja zbog toga što njihovi radni mehanizmi imaju jako velike zamašne mase, tj. velike momente inercije. Pojam "teški" EMP nije strogo definiran ali se uglavnom ovaj pojam veže za odnos zamašnih masa radnog mehanizma i rotora motora. Pogoni kod kojih je zamašna masa radnog mehanizma 10-20 puta veća od zamašne mase rotora motora zovu se "teški" EMP. Robusne su konstrukcije i građeni su tako da mogu izdržati velika termička naprezanja. Pokretanje kod ovakvih EMP traje veoma dugo, nekada čak i do 100 sekundi [47].

Pri teškim uvjetima pokretanja najviše su izloženi oštećenjima i kvarovima namoti rotora kaveznih motora jer se veliki iznosi gubitaka energije u namotu rotora pretvaraju u toplotu što ima za posljedicu prekomjerno zagrijavanje.

Za vrijeme pokretanja pojedini dijelovi namota rotora se različito zagrijavaju. U zavisnosti od izvedbe namota rotora, koji su većinom sa dubokim rotorskim štapovima radi postizanja određenih karakteristika momenta motora za vrijeme pokretanja nastaju veća ili manja potiskivanja struje u štapovima rotorskog kaveza. Gledajući štapove po dužini, veća zagrijavanja vanjskih strana štapova imati će za posljedicu savijanje štapa. Ova savijanja dalje uzrokuju naprezanja, što može imati za posljedicu pucanja i oštećenja. Najčešća oštećenja su na mjestima spojeva štapova sa kratkospojnim prstenovima (slika 5.5.) jer se na tim mjestima superponiraju i naprezanja nastala povećanjem prečnika prstena uslijed zagrijavanja. Ovakva oštećenja i kvarovi rotora su naročito izraženi kod motora sa dvokaveznim rotorima a pogotovu ako su oba kaveza spojena jednim kratkospojnim prstenom [55].



Slika 5.5. *Detalj oštećenja kaveza na spoju štapa i prstena*

Najteže je u ranoj fazi nastanka kvara otkriti slomljena rotorske štapove ili promjenu njihove provodnosti, zbog nepristupačnosti rotora za mjerenje rotorskih struja tokom rada motora.

5.2. Dijagnostika kvarova i nadzor VN asinkronih motora sa kaveznim rotorom

I pored toga što na prvi pogled izgleda da su kavezni rotori tako robusni i da ne postoji mogućnost njihovog oštećenja ipak to nije slučaj. Iako proizvodači elektromotora isporučuju asinkrone motora sa kvalitetnim rotorima, kako u mehaničkom tako i u električnom pogledu, često se u pogonu javljaju oštećenja kaveznih rotora, posebno kod velikih asinkronih motora. Zbog toga je potrebno kontrolirati kvalitetu kaveznih rotora i posvetiti veliku pažnju tome, jer u protivnom može doći do vrlo teških oštećenja cijelog motora [56].

Dijagnostičke metode za otkrivanje kvarova u rotoru asinkronog stroja mogu se podijeliti u dvije skupine i to:

Off- line metode – motor je van pogona

On- line metode – motor je u pogonu

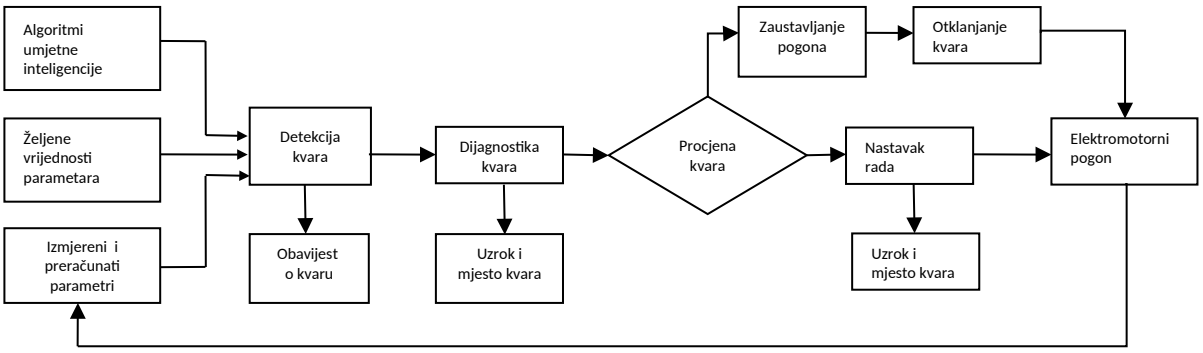
Najpoznatije i najčešće korištene off-line metode su:

- Vizualni pregled motora
- Ultrazvučna metoda
- Ispitivanje motora jednofaznim izvorom napajanja
- Mjerenja otpornosti štapova i prstena
- Ispitivanja primjenom penetrenata
- Specijalne metode korištenjem specijalističkih uređaja

Najpoznatije i najčešće korištene on-line metode su [56]:

- Promatranje titranja kazaljki ampermetra
- Snimanje i analiza promjena u brzini vrtnje rotora
- Snimanje i analiza struja zaleta motora
- Analiza spektra jedne linijske struje namota statora
- Analiza signala s posebnih svitaka ugrađenih u namot statora
- Mjerenja i analiza vibracija statorskog paketa
- Mjerenje i analiza vibracija ležaja motora
- Mjerenje i analiza rasipnog magnetskog toka

Moderan nadzor elektromotornog pogona prikazan je na slici 5.6. Tokom rada na elektromotornim pogonima, osobito onim koji se napajaju preko pretvarača i uključeni su u kontrolnu petlju, kontinuirano se mjere, preračunavaju i uspoređuju parametri , koje su ključni za pravilan rad pogona. Vrijednosti ovih parametara u normalnom radu je u rasponu poznatih ili propisanih granica i oni se određuju na osnovu simulacija ili prethodno testiranih pogona. Kada zbog neispravnosti u radu, neki od parametra počne odstupati od normalne vrijednosti, aktivira se mehanizam djelovanja sa sheme na slici 5.6 i daje odgovarajuća upozorenja o kvaru pogona. Pomoću nadzornog sistema koji sadrži veliki broj ugrađenih poznatih načina funkcioniranja pogona, na temelju algoritama umjetne inteligencije analizira se odstupanje od normalnih vrijednosti mjerene veličine. Budući da u biti mogu biti vrlo različiti kvarovi koji imaju slične ili iste posljedice na rad motora, potrebno je unakrsno učiniti više mogućih dijagnoza koje će s dovoljnom točnošću utvrditi pravi uzrok i mjesto oštećenja pogonskog motora, preopterećenje mrežnog uređaja ili bilo kojeg drugog segmenta kompleksnog industrijskog pogona [14].



Slika 5.6. *Blok shema dijagnostike i nadzora stanja suvremenog elektromotornog pogona*

5.2.1. Off-line metode dijagnostike

Off-line metode dijagnostike kvarova nisu predmetom izučavanja ove disertacije ali će se u ovom poglavlju dati kratki osvrt na neke od njih. Za velike strojeve, naročito one koji rade u važnim EMP čiji prekid u radu može izazvati ogromne posljedice, ove metode i nisu najpopularnije.

Najjednostavnija od ovih metoda utvrđivanja stanja asinkronog stroja je vizualni pregled. Kod ove metode pogon je potrebno zaustaviti a stroj rastaviti.

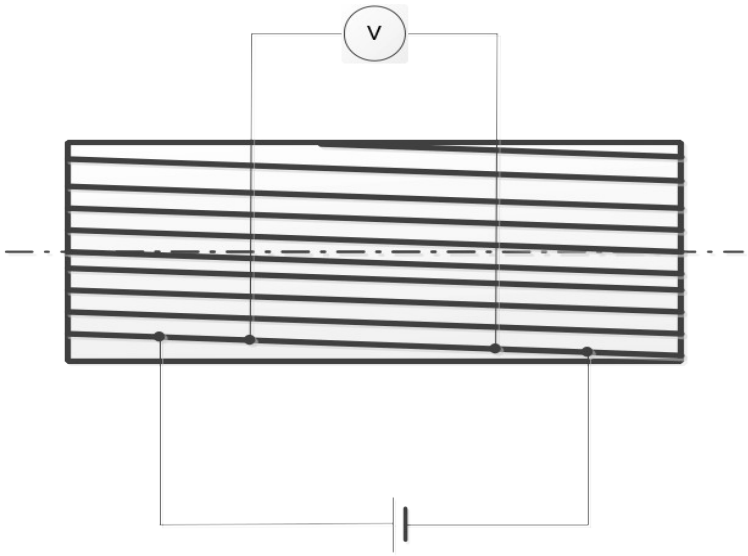
U slučajevima kada je stroj zaustavljen potrebno je pregledati stroj a posebno rotorski paket. Iskrenja, pregrijavanja i loši spojevi vrlo se često mogu locirati na mjestima na kojima su limovi promijenili boju. Kod velikih se pregrijavanja znaju pojaviti i slučajevi otapanja kaveza. Kvarovi

kod kojih je došlo do struganja rotora o stator, uvijek ostavljaju vidljive tragove na oba paketa. U slučaju postojanja dinamičkog ekscentriciteta obično je vidljivo oštećenje na jednom dijelu rotorskog paketa i cijelim obodom statorskog provrta. Ako je do struganja došlo uslijed magnetske neuravnoteženosti, struganje obično ostavi tragove na cijelom rotorskom paketu ali na statorskom provrtu samo na jednom mjestu. Pažljivim promatranjem ovakvih pokazatelja, može se steći gruba procjena stanja kao i uzroka kvara [57].

Primjena penetranata je metoda kojom se olakšava pronalaženje sitnih pukotina na štapovima i kratkospojnim prstenovima. Penetranti su specijalne tekućine ili sprejevi (britemor, hidrofilan), kojima se prska rotor stroja. Penetrant se uvuče u pukotine, koje onda postaju vidljive.

Ultrazvuk je također jedna od metoda za provjeru kaveza motora. Pomoću nje je moguće otkriti pukotine koje nisu vidljive golim okom. Osim toga pomoću nje moguće je detektirati pukotine koje su u radu kada je stroj zagrijan, zatvorene, odnosno pojavljuju se u hladnom stanju. Ovu metodu je moguće provesti isključivo kada je stroj rastavljen.

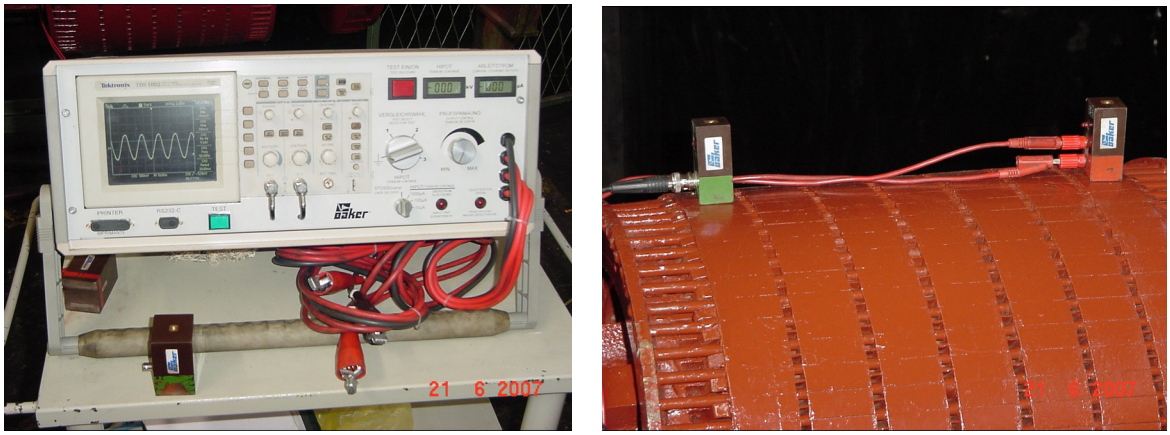
Lomovi na štapovima asinkronog kaveznog motora se mogu otkriti i mjerenjem otpora U-I metodom. Za provođenje metode potreban je izvor DC napona i precizni voltmetar. Mjerenja se provode na segmentima štapa, a ne za cijeli štap odjednom (slika 5.7.). Ovakav način mjerenja omogućuje točnije lociranje mjesta kvara [58].



Slika 5.7. *Mjerenje otpora štapova i prstena na asinkronim kaveznim motorima*

Pored toga, veoma je bitno utvrditi provodnost kako zamijenjenih tako i starih štapova. To može biti veoma bitno jer su česta napuknuća štapa u samom utoru koja su slabo ili gotovo nikako vidljiva golim okom. Posebna pažnja mora se posvetiti napuklinama u štapovima, prstenovima i na spojevima štapova i prstenova. U području napuklina ili prekida zbog

povećanog otpora teče smanjena struja, ali pored toga, zbog jako povećanog električnog otpora, ta se mjesta jako zagrijavaju. Prekid štapa ili kontakta uzrokuje to da se struje između susjednih štapova zatvaraju kroz zube rotorskog lim paketa. Uslijed jakog lokalnog zagrijavanja površina rotora na tim mjestima postaje plava, smeđa ili žuta. Budući da je električna vodljivost svih štapova istog kaveza jednaka, mjerene razlike u vodljivosti uzrokovane su nejednakim kontaktnim otporom štap-prsten. Na taj način može se vrlo efikasno i točno provjeriti stanje i kvalitetu zavarenih mjesta na kavezu. Kako svi štapovi moraju imati istu električnu vodljivost, logično je da će se napuknuti ili prekinuti štapovi razlikovati, što se tiče električne vodljivosti, u odnosu na druge. Naravno, sve ovo može se iskoristiti da se utvrdi stanje kaveza, odnosno rotora. Postoji više instrumenata pomoću kojih se ovo utvrđuje, a jedan od njih je instrument model "DSX12-RT" firme BAKER, koji je prikazan na slici 5.8.a. [56]



Slika 5.8. *a) BAKER instrument; b) Položaj senzora za ispitivanje provodnosti štapova*

Nehomogeni varovi i varovi sa premalo materijala imaju povećane kontaktne otpore štap-prsten. Kod vrlo dobrih rotora odstupanje vodljivosti pojedinih štapova treba biti otprilike u granicama ±5%, od srednje vrijednosti svih štapova kaveza, a kod još upotrebljivih kaveznih rotora vodljivost pojedinih štapova treba biti u granicama ±10%. Pomoću BAKER instrumenta moguće je snimiti odzive pojedinih štapova na kavezu pretvorene u naponske signale (mV). Naime, metoda se sastoji u tome da se koriste dva senzora. Jedan je pobudni, a drugi je mjerni. Pobudni senzor generira neku struju kroz kavez putem elektromagnetne indukcije. Na drugom kraju kaveza postavlja se mjerni senzor koji hvata signal generiran u pobudnom senzoru preko kaveza, odnosno preko svakog štapa pojedinačno, i pretvara ga u naponski signal (mV). Položaj senzora za ispitivanje provodnosti štapova na kaveznom rotoru prikazan je na slici 5.8.b [56].

Za rotor koji se ispituje potrebno je formirati tabelu u koju će se unositi podaci očitavani sa displeja instrumenta. Svaki štap se mora pojedinačno

ispitati i njegov odziv se mora unijeti u tabelu. Tabela ima onoliko redova koliko kavez ukupno ima štapova. Odziv štapova na displeju prikazuje se u mV. Vrlo je bitno da prilikom ispitivanja svakog slijedećeg štapa položaj senzora bude kao pri ispitivanju prethodnog, odnosno treba držati uvijek istu udaljenost između senzora. Ako su štapovi kaveza u dobrom stanju njihov odziv će biti približno isti i neće biti ekstremno velikog odstupanja. Ukoliko se prilikom ispitivanja naiđe na napuknuti štap, njegov odziv će drastično odstupati po amplitudi od odziva drugih štapova u kavezu i to mjesto se dodatno pregleda i obilježava. Ako je štap vidljivo oštećen (napuknuće ili totalni prekid), naravno, takav kavez je potrebno remontirati [59].

Ispitna oprema firme "BAKER" omogućuje mjerenje vodljivosti svakog pojedinog štapa u kratkospojnom kavezu. Sva mjerenja vrše se na samom rotoru, bez statora i bez ležajnih štitova. Rotor se postavlja na stalak da bi se mogao zakretati za vrijeme ispitivanja i da bi se na svaki štap mogao postaviti pobudni i mjerni senzor.

Jedna od off line metoda je i kontrola rotacijom pri jednofaznom napajanju. Ova metoda provodi se kada stroj nije u vrtnji ali ne zahtijeva rastavljanje stroja. Na dva motorska izvoda priključi se jednofazni napon iznosa cca. 5-10 % nazivnog napona. Rotor stroja zakreće se rukom i pri tome se pomoću strujnih kliješta promatra struja napajane faze. U trenutku kada slomljeni rotorski štap dođe u položaj ispod napajanog para polova, pojaviti će se titranje struje. Ovaj test nije uvijek moguće provesti.

5.2.2. On line metode dijagnostike

Promatranje titranja kazaljki ampermetra predstavlja najjednostavniju on line metodu detekcije kvarova na AKM. Treba istaći da se u slučaju oštećenja rotorskog kaveza u okretnom polju javlja inverzna komponenta struje protjecanja. Ta se komponenta odražava na statorsku struju što se može uočiti titranjem kazaljki ampermetara. Dodatna je komponenta struje proporcionalna klizanju, pa je i titranje kazaljki ovisno o njemu [40].

Sljedeća značajna on line metoda je metoda analize vibracija. Vibracije su kao dijagnostički signal dosta raširene. One predstavljaju mehaničke oscilacije u odnosu na referentnu poziciju. Vibracije nastaju kao rezultat dinamičkih sila u pokretnim dijelovima asinkronog motora. Osnovni parametri vibracije su amplituda, brzina i ubrzanje vibracije.

Vibracije kod asinkronih motora su generalno nepoželjne iz razloga što:

- intenziviraju proces habanja svih pokretnih elemenata,
- izazivaju lom mehaničkih komponenata,
- dovode do slabljenja razdvojivih veza,
- dovode do otkaza elektroničkih komponenata i sustava u cijelosti,
- dovode do oštećenja izolacije kablova koji se dodiruju,
- prouzrokuju buku i
- izazivaju oštećenja i oboljenja kod čovjeka.

Veliki dio otkaza asinkronih motora praćen je povećanjem vibracija motora ili pojedinih njegovih dijelova. U slučaju mnogih nepravilnosti vibracije mogu biti pouzdani pokazatelji istih. U današnje vrijeme mjerenje vibracija je jedna od najvažnijih dijagnostičkih metoda za asinkrone motore.

Kod vibracija asinkronih strojeva mjere se tri osnovne veličine [57]:

- amplituda vibracija (od 0 do 10 kHz),
- brzina vibracija (od 10 Hz do 10 kHz),
- ubrzanje vibracije (od 1 kHz do >100 kHz).

Vibracije asinkronih motora mjere se u tri smjera, tj. u tri međusobno okomite ravni (horizontalnoj, vertikalnoj i aksijalnoj). Mjerenje vibracija strojeva provodi se vibrometrima, proksimetrima, akcelerometrima. To je najjednostavniji način da se opiše stanje motora putem brojne vrijednosti vibracije.

Kod asinkronih strojeva vibracije predstavljaju periodičke vremenske funkcije, što znači da se mogu rastaviti na harmonijske (sinusne) funkcije. Za svaki harmonik je moguće odrediti amplitudu pomjeranja (izraženu u μm) i fazni pomak (izražen u stupnjevima) u odnosu na referentnu točku tako da vibraciju stroja možemo mjeriti i korištenjem spektralne analize. Na tržištu postoji veliki izbor opreme s kojom je moguće izmjeriti frekventni spektar vibracija. Frekventni spektar vibracija u najvećem broju slučajeva daje detaljniju informaciju o stanju stroja (nivoima vibracija koje uzrokuje svaki pojedinačni rotirajući element), pa je moguće locirati izvore vibracija i izvršiti dijagnostiku motora [56].

Prednost mjerenja vibracije frekventnom analizom ogleda se u činjenici da se u frekventnom spektru javljaju promjene u slučaju niza otkaza, pa se iz jednog mjerenja može donijeti sud o stanju različitih dijelova motora.

Nažalost, upravo činjenica da svaki otkaz asinkronog motora ostavlja trag na spektru, čini donošenje suda o točnoj prirodi otkaza složenom i zahtijeva povećani oprez.

Izmjereni signal vibracija sadrži informacije o stanju motora, koje je daljom obradom moguće rekonstruirati. Snimljeni signal najčešće se promatra u frekvencijskoj domeni (obrada FFT-om).Važno je uzeti u obzir da svaki motor ima svojstveni karakteristični spektar vibracija. Da bi se signal vibracije mogao iskoristiti kao dijagnostička veličina, važno je mjerenja obavljati u pravilnim vremenskim intervalima, a svaka promjena spektra može ukazivati na otkaz. [60].

Jedna od značajnijih on line metoda je i metoda snimanje aksijalnog rasipnog toka [48]. Čak i u slučaju kada se radi o ispravnom stroju, svaki stroj sadrži određene nesimetrije. Nesimetrije nastaju kao posljedica izrade, nejednolike debljine ili kvalitete materijala u svim dijelovima. Posljedica su pojave da se protjecanje u jednom dijelu glava namota, razlikuje od protjecanja u dijelu koji je smješten dijametralno na obodu motora. Rezultat te razlike je pojava aksijalnih tokova u osovini stroja. Ukoliko se mjerni svitak postavi koncentrično na osovinu (osovina prolazi kroz zavojnicu) u njoj se inducira napon zavisan o aksijalnim tokovima. Snimanjem i spektralnom analizom tog napona, može se otkriti niz problema i kvarnih stanja; oštećenja štapova kaveznih motora, gubitak jedne faze napajanja, ekscentricitet itd. Ova je metoda nedestruktivna i jednostavno primjenjiva korištenjem računala. U slučaju pojave kvara (statora ili rotora), nesimetrija motora se povećava i mijenja se i aksijalni tok. Jednako tako svaka promjena magnetskog kruga motora (koja nastaje na primjer kod pojave ekscentriciteta) odraziti će se i u aksijalnom toku.

Kako svaki kvar rotorskog kaveza ima za posljedicu i promjenu polja u zračnom rasporu, promijeniti će se i ukupno polje u motoru. Takva promjena osjetiti će se i u rasipnim tokovima. Ukoliko se mjerni svitak postavi na bilo kojem dijelu motora na kojem postoje rasipni tokovi, u njemu će se inducirati napon. Snimanjem i analizom induciranog napona moguće je dijagnosticirati pojavu kvarova u rotorskom kavezu [61].

Dijagnostika stanja asinkronog motora mjerenjem aksijalnog toka svodi se na promatranje promjene spektra toka. Aksijalni tok u sebi sadrži dvije komponente; komponentu statorske i komponentu rotorske struje. Prema tome, da bi se mogle ustanoviti nesimetrije neophodno je poznavati mrežnu frekvenciju kao i frekvenciju rotorskih struja, odnosno klizanje.

Vidljivo je da čak i u slučaju simetričnog i ispravnog motora, polje u rasporu i aksijalni tok, sadrže i frekvencije koje ovise o klizanju. Kako u praksi uvijek postoje određene nesimetrije, ove dodatne frekvencije pojaviti će se i u aksijalnom rasipnom toku. U slučaju kada se pojave dodatne nesimetrije, javljaju se i dodatne frekvencijske komponente. Naime svaka pojava dodatne nesimetrije uzrokuje pojavu inverznog protjecanja, što se odražava i na frekvencijskom

spektru struje. Općenito, sve promjene koje se uslijed nesimetrije pojavljuju u struji, moraju se odraziti i na aksijalnom toku.

Harmonijskom analizom aksijalnog toka moguće je otkriti i kvarove statorskog namota. Metoda dijagnosticiranja spektralnom analizom aksijalnog toka još se razvija. Nedostaci metode su zahtjevi za specijaliziranom opremom, te nedovoljna provjerenost metode [58,61,62,63].

Kao dijagnostičke veličine mogu se koristiti inducirani osovinski napon i ležajne struje. Osovinske struje se uobičajeno mjere i zbog toga što kod velikih motora, one mogu poprimiti iznose koji oštećuju ležajeve. Osovinski naponi i struje induciraju se zbog postojanja aksijalnih tokova kao posljedica nesimetrija.

Mjerenja osovinskih struja ili napona ipak nisu najpogodnija metoda dijagnostike stanja. Naime pri malim strujama, prijelazni otpori između osovine i četkica su preveliki da bi se osjetile male promjene. Kroz praksu se dešavalo često da su se kvarovi u motoru razvili i do većih razmjera a prije nego su uočene promjene u struji i naponu korištenjem ove metode. Zbog toga se osovinske struje mjere povremeno iz razloga da ne dostignu vrijednosti opasne za ležajeve [62,64,65,66,67].

Metoda snimanja rotorske struje se u pravilu koristi kod klizno kolutnih asinkronih strojeva. To je razlog što se u ovoj disertaciji neće posebno obrađivati.

Kada se govori o analizi razvijenog momenta i brzine vrtnje kao metode dijagnostike kvarova rotora AKM treba istaći da se slomljeni štapovi rotora odražavaju između ostalog i na oscilacije razvijenog momenta i brzine vrtnje. U simetričnom trofaznom asinkronom motoru, direktna komponenta okretnog polja djeluje na rotorske štapove protjecanje strujama ovisnim o klizanju i stvara jednoliki izlazni moment. U slučaju oštećenja rotorskog kaveza, pojavljuje se inverzna komponenta okretnog polja. Inverzna komponenta stvara dodatni moment čija vrijednost oscilira dvostrukom frekvencijom klizanja. Ovaj se dodatni moment sumira sa osnovnim momentom. Snimanjem i spektralnom analizom moguće je uočiti pojavu dodatnih harmonika, koji ovise o klizanju. Ovaj dodatni moment povećava vibracije i buku [68,69].

Detekciju električne nesimetrije kratkospojnog kaveznog rotora asinkronog motora metodom analize dinamičkog momenta omogućuje kvalitetan mjerni sustav kao i poboljšana programska oprema mjerača, koji je u osnovi namijenjen mjerenju karakteristike okretnog momenta asinkronog motora u toku zaleta. Ovakav sustav se koristi za mjerenje momenta brzine rotacije i momenta ubrzanja sa dosta visokom rezolucijom uz mogućnost složenijeg prikaza slike događanja u ispitivanom motoru.

Aktivnosti i istraživanja u području otkrivanja i dijagnostike kvarova asinkronih motora zadnjih godina su vrlo intenzivna što se vidi iz velikog broja objavljenih radova i rasprava o rezultatima i novim saznanjima. Nova teorijska razmatranja uz primjenu računarskih sustava znatno su doprinijela dostignutim poboljšanjima u ovoj oblasti. Najviše naučnih rasprava izaziva uporaba eksperimentalnih ispitivanja u otkrivanju najčešćih kvarova motora, odnosno elektromotornih pogona. Cilj je svakako izbjeći neočekivane ispade važnih elektromotornih pogona iz procesa rada.

Valovitost i frekventni sadržaj dinamičkog momenta daje informaciju o broju nepravilnosti u stroju, što može biti posljedica dužeg rada motora ili pak loše izrade motora, loše kvalitete materijala i greške u proizvodnom procesu. Među pogreške koje imaju loš utjecaj kod dinamičkog režima rada motora svakako spada i neujednačeni zračni raspor koji nastaje kao rezultat olabavljene osovine ili nedovoljno izbalansiranog rotora motora, oštećeni ili prekinuti kratkospojni prstenovi ili veze prstenova i štapova kaveznog rotora motora. U većini slučajeva, navedene pogreške je veoma teško otkriti, pogotovo kod obavljanja većine formalnih testiranje motora. Kao dokaz toj tvrdnji je klasično mjerenje karakteristike okretnog momenta tereta, kojim mjerimo samo srednju vrijednost proizvedenog momenta motora u statičkom režimu rada [51].

Za učinkovitu i autoritativnu analizu dinamičkog momenta kao izvora informacija za otkrivanje nepravilnosti u motoru bitno je poznavati fizikalnost tog procesa. Već iz definicije koja govori o pretvaranju električne energije u mehaničku, vidi se način izgradnje i rad motora. Ista teorija se također može koristiti u razdvajanju izvora pojedinih komponenti dinamičkog momenta koji mogu biti mehanički ili elektromagnetski.

Metoda spektralne analize dinamičkog momenta se temelji na dokazu generiranja dodatnih frekventnih komponenti u struji statora motora u kvaru i odražavanju na promjene električnih uvjeta sa nastankom dodatnih pulsiranja momenta a također i varijacije u brzine vrtnje [70].

Primarna posljedica nesimetrije, kao što je na primjer kod kvara kratkospojnog kaveznog rotora, je preraspodjela rotorske struje na susjedni zdravi štap kod koga se javlja povećanje mehaničkih i toplinskih opterećenja. Ta preraspodjela je u funkciji električne struje, koja je u normalnim uvjetima tekla kroz netaknute rotorske štapove, a koja utiče na povećanje mehaničkih i toplinskih opterećenja. Rezultat je promijenjena vrijednost aktivnog otpora i induktiviteta rotora motora. Lokalna nesimetrije ukupnog magnetskog polja motora zbog promjena rotorske struje utječe na raspodjelu magnetskog toka u zračnom rasporu što rezultira dodatnim

komponentama kojih inače nema u normalnim uvjetima. Osim napuknuća štapova kratkospojnog rotora i njihov međusobni položaj u rotoru utječe na radnu karakteristiku motora.

Najveće promjene u radu motora su kada su slomljeni štapovi jedan pored drugog, što je u praksi najčešći primjer kvara. Osim prekinutih štapova svi ostali štapovi su termički i mehanički preopterećeni, što također ima za posljedicu i njihov prekid. Posljedica nesimetrije je stvaranje dva dodatna rotirajuća elektromagnetna polja frekvencije $\pm sf_s$. [65].

Iz matematičkog opisa stanja u motoru vidi se utjecaj na dinamičke krivulje okretnog momenta. U frekventnom spektru dinamičkog momenta u praznom hodu (malo klizanje), unatoč relativno maloj struji elektromotora i skoro sinkronoj brzini vrtnje, vidljive su na statičkoj mehaničkoj karakteristici pojave pulsirajućeg momenta [65].

Tokom ubrzanja motora ($0 \leq n \leq n_{pT}$), zbog većih amplituda struja pokretanja i većeg klizanja za očekivati je primjetan utjecaj nesimetrije momenta rotora na valovitost izmjerene dinamičke karakteristike motora.

Učinak električne nesimetrije rotora asinkronog motora na izgled mehaničke dinamičke karakteristike tokom zaleta motora i njeno korištenje kao metoda za otkrivanje grešaka je potvrđeno rezultatima raznih ispitivanja i mjerenja. Utjecaj kvara kratkospojnog kaveza na karakteristike motora je evidentan. Svaki stupanj kvara motora karakterizira odgovarajući frekvencijski spektar dinamičkog momenta [65].

6. SPEKTRALNA ANALIZA STRUJE STATORA MOTORA

6.1. Spektralna analiza struje statora motora

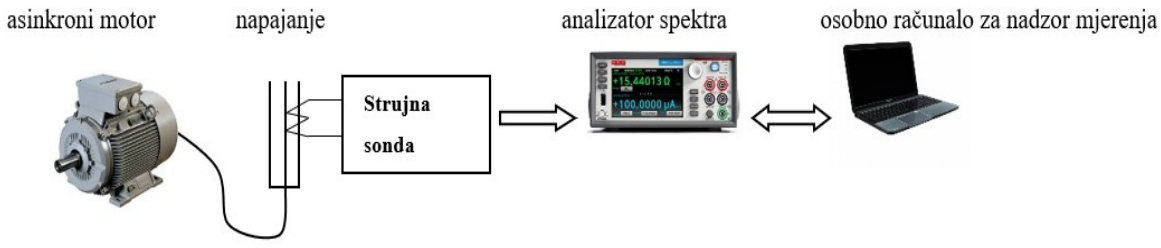
Metoda spektralna analiza struje statora motora MCSA (engl. *Motor current signature analysis MCSA*) je tehnika monitoringa i dijagnoze grešaka na AKM koja se u svijetu sve više koristi naročito kod otkrivanja:

- slomljenih i prekinutih rotorskih štapova,
- nenormalne razine zračnog raspora - ekscentričnosti,
- kratkih spojeva u namotima statora i
- nekih mehaničkih nedostataka.

Korisnici elektromotornih pogona sa AKM su pod stalnim pritiskom da se smanje troškovi održavanja i spriječe neplanirani zastoji koje rezultiraju gubitcima u proizvodnji i financijskim prihodima [65].

Mnogi korisnici ovakvih pogona već na veliko koriste on-line metode monitoringa i otkrivanja kvarova na EMP usporedno sa konvencionalnim metodama planiranih shema održavanja. I pored toga korisnik je taj koji odlučuje da li da motor izvadi iz procesa proizvodnje radi popravke ili ga pustiti da radi na osnovu informacija iz sustava za praćenje stanja.

Razlozi za ubrzani razvoj ovih metoda su višestruki. Kao prvo, mjerenje struje ne zahtijeva postavljanje nikakvih dodatnih uređaja, što osjetno poskupljuje provedbu ostalih metoda. Za mjerenje struje koriste se strujni transformatori, najčešće u izvedbi strujnih kliješta. Obzirom na činjenicu da je većina motora u pogonu opremljena mjernim instrumentima, vrlo često dovoljna su jedna strujna kliješta za mjerenje struje većine motora u pogonu. Principijelna shema spektralne analize statorske struje prikazana je na slici 6.1. [69].



Slika 6.1. *On-line nadzor frekventnog spektra struje statora asinkronog motora*

Signal struje, izmjeren pomoću strujnih kliješta odvodi se na spektralni analizator, provodi se brza Fourierova transformacija (FFT) i dobiveni se spektar odvodi u računalo. U računalu se dobiveni spektar analizira i dijagnosticira se stanje stroja.

Ključna stvar u metodi analize struje statora motora (MCSA) je ta što osjetljivi električni signal sadrži subharmonijske komponente koje su direktan nusproizvod jedinstvenog rotirajućeg toka uzrokovanog greškom uslijed slomljenih rotorskih štapova ili ekscentričnost, itd.

MCSA može otkriti te probleme u ranoj fazi i na taj način izbjeći sekundarna oštećenja i potpuni kvar motora. Istina je da će slomljeni rotorski štapovi uzrokovati promjenu u spektru vibracija, ali vibracije se tradicionalno osjete na ležajevima. Općenito svaki motor ima drugačiju mehaničku vezu između elektromagnetne sile, pozicije slomljenih štapova i pozicije nastalih vibracija.

To daje dodatnu kompleksnost kada se pokušava kvantificirati ozbiljnost problema putem analize vibracija. Vibracije nastaju iz jedinstvene elektromagnetne sile nastale uslijed slomljenih štapova, i to je, može se reći drugi učinak u odnosu na trenutne komponente izravno izazvane od specifičnih valova rotirajućeg fluksa. U mnogim slučajevima (npr. broj slomljenih rotorskih štapova) kvar je već ozbiljan, prije nego se otkrije analizom vibracija, a čak i tada predviđanja ozbiljnosti kvara su za još jedan red veličine teža [58].

To pak nije slučaj sa MCSA kao što je dokazano brojnim slučajevima iz prakse. Što se tiče otkrivanja problema ekscentričnosti zračnog raspora, slično obrazloženje važi kao što je objašnjeno i gore. Što se tiče otkrivanja harmonijskih komponenti kod kvara niskonaponskih namota statora pokazalo se da MCSA može otkriti međufazni kratki spoj ili zemljospoj. Stoga je moguće kod namota statora niskog napona (LV) uočiti da postoje neki tragovi koji ukazuju na mogući kvar motora. U poređenju sa visokonaponskim AKM, vrijeme do nastanka kvara kod NN motora će biti vrlo kratko.

Promatrajući sliku 6.1. može se zaključiti da je analizator spektra jedan od ključnih elemenata sustava dijagnostike. Naime da bi se na temelju prikupljenih podataka mogla izvršiti dijagnostika stanja motora na prikupljenim je podacima često potrebno izvršiti niz operacija. Upravo je ovo dio u kojem se računala najviše i najduže primjenjuju, i u kojem je moguća velika razina automatizacije procesa. Obrada podataka može se vršiti za vrijeme rada (on-line) ili nakon što su podaci zapisani i spremljeni (off-line) [65,70].

Jedan od najjednostavnijih oblika obrade podataka je zapisivanje neke veličine tijekom dužeg vremenskog perioda, te usporedba izmjerene veličine sa prijašnjim vrijednostima. Kada se pojave veća odstupanja može se sumnjati na kvar.

Najraširenije su metode obrade podataka za dijagnostičke svrhe spektralna analiza, korelacija i vremensko usrednjavanje. Razvoj mjerne i računarske tehnike je omogućio širu primjenu ovih metoda.

Temelj metode spektralne analize je prebacivanje signala snimljenih u vremenskoj domeni u frekvencijsku domenu. Analizom signala u frekvencijskoj domeni (struje, vibracije...) moguće je otkriti različite kvarove. Prebacivanje u frekvencijsku domenu predstavlja prikaz spektra frekvencija snimljenog signala i odgovarajućih amplituda. Osnova metode je Fourierova transformacija.

Ideja transformacije je periodički signal periode T, dan izrazom [28]:

$$g(t) = g(t+T) \tag{6-1}$$

prikazati jednoliko razmaknutim frekvencijskim komponentama koje se dobivaju kao:

$$G(f_k) = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} g(t)\cdot e^{-j2\pi f_k k}dt \tag{6-2}$$

gdje k predstavlja *k-ti* harmonik osnovne frekvencije *f*. Obrnuto, iz frekvencijskog spektra vremenska se funkcija dobiva prema izrazu

$$g(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} G(f_k)\cdot e^{j2\pi f_k t} \tag{6-3}$$

Iz ovoga je vidljivo da se kontinuirani vremenski signal u frekvencijskoj domeni može prikazati ograničenim brojem diskretiziranih vrijednosti, što je vrlo korisno u digitalnoj obradi signala.

U nekim je slučajevima radi dalje obrade potrebno vremenski signal digitalizirati, odnosno prikazati kao niz diskretnih vrijednosti jednoliko razmaknutih u vremenu.

Prebacivanje se provodi prema izrazu:

$$G(f_k) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{n-1} g(t_n)\cdot e^{-j2\pi nk/N} \tag{6-4}$$

Inverzna transformacija data je izrazom:

$$g(t_n)=\sum_{k=0}^{N-1} G(f_k)\cdot e^{j2\pi nk/N} \tag{6-5}$$

Vidljivo je da je frekvencija uzorkovana na frekvencijama f_k a vremenski se signal uzorkuje u trenucima t_n. Ovaj oblik transformacije naziva se "Diskretna Fourierova transformacija". U digitalnoj se tehnici koristi posebni oblik koji se naziva "Brza Fourierova transformacija (FFT)" .

Da bi se FFT-om dobila zadovoljavajuća točnost transformacije frekvencija uzorkovanja mora zadovoljiti Nyquistov kriterij, što znači da se snimanje mora izvršiti najmanje dvostrukom frekvencijom najviše frekvencije koju želimo analizirati. Kod analize statorske struje bočni harmonici javljaju se na relativno malom razmaku od osnovne frekvencije. Radi toga Fourierovu transformaciju potrebno je provesti dovoljno visokom rezolucijom [71].

Da bi se rezolucija transformacije povećala N puta, potrebno je prikupiti N puta više uzoraka, budući da upravo broj uzoraka određuje rezoluciju transformacija. Klasična FFT daje spektar koji pokriva frekvencije od 0 Hz do maksimalne snimljene frekvencije f_{max}. Veća rezolucija se može dobiti na nekoliko načina. Prvi je način povećati stupanj transformacije čime se povećava vrijeme potrebno za provođenje transformacije. Druga je mogućnost smanjivanje maksimalne frekvencije. Ovo rješenje nije uvijek povoljno budući da se time gube više frekvencije koje su potrebne za određivanje stanja ekscentriciteta. Slijedeće je rješenje povećanje vremena snimanja, što automatski daje bolju rezoluciju, uz uvjet da se osigura konstantnost mjerene veličine tijekom cijelog snimanja. U tom slučaju analiza se provodi izrezivanjem dijela spektra koji je zanimljiv (tzv. *ZOOM FFT*).

Za smanjivanje šuma u signalima koristi se funkcije korelacije. Funkcija korelacije pojavljuje se u dvije varijante: auto-korelacija i korelacija. Funkcija autokorelacije predstavlja mjeru sličnosti neke funkcije i iste te funkcije pomaknute u vremenu za vrijeme τ.

Funkcija korelacije prikazuje se u ovisnosti o τ i ima najveće vrijednosti na mjestima poklapanja funkcija, a zadana je izrazom:

$$R_{ff}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t-\tau)dt \tag{6-6}$$

Funkcija korelacije ima oblik :

$$R_{fh}(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty} f(t-\tau)h(t)\,dt \tag{6-7}$$

Kod dijagnosticiranja kvarova ležajeva i reduktora često se koristi usrednjavanje signala. Repetitivni se snimak davača ponavlja nekoliko puta uzastopno, a usrednjavanjem signala smanjuje se utjecaj smetnji, pa vrijednosti nastale uslijed kvara bolje dolaze do izražaja. U praksi se vrlo često iščitava veliki broj uzoraka tijekom dužeg vremenskog perioda. U tom slučaju broj uzoraka koje je potrebno usrednjavati zahtijevao bi veliku memoriju za zapisivanje vrijednosti. Da bi se broj zapisa smanjio usrednjavanje se vrši prema izrazu (6-8):

$$\bar{x}_n = \bar{x}_{n-1} + \frac{x_n - \bar{x}_{n-1}}{n} \tag{6-8}$$

gdje su: n - broj zapisa,

x_n - vrijednost varijable n-tog zapisa,

$\underline{x}_n$ i $\underline{x}_{n-1}$ – srednje vrijednosti (n)-te i (n-1)-te varijable.

Ovim načinom srednja vrijednost zapisa se u svakom trenutku može izračunati pomoću samo dva snimljena zapisa. Na taj način uštede u memoriji su velike ali treba voditi računa o brzini računanja posebice kada je period uzimanja uzoraka kratak.

Nakon konačne obrade podataka, može se vršiti dijagnostika kvara. U cilju jednostavnije dijagnostike vrlo je važno da podaci iz kojih se vrši dijagnostika budu u što jednostavnijem i preglednijem obliku i da sadržavaju informacije neophodne za točno otkrivanje problema.

Otkrivanje vrste i veličine kvara, odnosno mogućeg uzroka, zadnja je i ključna faza dijagnostičkog procesa. U današnje vrijeme to je još uvijek faza koja je najmanje automatizirana i u kojoj u mnogim slučajevima do izražaja dolazi čovjek. Za neke slučajeve postoje razvijeni ekspertni sustavi koji daju kvalitetne rezultate, ali konačna odluka vrlo je često na stručnjaku - inženjeru. Tendencije razvoja su primjena metoda umjetne inteligencije i algoritama za dijagnostiku. Korištenje računala olakšava dijagnostiku zbog složenosti postupka, kao i vrlo često velikog broja podataka i parametara koje treba uzeti u obzir [72].

U ovoj disertaciji dobivanje uzorka snimljenog signala i obrada signala izvedena je na nešto drugačiji način. Umjesto korištenja skupih dijagnostičkih sustava korišten je numerički relej pomoću koga se dobiva uzorak snimljenog signala koji se zatim obrađuje i prevodi korištenjem

brze Fourierove transformacije na računalu iz vremenske u frekventnu domenu. Prednosti ovakvog pristupa su prije svega u cijeni. Naime, spektralni analizatori su redovito vrlo skupi uređaji, dok su numerički releji postali realnost u suvremenim elektroenergetskim postrojenjima. Ove prednosti su očite naročito u novije vrijeme kada su prijenosna računala i numeričke zaštite sve pristupačniji i raširenij iz razloga njihove učinkovitosti i niske cijene.

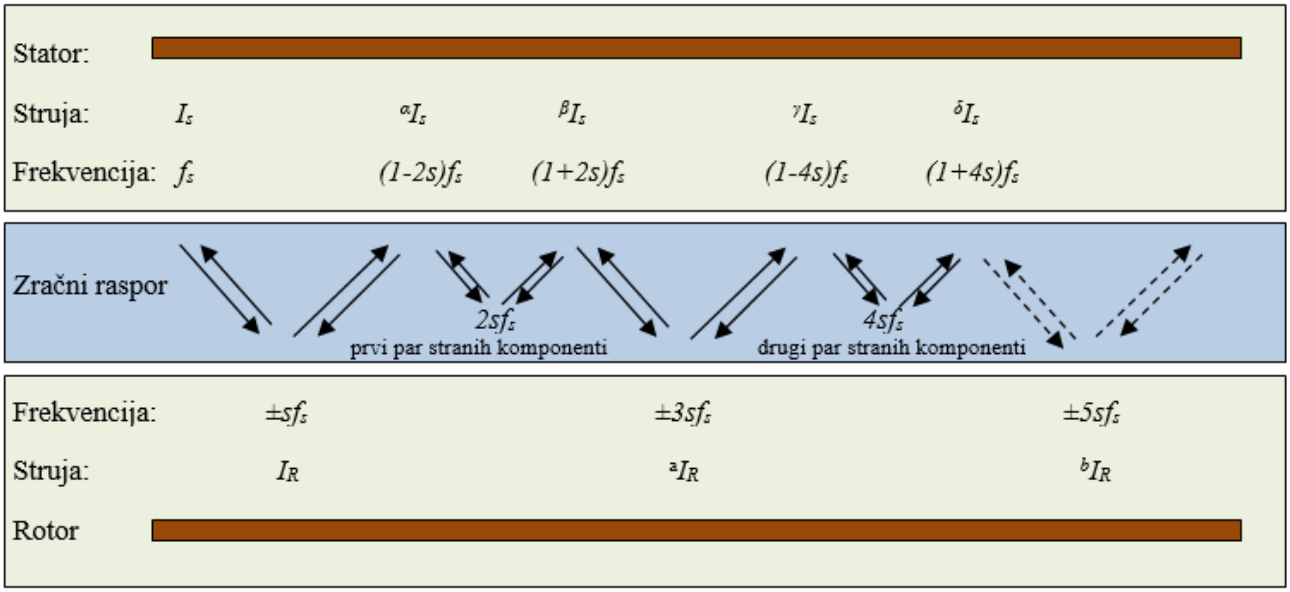
Druga je prednost dijagnostike spektralnom analizom, činjenica da se u spektru struje javljaju promjene u slučaju niza kvarova, pa se iz jednog mjerenja može donijeti sud o stanju različitih dijelova stroja. Naime, svako kvarno stanje predstavlja određenu nesimetriju, koja u zračnim rasporu mijenja oblik magnetskog polja. Svaka takva promjena u statorskom namotu inducira napone koji u odnosu na napon mreže imaju određen frekvencijski pomak [69].

Nažalost, upravo činjenica da sva kvarna stanja asinkronog motora ostavljaju trag na spektru statorske struje, čini donošenje suda o točnoj prirodi kvara složenom i zahtijevaju povećani oprez. Naime postoji mogućnost da se nepravilnosti spektra nastale istrošenim ležajevima na primjer, pogrešno interpretiraju kao nesimetrije rotorskog kaveza. Također veoma je bitno u sklopu kojeg EMP radi motor, koja je vrsta tereta, koji je režim rada pogona, itd. Nikako se ne smije smetnuti sa uma mogućnost pogreške u dijagnostici. U tom smislu nužno je izvršiti niz provjera kako bi se sa sigurnošću znalo da li se zaista radi o kvaru na motoru. Ovo je jedan od bitnih razloga što se ovakav postupak ne može automatizirati.

U sklopu ove disertacije detaljno je proučena promjena spektra statorske struje u slučaju kvara rotorskog kaveza. Statorska struja jednog motora snimljena je i analizirana za slučaj ispravnog motora i tri stupnja kvara. Detaljnije objašnjenje sačinjenih snimaka te pojave dodatnih harmonika uslijed pojave nesimetrije dano je u odsječku 7. u kome je dat i opis snimanja i pregled snimljenih rezultata. Ostali kvarovi koji se mogu otkriti spektralnom analizom statorske struje dani su samo pregledno u skraćenom obliku [72].

6.2. Frekventne komponente struje statora

Slijed elektromagnetnih i mehaničkih pojava u statoru i rotoru asinkronog motora sa nesimetrijom rotora, koje uzrokuju dodatne komponente u frekventnom spektru struje statora dat je na slici 6.2. Simetrični statorski namoti stvaraju obrtno magnetsko polje osnovne frekvencije f_s koje inducira napon i struju I_R u rotoru frekvencije sf_s (vektori od f_s do sf_s).



Slika 6.2. *Slijed generiranja dodatnih frekventnih komponenti zbog rotorske nesimetrije*

Zbog nesimetrije rotorskog namota, nesimetrično podijeljene rotorske struje uzrokuju nastanak dva polja suprotnog smjera vrtnje frekvencije $\pm sf_s$. Direktna (pozitivna) komponenta magnetnog polja frekvencije $+sf_s$ uzajamno djeluje sa glavnim statorskim obrtnim poljem (vektor od od $+sf_s$ do f_s) i predstavlja osnovni princip djelovanja asinkronog motora. Posljedica nesimetričnog rotorskog namota je generiranje dodatne inverzne (negativne) komponente polja frekvencije $-sf_s$, koje inducira u simetričnom statorskom namotu napon $^{\alpha}U_s$ i struju $^{\alpha}I_s$ frekvencije $(1-2s)f_s$ (vektor od $-sf_s$ do $(1-2s)f_s$) [17]

Nova komponenta struje $^{\alpha}I_s$ ima trenutnu vrijednost:

$$^{\alpha}i_S = {}^{\alpha}I_S \cos\left[(1-2s)\omega_S t - \alpha\,{}^{\alpha}I_S\right] \tag{6-9}$$

gdje je $(\alpha\,{}^{\alpha}I_S)$ - fazni pomak komponente u odnosu na I_s i ovisi o klizanju.

Ta komponenta struje statora sa osnovnim magnetnim poljem proizvodi pulsirajući moment frekvencije $2sf_s$

$$\Delta M(t) = 3P_p\Phi_m\,{}^{\alpha}I_S \sin\left[2s\omega_S t - \alpha_\Phi + \alpha\,{}^{\alpha}I_S\right] \tag{6-10}$$

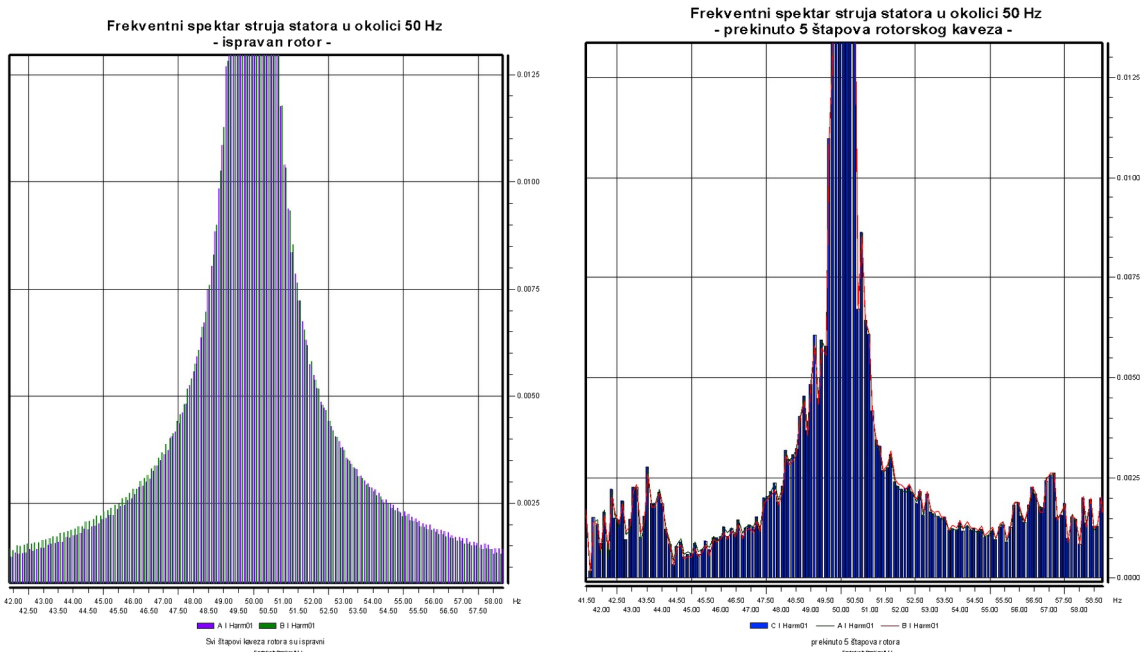
Posljedica superponiranja pulsirajućeg momenta ΔM sa osnovnim statičkim momentom M su oscilacije brzine vrtnje rotora [19], koje uzrokuju induciranje nove komponente statorske struje $^{\beta}I_s$ frekvencije $(1+2s)f_s$. Taj slijed se nastavlja (slika 6.2.) za drugi par stranih komponenata ($^{\gamma}I_s$,$^{\delta}I_s$), za treći, za četvrti itd., sve oko osnovne harmonijske komponente frekvencije 50 Hz.

$$\Delta\omega_{R\,mech}(t) = \frac{1}{J}\int \Delta M(t)\,dt = -\frac{P_p \Phi_m {}^{\alpha}I_S}{2s\omega_S J}\cos\left[2s\omega_S t - \alpha_{\Phi} {}^{\alpha}I_S\right] \tag{6-11}$$

Parovi stranih komponenata su prisutni i u okolici ostalih višeharmonijskih komponenti (peti, sedmi, jedanaesti, itd), ali su slabije izraženi, zato je u svrhu diagnostike najbitniji prvi par ${}^{\alpha}I_s$ i ${}^{\beta}I_s$, koji imaju najveću magnitudu . Odnos magnitude strane komponente i osnovnog harmonika struje statora $\left({}^{\alpha}I_S / I_S\right)$ predstavlja osnovni dijagnostički indeks pri ocjeni stupnja oštećenja kratkosponog kaveznog rotora.

Osim toga, jasno je da se povećanja magnituda struja ${}^{\alpha}I_s$ i ${}^{\beta}I_s$ dešavaju, s povećanjem nesimetrija i pomaknuta su na frekventnoj osi od osnovne frekvencije 50 Hz - ${}^{\alpha}I_s$ na lijevo prema nižim frekvencijama, i ${}^{\beta}I_s$ desno prema višim frekvencijama. Pri nepromijenjenom opterećenju, povećava se klizanje motora jer se povećanjem nesimetrije smanjuje moment motora i stabilni dio karakteristika postaje sve položeniji (mekše). Ova činjenica je jasno vidljivo iz simuliranih i izmjerenih statičkih karakteristika motora sa kvarom rotorskog kaveza , koji su dati u literaturi [14] . Čak i u slučaju da rotor nema prekinute štapove, minimalni nivo inverznog polja ili negativne sekvence u magnetnom polju uvijek su prisutne jer su komponenta ${}^{\alpha}I_s$ i ${}^{\beta}I_s$ uvijek prisutne pogotovu što se današnji rotori definitivno rijetko izgrađuje idealno simetrični. Tome dodatno doprinose pulzacija tereta i utori na rotoru.

Na slici 6.3. dat je prikaz frekventnih spektara struja statora za ispravan rotor i za rotor sa pet prekinutih štapova. Snimci su rađeni pomoću mjerenja releja REF 541, a obrađeni u programskom paketu DranView6. Povećanjem tereta povećava se i struja kroz kavez rotora. Povećano magnetiziranje od utjecaja nesimetričnih rotorskih struja povećava izraženost negativne sekvence magetskog polja, a time i iznos dodatnih harmonijskih komponenti ${}^{\alpha}I_s$, ${}^{\beta}I_s$, ${}^{\gamma}I_s$ ${}^{\delta}I_s$.



a) *b)*

Slika 6.3. *Frekventni spektar struja statora u okolici 50 Hz: a) ispravan kavez, b) pet prekinutih štapova*

Osim o veličini oštećenja rotora, iznos bočnih harmonika ovisi o još nekoliko faktora koji su veoma bitni kod ispravne dijagnostike stanja rotora motora:

- snaga motora (motori većih snaga znatno su osjetljiviji na kvarove kratkospojnog rotora)
- iznos tereta (različite su subharmonijske komponente kod neopterećenog i opterećenog motora)
- karakter tereta (stalno ili intermitirano opterećenje sa naglim promjenama bitno utiče na iznos subharmonika)
- izvedba kaveza rotora
- prijenosni mehanizam

Zbog svega navedenog poželjno je da analizu provodi veoma stručno osoblje. Naime zbog niza „zamki“ može se doći do pogrešnih zaključaka o stanju kaveznog rotora motora. Nekada je dobro, naravno ukoliko to situacija dozvoljava, dijagnostiku provjeriti nekom drugom dodatnom metodom, npr. analizom spektra brzine vrtnje ili analizom spektra dinamičkog mometna. Iskustva su pokazala da se u nekim pogonima, npr. mlinovima uglja, drobilicama kamena i sl. javljaju dodatni bočni harmonici velikih iznosa i kod normalnog rada, koji se mogu zamijeniti sa bočnim harmonicima nastalim zbog kvara štapova rotora. Također nekada razna konstrukcijska

rješenja rotora mogu uzrokovati nastanak bliskih subharmonijskih komponenti sličnih kvaru rotora. Sve ovo ukazuje na potrebu opreza jer u protivnom dijagnostika može biti pogrešna.

Već je rečeno da iznos bočnih harmonika ovisi o stupnju oštećenja rotorskog kaveza. Bočni harmonici su većeg iznosa kod većeg broja oštećenih štapova [73].

Omjer vrijednosti bočnog harmonika i osnovnog harmonika zavisi od broja oštećenih štapova i dat je izrazom:

$$A_S = \frac{\sin(\alpha)}{2p(2\pi - \alpha)}; \quad \alpha = \frac{2\pi n_p p}{N_2} \tag{6-12}$$

gdje je: A_S – omjer vrijednosti bočnog i osnovnog harmonika

n_p – broj oštećenih (napuknutih) štapova

N_2 – broj štapova kaveznog rotora

p – broj pari polova.

Ovaj omjer je u stvarnim uvjetima veoma mali te stvara nepreglednu sliku spektra iz koje nije moguće donijeti kvalitetne zaključke o stanju rotora motora. Zbog toga je pogodno spektar prebaciti u logaritamski prikaz koji je daleko prihvatljiviji i gdje su vrijednosti pojedinih harmonika prikazani u dB. Za prebacivanje vrijednosti u dB koristi se klasičan izraz: $A = 20 \log (A_S)$. Uvrštavanjem u izraz za α iz jednadžbe (6-12) može se dobiti relacija za izračun broja prekinutih štapova:

$$n_p = \frac{2N_2}{10^{-\frac{A}{20}} + 2p}; \tag{6-13}$$

Prema eksperimantalnim iskustvima izraz (6-13) u praksi daje nešto manju vrijednost od stvarnog broja puknutih štapova [12]. Također je eksperimentima utvrđeno da je iznos bočnih harmonika veći što je veće opterećenje motora i obrnuto.

7. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Tema ove disertacije odnosi se na potpunu i sveobuhvatnu električnu zaštitu teških elektromotornih pogona sa visokonaponskim asinkronim kaveznim motorima uključujući naročito prelazni režim pokretanja motora. U postupku eksperimentalnog istraživanja izvršena su snimanje procesa pokretanja teškog EMP sa VN asinkronim kaveznim motorom, na poligonu istraživanja, s posebnim osvrtom na: trajanje pokretanja, struje, napone, harmonijsku analizu, a sve u cilju ispravnog i kvalitetnog odabira i podešenja zaštite.

Istraživanja su pokazala prednosti suvremenih numeričkih releja u funkciji kvalitetne zaštite teških EMP sa VN asinkronim kaveznim motorom, sa posebnim osvrtom na korištenje releja u dijagnostičke svrhe. Treba istaći da je korištenje numeričkih releja u dijagnostičke svrhe novina, te da do sada nije bilo predmetom nikakvih istraživanja. U istraživanju je također prezentiran postupak snimanja „događaja“ putem snimača (disturbance rekorder) kao veoma bitne funkcije numeričkih releja, a u funkciji suvremene on-line dijagnostike VN asinkronih kaveznih motora. Dobiveni snimci kao rezultati istraživanja su pomoću brze Fourierove transformacije (FFT) „prevedeni“ iz vremenske u frekventnu domenu a sve u svrhu bolje prezentacije dobivenih rezultata. Poseban akcent je dat na kvarove na rotoru VN asinkronog kaveznog motora iz razloga što se oni upravo na tom mjestu najčešće i javljaju. Krajnji cilj je podizanje razine pouzdanosti, blagovremena i svrsishodna prevencija u održavanju ovako važnih EMP, smanjenje troškova održavanja i na koncu povećanje stupnja sigurnosti pogonskog osoblja.

Istraživanja u ovoj disertaciji su provedena u 2 faze:

- Istraživanja na malom trofaznom niskonaponskom asinkronom kaveznom stroju snage 300W
- Istraživanja na realnom teškom EMP-u mlina 6. bloka 5. TE Tuzla sa 6 kV asinkronim kaveznim strojem snage 630 kW [74].

7.1. Istraživanja na malom trofaznom NN asinkronom kaveznom stroju

U svrhu ovih ispitivanja odabran je mali NN trofazni asinkroni kavezni četveropolni motor snage 0,3 kW, I_n= 0,7 A prikazan na slici 7.1.a). Ovakav motor je odabran iz razloga što kod ispitivanja nije potrebna ugradnja strujnih mjernih transformatora kako bi se struje spojile na analogne strujne ulaze u numerički relej [75].

Numerički relej na kojem su vršena ispitivanja je relej REF 541 (slika 7.1.b) proizvođača ABB Finska. [76]



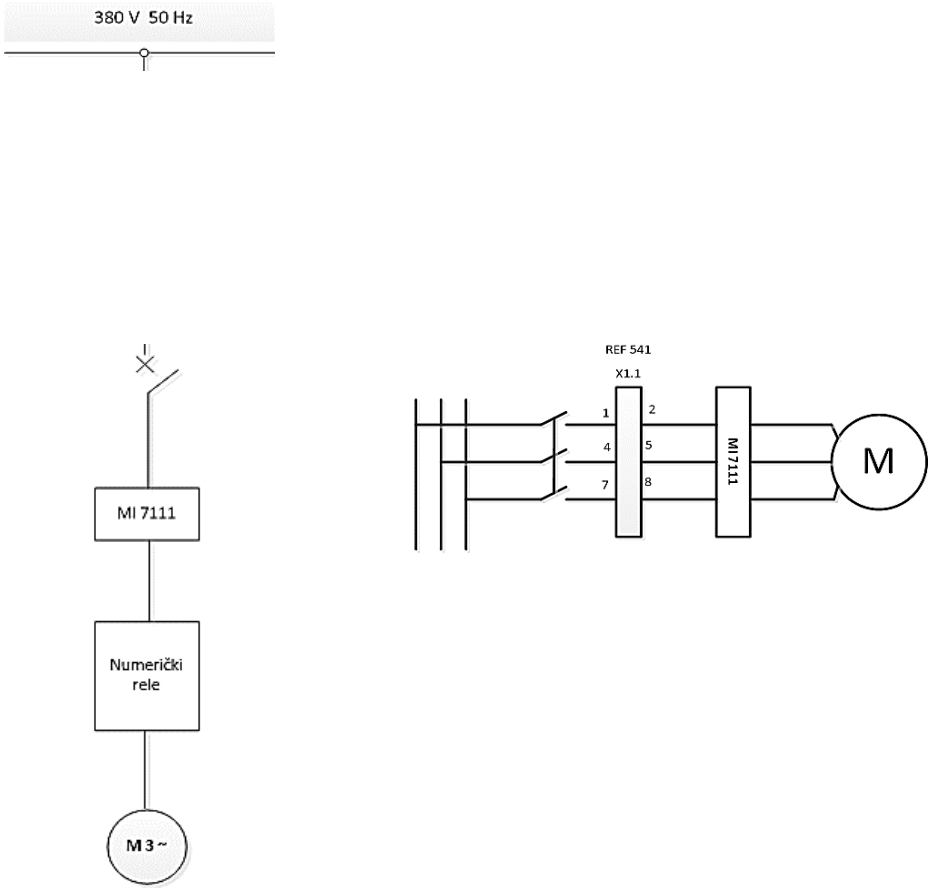
a) *b)* *c)*

Slika 7.1. *a) Trofazni NN asinkroni kavezni stroj snage 300 W; b) Numerički relej REF 541, c) Analizator snage MI 7111 „ Iskra“*

Pored toga paralelno su vršena ista ispitivanja i sa uređajem „Analizator snage MI 7111“ proizvođača „Iskra“ (Slika 7.1.c) [77], a sve u svrhu poređenja dobivenih rezultata sa rezultatima dobivanim iz numeričkog releja. Treba istaći da su se podaci-rezultati dobiveni iz analizatora MI 7111 morali prevoditi iz vremenske u frekventnu domenu korištenje Matlab skripte (Prilog 1.). Naime ovom skriptom se numerički podaci svake snimljene točke tokom provođenja snimanja odnosno uzorkovanja podataka tokom kompletnog vremena snimanja FFT prevode iz vremenske u frekventnu domenu. Prezentacija i uporaba podataka u frekventnoj domeni znatno je lakša. Na koncu treba dokazati uporabu dobivenih podataka iz numeričkog releja u dijagnostičke svrhe. Poređenja su provedena za svaku od 8 provedenih faza ispitivanja.

U podešenjima releja postavljeno je da start snimanja na disturbance rekorderu bude ručni trigger odnosno uključenjem trofaznog prekidača startati će se i snimanje. Da bi se povećalo vrijeme snimanja na podešenjima disturbance rekordera postavljeno je da se snima samo jedna struja, dok se sve ostale analogne veličine i digitalni ulazi ne snimaju. Kako je to i u teoriji rečeno snima se struja u stacinarnom režimu rada. Frekvencija uzorkovanja za navedeni relej REF 541 zavisi od frekvencije f_n tako da osnovni ciklus uvijek broji 40 uzoraka [78,79]. To ustvari znači da je frekvencija uzorkovanja 2 kHz za mreže 50 Hz. Time je zadovoljen Nyquistov kriterij, što znači da se snimanje mora izvršiti najmanje dvostrukom frekvencijom najviše frekvencije koju želimo analizirati [76].

Shema spoja data je slici 7.2.



a) *b)*

Slika 7.2. *a) jednopolni prikaz b) tropolni prikaz sheme spoja*

Svrha ispitivanja je da se dokaže uporaba snimaka iz disturbance rekordera u dijagnostičke svrhe. Pored toga dužina trajanja zaleta motora također ovisi o tome dali je motor ispravan ili nije. U teoriji je rečeno da se dužina zaleta motora povećava ukoliko na štapovima rotora motora postoji kvar. To je naročiti izraženo kod velikih jedinica. Kao primjer na slici 7.3. dat je prikaz zaleta motora. Snimak je odrađen pomoću releja REF 541. Snimljene struje je potrebno u svrhu kvalitetne prezentacije „prevesti“ iz vremenske u frekventnu domenu korištenjem brze Fourierove transformacije (FFT) (Prilog 10).

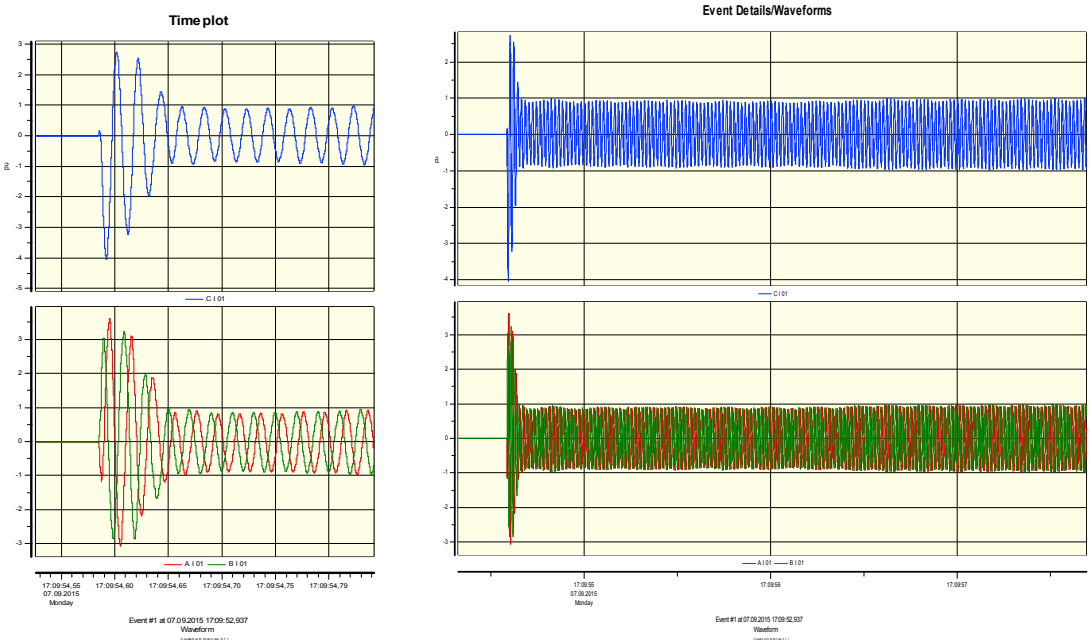
Jadan primjer snimka prikazan je na slici 7.4 . U istu svrhu korišten je software Dran-View 6 koji je inače sastavni dio analizatora kvaliteta Mavowat 50 (Slika 7.3.b) [80,81].

U konačnici cilj je bio pokazati da se i bez skupih analizatora može na vrijeme otkriti motor koji je u kvaru. Dovoljna je analiza jedne statorske struje u stacionarnom režimu rada za

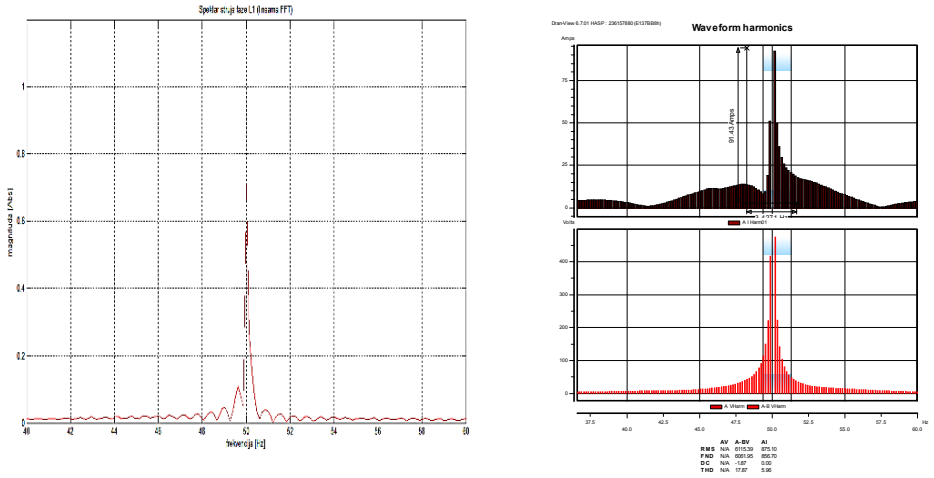
dobivanje pouzdanih rezultata o stanju motora. Primijenjeno na velike motore koji rade u sklopu teških i veoma značajnih EMP-a to bi značilo na vrijeme planirati remonte ili zamjene motora te onemogućiti neplanske zastoje koji mogu prouzročiti ogromne štete [82,83].

U konkretnom slučaju provedeno je ispitivanje u 8 faza [84]:

1) Zalet motora neopterećenog i opterećenog nominalnim teretom u ispravnom stanju (Prilog 2.)
2) Stacionarni režim rada motora neopterećenog i opterećenog nominalnim teretom u ispravnom stanju (Prilog 3.)
3) Zalet motora neopterećenog i opterećenog nominalnim teretom sa 5 prekinutih štapova (Prilog 4.)
4) Stacionarni režim rada motora neopterećenog i opterećenog nominalnim teretom sa 5 prekinutih štapova (Prilog 5.)
5) Zalet motora neopterećenog i opterećenog nominalnim teretom sa 10 prekinutih štapova (Prilog 6.)
6) Stacionarni režim rada motora neopterećenog i opterećenog nominalnim teretom sa 10 prekinutih štapova (Prilog 7.)
7) Zalet motora neopterećenog i opterećenog nominalnim teretom sa 10 prekinutih štapova i prekinutim prstenom (Prilog 8.)
8) Stacionarni režim rada motora neopterećenog i opterećenog nominalnim teretom sa 10 prekinutih štapova i prekinutim prstenom (Prilog 9.)



Slika 7.3. *Snimak zaleta motora snage 300 W pomoću releja REF 541*

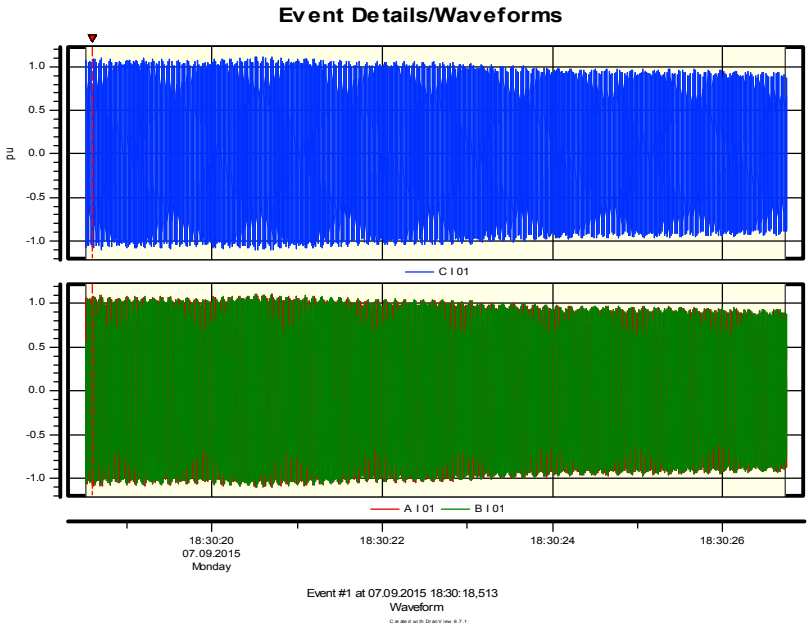


Slika 7.4. *Prikaz struja u frekventnoj domeni*

Snimci svih faza ispitivanja električnog motora dati su u prilozima od 2. do 9. ove doktorske disertacije.

Treba istaći poteškoće na koje se naišlo tokom eksperimentalnih ispitivanja:

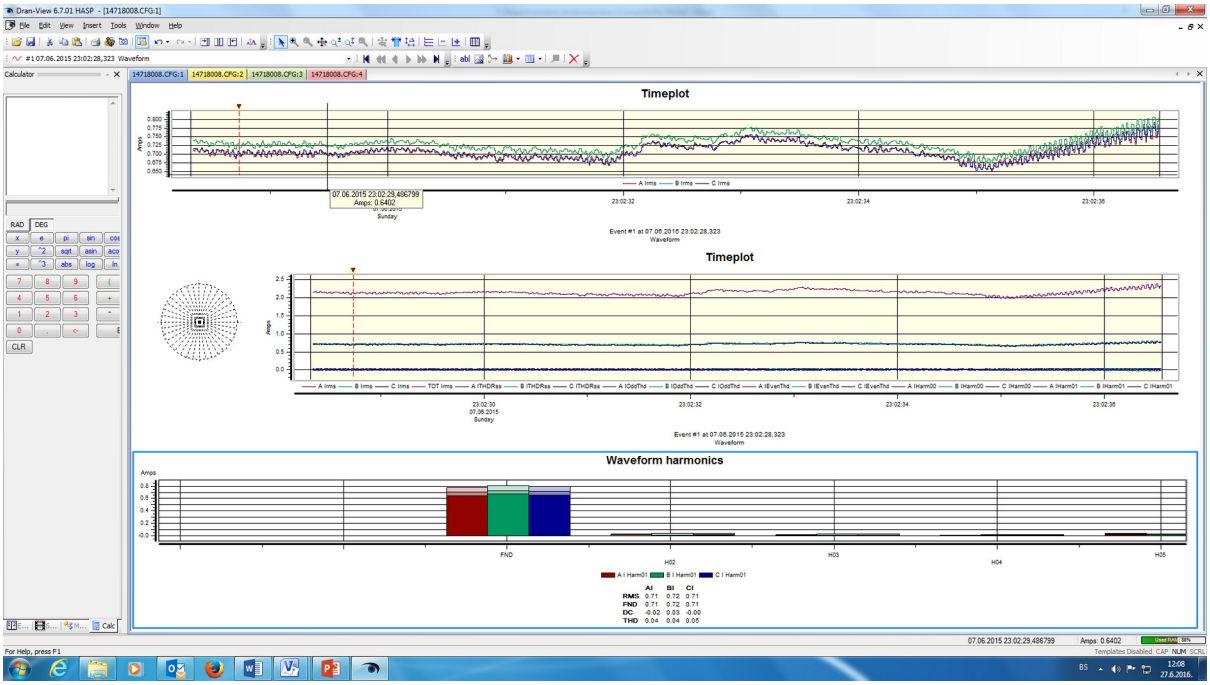
- Motor je male snage i kod njega je veoma teško uočiti promjene u dužini zaleta motora uzrokovanih kvarom
- Veoma su teško uočljive promjene u frekventnom spektru motora kod kvarnih 1,2 ili 3 štapa
- To je bio razlog da su ispitivanja provedena kod 5 te 10 kvarnih štapova i na koncu sa pokvarenim i kaveznim prstenom



Slika 7.5. *Snimak stacionarnog režima rada motora pomoću releja REF 541*

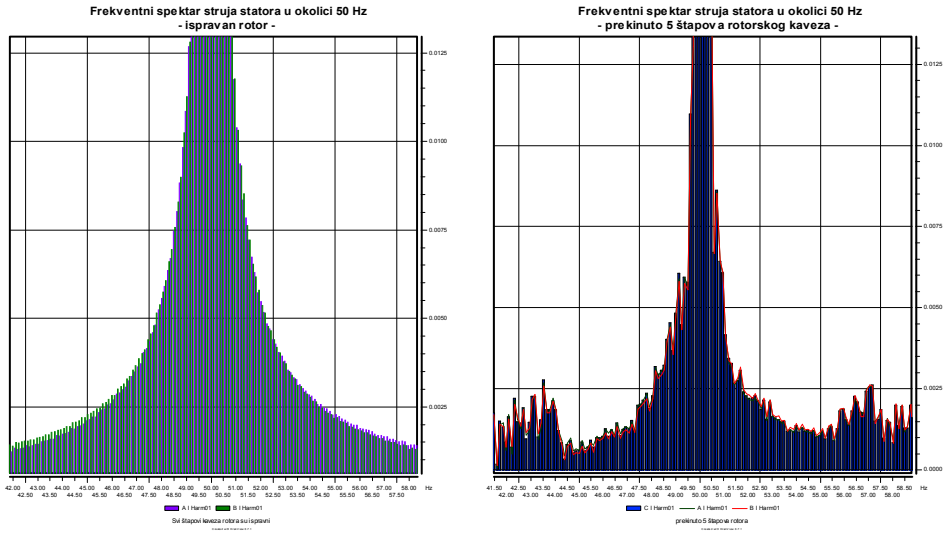
Korištenjem programskog paketa Dran-View 6 snimljeni dijagrami se veoma jednostavno iz vremenske domene pretvaraju u dijagrame u frekventnoj domeni. To se radi iz razloga boljeg pregleda podataka i uočljivosti anomalija na rotoru [84].

Kao rezultat nastanka grešaka na motoru javljaju se subharmonijske komponente u okolici osnovne frekvencije 50 Hz. Treba istaći i to da su subharmonijske komponente izraženije kod motora opterećenih sa punim teretom u odnosu na motor u praznom hodu. Na slici 7.6. dat je prikaz sučelja software paketa Dran-View 6 [80].



Slika 7.6. *Dran-View 6.*

U svrhu ilustracije dobivenih rezultata na slici 7.7. dat je prikaz frekventnog spektra struje statora u okolici osnovne frekvencije 50 Hz za slučaj ispravnog rotora (slika 7.7. a) i za slučaj rotora u kvaru sa 5 prekinutih rotorskih štapova (Slika 7.7.b)

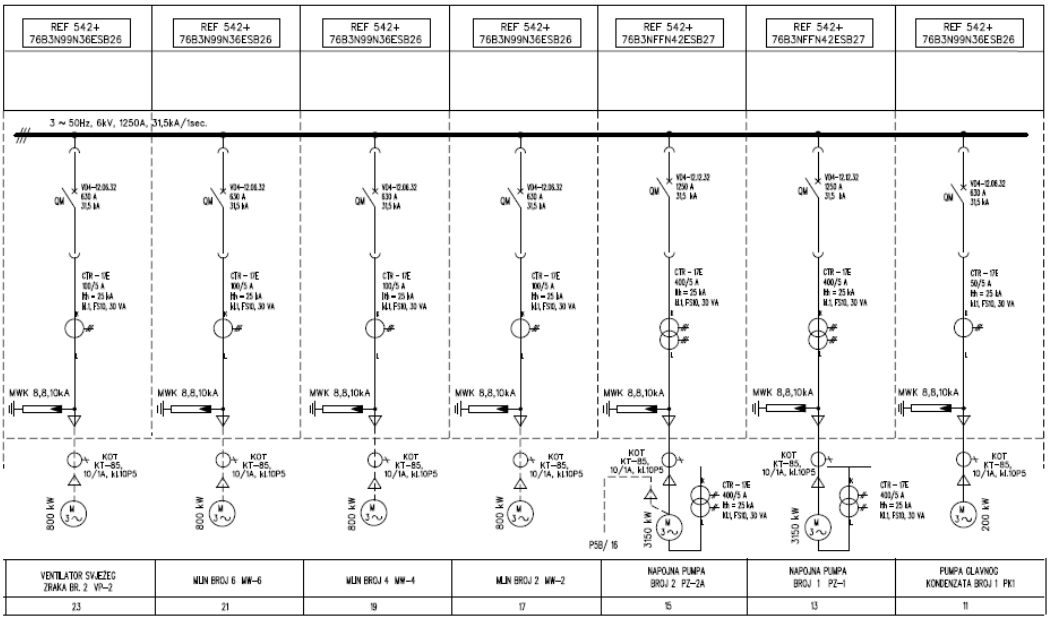


a) *b)*

Slika 7.7. *Prikaz frekventnog spektra struje statora asinkronog kaveznog stroja*

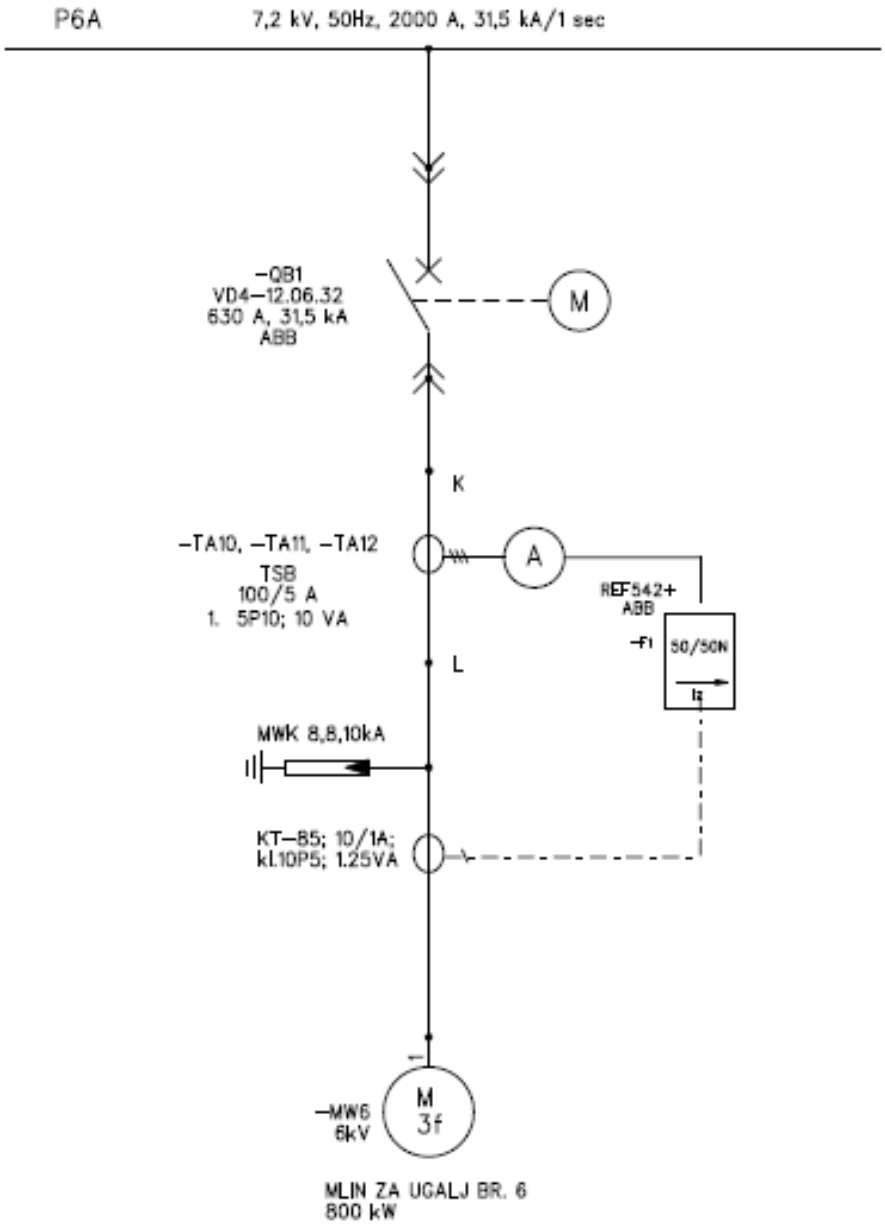
7.2. Istraživanja na teškom EMP mlina 6. bloka 6. TE Tuzla

Nakon što se dokazala uporaba snimaka sa releja REF 541 odnosno dobivenih rezultata ispitivanja na malom motoru provedena su probna eksperimentalna ispitivanja na realnom 6 kV EMP na Bloku 6. u pogonu TE Tuzla (jednopolna shema dijela Bloka 6. data na slici 7.8.). Konkretno u ovom slučaju radilo se o pogonu teškog EMP mlina 6. bloka 6. TE Tuzla sa 6 kV asinkronim kaveznim motorom snage 800 kW čiji je jednopolni prikaz dat na slici 7.9. [85]



Slika 7.8. *Jednopolna shema dijela Bloka 6. TE Tuzla [85]*

Na postrojenju Bloka 6. TE Tuzla urađen je retrofit postrojenja u periodu 2004-2005 godine. Dotrajalost starog postrojenja, česti neselektivni ispadi zbog pogrešnih prorada zaštitnih releja bili su osnovni razlozi opredjeljenja za obnavljanjem postrojenja. Osim toga, navedene činjenice su uticale i na povećanje troškova održavanja i smanjenu proizvodnju uslijed neplaniranih zastoja pogona. Ranija oprema je bila projektirana za 100.000 sati rada , a do početka kolovoza 2004. godine ostvareno je 157.376 sati rada. Svi ovi pokazatelji su ukazivali na potrebu za rekonstrukcijom kompletnog postrojenja [86,87].



Slika 7.9. *Jednopolni prikaz Mlina za ugalj br.6. 800 kW [85]*

Između ostalog rekonstrukcijom postrojenja bilo je potrebno ostvariti poboljšanje funkcija električnih zaštita. U tu svrhu izvršen je odabir releja sa sljedećim zaštitinim funkcijama:

- termička zaštita,
- kratkospojna zaštita,
- zaštita od nesimetrije,
- zaštita od blokiranja rotora,
- zaštita od predugog zaleta,
- zemljospojna zaštita,
- zaštita od prečestog startanja,

Odabrani numerički releji trebali su zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- Trebali su imati sve funkcije zaštite koje zahtijeva dati pogon, sa pouzdanim i selektivnim djelovanjem u slučaju kvara,
- Da bude dio SCADA sustava za daljinski nadzor i upravljanje,
- Trebali su omogućiti svjetlosnu signalizaciju uklopnoga stanja prekidača na jednopolnoj shemi displeja električne zaštite pogona,
- Trebali su da omoguće mjerenja električnih veličina (struja,napon,snaga, frekvencija itd.),
- Sistemski i aplikativni softver (licencirani) trebao je da omogući transfer svih informacija iz električnih zaštita postrojenja u lokalnu LAN mrežu TE "Tuzla",
- Trebali su da imaju software za memoriranje i prikaz digitalnih i analognih veličina na PC i štampaču kao i software za parametriranje zaštitnih funkcija,
- Mogućnost priključenja zaštite na sustav realnog mjerenja vremena – GPS,
- Trebali su da imaju funkciju samonadzora u cilju otkrivanja unutarnjeg kvara ili poremećaja ulaznih parametara (nestanak pomoćnog napona, prekid jedne strujne grane, …),
- Trebali su da imaju lokalnu indikaciju djelovanja zaštite, signalizaciju položaja prekidača, kao i kontakte za signalizaciju u komandnoj prostoriji.

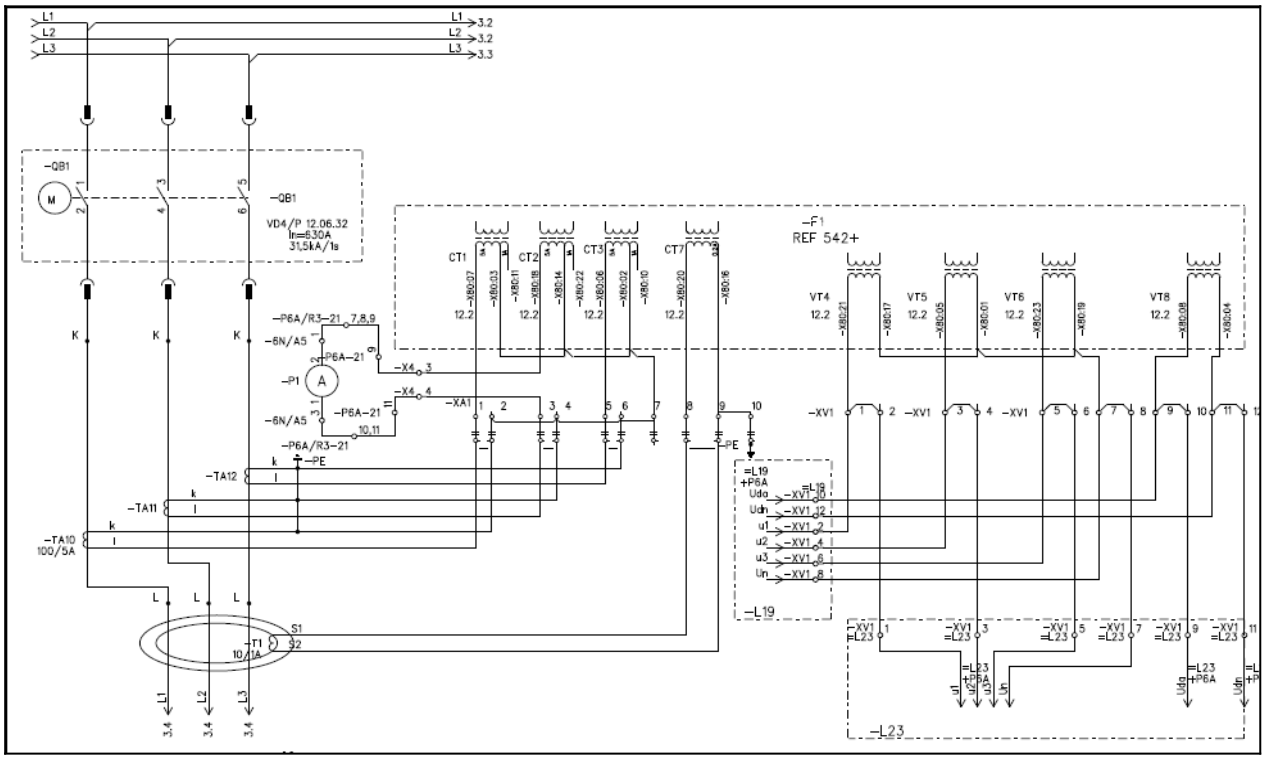
Motorska zaštita REF 542 plus je multifunkcionalni zaštitni relej, univerzalne primjene koji se može koristiti i za zaštitu raznih tipova motora [88]. Konstruirani su na bazi mikroprocesora. Vlastiti nadzorni sustav releja vrši kontinuirani monitoring releja. Za neposredno lokalno korištenje relej posjeduje LCD displej koji je fizički odvojen od ostalog fiksnog dijela releja. Sa prednje strane releja postoji komunikacijski port za komunikaciju releja i računala, dok sa zadnje

strane postoji komunikacijski port za povezivanje releja na daljinski sustav kontrole, upravljanja i nadzora. [89]

Na slikama 7.10. i 7.11. prikazani su detalji spajanja analognih strujnih i naponskih ulaza releja kao i shema analognih i digitalnih izlaza sa stražnje ploče releja.

Relej sadrži sljedeće funkcije:

- Nadzor termičkog naprezanja motora
- Trofazna prekostrujna zaštita sa „definite-time“ karakteristikom I >
- Trofazna kratkospojna zaštita sa „definite-time“karakteristikom I >>
- Trofazna neusmjerena zemljospojna zaštita sa „definite-time“karakteristikom U_0
- Trofazna zaštita od nesimetričnog opterećenja
- Zaštita od predugog zaleta
- Zaštita od prevelikog broja zaleta
- Zaštita od ukočenog rotora



Slika 7.10. *Detalj spajanja SMT i NMT na analogne ulaze releja REF 542 Plus*

Osnovna izvedba releja pored ostalog ima :

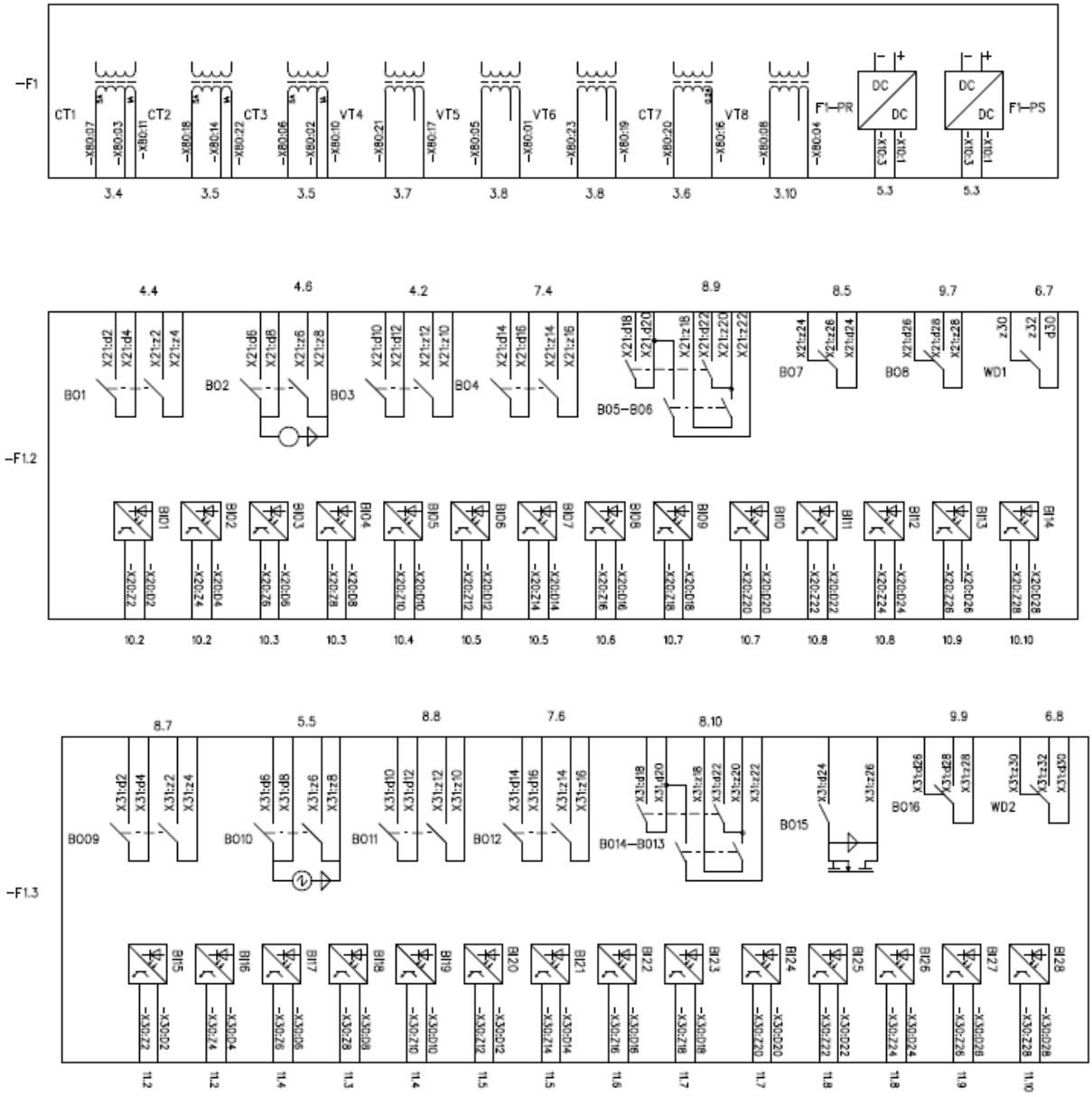
- Četiri strujna ulaza
- Tri normalno otvorena snažna izlazna kontakta
- Programibilni izlazni kontakti za željene funkcije
- Optički komunikacijski port sa prednje strane
- Opcionalni port sa zadnje strane
- Baterija za čuvanje vremena na releju
- Dva dvopoložajna signalna izlazna kontakta
- Snimač poremećaja (Disturbence recorder)
- Neizbrisiva memorija

Opcionalno relej može sadržavati RTD modul sa:

- Sa 6 mjernih ulaza
- Podrška za PTC termistore i različite RTD senzore
- Tri dodatna galvanski izolirana digitalna ulaza

Ostale osobine releja su:

- Vremenska sinkronizacija sa digitalnim ulazima
- Nadzor isključenja prekidača
- Mogućnost izbora frekvencije 50 i 60 Hz
- Višejezični izvještaji
- Zaštita od neovlaštenog pristupa (pasword)
- Prikaz primarnih vrijednosti struja
- Podešavanje svih vrijednosti na PC
- Nadzor punjenja baterije
- Stalni nadzor elektronike i software
-



Slika 7.11. *Zaštitni relej REF 542 Plus [88]*

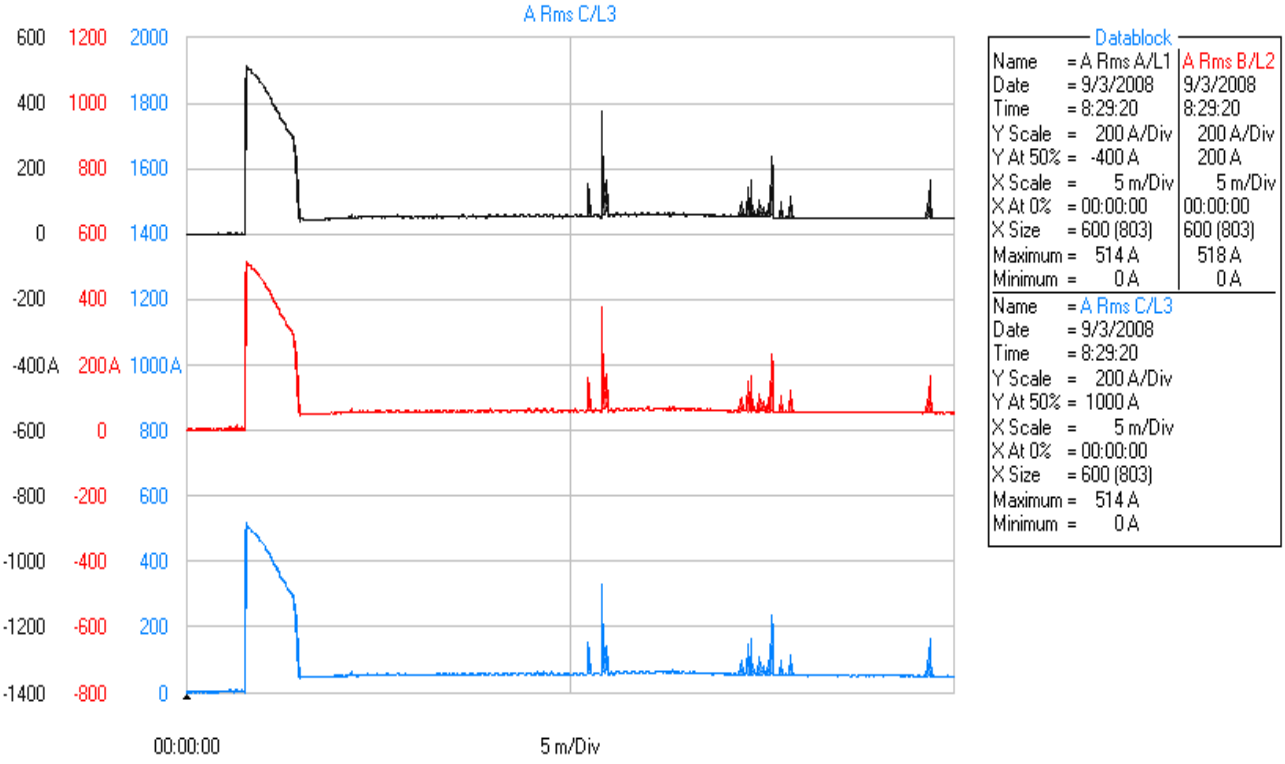
Podešenja zaštitnih funkcija za konkretan slučaj data su u tablici 7.1.

Tablica 7.1. *Podešenja zaštitnih funkcija na releju REF 542 Plus [88]*

Funkcija	Podešenje	Komentar
t_{6x}	104 s	Krivulja tj. radno vrijeme u sekundama za hladan motor kod šestostruke FLC (FLC – full load current). FLC motora na temperaturi ambijenta 40°C određuje najveći dozvoljeni trajni teret. Ako u ovom slučaju struja motora eventualno poraste za 5% to će uzrokovati njegovo isključenje.
p	50%	Termička zaštita motora zavisi od težinskog faktora p. Npr. Ako je p podešeno na 50%, termička zaštita uzima u obzir pojavu toplih tačaka motora te razlikuje kratkovremena i dugovremena preopterećenja. U principu za direktno startane motore tipično podešenje za p je 50%.
K_c	4	Vremenska konstanta Kc predstavlja odnos vremenske konstante hlađenja i vremenske konstante zagrijavanja motora.
Θ_a	90%	Vrijednost na kojoj se pojavljuje signal alarma od preopterećenja (u ovom slučaju 90%) u odnosu na trip nivo.
Θ_i	50%	Vrijednost na kojoj je dozvoljeno ponovno uključivanje motora (50% u ovom slučaju) u odnosu na trip nivo.
t_{amb}	40 °C	Pretpostavljena radna temperatura ambijenta motora. U zavisnosti od temperature ambijenta mijenja se i FLC. Na 40°C FLC treba množiti sa faktorom 1.
Is	2.42 I_n	Vrijednost prorade zaštite od predugog zaleta u odnosu na nazivnu struju releja (motora ako se prenese vrijednost na primarnu stranu).
t_s	80 s	Vrijeme djelovanja zaštite od predugog zaleta – izabran princip tačno definisanog vremena.
I >>	7,26 I_n	Vrijednost prorade zaštite od kratkog spoja u odnosu na nazivnu struju releja (odnosno motora ako se prenese vrijednost na primarnu stranu).
t >>	0,05 s	Vrijeme djelovanja zaštite od kratkog spoja.
I_o	3%I_n	Podešena procentualna vrijednost struje zemljospoja u odnosu na nazivnu struju releja (motora ako se prenese vrijednost na primarnu stranu).
t_o	1 s	Vrijeme djelovanja zaštite od zemljospoja.
I_2	0,2	Zaštita od nesimetrije je bazirana na računanju Negativne-Fazne-Sekvence (NPS) struje i otkrivanju debalansa između struja I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}. Kada računata vrijednost NPS=I_2 nadmaši podešenu vrijednost dolazi do startnog signala ove zaštite poslije približno 100 ms.
k_2	7	Vremenska konstanta jednaka vremenskoj konstanti motora (u principu treba biti dobivena od proizvođača motora)
Σt_{si}	80 s	Kumulativni brojač otkriva prečesto startanje motora. U ovom primjeru dozvoljena su dva starta u jednom satu.

$\Delta\Sigma t_s$	79 s	Maksimalno dozvoljeno vrijeme starta za ovu zaštitu.

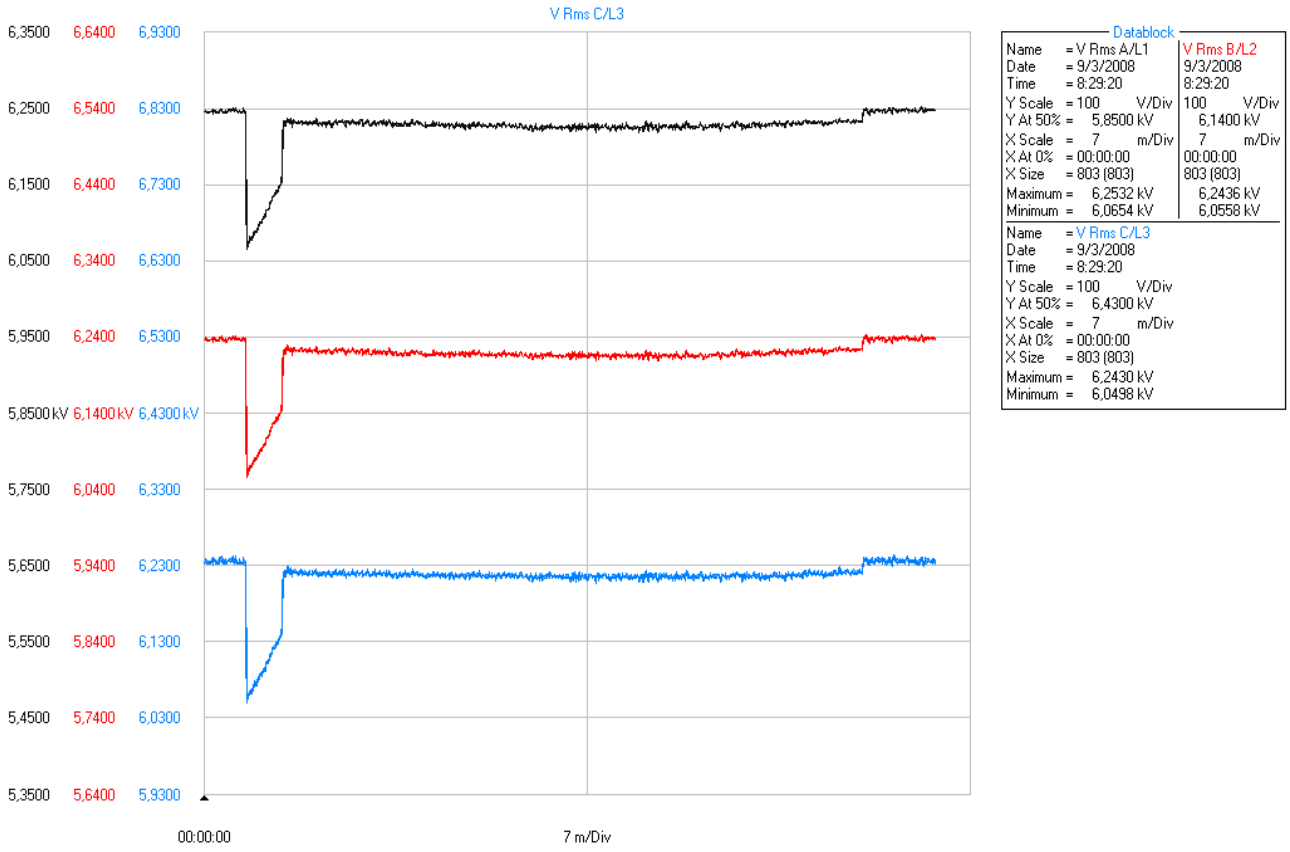
U svrhu što boljeg iskorištenja motora i ispravnog podešenja zaštitnih funkcija releja vršena su snimanja karakteristika zaleta motora M6. Snimanje je obavljeno sa pojačala i instrumenta Metex DG SCOPE 20 MHz kao i sa analizatorom mreže proizvodnje Fluke 435-II . Snimak struja (Slika 7.12.) i napona (slika 7.13.) u toku zaleta prikazan je u ovom poglavlju dok su ostali interesantni snimci dati u Prilogu ovog rada.



Slika 7.12. *Struje upuštanja motora mlina 6. bloka 6. TE Tuzla*

Snimanja ostalih dinamičkih režima rada ovog EMP mlina nisu mogla biti vršena zbog pogonskih uvjeta rada na Bloku 6 TE Tuzla.

Također u Prilogu ovog rada se nalaze podaci o ćeliji (opremi ćelije - SMT, prekidač itd), zatim podaci o zaštitnom releju, kao i ispitni protokoli o ispitivanju zaštita za navedeni motor mlina 6.



Slika 7.13. Naponi pri upuštanju motora mlina 6. bloka 6. TE Tuzla

Podaci o motoru (Slika 7.14.) su slijedeći [85]:

Mlin: 6

Vrsta motora: trofazni asinkroni dvokavezni

Proizvođač: ATB „SEVER“ Subotica

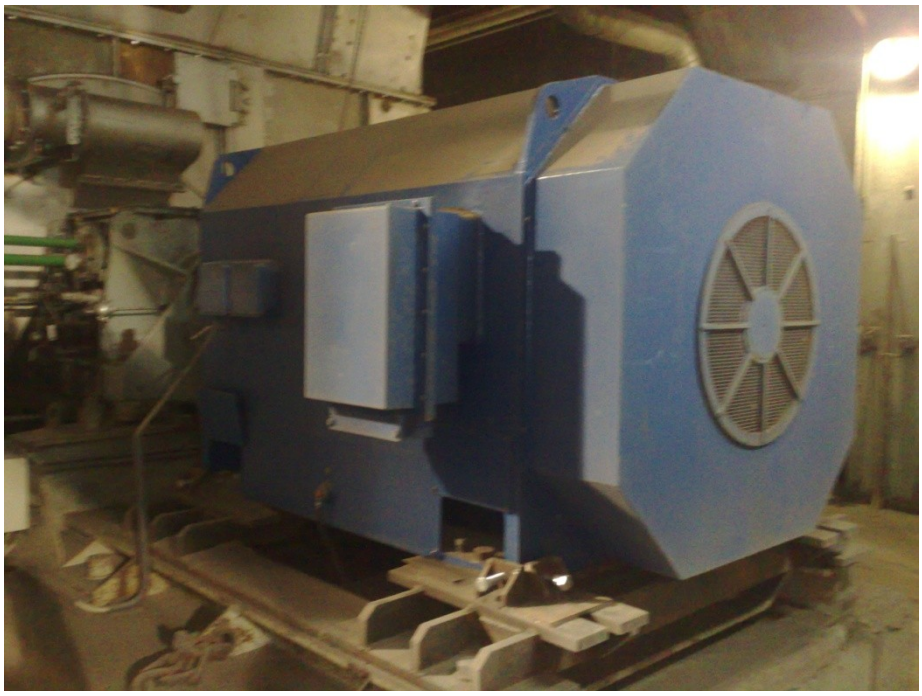
Nominalni napon : 6000 V Y

Nominalna snaga: 800 kW

Faktor snage cosφ: 0,77

Klasa izolacije : F

Rotor kavezni



Slika 7.14. *Motor mlina 6. snage 800 kW bloka 6. TE Tuzla*

U ovom konkretnom primjeru za dati EMP u svrhu zaštite koristi se numerički zaštitni relej proizvodnje "ABB" tip „REF 542 plus“ sa svim potrebnim zaštitnim funkcijama (Slika 7.15.). Zbog nesmetanosti odvijanja procesa rada za predmetna snimanja struja i napona nije korišten relej REF 542 plus već je korišten dodatni relej REF 541 koji je spojen tako što su mu struje I_{L1}, I_{L2} i I_{L3} spojene u seriju sa strujama releja REF 542 plus a naponi U_{12} , U_{23} i U_{31} u paralelu sa naponima koji su prisutni na releju REF 542 plus [89,90].



Slika 7.15. Polje Mlina br.6. sa zaštitnim relejom REF 542 plus

Pošto se radi o veoma važnom EMP bilo je potrebno duže vrijeme da se dobije neophodni zastoj a u svrhu snimanja pokretanja motora EMP-a kao i stacionarnog režima rada. Naime u

poglavlju 6. ovog rada je rečeno da je za potrebe metode spektralne analize statorske struje potreban snimak samo jedne struje statora u stacionarnom režimu rada .

Snimanje je obavljeno u 4 faze (Prilog 11) [86]:

1) Start motora EMP-a – snimak struje jedne faze i sva tri linijska napona
2) Stacionarni režim rada EMP-a – snimak jedne struje
3) Stacionarni režim rada EMP-a – snimak sve tri struje
4) Stacionarni režim rada EMP-a – snimak sve tri struje sa isključenim binarnim ulazima

8. ZAKLJUČAK

Istraživanja opisana u ovoj disertaciji obuhvaćaju primjenu numeričkih zaštitnih releja u svrhu dijagnosticiranja kvarova na VN teškim EMP sa asinkronim kaveznim strojevima. Na osnovu toga u najkraćem se može zaključiti:

- Tehničke uvjete i kriterije za izbor osnovnih elemenata elektromotornog pogona (EMP), opredjeljuju prije svega njihova uloga i značaj u tehnološkom procesu. Pored uvjeta koji vrijede za stacionarni rad, moraju biti ispunjeni i kriteriji koje definira dinamički prelazni proces, posebno proces pokretanja. Ovi kriteriji potiču od uvjeta napajanja i specifičnosti radnog mehanizma, odnosno EMP. Kriterije koji potiču od napojne električne mreže lakše je zadovoljiti, međutim kriterije koji karakteriziraju specifičnost vrste radnih mehanizama nije uvijek moguće do kraja ispuniti. Kako je po pravilu kod ovakvih pogona moment inercije radnog mehanizma u odnosu na moment inercije rotora stroja izuzetno velik, veći od 10 puta, ova se vrsta EMP svrstava u grupu teških pogona. Obzirom na visoke zahtjeve u pogledu pouzdanosti, sigurnosti i jednostavnosti u eksploataciji, zbog svojih osobina kao pogonski strojevi teških EMP, skoro da su predodređeni VN asinkroni kavezni, odnosno dvokavezni strojevi.

- Razvoj elektroenergetike u posljednje vrijeme, postavlja stroge zahtjeve pred zaštitu elektroenergetskih postrojenja. Velike struje kratkih spojeva pri pojavi kvara u električnoj mreži, te održavanje stabilnog rada EMP u takvim uvjetima, zahtijevaju vrlo precizne i osjetljive elemente zaštite pogonskih strojeva. Usavršavanjem tehnologije proizvodnje strojeva, bitno je povećan učinak stroja po jedinici volumene, što znači da manji volumen po snazi stroja snižava termički kapacitet stroja, a to znači da je brže zagrijavanje pri nenormalnim uvjetima. Suvremeni VN asinkroni kavezni strojevi dimenzionirani su za točno određeni moment tereta i sa vrlo malim dozvoljenim preopterećenjem. Svako odstupanje nekog, od velikog broja različitih činilaca, koji utječu na rad asinkronog stroja po pravilu uzrokuje njegovo oštećenje. Dakle u pogonu se mora računati sa mogućnošću pojave kvara na gotovo svakom dijelu električnog postrojenja, a samim tim i na električnom stroju.

- VN asinkroni kavezni strojevi su najčešće pogonski strojevi raznih mehanizama. Obzirom na snagu strojeva uglavnom se radi o značajnim EMP u proizvodnim procesima - najčešće glavnim. Zbog toga je veoma važno osigurati nesmetan rad ovakvih pogona. U tom smislu je i potreba za sigurnom i sveobuhvatnom zaštitom elektromotora. Brzim isključenjem

oštećenog stroja iz pogona i njegovim odvajanjem od ostalog, zdravog sustava mogu se izbjeći neželjene posljedice. Znači, vrlo je važno od čega i na koji način treba štititi EMP-e, posebno one koji pokreću vrlo važna i osjetljiva industrijska postrojenja, čiji bi zastoj izazvao velike materijalne štete. Zbog toga je pri definiranju zaštite obavezno potrebno izvršiti potpunu analizu stacionarnog i dinamičkog režima rada ovakvih EMP. U slučaju direktnog pokretanja takvog pogona, to podrazumijeva kvalitativni prikaz ponašanja pogonskog motora od trenutka uključenja na napon do postizanja nominalne brzine. Analiza, pored definiranja svih relevantnih i utjecajnih parametara EMP, podrazumijeva snimanje karakteristika EMP kako u stacionarnom radu tako i za vrijeme pokretanja, pomoću pogodnog analizatora, koje će omogućiti definiranje kritičnih točaka događaja sa aspekta mogućeg kvara. U tom pogledu kao rješenja problema nameću se numerički releji koji imaju mogućnost snimanja događaja i značajnu ulogu u dijagnosticiranja stanja EMP. Mogućnosti modernih numeričkih zaštitnih releja su velike sa aspekta osjetljivosti, točnosti, broja funkcija zaštite i nadzora, pouzdanosti itd, tako da se "klasične" zaštite uglavnom nalaze kod ranije izgrađenih EMP. Posebnu pažnju treba posvetiti usklađivanju podešenja numeričkih relejnih zaštita sa stvarnim karakteristikama motornog pogona.

- Korištenje numeričkih releja u dijagnostičke svrhe predstavlja novinu, te da do sada nije bilo predmetom nikakvih istraživanja. U istraživanju provedenom za potrebe izrade ove disertacije proveden je postupak snimanja „događaja“ putem snimača (disturbance rekorder) kao veoma bitne funkcije numeričkih releja, a u funkciji suvremene on-line dijagnostike VN asinkronih kaveznih strojeva. Dobiveni snimci kao rezultati istraživanja, prevedeni iz vremenske u frekventnu domenu pomoću brze Fourierove transformacije su pokazali primjenjivost u dijagnosticiranju kvarova asinkronih kaveznih strojeva. U disertaciji je dat akcenat na kvarove rotora VN asinkronog kaveznog stroja iz razloga što se oni upravo na tom mjestu najčešće i javljaju. Krajnji cilj je postignut a on se ogleda u podizanju razine pouzdanosti, blagovremene i svrsishodne prevencije u održavanju ovako važnih EMP, smanjenju troškova održavanja i na koncu povećanju stupnja sigurnosti pogonskog osoblja.

LITERATURA

[1] B. Jurković, Elektromotorni pogoni, Školska knjiga, Zagreb, 1990
[2] R. F. McElveen, M. K. Toney, Starting high-inertia loads, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 37(1), str. 137–144 (2001).
[3] Hodžić, Dinamika elektromotornih pogona, Lukavac 2012
[4] V. Vučković, Električni pogoni, Akademska misao, Beograd, 2002.
[5] P. J. Tavner, J. Penman, Condition Monitoring of Electrical Machines, Research studies press LTD, Letchworth, 1987.
[6] Dolenc, Asinkroni strojevi, Sveučilište u Zagrebu, 1970
[7] Š. Mašić , Električni strojevi, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Sarajevu, 2006.
[8] IEEE, Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I. IEEE, Trans. on Industry Applications, IA-21(4), 853–864, 1985
[9] M. Jandrić, B. Frančić, Dinamika električnih strojeva, Graphis Zagreb, 1977.
[10] J. L. Kirtley Jr. , Analytic Design Evaluation of Induction Machines, Massachusetts Institute of Technology Department of Electrical Engineering and Computer Science 6.061 Introduction to Power Systems Class Notes Chapter 10, 2003.
[11] Jahić, Ž. Hederić, M. Atić, Detection of failures on the high-voltage cage induction motors rotor, 32nd International Conference Science in Practice (SIP 2014), Osijek, October, 2014.
[12] D. W. Novotny and T. A. LIPO, Vector control and Dynamics of AC drives, Oxford science publications, 1996
[13] N. Marinović, Elektromotorna postrojenja, Školska knjiga, Zagreb, 1986.
[14] Jahić, „Utvrđivanje kriterija za izbor zaštite teških elektromotornih pogona sa visokonaponskim asinhronim kaveznim motorim“, Magistarski rad, Tuzla, 2009
[15] H. Penrose, Large Electric Motor Reliability, What Did the Studies Really Say?, CBM CONNECT, September 2018 , https,//www. cbmconnect. com/large-electric-motor-reliability-what-did-the-studies-really-say-2/ (pristupljeno 20. 01. 2020.)
[16] B. Mitraković, N. LJ. Nikolić, Asinhrone mašine, Naučna knjiga Beograd, 1986
[17] V. Teodorović, O određivanju zagrijavanja asinhronih motora velikih snaga sinte-tičkom metodom 3K, Zbornik radova, Savjetovanje visokonaponski motori, Sever Subotica,1988.
[18] R. Fišer, S. Ferkolj, Sodobne metode diagnostike elektromotorskih pogonov z asin-hronskimi motorji, Zbornik Pete Elektrotehniške in Računalniške Konference ERK 96, Portorož, str. 331-334, 1996.
[19] Y. Xia, Y. Xu , M. Ai, J. Liu, Temperature Calculation of an Induction Motor in the Starting Process, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 29(2), 1–4,2019
[20] W. T. Thomson, On-line Current Monitoring to Diagnose Mechanical Shaft Misalignment in Three Phase Induction Motor Drive Systems, Proceedings of the Int. Conference on Electrical Machines ICEM94, Paris, Vol. 2 , str. 239-243, 1994.
[21] J. Varga, Đ. Bašić, Naprezanja velikih elektromotora u prelaznim režimima, Zbornik radova, Savetovanje o visokonaponskim motorima, Sever, Subotica, 1988.
[22] Đ. Bašić, G. Vidaković, Modeliranje procesa zagrijavanja visokonaponskih asin-hronih motora pri upotrebi mikroprocesorskih releja u termičkoj zaštiti, Zbornik radova, Savjetovanje visokonaponski motori, Sever Subotica, 1988.

[23] Jahić, Ž. Hederić, E. Bečić, Definiranje uzroka nastanka kvarova i njihovo lociranje na rotoru velikih visokonaponskih kaveznih asinhronih motora, Međunarodna konferencija za visokonaponske električne sisteme BHK CIGRE, XI Bosansko-hercegovačko savjetovanje, Zbornik radova R. A1. 07. , Neum 2013.
[24] Z. Kujundžić, Električna zaštita asinhronih motora povećana sigurnost, Končar, Stručne informacije 1-2/84, 1984.
[25] Hodžić,Upravljanje i regulacija elektromotornih pogona, Autorizovana predavanja za Postdiplmski studij – Energetska elektrotehnika, Tuzla, 2008.
[26] T. Teklić, B. Filipović-Grčić, and I. Pavić, Modelling of three-phase electric arc furnace for estimation of voltage flicker in power transmission network, Electr. Power Syst. Res. , vol. 146, pp. 218–227, 2017.
[27] P. Vukelja, J. Mrvić, D. Hrvić i dr. , Istraživanja prenapona i struja pri uključenju i isključenju visokonaponskih motora u mreži 6 kV Sartid-a, Elaborat broj 310309, Elektrotehnički institut N. Tesla, Beograd 2003.
[28] Tokić, Kvalitet električne energije, Autorizovana predavanja na PDS CEFES, ETF Tulza, 2005.
[29] J. A. Melkebeek, Electrical Machines and Drives, Fundamentals and Advanced Modelling. Cham, Switzerland, Springer, 2018.
[30] Tokić, V. Milardić, Kvalitet električne energije, Tuzla, 2015
[31] Vanja Ambrožič, David Nedeljković, Rastko Fišer, New control method for current converters, V, EPE 2001, 9th European Conference on Power Electronics and Applications, Graz, 27-29 August, 2001, Brussels, EPE Association, 2001,1-8.
[32] Hodžić, Interakcija električne mreže i pogonskih motora, Autorizovana predavanja na PDS Fakulteta elektrotehnike, 2006-2007
[33] Z. Cele;A. M. Chol;R. F. Chidzonga, Problems on high failure incidence of induction motors and protection, 2004 IEEE Africon. 7th Africon Conference in Africa
[34] Javier Portos;Kenneth Dean Garner;Blake Parker;Jim Cannon, Most common mechanisms and reasons for electric motor failures in petrochemical industry, 2015 IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC), 2015
[35] L. V. Pavlović, Z. M. Lazarević, Asinhroni motori u protiveksplozivnoj zaštiti povećana sigurnost“, Akademska misao Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2008.
[36] F. Božuta, Automatski zaštitni uređaji elektro energetskih postrojenja, Elektro-tehnički fakultet Univerziteta u Sarajevu, 1987.
[37] Jahić, A. Hodžić, Š. Hadžić,Zaštita teških elektromotornih pogona sa VN asin-hronim kaveznim motorima, Međunarodna konferencija za visokonaponske električne sisteme BHK CIGRE, IX Bosanskohercegovačko savjetovanje, Zbornik radova R.B5. 10, 448-460, Neum, 2009.
[38] J. Zakonjšek, Zaštita velikih asinhronih motora, XV Savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Referat br. 34. 02, Beograd 1981
[39] J. Y. Blanc, Control / monitoring and protection of HV motors, Cahier Technique Merlin Gerin no. 165/p. 3, 1995.
[40] Đ. Bašić, G. Vidaković, Zaštita visokonaponskih motora primjenom mikro proce-sorskog uređaja za zaštitu, Zbornik radova, Savjetovanje visokonaponski motori, Sever Subotica, 1988.
[41] Pinja Zhang, Yi Du, Thomas G. Habetler and Bin Lu, Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium- Voltage Induction Motors, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No. 1, January/February 2011

[42] IEEE, Std C37. 96-2000, Revision of IEEE Std C37. 96-1988. , IEEE Guide for AC Motor Protection, 2000.
[43] Buttery;S. Alahakoon, Improving condition monitoring & fault diagnosis strategy for HV motors in coal fired power stations, 2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2013
[44] P. J. Tavner, Review of condition monitoring of rotating electrical machines. Electric Power Applications, IET, 2(4), 215-247
[45] R. Giussani, L. Renforth, M. Seltzer-Grant and C. Zachariades, A holistic combined electrical and mechanical condition monitoring technique for oil and gas high voltage rotating machines, 2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2015, pp. 283-287
[46] Pinja Zhang, Yi Du, Thomas G. Habetler and Bin Lu, Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium- Voltage Induction Motors, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No. 1, January/February 2011.
[47] Fang Duan, Diagnostics of Rotor and Stator Problems in Industrial Induction Motors, B. E. (Telecomunikation Engineering), Southwest Jiaotong University, China, 2005
[48] M. Trkulja, Elektromotorni pogon sa teškim uvjetima pokretanja, Končar , Stručne informacije 3-4/80, (od str. 113 do str. 22), 1980
[49] Renforth, A New Technique for the Remote Partial Discharge Monitoring of the Stator Insulation of High-Voltage Motors Located in Ex (Hazardous) Locations. IEEE PCIC Conference, New Orleans, USA, (2012).
[50] [F. Duan, Diagnostics of Rotor and Stator Problems in Industrial Induction Motors, B. E. Telecommunication Engineering, Southwest Jiaotong University, China, 2005
[51] Barat, Savremena tendencija projektovanja velikih elektromotora, II Severov simpozijum o velikim motorima, Zbornik radova, Subotica 1980
[52] Riera-Guasp, M. Cabanas, J. A. Daviu, Influence of Nonconsecutive Bar Breakages in Motor Current Signature Analysis for the Diagnosis of Rotor Faults in Induction Motors,IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010 Vol 25,
[53] K. Bečić, Utjecaj reparature namota rotora na čvrstoću konstrukcije kod visoko-naponskih asinhronih motora, Doktorska disertacija, Tuzla, 2005
[54] K. Bečić, M. Kasumović, A. Hodžić, Utvrđivanje kvara na kavezu rotora VN asin-hronih motora, Međunarodna Konferencija za visokonaponske električne sisteme BHK CIGRE, VII Savjetovanje bosansko hercegovačko komiteta, Zbornik radova, R. A1. 04, str. 20-23, Neum, 2005.
[55] Ban D. , Wolf R. , Cettolo M. , Kompjutorizirana „ON-LINE“ dijagnostika stanja rotora asinkronih motora, 4. međunarodni simpozij o novim tehnologijama, Pula, 25-27. 10. 1993. , Hrvatska, pp. 80-83.
[56] Tavner, F. Duan , Diagnostics of Rotor and Stator Problems in Industrial Induction Motors, B. E. Telecomunication Engineering, Southwest Jiaotong University, China, 2005
[57] H. W. Penrose, Estimating motor life using motor circuit analysis predictive measure-ments. Part II, Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2004, pp. 15-17
[58] A. Miletić, Magistarski rad, Dijagnostičke metode i kriteriji za ocjenu elektro-mehaničkog stanja asinkronog stroja, Zagreb, 2002. , str. 8.
[59] Aydin, M. Karakose, E. Akin, A new method for early fault detection and diagnosis of broken rotor bars, Elsevier, Wnergy Conversion and Management , Vol 52, No. 4, 2011
[60] Bečić, Utjecaj reparature namota rotora na čvrstoću konstrukcije kod visokonaponskih asinhronih motora, Doktorska disertacija, Tuzla, 2005.

[61] H. Benbouzid, A review of induction motors signature analysis as a medium for fault detection, IEEE Trans. Ind. Electron. , vol. 47, no. 5, pp. 984-993, Oct. 2000.
[62] Bessous, S. Zouzou, S. Sbaa, A. Khelil, New vision about the overlap frequencies in the MCSA-FFT technique to diagnose the eccentricity fault in the induction motors, 2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B),2017
[63] J. Castelli, J. P. Fossati, M. T. Andrade, New methodology to faults detection in induction motors via MCSA, 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Latin America, 2008
[64] R. Fišer. , Modeliranje in diagnostika napak v pogonih z asinhronskimi motorji, Doktorska disertacija, Ljubljana 1998.
[65] G. Dias , I. E. Chabu, Analysis of broken rotor bars in large induction motors, Exacta, Vol4, No2,Centro Universitario Nove de Julho, Sao paulo, Brasil, 2006
[66] R. Saravana Kumar, K. K. Ray, K. Vinoth Kumar, Fault diagnosis of industrial drives using MCSA techniques,2009 International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation,2009
[67] Bhole, S. Ghodke, Motor Current Signature Analysis for Fault Detection of Induction Machine–A Review,2021 4th Biennial International Conference on Nascent Techno-logies in Engineering (ICNTE), 2021
[68] S. Singh, A. Kumar,N. Kumar, Motor Current Signature Analysis for Bearing Fault Detection in Mechanical System, ScienceDirect Procedia Materials Science, vol. 6, pp. 171-177, 2014.
[69] P. Bajec. , J. Nastran , Detekcija električne nesimetrije kratkostične kletke asin-hronskega motorja na osnovi spektralne analize dinamičnega navora, ERK, 2002, Portorož, str, 421-424
[70] R. Fišer. ,S. Ferkolj. , Detekcija nesimetrije rotorskega navitja asinhronskega motorja na osnovi frekvenčne analize statorskega toka, Zbornik elektrotehniška in računal-niška konferenca ERK 1998, Portorož, str. 479-482.
[71] N. Mehala, R. Dahiya, An Approach of Condition Monitoring of Induction Motor Using MCSA, International journal of Systems Applications, Engineering and Development, Vol 1, No 1, 2007
[72] Drobnič , V. Ambrožič, R. Fišer, Uporaba diskretne Fouriereve transformacije pri detekciji zlomljenih rotorskih palic v asinhronskem motorju, Elektrotehniški vestnik 80(4) , 177-183,2013
[73] N. Turk , Fault Diagnosis of Induction Motor using MCSA, International Journal of Electrical and Computer Engineering. ISSN 0974-2190 Volume 8, Number 1 (2016), pp. 13-18
[74] R. J. Gilmore, Motor current signature analysis to detect faults in induction drives – fundamentals, data interpretation and industrial case histories, Proceedings of the thirty-second turbomachinery symposium, 2003
[75] ABB report, Proračuni, karakteristike zaleta i podešenja zaštita na 6 kV pogonima, glavnim i rezervnim napajanjima i transformatorima bloka 5 TE Tuzla, prot. br. TET01/06 2006, Zagreb
[76] S. Nikolovski, M. Havranek and P. Marić, Numerical relay protection coordination using simulation software, 2013 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 2013, pp. 869-873.

[77] S. Nikolovski, D. Šljivac, I. Provči, Simulacija rada numeričke zaštite ref 541 u transformatorskoj stanici ts 35/10 kv korištenjem power protector software-a ,6. savjetovanje hk cigre. zagreb , zbornik HK CIGRE, 2003. b5-17.
[78] Iskra, MI 7111-Uputstvo za upotrebu
[79] ABB, REF 541, REF 543 and REF 545 Feeder terminals Buyer's guide
[80] ABB Finland, Feeder Terminal REF 54_ Technical Reference Manual, General, Copyright 2005 ABB Oy, Distribution Automation, Vaasa, Finland
[81] DRANETZ-BMI, Dran-View 6. 3 Professional,Enterprise User Guide-AC power analysis sofware, Dranetz-BMI 1000 New Durham Road Edison, NJ 08818-4019
[82] GMC-I Gossen-Metrawatt GmbH, Operating Manual Mavowat 50
[83] F. Božuta, Automatski zaštitni uređaji elektro energetskih postrojenja, Elektro-tehnički fakultet Univerziteta u Sarajevu, 1987.
[84] Barat, Osnovni principi projektovanja i izbora visokonaponskih motora za termo-elektrane, Časopis Tehnika-Elektrotehnika br. 5, Beograd 1974.
[85] Hodžić, Dinamika elektromotornih pogona-odabrana poglavlja, Univerzitet u Tuzli, 2012.
[86] DELING, Projektna dokumentacija Bloka 6. TE Tuzla, Tuzla, 2012
[87] Hodžić, i drugi, Studija Uporedna analiza termičkih i dinamičkih stanja elektro-motornih pogona mlinova za ugalj u TE Tuzla u uslovima direktnog starta i sa PULVIS spojkom, Fakultet elektrotehnike Univerziteta u Tuzli, 2009.
[88] Enache; A. Campeanu;S. Enache, Dynamic State of Starting for a High-Power Asynchronous Motor Used for Driving a Surface Mining Excavator, 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) 2019
[89] ABB, REF 542plus „Multifunction Protection and Switchgear Control Unit Operators manual", REF542plus_OM_1MRS755869_ENg 1. . 142 ++ (abb. com)
[90] ABB Zagreb, Protokol br. TET01/06 od 22. 05. 2006.

SAŽETAK

Suvremeni trendovi u dizajniranju električnih strojeva usmjereni su na povećanje efikasnosti rada, odnosno na usavršavanje tehnologije proizvodnje električnih strojeva. To posljedično dovodi do smanjenja volumena i smanjenja toplinskih vremenski konstanti električnog stroja. Kako se električnim strojevima u suvremenim industrijskim pogonima nameće i dinamičniji režimi rada to dovodi do pojave bržeg zagrijavanja motora pri preopterećenju što je posebno izraženo kod teških elektromotornih pogona (EMP).

Visokonaponski (VN) asinkroni kavezni motori (AKM) dimenzioniraju se za točno određeni teret velike snage te sa vrlo malim dozvoljenim preopterećenjem za primjenu u teškim EMP. Postoji veliki broj različitih faktora koji utiču na rad VN AKM, a odstupanje svakog od njih može uzrokovati njegovo oštećenje. Razvijeni su razni oblici zaštita motora u suvremenim industrijskim pogonima sa ciljem sprečavanja nastanka kvara ili smanjenja materijalne štete procesa proizvodnje. Štete zaustavljanja procesa proizvodnje pogonjeni sa VN AKM u pravilu su višestruko veće od štete uništenja motora uslijed kvara, pa se nameću zahtjevi procjene stanja i produženja rada motora u stanju kvara dok se ne osigura zamjenski pogoni. Najčešće korištene zaštite u praksi su korištenjem numeričkih releja s obzirom na jednostavniju funkcionalnost, nižu cijenu i robusniju izradu.

U ovoj disertaciji prezentirano je korištenje numeričkih releja kao već postojećeg kontrolnog uređaja zaštite VN AKM kojemu možemo aktivirati i dodatnu prediktivnu zaštitnu ulogu u cilju osiguravanja uvjeta za procjenu stanja teških elektromotornih pogona sa VN AKM. Time se postiže povećanje pouzdanosti rada postrojenja uz zanemarivo ulaganje u postojeću infrastrukturu upravljanja i zaštite. Prezentirane su teorijske postavke dinamičkih režima rada teških EMP sa VN AKM, utjecaji napojne mreže, kao i ekspertna znanja dobivena istraživanjima kvarova te prijelaznih režima rada. Dat je prikaz postojećih dijagnostičkih metoda za lociranje kvarova sa posebnim osvrtom na on-line metode, te primjene zaštitnih numeričkih releja u procjeni stanja teških EMP pogonjenih sa VN AKM.

KLJUČNE RIJEČI

Visokonaponski asinkroni kavezni motori, toplinska naprezanja elektromotora, online dijagnostika kvarova, numerički relej

ABSTRACT

Modern trends in the design of electrical machines aim to increase efficiency, i.e. to improve the technology of electrical machine production. This in turn leads to a reduction in the volume and a reduction in the thermal time constants of the electrical machine. As the electrical machines in modern industrial plants are operated more and more dynamically, this leads to faster overheating of the motor in the event of an overload, which is particularly pronounced in heavy electric motor drives (EMD).

High voltage (HV) Squirrel Cage Induction Motors (SCIM) are designed for particularly high loads and have very low permissible overloads for use in heavy duty applications. There are a number of different factors that affect the operation of HV SCIM and a deviation from any of these factors can result in damage to the motor. In modern industrial plants, various forms of motor protection have been developed to prevent the occurrence of failures or to reduce the damage to the production process. The damage caused by stopping the production process driven by HV SCIM is usually many times more expensive than the damage caused by destroying the motor due to a failure. Therefore, it's necessary to assess the condition of the failed motor and extend its operation until replacement drives are available. The most common protective measures used in practise are the use of numerical relays due to their simpler operation, lower cost and more robust construction.

The dissertation presents the use of numerical relays as an existing control device for HV SCIM protection, to which we can activate an additional predictive protection function to create conditions for state evaluation of heavy electric motor drives with HV SCIM. This increases the reliability of the system with negligible investment in the existing management and protection infrastructure. Theoretical settings of dynamic modes of heavy EMD driven by HV SCIM, influences of the power supply network and expert knowledge from research on failures and transient operating modes are presented. Current diagnostic methods for fault location are presented, in particular on-line methods and the application of numerical protection relays in the condition assessment of heavy EMD driven by HV SCIM..

KEYWORDS

High Voltage Squirrel Cage Induction Motors, Thermal Stresses of Electric Motors, Online Fault Diagnosis, Numerical Relay