

SVEUČILIŠTE U SPLITU
Sveučilišni studijski centar za stručne studije

PREDAVANJA

ZAŠTITA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU

Dr. sc. Petar Sarajčev, doc.
Robert Kosor, dipl.ing.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Kratak osvrt na elektroenergetski sustav	2
1.2. Zaštitni uređaj – relej.....	4
1.3. Relejna zaštita.....	10
2. STRUJNI I NAPONSKI TRANSFORMATORI.....	14
2.1. Značajke i izbor strujnih i naponskih transformatora.....	14
2.1.1. Strujni transformatori.....	14
2.1.2. Naponski transformatori.....	22
2.2. Analiza problematike istosmjerne komponente struje kratkog spoja u strujnom transformatoru	25
2.3. Optički strujni i naponski transformatori	30
3. ZAŠTITA DISTRIBUTIVNIH MREŽA	34
3.1. Zaštita u odnosu na međufazne kratke spojeve	36
3.1.1. Određivanje podešenja vremenskog člana niskopodesive nadstrujne zaštite u odnosu na međufazne kratke spojeve	36
3.1.2. Određivanje podešenja proradne struje mjernog člana niskopodesive nadstrujne zaštite u odnosu na međufazne kratke spojeve	41
3.1.3. Provjera osjetljivosti podešenja mjernog člana nadstrujne zaštite ...	49
3.1.4. Određivanje podešenja proradne struje mjernog člana visokopodesive nadstrujne zaštite u odnosu na međufazne kratke spojeve	49
3.1.5. Određivanje maksimalne i minimalne zone štićenja visokopodesive nadstrujne zaštite	51
3.1.6. Usmjerena niskokopodesiva nadstrujna zaštita u odnosu na međufazne kratke spojeve	60
3.2. Zaštita u odnosu na kvarove sa zemljom	67
3.2.1. Homopolarna nadstrujna zaštita.....	68
3.2.2. Zemljospojna zaštita.....	78
3.2.3. Osjetljiva usmjerena homopolarna nadstrujna zaštita.....	86
4. ZAŠTITA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA	91
4.1. Diferencijalna zaštita energetskog transformatora	92
4.1.1. Teorijske osnove stabilizirane diferencijalne zaštite	93
4.1.2. Diferencijalna zaštita dvonamotnog transformatora	102

4.1.3. <i>Diferencijalna zaštita tronamotnog transformatora</i>	110
4.2. Termička zaštita energetskog transformatora	117
4.3. Nadstrujne zaštite energetskog transformatora.....	118
4.3.1. <i>Niskopodesiva nadstrujna zaštita</i>	119
4.3.2. <i>Visokopodesiva nadstrujna zaštita</i>	121
4.3.3. <i>Homopolarna nadstrujna zaštita.....</i>	121
5. DISTANTNA ZAŠTITA.....	124
5.1. Određivanje mjerene impedancije distantne zaštite.....	129
5.1.1. <i>Mjerena impedancija kod nastupa međufaznih kratkih spojeva</i>	130
5.1.2. <i>Mjerena impedancija kod nastupa dozemnih kratkih spojeva.....</i>	134
5.1.3. <i>Klasifikacija kvarova.....</i>	138
5.2. Vrste i karakteristike distantnih releja	141
5.2.1. <i>Utjecaj otpora na mjestu kvara na rad mjernog člana.....</i>	153
5.3. Proračun podešenja distantnog releja	157
5.3.1. <i>Proračun podešenja proradnih impedancija</i>	157
5.3.2. <i>Određivanje vremenskih podešenja distantnog releja.....</i>	165
5.3.3. <i>Određivanje proradne vrijednosti poticajnog člana</i>	166
5.4. Komunikacijske sheme distantne zaštite.....	168
5.5. Detekcija njihanja snage.....	171

1. UVOD

Relejna zaštita predstavlja složeni sustav, sastavljen od strujnih i naponskih transformatora, sekundarnih krugova ožičenja između sekundara strujnih i naponskih transformatora i zaštitnih uređaja, samih uređaja relejne zaštite te prekidača koji prekidaju strujni krug u kvaru (prema nalogu releja). Ovaj složeni sustav treba kontinuirano pravilno funkcionirati da bi osigurao nesmetan i kontinuiran rad elektroenergetskog sustava u cijelini te isporuku električne energije od proizvođača, preko prijenosnog i distribucijskog sustava do krajnjeg potrošača. Ispravan rad, stabilnost i pouzdanost elektroenergetskog sustava ovisi o pravilnom funkcioniranju sustava relejne zaštite. Budući da su kvarovi na opremi elektroenergetskog sustava stohastičke prirode te često za posljedicu mogu imati oštećenje ili čak i uništenje opreme, relejna zaštita mora biti u stanju reagirati u bilo kojem trenutku i u najkraćem vremenskom roku isključiti / izolirati mjesto kvara (prekinuti napajanje mesta kvara). Stoga sustav relejne zaštite djeluje automatski i bez prisustva / sudjelovanja čovjeka.

Projektiranje i podešavanje uređaja numeričke zaštite, zbog relativno velikog broja različitih vrsta zaštita i složenosti samog sustava relejne zaštite, predstavlja jedinstvenu inženjersku vještinsku koja zahtjeva određenu širinu (mogućnost razmatranja elektroenergetskog sustava u cijelini kao i istovremenog i detaljnog sagledavanja svake pojedine komponente zasebno). Istovremeno, proračun i izbor parametara relejne zaštite elemenata elektroenergetskog sustava predstavlja donekle i svojevrsnu umjetnost pomirenja oprečnih zahtjeva u svrhu ostvarenja što učinkovitijeg sustava relejne zaštite. Osim toga, relejna zaštita je u posljednjih nekoliko desetljeća doživjela napredak koji prati malo-koja disciplina elektroenergetske struke.

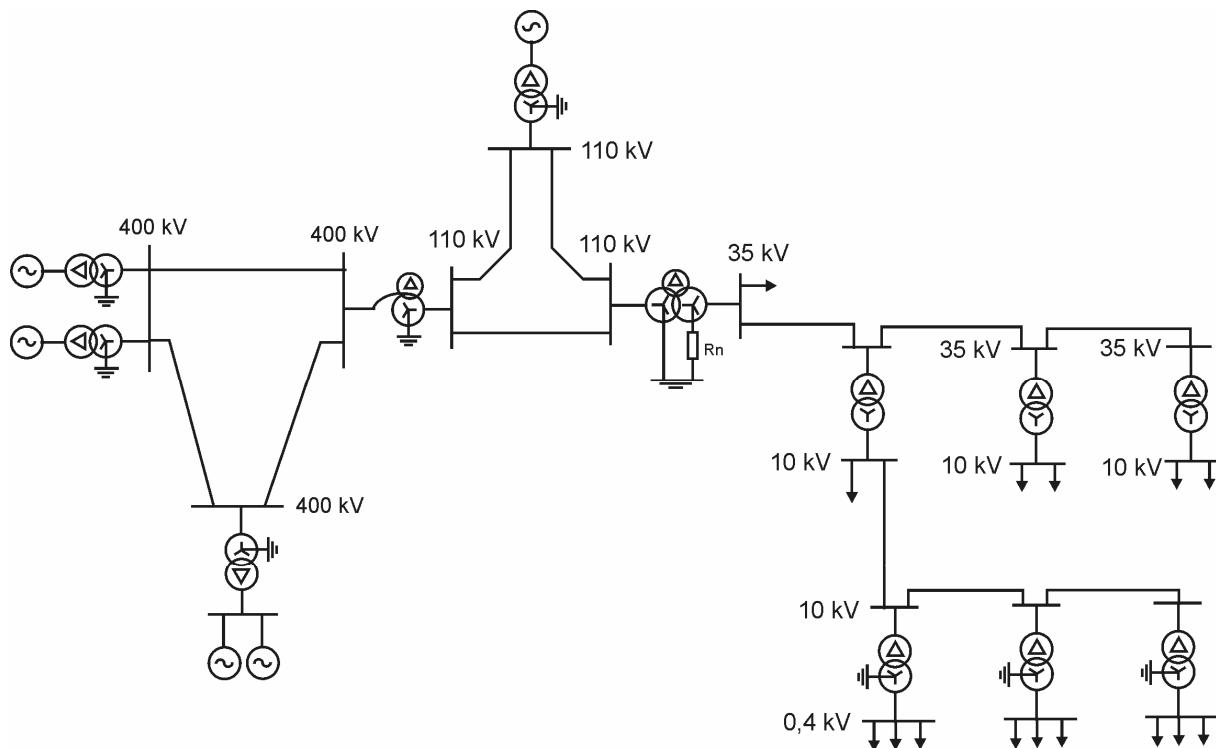
Prodom numeričkih releja, baziranih na mikroprocesorima i modernim komunikacijskim protokolima, ova grana elektrotehnike doživljava trenutno svoj puni procvat. Najnapredniji numerički algoritmi kao što su npr. umjetne neuronske mreže, fuzzy logika i tome sl. nalaze primjenu u modernim relejnim uređajima. Novi i bolji načini detekcije poremećaja (kvara) u sustavu se kontinuirano iznalaze i implementiraju na softverskoj i hardverskoj platformi numeričkog releja. Moderni komunikacijski protokoli (u kombinaciji s mrežom optičkih kabela) omogućavaju umrežavanje modernih uređaja numeričke zaštite u jedinstvenu strukturu. Numeričkom relaju moguće je stoga pristupiti daljinski, korištenjem LAN mreže (engl. local area network) ili pak interneta. Releji međusobno komuniciraju na velikim udaljenostima i sinkronizirano djeluju. Numerički relaj pojeduje samonadzor i kontrolu ispravnosti svojih podsustava, što ima za posljedicu visoku pouzdanost. Ona uz brzinu djelovanja i popratne pogodnosti (npr. snimanje tranzijentnih pojava pri nastupu kvara i sl.) čini numerički relaj novim alatom u analizi prijelaznih pojava u elektroenergetskom sustavu. Razvijeni su pritom i sofisticirani programski paketi za podešavanje samih uređaja kao i analizu zapisa kvarova koji se spremaju u memoriju numeričkih releja (kronologija događaja).

Ovaj kolegij se bavi temeljnim načelima relejne zaštite elektroenergetskog sustava kao cjeline, s naglaskom na temeljenim zaštitama koje se primjenjuju u distributivnim i prijenosnim mrežama, kao i zaštiti transformatora kao sveprisutnog i važnog elementa elektroenergetskog sustava. Razumijevanje ponašanja elektroenergetskog sustava u

stacionarnim i prijelaznim stanjima (izazvanim raznim poremećajima i kvarovima) predstavlja temeljni preduvijet za kvalitetno sagledavanje problematike učinkovitog štićenja elektroenergetskog sustava. Temeljna znanja i vještine koje se stječu u okviru ovog kolegija trebale bi omogućiti budućem inženjeru koji se želi baviti ovom interesantnom granom elektroinženjerkarstva da savlada osnovnu terminologiju i koncepte koji su temelj za primjenu složenijih sustava reljne zaštite.

1.1. Kratak osvrt na elektroenergetski sustav

Elektroenergetski sustav je zajedništvo: generatora, transformatora, vodova i trošila (potrošača) povezano u kompleksnu strukturu (mrežu). Primjer elektroenergetskog sustava (EES) s njegovim karakterističnim sastavnim dijelovima prikazan je na slici 1.1. Uočava se sa slike 1.1 da je riječ o nekoliko različitih naponskih razina, kao i o više međusobno galvanski odvojenih dijelova (bilo između ili unutar iste naponske razine). Energetski transformatori pritom osiguravaju elektromagnetsku vezu između galvanski odvojenih dijelova sustava.



Slika 1.1. Jednopolna shema karakterističnog sastava dijela elektroenergetskog sustava.

Mreža je skup svih galvanski spojenih postrojenja i vodova istog nazivnog napona i frekvencije. Nazivni napon mreže (U_n) jest napon kojim je mreža označena i na koji se odnose neke radne karakteristike mreže. Riječ je o efektivnoj vrijednosti međufaznog (linijskog) napona nazivne frekvencije. Nazivni naponi mreža su određeni normom (HRN, IEC). Uz nazivni napon mreže (U_n), daje se najviši napon mreže (U_m).

Najviši pogonski napon mreže (U_m) jest najviša efektivna vrijednost međufaznog (linijskog) napona, nazivne frekvencije, koja se javlja u normalnim (stacionarnim) pogonskim

uvjetima, u bilo kojem času i u bilo kojoj točki dotične mreže. U vezi je s nazivnim naponom (U_n). Nazivna frekvencija mreže (f_n) jest frekvencija kojom je mreža označena (npr. $f_n = 50$ Hz).

Prema HRN, u tablici 1.1. prikazani su nazivni naponi mreža (U_n) i najviši naponi mreža (U_m), kakvi se koriste u Republici Hrvatskoj.

Tablica 1.1. Nazivni i najviši pogonski naponi distributivnih i prijenosnih mreža u mreži HEP-a.

Nazivni napon, U_n [kV]	10	20	35	110	220	400
Maksimalni pogonski napon, U_m [kV]	12	24	38	123	245	420

S obzirom na svoju namjenu mreže se dijele na:

- distributivne mreže,
- prijenosne mreže.

Distributivne mreže su namijenjene distribuciji (raspodjeli) električne energije. To su mreže nazivnih napona 10 kV, 20 kV i 35 kV. Ove se mreže još zovu i razdjelne mreže. One su gotovo redovito napajane samo s jedne strane. Radi se o trofaznim radijalnim mrežama.

Zvjezdišta energetskih transformatora u dotičnim mrežama su izolirana ili pak najčešće uzemljena preko malog djelatnog otpornika (R_n), koji služi za ograničenje struje jednopolnoga kratkog spoja u dotičnoj mreži. Osim uzemljenja preko malog djelatnog otpornika (kojim se pripadna struja jednopolnoga kratkog spoja ograničava na 150 A ili 300 A), distributivne mreže moguće je uzemljiti i preko prigušnice (Petersenova prigušnica). Uzemljenjem mreže preko prigušnice moguće je potpuno kompenzirati struju jednopolnoga kratkog spoja. Ovo se ostvaruje na način da se prigušnica odabere na način da poništi kapacitet mreže. Osim toga, kompenzaciju je moguće ostvariti i djelomično podkompenzacijom ili iznad razine nadkompenzacijom. Valja naglasiti da je distributivne mrežu moguće uzemljiti i preko visokoomskog otpornika. U svakom slučaju, uzemljenje zvjezdišta energetskog transformatora uvijek se provodi jedino u izvornoj trafostanici. Uzemljenje zvjezdišta energetskog transformatora se također provodi u samo jednoj točki. Ovisno o vrsti primjenjenog uzemljenja (maloomsko, visokoomsko, prigušnica) ovisit će i vrsta primjenjene relejne zaštite mreže u odnosu na kratke spojeve sa zemljom. Isto tako, izoliranu mrežu potrebno je štititi na različit način od načina provedbe relejne zaštite uzemljene mreže. U okviru ovog kolegija dati će se temeljni principi i načini projektiranja te proračuna parametara relejne zaštite distributivnih mreža.

Prijenosne mreže su namijenjene prijenosu električne energije. To su mreže nazivnih napona 110 kV, 220 kV i 400 kV. Radi se o trofaznim petljastim mrežama, napajanim sa više strana i sa izravno uzemljenim zvjezdištima svih energetskih transformatora.

Relejna zaštita prijenosne mreže, zbog velikih duljina vodova i različite namjene, provodi se različito od relejne zaštite distributivne mreže. Posebno i odvojeno će se stoga tretirati problematika projektiranja i podešenja relejne zaštite distributivnih mreža a posebno prijenosnih mreža. U okviru ovog kolegija će se također dati temeljni principi i način projektiranja i proračuna relejne zaštite prijenosnih mreža.

Mreže nazivnog napona 0,4 kV jesu niskonaponske mreže. Njihova zaštita najčešće je bazirana na principima osigurača i neće se detaljno tretirati u okviru ovog kolegija.

Osim prijenosa i distribucije električne energije postoji i treća ključna karika u elektroenergetskom sustavu a to je proizvodnja električne energije. Ona se odvija u elektranama, podsredstvom generatora. Relejna zaštita elektrane (generatora i pripadne električne opreme) je posebna i izuzetno složena zadaća. Budući da je generator najskuplji pojedinačni element elektroenergetskog sustava (a istovremeno jest kompleksan rotirajući stroj), njegovoj zaštiti posvećena je posebna i zaslužena pozornost. Problematica štićenja generatora prelazi okvire ovog kolegija te se neće ovdje obrađivati.

Transformator je drugi važan i sveprisutan element elektroenergetskog sustava koji posjeduje određene specifičnosti, gledano s aspekta relejne zaštite. Njegovoj zaštiti se također redovito posvećuje dužna pozornost. Relejna zaštita transformatora kao jednog od vitalnih dijelova elektroenergetskog sustava (nalazimo ga u elektranama, prijenosnim i razdijelnim trafostanicama) obradit će se u okviru ovog kolegija.

1.2. Zaštitni uređaj - relej

Osnovni element relejne zaštite jest **relej**. Relej može biti jednofazne ili trofazne izvedbe. To je uređaj koji trajno kontrolira određenu veličinu koja može biti:

- električna (struja, napon, snaga, otpor / impedancija, frekvencija),
- neelektrična (temperatura, tlak, broj okretaja, brzina strujanja i sl.).

Riječ je o konstrukcijski komplikiranom uređaju koji redovito posjeduje više elemenata / članova, kao što su:

- mjerni član,
- vremenski član,
- proradni član,
- usmjerni član.

Povjesno gledano postoje tri generacije relejne zaštite, kako slijedi:

- elektromehanički relej,
- statički relej,
- numerički relej.

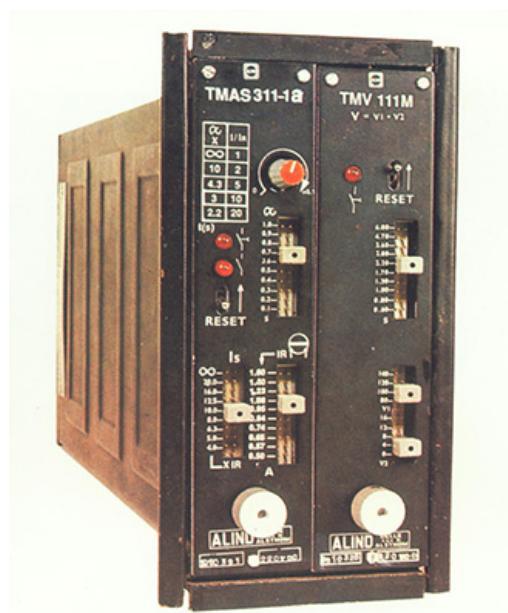
Elektromehanički releji rade na principu pomicanja kontakata (kotvi s kontaktima) elektromehaničkim silama koje izaziva struja dok teče određenim svicima (npr. uzbudni svitak releja). Sila koju svitak izaziva na kotvi proporcionalna je struji koja protječe svitkom.

Ova činjenica koristi se pri diskriminiranju između struje normalnog pogona i struje kvara. Elektromehanički releji imaju pokretnе dijelove koji se vremenom troše i habaju. Osjetljivi su na prašinu i vanjske utjecaje. Imaju relativno veliku snagu (potrošnju). Nisu osjetljivi na vanjska elektromagnetska polja, tj. nemaju izražen problem elektromagnetske kompatibilnosti. Izuzetno su pouzdani i robusni te imaju dug vijek trajanja. Fotografija tipičnog elektromehaničkog releja prikazana je na slici 1.2



Slika 1.2 Fotografija elektromehaničkog releja.

Statički releji baziraju svoje djelovanje na principima poluvodičke tehnike. Fotografija tipičnog statičkog releja prikazana je na slici 1.3.



Slika 1.3 Fotografija statičkog releja.

Kod njih su pomični elektromehanički kontakti zamijenjeni s nepomičnim kontaktima koji se temelje na tranzistorima i poluvodičkim diodama. Nemaju pomičnih dijelova i troše manje energije. Brže djeluju od elektromehaničkih releja. Relativno su osjetljivi na elektromagnetske utjecaje (problem elektromagnetske kompatibilnosti).

Numerički releji bazirani su na primjeni mikroprocesora i računalnog programa (softvera) koji zamjenjuje osnovne principe djelovanja reljne zaštite. Odlikuju se vrlo malom potrošnjom i velikom brzinom rada. Nemaju pomičnih dijelova. U jednoj fizički samostalnoj jedinici posjeduju istovremeno više zaštitnih funkcija (više reljnih zaštita objedinjeno u jednoj fizičkoj jedinici). Svaka zaštitna funkcija posjeduje softverski program koji kontrolira određenu veličinu (struju, napon, frekvenciju i sl.) ili kombinaciju veličina (npr. struju i napon iz koje računa impedanciju).

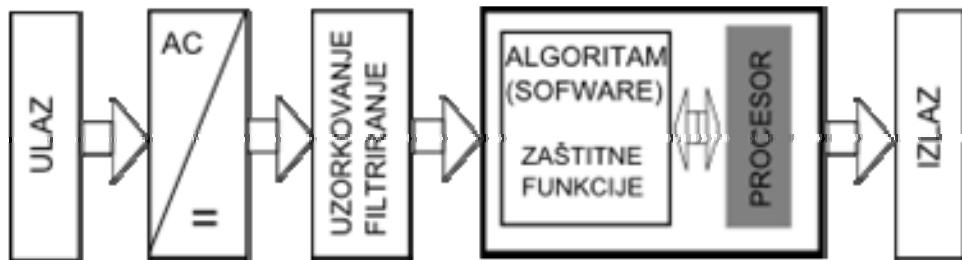
Numerički relj radi s digitalnim veličinama ulaznih parametara (struja i napon) te stoga posjeduje A/D (analogno-digitalne konverte), odgovarajuće digitalne filtere i logičke krugove. Ulazna veličina se kontinuirano samplira i digitizira te obrađuje u skladu s računalnim programom koji predstavlja određenu zaštitnu funkciju. Fotografija tipičnog numeričkog reljeja prikazana je na slici 1.4.



Slika 1.4 Fotografija numeričkog reljeja.

Softver zaštitne funkcije numeričkog reljeja je izuzetno učinkovit (pisan u programskom jeziku niskog nivoa, npr. assembler) i iznimno brz. Numerički relj mora osigurati pravilno prepoznavanje kvara i dati nalog za isključenje prekidača u iznimno kratkom vremenu (unutar 20-30 ms) za tzv. trenutne / brze zaštitne funkcije (takva je primjerice diferencijalna zaštita i I. stupanj distantne zaštite). Procesiranje ulaznih veličina može uključivati i brzu Fourierovu transformaciju i slične komplikirane i numerički zahtjevne

algoritme. Krajnje pojednostavljena blok shema funkcioniranja numeričkog releja prikazana je na slici 1.5.



Slika 1.5 Pojednostavljena blok shema funkcioniranja numeričkog releja.

Budući da su zaštitne funkcije numeričkih releja implementirane softverski te da je sam relej baziran na naprednom vrlo sofisticiranom i brzom mikroprocesoru, moguće su implementacije vrlo složenih (zaštitnih) algoritama. Ovi algoritmi moraju ipak biti dovoljno brzi da se izvode u realnom vremenu. Ipak, mikroprocesorska arhitektura numeričkog releja, koja se svakom generacijom numeričke zaštite unapređuje (ubrzava), omogućava široku primjenu različitih algoritama, koje nije bilo moguće do sada primjeniti (kod starije generacije relejnih uređaja).

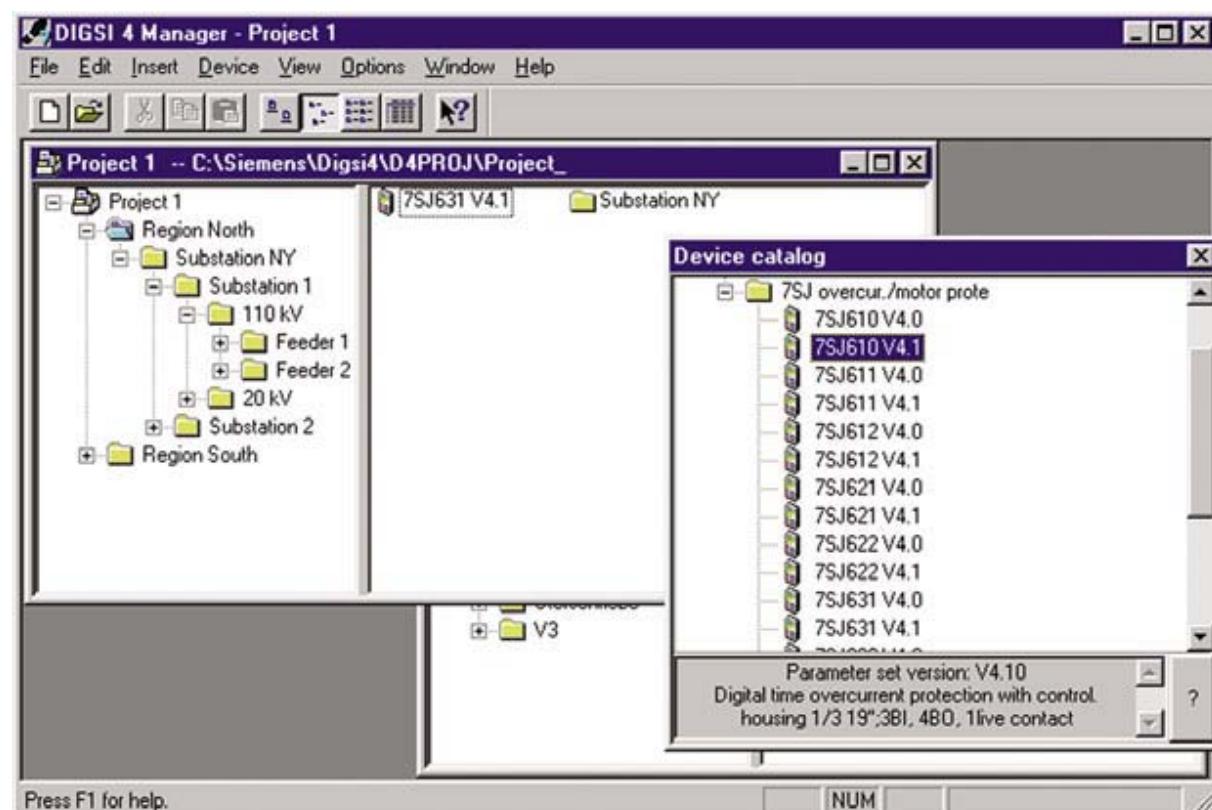
Tako je jedan novi sustav, danas iznimno popularnih algoritama za numeričku implementaciju zaštitnih funkcija, baziran na primjeni umjetnih neuronskih mreža (engl.: Artificial Neural Networks, ANN). Ovaj koncept omogućava potpuno nove trendove u razvoju zaštitnih funkcija relejne zaštite kao i poboljšanje postojećih. Riječ je o novom trendu koji je još uvijek u fazi intenzivnog istraživanja i razvoja. Očekuju se njegove primjene i implementacije u budućim generacijama numeričkih relejnih uređaja. Valja naglasiti da ipak za sada na tržištu još uvijek ne postoje numerički relejni uređaji koji implementiraju ovaj novi koncept baziran na primjeni umjetnih neuronskih mreža. Osnove funkcioniranja umjetnih neuronskih mreža dane su u Prilogu A, kao i neke od karakterističnih primjena u relejnoj zaštiti.

Osim toga, numerički releji posjeduju mogućnost samonadzora kao i zapis dogadaja. Naime, pri nastupu kvara numerički relej snima krivulje struje (i/ili napona) i pohranjuje ih u vlastitu memoriju za kasniju računalnu analizu. Numerički releji posjeduju komunikacijske portove za podešenje (korištenjem PC-a i odgovarajućeg softverskog paketa), kao i za komunikaciju sa staničnim računalom (SCADA sustav). Numerički releji mogu komunicirati i između sebe (uz pomoć optičke komunikacijske veze), čime omogućavaju ostvarenje složenijih i visoko učinkovitih sustava relejne zaštite elemenata elektroenergetskog sustava. Ovime se poboljšava sigurnost opskrbe električne energije, kao i sigurnost elektroenergetskog sustava u cjelini. Nadzor i podešenje parametara numeričkog releja moguće je obaviti preko lokalne mreže (LAN) trafostanice / postrojenja ili čak i preko interneta. Mana numeričkih releja je da su relativno osjetljivi na vanjska elektromagnetska polja.

Podešavanje parametara (tzv. parametriranje) numeričkih releja najčešće se provodi pomoću za tu svrhu posebno razvijenog programskog paketa. Dotični programski paket podržava sve numeričke relejne uređaje istog proizvođača (i sve generacije numeričkih releja

tog proizvođača iste namjene). Riječ je o Windows aplikaciji s grafičkim sučeljem koje je vrlo intuitivno i ugodno za korištenje. Ovo omogućava brzo podešavanje više različitih zaštitnih funkcija numeričkog relejnog uređaja. Osim toga, moguće je istovremeno podešavati više različitih releja (npr. u istoj trafostanici).

Valja naglasiti da različiti proizvođači numeričkih relejnih uređaja imaju posebne (međusobno različite) programske pakete za njihovo parametrisanje. Nije moguće parametrisanje numeričkih releja programskim paketom kojeg nije razvio njegov proizvođač. Jednom podešene vrijednosti se preko komunikacijske veze (serijski port, LAN mreža) prenose s računala na numerički relaj. Slika 1.6 prikazuje primjer grafičkog sučelja jednog takvog programskog paketa za podešavanje parametara numeričkih releja.

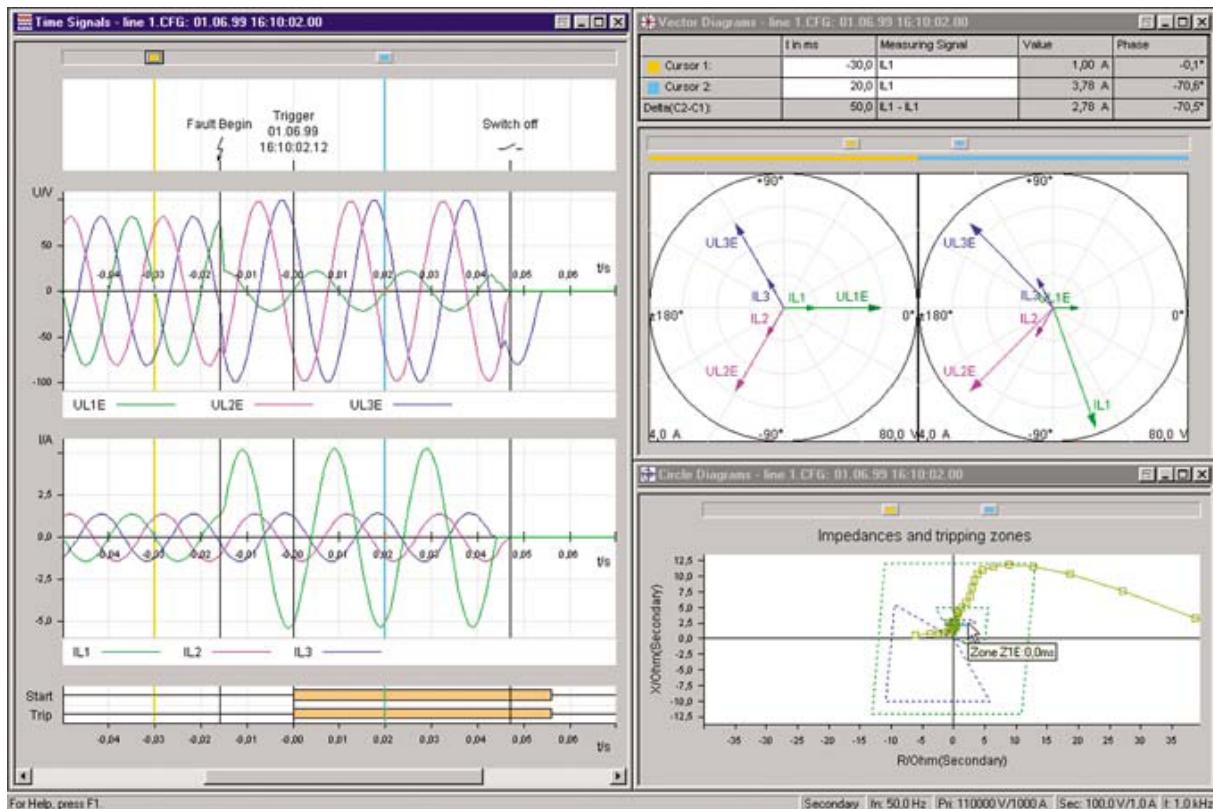


Slika 1.6 Primjer grafičkog sučelja programskog paketa za parametrisanje numeričkih releja.

Osim toga, numerički releji, kao što je prethodno spomenuto, imaju mogućnost snimanja (memoriranja) strujnih i naponskih stanja za vrijeme nastupa kvarova. Ovo je vrlo poželjna funkcija numeričkih relejnog uređaja i služi za vrlo kvalitetnu i detaljnu post-mortem analizu kvarova.

Naime, numerički releji konstantno nadziru mjerene veličine (struje i napone, i tome sl.) te u slučaju nastupa kvara započinju s bilježenjem pojave koja je dovela do isključenja štićenog elementa. Na memorijskim lokacijama, koje su dostupne korisniku, postoje zabilježeni tranzijentni naponi i struje koje su se javile za vrijeme kvara, sve do momenta isključenja štićenog elementa. Ove zapise moguće je povući (download-irati) s numeričkog

releja te ih potom analizirati. Za to služi posebno razvijen (od strane samog proizvođača numeričkog releja) programski paket. Riječ je također o Windows aplikaciji s grafičkim sučeljem, koja omogućava ugodan i jednostavan rad. Slika 1.7 prikazuje grafički izgled sučelja jednog takvog programskog paketa namijenjenog analizi snimljenih zapisa tranzijentnih pojava, neposredno prije i za vrijeme djelovanja numeričkog releja. Ovakvi programski paket redovito omogućavaju korisniku jednostavnu primjenu niza korisnih (a ujedno vrlo sofisticiranih) alata za analizu tranzijentnih signala (npr. struja i napona), kao što je brza Fourierova transformacija, fazorski prikaz veličina, praćenje promjene mjerene impedancije (kod distantne zaštite) i tome sl.



Slika 1.7 Primjer grafičkog sučelja programskog paketa za analizu snimljenih tranzijentnih pojava, neposredno prije i za vrijeme djelovanja numeričkog releja.

Na kraju se može naglasiti da je zbog svojih višestrukih prednosti, kao i dokazane pouzdanosti, numerički tip relejnih uređaja prevladao na tržištu. On je gotovo u potpunosti istisnuo iz uporabe prethodne dvije generacije relejne zaštite (elektromehaničku i staticku). Kao posljedica toga, danas se gotovo isključivo ugrađuje relejna zaštita u numeričkoj izvedbi, na svim naponskim razinama. Za sada, zbog iznimne važnosti vodova 400 kV, elektromehanički releji se i dalje upotrebljavaju paralelno s numeričkim relejima. Zbog svojeg nedavnog pojavljivanja na tržištu, vijek trajanja numeričkih releja za sada nije točno definiran (iznosi do 10 godina). S druge strane, elektromehanički releji imaju vijek trajanja od 20-30 godina.

1.3. Relejna zaštita

Zadaća relejne zaštite jest štićenje svih elemenata elektroenergetskog sustava od nastupa svih vrsta kvarova. Najčešći uzroci nastupa kvarova jesu: izravni i neizravni udari munje, starenje i deterioracija izolacije opreme, povremeni vandalizam, padanje grana stabala na nadzemne vodove, i sl. Velika većina kvarova je prolaznog karaktera (oko 80 % svih kvarova otpada na kratkotrajne jednopolne kratke spojeve u prijenosnoj i distribucijskoj mreži). Relejna zaštita ima funkciju isključiti samo onaj dio elektroenergetskog sustava (vod, transformator) koji je u kvaru (selektivnost), minimizirajući pritom utjecaj kvara na ostale elemente sustava. Da bi ovo bilo ostvarivo, relejna zaštita mora biti usklađena (tj. koordinirana).

Također, relejna zaštita mora što prije izolirati mjesto kvara, tj. isključiti dijelove sustava koji napajaju mjesto kvara bez isključivanja nepotrebnih elemenata. Drugim riječima, relejna zaštita mora isključiti najmanji mogući broj elemenata koji će ukloniti kvar a da pritom ostatak sustava ostane u normalnom pogonu. Brzina isključenja kvara (trajanje kvara) važna je za samu opremu kao i za stabilnost sustava u cjelini (kada je riječ o prijenosnom sustavu). Zaštita mora biti osjetljiva i razlikovati stanje normalnog opterećenja sustava (i eventualno dopuštenih preopterećenja) od stanja kvara. Relejna zaštita mora osigurati i dodatnu (rezervnu) tzv. back-up zaštitu u što većoj mjeri. U slučaju ne djelovanja primarne zaštite (npr. uslijed neispravnosti releja) rezervna zaštita mora djelovati i isključiti kvar.

Temeljni zahtjevi relejne zaštite jesu:

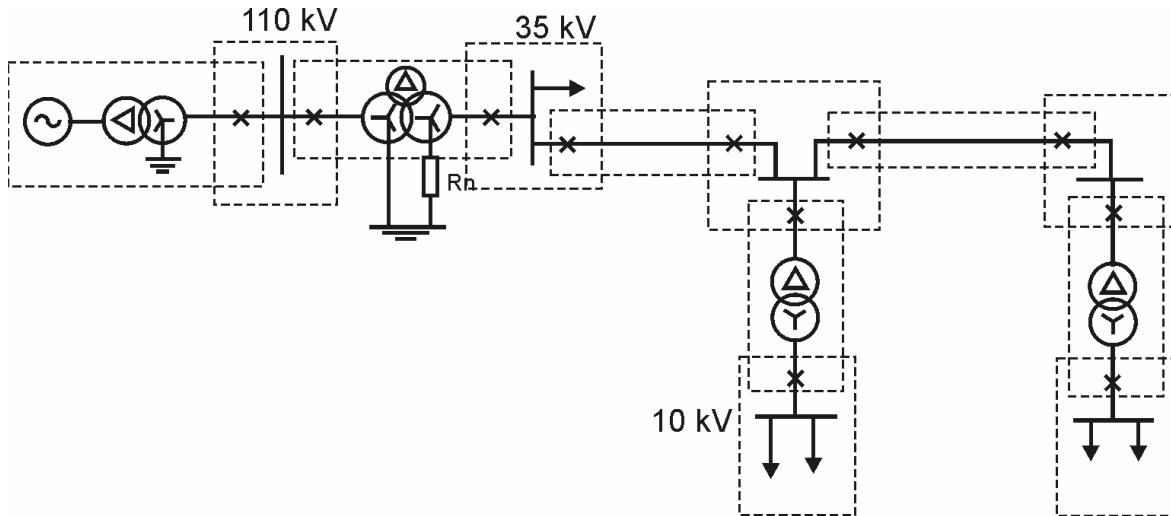
- što brže isklapanje kvarova,
- selektivno djelovanje,
- što veća osjetljivost,
- pričuvno štićenje u što većoj mjeri.

Iz prethodnih zahtjeva uočava se da projektiranje i podešenje relejne zaštite predstavlja često kompromis u smislu usklađenja navedenih zahtjeva, koji su često u međusobnoj opreci.

U osnovi projektiranja sustava relejne zaštite, uz pouzdanost samog uređaja (engl.: reliability), postavljena su dva međusobno oprečna zahtjeva: da zaštita bude što pouzdanija (engl.: dependability) i istovremeno što sigurnija (engl.: security). Pouzdanost se odnosi na zahtjev da relj u što većoj mjeri ispravno djeluje na kvar i pravilno isključi element u kvaru. Zahtjev za sigurnošću odnosi se na težnju da relj neće pogrešno djelovati u slučaju kvara za koji nije predviđeno njegovo djelovanje. Povećana pouzdanost ima tendenciju smanjenja sigurnosti sustava relejne zaštite. Današnji sustavi relejne zaštite razvijaju se u smjeru povećanja pouzdanosti, uz žrtvovanje ponešto sigurnosti. Pomirenje prethodno navedenih zahtjeva predstavlja složen problem, koji se dodatno komplikira složenošću elektroenergetskog sustava koji se štiti relejnom zaštitom.

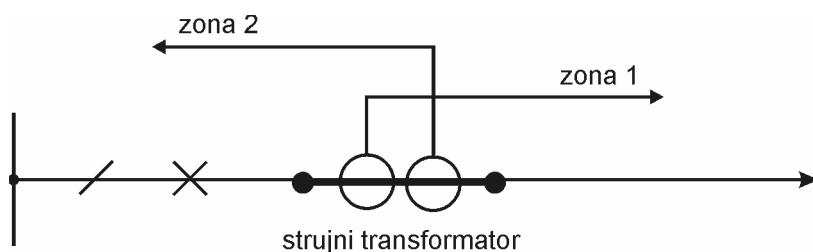
Projektiranje i izvedba relejne zaštite bazira se na podjeli elektroenergetskog sustava u individualne zone na kojima se primjenjuje zaštita. Ove zone se redovito međusobno preklapaju čime se omogućava da ni jedan dio (ili element) sustava ostane nezaštićen. Primjer podjele dijela elektroenergetskog sustava na zone prikazan je na slici 1.8. Na dotičnoj slici

zone su prikazane crtkanim pravokutnicima, koji se međusobno preklapaju. Primjer zone jest: dalekovod (kabel), transformator, generator, sabirnice, i tome sl. Preklapanjem zaštitnih zona osigurava se i pričuvno štićenje reljnih zaštita (engl.: back-up).



Slika 1.8 Primjer podjele dijela elektroenergetskog sustava na zaštitne zone.

Preklapanje zona ostvaruje se odgovarajućim spajanjem reljnih uređaja na strujne transformatore. Primjer spajanja releja na strujne transformatore za ostvarenje preklapanja zaštitnih zona prikazan je na slici 1.9. Strujni transformatori redovito posjeduju više sekundarnih jezgri (zaštitne jezgre) na koje se priključuju reljni uređaji. Ovo je također vidljivo sa slike 1.8 i koristi se za ostvarenje preklapanja zona štićenja.



Slika 1.9 Primjer spajanja releja na strujne transformatore kojim se ostvaruje preklapanje zaštitnih zona.

Velika većina reljnih zaštita posjeduje tzv. osnovnu zonu (dionicu) štićenja i pričuvnu / rezervnu zonu štićenja. Osnovna zona štićenja je primjerice vod ili transformator čijem štićenju je razmatrana zaštita namijenjena, dok pričuvnu (susjednu) zonu predstavlja susjedni vod ili transformator na kojem razmatrana zaštita djeluje kao rezerva (back-up zaštita). Određene zaštite djeluju isključivo unutar svoje osnovne zone (dionice). Ukoliko određena zaštita izlazi izvan svoje osnovne dionice (i prelazi u svoju pričuvnu zonu) tada ona mora biti koordinirana / usklađena sa zaštitom kojoj je ta zona osnovna. Ovo usklađenje provodi se tzv. vremenskim stupnjevanjem, o čemu će više govora biti u nastavku. Osim toga zona štićenja može biti zatvorena ili otvorena, što dodatno komplificira njenu koordinaciju s drugim zaštitama. Za zonu štićenja koja nije strogo definirana (omeđena) kaže se da je otvorena.

U određenim slučajevima biti će potrebno da reljena zaštita posjeduje usmjerenje, pri čemu će ona morati biti u stanju odrediti (tj. definirati) smjer struje, odnosno, snage kvara. Ovisno o smjeru struje/ snage kratkog spoja, usmjerena reljena zaštita će dopušтati ili blokirati djelovanje na isklop prekidača.

Primjera radi u tablici 1.2 navedene su neke od najčešće korištenih reljnih zaštita, koje se koriste za zaštitu različitih elemenata elektroenergetskog sustava.

Tablica 1.2 Neke od najčešće korištenih reljnih zaštita.

Zaštitna funkcija	ANSI
Diferencijalna zaštita	87
Niskopodesiva nadstrujna zaštita	51
Visokopodesiva nadstrujna zaštita	50
Zaštita od nesimetričnog opterećenja	46
Homopolarna niskopodesiva nadstrujna zaštita	51N
Homopolarna visokopodesiva nadstrujna zaštita	50N
Zemljospojna zaštita	64
Usmjerena zemljospojna nadstrujna zaštita	67N
Nadnaponska zaštita	59
Podnaponska zaštita	27
Nadstrujno podnaponska zaštita	51/27
Termička zaštita	49
Zaštita od nesimetričnog opterećenja	46
Distantna zaštita	21
Frekvencijska zaštita	81
Zaštita od previsoke magnetske indukcije	25
95 %-tna zemljospojna zaštita statora	59N
100 %-tna zemljospojna zaštita statora	64S
Zemljospojna zaštita rotora	64R
Zaštita od gubitka sinkronizma	78
Zaštita od gubitka uzbude	40
Zaštita od povratne snage	32

Najveći broj spomenutih zaštita primjenjuje se pri zaštiti generatora (naročito kod zaštite generatora velikih snaga). Kod zaštita distributivne mreže, kao što će se vidjeti u nastavku, primjenjuje se niskopodesiva i visokopodesiva nadstrujna zaštita za zaštitu od međufaznih kratkih spojeva. Za zaštitu od kratkih spojeva sa zemljom u distributivnoj mreži koristi se homopolarna nadstrujna zaštita, odnosno, zemljospojna zaštita (ovisno o tretmanu zvjezdišta). Za zaštitu prijenosne mreže, kao osnovna zaštita, koristi se distantna zaštita. Ona se nadopunjuje nadstrujnim zaštitama koje uglavnom služe kao dodatne (tj. back-up) zaštite.

Kod kraćih kabelskih vodova koristi se ponekad i diferencijalna zaštita. Osnovna zaštita transformatora, kao što će se također vidjeti u nastavku, jest diferencijalna zaštita (koja je osnovna zaštita i kod generatora). Ona se također nadopunjuje nadstrujnim zaštitama (back-up), te termičkom zaštitom. Valja naglasiti da specifičnosti transformatora (spaja različite naponske razine, grupa spoja namota, tretman zvjezdišta, struja magnetiziranja i tome sl.) imaju utjecaja na izbor parametara njegove diferencijalne zaštite u daleko većoj mjeri nego li je to slučaj kod njene primjene npr. na generatoru ili vodu / kabelu. O svemu ovome će biti više riječi u nastavku.

2. STRUJNI I NAPONSKI TRANSFORMATORI

2.1. Značajke i izbor strujnih i naponskih transformatora

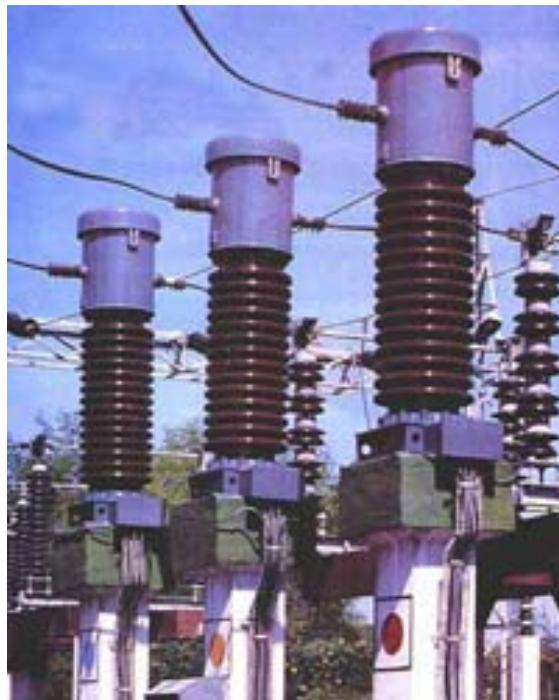
Poznato je da se reljena zaštita priključuje na sekundarnu stranu strujnih i/ili naponskih (mjernih) transformatora. Dotični strujni i naponski transformatori predstavljaju stoga sastavni dio šireg sustava reljne zaštite. Potrebno je stoga voditi računa o izboru njihovih tehničkih podataka (karakteristika), jer su oni ključni za ispravno funkcioniranje sustava reljne zaštite. Drugim riječima, izbor strujnih i naponskih (mjernih) transformatora na koje će se priključiti reljena zaštita ima ključan utjecaj na njeno ispravno djelovanje (funkcioniranje) i može se stoga smatrati da izbor parametara dotičnih strujnih i naponskih (mjernih) transformatora predstavlja sastvni dio parametriranja sustava reljne zaštite (u širem smislu).

2.1.1. Strujni transformatori

Strujni transformatori za zaštitu razlikuju se po izvedbi jezgre i pripadnih namota od strujnih transformatora za mjerjenje. Najčešće se u jednoj fizički samostalnoj jedinici nalazi više jezgri strujnih transformatora sa vlastitim sekundarnim namotima, od čega su neke (jezgre) predviđene za priključak uređaja mjerjenja (tzv. mjerne jezgre) a neke za priključak uređaja reljne zaštite (tzv. zaštitne jezgre).

Primarni namot strujnog transformatora predstavlja sam visokonaponski vodič. Različitosti u izvedbi mjernih i zaštitnih jezgri strujnog transformatora posljedica su njihove različite namjene. Naime, strujni transformatori za mjerjenje moraju vjerno prenositi informaciju o struji koja je na razini nazivne struje elementa na koji je priključen strujni transformator (dalekovod, kabel, transformator, generator, itd.). S druge strane, strujni transformator za zaštitu mora biti u stanju vjerno prenositi struje kvara (tj. kratkih spojeva) koje su čak do deset puta veće od nazivne struje elementa. Pri tome, naravno, ne smije doći do pojave zasićenja njegove jezgre, jer bi u protivnom došlo do izobličenja struje na njegovom sekundaru. Posljedica toga bi bilo pogrešno djelovanje (ili pak izostanak djelovanja) priključene reljne zaštite. To se, naravno, ne smije dopustiti.

Jezgra strujnog transformatora za zaštitu stoga mora biti tako dimenzionirana da strujni transformator ne uđe u zasićenje uslijed struja kvara (kratkog spoja). Dimenzije zaštitne jezgre (poprečni presjek, oblik poprečnog presjeka, prisutnost zračnog raspora i tome sl.) se konstrukcijski značajno razlikuju od dimenzija mjerne jezgre strujnog transformatora, što je prirodna posljedica njihove različite namjene. Strujni transformator za mjerjenje zasigurno bi stoga doživio zasićenje uslijed struja kratkog spoja, jer je njegova jezgra dimenzionirana za struje u okolini nazivne struje elementa na koji se priključuje. Stoga, dakle, reljni uređaji moraju biti priključeni isključivo na zaštitne jezgre strujnih transformatora. Iznimke od ovog pravila su vrlo rijetke i moraju biti opravdane. Fotografija visokonaponskog strujnog (mjernog) transformatora prikazana je na slici 2.1-1.



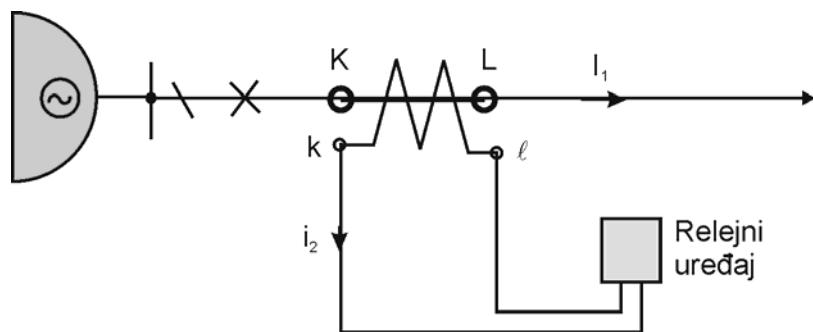
Slika 2.1-1 Fotografija visokonaponskog strujnog transformatora.

Strujni transformatori izrađuju se sa do najviše pet sekundarnih namota, od kojih su neki namjenjeni priključku uređaja mjerena i neki priključku zaštitnih uređaja.

Strujni transformatori (zaštitna jezgra) su karakterizirani sljedećim osnovnim tehničkim podacima:

- nazivni prijenosni omjer (p_i),
- nazivna snaga (S_n),
- klasa točnosti (5P ili 10P),
- nazivni granični faktor točnosti (F_{tn}).

Strujni transformatori imaju primarni namot spojen u seriju s glavnim strujnim krugom, tako da njime protječe primarna struja (I). Na sekundarni namot strujnog transformatora priključen je, primjerice, proradni član nadstrujne zaštite. Ovo je grafički ilustrirano na slici 2.1-2.



Slika 2.1-2 Grafička ilustracija načina spoja proradnog člana nadstrujnog releja na sekundarnu stranu / namot strujnog transformatora.

Nazivni prijenosni omjer (p_i) jednak je sljedećem izrazu:

$$p_i = \frac{I_{1n}}{i_{2n}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.1-1)$$

gdje su:

- I_{1n} – nazivna primarna struja strujnog transformatora u A,
- i_{2n} – nazivna sekundarna struja strujnog transformatora u A,
- N_2 – broj zavoja sekundarnog namota strujnog transformatora,
- N_1 – broj zavoja primarnog namota strujnog transformatora.

Nazivna primarna struja strujnog transformatora određuje se prema:

- trajnoj struji voda za strujne transformatore ugrađene u pripadno vodno polje,
- nazivnoj struji energetskog transformatora one naponske razine u kojoj je uključen dotični strujni transformator.

Standardne vrijednosti nazivnih primarnih struja prikazane su u tablici 2.1-1. Pri njihovom izboru prednost se daje osjenčenim vrijednostima.

Tablica 2.1-1 Standardne vrijednosti nazivnih primarnih struja.

	10	12.5	15	20	25	30	40	50	60	75
I_{1n} [A]	100	125	150	200	250	300	400	500	600	750
	1000	1250	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000	7500

Pri izboru nazivne primarne struje strujnog transformatora treba imati u vidu činjenicu da su strujni transformatori građeni tako da mogu trajno izdržati i 20 % veću struju od nazivne.

Nazivna sekundarna struja strujnog transformatora odabire se iz standardnih vrijednosti navedenih u tablici 2.1-2. Izbor veličine i_{2n} ovisi o korištenim mjernim i zaštitnim uređajima. Struje $i_{2n} = 1$ A odabire se, u pravilu, u postrojenjima gdje su veliki razmaci između mesta ugradnje strujnih transformatora i mesta smještaja sekundarne opreme (dugi su putevi sekundarnog ožičenja).

Tablica 2.1-2 Najčešće vrijednosti standardnih nazivnih sekundarnih struja.

I_{2n} [A]	1	5
---------------------------	---	---

Nazivna snaga (S_n) je vrijednost prividne snage koju strujni transformator daje sekundarnom krugu pri nazivnoj sekundarnoj struji i priključenom nazivnom teretu Z_n . Nazivna snaga strujnog transformatora, izražena u VA, definira se pomoću sljedeće relacije:

$$S_n = u_{2n} \cdot i_{2n} \quad (2.1-2)$$

gdje su:

- u_{2n} – nazivni napon sekundarnog namota strujnog transformatora u V,
- i_{2n} – nazivna struja sekundarnog namota strujnog transformatora u A.

Budući da vrijedi sljedeći izraz:

$$u_{2n} = i_{2n} \cdot Z_n \quad (2.1-3)$$

pri čemu je Z_n nazivni opteretni otpor priključen na sekundarnu stranu strujnog transformatora, koji se još zove i nazivno breme strujnog transformatora (nazivni teret). Uvrštenjem relacije (2.1-3) u (2.1-2) slijedi:

$$S_n = i_{2n}^2 \cdot Z_n \quad (2.1-4)$$

Valja reći da se na nazivnom teretu / bremenu (Z_n) temelje zahtjevi s obzirom na točnost strujnog transformatora. Nazivna snaga strujnog transformatora mora općenito zadovoljiti sljedeću relaciju:

$$S_n \geq S_r + S_{mt} + S_o \quad (2.1-5)$$

pri čemu su:

- S_r – vlastiti potrošak releja priključenih na strujni transformator,
- S_{mt} – vlastiti potrošak međutransformatora, ukoliko se isti koristi,
- S_o – snaga koja se troši na ožičenju sekundarnih krugova.

U tablici 2.1-3 prikazane su standardne vrijednosti nazivnih snaga strujnih transformatora.

Tablica 2.1-3 Standardne vrijednosti nazivnih snaga do 30 VA.

S_n [VA]	2.5	5	10	15	30

Klasa točnosti je oznaka dodijeljena strujnom transformatoru čije pogreške ostaju unutar utvrđenih granica za propisane uvjete korištenja. Strujni transformatori za zaštitu moraju korektno djelovati u području struja kratkog spoja. Za razliku od njih, strujni transformatori za mjerjenje moraju korektno djelovati u području nazivnih struja. Struje kratkih spojeva su redovito mnogo veće od pogonskih struja, te se stoga pred strujne transformatore za zaštitu postavljaju različiti uvjeti od onih koji postoje kod strujnih transformatora za mjerjenje. Stoga se točnost strujnih transformatora za zaštitu određuje složenom pogreškom (ε_i) u %-cima, koja se definira sljedećim izrazom:

$$\varepsilon_i = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i_2(t) \cdot p_i - I_1(t)]^2 dt} \quad (2.1-6)$$

u kojem su:

- $i_2(t)$ – trenutna vrijednost sekundarne struje,
- $I_1(t)$ – trenutna vrijednost primarne struje,

p_i – nazivni prijenosni omjer strujnog transformatora,
 T – trajanje jedne periode, koje iznosi:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.1-7)$$

gdje je f – frekvencija struje kvara (50 Hz).

I_1 – efektivna vrijednost primarne struje, koja je jednaka sljedećem izrazu:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_1^2(t) \cdot dt} \quad (2.1-8)$$

Treba reći da je ovakva definicija složene pogreške nužna, jer u području struja kratkog spoja dolazi do zasićenja jezgre strujnog transformatora i stoga do pojave struja nesinusnog oblika. Nemoguće je tada definirati strujnu i kutnu pogrešku kao kod strujnog transformatora koji služe za mjerjenje. U tablici 2.1-4 prikazane su granice složene pogreške strujnih transformatora za zaštitu klase P. One su dane pri nazivnoj primarnoj graničnoj struci točnosti (I_{gt_n}). To je najveća vrijednost primarne struje kod koje strujni transformator zadovoljava zahtjeve glede zadane složene pogreške ε_i . Spomenuta pogreška odgovara pritom opterećenju strujnog transformatora nazivnim teretom Z_n .

Tablica 2.1-4 Granice složene progeške strujnih transformatora za zaštitu klase P.

Klasa točnosti	$\pm \varepsilon_i$ [%]
5P	5
10P	10

Nazivni granični faktor točnosti (F_{tn}) određuje se kao omjer između nazivne primarne granične struje točnosti (I_{gt_n}) i nazivne primarne struje (I_{1n}), tj.:

$$F_{tn} = \frac{I_{gt_n}}{I_{1n}} \quad (2.1-9)$$

Nazivna primarna granična struja točnosti jest najveća vrijednost primarne struje za koju strujni transformator zadovoljava u pogledu složene pogreške. Standardne vrijednosti nazivnog graničnog faktora točnosti predviđene su u tablici 2.1-5.

Tablica 2.1-5 Standardne vrijednosti nazivnog graničnog faktora točnosti.

F_{tn}	5	10	15	20	30
----------	---	----	----	----	----

Nazivni granični faktor točnosti strujnog transformatora se odabire na način da zadovolji sljedeću relaciju:

$$F_{tn} \geq \frac{I_{K\max}}{I_{1n}} \quad (2.1-10)$$

pri čemu je $I_{K\max}$ – maksimalna struja kvara na mjestu ugradnje strujnog transformatora. Riječ je o efektivnoj vrijednosti struje tropolnoga kratkog spoja.

Stvarni granični faktor točnosti strujnog transformatora nije konstantna veličina i može se razlikovati od nazivnog graničnog faktora točnosti. On se mijenja u ovisnosti o stvarnom sekundarnom bremenu strujnog transformatora. Stvarni granični faktor točnosti može se odrediti pomoću sljedećeg izraza:

$$F_t = F_{tn} \cdot \frac{S_v + S_n}{S_v + S_b} \quad (2.1-11)$$

gdje su:

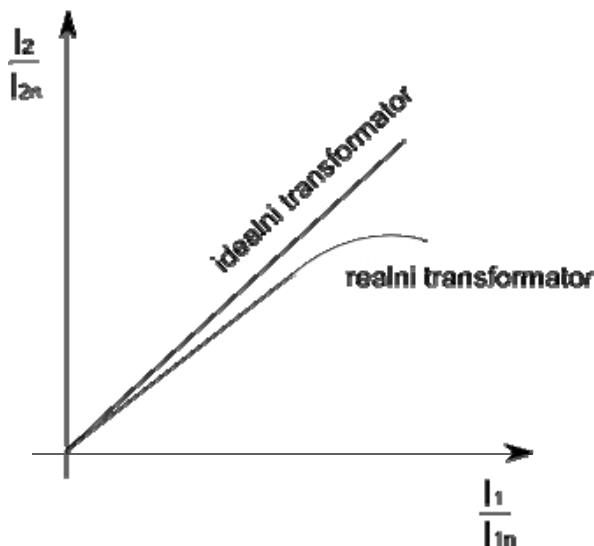
- F_t – stvarni granični faktor točnosti strujnog transformatora,
- F_{tn} – nazivni granični faktor točnosti strujnog transformatora,
- S_v – vlastita potrošnja strujnog transformatora (VA),
- S_n – nazivna snaga strujnog transformatora (VA),
- S_b – snaga priključenog bremena (stvarno breme) strujnog transformatora (VA).

Stvarni granični faktor točnosti strujnog transformatora (F_t) biti će jednak nazivnom graničnom faktoru točnosti (F_{tn}) u slučaju kada je strujni transformator opterećen nazivnom snagom, tj. kada je $S_b = S_n$. Dakle, vrijede općenito sljedeće relacije:

- $S_n > S_b \rightarrow F_t > F_{tn}$
- $S_n = S_b \rightarrow F_t = F_{tn}$
- $S_n < S_b \rightarrow F_t < F_{tn}$

U slučajevima vrlo visokih vrijednosti maksimalne struje kratkog spoja, nazivni granični faktor točnosti bi mogao biti izvan standarda. U tom slučaju se bira strujni transformator veće nazivne snage od potrebne (tj. $S_n > S_b$) da bi time stvarni granični faktor točnosti bio veći od nazivnog graničnog faktora točnosti.

Nadalje, grafička ilustracija prijenosne karakteristike strujnog transformatora prikazana je na slici 2.1-3. Kod idealnog strujnog transformatora uočava se da je riječ o pravcu pod kutem od 45° u odnosu na apscisu, što znači da je riječ o konstantnoj veličini koja ne ovisi o trenutnom omjeru struja primara i sekundara. Međutim, kod realnog transformatora to nije slučaj, što je zorno ilustrirano na slici 2.1-3.



Slika 2.1-3 Grafička ilustracija prijenosne karakteristike strujnog transformatora.

Strujni transformatori za zaštitu na natpisnoj pločici posjeduju:

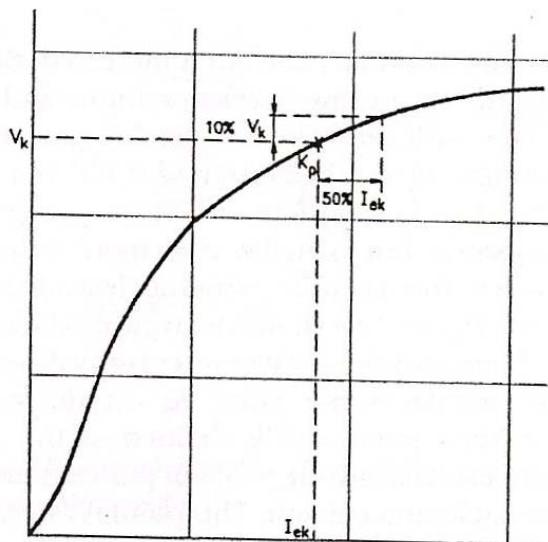
- klasu točnosti,
- slovo P (protection),
- granični faktor točnosti.

Primjerice, oznaka 10P 30 pokazuje da složena pogreška strujnog transformatora pri struji kvara $30 \cdot I_{1n}$ nije veća od 10 %.

Valja naglasiti da poseban problem pri izboru tehničkih podataka strujnih transformatora za zaštitu predstavlja pojava zasićenja strujnih transformatora u uvjetima nastupa kvarova praćenih vrlo velikim iznosima struje. Također pojavu zasićenja strujnog transformatora za zaštitu može izazvati i pojava istosmjerne komponente struje kvara (asimetrična struja kratkog spoja koja sadrži značajan udio istosmjerne komponente). Ovaj problem je naročito izražen u prijenosnoj mreži blizu elektrana i u samim elektranama. U spomenutim slučajevima potrebno je posebno voditi računa o pojavi (i odgovarajućoj provjeri) eventualnog zasićenja jezgre strujnog transformatora za zaštitu. U distributivnim mrežama ovaj problem je daleko manje izražen te se neće stoga posebno obrađivati.

Da bi se moglo eliminirati mogućnost pojave zasićenja jezgre strujnog transformatora za zaštitu potrebno je u određenim slučajevima (ugradnja strujnog transformatora u elektrani ili u rasklopnim postrojenjima i trafostanicama blizu elektrana) provjeriti da li će doći do pojave zasićenja pri nastupu kvara. Zasićenje jezgre strujnog transformatora može nastupiti uslijed izmjenične komponente struje kratkog spoja i/ili uslijed istosmjerne komponente struje kratkog spoja. U svakom slučaju, dolazi do pomaka radne točke strujnog transformatora (na krivulji magnetiziranja) iznad tzv. točke koljena.

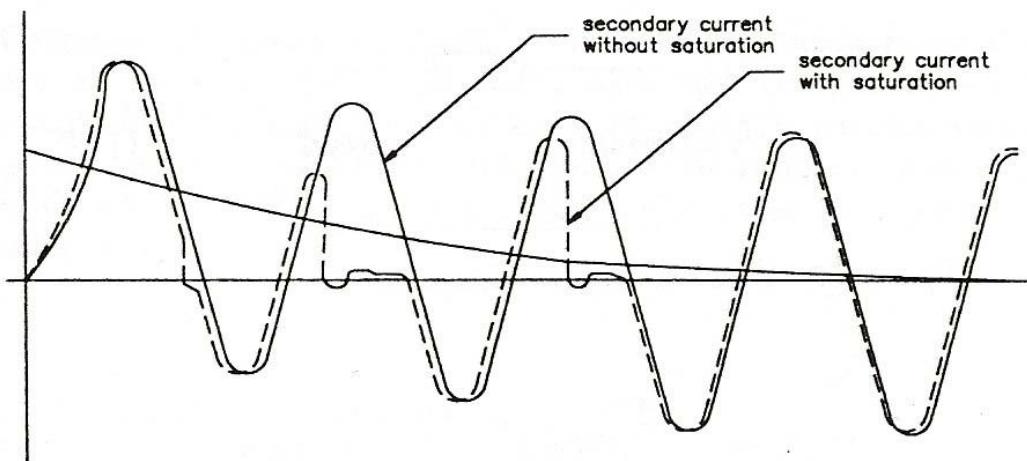
Slika 2.1-4 prikazuje primjer krivulje magnetiziranja strujnog transformatora. Ona prikazuje ovisnost sekundarne uzbudne struje (I_{ek}) strujnog transformatora o sekundarnom uzbudnom naponu (V_k) i može se odrediti mjeranjem. Proizvođači strujnih transformatora također ponekad prilažu ovu krivulju kataloškim podacima.



Slika 2.1-4 Primjer krivulje magnetiziranja strujnog transformatora.

Točka koljena na ovoj krivulji, prema IEC propisima, definirana je točkom u kojoj pri deset postotnom (10%) povećanju sekundarnog uzbudnog napona dolazi do pedeset postotnog (50%) povećanja sekundarne uzbudne struje strujnog transformatora.

Zasićenje jezgre strujnog transformatora uslijed istosmjerne komponente struje kratkog spoja može imati dramatične posljedice na rad relajnih uređaja spojenih na njegovu sekundarnu stranu. Slika 2.1-5 ilustrira primjer distorziranja / iskriviljenja struje kratkog spoja (uslijed zasićenja jezgre istosmjernom komponentom) koju strujni transformator prenosi sa primarne strane na svoju sekundarnu stranu. Na dotičnoj slici punom linijom prikazana je krivulja sekundarne struje kakva bi trebala biti (bez pojave zasićenja), dok je isertkanom linijom prikazana sekundarna struja uslijed zasićenja jezgre strujnog transformatora istosmjernom komponentom struje kratkog spoja. Uočava se značajno odstupanje potonje struje, što ima za posljedicu pogrešno djelovanje relajne zaštite.



Slika 2.1-5 Utjecaj zasićenja jezgre strujnog transformatora istosmjernom komponentom na prijenos struje kvara na sekundarnu stranu.

Na kraju se može konstatirati da istosmjerna komponenta struje kvara ima općenito veći (značajniji) utjecaj na zasićenje jezgre strujnog transformatora (a time i na njegovu pogrešku) nego li je to slučaj s izmjeničnom komponentom struje kvara.

2.1.2. Naponski transformatori

Naponski transformatori po svojoj izvedbi mogu biti induktivni ili kapacitivni. Kapacitivni naponski transformatori bazirani su na principu kapacitivnog dijelila napona i uglavnom se koriste kod vrlo visokih napona. Naponski transformatori se dijele po svojoj namjeni na naponske transformatore za mjerjenje i naponske transformatore za zaštitu. Za razliku od strujnih transformatora, naponski transformatori imaju neznatne probleme sa zasićenjem magnetske jezgre (jer se napon kreće u relativno malim granicama). Obično se u jednoj fizičkoj samostalnoj jedinici nalaze zajedno transformatori za mjerjenje i transformatori za zaštitu. To se postiže upotrebom više odvojenih sekundarnih namota smještenih oko zajedničke jezgre. Slika 2.1-6, ilustracije radi, prikazuje fotografiju visokonaponskog kapacitivnog naponskog transformatora.

Osim toga, naponski transformatori mogu posjedovati i *pomoćni sekundarni namot*, koji se koristi za formiranje otvorenog trokuta kod sloga od tri naponska transformatora. Pomoćni sekundarni namoti u spoju otvorenog trokuta iskorištavaju se za:

- dobivanje trostrukog nultog napona ($3u_0$) mreže,
- prigušenje pojave ferorezonancije u mreži; ovo se postiže ugradnjom odgovarajućeg djelatnog otpornika u otvoreni trokut.



Slika 2.1-6 Fotografija visokonaponskog kapacitivnog naponskog transformatora.

S obzirom na način priključka na mrežu naponski transformatori se dijele na:

- uzemljene (jednopolno izolirane) naponske transformatore; spajaju se između faznog vodiča i zemlje,
- neuzemljene (dvopolno izolirane) naponske transformatore; spajaju se između faznih vodiča mreže.

Osnovni tehnički podaci naponskih transformatora za zaštitu jesu:

- nazivni prijenosni omjer (p_u),
- nazivna snaga (S_n),
- klasa točnosti.

Nazivni prijenosni omjer (p_u) jednak je sljedećem izrazu:

$$p_u = \frac{U_{1n}}{u_{2n}} \quad (2.1-12)$$

pri čemu su:

U_{1n} – nazivni primarni napon naponskog transformatora,

u_{2n} – nazivni sekundarni napon naponskog transformatora.

Nazivni primarni napon naponskog transformatora vezan je uz nazivni napon mreže i njegova se vrijednost određuje kako slijedi:

- za uzemljeni naponski transformator:

$$U_{1n} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (2.1-13)$$

- za neuzemljeni naponski transformator:

$$U_{1n} = U_n \quad (2.1-14)$$

gdje je: U_n – nazivni napon mreže u kojoj je uključen promatrani naponski transformator.

Nazivni sekundarni napon naponskog transformatora odabire se iz standardnih vrijednosti navedenih u tablici 2.1-6. Predočene alternativne vrijednosti u_{2n} -a odabiru se za prostrane sekundarne krugove (duge puteve sekundarnog ožičenja). U posljednjem retku tablice 2.1-6 prikazane su vrijednosti nazivnog sekundarnog napona tzv. pomoćnog sekundarnog namota.

Tablica 2.1-6 Standardne vrijednosti nazivnih sekundarnih napona.

Izvedba NT-a	Preferirane vrijednosti u_{2n} [V]		Alternativne vrijednosti u_{2n} [V]
Neuzemljena	100	110	200
Uzemljena	$\frac{100}{\sqrt{3}}$	$\frac{110}{\sqrt{3}}$	$\frac{200}{\sqrt{3}}$
	$\frac{100}{3}$	$\frac{110}{3}$	$\frac{200}{3}$

Nazivna snaga (S_n) je vrijednost prividne snage koju naponski transformator daje sekundarnom krugu pri nazivnom sekundarnom naponu i priključenom nazivnom teretu Y_n . Vrijedi sljedeći izraz:

$$S_n = u_{2n}^2 \cdot Y_n \quad (2.1-15)$$

Nazivna snaga naponskog transformatora mora zadovoljiti sljedeću relaciju:

$$S_n \geq S_r + S_{mt} \quad (2.1-16)$$

pri čemu su:

S_r – vlastiti potrošak zaštitnih i mjernih uređaja priključenih na naponski transformator,

S_{mt} – vlastiti potrošak međutransformatora, ukoliko se isti koristi.

U tablici 2.1-7 prikazane su standardne vrijednosti nazivnih snaga naponskih transformatora, pri $\cos\varphi = 0.8$ ind. One se odnose i na pomoći sekundarni namot. Preporuča se izbor osjenčenih vrijednosti.

Tablica 2.1-7 Standardne vrijednosti nazivnih snaga.

S_n [VA]	10	15	25	30	50	75	100	150	200	300	400	500

Klasa točnosti je oznaka dodijeljena naponskom transformatoru čije pogreške ostaju unutar određenih granica za propisane uvjete korištenja. Naponska pogreška (ε_u) u %-cima određuje se pomoću izraza:

$$\varepsilon_u = \frac{u_2 \cdot p_u - U_1}{U_1} \cdot 100 \quad (2.1-17)$$

gdje veličine U_1 i U_2 predstavljaju respektivno primarne i sekundarne napone naponskog transformatora, dok veličina p_u predstavlja nazivni prijenosni omjer dotičnog naponskog transformatora. Kutna pogreška (δ_u) definira se kao razlika kuteva između fazora primarnog i sekundarnog napona. Smatra se pozitivnom ukoliko fazor sekundarnog napona prethodi fazoru primarnog napona. Izražava se u minutama ili u centiradijima.

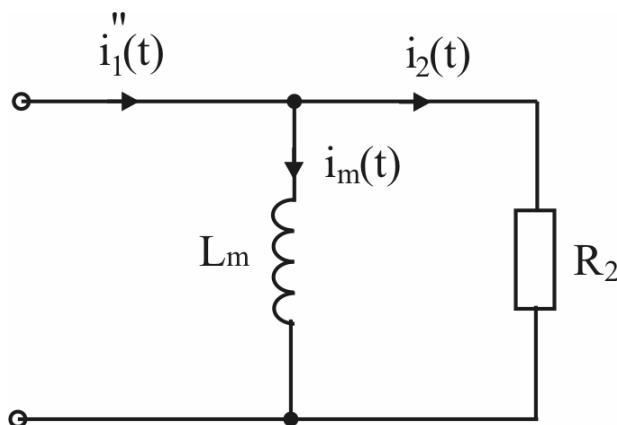
Naponski transformatori za zaštitu posjeduju dvije klase točnosti i to 3P i 6P. Granice njihovih naponskih i kutnih pogrešaka prikazane su u tablici 2.1-8. Za pomoćni sekundarni namot naponskog transformatora klasa točnosti je 6P.

Tablica 2.1-8 Granice pogrešaka NT-a za zaštitu.

Klasa Točnosti	$\pm \varepsilon_u$ [%]	$\pm \delta_u$ [min]
3P	3.0	120
6P	6.0	240

2.2. Analiza problematike istosmjerne komponente struje kratkog spoja u strujnom transformatoru

Na slici 2.2-1 prikazana je pojednostavljena nadomjesna shema strujnog transformatora. Zanemaren je, naime, rasipni induktivitet njegovog sekundarnog namota. To je u pravilu dopustivo, jer je sekundarni namot jednoliko raspodijeljen oko magnetske jezgre. Također je uzeto da je stvarno breme potpuno djelatnog karaktera ($Z_b = R_b$), što je u slučaju priključka numeričke zaštite u potpunosti zadovoljeno. Na dalje, zanemareni su djelatni otpori i rasipna reaktancija primarnog namota dotičnog strujnog transformatora, jer oni nemaju utjecaja na promatranoj strujni krakoj spoju. Također je zanemaren i nadomjesni djelatni otpor koji predstavlja gubitke vrtložnih struja i histereze u jezgri transformatora. Spomnuta nadomjesna shema strujnog transformatora je reducirana / svedena na njegovu sekundarnu stranu.



Slika 2.2-1 Pojednostavljena nadomjesna shema strujnog transformatora, pri čisto radnom teretu.

Oznake upotrijebljene na slici 2.2-1 imaju sljedeće značenje:

L_m - glavni induktivitet jezgre strujnog transformatora,

R_2 - ukupni djelatni otpor sekundarnog kruga. Jednak je sljedećem izrazu:

$$R_2 = R_{ct} + R_b \quad (2.2-1)$$

gdje su:

R_{ct} - djelatni otpor sekundarnog namota strujnog transformatora pri temperaturi $75^\circ C$,

R_b - djelatni otpor priključenog tereta (stvarno breme).

$i_l''(t)$ - struja kratkog spoja koja protječe primarnim namotom strujnog transformatora, reducirana na njegovu sekundarnu stranu. Jednaka je sljedećem izrazu:

$$i_l''(t) = \frac{i_l(t)}{p_i} \quad (2.2-2)$$

u kojem su:

$i_l(t)$ – stvarna struja kratkog spoja koja protječe primarnim namotom strujnog transformatora,

p_i – nazivni prijenosni omjer strujnog transformatora,

$i_2(t)$ – struja u sekundarnom krugu strujnog transformatora,

$i_m(t)$ – struja magnetiziranja strujnog transformatora.

Promatra se maksimalno asimetrična struja kratkog spoja. To je struja s maksimalnim udjelom istosmjerne komponente struje kvara. Ova struja može se prikazati u sljedećem obliku:

$$i_l(t) \approx \sqrt{2} \cdot I_{\max} \cdot \left[\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{T_1}} \right] \quad (2.2-3)$$

pri čemu su:

I_{\max} – efektivna vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja,

T_1 – vremenska konstanta istosmjerne komponente struje kvara. Riječ je o vremenskoj konstanti primarnog kruga (mreže).

ω – kružna frekvencija struje kvara.

Primjenom Laplace-ove transformacije, za struju $i_l(t)$ danu izrazom (2.2-3), iz nadomjesne sheme prikazane na slici 2.2-1, dobiva se za struju magnetiziranja strujnog transformatora – do momenta zasićenja njegove jezgre – sljedeći izraz:

$$i_m(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{\text{max}}}{p_i} \left[\frac{T_1}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{T_2 - T_1}{T_1} \cdot \frac{1}{\omega^2 \cdot T_2^2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \right) + \frac{1}{\omega^2 \cdot T_2^2} \cdot \cos(\omega t) + \frac{1}{\omega T_2} \cdot \sin(\omega t) \right] \quad (2.2-4)$$

u kojem je:

T_2 - vremenska konstanta sekundarnog kruga strujnog transformatora. Ona je jednaka sljedećem izrazu:

$$T_2 = \frac{L_m}{R_2} \quad (2.2-5)$$

Obično vrijedi da je:

$$T_2 > T_1 \quad (2.2-6)$$

Također je zadovoljena i sljedeća nejednakost:

$$\omega^2 \cdot T_2^2 \gg 1 \quad (2.2-7)$$

Temeljem potonje nejednakosti, izraz (2.2-4) prelazi u sljedeći oblik:

$$i_m(t) = -\frac{\sqrt{2} \cdot I_{\text{max}}}{p_i} \left[\frac{T_1}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) - \frac{1}{\omega T_2} \cdot \sin(\omega t) \right] \quad (2.2-8)$$

Izraz (2.2-8) pokazuje da struja magnetiziranja posjeduje izmjeničnu i istosmjernu komponentu. Ona u jezgri strujnog transformatora stvara popratni magnetski tok, koji se sastoji također od izmjenične i istosmjerne komponente. Nazočnost istosmjerne komponente magnetskog toka može dovesti do zasićenja jezgre strujnog transformatora. Ako se to dogodi onda se u poprečnoj grani strujnog transformatora ne inducira gotovo nikakav napon. Pritom vrijedi $i_2(t) \approx 0$, $i_m(t) \approx i_1(t)/p_i$. Ovo pak znači da sekundarnim krugom strujnog transformatora ne teče struja. Ovakvo stanje ostaje sve dok struja $i_1(t)$ ne promijeni svoj smjer i time uzrokuje da se magnetski tok (indukcija) smanji ispod granice zasićenja. Nakon tog trenutka struja $i_2(t)$ ponovno teče sve do novog zasićenja jezgre.

U skladu s navedenim, da bi se opisalo ponašanje strujnog transformatora kada njegovim primarnim namotom protjeće maksimalno asimetrična struja kratkog spoja, uvodi se tzv. koeficijent predimenzioniranja. On se definira kao omjer između ukupnog teoretski spregnutog magnetskog toka (uslijed izmjenične i istosmjerne komponente struje magnetiziranja u uvjetima kratkog spoja) i tjemene vrijednosti izmjenične komponente magnetskog toka (uzrokovane samo tjemnom vrijednošću izmjenične komponente struje magnetiziranja u uvjetima kratkog spoja), uz pretpostavku da vremenska konstanta

sekundarnog kruga zadržava stalnu vrijednost. Vrijednost dotičnog koeficijenta, nakon vremena t od časa nastupa kratkog spoja, a na temelju (8), određuje se pomoću sljedećeg izraza:

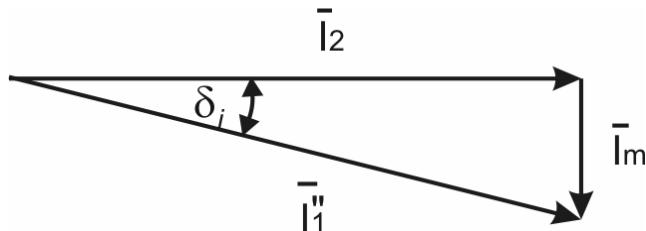
$$K_{td} = \frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) - \sin(\omega t) \quad (2.2-9)$$

Vremenska konstanta sekundarnog kruga određuje se izrazom (2.2-5). Uvrštenjem izraza (2.2-1) u (2.2-5) dobiva se:

$$T_2 = \frac{L_m}{R_{ct} + R_b} \quad (2.2-10)$$

Za pojednostavljenu nadomjesnu shemu strujnog transformatora prikazanu na slici 2.2-1, odgovarajući fazorski dijagram struja izgleda prema slici 2.2-2. Pritom su:

- \bar{I}_1'' - fazor nazivne primarne struje, reducirana na sekundarnu stranu strujnog transformatora,
- \bar{I}_2 - fazor sekundarne struje strujnog transformatora,
- \bar{I}_m - fazor struje magentiziranja strujnog transformatora,
- δ_i - kutna/fazna pogreška strujnog transformatora.



Slika 2.2-2 Fazorski dijagram struja strujnog transformatora s općenito čisto djelatnim teretom.

Sa slike 2.2-2 slijedi

$$\operatorname{tg} \delta_i = \frac{|\bar{I}_m|}{|\bar{I}_2|} \quad (2.2-11)$$

Potonji izraz, za slučaj da je strujni transformator opterećen svojim nazivnim teretom (nazivnim bremenom), može se prikazati u obliku:

$$\operatorname{tg} \delta_i = \frac{R_{ct} + Z_n}{\omega L_m} \quad (2.2-12)$$

Iz (2.2-12) slijedi:

$$L_m = \frac{R_{ct} + Z_n}{\omega \cdot \operatorname{tg}\delta_i} \quad (2.2-13)$$

Uvrštenjem izraza (2.2-13) u (2.2-10) dobiva se:

$$T_2 = \frac{1}{\omega \cdot \operatorname{tg}\delta_i} \cdot \frac{R_{ct} + Z_n}{R_{ct} + R_b} \quad (2.2-14)$$

Kutna pogreška strujnog transformatora izražava se u minutama. Stoga vrijedi:

$$1 \text{ min} = \frac{1}{60} \cdot \frac{\pi}{180} = \frac{1}{3440} \text{ rad.} \quad (2.2-15)$$

Osim toga, one su vrlo malih iznosa. Zbog toga vrijedi:

$$\operatorname{tg}\delta_i \approx \delta_i \quad (2.2-16)$$

Korištenjem (2.2-15) i (2.2-16) izraz (2.2-14) prelazi u oblik:

$$T_2 = \frac{3440}{\omega \cdot \delta_i} \cdot \frac{R_{ct} + Z_n}{R_{ct} + R_b} \quad (2.2-17)$$

Da ne bi došlo do zasićenja jezgre promatranog strujnog transformatora za zaštitu, mora biti zadovoljena sljedeća relacija:

$$E_0 \leq U_k \quad (2.2-18)$$

pri čemu su:

E_0 – elektromotorna sila koja se javlja u sekundarnom namotu strujnog transformatora uslijed izmjenične i istosmjerne komponente struje kvara.

U_k – napon koljena (napon zasićenja) promatranog strujnog transformatora. Ovu vrijednost obično daje proizvođač transformatora.

Na dalje, u konkretnom slučaju, elektromotorna sila E_0 određuje se sljedećim izrazom:

$$E_0 = K_{td} \cdot \frac{I_{\sim \max}}{p_i} \cdot (R_{ct} + Z_b) \quad (2.2-19)$$

u kojem su:

K_{td} – koeficijent predimenzioniranja strujnog transformatora. On je dan izrazom (2.2-9). Da se dobije što veća njegova vrijednost (to je nepovoljnije), neka se usvoji:

$$\sin(\omega t) = -1 \quad (2.2-20)$$

Tada izraz (2.2-9) poprima sljedeći oblik:

$$K_{td} = \frac{\omega \cdot T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) + 1 \quad (2.2-21)$$

Veličina t u potonjem izrazu predstavlja vrijeme tijekom kojeg se traži da promatrani strujni transformator ne uđe u zasićenje, kako bi pripadna relejna zaštita imala povoljne uvjete za svoje djelovanje. U većini slučajeva biti će primjenjena moderna numerička zaštita. Ona ima više zaštitnih funkcija. Dio zaštitnih funkcija su tzv. "brze" zaštite koje djeluju bez vremenske odgode. Jedna od takvih zaštita je i diferencijalna zaštita. Obično se usvaja da promatrani strujni transformator, pri protjecanju spomenute struje kvara, ne smije ući u zasićenje tijekom prve poluperiode (dotična numerička zaštita inače traži da on ne uđe u zasićenje tijekom najmanje prvih 10 ms), tj. za:

$$t = 10 \text{ ms} = 0.01 \text{ s} \quad (2.2-22)$$

I_{max} – efektivna vrijednost izmjenične komponente odgovarajuće struje kratkog spoja
 p_i – nazivni prijenosni omjer strujnog transformatora.

R_{ct} – djelatni otpor sekundarnog namota strujnog transformatora pri temperaturi 75 °C.
 R_b – stvarno breme strujnog transformatora.

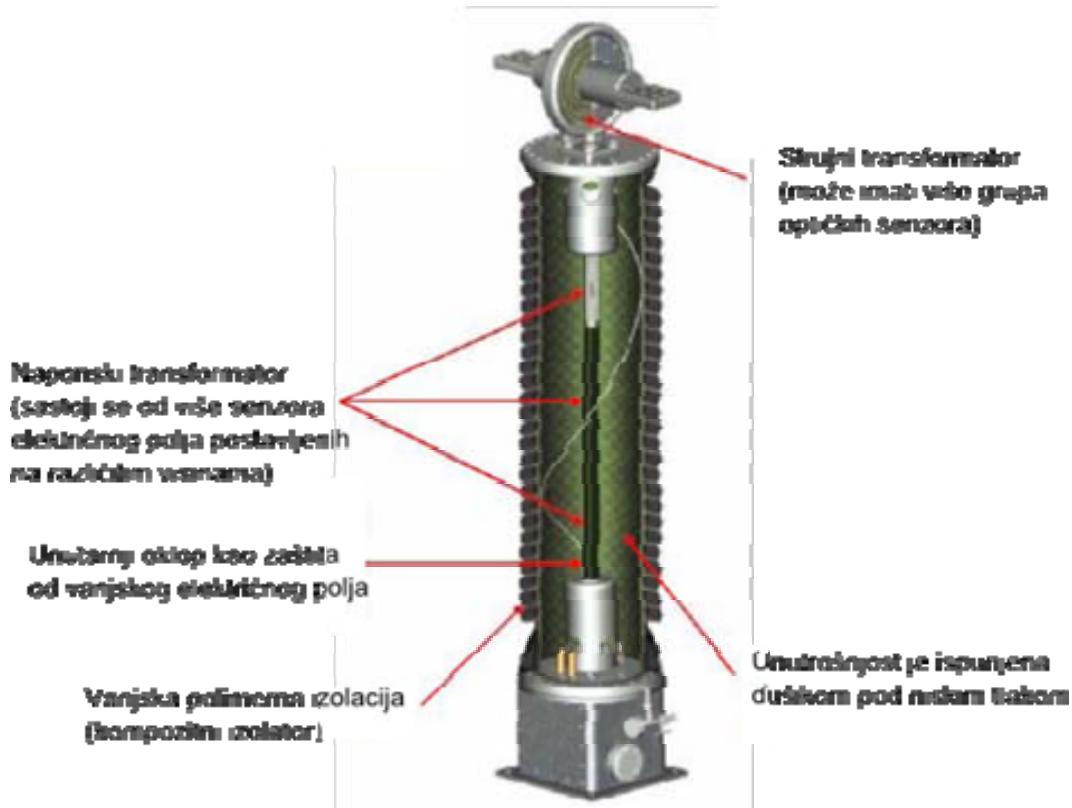
Na temelju izraza (2.2-19) određuje se, u skladu s gore objašnjenim ulaznim parametrima, vrijednost E_0 (V). Usaporebom dotične vrijednosti s naponom koljena U_k (V), koju daje proizvođač strujnog transformatora, može se ustanoviti da li je zadovoljena relacija (2.2-18). Ukoliko jest, to znači da tijekom traženog vremena (npr. $t = 10 \text{ ms}$) neće doći do zasićenja jezgre promatranog strujnog transformatora za zaštitu. Ovakva računska provjera je nužna pri određenim situacijama kada se vrši izbor strujnih transformatora (npr. u situacijama izbora strujnih transformatora za postrojenja koja se nalaze „blizu“ elektrana).

2.3. Optički strujni i naponski transformatori

Na današnjem stupnju tehničkog razvoja, moguće je u potpunosti eliminirati sve prethodno spomenute negativne posljedice feromagnetske jezgre strujnog i naponskog mjernog transformatora, na način da se dotična jezgra u potpunosti ukloni / eliminira iz konstrukcijskog rješenja strujnog i naponskog transformatora. Riječ je o potpuno novom konceptu razvoja visokonaponskih strujnih i naponskih mjernih transformatora, koji je baziran na optičkoj tehnologiji. Dakle, riječ je o optičkim strujnim i naponskim (mjernim) transformatorima.

Oni se obično izrađuju kao kombinirane jedinice, pri čemu jedna fizički samostalna jedinica posjeduje strujni i naponski transformator (koji su zajedno integrirani unutar zajedničkog kućišta). Budući da ovi transformatori ne posjeduju feromoagnetsku jezgru, nema opasnosti od utjecaja zasićenja strujnih transformatora visokim vrijednostima struje kvara na rad reljeve zaštite. Ovo je vrlo poželjna karakteristika optičkih transformatora. Nadalje, ovi mjerni transformatori su, osim što se strujni i naponski transformator nalaze zajedno u istom kućištu, redovito lakši (manje mase) od istovjetnih mjernih transformatora klasične izvedbe. Oni su već neko vrijeme prisutni na tržištu visokonaponske opreme i nude ih razni proizvođači. Za očekivati je njihov značajniji prodor u visokonaponska rasklopna postrojenja u bližoj budućnosti.

Optički mjerni transformatori svoj princip rada baziraju na fenomenu polarizacije svjetla u optičkoj niti pod utjecajem elektromagnetskog polja. Presjek karakterističnog visokonaponskog optičkog mjernog transformatora (strujni + naponski transformator) prikazan je na slici 2.3-1.



Slika 2.3-1 Presjek karakterističnog optičkog mjernog transformatora.

Na temelju slike 2.3-1 uočava se da unutar zajedničkog kućišta mjernog transformatora postoje optički senzori koji predstavljaju strujni transformator te optički senzori koji predstavljaju naponski transformator.

Optički senzor za mjerjenje struje (optički strujni transformator) radi na principu zakreta ravnine polariziranog svjetla u optičkom vlaknu pod utjecajem magnetskog polja u faznom vodiču (tzv. Faraday-ev efekt). Naime, svjetlo koje je najčešće linearno polarizirano

propušta se kroz optičko vlakno koje čini petlju oko faznog vodiča (ili kroz optički blok kroz koji prolazi fazni vodič, ovisno o izvedbi). Na slici 2.3-1 ova petlja oko faznog vodiča prikazana je na vrhu slike (više namotaja optičkog vlakna oko faznog vodiča). Ravnina polarizacije svjetla se pod utjecajem magnetskog polja faznog vodiča zakreće za određeni kut. Ovaj kut zakreta proporcionalan je jačini magnetskog polja, odnosno, iznosu jakosti struje u faznom vodiču. Mjeranjem spomenutog kuta zakreta ravnine polarizacije svjetla moguće je indirektno odrediti trenutnu vrijednost jakosti struje u faznom vodiču. Ova veza između jakosti struje i kuta zakreta ravnine polarizacije svjetla jest linearna funkcija. Ne postoji stoga mogućnost zasićenja ovog strujnog transformatora.

Optički senzori za mjerjenje napona (optički naponski transformator) bazirani su na principu čelija koje iskorištavaju tzv. Pockelov efekt (engl.: Pockel cells). Naime, Pockelove čelije izazivaju promjenu polarizacije (najčešće kružno) polariziranog svjetla pri prolazu kroz njih. Ova promjena je linearno proporcionalna narinutom naponu, odnosno jakosti električnog polja. Optički senzor radi na principu propuštanja kružno polariziranog snopa svjetla kroz Pockelovu čeliju, koja proporcionalno jakosti električnog polja (dakle, samim time i proporcionalno trenutnoj vrijednosti narinutog napona) vrši eliptičku polarizaciju svjetla. Ovo eliptički polarizirano svjetlo (nastalo djelovanjem Poceklove čelije na kružno polariziran snop svjetla) se potom rastavlja na dva linearno polarizirana snopa svjetla na kojima se vrši analiza utjecaja polarizacije Pockelove čelije (usporedba male i velike poluosni elipse s izvornim radiusom kružnice). Ova polarizacija je, kao što je rečeno, proporcionalna narinutom naponu te je na ovaj način, indirektnim postupkom, moguće izmjeriti napon. Kao što se vidi sa slike 2.3-1 postavlja se više naponskih senzora (obično tri) na različitim visinama duž transformatora a konačna vrijednost mjerjenog napona se računa na osnovu sva tri neovisna mjerjenja (senzora).

3. ZAŠTITA DISTRIBUTIVNIH MREŽA

Distributivne mreže su nazivnih napona $U_n = 10 \text{ kV}$, 20 kV i 35 kV . Redovito su napajane samo s jedne strane (tj. jednostrano napajane mreže). Radi se, dakle, gotovo isključivo o radijalnim (razdijeljnim) mrežama. Za zaštitu distributivnih mreža potrebno je primijeniti odgovarajuće zaštite u odnosu na:

- međufazne kratke spojeve (dvopolni i tropolni kratki spoj),
- kratke spojeve sa zemljom (jednopolni kratki spoj i dvopolni kratki spoj s istodobnim spojem sa zemljom) u uzemljenim mrežama,
- zemljospoj (u izoliranim mrežama).

Za zaštitu distributivnih mreža u odnosu na međufazne kratke spojeve, najčešće se koristi tzv. niskopodesiva nadstrujna zaštita. Kontrolirana veličina ove zaštite jest struja. Njena oznaka prema IEC-u jest I^* (ANSI oznaka 51). Dotična zaštita posjeduje:

- mjerni (proradni) član,
- vremenski član.

Proradni (mjerni) član ove zaštite posjeduje podešenu vrijednost proradne struje (i_{pr}^*). Jednako tako, vremenski član posjeduje podešenu vrijednost vremena (t^*). Kada je zadovoljena sljedeća nejednakost:

$$i \geq i_{pr}^* \quad (3.1)$$

gdje je i – sekundarna struja strujnog transformatora na koji je priključen proradni član nadstrujne zaštite (ujedno je to struja koja teče proradnim članom), tada će proradni član proraditi i aktivirati (uključiti) vremenski član, koji će započeti odbrojavanje vremena $t \in [0, t^*]$. Ukoliko je kvar stabilan (djeluje tijekom vremena t^*), tada će vremenski član nakon podešenog vremena t^* dati nalog prekidaču da isklopi dotični kvar. Pritom će se također uključiti odgovarajuća signalizacija (zvučna i/ili svejtlosna). Ukoliko kvar djeluje kraće od podešenog vremena t^* , tada će doći do otpuštanja proradnog člana releja i vraćanja releja u početno stanje (tzv. resetiranje releja).

Kod niskopodesive nadstrujne zaštite, glede zone štićenja, razlikuje se:

- osnovna dionica (zona),
- susjedna / pričuvna dionica (zona).

Osnovnu zonu štićenja predstavlja sam štićeni element (vod ili transformator), dok pričuvnu zonu štićenja čini prvi sljedeći element (obično je to najdulji vod).

Selektivno djelovanje nisko podesivog mjernog člana nadstrujne zaštite ostvaruje se izborom prikladnog vremena podešenja njegovog vremenskog člana. Pod pojmom selektivnog djelovanja nadstrujne zaštite razumijeva se njena sposobnost prepoznavanja struja kvara i isključenja onog elementa u kojem se dogodio dotični kvar. Provodi se stoga vremensko stupnjevanje djelovanja nadstrujnih zaštita, počevši od krajnjih potrošača (krajnja točka mreže) prema izvoru napajanja. Usljed navedenog, nadstrujne zaštite bliže izvoru

napajanja imaju i dulja vremena djelovanja. Tim zaštitama odgovaraju ujedno i veće struje kratkog spoja. To je osnovni nedostatak niskopodesive nadstrujne zaštite.

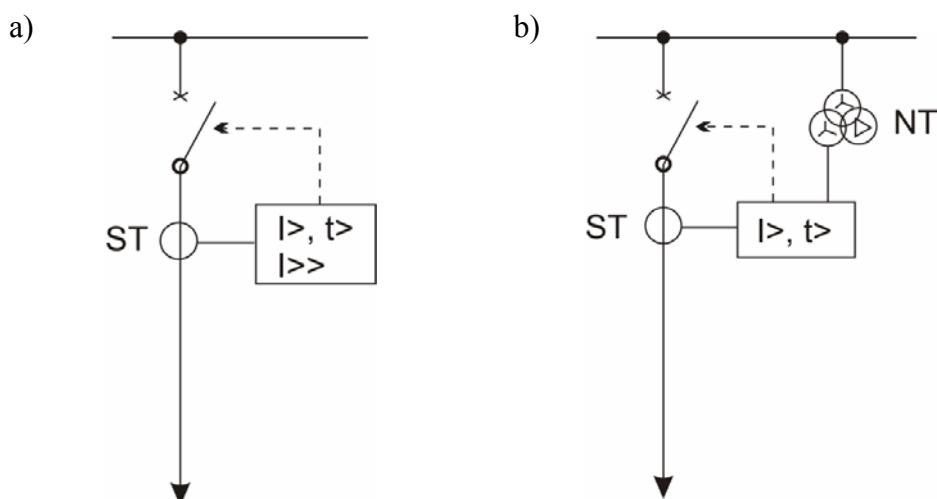
Da bi se ovaj nedostatak donekle umanjio koristi se u sklopu sustava nadstrujne zaštite distributivne mreže, u odnosu na međufazne kratke spojeve, i tzv. visokopodesivi nadstrujni član. Njegova IEC oznaka je $I >$ (ANSI oznaka 50). Ovaj se nadstrujni član još naziva i trenutni član. On djeluje često bez vremenske odgode. Njegova zadaća je djelovati u slučaju kvarova isključivo unutar osnovne zone štićenja. Upravo iz tog razloga on najčešće djeluje trenutno.

U spomenutim distributivnim mrežama, u odnosu na međufazne kratke spojeve, još se koristi i tzv. usmjerena nadstrujna zaštita. IEC oznaka ove zaštite je $\bar{I} >$. Njena ANSI oznaka je 67. Usmjerena nadstrujna zaštita, za razliku od obične nadstrujne zaštite, posjeduje (pored mjernog i vremenskog) još i usmjereni član. On prima informacije o strujama i naponima preko strujnih i naponskih transformatora na koje je priključena dotična zaštita. Usmjereni član mjeri tok snage kratkog spoja direktnog redoslijeda. Ukoliko je smjer navedene snage orijentiran iz pravca sabirnica k štićenom elementu (vod, transformator) usmjereni član će dopustiti djelovati pripadnoj zaštiti (nisko podesivom mjernom članu). U protivnom, ako je smjer navedene snage orijentiran iz pravca štićenog elementa k sabirnici usmjereni član dotične zaštite će blokirati njeno djelovanje. Usmjerena nadstrujna zaštita se koristi za zaštitu elementa (vod, transformator) kojeg je kvar napajan s obje strane. Takvi su primjeri:

- prstenasto napajana mreža,
- paralelni vodovi,
- mreža napajana s dvije strane.

Kod radikalnih mreža primjena usmjerene nadstrujne zaštite nije potrebna.

Obje spomenute nadstrujne zaštite (obična i usmjerena) djeluju na isklapanje prekidača pripadnog štićenog elementa. Na slici 3.1 prikazane su jednopolne sheme priključka dotičnih zaštita. Sa ST i NT su označeni odgovarajući strujni i naponski transformatori, respektivno.



Slika 3.1 Jednopolne sheme priključka: a) obične nadstrujne zaštite i b) usmjerene nadstrujne zaštite.

S dotične slike je jasno da se niskopodesiva ($I >$) i visokopodesiva ($I >>$) nadstrujna zaštita priključuju samo na strujni transformator, dok se usmjerena nadstrujna zaštita ($\bar{I} >$) priključuje na strujni i na naponski transformator.

Distributivne mreže potrebno je štititi i u odnosu na kvarove sa zemljom. Riječ je o primjeni tzv. homopolarnih nadstrujnih zaštita. Distributivna mreža 35 kV radi u režimu mreže uzemljene preko malog djelatnog otpornika iznosa 70Ω , koji ima funkciju ograničavanja popratne struje jednopolnoga kratkog spoja na vrijednost od 300 A. Dakle, dodir faznog vodiča sa zemljom u ovoj mreži predstavlja jednopolni kratki spoj. S druge strane distributivna mreža 10 kV najčešće radi u režimu izolirane mreže. Dodir faznog vodiča sa zemljom u ovoj mreži predstavlja zemljospoj.

Ukoliko je distributivna mreža uzemljena (bilo preko malog djelatnog otpornika ili prigušnice) primjenjuje se tzv. niskopodesiva homopolarna nadstrujna zaštita. Ona također posjeduje svoj mjerni i vremenski član, koji se zasebno podešava. U slučaju petljaste mreže, dvostranog napajanja ili paralelnih vodova, može se i u ovom slučaju primijeniti usmjerena niskopodesiva homopolarna nadstrujna zaštita.

3.1. Zaštita u odnosu na međufazne kratke spojeve

Prethodno je već spomenuto da se kod distributivnih mreža treba razlikovati izbor i podešenje zaštita u odnosu na:

- međufazne kratke spojeve (dvoponi i tropolni kratki spoj),
- kratke spojeve sa zemljom (jednopolni kratki spoj, dvopolni kratki spoj s istodobnim spojem sa zemljom) u uzemljenim mrežama.

Distributivne se mreže, u odnosu na međufazne kratke spojeve, najčešće štite sljedećim zaštitama:

- niskopodesiva nadstrujna zaštita (IEC $I >$, ANSI 51),
- visokopodesiva nadstrujna zaštita (IEC $I >>$, ANSI 50),
- usmjerena niskopodesiva nadstrujna zaštita (IEC $\bar{I} >$, ANSI 67).

Usmjerena nadstrujna zaštita se koristi za zaštitu elementa kojeg je kvar napajan s obje strane. Takvi su primjeri: prstenasto napajana mreža, paralelni vodovi i mreža napajana s dvije strane. Svaka od spomenutih zaštita posjeduje svoj mjerni i vremenski član. Potrebno je stoga odrediti njihova podešenja. Usmjerena nadstrujna zaštita posjeduje još i usmjerni član, koji joj dopušta djelovanje (odnosno blokira njeno djelovanje), ovisno o smjeru snage kratkog spoja.

3.1.1. Određivanje podešenja vremenskog člana niskopodesive nadstrujne zaštite u odnosu na međufazne kratke spojeve

Selektivno djelovanje nadstrujnih zaštita, u odnosu na međufazne kratke spojeve, postiže se vremenskim stupnjevanjem vremenskih članova spomenutih nadstrujnih zaštita. Polazi se, pritom, od krajnjih točaka distributivne mreže prema izvoru napajanja dotične

mreže. Potrebni vremenski interval (selektivni stupanj djelovanja), Δt , ovisi o vrsti i izvedbi releja. Postoje tri vrste izvedbe zaštitnih releja: elektromehanički, statički i numerički. Valja naglasiti da se danas proizvode isključivo numerički releji. Elektromehanički i statički releji postoje u distributivnoj mreži ali se redovitim revitalizacijama postrojenja zamjenjuju numeričkim izvedbama. U skladu s tim, sve novo-projektirane zaštite distributivnih mreža biti će implementirane korištenjem isključivo numeričkih releja.

Kod elektromehaničkih releja odabire se vremenski interval u sljedećem području:

$$\Delta t = 0,4 - 0,6 \text{ s} \quad (3.1-1)$$

Obično se iz dotičnog intervala usvaja srednja vrijednost:

$$\Delta t = 0,5 \text{ s} \quad (3.1-2)$$

Kod statičkih releja, kao i kod numeričkih releja, može se odabrati kraći vremenski interval, kako slijedi:

$$\Delta t = 0,2 - 0,4 \text{ s} \quad (3.1-3)$$

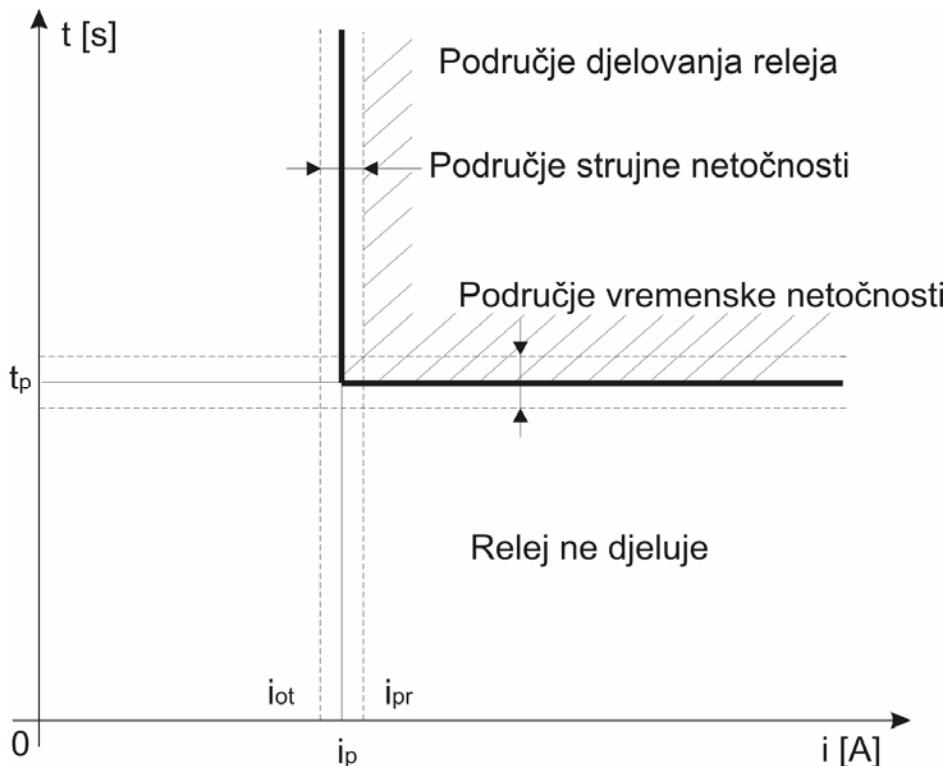
Naime, ove izvedbe zaštitnih releja odlikuju se većom brzinom rada. Ponovno se iz intervala prema (3.1-3) obično usvaja srednja vrijednost:

$$\Delta t = 0,3 \text{ s} \quad (3.1-4)$$

U Europi, pa tako i u našoj zemlji koristi se nadstrujna zaštita s tzv. **vremenski neovisnom radnom karakteristikom**. Takva je karakteristika prikazana grafički na slici 3.1-1, pri čemu su i - struja releja, t - vrijeme djelovanja releja. S druge strane, u anglo-američkim zemljama (npr. Velika Britanija, SAD) koriste se nadstrujni releji s vremenski ovisnom radnom karakteristikom (engl.: inverse time), pri čemu vrijeme isklopa releja ovisi (obrnuto proporcionalno) o struji kvara. Postoji pritom više različitih standardiziranih nelinearnih proradnih karakteristika relejnih uređaja između kojih se može vršiti izbor, kojim se provodi selektivnost između različitih zaštita.

Oznake upotrijebljene na slici 3.1-1 imaju sljedeća značenja:

- i_p – podešena vrijednost struje na niskopodesivom mjernom članu,
- t_p – podešena vrijednost vremena na vremenskom članu (vrijeme odgode djelovanja nadstrujne zaštite),
- i_{pr} – minimalna vrijednost struje kod koje proradi niskopodesivi mjerni član,
- i_{ot} – maksimalna vrijednost struje kod koje otpusti niskopodesivi mjerni član.



Slika 3.1-1 Vremenski neovisna radna karakteristika nadstrujnog releja.

Definira se i omjer otpuštanja nadstrujnog releja kako slijedi:

$$a = \frac{i_{ot}}{i_{pr}} \quad (3.1-5)$$

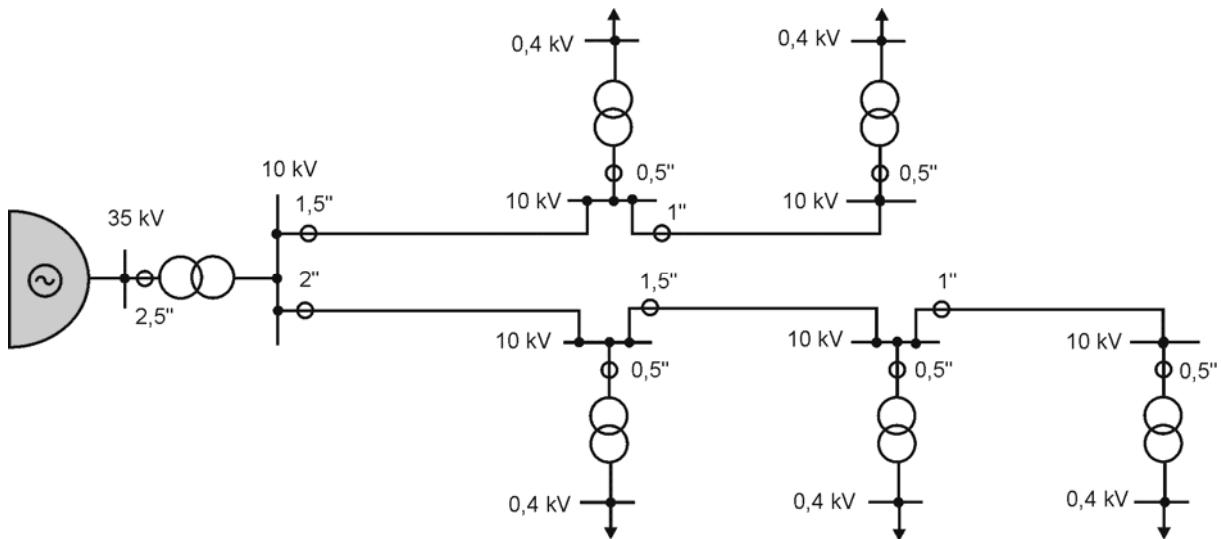
On je jedna od osobina releja. Što je on bliže jedinici to je relj kvalitetniji.

Za vrijednosti struja $i < i_{pr}$ relj neće djelovati. Ukoliko je pak $i \geq i_{pr}$ proradit će niskopodesivi mjerni član, te će djelovati na aktiviranje vremenskog člana. Kada pritom potekne podešeno vrijeme t_p , a uz uvjet $i > i_{ot}$, relj će djelovati na isključenje štićenog elementa. Međutim, ako tijekom vremena $t < t_p$ dođe do smanjenja struje na $i < i_{ot}$, doći će do otpuštanja releja (relej tada neće djelovati na isključenje).

Na sljedećim primjerima prikazat će se način vremenskog stupnjevanja nadstrujnih zaštita u distributivnoj mreži.

Primjer 1.

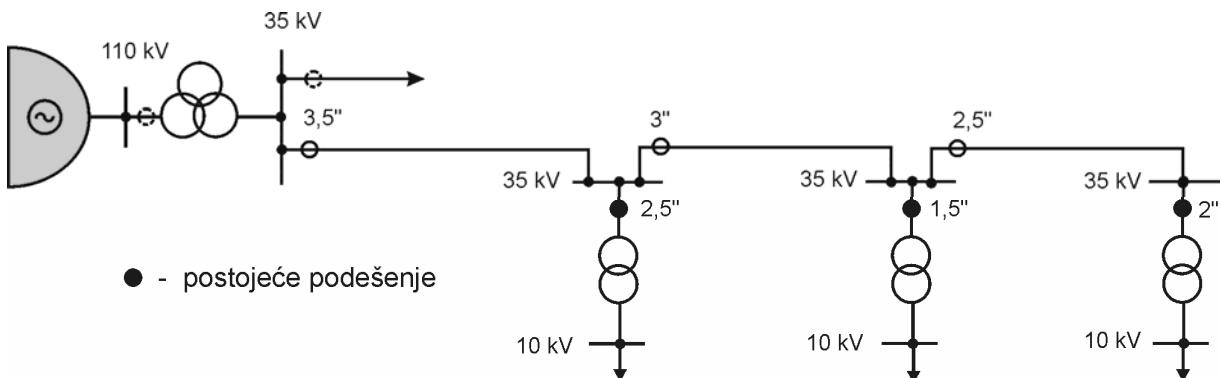
Slika 3.1-2 prikazuje jednopolnu shemu distributivne mreže 10 kV za koju je potrebno izabrati vremenska podešenja nadstrujne zaštite. Smještaj dotičnih releja prikazan je kružićima na slici 3.1-2. Neka su nadstrujni releji izvedeni u elektromehaničkoj izvedbi. Tada se za selektivni vremenski interval usvaja $\Delta t = 0,5$ s. Provodi se stupnjevanje vremenskih članova polazeći od kraja distributivne mreže 10 kV prema njenom izvoru napajanja.



Slika 3.1-2 Jednopolna shema distributivne mreže 10 kV za koju se izabire vremensko podešenje nazočnih nadstrujnih zaštita.

Primjer 2.

Slika 3.1-3 prikazuje jednopolnu shemu distributivne mreže 35 kV za koju je potrebno izabrati vremenska podešenja nadstrujne zaštite. Smještaj dotičnih releja prikazan je kružićima na slici 3.1-3. Pritom su punim kružićima prikazana zadana podešenja vremenskih članova, koja su posljedica posebno provedenog vremenskog stupnjevanja (uvjet selektivnosti) nadstrujnih zaštita u mreži 10 kV.



Slika 3.1-3 Jednopolna shema distributivne mreže 35 kV za koju se izabire vremensko podešenje nazočnih nadstrujnih zaštita.

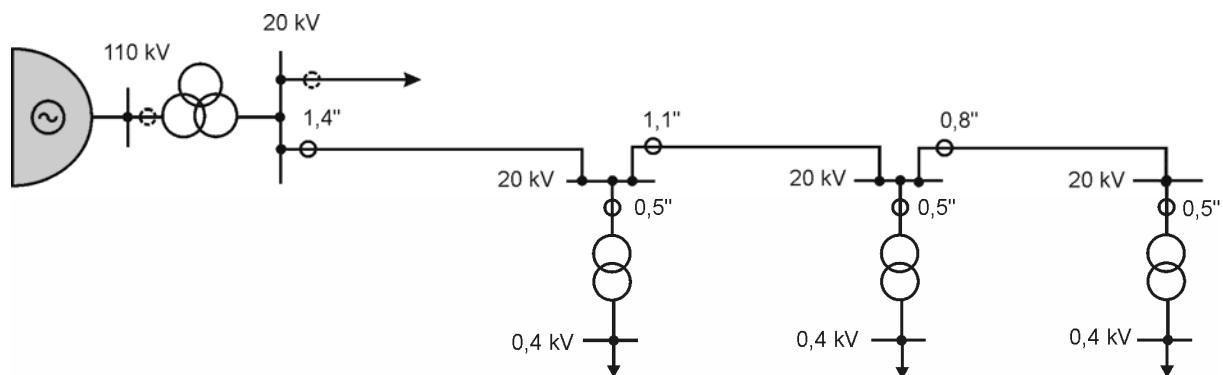
Praznim kružićima prikazan je smještaj nadstrujnih releja za koje se traži podešenje vremenskog člana. Neka su nadstrujni releji ponovno izvedeni u elektromehaničkoj izvedbi. Tada se za selektivni vremenski interval usvaja $\Delta t = 0,5$ s. Provodi se stupnjevanje vremenskih članova polazeći od kraja distributivne mreže 35 kV prema njenom izvoru napajanja, uvažavajući pritom zadana podešenja vremenskih članova.

Analizom vremenskih podešenja prema slici 3.1-3 uočava se da je vremensko podešenje releja uz sabirnice 35 kV (izvorna trafostanica) vrlo visoko. Ono je nužna

posljedica vremenskog stupnjevanja releja, koje je pak ključno za selektivnost same zaštite distributivne mreže. Istovremeno, vrlo visoko vremensko podešenje releja uz sabirnice 35 kV u izvornoj trafostanici nije povoljno jer se time, dakle, dopušta trajanje kratkog spoja.

Primjer 3.

Slika 3.1-4 prikazuje jednopolnu shemu distributivne mreže 20 kV za koju je potrebno izabrati vremenska podešenja nadstrujne zaštite. Ovaj primjer odgovara konfiguraciji budućih distributivnih mreža, koje se kane ostvariti s nazivnim naponom 20 kV. Smještaj nadstrujnih releja prikazan je ponovno kružićima na slici 3.1-4. Neka je u ovom primjeru riječ o numeričkim reljima, za koje se može usvojiti selektivni vremenski interval prema izrazu (3.1-4), tj. vrijedi $\Delta t = 0,3$ s.



Slika 3.1-4 Jednopolna shema distributivne mreže 20 kV za koju se izabire vremensko podešenje nazočnih nadstrujnih zaštita.

Analizom vremenskih podešenja prema slici 3.1-4 uočava se daleko povoljnija situacija nego li je u slučaju mreže 35 kV. Naime, sada najdulje vrijeme odgode djelovanja zaštite (relejna zaštita uz sabirnice 20 kV u izvornoj trafostanici) iznosi svega 1,4 s, što je daleko manje nego li 3,5 s. Razlog tomu je kraći selektivni vremenski interval releja (koji je posljedica primjene numeričke zaštite) i manje razgranatosti mreže 20 kV u odnosu na mrežu 35 kV. Naime, u ovom slučaju u potpunosti je eliminirana mreža 10 kV (i sve zaštite koje se u njoj nalaze).

Na temelju prethodno razmatranih primjera može se konstatirati sljedeće:

- na svakom vodu dovoljno je upotrijebiti samo po **jedan nadstrujni relj**, koji se postavlja na onoj strani voda (uz one sabirnice) koja je bliže izvoru napajanja,
- sustavom nadstrujne zaštite može se ostvariti rezervno / pričuvno štićenje, ukoliko dođe do zatajenja pojedinih zaštita,
- mana / nedostatak nadstrujne zaštite jest u tome što se kvarovi koji su bliže izvoru napajanja (oni su praćeni većim strujama kvara) isključuju s dužim vremenima zatezanja.

Upotreboom nadstrujnih releja u statičkoj i/ili numeričkoj izvedbi ovo se vrijeme isklapanja (zatezanja) može donekle smanjiti, jer je u tom slučaju kraći selektivni vremenski interval. Međutim, kod izvoda s većim brojem podstanica vrijeme isključenja u blizini izvora napajanja ipak naraste na značajne iznose. Maksimalno vrijeme isklapanja u blizini mjesta napajanja moralo bi ipak zadovoljiti sljedeću nejednakost:

$$t_{\max}^* \leq 4 \text{ s} \quad (3.1-6)$$

Ovo je, kao što je navedeno, ujedno i temeljni ograničavajući faktor u primjeni niskopodesive nadstrujne zaštite u distributivnim mrežama. Ovaj problem se donekle rješava dodatnom primjenom spomenute visokopodesive nadstrujne zaštite. Ukoliko bi ipak distributivna mreža imala takvu konfiguraciju da se ne bi mogla zadovoljiti nejednakost (3.1-6), valjalo bi razmotriti uporabu neke druge brze zaštite u području blizu izvora napajanja. Takva je primjerice distantna zaštita.

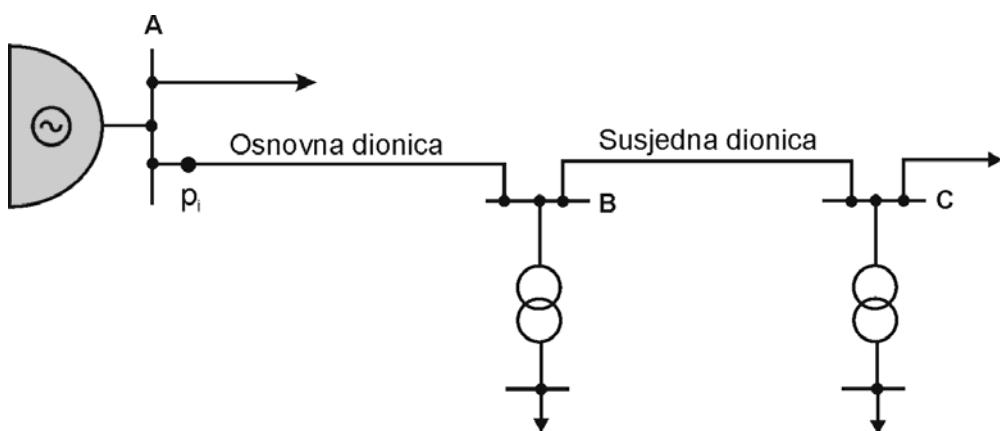
3.1.2. Određivanje podešenja proradne struje mjernog člana niskopodesive nadstrujne zaštite u odnosu na međufazne kratke spojeve

Ovdje se, dakle, podrazumjeva određivanje minimalne proradne struje mjernog člana niskopodesive nadstrujne zaštite, u odnosu na međufazne kratke spojeve, kod koje će proraditi njen proradni član i pokrenuti odgovarajući vremenski član. Međufazni kratki spojevi jesu tropolni i dvopolni kratki spoj. Ova se struja podešava na mjernom članu nadstrujnog releja.

Proradna struja mjernog člana nadstrujne zaštite, u odnosu na međufazne kratke spojeve, određuje se iz sljedećih zahtjeva:

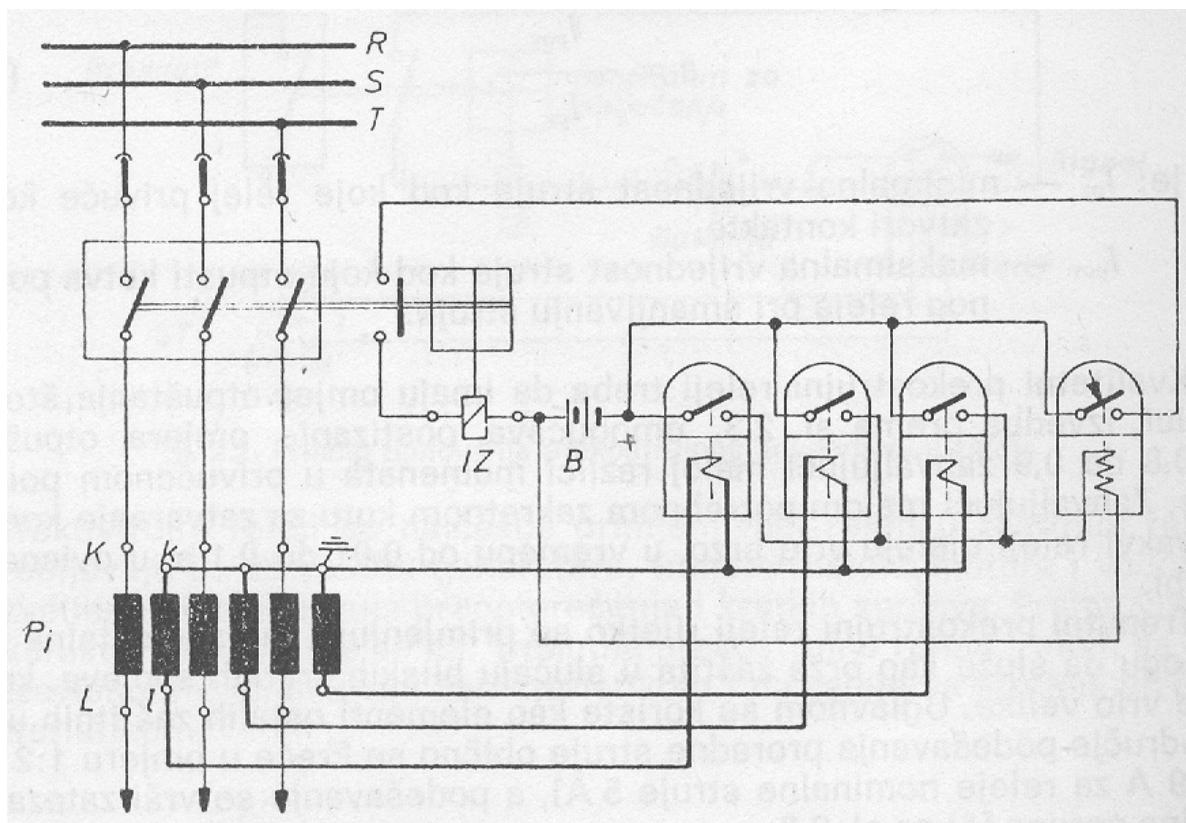
- a) da nadstrujna zaštita sigurno djeluje kod minimalnih struja kratkih spojeva na sonovnoj i susjednoj dionici,
- b) da ne djeluje kod maksimalne pogonske struje opterećenja.

Pojednostavljeni jednopolni prikaz karakterističnog primjera priključka nadstrujne zaštite u odnosu na međufazne kratke spojeve, ugrađene u postrojenju A na vodu A – B (mjesto ugradnje strujnog transformatora), prikazan je na slici 3.1-5. Na dotičnoj slici naznačena je osnovna i susjedna (pričuvna) dionica spomenute nadstrujne zaštite smještene u postrojenju A voda A – B.



Slika 3.1-5 Pojednostavljeni jednopolni prikaz priključka nadstrujne zaštite s označenom njenom osnovnom i susjednom dionicom.

Trofazni prikaz priključka mjernog člana nadstrujne zaštite, u odnosu na međufazne kratke spojeve, na sekundarnu stranu strujnog transformatora dan je na slici 3.1-6.



Slika 3.1-6 Trofazni prikaz priključka mjernog člana nadstrujne zaštite, u odnosu na međufazne kratke spojeve, na sekundarnu stranu strujnog transformatora.

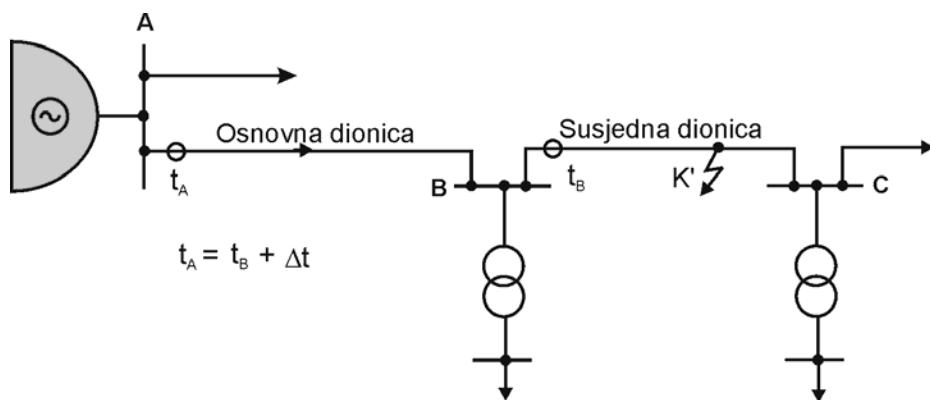
Kao što se vidi prema dotičnom prikazu (slika 3.1-6), sekundarni namoti strujnih transformatora spajaju se u *spoj zvijezda*. To je standardna praksa u većini Europskih zemalja (izuzetak je Rumunjska i Anglo-američke zemlje, gdje se sekundarni namoti strujnih transformatora mogu spajati i u spoj trokut). Zvjezdište se formira uvijek sa strane prekidača (sabirnice). Dobiveno je spajanjem "k" stezaljke navedenog strujnog transformatora. Dotično zvjezdište se redovito uzemljuje.

Sa slike 3.1-6 se također vidi da je za rad nadstrujne zaštite potreban i istosmjerni napon. On se najčešće dobiva iz akumulatorske baterije napona (B). Riječ je o tzv. sekundarnim sustavima napajanja zaštitnih strujnih krugova u visokonaponskim rasklopnim postrojenjima (trafostanicama) i elektranama. Ovi sekundarni strujni krugovi su redovito na niskom naponu (istosmjerni ili izmjenični napon) iznosa 48 V, 110 V ili 220 V. Spomenuti istosmjerni (ili izmjenični) niskonaponski strujni krugovi su značajni za uspješan rad relejne zaštite (i na neki način predstavljaju dio tog sustava). Bez njih zaštita ne bi mogla ispravno djelovati. Stoga je važno da ne dođe do prekida u njihovom napajanju, jer bi pritom došlo do zatajenja rada relejnih zaštita.

Pri razmatranju zahtjeva a) valja analizirati strujno stanje na mjestu ugradnje nadstrujne zaštite u slučaju:

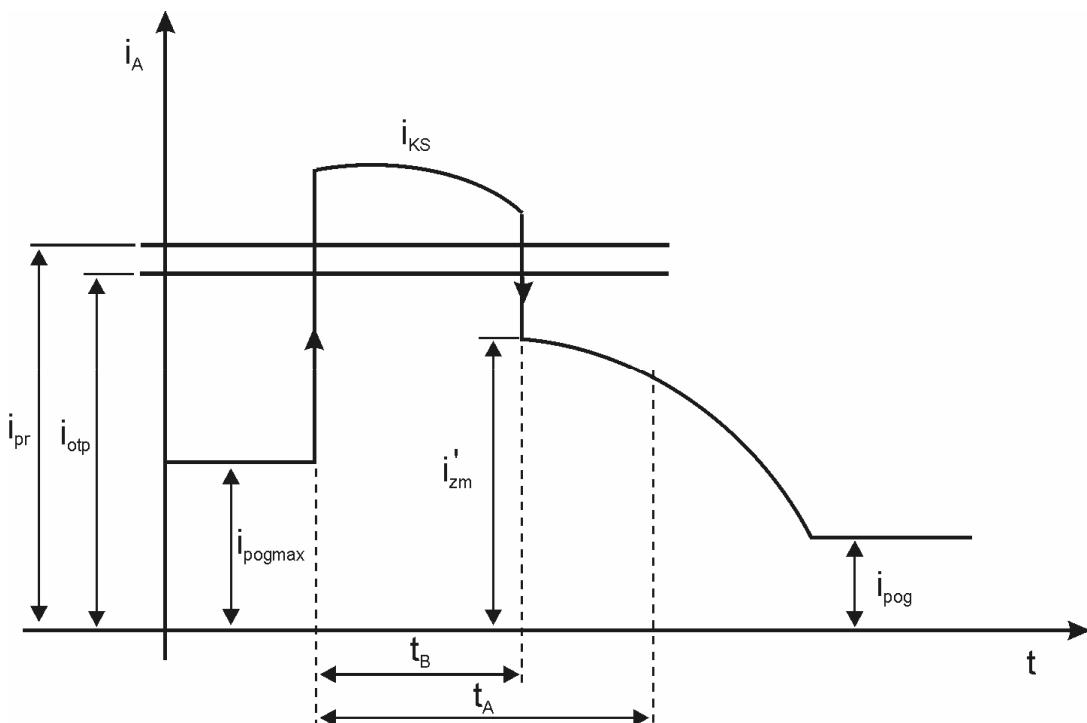
- a1) nastupa kratkog spoja na susjednoj dionici,
- a2) nastupa kratkog spoja i prorade uređaja za automatski ponovni uklop (APU) na osnovnoj dionici.

Ad a1) Nastup kratkog spoja na susjednoj dionici grafički je ilustriran na jednopolnoj shemi prikazanoj na slici 3.1-7.



Slika 3.1-7 Grafička ilustracija nastupa kratkog spoja na susjednoj dionici.

Na slici 3.1-8 prikazan je dijagram promjene struje kroz nadstrujni relaj zaštite I> u postrojenju A, na razmatranom vodu A – B, za slučaj kvara (kratkog spoja) u susjednoj dionici (mjesto K' prema slici 3.1-8).



Slika 3.1-8 Dijagram promjene struje kroz nadstrujni relaj u postrojenju A za slučaj kvara u susjednoj dionici.

Veličine upotrijebljene na slici 3.1-8 imaju sljedeća značenja:

$i_{pog\max}$ – maksimalna pogonska struja koja teče kroz relej; odgovarajuća primarna maksimalna pogonska struja pritom iznosi:

$$I_{pog\ max} = i_{pog\ max} \cdot p_i \quad (3.1-7)$$

i'_{zm} - struja kroz relej koja je posljedica zaleta asinkronih motora (ako isti postoje), do čega dolazi nakon isklapanja kvara u točki K'; odgovarajuća primarna struja iznosi:

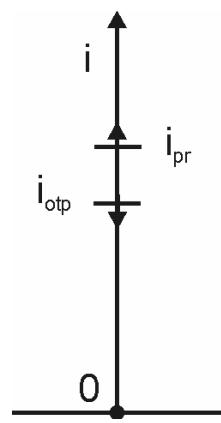
$$I'_{zm} = i'_{zm} \cdot p_i \quad (3.1-8)$$

i_{KS} – struja kratkog spoja kroz promatrani relej; odgovarajuća struja kratkog spoja u primarnom krugu ima vrijednost:

$$I_{KS} = i_{KS} \cdot p_i \quad (3.1-9)$$

Sa slike 3.1-8 se uočava da se struja kratkog spoja s vremenom smanjuje zbog prigušenja u mreži, kao i zbog prijelaza generatora iz subtranzijentnog perioda u tranzijentni te eventualno u sinkroni rad, ukoliko kratki spoj traje dovoljno dugo.

Valja navesti da proradni član zaštite $I >$ ima određenu manu (koja je izražena kod elektromehaničkih releja ali postoji kod svih izvedbi releja), a ta je da ne prorađuje i otpušta kod iste vrijednosti struje. Vrijednost kod koje relej prorađuje zove se proradna struja (i_{pr}), a vrijednost kod koje otpušta zove se povratna struja (i_{otp}). Grafička ilustracija ovog fenomena prikazana je na slici 3.1-9.



Slika 3.1-9 Grafička ilustracija uz definicije proradne i povratne struje releja.

Veličine označene na slici 3.1-9 znače:

i_{pr} – proradna struja (kod ove ili veće struje od nje će relej proraditi, tj za $i \geq i_{pr}$),

i_{otp} – povratna struja (kod ove struje relej otpušta i vraća se u početno stanje).

Temeljem slike 3.1-9, redovito je zadovoljena sljedeća nejednakost:

$$i_{otp} < i_{pr} \quad (3.1-10)$$

Definira se stoga tzv. koeficijent otpuštanja releja (povratni faktor releja), kako slijedi:

$$a = \frac{i_{otp}}{i_{pr}} < 1 \quad (3.1-11)$$

On se obično kreće u sljedećem području:

$$a \in [0,85 - 0,95] \quad (3.1-12)$$

Elektromehanički releji imaju lošiji (niži) koeficijent otpuštanja (cca 0,85), dok statički i numerički releji imaju bolji (viši) koeficijent otpuštanja (cca 0,95 i više). Zbog navedenog, a u skladu sa slikom 3.1-8, mora vrijediti:

$$i_{otp} = k_s \cdot i'_{zm} \quad (3.1-13)$$

gdje je k_s - koeficijent sigurnosti, koji uzima u obzir pogreške releja, pogreške strujnih transformatora, i sl. a obično se kreće u sljedećim granicama:

$$k_s \in [1,1 - 1,2] \quad (3.1-14)$$

Na dalje je također u skladu sa slikom 3.1-8:

$$i'_{zm} = k'_m \cdot i_{pog\ max} \quad (3.1-15)$$

pri čemu su:

k'_m - koeficijent kojim se uzima u obzir povećanje struje uslijed zaleta motora nakon isklapanja promatranog kratkog spoja u točki K' (prema slici 3.1-7); ovaj koeficijent ovisi o broju i veličini nazočnih asinkronih motora i može se kretati u području:

$$k'_m \in [1 - 5] \quad (3.1-16)$$

Ukoliko je pak područje koje se štiti bez značajnijeg prisustva asinkronih motora tada vrijedi da je:

$$k'_m = 1 \quad (3.1-17)$$

i_{pogmax} – maksimalna pogonska struja štićenog voda.

Uvrštenjem relacije (3.1-15) u (3.1-13) slijedi:

$$i_{otp} = k_s \cdot k_m' \cdot i_{pog\ max} \quad (3.1-18)$$

Temeljem izraza (3.1-11) i (3.1-7) mogu se respektivno postaviti sljedeće relacije:

$$i_{otp} = a \cdot i_{pr} \quad (3.1-19)$$

$$i_{pog\ max} = \frac{I_{pog\ max}}{p_i} \quad (3.1-20)$$

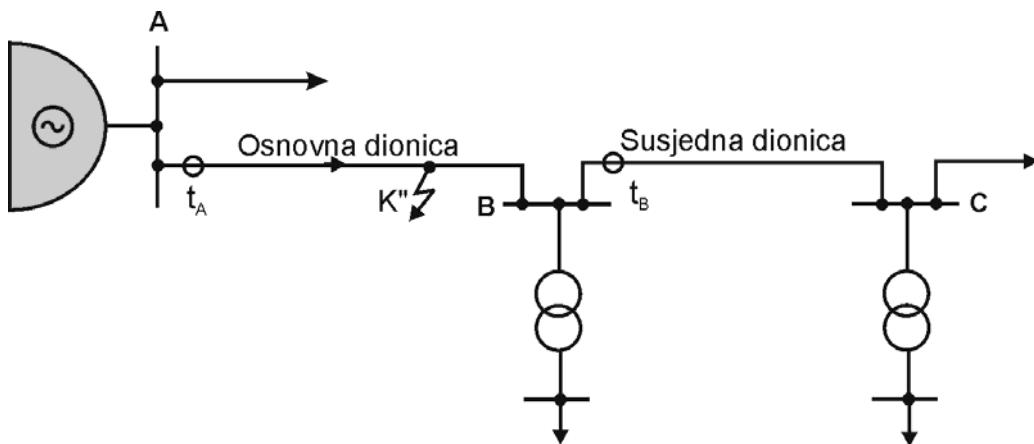
Kombiniranjem netom uvedenih relacija (3.1-19) i (3.1-20) s prethodno izvedenim izrazom (3.1-18) može se napisati sljedeća jednadžba:

$$a \cdot i_{pr} = k_s \cdot k_m' \cdot \frac{I_{pog\ max}}{p_i} \quad (3.1-21)$$

Iz potonje relacije konačno slijedi izraz za određivanje sekundarne vrijednosti proradne struje nadstrujne ($I >$) relejne zaštite:

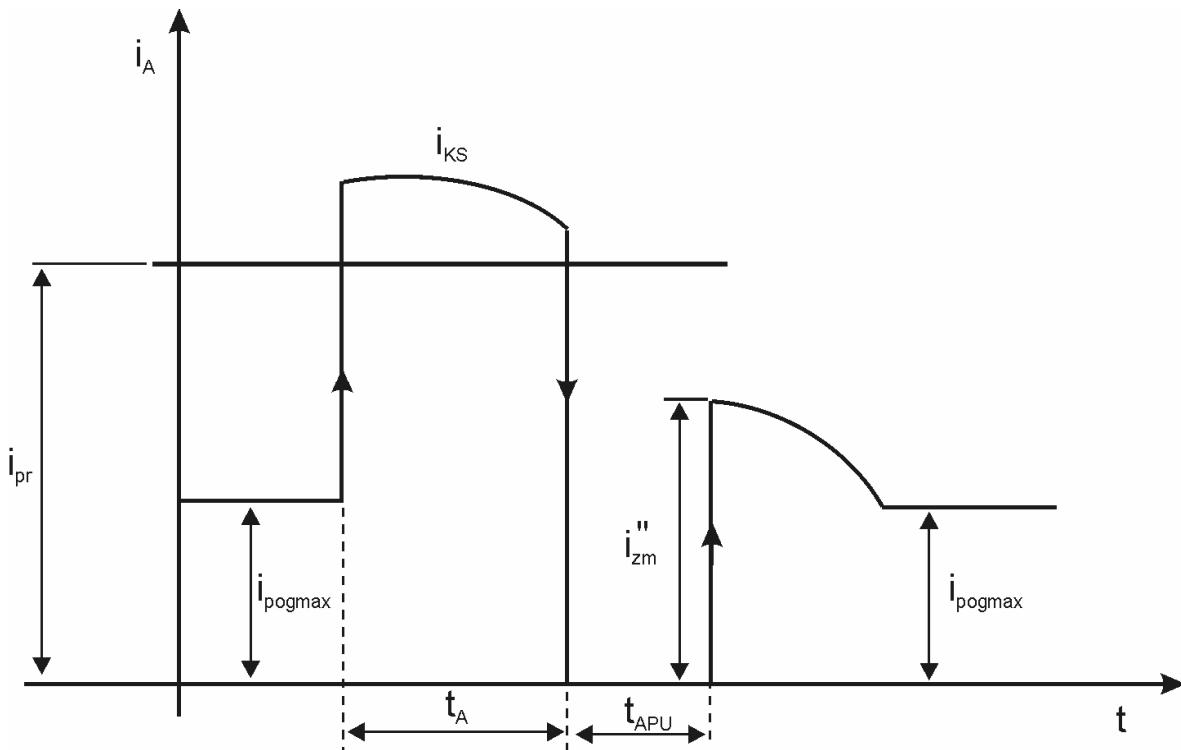
$$i_{pr} = \frac{k_s \cdot k_m'}{a \cdot p_i} \cdot I_{pog\ max} \quad (3.1-22)$$

Ad a2) Nastup kratkog spoja uz proradu uređaja za automatski ponovni uklop (APU) na osnovnoj dionici grafički je ilustriran na jednopolnoj shemi prikazanoj na slici 3.1-10.



Slika 3.1-10 Grafička ilustracija nastupa kratkog spoja na osnovnoj dionici.

Istovremeno je na dijagramu prikazanom na slici 3.1-11 prikazana promjena struje kroz nadstrujni član $I >$ u trafostanici A, na vodu A – B, za slučaj nastupa kvara na osnovnoj dionici na mjestu K'' i pri djelovanju uređaja za APU.



Slika 3.1-11 Dijagram promjene struje kvara pri nastupu kratkog spoja na osnovnoj dionici pri djelovanju uređaja za APU.

Veličine uvedene na slici 3.1-11 imaju sljedeća značenja:

t_{APU} – vrijeme trajanja beznaponske pauze (ovoliko dugo je prekidač bio u isklopljenom stanju),

i''_{zm} - struja koja protječe nadstrujnim članom zaštite $I>$, a posljedica je zaleta asinkronih motora i ostalog maksimalnog opterećenja u promatranom dijelu mreže; ova je struja veća od prije navedene struje i'_{zm} , tj. vrijedi: $i''_{zm} > i'_{zm}$, jer je dulje trajao kvar ($t_A > t_B$) i jer je postojala beznaponska pauza zbog djelovanja uređaja APU (t_{APU}).

Stoga, temeljem prethodno iznesenog (u skladu sa slikom 3.1-11), iznos proradne struje (i_{pr}) mora zadovoljiti sljedeću relaciju:

$$i_{pr} = k_s \cdot i''_{zm} \quad (3.1-23)$$

pri čemu je k_s i ovdje tzv. koeficijent sigurnosti; usvaja se ponovno, u skladu s izrazom (3.1-14) da vrijedi:

$$k_s \in [1,1 - 1,2] \quad (3.1-24)$$

Na dalje je, u skladu s oznakama primjenjenim na slici 3.1-11:

$$i_{zm}'' = k_m'' \cdot i_{pog\ max} \quad (3.1-25)$$

pri čemu je k_m'' - koeficijent kojim se uzima u obzir povećanje struje opterećenja uslijed zaleta asinkronih motora nakon uspješnog djelovanja uređaja za APU; ovaj se koeficijent može kretati u sljedećem području:

$$k_m'' \in [1 - 7] \quad (3.1-26)$$

i općenito vrijedi sljedeća nejednakost: $k_m'' > k_m'$. Za odvod bez značajnih udjela asinkronih motora usvaja se da vrijedi:

$$k_m'' = 1 \quad (3.1-27)$$

Uvrštenjem (3.1-25) u relaciju (3.1-23) dobiva se:

$$i_{pr} = k_s \cdot k_m'' \cdot i_{pog\ max} \quad (3.1-28)$$

odnosno, daljenjim korištenjem izraza (3.1-20) konačno slijedi:

$$i_{pr} = \frac{k_s \cdot k_m''}{p_i} \cdot I_{pog\ max} \quad (3.1-29)$$

Zanimljivo je navesti da u izrazu (3.1-29) nema koeficijenta otpuštanja releja (a), jer se relej vraća u početno stanje tijekom beznaponske pauze (djelovanjem APU).

Kao mjerodavna proradna struja mjernog člana zaštite $I_>$ podešava se na releju veća struja dobivena u izrazima (3.1-22) i (3.1-29), tj.:

$$i_{pr}^* = \max \left(\frac{k_s \cdot k_m'}{a \cdot p_i} \cdot I_{pog\ max}, \frac{k_s \cdot k_m''}{p_i} \cdot I_{pog\ max} \right) \quad (3.1-30)$$

Za izvod koji napaja potrošačko područje s beznačajnim udjelom asinkronih motora vrijedi:

$$k_m' = k_m'' = 1 \quad (3.1-31)$$

te stoga slijedi:

$$i_{pr}^* = \frac{k_s \cdot I_{pog\ max}}{a \cdot p_i} \quad (3.1-32)$$

3.1.3. Provjera osjetljivosti podešenja mjernog člana nadstrujne zaštite

Odabrana proradna struja (i_{pr}^*) mora biti manja od minimalne vrijednosti struje kratkog spoja kod kvara na kraju osnovne i susjedne dionice. Osjetljivost podešenja mjernog člana nadstrujne zaštite ($I>$) definirana je sljedećim koeficijentima osjetljivosti:

$${}^B k_{os} = \frac{{}^B I_{K \min}}{p_i \cdot i_{pr}^*} \quad (3.1-33)$$

$${}^C k_{os} = \frac{{}^C I_{K \min}}{p_i \cdot i_{pr}^*} \quad (3.1-34)$$

gdje su: ${}^B I_{K \min}$, ${}^C I_{K \min}$ - minimalne struje kratkog spoja na mjestu ugradnje reljne zaštite pri njihovom nastupu na kraju osnovne i susjedne dionice, respektivno. Riječ je o neistodobnim nastupima kratkih spojeva na sabirnicama postrojenja na kraju osnovne i susjedne (pričuvne) dionice. Za određivanje spomenutih minimalnih struja kratkog spoja treba promatrati nastup **dvopolnog kratkog spoja** (K2) uz minimalno uvrštenje elemenata pripadne mreže. Navedeni koeficijenti osjetljivosti moraju pritom zadovoljavati sljedeće nejednakosti:

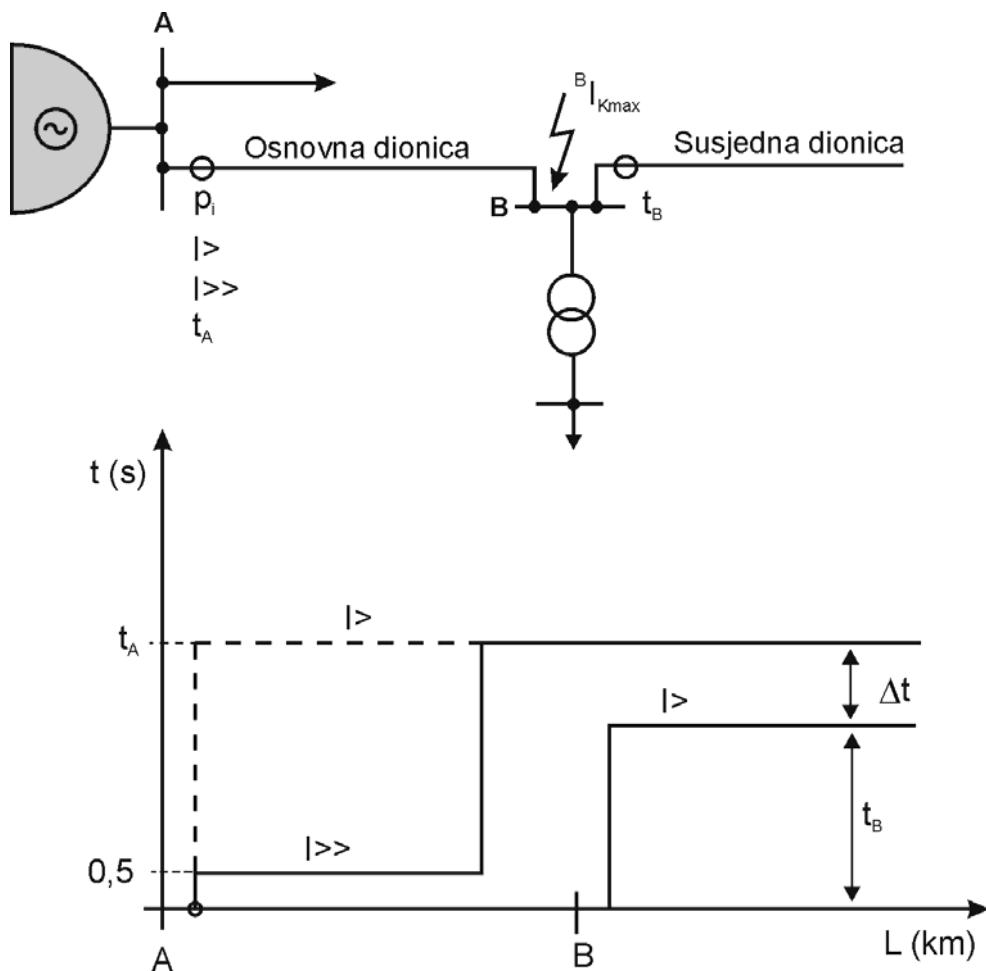
$${}^B k_{os} > 1,5 \quad (3.1-35)$$

$${}^C k_{os} > 1,2 \quad (3.1-36)$$

3.1.4. Određivanje podešenja proradne struje mjernog člana visokopodesive nadstrujne zaštite u odnosu na međufazne kratke spojeve

Visokopodesiva nadstrujna zaštita nosi IEC oznaku $I>>$, odnosno ANSI oznaku 50. Osnovni nedostatak obične (niskopodesive) nadstrujne zaštite (oznaka $I>$) jest dugo vrijeme odgode djelovanja kod kratkih spojeva u blizini izvorne trafostanice (izvora napajanja). Ovo je posljedica vremenskog stupnjevanja nadstrujnih zaštita $I>$ u mreži, koje je nužno zbog uvjeta selektivnosti. Ovaj nedostatak se može umanjiti primjenom visokopodesive ($I>>$) nadstrujne zaštite.

Primjena visokopodesive nadstrujne zaštite je posebice povoljno u slučajevima kada je nadomjesna impedancija pojne mreže znatno manja od impedancije voda štićenog spomenutom visokopodesivom nadstrujnom zaštitom. Radi se dakako o impedancijama direktnog redoslijeda, jer su u pitanju međufazni kratki spojevi. Slika 3.1-12 prikazuje vremensku karakteristiku kombiniranih nadstrujnih zaštita, niskopodesive ($I>$) i visokopodesive ($I>>$) nadstrujne zaštite. S dotične slike je vidljivo da je primjenom visokopodesive nadstruje zaštite skraćeno vrijeme isklapanja kratkih spojeva na dijelu osnovne dionice. Radi se o vrlo kratkom vremenu (npr. 0,1 s ili 0,5 s).



Slika 3.1-12 Vremenska karakteristika kombinirane niskopodeisve i visokopodesive nadstrujne zaštite.

Proradna struja trenutnog člana visokopodesive nadstrujne zaštite ($i_{pr>>}$) određuje se pomoću sljedećeg izraza:

$$i_{pr>>} = \frac{k_s \cdot {}^B I_{K \max}}{p_i} \quad (3.1-37)$$

u kojem su:

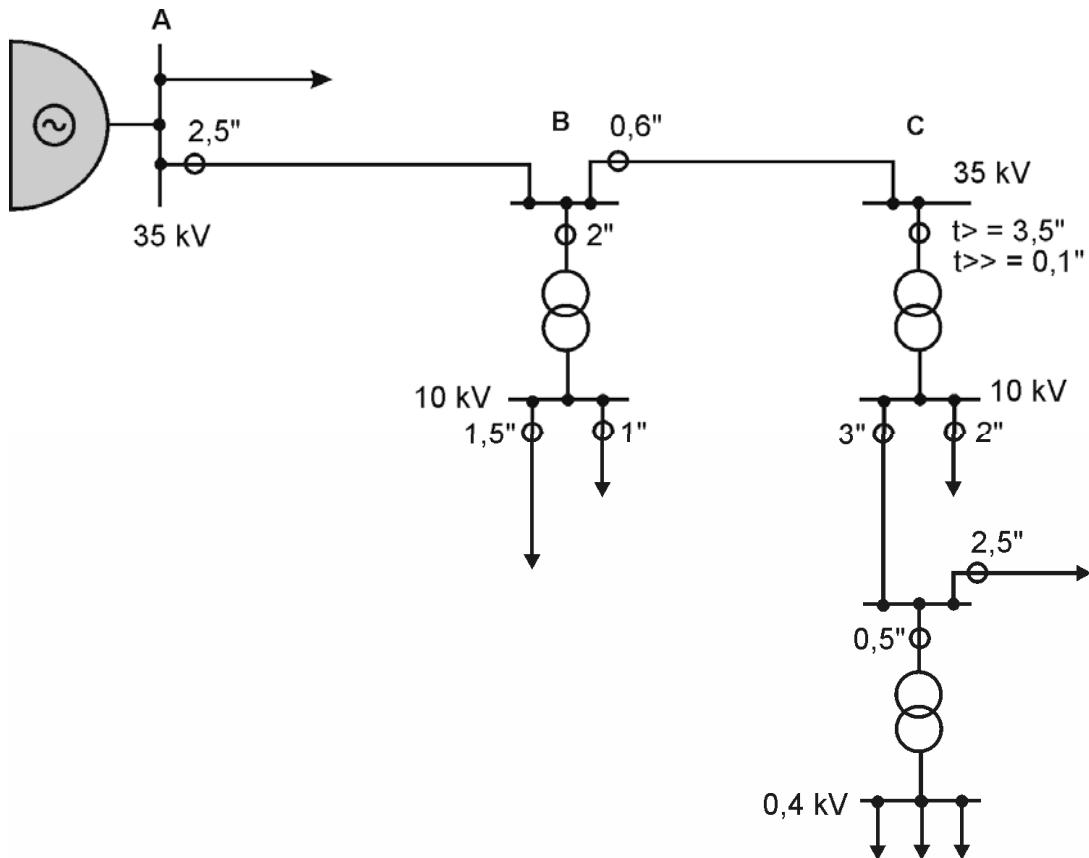
${}^B I_{K \max}$ - maksimalna struja kratkog spoja na kraju osnovne dionice; riječ je o struci **tropolnoga kratkog spoja**, dobivenoj pri maksimalnom uvrštenju elemenata pripadne mreže,

k_s – koeficijent sigurnosti; ovisan je o poznavanju točne vrijednosti struje ${}^B I_{K \max}$; može se primjerice usvojiti vrijednost:

$$k_s = 1,2 \quad (3.1-38)$$

Osim toga, primjenom zaštite $I>>$ na visokonaponskoj (VN) strani energetskog transformatora može se u nekim slučajevima omogućiti nezavisno vremensko stupnjevanje

nadstrujnih zaštita u pripadnim (incidentnim) mrežama s VN i NN strane dotičnog transformatora. Jedan takav primjer prikazan je na slici 3.1-13.



Slika 3.1-13 Primjer nezavisnog vremenskog stupnjevanja nadstrujnih zaštita dijela distributivne mreže.

Primjenom visokopodesive nadstrujne zaštite na 35 kV strani TS 35/10 kV "C" (prema slici 3.1-13) omogućeno je nezavisno vremensko podešenje zaštita u odgovarajućim mrežama 10 kV i 35 kV. Jasno je da pritom nadstrujna zaštita u TS 35/10 kV "B" (prema slici 3.1-13) na vodu "B – C" ne smije djelovati (reagirati) kod kratkih spojeva na sabirnici 10 kV u TS 35/10 kV "C". To treba obavezno provjeriti.

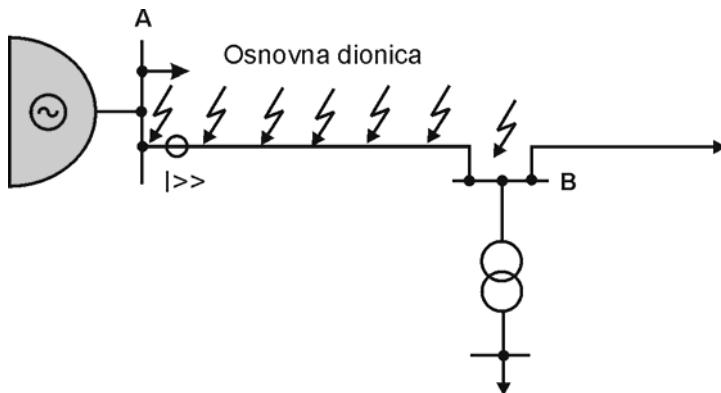
3.1.5. Određivanje maksimalne i minimalne zone štićenja visokopodesive nadstrujne zaštite

Određivanje maksimalne i minimalne zone štićenja visokopodesive nadstrujne zaštite ($I_{>>}$) može se provesti:

- grafičkim postupkom,
- analitičkim postupkom.

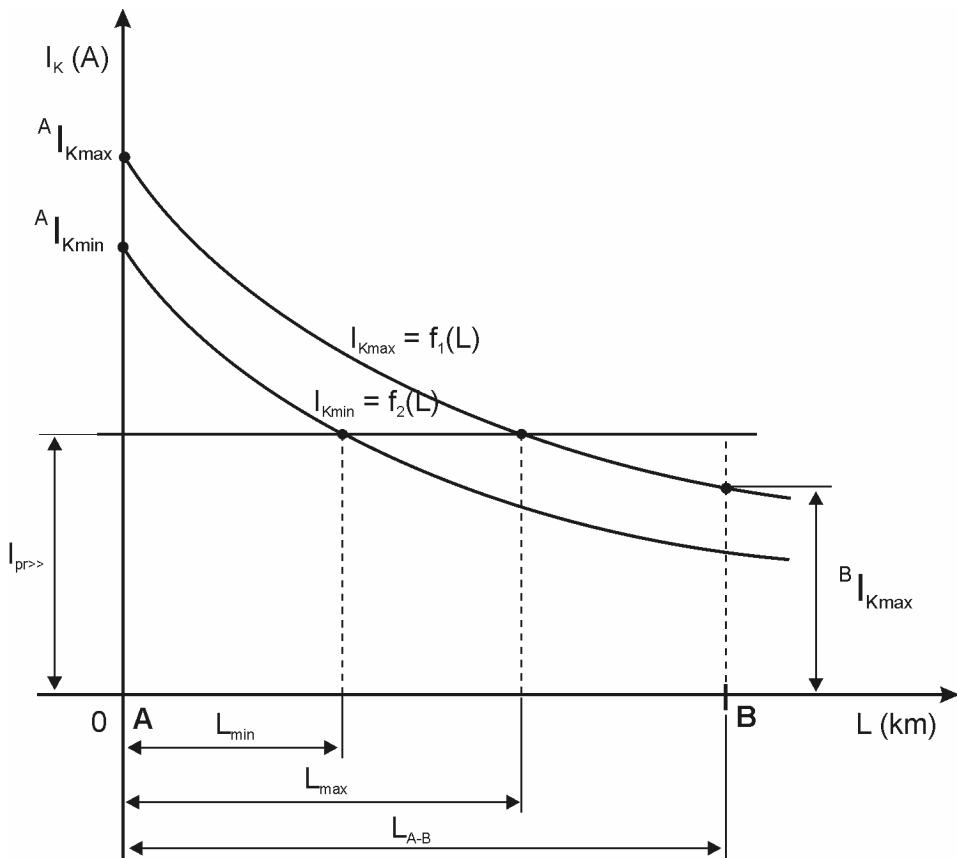
Ad a) Grafički postupak određivanja maksimalne i minimalne zone štićenja visokopodesive nadstrujne zaštite svodi se na crtanje krivulja koje prikazuju raspodjelu maksimalnih i minimalnih struja kratkog spoja duž osnovne dionice. Maksimalne vrijednosti struja (I_{Kmax})

dobiju se proračunom ***tropolnoga kratkog spoja***, uz maksimalno uvrštenje elemenata mreže. Minimalne vrijednosti struja ($I_{K\min}$) dobiju se proračunom ***dvopolnoga kratkog spoja***, uz minimalno uvrštenje elemenata mreže. Pritom se mjesto nastupa kratkog spoja postepeno pomiće duž osnovne dionice štićenja zaštite $I>>$, kao što je to pokazano na slici 3.1-14.



Slika 3.1-14 Ilustracija određivanja maksimalne i minimalne zone štićenja zaštite $I>>$ grafičkim postupkom.

Na slici 3.1-15 prikazan je primjer izgleda spomenutih krivulja ovisnosti maksimalne i minimalne struje kratkog spoja o mjestu njegova nastupa.



Slika 3.1-15 Grafički izgled krivulja maksimalne i minimalne struje kvara duž osnovne dionice.

Dakle, na slici 3.1-15 prikazane su sljedeće funkcije:

$$I_{K \max} = f_1(L)$$

$$I_{K \min} = f_2(L)$$

za $0 \leq L \leq L_{A-B}$, gdje je L_{A-B} – duljina osnovne dionice, km.

Oznake L_{\max} i L_{\min} na slici 3.1-15 predstavljaju respektivno duljinu maksimalne i minimalne zone štićenja visokopodesive nadstrujne zaštite. Veličina $I_{pr>>}$ na slici 3.1-15 predstavlja pak primarnu proradnu vrijednost struje visokopodesive nadstrujne zaštite. Ona je jednaka sljedećem iznosu:

$$I_{pr>>} = i_{pr>>} \cdot p_i \quad (3.1-39)$$

odnosno:

$$I_{pr>>} = k_s \cdot {}^B I_{K \max} \quad (3.1-40)$$

Sjecište krivulje $I_{K \max} = f_1(L)$ s vrijednošću $I_{pr>>}$ (prema slici 2.2-15) određuje duljinu maksimalne zone štićenja L_{\max} . Isto tako, sjecište krivulje $I_{K \min} = f_2(L)$ s vrijednošću $I_{pr>>}$ određuje duljinu minimalne zone štićenja L_{\min} . Spomenute se zone štićenja mogu izraziti i u postocima ukupne duljine osnovne dionice štićenog voda, kako slijedi:

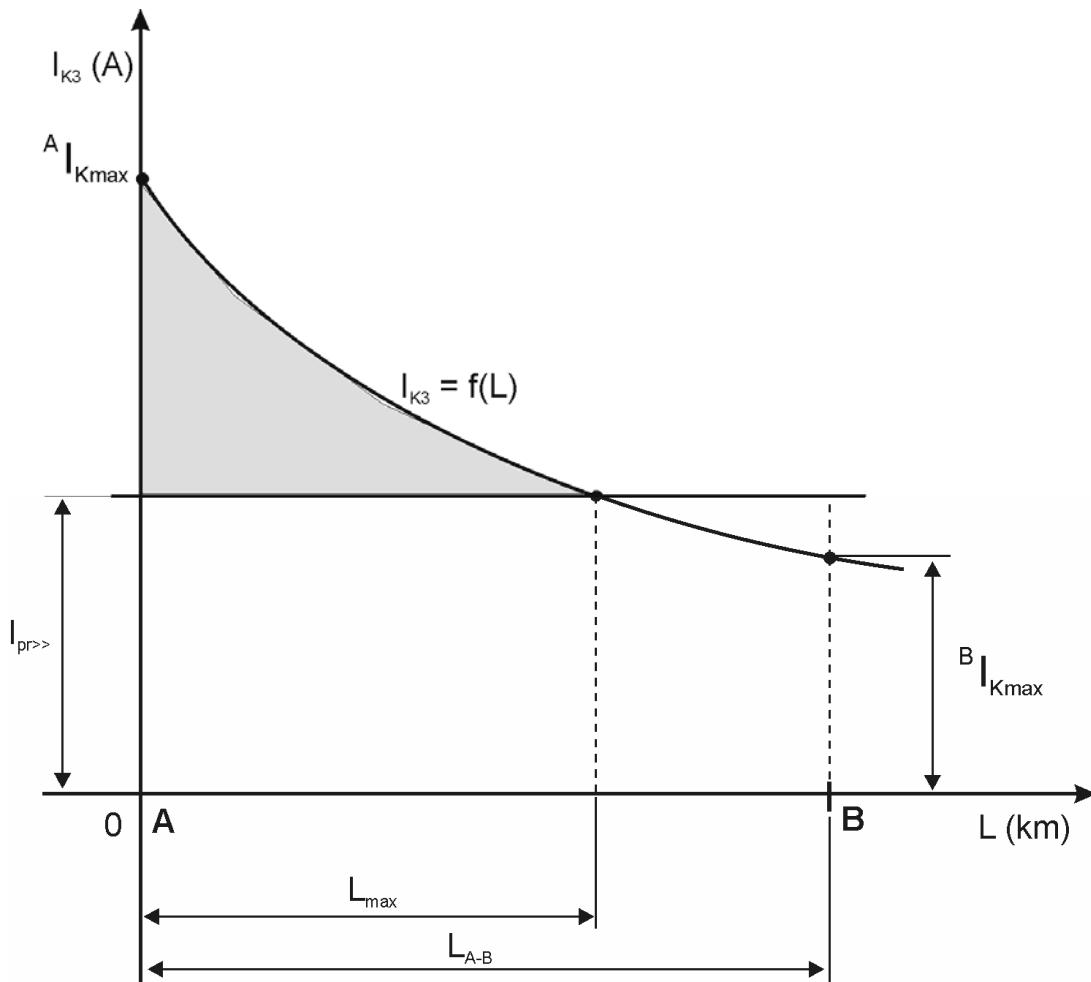
$$\ell_{\max} = \frac{L_{\max}}{L_{A-B}} \cdot 100 \% \quad (3.1-41)$$

$$\ell_{\min} = \frac{L_{\min}}{L_{A-B}} \cdot 100 \% \quad (3.1-42)$$

Zahtjeva se pritom da minimalna duljina zone štićenja (ℓ_{\min}) bude veća ili barem jednaka od 10 – 15 % ukupne duljine štićenog voda, tj.:

$$\ell_{\min} \geq (10 \div 15) \% \quad (3.1-43)$$

Ad b) Za određivanje maksimalne duljine zone štićenja visokopodesive nadstrujne zaštite ($I>>$) potrebno je promatrati nastupe *tropolnoga kratkog spoja* duž osnovne dionice. Slika 3.1-16 grafički ilustrira ovisnost iznosa struje tropolnoga kratkog spoja (K3) o mjestu njenog nastupa duž osnovne dionice štićenog voda.



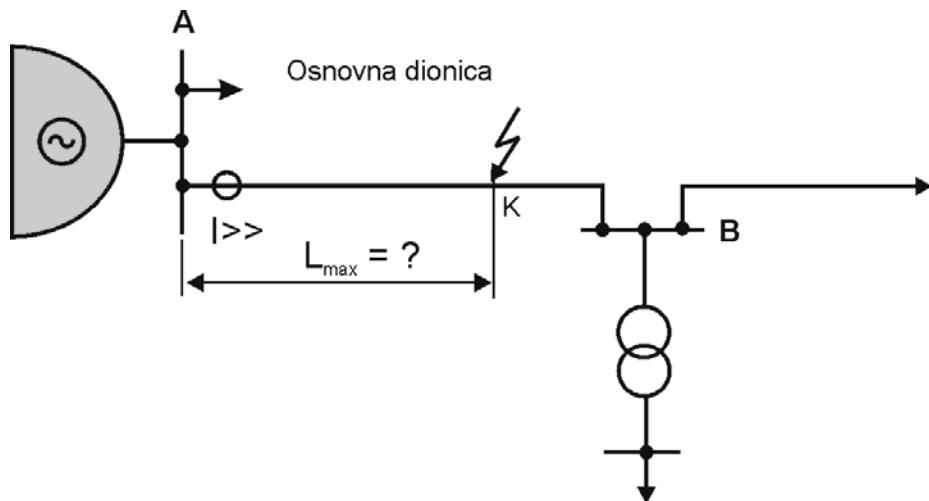
Slika 3.1-16 Grafička ilustracija ovisnosti iznosa struje K3 o mjestu nastupa duž osnovne dionice.

Na slici 3.1-16 označeno je označeno područje gdje je zadovoljena sljedeća relacija:

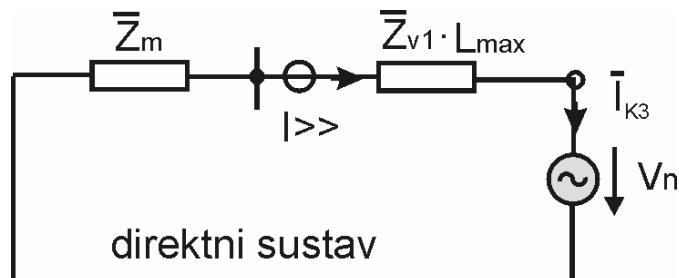
$$I_{K3} \geq I_{pr>>} \quad (3.1-44)$$

U označenom području doći će do djelovanja visokopodesive nadstrujne zaštite. Prikazano sjecište spomenute krivulje ovisnosti struje tropolnoga kratkog spoja $I_{K3} = f(L)$ i vrijednosti proradne struje $I_{pr>>}$ (prema slici 3.1-16) predstavlja, dakle, maksimalnu duljinu štićenja promatrane zaštite $I>>$ (L_{max}). Presjecište opisanih krivulja definira točku K, koja predstavlja mjesto na štićenom vodu do kojeg "doseže" zaštitu $I>>$. Spomenutu duljinu (L_{max}) potrebno je, dakle, odrediti odgovarajućim analitičkim postupkom, koji se prikazuje u nastavku.

Tropolni kratki spoj je simetričan kvar. Kod njega se javlja samo direktni sustav struja i napona. Radi se također i o impedancijama direktnog redoslijeda nadomjesnih elemenata elektroenergetskog sustava. Razmatra se nastup spomenutog tropolnog kratkog spoja na osnovnoj dionici štićenog voda. Grafička ilustracija spomenutog nastupa kratkog spoja prikazana je na slici 3.1-17. Istovremeno je na slici 3.1-18 prikazana nadomjesna shema direktnog sustava za proračun spomenutog tropolnog kratkog spoja.



Slika 3.1-17 Grafička ilustracija nastupa kratkog spoja na osnovnoj dionici štićenog voda.



Slika 3.1-18 Nadomjesna shema direktnog redoslijeda za proračun nastupa troplnoga kratkog spoja na osnovnoj dionici.

Oznake upotrijebljene na slikama 3.1-18 imaju sljedeća značenja:

K – mjesto nastupa tropoljnoga kratkog spoja,

\bar{Z}_m - nadomjesna impedancija direktnog redoslijeda pojne mreže, Ω ,

\bar{Z}_{v1} - jedinična direktna impedancija štićenog voda A – B, Ω ,

V_n – fazni napon tzv. fiktivnog generatora; riječ je o faznom naponu mreže u kojoj je nastupio promatrani kratki spoj, V ; on se određuje pomoću sljedećeg izraza:

$$V_n = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (3.1-45)$$

pri čemu je U_n nazivni napon promatrane mreže,

I_{K3} - struja tropoljnoga kratkog spoja na mjestu K, A; to je ujedno i struja koja protječe kroz mjesto ugradnje zaštite $I>>$.

Iz nadomjesne sheme sa slike 3.1-18 slijedi:

$$I_{K3} = \frac{V_n}{\bar{Z}_m + \bar{Z}_{V1} \cdot L_{max}} \quad (3.1-46)$$

Istovremeno, prema dijagramu prikazanom na slici 3.1-16, za točku K vrijedi:

$$I_{pr>>} = |\bar{I}_{K3}| \quad (3.1-47)$$

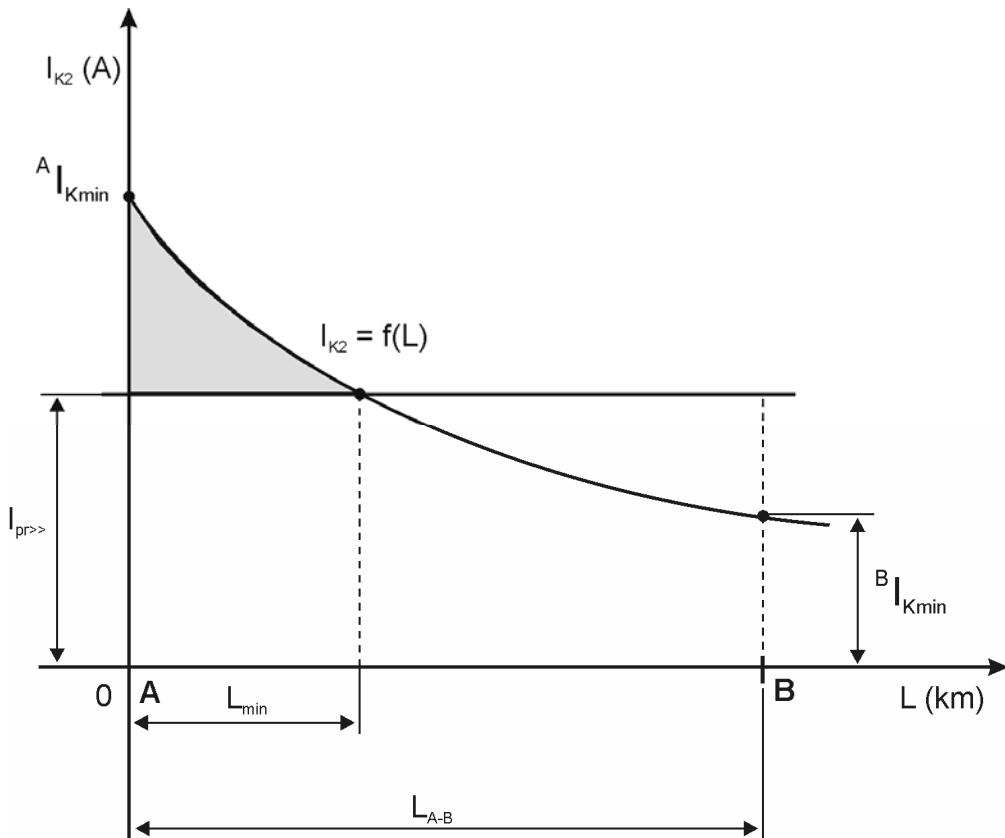
pri čemu oznaka $|\bar{I}_{K3}|$ predstavlja iznos (modul) struje tropolnoga kratkog spoja dane izrazom (3.1-46). Usporedbom izraza (3.1-47) i (3.1-46) slijedi da je:

$$I_{pr>>} = \frac{V_n}{|\bar{Z}_m + \bar{Z}_{V1} \cdot L_{\max}|} \quad (3.1-48)$$

Temeljem izraza (3.1-48), njegovim razriješenjem, moguće je odrediti nepoznatu veličinu L_{\max} jer su sve preostale veličine poznate.

Za određivanje minimalne duljine zone štićenja pomoću visokopodesive nadstrujne zaštite ($I_{>>}$) treba promatrati nastupe ***dvopolnoga kratkog spoja*** duž osnovne dionice. Slika 3.1-19 grafički ilustrira ovisnost iznosa struje dvopolnoga kratkog spoja (K_2) o mjestu njenog nastupa duž osnovne dionice štićenog voda. Isto tako, na slici 3.1-19 osjenčano je označeno područje gdje je zadovoljena sljedeća relacija:

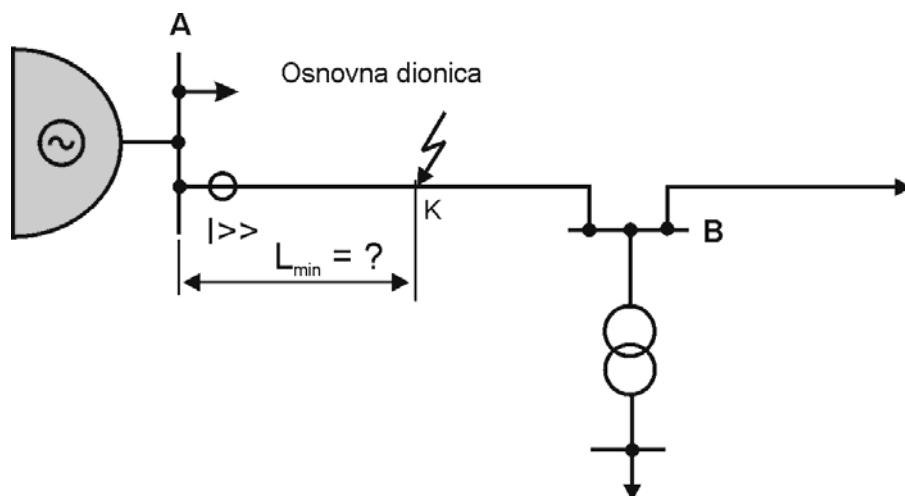
$$I_{K2} \geq I_{pr>>} \quad (3.1-49)$$



Slika 3.1-19 Grafička ilustracija ovisnosti iznosa struje K_2 o mjestu nastupa duž osnovne dionice.

U tom području (osjenčano područje na slici 3.1-19) doći će, dakle, do djelovanja visokopodesive nadstrujne zaštite. Prikazano sjecište spomenute krivulje ovisnosti struje dvopolnoga kratkog spoja i vrijednosti proradne struje $I_{pr>>}$ (prema slici 3.1-19) predstavlja, dakle, minimalnu duljinu štićenja promatrane zaštite $I>>$ (L_{min}). Presjecište opisanih krivulja definira točku K nastupa dvopolnog kratkog spoja na osnovnoj dionici kojoj upravo odgovara minimalna duljina zaštitne zone.

Dvopolni kratki spoj je nesimetričan kvar. Kod njega se razvijaju sustavi struja i napona direktnog i inverznog redoslijeda. Neka je dvopolni kratki spoj nastupio na mjestu K na osnovnoj dionici štićenog voda između faza S i T. Slika 3.1-20 grafički ilustrira nastup spomenutog kratkog spoja na osnovnoj dionici (mjesto K koje je u ovom slučaju bliže izvornoj trafostanici nego li je to bio slučaj na slici 3.1-17).

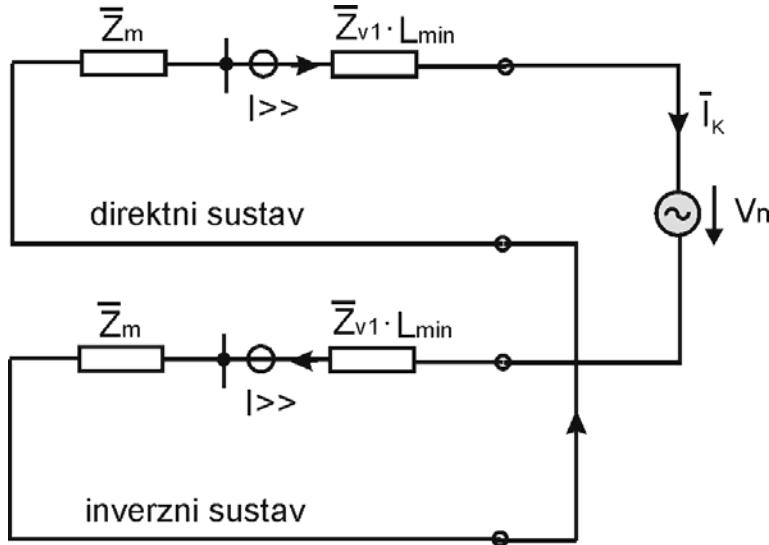


Slika 3.1-20 Grafička ilustracija nastupa kratkog spoja na osnovnoj dionici štićenog voda.

Istovremeno slika 3.1-21 prikazuje odgovarajuću nadomjesnu shemu za proračun dvopolnog kratkog spoja na osnovnoj dionici. Sve veličine na nadomjesnoj shemi već su prethodno objašnjene uz sliku 3.1-18. Valja uočiti da su direktni i inverzni sustavi u ovom slučaju potpuno jednaki. Odgovarajuće impedancije direktnog i inverznog redoslijeda, prikazane na nadomjesnoj shemi sa slike 3.1-21, su međusobno jednake.

Iz nadomjesne sheme na slici 3.1-21 slijedi:

$$\bar{I}_K = \frac{V_n}{2 \cdot (\bar{Z}_m + \bar{Z}_{V1} \cdot L_{min})} \quad (3.1-50)$$



Slika 3.1-21 Nadomjesna shema za proračun nastupa dvopolnoga kratkog spoja na osnovnoj dionici.

Budući da je riječ o nesimetričnom kvaru, struje u faznim vodičima nisu međusobno jednake, pa se koristi sljedeća matrična jednadžba (simetrične komponente):

$$\begin{Bmatrix} {}^R I_{A-K} \\ {}^S I_{A-K} \\ {}^T I_{A-K} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} {}^0 I_{A-K} \\ {}^d I_{A-K} \\ {}^i I_{A-K} \end{Bmatrix} \quad (3.1-51)$$

pri čemu je a – kompleksni operator, koji ima vrijednost:

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Iz nadomjesne sheme na slici 3.1-21 također slijedi:

$${}^0 I_{A-K} = 0 \quad (3.1-52)$$

$${}^d I_{A-K} = \bar{I}_K \quad (3.1-53)$$

$${}^i I_{A-K} = -\bar{I}_K \quad (3.1-54)$$

Uvrštenjem (3.1-52), (3.1-53) i (3.1-54) u matričnu jednadžbu (3.1-51) slijedi:

$$\begin{Bmatrix} {}^R I_{A-K} \\ {}^S I_{A-K} \\ {}^T I_{A-K} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 0 \\ \bar{I}_K \\ -\bar{I}_K \end{Bmatrix} \quad (2.2-55)$$

Iz dotične matrične jednadžbe dobiva se:

$${}^R\bar{I}_{A-K} = \bar{I}_K - \bar{I}_K = 0 \quad (3.1-56)$$

$${}^S\bar{I}_{A-K} = a^2 \cdot \bar{I}_K - a \cdot \bar{I}_K = \bar{I}_K \cdot (a^2 - a) \quad (3.1-57)$$

$${}^T\bar{I}_{A-K} = a \cdot \bar{I}_K - a^2 \cdot \bar{I}_K = \bar{I}_K \cdot (a - a^2) \quad (3.1-58)$$

Valja naglasiti da među strujama kvara u fazi S i T postoji sljedeća veza:

$${}^T\bar{I}_{A-K} = -{}^S\bar{I}_{A-K}$$

Budući da vrijedi da je $a - a^2 = j\sqrt{3}$, relacija (3.1-58) prelazi u sljedeći oblik:

$${}^T\bar{I}_{A-K} = j\sqrt{3} \cdot \bar{I}_K = j \frac{\sqrt{3} \cdot V_n}{2 \cdot (\bar{Z}_m + \bar{Z}_{V1} \cdot L_{\min})} \quad (3.1-59)$$

Prema dijagramu prikazanom na slici 3.1-20, za točku K vrijedi da je:

$$I_{pr>>} = \left| {}^T\bar{I}_{A-K} \right| \quad (3.1-60)$$

Stoga se kombiniranjem izraza (3.1-60) i (3.1-59) dobiva sljedeća relacija:

$$I_{pr>>} = \left| j \frac{\sqrt{3} \cdot V_n}{2 \cdot (\bar{Z}_m + \bar{Z}_{V1} \cdot L_{\min})} \right| \quad (3.1-61)$$

odnosno:

$$I_{pr>>} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_n}{2 \cdot |\bar{Z}_m + \bar{Z}_{V1} \cdot L_{\min}|} \quad (3.1-62)$$

Temeljem izraza (3.1-62), njegovim razriješenjem, moguće je odrediti nepoznatu veličinu L_{\min} jer su sve preostale veličine poznate.

Digresija:

Odredimo odnos između struje dvoljnoga i trojnjoga kratkog spoja na štićenom vodu, uz jednaku izdašnost pojne mreže. Struja dvoljnoga kratkog spoja dana je sljedećom relacijom:

$$\bar{I}_{K2} = {}^T\bar{I}_{A-K} = j \frac{\sqrt{3} \cdot V_n}{2 \cdot \bar{Z}_d}$$

pri čemu je \bar{Z}_d ukupna (ekvivalentna) nadomjesna impedancija direktnog redoslijeda razmatranog sustava i jednaka je sljedećem izrazu:

$$\bar{Z}_d = \bar{Z}_m + \bar{Z}_{\nu l} \cdot L$$

Struja tropolnoga kratkog spoja dana je pak sljedećim izrazom:

$$\bar{I}_{K3} = \frac{V_n}{\bar{Z}_d}$$

Omjer između iznosa (amplituda) struje dvopolnoga i tropolnoga kratkog spoja glasi:

$$\frac{I_{K2}}{I_{K3}} = \frac{|\bar{I}_{K2}|}{|\bar{I}_{K3}|} = \left| \frac{j \frac{\sqrt{3} \cdot V_n}{2 \cdot \bar{Z}_d}}{\frac{V_n}{\bar{Z}_d}} \right| = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

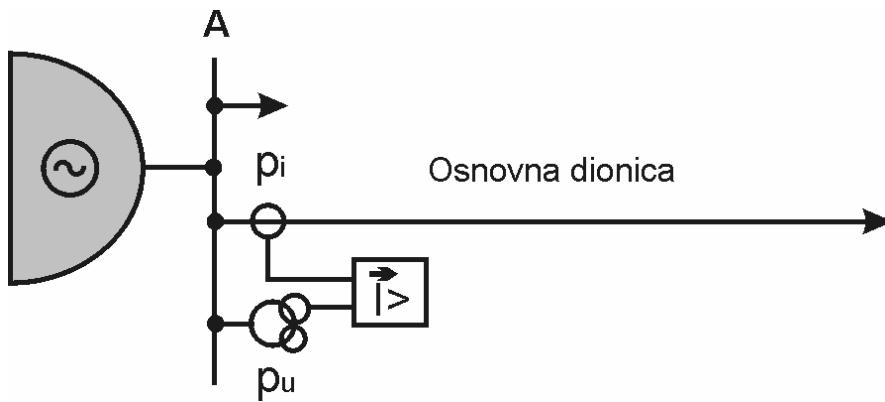
Dakle, vrijdi da je:

$$I_{K2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K3} = 0.866 \cdot I_{K3}$$

Drugim riječima, struja (iznos / amplituda) dvopolnog kratkog spoja iznosi 86,6% vrijednosti struje odgovarajućeg tropolnog kratkog spoja. Obje struje su dobivene uz uvrštenje istog broja elemenata i istu izdašnost pojne mreže. Dakle, dvopolni kratki spoj u mreži praćen je manjom strujom od odgovarajućeg tropolnog kratkog spoja.

3.1.6. Usmjerena niskopodesiva nadstrujna zaštita u odnosu na međufazne kratke spojeve

Usmjerena niskopodesiva nadstrujna zaštita u odnosu na međufazne kratke spojeve (K2 i K3) nosi IEC oznaku $\vec{I} >$, odnosno, ANSI oznaku 67. Ova nadstrujna zaštita pored mjernog i vremenskog člana posjeduje još i usmjerni član. Usmjerni član se priključuje preko strujnih i naponskih transformatora. On stoga prima informacije o strujama i naponima na mjestu svoje ugradnje. Primjer priključka usmjerene nadstrujne zaštite prikazan je na slici 3.1-22.



Slika 3.1-22 Način priključka usmjerenje nadstrujne zaštite.

Na temelju dotičnih napona i struja usmjerni član prepozna smjer snage na mjestu ugradnje releja. To prepoznavanje smjera snage usmjerni član vrši stalno, pa i u uvjetima nastupa kratkog spoja. Ukoliko je tok snage kratkog spoja sumjeren od sabirnica prema vodu usmjerni član dopušta djelovati proradnom članu zaštita $I >$. U protivnom, ukoliko je smjer snage kratkog spoja orijentiran iz pravca voda k sabirnici, usmjerni član blokira djelovanje proradnog člana zaštita $I >$.

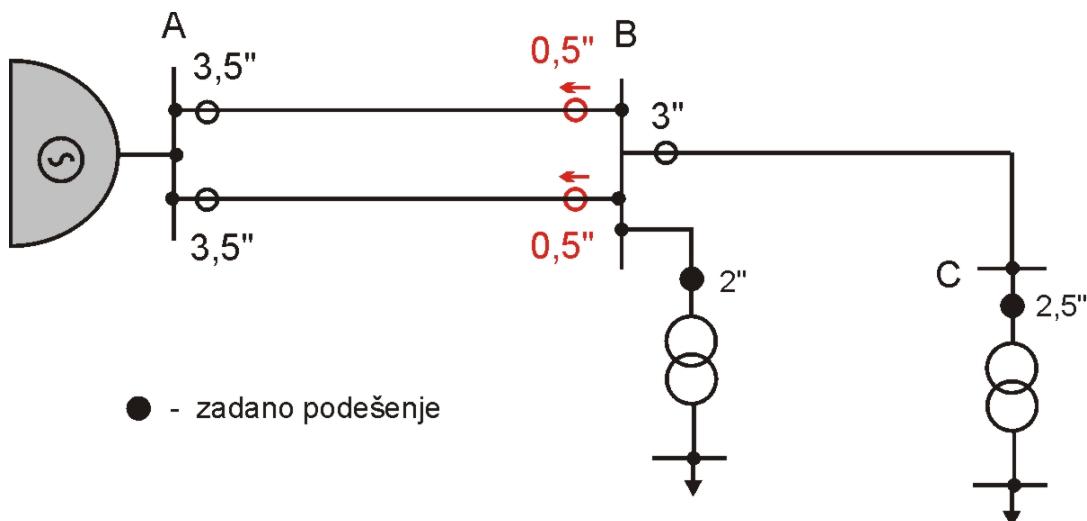
Proračun podešenja mjernog člana (proradne struje) usmjerenе niskopodesive nadstrujne zaštite u odnosu na međufazne kratke spojeve provodi se na isti način kao i kod obične niskopodesive nadstrujne zaštite ($I >$). Međutim, podešenje vremenskog člana ove zaštite ($\bar{I} >$) jest problematičnije te će se prikazati u nastavku. Usmjerni član pritom ima ulogu blokirajući prorade zaštite ovisno o smjeru snage kratkog spoja.

Usmjereni nadstrujni zaštitni element ($\bar{I} >$) se koristi u slučajevima:

- mreže s paralelnim vodovima,
- prstenasto napajane mreže,
- dvostrano napajanog voda.

Naime, u dotičnim slučajevima nije moguće ostvariti selektivnu zaštitu pomoću običnih nadstrujnih releja, jer je mjesto kratkog spoja napajano s dvije strane. Ova zaštitna ($\bar{I} >$) se redovito kombinira s prije spomenutom nadstrujnom zaštitom ($I >$ i $I >>$) da bi se dobilo učinkovito štićenje distributivne mreže.

Ad a) Do primjene paralelnih vodova dolazi u slučajevima kada uslijed porasta opterećenja konzuma jedan vod nije više u stanju penjeti naraslo opterećenje. Tada se gradi drugi vod. Tako nastaju npr. dva ili više paralelnih vodova. Način određivanja vremenskih podešenja zaštite $\bar{I} >$ u slučaju paralelnih vodova prikazan je na slici 3.1-23. Riječ je o konkretnom primjeru u kojem postoji dva paralela voda. Kao što se vidi sa slike 3.1-23, zaštitna $\bar{I} >$ se kombinira s prije spomenutom niskopodesivom nadstrujnom zaštitom $I >$ (kao i sa zaštitom $I >>$) u funkciji ostvarenja učinkovitog sustava relejne zaštite distributivne mreže.

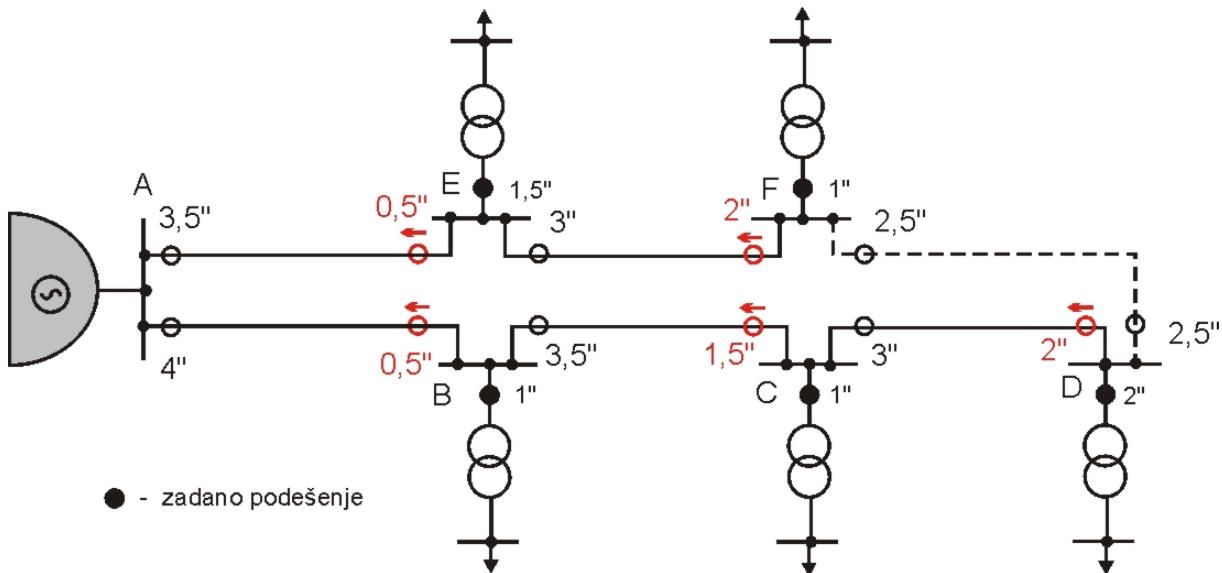


Slika 3.1-23 Primjer štićenja paralelnih vodova niskopodesivom usmjerrenom nadstrujnom zaštitom od međufaznih kratkih spojeva.

Punim križićem na slici 3.1-23 označena su prethodno zadana (postojeća) vremenska podešenja nadstrujnih zaštita $I>$. Kod kratkih spojeva na vodu B-C prema slici 3.1-23, usmjerena nadstrujna zaštitna na paralelnim vodovima A-B je blokirana, jer joj je tok snage kratkog spoja od voda prema sabirnicama (dolazi iz smjera voda). Kod kratkih spojeva na jednom od paralelnih vodova A-B odabrana reljefna zaštitna isključit će upravo onaj vod na kojem je nastupio kratki spoj. Naime, u tom slučaju, usmjerena nadstrujna zaštitna koja se nalazi na vodu u kvaru vidi smjer struje (snage) kratkog spoja od sabirnica prema vodu i dopušta djelovanje. To je sasvim u redu.

Valja naglasiti da određivanje vremenskog podešenja niskopodesive usmjerene nadstrujne zaštite nije moguće provesti odvojeno od razmatranja obične niskopodesive nadstrujne zaštite ($I>$). Jedna i druga zaštitna djeluju usklađeno u svrhu ostvarenja učinkovite nadstrujne zaštite od međufaznih kratkih spojeva.

Ad b) Distributivne mreže su obično radikalne mreže, napajane samo s jedne strane. Stoga ovaj tip mreže (prstenasto napajana) može nastupiti u izvanrednim situacijama. Naime, da bi se povećala raspoloživost izgrađene distributivne mreže često se između krajnjih podstanica susjednih odvoda postavlja dodatni vod, kojim se u određenim situacijama mogu povezati spomenuti odvodi. Tako nastaje prstenasto napajana mreža. Ova situacija prikazana je na slici 3.1-24 za jedan konkretni primjer prstenasto napajane mreže. Crtkano je na dotičnoj slici prikazan vod čijim se uključenjem ostvaruje spomenuti prsten. Valja naglasiti da se dvostrano napajanje, koje se ostvara zatvaranjem prstena, tretira najčešće kao izvanredni pogon. No, svejedno, i za takvo izvanredno pogonsko stanje treba osigurati selektivnost primijenjene reljefne zaštite.



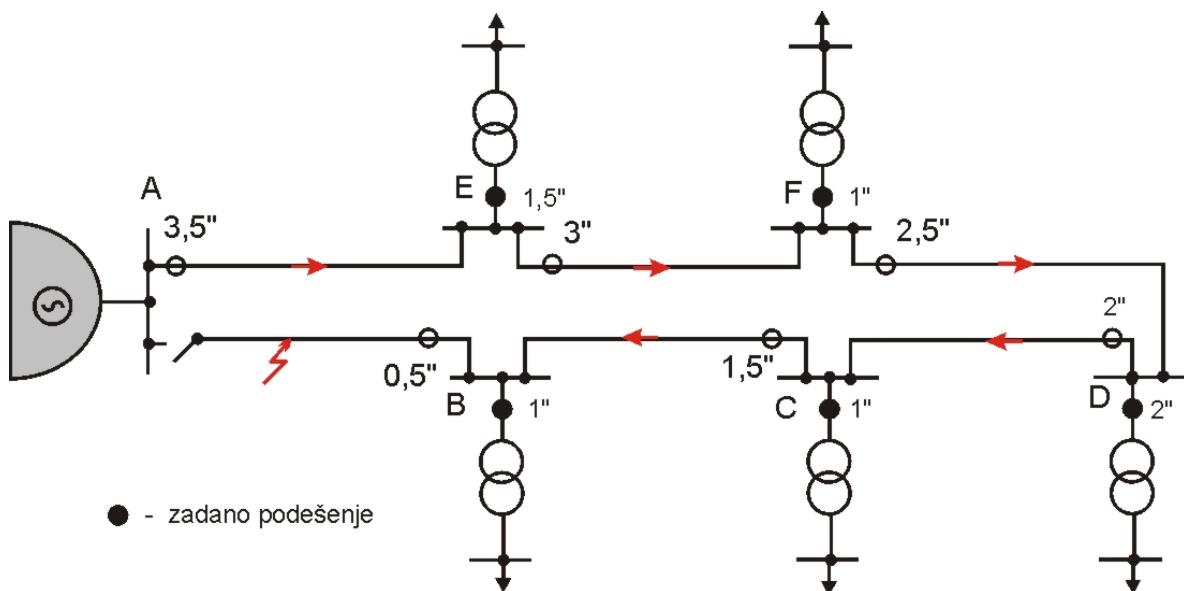
Slika 3.1-24 Određivanje vremenskih podešenja nadstrujnih zaštita u prstenasto napajanoj mreži.

Punim križićem na slici 3.1-24 označena su prethodno zadana (postojeća) vremenska podešenja nadstrujnih zaštita $I>$. Kod prstenasto napajane mreže, kao i u slučaju paralelnih vodova, kratki spoj je napajan sa dvije strane. Stoga je potrebno primijeniti na svakom vodu po dva nadstrujna releja, pri čemu jedan od njih treba biti u pravilu s usmjernim članom. Dakle, kao što je već spomenuto, i u ovom slučaju kombinira se obična nadstrujna zaštita ($I>$) s usmjerrenom nadstrujnom zaštitom ($\bar{I}>$), a u svrhu ostvarenja učinkovite relejne zaštite prstenasto napajane mreže.

Određivanje vremenskih podešenja navedenih nadstrujnih zaštita $I>$ provodi se otvaranjem prstena (prema slici 3.1-24) dva puta u postrojenju A:

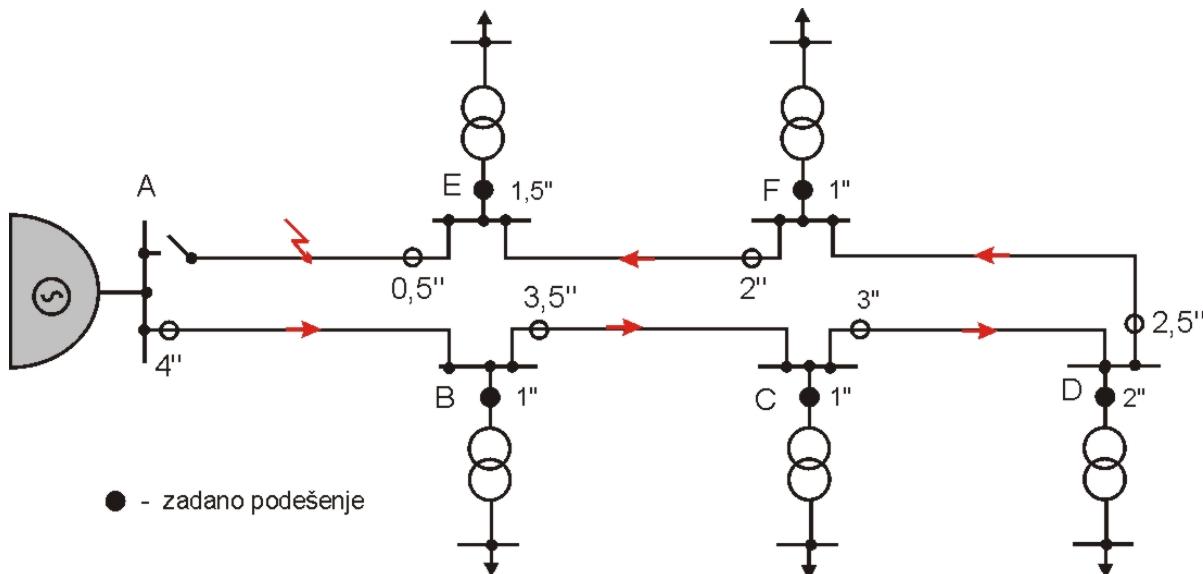
- jednom na vodu A-B,
- drugi put na vodu A-E.

Otvaranjem prstena u stanici A na vodu A-B dobiva se radijalni vod prikazan na slici 3.1-25. Dobiveni radijalni vod je sada napajan samo s jedne strane, pa je vremenska podešenja zaštita $I>$ jednostavno odabrati kako je to prije objašnjeno u podpoglavlju 3.1.1. Odabir vremenskih podešenja zaštita $I>$ prikazan je dakle na slici 3.1-25. Usvojen je selektivni vremenski interval od 0,5 s.



Slika 3.1-25 Otvaranje prstena u stanici A na vodu A-B.

Otvaranjem sada prstena u stanici A na vodu A-E dobiva se ponovno radijalni vod, prikazan na slici 3.1-26. Postavljanje niskopodesivih nadstrujnih releja I₁ i njihovo vremensko stupnjevanje (podešavanje) provodi se ponovno po pravilima radijalnog voda (vidjeti podpoglavlje 3.1.1). Odabir vremenskih podešenja dotičnih zaštita I₁ također je prikazan na slici 3.1-26. Usvojen je ponovno selektivni vremenski interval od 0,5 s.

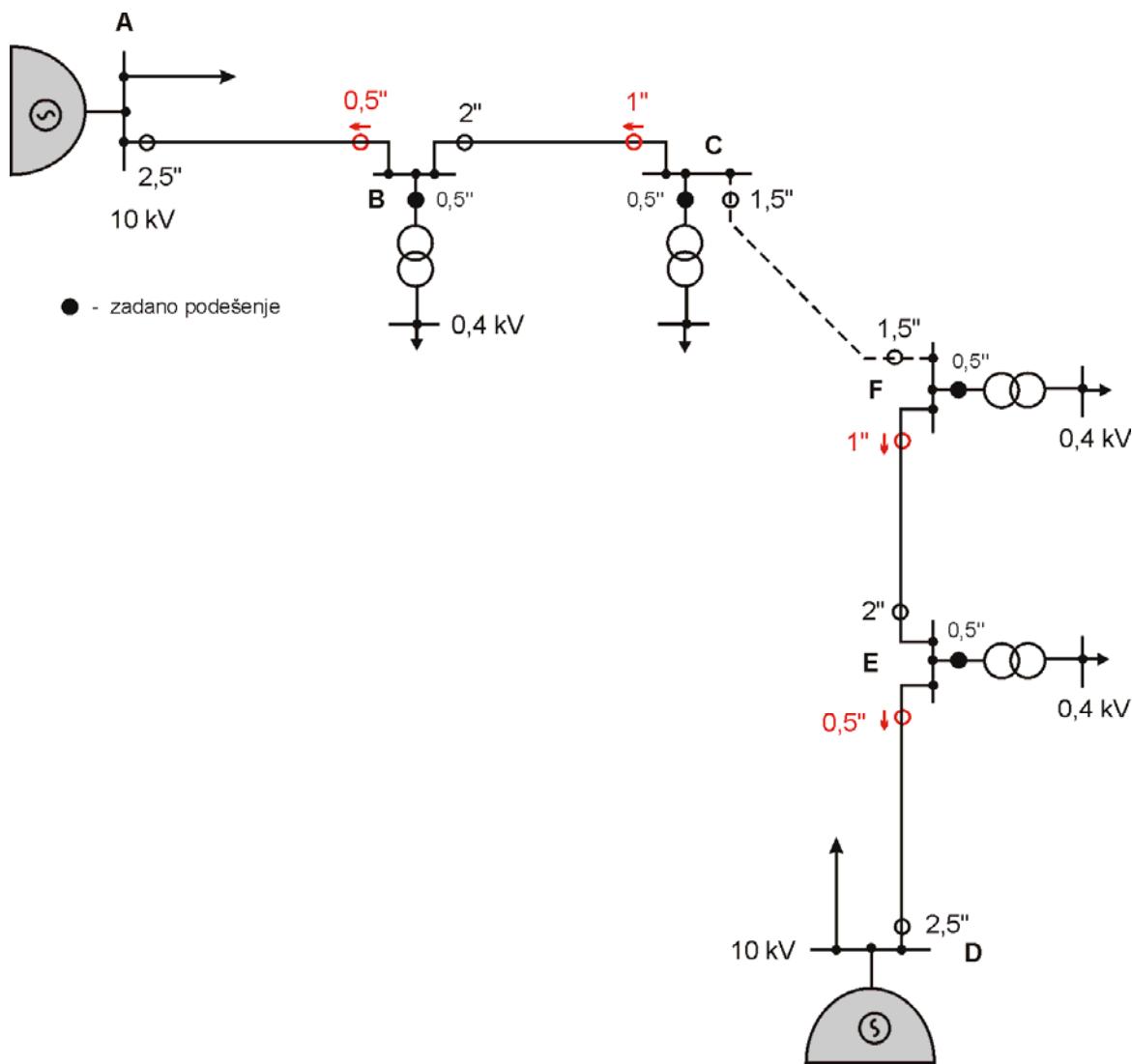


Slika 3.1-26 Otvaranje prstena u stanici A na vodu A-E.

Konačno se na kraju odabire koji će od dva nadstrujna releja na svakom od vodova biti običan a koji će imati usmjerni član. U konkretnom primjeru pokazuje se da na vodu D-F oba nadstrujna člana mogu biti obična (jer im je vrijeme odgode djelovanja isto). Na preostalim vodovima onaj nadstrujni član koji ima kraće vrijeme odgode djelovanja mora biti usmjeren (zaštita $I >$), s usmjerenjem od sabirnica prema vodu. Dakle, u slučaju kvara na nekom od

vodova, ukoliko je smjer snage od sabirnica prema vodu, usmjerni nadstrujni relej ($I >$) će djelovati. U protivnom, usmjereni releji kojima je smjer snage od voda prema sabirnicama blokirat će djelovanje.

Ad c) Kao i u prijašnjem slučaju, ovaj tip voda (dvostrano napajani vod) nastaje u određenim izvanrednim okolnostima. On nastaje primjerice u slučaju spajanja dvaju vodova koji izlaze iz različitih trafostanica. Primjer ovakvog voda prikazan je na slici 3.1-27. I ovdje valja naglasiti da se dvostrano napajanje, koje se ostvaruje uključenjem spomenutog voda, tretira najčešće kao izvanredni pogon



Slika 3.1-27 Primjer štićenja dvostrano napajanog voda.

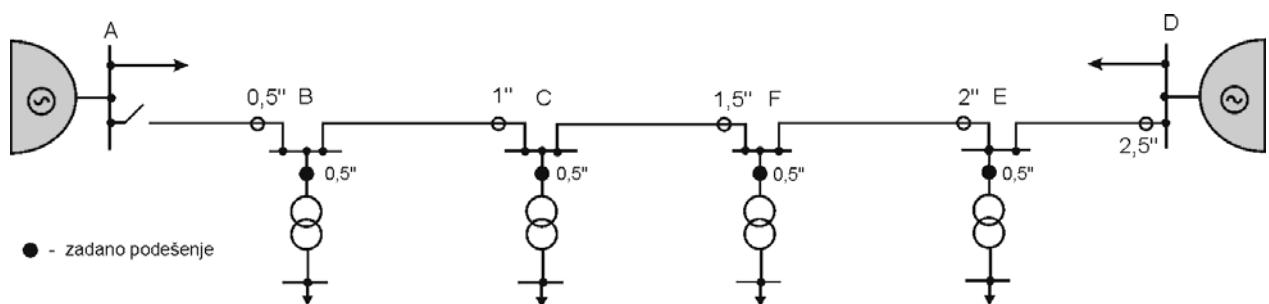
Punim križićem na slici 3.1-27 označena su prethodno zadana (postojeća) vremenska podešenja nadstrujnih zaštita $I >$. Uključenjem voda C-F na slici 3.1-27 (iscrtkano prikazan vod) nastaje dvostrano napajani vod A-D. U tom slučaju mjesto kratkog spoja na bilo kojoj dionici napajano je s oba kraja. Potrebno je stoga na oba kraja spomenutih dionica postaviti nadstrujnu zaštitu s usmjernim članom. Kao i u prijašnjim slučajevima i ovdje se kombinira

nadstrujna zaštita ($I>$) s usmjerenom nadstrujnom zaštitom ($\bar{I}>$) da bi se ostvario učinkovit sustav relejne zaštite.

Vremenska podešenja navedenih zaštita $I>$ odredit će se otvaranjem spomenutog dvostruko napajanog voda dva puta:

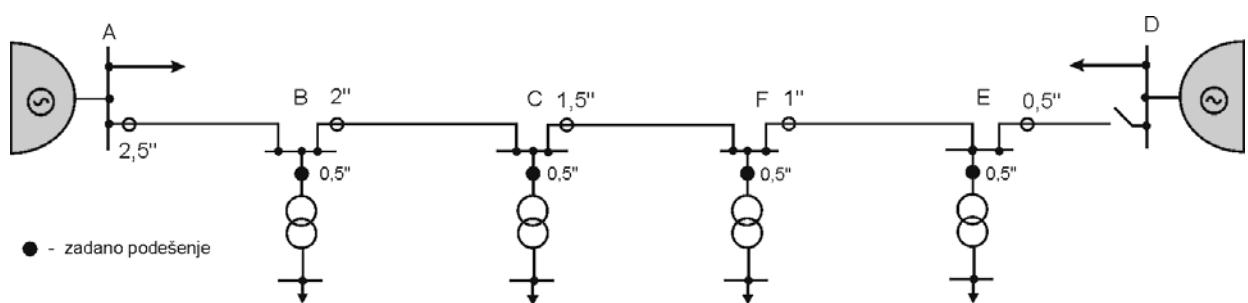
- jednom u postrojenju A,
- drugi put u postrojenju D.

Otvaranjem dvostrano napajanog voda u postrojenju A dobiva se radijalni vod, koji je napajan samo iz TS 35/10 kV "D". Prikaz dotičnog voda s potrebnim nadstrujnim zaštitama ($I>$) i njihovim vremenskim podešenjima dan je na slici 3.1-28. Vremensko stupnjevanje nadstrujnih zaštita provedeno je, dakle, prema pravilima radijalnog voda (vidjeti podpoglavlje 3.1.1). Usvojen je selektivni vremenski interval od 0,5 s.



Slika 3.1-28 Vremensko stupnjevanje nadstrujnih zaštita radijalnog voda, dobivenog otvaranjem dvostrano napajanog voda u postrojenju A.

Otvaranjem dotičnog voda u postrojenju D dobiva se također radijalni vod, koji je napajan sada iz TS 35/10 kV "A". Prikaz dotičnog voda s potrebnim nadstrujnim zaštitama ($I>$) i njihovim vremenskim podešenjima dan je na slici 3.1-29. Vremensko stupnjevanje je ponovno provedeno prema pravilima radijalnog voda (vidjeti podpoglavlje 3.1.1). Usvojen je isti selektivni vremenski interval (0,5 s).



Slika 3.1-29 Vremensko stupnjevanje nadstrujnih zaštita radijalnog voda, dobivenog otvaranjem dvostrano napajanog voda u postrojenju D.

Na kraju se odabire koja će od dvije nadstrujne zaštite na svakoj dionici dvostrano napajanog voda biti usmjerena. To se radi na način da se za određenu dionicu usvoji nastup kratkog spoja, pri čemu mora taj kratki spoj isključiti nadstrujna zaštita upravo te dionice (selektivno). Temeljem ovog kriterija odabrane su usmjerene nadstrujne zaštite kako su prikazane na slici

3.1-27. Naime, ona nadstrujna zaštita voda koja ima kraće vrijeme djelovanja u principu mora biti usmjerena. Usmjerenje je od sabirnica prema vodu.

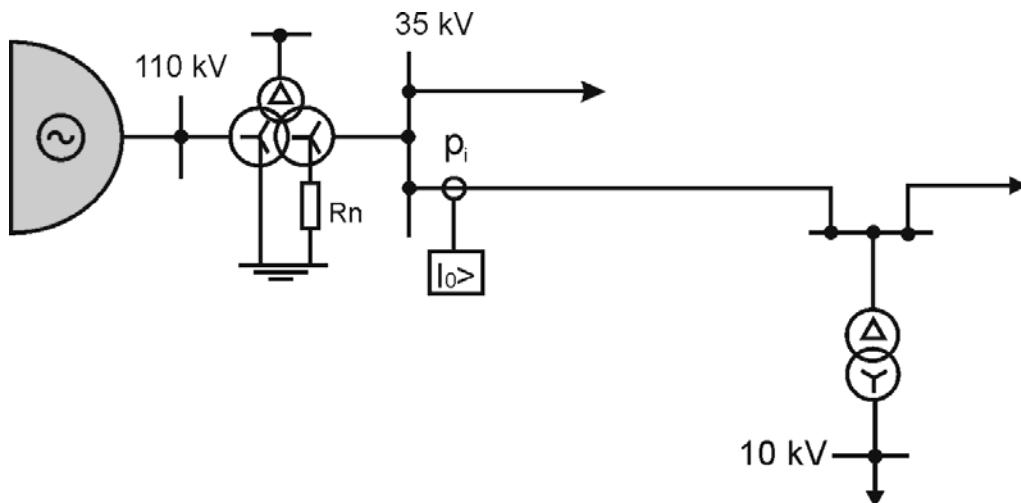
3.2. Zaštita u odnosu na kvarove sa zemljom

Zaštita distributivne mreže u odnosu na kvarove (kratke spojeve) sa zemljom nosi IEC oznaku $I_0>$, odnosno ANSI oznaku 51N. Mogući kratki spojevi sa zemljom jesu:

- jednopolni kratki spoj (JKS),
- dvopolni kratki spoj s istovremenim spojem sa zemljom (DKSZ).

Jednopolni kratki spoj je najčešći kvar u mreži. To pokazuju odgovarajući statistički podaci. Jednopolni kratki spoj (JKS) i dvopolni kratki spoj s istovremenim spojem sa zemljom (DKSZ) se javljaju u mreži s uzemljenim zvjezdišta energetskih transformatora.

U distributivnoj mreži zvjezdišta energetskih transformatora su izolirana ili pak uzemljena preko malog djelatnog otpornika R_n u izvornoj trafostanici. Otpornik R_n služi za ograničenje struje jednopolnoga kratkog spoja na određenu vrijednost, primjerice 150 A ili 300 A. Primjer uzemljenja distributivne mreže 35 kV preko malog djelatnog otpornika u izvornoj trafostanici prikazan je na slici 3.2-1. Osim toga, na slici 3.2-1 prikazan je i način priključka homopolarne nadstrujne zaštite.



Slika 3.2-1 Primjer uzemljenja distributivne mreže 35 kV preko malog djelatnog otpornika u izvornoj trafostanici.

U mreži s izoliranim zvjezdišta energetskih transformatora spoj jednog faznog vodiča sa zemljom predstavlja zemljospoj, a ne jednopolni kratki spoj.

Ovisno o spomenutom načinu tretmana zvjezdišta energetskih transformatora u distributivnoj mreži koristiti će se različite reljene zaštite. U uzemljenim mrežama riječ je o tzv. homopolarnim nadstrujnim zaštitama, dok je u izoliranim mrežama riječ o zemljospojnim zaštitama.

3.2.1. Homopolarna nadstrujna zaštita

U distributivnim mrežama u kojima su struje jednopolnoga kratkog spoja (300 A ili 150 A) dovoljno veće od maksimalne pogonske struje (I_{pogmax}) kao zaštita od struja jednopolnoga kratkog spoja može se koristiti niskopodesiva nadstrujna zaštita ($I_>$) u odnosu na međufazne kratke spojeve. Međutim, čest je slučaj u distributivnoj mreži da su maksimalne pogonske struje veće od struja jednopolnoga kratkog spoja (150 A ili 300 A). Tada nadstrujna zaštita $I_>$ u odnosu na međufazne kratke spojeve neće djelovati u slučaju nastupa JKS-a. To nije u redu. Osim toga, u mrežama koje se prostiru na kraškim područjima mogući su pri nastupu jednopolnoga kratkog spoja veliki prijelazni otpori R_p (npr. veliki otpori uzemljenja uzemljivača dalekovodnih stupova). Pritom se znatno namjene struja JKS-a i na znatno manje vrijednosti od navedenih 140 A ili 300 A (potonje vrijednosti odnose se na nastup metalnog jednopolnog kratkog spoja bez prijelaznog otpora na mjestu kvara).

Usljed svega prethodno iznesenog, u potonjim slučajevima primjenjuje se stoga dodatna nadstrujna zaštita u odnosu na kratke spojeve sa zemljom, tzv. homopolarna niskopodesiva nadstrujna zaštita. Ona se temelji na pojavi nultog sustava struja, koji se razvijaju u slučaju nastupa spomenutih vrsta kratkih spojeva sa zemljom. Ova nadstrujna zaštita se prema IEC označava s oznakom $I_0>$ a prema ANSI s oznakom 51N.

Način dobivanja nultog sustava struja različit je kod zračnih vodova (dalekovodi) i kabelskih vodova. Stoga se razlikuje:

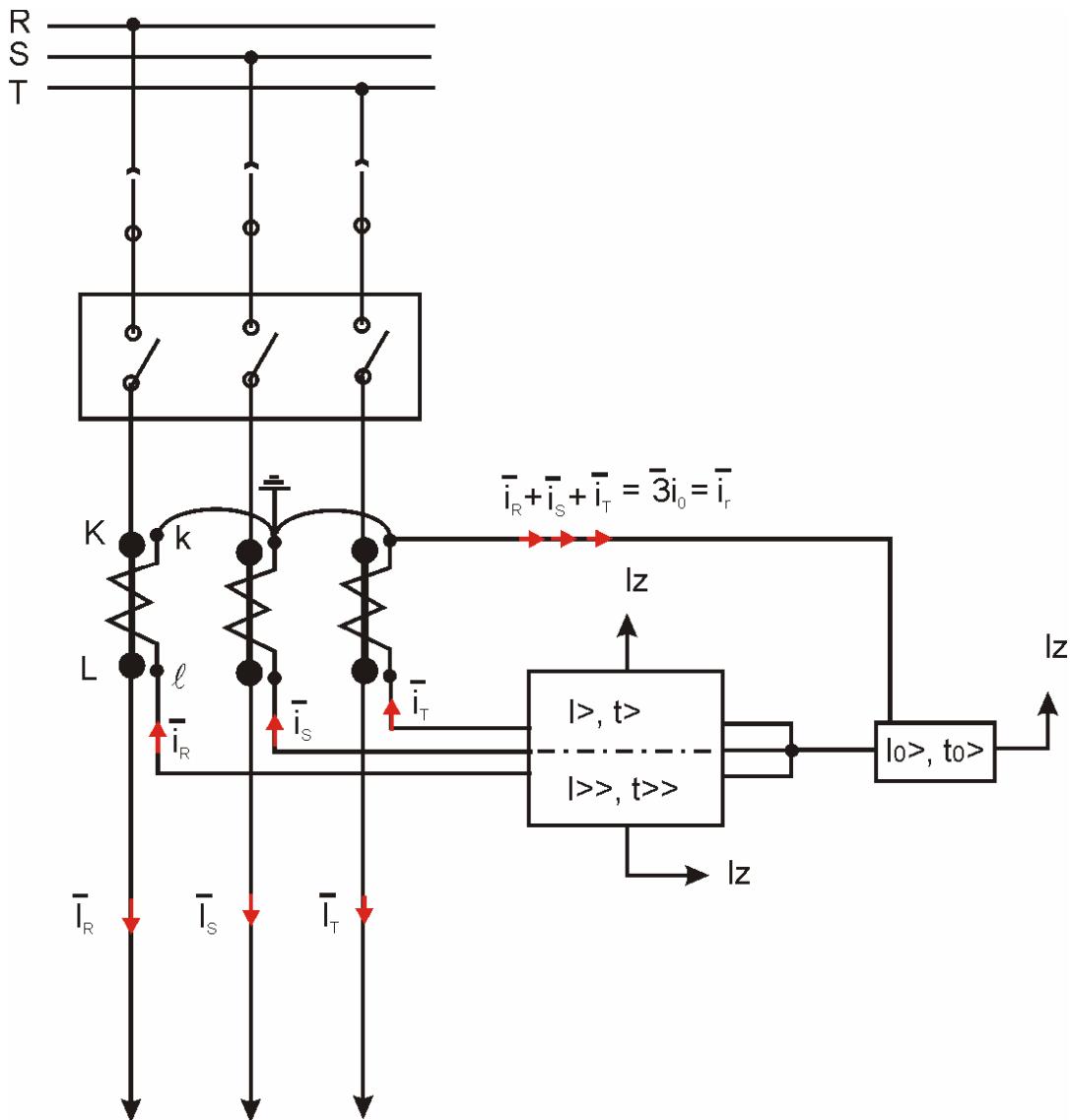
- homopolarna nadstrujna zaštita ($I_0>$) za zaštitu zračnih vodova,
- homopolarna nadstrujna zaštita ($I_0>$) za zaštitu kabelskih vodova.

Ad a) Trostruka nulta komponenta struje ($3\bar{I}_0$) određena je općenito sljedećim izrazom:

$$3\bar{I}_0 = \bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T \quad (3.2-1)$$

gdje su \bar{I}_R , \bar{I}_S i \bar{I}_T struje u fazama R, S i T, respektivno. Stoga se struja $3\bar{I}_0$ može dobiti tzv. sumarnim spojem strujnih transformatora, koji su ugrađeni u vodno polje zračnog voda.

Grafička ilustracija sumarnog spoja strujnih transformatora dana je na slici 3.2-2. Na dotičnoj slici uočava se da se strujni transformatori postavljaju tako da im je K stezaljka (standardna oznaka stezaljki strujnih transformatora: primarna strana K-L, sekundarna strana k-ℓ) okrenuta prema sabirnicama. Dotična strana sekundarnih namota (k stezaljke) strujnih transformatora su spojene u zvijezdu i uzemljene. Relej je također spojen sa spomenutom k stezaljkom (mjestom uzemljenja sekundarnih namota strujnih transformatora). Ovo je standardna praksa u zemljama zapadne Europe pa tako i u mreži HEP-a. Od ovdje spomenutog pravila odstupa se samo u nekim specijalnim slučajevima koji to opravdavaju. U protivnom valja poštivati ovdje prikazanu praksu tretiranja sekundarnih stezaljki strujnih transformatora i način njihovog uzemljenja.



Slika 3.2-2 Grafička ilustracija sumarnog spoja strujnih transformatora za dobivanje nulte struje dalekovoda.

U skladu s oznakama primjenjenim na slici 3.2-2 slijedi da je struja releja (\bar{i}_r) dana sljedećim izrazom:

$$\bar{i}_r = \bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T \quad (3.2-2)$$

U normalnom pogonu (stacionarno stanje) u idealnom slučaju suma struja u faznim vodičima faza R, S i T jednaka je nuli, tj. vrijedi:

$$\bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T = 0 \Rightarrow 3\bar{I}_0 = 0$$

Međutim, zbog postojanja struje praznog hoda, u kojoj dominantnu komponentu čini struja magentiziranja, vrijede sljedeći odnosi:

- za strujni transformator u fazi R:

$$(\bar{I}_R - \bar{I}_{0R}) \cdot N_1 = \bar{i}_R \cdot N_2 \quad (3.2-3)$$

- za strujni transformator u fazi S:

$$(\bar{I}_S - \bar{I}_{0S}) \cdot N_1 = \bar{i}_S \cdot N_2 \quad (3.2-4)$$

- za strujni transformator u fazi T:

$$(\bar{I}_T - \bar{I}_{0T}) \cdot N_1 = \bar{i}_T \cdot N_2 \quad (3.2-5)$$

pri čemu su:

\bar{I}_R, \bar{I}_S i \bar{I}_T - struje u faznim vodičima faza R, S i T spomenutog voda; ujedno su to struje kroz primarni namot strujnih transformatora ugrađenih u faze R, S i T promatranog voda,

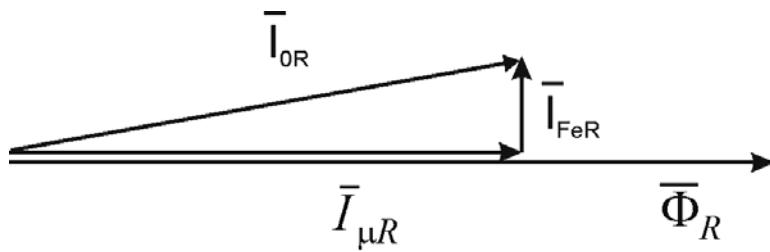
$\bar{I}_{0R}, \bar{I}_{0S}$ i \bar{I}_{0T} - struje praznog hoda strujnih transformatora ugrađenih u faze R, S i T promatranog voda;

\bar{i}_R, \bar{i}_S i \bar{i}_T - struje u sekundarnim namotima strujnih transformatora ugrađenih u faze R, S i T promatranog voda,

N_1 – broj zavoja primarnog namota strujnog transformatora,

N_2 – broj zavoja sekundarnog namota strujnog transformatora.

Primjerice, za strujni transformator ugrađen u fazu R može se konstruirati vektorski dijagram struja praznog hoda strujnog transformatora, prema slici 3.2-3.



Slika 3.2-3 Vektorski dijagram struja praznog hoda strujnog transformatora ugrađenog u fazu R.

Novo upotrijebljene oznake na slici 2.3-3 imaju sljedeća značenja:

$\bar{\Phi}_R$ - vektor magnetskog toka strujnog transformatora,

\bar{I}_{FeR} - struja mjerodavna za gubitke u željezu strujnog transformatora,

$\bar{I}_{\mu R}$ - struja magnetiziranja strujnog transformatora.

Temeljem vektorskog dijagrama sa slike 3.2-3 uočava se da je struja praznog hoda strujnog transformatora (\bar{I}_{0R}) praktički jednaka struji magnetiziranja strujnog transformatora (uobičajeno je zanemarena pritom struja koja je mjerodavna za gubitke u željezu).

Iz jednadžbi (3.2-3), (3.2-4) i (3.2-5) jednostavno slijedi da je:

$$\bar{i}_R = \frac{N_1}{N_2} \cdot (\bar{I}_R - \bar{I}_{0R}) \quad (3.2-6)$$

$$\bar{i}_S = \frac{N_1}{N_2} \cdot (\bar{I}_S - \bar{I}_{0S}) \quad (3.2-7)$$

$$\bar{i}_T = \frac{N_1}{N_2} \cdot (\bar{I}_T - \bar{I}_{0T}) \quad (3.2-8)$$

Temeljem relacije (3.2-2), korištenjem izraza (3.2-6), (3.2-7) i (3.2-8) te nakon sređivanja dobivenog izraza slijedi da je struja releja jednaka:

$$\bar{i}_r = \frac{N_1}{N_2} \cdot \underbrace{(\bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T)}_{3\bar{I}_0} - \frac{N_1}{N_2} \cdot \underbrace{(\bar{I}_{0R} + \bar{I}_{0S} + \bar{I}_{0T})}_{\bar{I}_{0L}} \quad (3.2-9)$$

Uz supsticiju:

$$\bar{I}_{0L} = \bar{I}_{0R} + \bar{I}_{0S} + \bar{I}_{0T} \quad (3.2-10)$$

i

$$p_i = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_{1n}}{i_{2n}} \quad (3.2-11)$$

gdje su:

\bar{I}_{0L} - primarna tzv. **lažna nulta struja strujnih transformatora** (jednaka je zbroju struja praznog hoda navedenih strujnih transformatora),
 p_i - nazivni prijenosni omjer strujnih transformatora,

dobiva se:

$$\bar{i}_r = \frac{3\bar{I}_0}{p_i} - \frac{\bar{I}_{0L}}{p_i} \quad (3.2-12)$$

Kao što je prethodno spomenuto, u normalnom pogonu suma struja u faznim vodičima faza R, S i T jednaka je nuli, tj. vrijedi:

$$\bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T = 0 \Rightarrow 3\bar{I}_0 = 0 \quad (3.2-13)$$

Uvrštenjem izraza (3.2-13) u relaciju (3.2-12) dobiva se da kroz relej teče samo tzv. lažna struja, tj. vrijedi:

$$\bar{i}_r = -\frac{\bar{I}_{0L}}{p_i} \quad (3.2-14)$$

Ova lažna struja obično iznosi oko 6% do 10 % nazivne struje strujnog transformatora. Vrijedi, dakle, da je:

$$\bar{I}_{0L} = (0,06 \div 0,1) \cdot I_{1n} \quad (3.2-15)$$

pri čemu je I_{1n} nazivna primarna struja strujnog transformatora. Temeljem relacije (3.2-16) i (3.2-14) slijedi da je:

$$i_r = (0,06 \div 0,1) \cdot \frac{I_{1n}}{p_i} \quad (3.2-16)$$

odnosno, nakon uvođenja relacije (3.2-11), konačno slijedi:

$$i_r = (0,06 \div 0,1) \cdot i_{2n} \quad (3.2-17)$$

gdje je i_{2n} nazivna sekundarna struja strujnog transformatora (1 A ili 5 A). Povoljno je iz potonjeg izraza odabrati gornju granicu lažne struje strujnih transformatora.

Proradna struja homopolarne nadstrujne zaštite ($I_0 >$) mora biti veća od navedene lažne struje strujnih transformatora. Vrijedi stoga sljedeći izraz:

$$i_{pr0} \geq k_s \cdot i_r \quad (3.2-18)$$

pri čemu je k_s koeficijent sigurnosti za kojega vrijedi:

$$k_s \in [1,1 \div 1,2] \quad (3.2-19)$$

Ponovno je povoljno iz potonjeg izraza izrabrati gornju vrijednost koeficijenta sigurnosti jer se time proračun provodi na strani sigurnosti.

Konačno se kombiniranjem (3.2-18) i (3.2-17) dobiva izraz za proračun proradne struje podešenja mjernog člana homopolarne nadstrujne zaštite, kako slijedi:

$$i_{pr0} = k_s \cdot (0,06 \div 0,1) \cdot i_{2n} \quad (3.2-20)$$

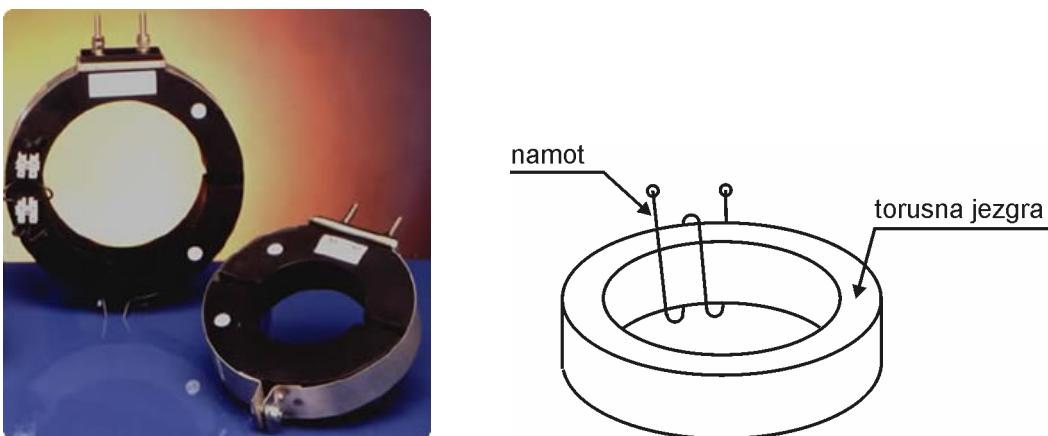
Dakle, u slučaju nastupa jednopolnoga kratkog spoja kada kroz mjerni član homopolarne nadstrujne zaštite ($I_0 >$) protjeće struja:

$$i_r \geq i_{pr0}$$

tada će doći do prorade dotičnog mjernog člana. On će tada aktivirati odgovarajući vremenski član, koji će nakon isteka na njemu podešenog vremena odgode djelovanja isključiti prekidač u dotičnom vodnom polju.

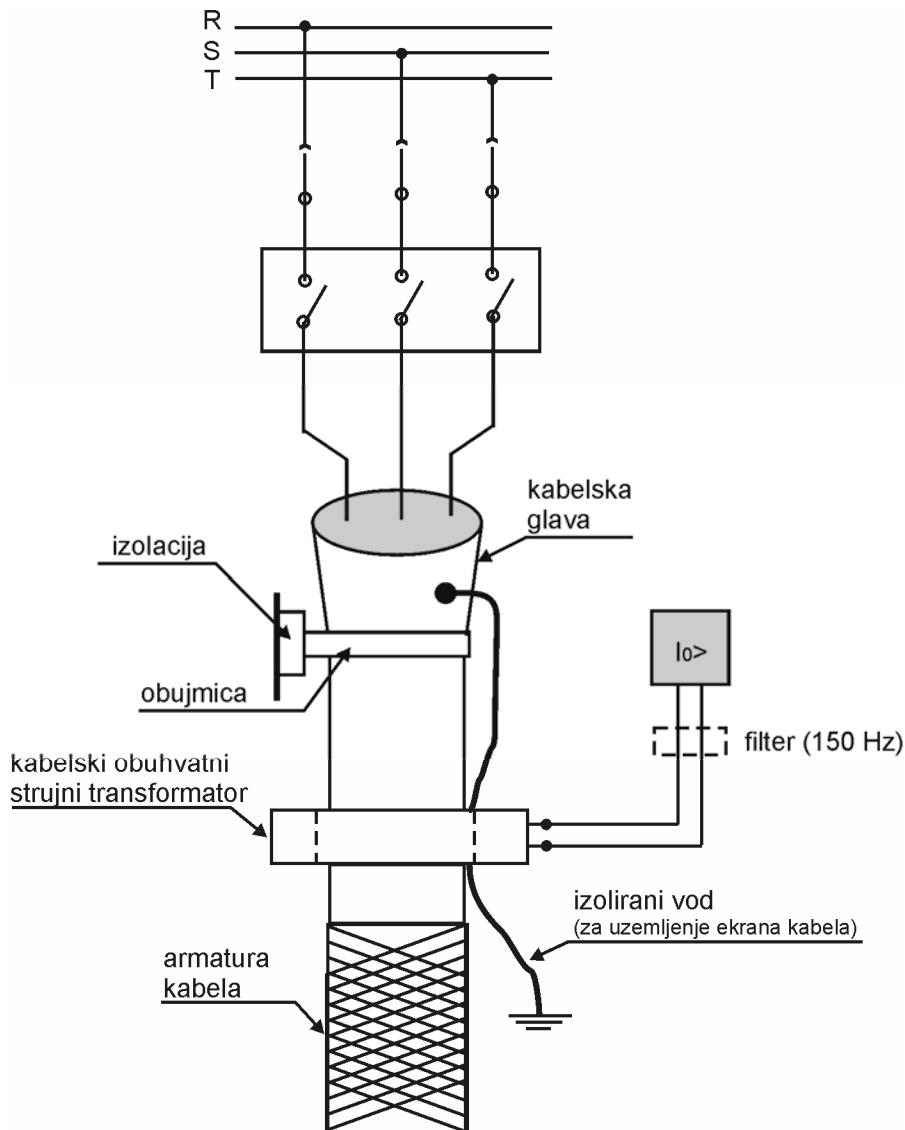
Određivanje vremena odgode djelovanja vremenskog člana homopolarne nadstrujne zaštite (u svrhu ostvarenja selektivne nadstrujne zaštite distributivne mreže u odnosu na kratke spojeve sa zemljom) provodi se po istim pravilima kao i u slučaju nadstrujne zaštite od međufaznih kratkih spojeva ($I >$) u distributivnoj mreži (vidjeti podoglavlje 3.1.1.). Valja naglasiti da su vremenska stupnjevanja homopolarne nadstrujne zaštite ($I_0 >$) i nadstrujne zaštite od međufaznih kratkih spojeva ($I >$) u mreži potpuno neovisna jedna od drugih. Može se koristiti zajednički vremenski član za zaštite $I_0 >$ i $I >$ samo u slučaju da su obje distributivne mreže 35 kV i 10 kV posredno uzemljene. Međutim, kada je mreža 10 kV izolirana (to je najčešće upravo slučaj) tada se upotrebom posebnog vremenskog člana homopolarne nadstrujne zaštite ($I_0 >$) mogu dobiti znatno kraća vremena isklapanja kratkih spojeva sa zemljom. Ovo se redovito i provodi u praksi.

Ad b) Kod kabelskih vodova umjesto klasičnih strujnih transformatora koristi se tzv. **kabelski obuhvatni strujni transformatori** (KOST). On se sastoji od jezgre torusnog oblika na kojoj se nalazi namot (jedan ili više njih). Jezgra je izrađena od limova od feromagnetskog materijala. Limovi su međusobno izolirani da bi se smanjili gubici vrtložnih struja u jezgri (slično kao i kod jezgre energetskog transformatora). Fotografija, te krajnje pojednostavljena grafička ilustracija kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora prikazane su na slici 3.2-4.



Slika 3.2-4 Fotografija te pojednostavljena grafička ilustracija kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora.

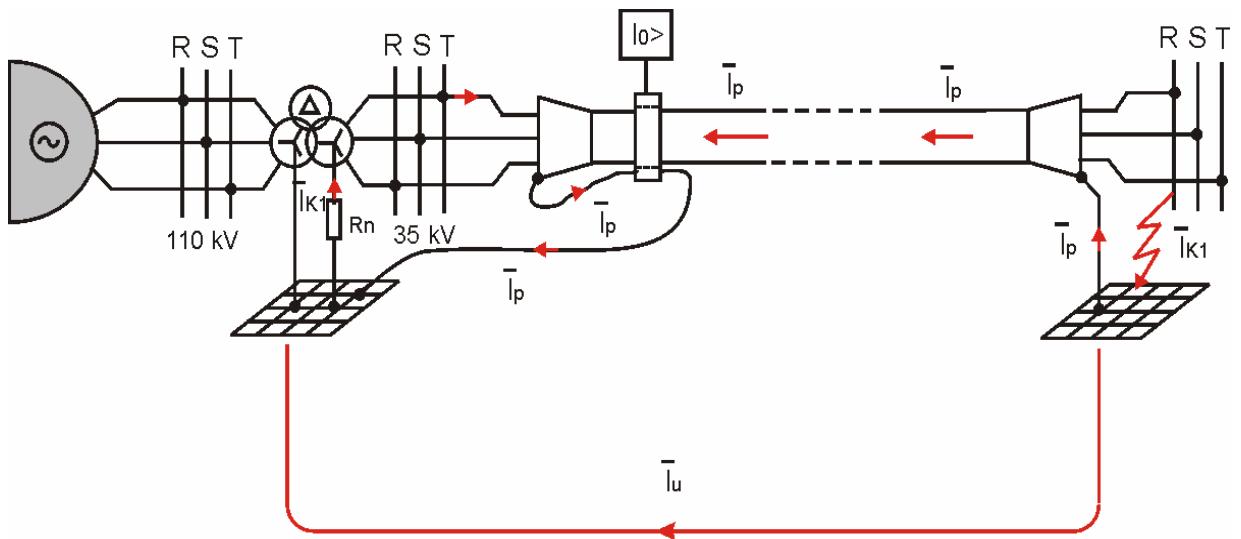
Kroz jezgru kabelskog obuhvatnog transformatora provlači se trožilni kabel. Njegovim faznim vodičima faza R, S i T teku općenito struje \bar{I}_R , \bar{I}_S i \bar{I}_T . Način priključka kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora prikazan je na slici 3.2-5. Prije instalacije kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora, s kabela se prethodno skida armatura ukoliko ista postoji. To se radi iz razloga da se magnetski tok ne bi zatvarao dijelom i kroz armaturu kabela (jer bi to dovelo do velikih pogrešaka pri radu kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora).



Slika 3.2-5 Način priključka kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora.

Kabelska glava (završnica) mora biti postavljena izolirano u odnosu na susjedne konstrukcijske dijelove. Ujedno se uzemljenje ekrana kabela provodi izoliranim vodom, koji se provlači kroz provrt kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora. To se radi sa svrhom da se poništi magnetski tok kojeg bi stvorila struja u ekrani kabela, do koje dolazi u slučaju nastupa jednopolnoga kratkog spoja. Ovaj dodatni magnetski tok (uslijed struje ekrana) bi izazvao nedopustive pogreške u kabelskom obuhvatnom strujnom transformatoru.

Prikaz raspodjele struja jednopolnoga kratkog spoja grafički je ilustriran na slici 3.2-6. Ekrani kabela su uzemljeni na oba kraja. Radi se o radijalnom vodu (distributivna mreža). Mjesto nastupa jednopolnoga kratkog spoja je stoga napajano samo s jedne strane (iz izvorene trafostanice). Jednopolni kratki spoj se dogodio između faze R i zemlje (uzemljivača).



Slika 3.2-6 Grafički prikaz raspodjele struja jednopoljnoga kratkog spoja.

Oznake upotrijebljene na slici 3.2-6 imaju sljedeća značenja.

\bar{I}_{K1} - struja jednopoljnoga kratkog spoja,

\bar{I}_p - struja u ekranu (metalni plašt) kabelskog voda,

\bar{I}_u - struja u zemlji (ova se struja uzemljivačem odvodi u zemlju).

Temeljem simbolike i oznaka primijenjenih na slici 3.2-6 vrijedi sljedeća relacija:

$$\bar{I}_u = \bar{I}_{K1} - \bar{I}_p \quad (3.2-21)$$

Pomoću kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora moguće je dobiti trostruku nultu komponentu struje jednopoljnoga kratkog spoja. Iskorišteva se pritom ponovno izraz (3.2-1), tj.:

$$3\bar{I}_0 = \bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T \quad (3.2-22)$$

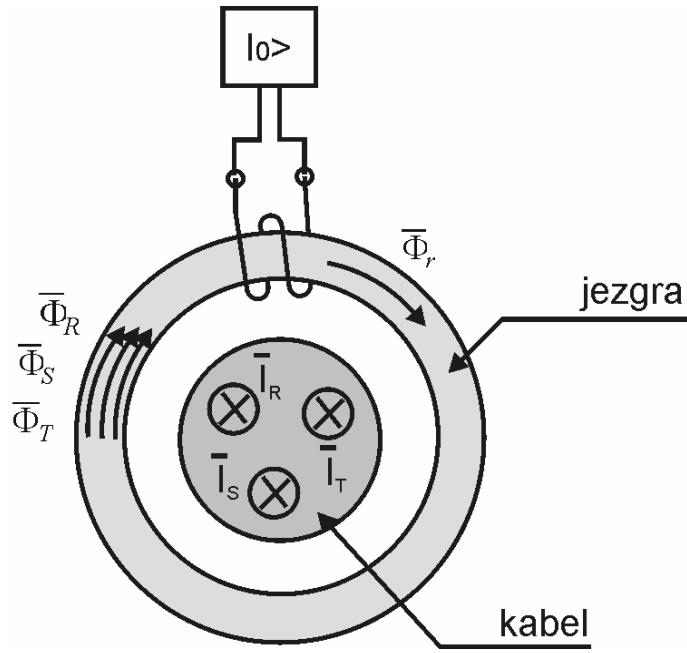
pri čemu su \bar{I}_R , \bar{I}_S i \bar{I}_T struje u faznim vodičima faza R, S i T promatranog kabelskog voda, respektivno. Spomenute struje \bar{I}_R , \bar{I}_S i \bar{I}_T stvaraju u jezgri kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora magnetske tokove $\bar{\Phi}_R$, $\bar{\Phi}_S$, $\bar{\Phi}_T$, respektivno. Ovi magnetski tokovi su proporcionalni spomenutim strujama pa stoga slijedi da je:

$$\bar{\Phi}_R = k \cdot \bar{I}_R \quad (3.2-23)$$

$$\bar{\Phi}_S = k \cdot \bar{I}_S \quad (3.2-24)$$

$$\bar{\Phi}_T = k \cdot \bar{I}_T \quad (3.2-25)$$

pri čemu je k – konstanta proporcionalnosti. Na slici 3.2-7 grafički su ilustrirani dotični magnetski tokovi u jezgri kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora.



Slika 3.2-7 Grafička ilustracija magnetskih tokova u jezgri kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora.

Ukupni (rezultirajući) magnetski tok kroz jezgru kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora iznosi:

$$\overline{\Phi}_r = \overline{\Phi}_R + \overline{\Phi}_S + \overline{\Phi}_T \quad (3.2-26)$$

Uvrštenjem (3.2-23), (3.2-24) i (3.2-25) u relaciju (3.2-26) slijedi:

$$\overline{\Phi}_r = k \cdot (\bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T) \quad (3.2-37)$$

Dakle, temeljem potonje relacije, u skladu s izrazom (3.2-22), konačno slijedi:

$$\overline{\Phi}_r = k \cdot 3\bar{I}_0 \quad (3.2-38)$$

U normalnom pogonu (stacionarno stanje) suma struja u faznim vodičima faza R, S i T, jednaka je nuli, pa stoga vrijedi:

$$\overline{\Phi}_r = 0 \quad (3.2-39)$$

Dakle, tada je i rezultirajući magnetski tok u jezgri kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora jednak nuli pa homopolarna nadstrujna zaštita ($I_0>$) neće djelovati.

Međutim, u slučaju kvara sa zemljom zadovoljena je sljedeća relacija:

$$\bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T \neq 0 \quad (3.2-40)$$

te će se uslijed toga javiti određena trostruka nulta komponenta struje kvara $3\bar{I}_0 \neq 0$ koja će u jezgri kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora stvoriti rezultirajući magnetski tok $\Phi_r \neq 0$. Ovaj magnetski tok će u namotu kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora inducirati napon koji će pak kroz homopolarni nadstrujni relej ($I_0>$) protjerati odgovarajuću struju.

Upotreba kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora omogućava vrlo osjetljivo podešenje homopolarne nadstrujne zaštite kabelskih vodova. Proradne struje mjernog člana zaštite $I_0>$ mogu biti stoga podešene vrlo nisko, npr.:

$$i_{pr0} \in [10 \div 50] \text{ mA} \quad (3.2-41)$$

a u nekim slučajevima još i niže, npr.:

$$i_{pr0} \in [5 \div 10] \text{ mA} \quad (3.2-42)$$

Primarni namot kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora sastoji se samo od jednog zavoja. Radi se o samom kabelu kroz koji se zatvara trostruka nulta struja $3\bar{I}_0$. Sekundarni namot se nalazi na jezgri i na njega se priključuje homopolarna nadstrujna zaštita. S obzirom da primarni namot ima samo jedan zavoj to je snaga koju može proizvesti kabelski obuhvatni strujni transformator malena. Zbog male snage kabelskog obuhvatnog strujnog transformatora važno je da homopolarni nadstrujni relej ima malu vlastitu potrošnju. Tom zahtjevu u potpunosti udovoljavaju staticki releji kao i moderni numerički releji. S njima se može ostvariti vrlo osjetljiva zaštita u odnosu na kratke spojeve sa zemljom.

Kod vrlo osjetljivo podešenih homopolarnih nadstrujnih zaštita često se javlja potreba za filtrom, koji u relej ($I_0>$) propušta samo struju nazivne frekvencije (50 Hz). Taj filter posebice blokira struje trećeg harmonika (njihova je frekvencija 150 Hz), koje se često javljaju u primarnim strujnim krugovima. Dotične su struje istofazne u sve tri faze, tako da se sumiraju, što bi moglo dovesti do nepotrebnog i pogrešnog djelovanja releja $I_0>$.

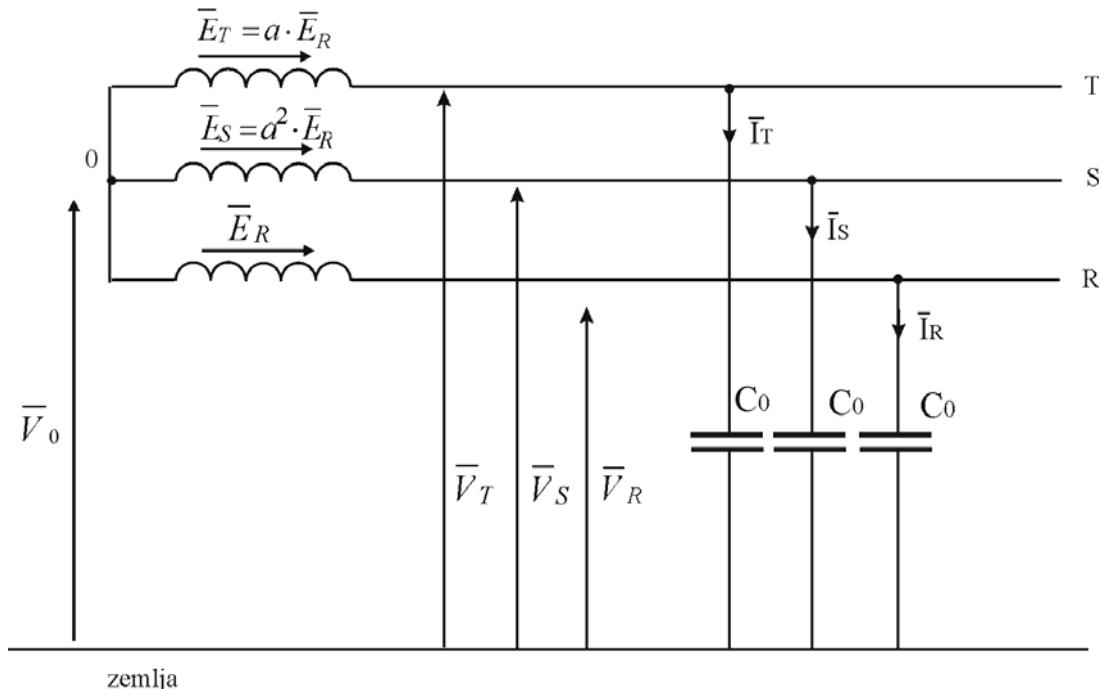
Obuhvatni strujni transformatori imaju neke prednosti u odnosu na sumarni spoj klasičnih strujnih transformatora. Te prednosti jesu:

- ne postoje problemi vezani uz različite prijenosne karakteristike strujnih transformatora,
- veličina primarne struje kod kabelskih obuhvatnih strujnih transformatora ne utječe na osjetljivost homopolarne nadstrujne zaštite,
- moguće je vrlo osjetljivo podešenje homopolarne nadstrujne zaštite,
- znatno su jeftiniji od klasičnih strujnih transformatora (razlog tome je što se postavljaju direktno na kabele pa ne moraju biti izolirani za visoki napon).

3.2.2. Zemljospojna zaštita

Zemljospoj predstavlja spoj faznog vodiča sa zemljom u mreži u kojoj su zvezdišta energetskih transformatora izolirana u odnosu na zemlju (uzemljivač). U izoliranoj mreži, za zaštitu od zemljospoja, koristi se tzv. zemljospojna zaštita, koja nosi IEC oznaku $U_0 >$, odnosno, ANSI oznaku 64.

Na slici 3.2-8 prikazana je trofazna nadomjesna shema mreže s izoliranim zvezdištem u stanju praznog hoda.



Slika 3.2-8 Trofazna nadomjesna shema izolirane mreže u stanju praznog hoda.

Oznake primjenjene na slici 3.2-8 imaju sljedeća značenja.

$\bar{E}_R, \bar{E}_S, \bar{E}_T$ - nadomjesne elektromotorne sile faza R, S i T, respektivno,

$\bar{V}_R, \bar{V}_S, \bar{V}_T$ - fazni naponi faza R, S i T, respektivno,

$\bar{I}_R, \bar{I}_S, \bar{I}_T$ - kapacitivne struje faza R, S i T, (zatvaraju se dozemnim kapacitetima) i prethode respektivnim naponima $\bar{V}_R, \bar{V}_S, \bar{V}_T$ za 90° ,

\bar{V}_0 – napon zvezdišta izolirane mreže prema zemlji,

C_0 – dozemni (multi) kapacitet faznog vodiča promatrane mreže.

Radi se, dakle, o simetričnom pogonskom stanju, pri kojem uvažavajući oznake i simboliku primjenjenu na slici 2.3-8, vrijedi:

$$\bar{V}_R = \bar{E}_R + \bar{V}_0 \quad (3.2-43)$$

$$\bar{V}_S = \bar{E}_S + \bar{V}_0 \quad (3.2-44)$$

$$\bar{V}_T = \bar{E}_T + \bar{V}_0 \quad (3.2-45)$$

Sumiranjem izraza (3.2-43), (3.2-44) i (3.2-45) slijedi:

$$\bar{V}_R + \bar{V}_S + \bar{V}_T = \bar{E}_R + \bar{E}_S + \bar{E}_T + 3 \cdot \bar{V}_0 \quad (3.2-46)$$

Budući da se radi o simetričnom pogonskom stanju, u skladu s oznakama prikazanim na slici 3.2-8, slijedi da je:

$$\bar{E}_R + \bar{E}_S + \bar{E}_T = 0 \quad (3.2-47)$$

Stoga, korištenjem (3.2-47) relacija (3.2-46) prelazi u sljedeći oblik:

$$\bar{V}_R + \bar{V}_S + \bar{V}_T = 3 \cdot \bar{V}_0 \quad (3.2-48)$$

Naponi faza $\bar{V}_R, \bar{V}_S, \bar{V}_T$, temeljem oznaka primijenjenih na slici 3.2-8, mogu se odrediti kako slijedi:

$$\bar{V}_R = \bar{I}_R \cdot \frac{1}{j \cdot \omega C_0} \quad (3.2-49)$$

$$\bar{V}_S = \bar{I}_S \cdot \frac{1}{j \cdot \omega C_0} \quad (3.2-50)$$

$$\bar{V}_T = \bar{I}_T \cdot \frac{1}{j \cdot \omega C_0} \quad (3.2-51)$$

Uvrštenjem izraza (3.2-49), (3.2-50) i (3.2-51) u relaciju (3.2-48) slijedi:

$$(\bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T) \cdot \frac{1}{j \omega C_0} = 3 \cdot \bar{V}_0 \quad (3.2-52)$$

Budući da je riječ o simetričnom pogonskom stanju, suma faznih struja jednaka je ništici, tj. vrijedi da je:

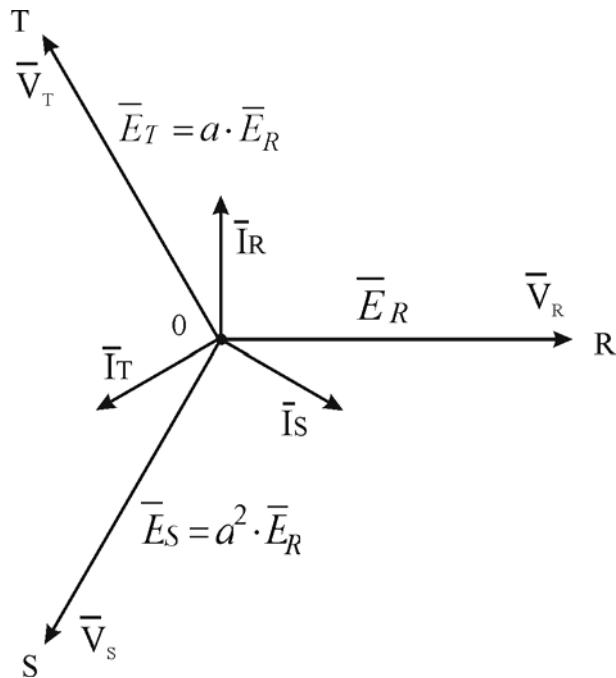
$$\bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T = 0 \quad (3.2-53)$$

Temeljem relacije (3.2-53) slijedi iz izraza (3.2-52) da je:

$$\bar{V}_0 = 0 \quad (3.2-54)$$

Dakle, u idealnom praznom hodu izolirane mreže, napon zvjezdišta jednak je nuli, a fazni naponi su jednakim elektromotornim silama. U realnom slučaju ipak postoji neka mala

nesimetrija između dozemnih (nultih) kapaciteta faza (naročito kod nadzemnih mreža) te stoga uvijek postoji neki mali napon zvjezdišta izolirane mreže. Odgovarajući fazorski dijagram napona i struja za idealan prazni hod izolirane mreže prikazan je na slici 3.2-9.



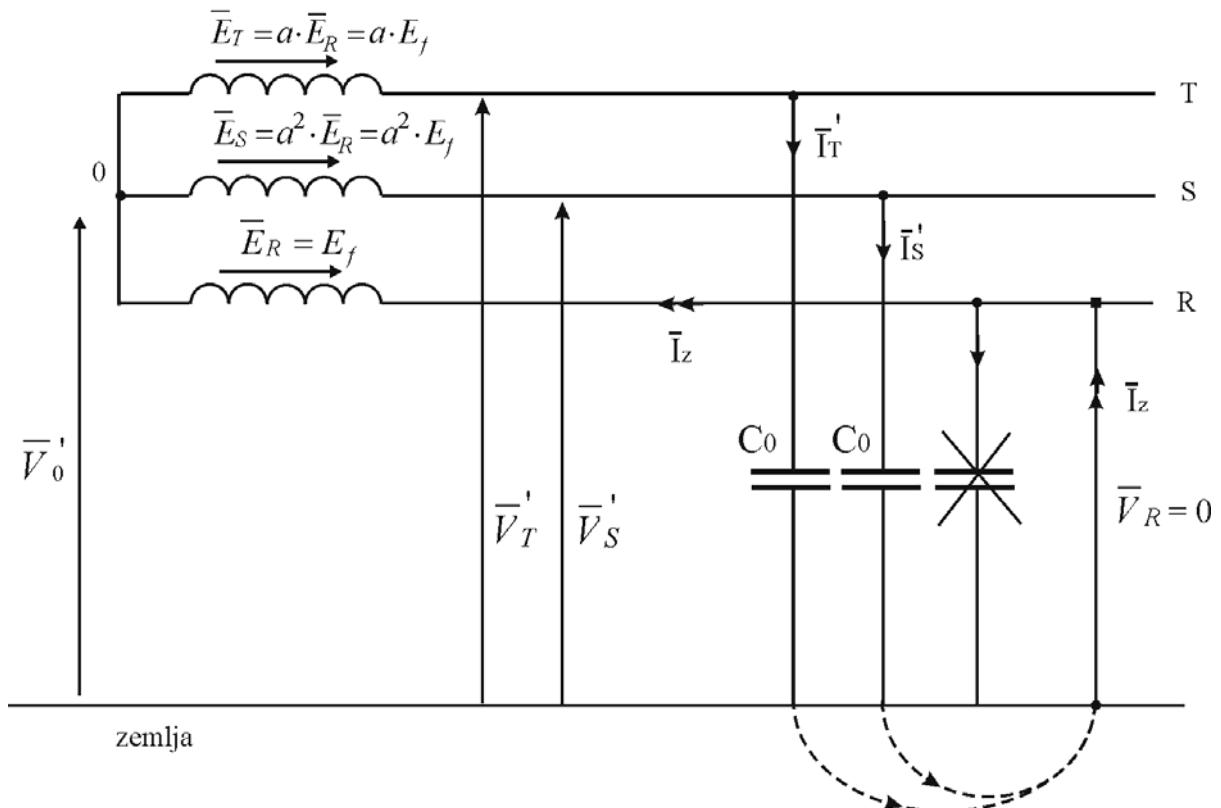
Slika 3.2-9 Fazorski dijagram napona i struja za slučaj idealnog praznog hoda izolirane mreže.

Neka se sada razmotri slučaj nastupa metalnog spoja npr. faze R sa zemljom. Riječ je, dakle, o nastupu **zemljospoja** u fazi R izolirane mreže. Pri dotičnom zemljospoju premošten je dozemni (nulti) kapacitet dotične faze. Napon faze R prema zemlji postao je pritom jednak nuli, tj. vrijedi da je:

$$\bar{V}_R = 0 \quad (3.2-55)$$

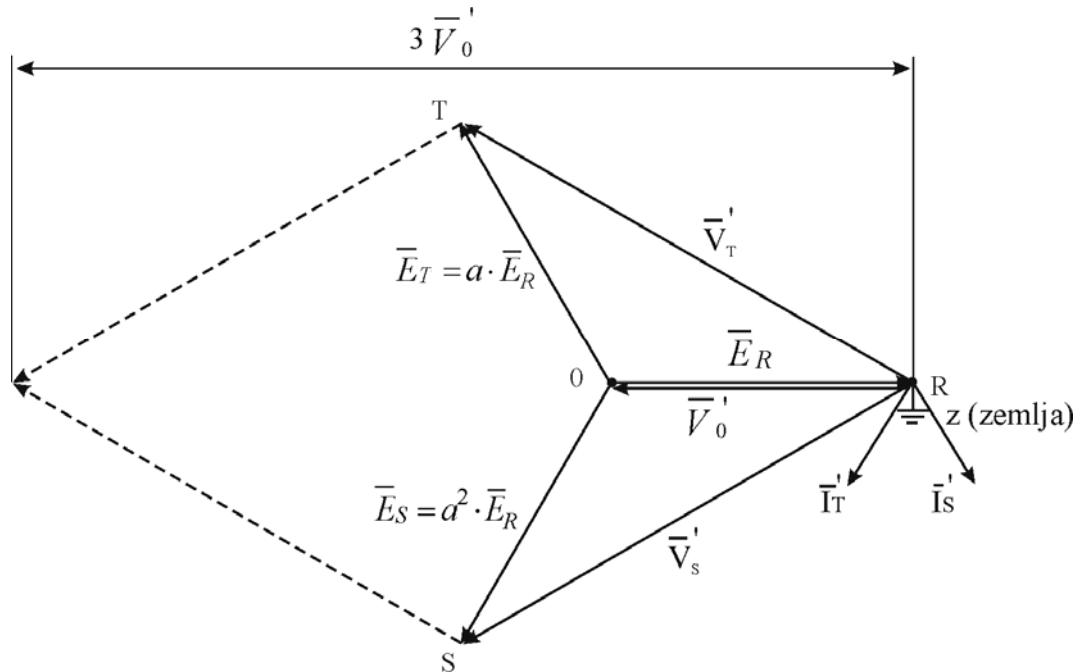
Elektromotorne sile \bar{E}_R , \bar{E}_S , \bar{E}_T ostaju i dalje nepromjenjene. Mijenjaju se pripadni fazni naponi tzv. zdravih faza (faza koje nisu u kvaru).

Slika 3.2-10 prikazuje trofaznu nadomjesnu shemu nastupa zemljospoja u izoliranoj mreži. Zvjezdište mreže poprima također neki napon prema zemlji. Taj napon označen je s \bar{V}'_0 na slici 3.2-10. Osim toga, fazni naponi zdravih faza \bar{V}'_S i \bar{V}'_T kroz nulte kapacitete mreže C_0 tjeraju struje \bar{I}'_S i \bar{I}'_T (vidjeti sliku 3.2-10). Ove su struje također kapacitivne i one prethode naponima \bar{V}'_S i \bar{V}'_T za 90° .



Slika 3.2-10 Trofazna nadomjesna shema nastupa zemljospoja.

Odgovarajuća fazorska slika koja odgovara spomenutom zemljospoju prikazana je na slici 3.2-11.



Slika 3.2-11 Fazorska slika napona i struja za vrijeme nastupa zemljospoja u fazi R izolirane mreže.

Temeljem oznaka i simbolike primijenjene na slikama 3.2-10 i 3.2-11 vrijede sljedeće relacije:

$$\bar{V}_R' = 0 \quad (3.2-56)$$

$$\bar{V}_S' = \bar{E}_S + \bar{V}_0' \quad (3.2-57)$$

$$\bar{V}_T' = \bar{E}_T + \bar{V}_0' \quad (3.2-58)$$

$$\bar{V}_0' = -\bar{E}_R \quad (3.2-59)$$

Sumiranjem izraza (3.2-57) i (3.2-58) slijedi da je:

$$\bar{V}_S' + \bar{V}_T' = \bar{E}_S + \bar{E}_T + 2 \cdot \bar{V}_0' \quad (2.3-60)$$

Temeljem relacije (3.2-47) izraz (3.2-60) prelazi u sljedeći oblik:

$$\bar{V}_S' + \bar{V}_T' = -\bar{E}_R + 2 \cdot \bar{V}_0' \quad (3.2-61)$$

Dalnjim korištenjem izraza (3.2-59), relacija (3.2-61) prelazi u konačni oblik:

$$\bar{V}_S' + \bar{V}_T' = 3 \cdot \bar{V}_0' \quad (3.2-62)$$

Također, budući da vrijedi izraz (3.2-56), relacija (3.2-62) može se napisati u pogodnijem obliku, kako slijedi:

$$3 \cdot \bar{V}_0' = \bar{V}_R' + \bar{V}_S' + \bar{V}_T' \quad (3.2-63)$$

Ovaj se izraz iskorištava pri prepoznavanju nastupa zemljospoja u izoliranoj mreži. Naime, kod zdrave mreže (idelano izbalansirane u sve tri faze) vrijedi da je:

$$\bar{V}_R + \bar{V}_S + \bar{V}_T = \bar{E}_R + \bar{E}_S + \bar{E}_T = 0 \quad (3.2-64)$$

Digresija:

Struje u zdravim fazama S i T, pri nastupu matalnog zemljospoja u fazi R, mogu se odrediti pomoću sljedećih izraza:

$$\bar{I}_S' = \bar{V}_S' \cdot j\omega C_0 \quad (3.2-65)$$

$$\bar{I}_T' = \bar{V}_T' \cdot j\omega C_0 \quad (3.2-66)$$

Istovremeno vrijedi da je:

$$\bar{V}_S' = \sqrt{3} \cdot E_f \cdot e^{j150^\circ} \quad (3.2-67)$$

$$\bar{V}_T' = \sqrt{3} \cdot E_f \cdot e^{j210^\circ} \quad (3.2-68)$$

pri čemu je:

$$E_f = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (3.2-69)$$

Temeljem relacija (3.2-67) i (3.2-68), izrazi (3.2-65) i (3.2-66) repsektivno prelaze u sljedeće oblike:

$$\bar{I}_S' = \sqrt{3} \cdot E_f \cdot e^{j210^\circ} \cdot e^{j90^\circ} \cdot \omega C_0 = \sqrt{3} \cdot E_f \cdot \omega C_0 \cdot e^{j300^\circ} \quad (3.2-70)$$

$$\bar{I}_T' = \sqrt{3} \cdot E_f \cdot e^{j150^\circ} \cdot e^{j90^\circ} \cdot \omega C_0 = \sqrt{3} \cdot E_f \cdot \omega C_0 \cdot e^{j240^\circ} \quad (3.2-71)$$

Struja zemljospoja jednaka je sljedećem izrazu:

$$\bar{I}_z = \bar{I}_S' + \bar{I}_T' \quad (3.2-72)$$

Uvrštenjem izraza (3.2-70) i (3.2-71) u potonju relaciju te nakon sređivanja dobiva se:

$$\bar{I}_z = \sqrt{3} \cdot E_f \cdot \omega C_0 \cdot (e^{j240^\circ} + e^{j300^\circ}) \quad (3.2-73)$$

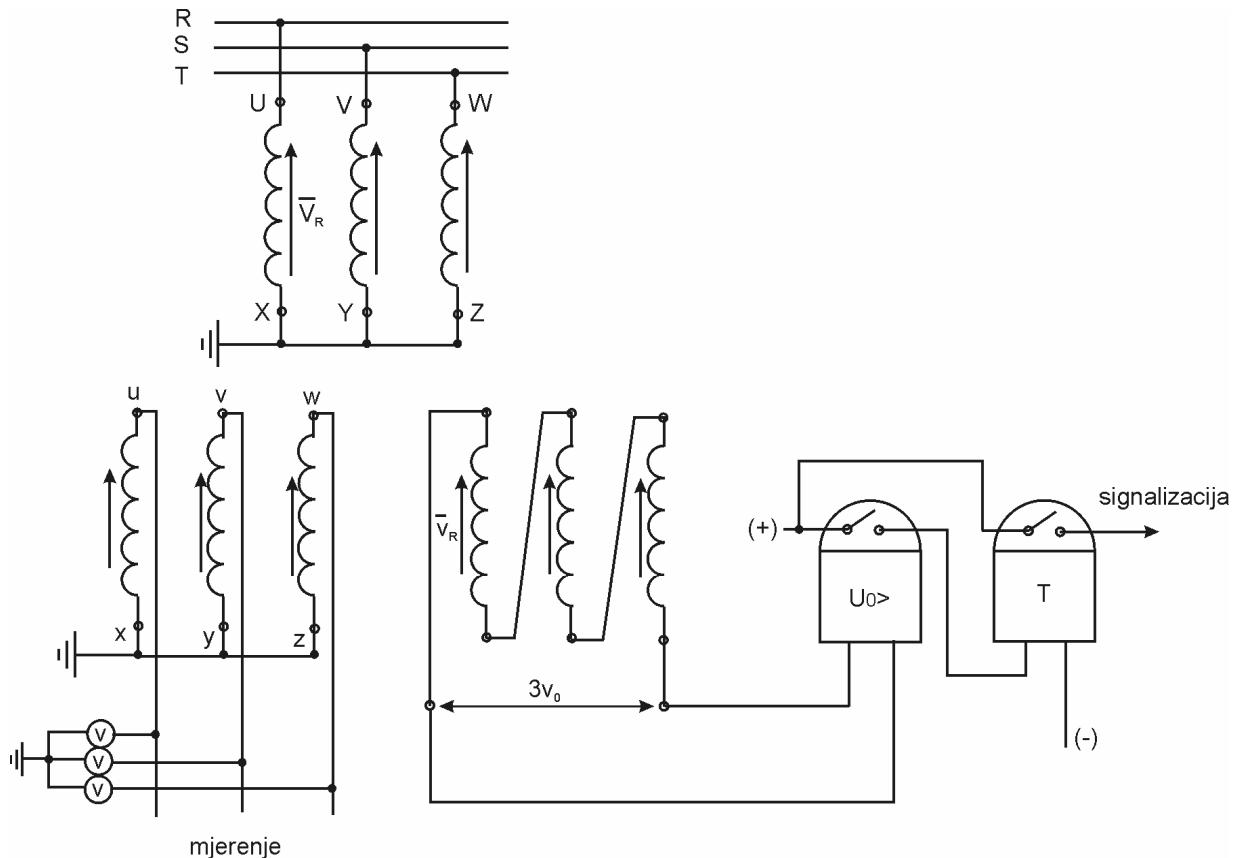
Razrješenjem zagrada u izrazu (3.2-73) dobiva se konačni oblik relacije za proračun struje zemljospoja:

$$\bar{I}_z = -j \cdot E_f \cdot 3\omega C_0 \quad (3.2-74)$$

Zemljospoj se u izoliranoj mreži samo *signalizira* a ne isključuje. Naime, mreža s zemljospojem može nastaviti rad, budući da je trokut napona ostao sačuvan. Struje zemljospoja su relativno malih iznosa. Potrebno je ipak što prije pronaći i sanirati mjesto zemljospoja jer postoji opasnost od nastupa drugog zemljospoja, tj. dvostrukog zemljospoja. Ovaj kvar praćen je velikim strujama i opasan je za mrežu.

Za priključak zemljospojne zaštite koristi se naponski mjerni transformator. On se redovito nalazi u mjernom polju rasklopnog postrojenja. Uz primarni namot dotični naponski transformator posjeduje obično i dva sekundarna namota. Radi se o slogu (tri komada) naponskih mjernih transformatora. Sekundarni namoti su nazivnog napona 100 V, dok je primarni namot jednak nazivnom naponu odgovarajuće mreže. Jedan od sekundarnih namota naponskog transformatora spaja se u tzv. *otvoreni trokut* i na njemu će se dobiti (mjeriti)

napon $3\cdot\bar{V}_0'$. Riječ je o tzv. **sumarnom spoju sekundarnih napona**. Drugi sekundarni namot naponskog transformatora spaja se u spoj zvijezda. Višenaponski namoti naponskog transformatora također se spajaju u spoj zvijezda. Slika 3.2-12 grafički ilustrira trofaznu shemu spoja zemljospojne zaštite na otvoreni trokut sekundarnih namota naponskih mernih transformatora. Na dotičnoj slici prikazane su i standardizirane oznake namota (početak primarnog namota nosi označke U, V i W a kraj primarnog namota X, Y i Z, dok se početak sekundarnog namota označava sa u, v i w a kraj sekundarnog namota sa x, y i z).



Slika 3.2-12 Trofazna shema spoja zemljospojne zaštite na otvoreni trokut sekundarnih namota naponskog transformatora.

Kod metalnog zemljospoja (kakav je prethodno razmatran), na otvorenom trokutu sekundara naponskih transformatora dobiva se napon iznosa 100 V. Taj napon se dovodi relejnom uređaju zemljospojne zaštite ($U_0>$). Za signalizaciju nastupa zemljospoja u mreži koristi se nadnaponski merni član u kombinaciji s vremenskim članom, kao što je to pokazano na slici 3.2-12.

Naime, kod nastupa metalnog zemljospoja u fazi R, napon na otvorenom trokutu sekundara naponskih transformatora glasi:

$$3v_0' = \frac{1}{p_u} \cdot |\bar{V}_R + \bar{V}_S + \bar{V}_T| = \frac{1}{p_u} \cdot 3 \cdot E_f = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{p_u} \quad (3.2-75)$$

Nazivni prijenosni omjer naponskog transformatora glasi:

$$p_u = \frac{U_n}{\sqrt{3}} / \frac{100}{3} \text{ V} \quad (3.2-76)$$

pri čemu je U_n nazivni napon promatrane mreže. Uvrštenjem izraza (3.2-76) u relaciju (3.2-75) slijedi:

$$3V_0 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{\frac{3 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot 100}} = 100 \text{ V} \quad (3.2-77)$$

Da bi zemljospojni relj djelovao i kod zemljospojeva praćenih prijelaznim otporima na mjestu kvara, proradni napon nadnaponskog člana zemljospojne zaštite mora biti podešen na vrijednost oko 40 – 50 V, tj.:

$$u_{pr0} \in [40 \div 50] \text{ V} \quad (3.2-78)$$

Da bi se izbjeglo nepotrebno signaliziranje kratkotrajnih prolaznih zemljospojeva, koristi se vremenski član s podešenjem:

$$t_0 \in [3 \div 10] \text{ s} \quad (3.2-79)$$

Proračun podešenja mjernog člana zemljospojne zaštite provodi se temeljem sljedećeg izraza:

$$U_{p0} \geq k_s \cdot \frac{U_{nes}}{p_u} \quad (3.2-80)$$

pri čemu su:

k_s – koeficijent sigurnosti ($k_s > 1$),

U_{nes} – ukupni napon nesimetrije u mreži bez kvara; naime, uslijed stanovite nesimetrije elemenata mreže moguća je pojava ukupnog nesimetričnog napona, U_{nes} (ovaj napon se može odrediti mjeranjem), dakle, vrijedi:

$$3V_0 = U_{nes} \quad (3.2-81)$$

p_u – nazivni prijenosni omjer pripadnih naponskih transformatora.

Obično je u praksi zadovoljena sljedeća relacija:

$$\frac{U_{nes}}{p_u} \approx 5 \text{ V} \quad (3.2-82)$$

Stoga izraz (3.2-80) poprima sljedeći oblik:

$$u_{p0} \geq k_s \cdot 5 V \quad (3.2-83)$$

Obično se usvaja vrijednost koeficijenta sigurnosti $k_s = 2$ te stoga izraz (3.2-83) daje sljedeću tipičnu vrijednost podešenja mjernog člana zemljospojne zaštite:

$$u_{p0} = 10 V \quad (3.2-84)$$

Također je uobičajeno usvojiti sljedeće tipično vremensko zatezanje zemljospojne zaštite (da ne bi dolazilo do čestog signaliziranja prolaznih zemljospojeva u mreži):

$$t_{p0} = 5 s \quad (3.2-85)$$

3.2.3. Osjetljiva usmjerena homopolarna nadstrujna zaštita

Niskopodesiva osjetljiva usmjerena homopolarna nadstrujna zaštita služi za zaštitu distributivnih mreža od kratkih spojeva sa zemljom (jednopolni kratki spoj i dvopolni kratki spoj s istodobnim spojem sa zemljom) u uzemljenim mrežama te zemljospoja u izoliranim distributivnim mrežama. Usmjerena homopolarna nadstrujna zaštita je vrlo osjetljiva zaštita, koja se spaja na strujne i naponske transformatore. Ona nosi IEC oznaku $\vec{I}_0 >$, odnosno, ANSI oznaku 67N. Ova zaštita za svoj rad koristi činjenicu da se kod spomenutih kvarova sa zemljom razvija:

- trostruka nulta / homopolarna komponenta struje, $3I_0$
- trostruka nulta / homopolarna komponenta napona, $3V_0$.

Struja $3I_0$ se određuje u skladu s (3.2-1). Ona je jednaka ništici u stacionarnom / normalnom pogonu mreže kao i u slučajevima nastupa međufaznih kratkih spojeva, tj.:

$$3\bar{I}_0 = 0 \quad (3.2-86)$$

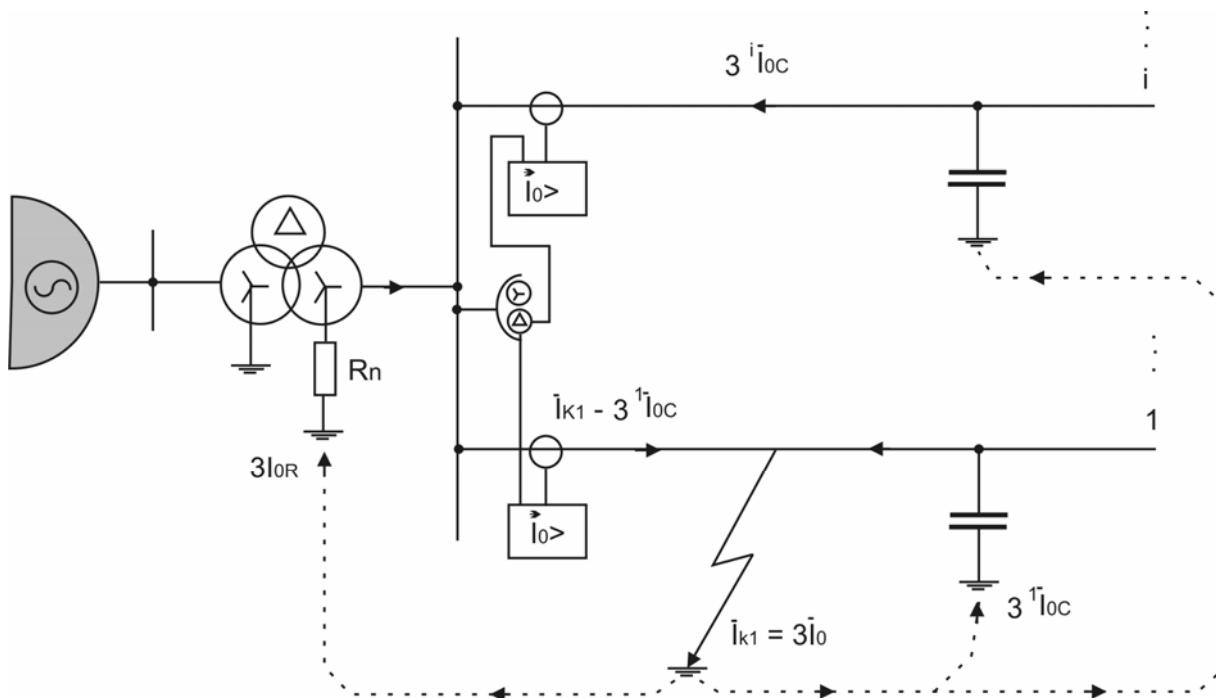
Za dobivanje dotične struje $3I_0$, zaštita $\vec{I}_0 >$ se priključuje kao i homopolarna nadstrujna zaštita $I_0 >$ (vidjeti podoglavlje 3.2.1) na sumacioni spoj pripadnih strujnih transformatora.

Napon $3V_0$ se određuje pomoću sljedećeg izraza:

$$3\bar{V}_0 = \bar{V}_R + \bar{V}_S + \bar{V}_T \quad (3.2-87)$$

u kojem veličine \bar{V}_R , \bar{V}_S i \bar{V}_T predučuju fazne napone faza R, S i T, respektivno. Zaštita $\vec{I}_0 >$ se stoga priključuje i na otvoreni trokut sekundarnih namota naponskog transformatora. U stanju bez kratkog spoja sa zemljom zadovoljena je približno sljedeća jednakost:

$$3\bar{V}_0 \approx 0 \quad (3.2-88)$$



Slika 3.2-13 Prikaz tijeka trostrukih nultih komponenti struja jednopoljnoga kratkog spoja u distribucijskoj mreži uzemljenoj preko malog djelatnog otpornika.

Oznake primjenjene na slici 3.2-13 imaju sljedeća značenja:

I_{0R} – nulta komponenta struje kvara koja se zatvara malim djelatnim otpornikom; riječ je o struji djelatnog karaktera,

I_{0C} – nulta komponenta struje kvara koja se zatvara dozemnim / nultim kapacitetima promatrane distribucijske mreže; ova struja je, dakako, kapacitivnog karaktera.

Prema slici 3.2-13, strujnim transformatorima koji se nalaze u "zdravim" vodovima i na koje su priključene zaštite $\vec{I}_0 >$ teku samo kapacitivne struje. Ove struje su usmjerene od voda k sabirnicama postrojenja. Međutim, sumacionim spojem strujnih transformatora u "bolesnom" vodu (vod koji je pogoden jednopolnim kratkim spojem) struja teče od sabirnica k vodu (mjestu kvara). Ova struja sadrži, dakle, djelatnu i kapacitivnu komponentu.

Glede načina rada promatrane niskopodesive usmjerene homopolarne nadstrujne zaštite ($\vec{I}_0 >$) može se odabrati:

- $\sin\phi$ spoj,
- $\cos\phi$ spoj.

Kod $\sin\phi$ spoja za djelovanje dotične zaštite mjerodavna je kapacitivna komponenta struje kvara. Stoga se ovaj spoj zaštite $\vec{I}_0 >$ preferira u distribucijskim mrežama s **izoliranim zvjezdštim** energetskih transformatora. U dotičnim mrežama spoj faznog vodiča sa zemljom je zemljospoj, a ne jednopolni kratki spoj. Naime, kod zemljospoja popratne struje kvara su kapacitivnog karaktera.

Kod cosφ spoja za djelovanje niskopodesive usmjerene homopolarne nadstrujne zaštite ($\vec{I}_0 >$) mjerodavna je pak djelatna komponenta struje kvara. Zbog toga se ovaj spoj zaštite $\vec{I}_0 >$ preferira koristiti u distribucijskim mrežama ***uzemljenim preko malog djelatnog otpornika***. Naime, u ovim mrežama struja jednopolnoga kratkog spoja je dominantno djelatnog karaktera.

Valja reći da se zaštita $\vec{I}_0 >$ može podesiti vrlo osjetljivo, jer ona istodobno koristi podatke o trostrukim nultim/homopolarnim naponima i strujama na mjestu svoje ugradnje. Na temelju dotičnih nultih napona i struja zaštita $\vec{I}_0 >$ utvrđuje smjer snage nultog redoslijeda. Riječ je stoga o usmjerenoj homopolarnoj zaštiti. Treba inače reći da je raspodjela nulte komponente napona po distribucijskoj mreži izloženoj kvaru sa zemljom vrlo jednolika ($V_0 \approx V_n$). Zbog toga je niskopodesiva usmjerena homopolarna nadstrujna zaštita ($\vec{I}_0 >$) vrlo stabilna (nema tzv. "mrtvih" zona).

Što se tiče vremenskih podešenja niskopodesive usmjerene homopolarne nadstrujne zaštite ($\vec{I}_0 >$) vrijedi sve isto što je rečeno o vremenskim podešenjima običnih homopolarnih nadstrujnih zaštita ($I_0 >$). Vidjeti stoga podpoglavlje 3.2.1. Na kraju valja reći da zaštita $\vec{I}_0 >$ ne može korektno djelovati u slučaju kvara u njenim naponskim krugovima (naponski transformator i sl.).

Naime, uslijed stanovite nesimetrije elemenata mreže moguća je pojava ukupnog nesimetričnog napona, U_{nes} , tj.:

$$3V_0 = U_{nes} \quad (3.2-89)$$

Ovaj napon se javlja u mreži bez kvara i može se odrediti mjeranjem.

Podešenje praga napona prorade niskopodesive usmjerene homopolarne nadstrujne zaštite ($\vec{I}_0 >$) provodi se pomoću izraza (3.2-80), kako je to pokazano u podpoglavlju 3.2.2. Sve prethodno rečeno, vezano uz izraz (3.2-80), vrijedi i ovdje.

Podešenje mjernog člana niskopodesive usmjerene homopolarne nadstrujne zaštite ($\vec{I}_0 >$) mora pritom zadovoljiti sljedeću relaciju:

$$i_{p0}^{\prime} \geq \max(i_{p0}^{\prime}, i_{p0}^{\prime\prime}) \quad (3.2-90)$$

gdje su:

$$i_{p0}^{\prime} = k_s^{\prime} \cdot \frac{3 \cdot I_{0C}^{\prime}}{P_i} \quad (3.2-91)$$

$$i_{p0}^{\prime\prime} = k_s^{\prime\prime} \cdot (0.06 \div 0.1) \cdot i_{2n} \quad (3.2-92)$$

Veličine upotrijebljene u izrazima (3.2-91) i (3.2-92) imaju sljedeća značenja:

$k_s^{\prime}, k_s^{\prime\prime}$ - koeficijenti sigurnosti; veći su od jedinice,

I_{0C}^{\prime} - nulta komponenta struje koja se zatvara dozemnim kapacitetima voda (zaštita ovog voda se podešava) kada on nije izložen kratkom spoju sa zemljom; dotični kvar je pak prisutan na nekom od preostalih vodova promatrane mreže, P_i , i_{2n} – nazivni prijenosni omjer i nazivna sekundarna struja spomenutih strujnih transformatora, respektivno.

Valja navesti da izraz (3.2-91) predstavlja kriterij tzv. zdravog voda. Izraz (3.2-92) predstavlja pak kriterij minimalne struje strujnih transformatora. Riječ je o tzv. "lažnoj" struci, koja se javlja uslijed struja magnetiziranja spomenutih strujnih transformatora. Ona se obično kreće u području od 6% do 10% nazivne sekundarne struje strujnih transformatora.

Na slici 3.2-13 prikazan je primjer raspodjele struja jednopolnoga kratkog spoja u distribucijskoj mreži uzemljenoj preko malog djelatnog otpornika. Prikazan je tijek pripadnih trostrukih nultih komponenti struja. Spomenuti kvar je nastupio na proizvoljno odabranom vodu broj 1 na slici 3.2-13. Distributivna mreža pritom sadrži veći broj vodova. Na dotičnoj slici prikazana su i mjesta ugradnje niskopodesive usmjerene homopolarne nadstrujne zaštite ($\vec{I}_0 >$). Kao što je navedeno, spomenuta zaštita se priključuje na **sumacioni spoj pripadnih strujnih transformatora i otvorenim trokut pomoćnih sekundarnih namota jednopolno izoliranih naponskih transformatora**.

4. ZAŠTITA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Energetski transformator je sveprisutan element rasklopnih postrojenja, trafostanica i elektrana elektroenergetskog sustava na svim naponskim razinama. On ima vitalnu funkciju u elektroenergetskom sustavu i predstavlja vrlo skup pojedinačan element. Stoga njegova učinkovita zaštita od mogućih kvarova predstavlja važnu komponentu u cijelokupnom sustavu relejne zaštite elektroenergetskog sustava.

Izolacija energetskih transformatora je u pogonu izložena, osim pogonskog napona, djelovanju: privremenih, sklopnih i atmosferskih prenapona. Također je izložena procesu neumitnog starenja, te mehaničkim naprezanjima do kojih dolazi uslijed dinamičkih sila u uvjetima nastupa kratkih spojeva. Stoga u pogonu energetskih transformatora treba računati s mogućnošću kvara. Mogući kvarovi energetskog transformatora jesu:

- međufazni kratki spojevi u transformatoru ili na njegovim izvodima,
- kratki spojevi između zavoja iste faze,
- kratki spojevi sa zemljom (ili kotlom) namota transformatora ili njegovih izvoda.

U pogonu su najčešći preskoci na izvodima iz transformatora i spojevi među zavojima iste faze. Potonje kratke spojeve izazivaju vrlo strmi prenaponski valovi. Česti su također i preskoci ili proboji prema uzemljenim dijelovima energetskog transformatora.

Kao zaštita od navedenih kvarova energetskih transformatora mogu se upotrijebiti slijedeće zaštite:

- diferencijalna zaštita,
- plinska zaštita (Buchholtzov relaj),
- zemljospojna / homopolarna zaštita,
- niskopodesiva i visokopodesiva nadstrujna zaštita,
- distantna zaštita.

U slučaju nastupa navedenih kvarova, spomenuta relejna zaštita mora djelovati na prekidač i u što kraćem vremenu isključiti transformator (odvojiti ga od svih izvora napajanja), kako bi se izbjeglo razaranje kotla te curenje i eventualno zapaljenje transformatorskog ulja, kao i smanjenje opsega poslova pri popravku transformatora.

Osim navedenih kvarova, u pogonu se još javljaju i razna opasna / abnormalna stanja. To je u prvom redu preopterećenje transformatora, do kojeg može doći uslijed ispada drugog transformatora ili vodova koji paralelno napajaju isto potrošačko područje. Znatno opasnije (nepovoljnije) su struje kratkog spoja koje teku kroz energetski transformator uslijed kvarova u napajanoj mreži (ove struje nisu posljedica kvara u samom transformatoru). Kod ovih opasnih (abnormalnih) stanja zahtjeva se da zaštita energetskog transformatora (NE diferencijalna zaštita) signalizira kvar i isključi energetski transformator prije nego li dođe do njegovog kvara, ili do znatnog sniženja životne dobi izolacije transformatora. Naime, životna dob izolacije transformatora usko je povezana s radnom temperaturom kojoj je izložena pri eksploataciji transformatora i obrnuto je proporcionalna s povećanjem radne temperature. Stoga je potrebno ne izlagati izolaciju transformatora povećanim toplinskim naprezanjima. Upravo ovakva toplinska naprezanja izolacije transformatora posljedica su velikih struja

kvara (Jouleovi gubici u namotima) koje prolaze kroz transformator pri napajanju kvara u nekom od njegovih izvoda u napajanoj mreži (nije riječ o kvaru u samom transformatoru).

Za zaštitu od nedozvoljenih stanja preopterećenja energetskog transformatora najčešće se primjenjuje:

- termička zaštita.

Za zaštitu energetskog transformatora od struja tzv. vanjskih kratkih spojeva (kvarovi izvan ali u blizini energetskog transformatora) najčešće se primjenjuje:

- nadstrujna zaštita (sa strujno nezavisnom vremenskom karakteristikom) ili
- distantna zaštita.

Valja naglasiti da je diferencijalna zaštita ujedno i temeljna relejna zaštita energetskog transformatora, dok su ostale navedene zaštite pričuvne i/ili dopunske zaštite. Prilikom primjene diferencijalne zaštite energetskih transformatora, između ostalog, treba voditi računa i o sljedećim značajkama:

- broju namota, njihovom spolu i načinu uzemljenja,
- struji magnetiziranja energetskog transformatora; ovo je prirodna pojava koja je prisutna kod svih energetskih transformatora,
- različitim naponskim razinama primarne i sekundarne (i tercijarne ako postoji) strane energetskog transformatora, radi čega se moraju primjeniti strujni transformatori različitih prijenosnih omjera i karakteristika,
- faznom pomaku između struja i napona između primarne i sekundarne (i tercijarne) strane energetskih transformatora grupe spoja zvijezda – trokut (tj. treba voditi računa o grupi spoja transformatora),
- regulaciji napona na višenaponskom namotu energetskog transformatora,
- faznim pomacima i regulacijama napona kod regulacijskih transformatora.

U nastavku će se iznijeti detaljan prikaz načina primjene diferencijalne zaštite dvonamotnih i tronomotnih trofaznih energetskih transformatora. Usputno će se spomenuti i neke od preostalih zaštita koje su prethodno navedene i primjenjuju se u sustavu relejne zaštite energetskih transformatora.

4.1. Diferencijalna zaštita energetskog transformatora

Diferencijalna zaštita predstavlja, dakle, osnovnu (temeljnu) zaštitu energetskog transformatora. Njena IEC oznaka glasi Id, dok je njena ANSI oznaka 87T. Diferencijalna zaštita ima strogo definiranu zonu štićenja (zaštitnu zonu), koja je omeđena strujnim transformatorima na koje se ona priključuje. Sve što se nalazi u području između spomenutih strujnih transformatora jest zaštićeno primjenjenom diferencijalnom zaštitom (štićeni objekt, tj. sam energetski transformator te dio primarnog strujnog kruga do strujnih transformatora s obje strane energetskog transformatora). Dakle, diferencijalna zaštita ima strogo omeđenu zonu svog djelovanja / štićenja.

Diferencijalna zaštita mora djelovati isključivo u slučaju kvarova unutar svoje zaštitne zone (kvarovi na potezu između strujnih transformatora na koje je priključena). Dakle, riječ je o kvarovima u samom štićenom objektu (energetskom transformatoru) i kvarovima na primarnim spojnim vodovima na potezu od energetskog transformatora do strujnih transformatora s obje strane. U slučaju kvarova izvan štićene zone, diferencijalna zaštita ne smije djelovati.

Budući da je energetski transformator element koji povezuje mreže dviju (ili čak triju) različitih naponskih razina, njegova nazivna struja na primarnoj i sekundarnoj (i tercijarnoj ako postoji) strani neće biti jednake. Njihove primarne struje su standardizirane tako da je u većini slučajeva nemoguće idealno prilagođenje strujnih transformatora prijenosnom omjeru energetskog transformatora. Osim toga, potrebno je primijeniti strujne transformatore s različitim nazivnim prijenosnim omjerima na svakom od namota / strana energetskog transformatora, na koje će se priključiti diferencijalna zaštita. Kao posljedica primjene strujnih transformatora različitih nazivnih prijenosnih omjera oni će nužno imati različite i ostale tehničke podatke: nazivne snage, karakteristike magnetiziranje jezgre i tome sl. Ovo će imati značajan utjecaj na osjetljivost i sigurnost prorade diferencijalne zaštite transformatora.

Osim toga, kod različitih grupa spojeva (zvijezda – trokut) različit je i fazni pomak struja s njegove višenaponske i niženaponske strane. Zbog toga su potrebni strujni međutransformatori za prilagođenje sekundarnih struja strujnih transformatora po iznosu i faznom kutu. Oni mogu biti prisutni kao fizičke jedinice (u slučaju primjene elektromehaničke i statičke diferencijalne zaštite) ili pak softverski implementirani na razini numeričkog diferencijalnog releja.

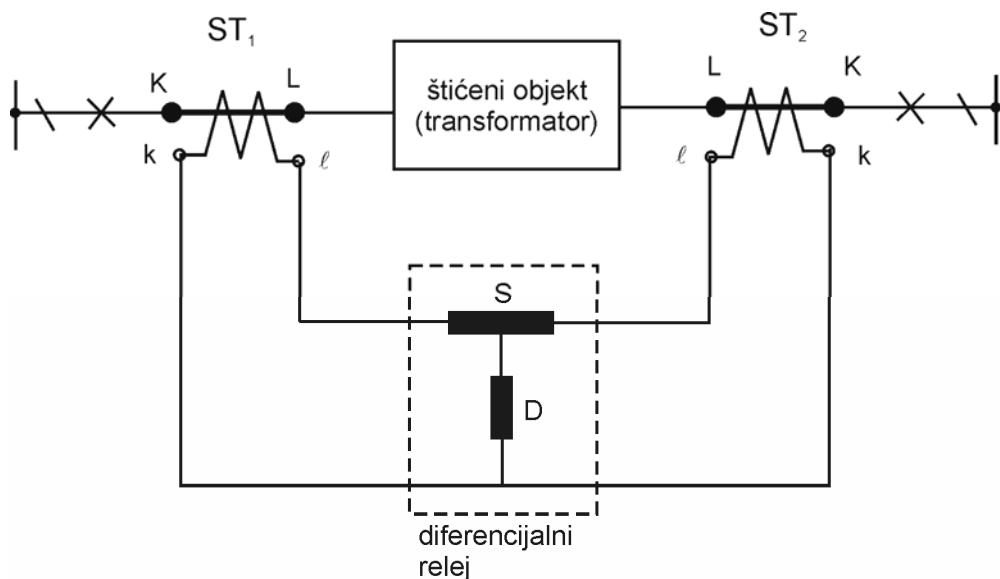
Još teže su prilike kod regulacijskih transformatora kod kojih se prijenosni odnos mijenja tijekom pogona, te ne odgovara prijenosnom omjeru za koji su prilagođeni / odabrani strujni međutransformatori. O svemu spomenutom, između ostalog, valja voditi računa pri primjeni diferencijalne zaštite energetskih transformatora.

4.1.1. Teorijske osnove stabilizirane diferencijalne zaštite

Osnovni element diferencijalne zaštite energetskog transformatora jest stabilizirani diferencijalni relej. On djeluje na temelju usporedbe struja koje ulaze i izlaze iz štićenog objekta (zaštitne zone). Sastoje se od:

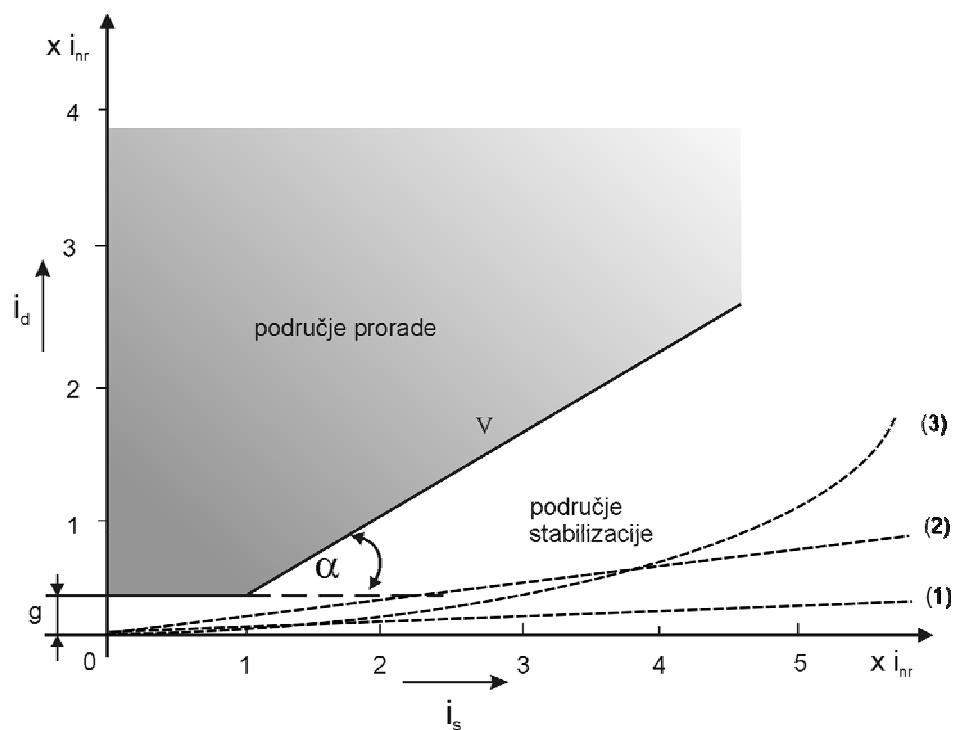
- stabilizacijske grane,
- diferencijalne grane.

Na slici 4.1-1 prikazana je nadomjesna shema načina priključka stabiliziranog diferencijalnog releja. On je priključen sa sekundarne strane strujnih transformatora (ST_1 i ST_2), koji su ugrađeni na obje strane štićenog objekta, tj. energetskog transformatora. Strujni transformatori ST_1 i ST_2 dakle određuju / omeđuju područje štićenja pripadnog im diferencijalnog releja. S ozнаком S na slici 4.1-1 je označena stabilizacijska grana, a s oznakom D diferencijalna grana stabilizacijskog diferencijalnog releja.



Slika 4.1-1 Grafička ilustracija načina priključka stabilizirane diferencijalne zaštite.

Karakterističan izgled proradne karakteristike diferencijalnog releja prikazana je na slici 4.1-2. Osim toga, na slici 4.1-2 prikazane su i vrste pogrešaka u mjerenu stabilizirane i diferencijalne struje, koje su posljedica: (1) struje magnetiziranja energetskog transformatora; (2) strujno zavisnih pogrešaka strujnih transformatora na obje strane štićenog objekta (tj. nesavršenosti strujnih transformatora); (3) različitih prijenosnih omjera strujnih transformatora na VN i NN strani energetskog transformatora, te utjecaja regulacije napona na VN strani transformatora (ako postoji).



Slika 4.1-2 Karakterističan izgled proradne karakteristike stabilizirane diferencijalne zaštite.

Oznake upotrijebljene na slici 4.1-2 imaju sljedeća značenja:

- i_s – stabilizacijska struja (ili tzv. struja držanja); teče kroz stabilizaciju granu diferencijalnog releja (grana označena s oznakom S na slici 4.1-1),
- i_d – diferencijalna struja; teče kroz diferencijalnu granu diferencijalnog releja (grana označena s oznakom D na slici 4.1-1).

Obje navedene struje izražene su kao višekratnici nazivne struje diferencijalnog releja (i_{nr}), koja može biti 1A ili 5A. Ovo je standardna praksa kod prikaza zaštitnih karakteristik diferencijalne zaštite. Na slici 4.1-2 osjenčano je označeno područje djelovanja diferencijalne zaštite (koje predstavlja dio iznad proradne karakteristike). Ukoliko radna točka stabilizirane diferencijalne zaštite "padne" u osjenčano područje na slici 4.1-2, diferencijalni relj djeluje, jer je riječ o kvaru unutar štićenog područja (ukoliko su, naravno, pravilno odabrani parametri koji definiraju radnu / proradnu karakteristiku diferencijalnog relja). Ukoliko se radna točka nalazi ispod proradne karakteristike prema slici 4.1-2 (rijec je o vanjskom kvaru pri kojem diferencijalna zaštita ne smije djelovati) diferencijalni relj se nalazi u području stabilizacije i ne djeluje na takav kvar.

Proradna / radna karakteristika diferencijalnog relja, prema slici 4.1-2, definira se s dva parametra koji se izražavaju u postocima (%). To su:

- osnovno podešenje (g), koje uzima u obzir strujno nezavisne pogreške,
- koeficijent stabilizacije (v), koji uzima u obzir strujno zavisne pogreške (strujnih transformatora na koje je relj priključen).

Spomenuti parametri definiraju se sljedećim izrazima:

$$g = \frac{i_d}{i_{nr}} \cdot 100, \quad \text{pri } i_s = 0 \quad (4.1-1)$$

$$v = \frac{f\left(\frac{i_s}{i_{nr}} = a\right) - f\left(\frac{i_s}{i_{nr}} = 1\right)}{a - 1} \cdot 100, \quad \text{pri } a > 1 \quad (4.1-2)$$

pri čemu su:

i_d, i_s – diferencijalna i stabilizacijska struja (tzv. struja držanja), respektivno,
 f – funkcionalna veza oblika $i_d/i_{nr} = f(i_s/i_{nr})$.

Temeljem izraza (4.1-1) uočava se da je osnovno podešenje (g) radne karakteristike definirano kao postotak diferencijalne (isklopne) struje i_d prema nazivnoj struci relja i_{nr} , pri stabilizacijskoj struci jednako nuli ($i_s = 0$). Može se obično podešavati u području 20 – 50 %, tj. vrijedi:

$$g \in [20 - 50] \% \quad (4.1-3)$$

Izbor parametra osnovnog podešenja (g) odnosi se na zadovoljenje uvjeta da diferencijalna zaštita ne prorađuje uslijed prisutnih nesavršenosti strujnih transformatora na

koje je priključena, kao što su: razlike u njihovim prijenosnim omjerima, tehničkim značajkama, krivuljama magnetiziranja i tome sl.

Koeficijent stabilizacije (v), definiran prema izrazu (4.1-2), odgovara koeficijentu smjera pravca na radnoj / proradnoj karakteristici (vidjeti sliku 4.1-2) iznad koljena, tj.:

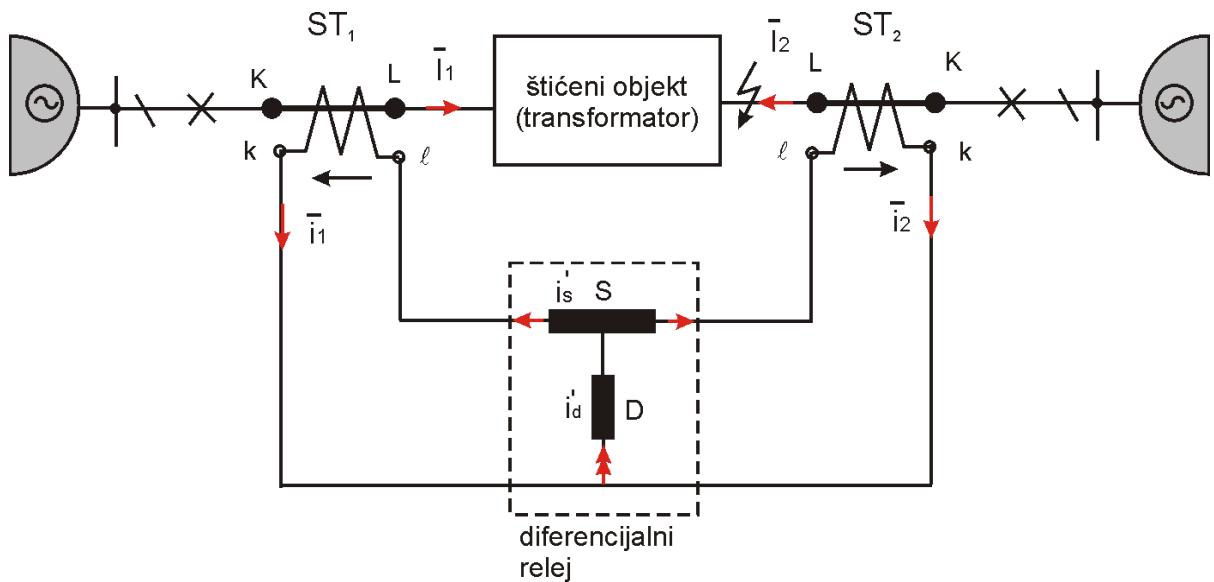
$$v = t \cdot g \alpha \cdot 100 \quad (4.1-4)$$

On se obično može podešavati u sljedećem području:

$$v \in [20 - 50] \% \quad (4.1-5)$$

Ovaj parametar uvažava činjenicu da diferencijalna zaštita ne smije djelovati u slučaju zasićenja jednog ili obaju strujnih transformatora (primjerice istosmјernom komponentom struje kratkog spoja) pri nastupu kvara izvan štićenog područja.

Situacija nastupa kvara u području između strujnih transformatora ST_1 i ST_2 (dakle, unutar štićenog područja diferencijalne zaštite prema slici 4.1-1), a ukoliko se dotični kvar napaja s obje strane, grafički je ilustrirana na slici 4.1-3. Na dotičnoj slici prikazana je raspodjela struja kvara u primarnom i sekundarnom krugu, za slučaj nastupa spomenutog kvara (kratkog spoja) unutar štićenog područja.



Slika 4.1-3 Raspodjela struje u primarnom i sekundarnom krugu diferencijalne zaštite kod kvara unutar štićenog područja i dvostranog napajanja.

Struje u stabilizacijskom i diferencijalnom krugu (granama) diferencijalne zaštite (u skladu s oznakama i simbolikom primijenjenom na slici 4.1-3) respektivno iznose:

$$i_s' = \frac{|\bar{i}_1 - \bar{i}_2|}{2} \quad (4.1-6)$$

$$\dot{i}_d = |\bar{i}_1 + \bar{i}_2| \quad (4.1-7)$$

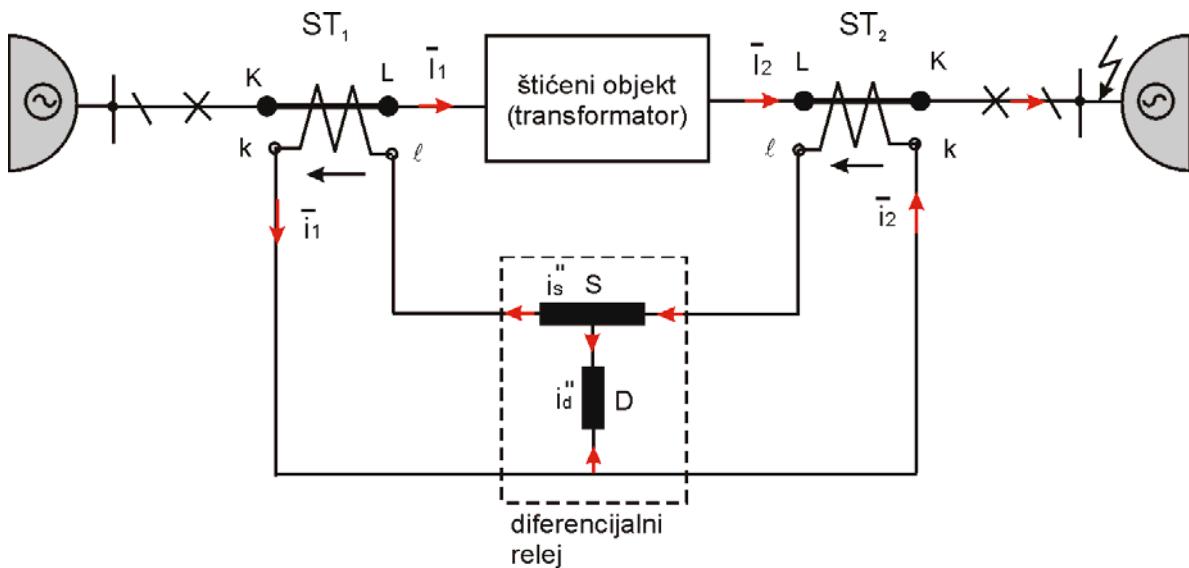
pri čemu su:

\bar{i}_1 - sekundarna struja strujnog transformatora ST₁,

\bar{i}_2 - sekundarna struja strujnog transformatora ST₂,

Vidi se, naime, da se struje u stabilizacijskoj grani umanjuju, a u diferencijalnoj grani se povećavaju. Radna točka diferencijalnog releja, definirana kao (\dot{i}_s, \dot{i}_d) biti će stoga u području prorade (iznad radne karakteristike diferencijalnog releja prema slici 4.1-2) i diferencijalni relej će proraditi te će isključiti štićeni objekt s obje strane. Djelovanje diferencijalnog releja se odvija bez vremenskog zatezanja, tj. u osnovnom vremenu djelovanja samog releja (tzv. vlastito vrijeme djelovanje releja).

Situacija nastupa kvara izvan područja omeđenih strujnim transformatorima ST₁ i ST₂ (dakle, izvan štićenog područja diferencijalne zaštite prema slici 4.1-1), a ukoliko se dotični kvar napaja s obje strane, grafički je ilustrirana na slici 4.1-3. Na dotičnoj slici prikazana je ponovno raspodjela struja kvara u primarnom i sekundarnom krugu, za slučaj nastupa spomenutog kvara (kratkog spoja).



Slika 4.1-4 Raspodjela struje u primarnom i sekundarnom krugu diferencijalne zaštite kod kvara izvan štićenog područja i dvostranog napajanja.

Odgovarajuće struje u stabilizacijskoj i diferencijalnoj grani (temeljem oznaka i smjerova struja prikazanih na slici 4.1-4), u ovom slučaju, respektivno iznose:

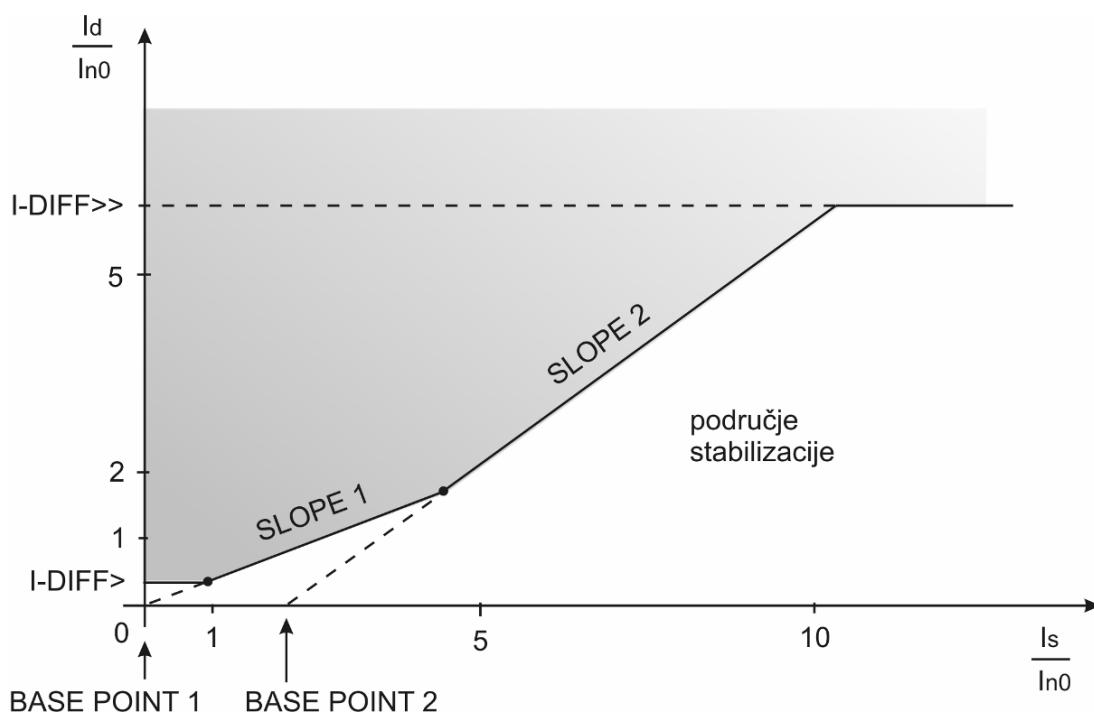
$$\dot{i}_s'' = \frac{|\bar{i}_1 + \bar{i}_2|}{2} \quad (4.1-8)$$

$$\dot{i}_d'' = |\bar{i}_1 - \bar{i}_2| \quad (4.1-9)$$

Struja u stabilizacijskog grani se u ovom slučaju povećava, dok se struja u diferencijalnoj grani smanjuje i time radna točka releja (i_s^u, i_d^u) "pada" u područje stabilizacije (ispod radne karakteristike diferencijalnog releja prema slici 4.1-2) i stoga diferencijalni relej neće proraditi. To je sasvim u redu, jer kvar nije unutar njegove nadležnosti.

Situacija identična ovoj prikazanoj na slici 4.1-4 javila bi se i u slučaju jednostranog napajanja te nastupa kvara izvan štićenog područja. U slučaju pak nastupa kvara unutar štićenog područja i jednostranog napajanja, struja kvara ulazi u štićeno područje samo sa strane napajanja. S druge strane štićenog objekta nema struje. Dakle, i u ovom slučaju radna točka releja nalaziti će se iznad proradne karakteristike i relej će djelovati. To je sasvim u redu.

Moderni (numerički) uređaji diferencijalne zaštite posjeduju relativno složeniji oblik radne karakteristike, koja omogućuje kvalitetniju zaštitu energetskog transformatora. Primjer radne karakteristike numeričkog diferencijalnog releja prikazan je na slici 4.1-5. Na dotičnoj slici područje djelovanja diferencijalne zaštite prikazano je zatamnjeno (osjenčano). Ono se nalazi iznad radne karakteristike stabilizacijskog stupnja diferencijalne zaštite. Ispod dotične radne karakteristike nalazi se područje stabilizacije (ne djelovanja) diferencijalne zaštite.



Slika 4.1-5 Radna karakteristika numeričke diferencijalne zaštite.

Prema slici 4.1-5, radna karakteristika stabilizacijskog stupnja diferencijalne zaštite sastoji se od tri dijela. Ona je prikazana sljedećim veličinama:

I-DIFF $>$ - osnovno podešenje (odgovara prethodno uvedenoj veličini g),

BASE POINT 1 – nultočka 1. kosog pravca,

SLOPE 1 – koeficijent smjera (koeficijent stabilizacije) 1. kosog pravca,

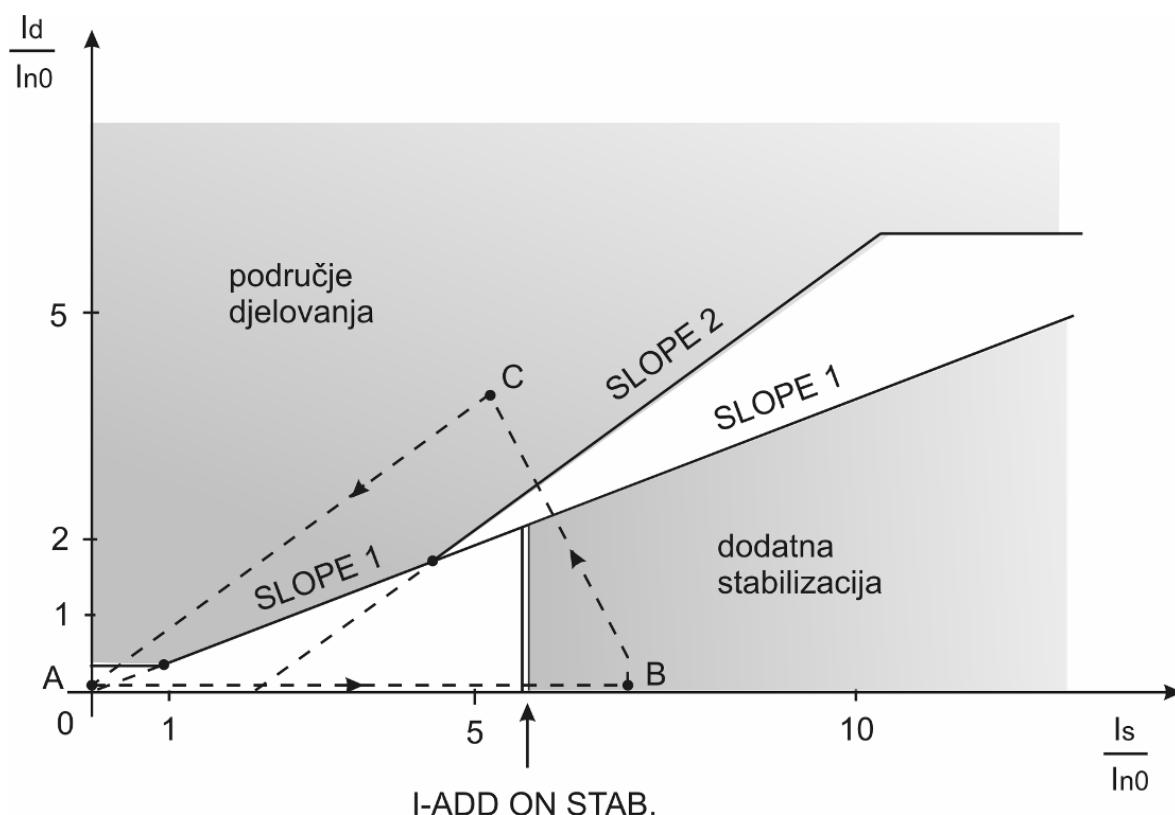
BASE POINT 2 – nultočka 2. kosog pravca,

SLOPE 2 – koeficijent smjera (koeficijent stabilizacije) 2. kosog pravca,

I-DIFF>> - nestabilizirani stupanj diferencijalne zaštite.

Valja navesti da se veličinama BASE POINT 1 i SLOPE 1 (ove veličine definiraju 1. pravac) ostvaruje stabilizacija u odnosu na strujnu pogrešku strujnih transformatora, te kod regulacijskih transformatora na strujnu pogrešku uslijed promjene prijenosnog omjera. Veličinama BASE POINT 2 i SLOPE 2 (one definiraju 2. pravac) ostvaruje se stabilizacija u području većih struja koje mogu izazvati zasićenje strujnih transformatora. Veličina I-DIFF>> definira tzv. nestabilizirani stupanj diferencijalne zaštite koji se odnosi na djelovanje diferencijalne zaštite u slučaju kvarova unutar štićenog područja koji su praćeni vrlo velikim iznosima struja kvara.

Osim navedenog, može se koristiti i dodatna stabilizacija (engl.: add-on stabilization). Riječ je o dinamičkoj stabilizaciji koja se aktivira pri kvarovima izvan štićenog područja. Naime, istosmjerna komponenta struje kratkog spoja može izazvati značajno zasićenje glavnih strujnih transformatora (ST_1 i ST_2). Dotična istosmjerna komponenta struje se prigušuje odgovarajućom vremenskom konstantom. Razvija se popratna prijelazna pojava u dotičnim strujnim transformatorima. Njihovo zasićenje ne nastupa odmah u momentu nastupa kvara, već nešto kasnije. Radna točka diferencijalne zaštite određena je iznosima diferencijalne i stabilizacijske struje. Do momenta zasićenja izmjenična komponenta struje kvara protjeće, dakako, primarnim namotima glavnih strujnih transformatora. Odgovarajuća radna točka za ovo stanje označena je na slici 4.1-6 s oznakom B.

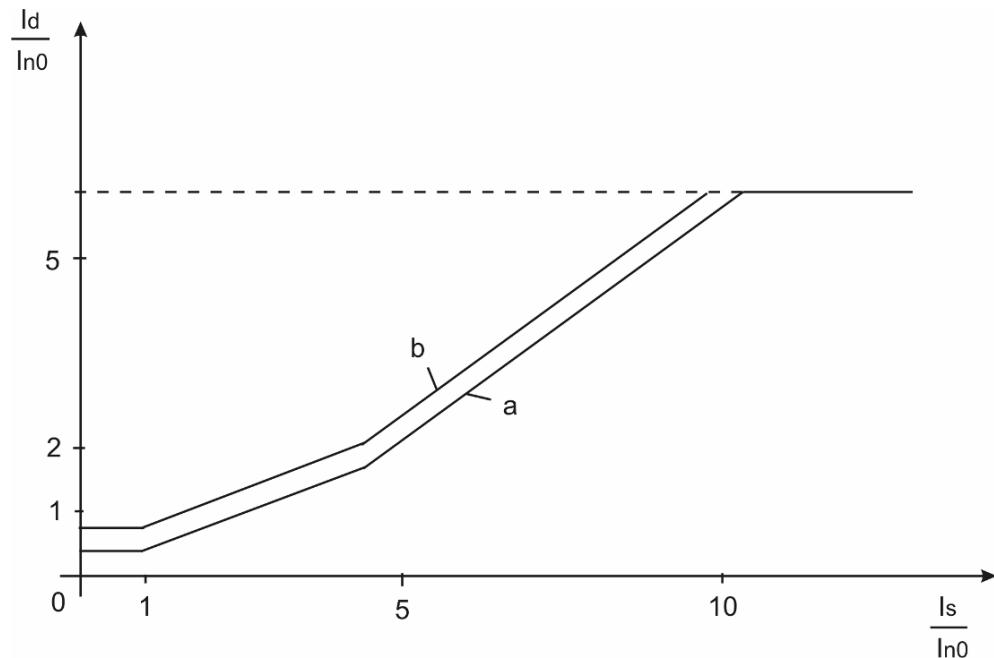


Slika 4.1-6 Kretanje radne točke diferencijalne zaštite pri zasićenju jednog od glavnih strujnih transformatora i područje dodatne stabilizacije.

Na dotičnoj slici prikazano je i dinamičko kretanje radne točke do momenta zasićenja spomenutih strujnih transformatora (od A do B). Oznaka I-ADD ON STAB. na slici 4.1-6 predstavlja vrijednost dinamičke stabilizacijske struje (koja se podešava na uređaju numeričke zaštite) iznad koje će se uključiti spomenuta dodatna stabilizacija. Na slici 4.1-6 prikazano je također daljnje kretanje radne točke, primjerice, pri zasićenju jednog od navedenih strujnih transformatora. Riječ je o točki C. Ona se nalazi u području djelovanja promatrane diferencijalne zaštite. Dakle, u ovom slučaju došlo bi do prorade diferencijalne zaštite, iako je kvar izvan štićenog područja. To, naravno, nije u redu. Zato se koristi spomenuta dodatna stabilizacija.

Kao što se vidi sa slike 4.1-6, područje dodatne stabilizacije je s gornje strane ograničeno 1. kosim pravcem (veličine BASE POINT 1 i SLOPE 1) spomenutog stabilizacijskog stupnja promatrane diferencijalne zaštite. Valja navesti da se indikator dodatne stabilizacije aktivira tijekom prve četvrtine periode (5 ms) od momenta nastupa kvara izvan štićenog područja. Pritom se blokira djelovanje dotične diferencijalne zaštite kroz određeno vrijeme koje se može podesiti na samom uređaju. Međutim, ukoliko se dogodi da se pripadna radna točka stabilno kreće u području djelovanja diferencijalne zaštite tijekom dviju perioda (40 ms) tada se briše spomenuta blokada. To znači da je u štićenom području nastupio tzv. evoluirajući kvar (on može biti posljedica prije nastalog kvara izvan štićenog područja). Tada, naime, diferencijalna zaštita djeluje na prije opisani način.

Pored svega navedenog, radi dodatne sigurnosti, pri energizaciji transformatora moguće je odabrati povećanje proradnih vrijednosti stabilizacijskog stupnja promatrane diferencijalne zaštite. Na slici 4.1-7 prikazane su spomenute radne karakteristike stabilizacijskog stupnja diferencijalne zaštite.

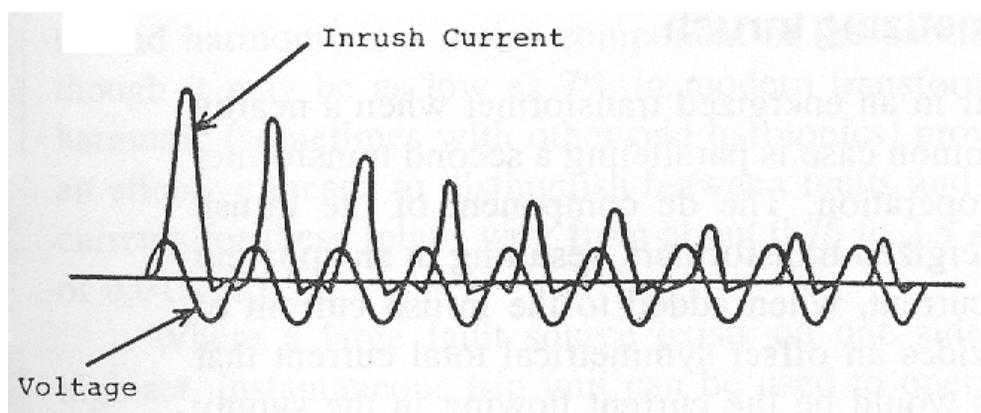


Slika 4.1-7 Povećanje proradnih vrijednosti stabilizacijskog stupnja (karakteristika b) pri energizaciji transformatora.

S oznakom a) je označena dotična karakteristika za redovno / uobičajeno stanje transformatora, a s oznakom b) radna karakteristika pri njegovoj energizaciji. Naime, općenito pri energizaciji štićenog objekta (transformatora) remanentni / zaostali magnetski tok u glavnim strujnim transformatorima može izazvati njihovo dodatno zasićenje, što može imati dodatni nepovoljni utjecaj na korektno djelovanje diferencijalne zaštite, pri kvarovima izvan njenog štićenog područja.

Valja navesti da se pri ukapčanju energetskog transformatora u stanje praznog hoda blokira djelovanje diferencijalnog releja. Razlog tome je što se pri ukapčanju energetskog transformatora u prazni hod javlja struja magnetiziranja, koja se manifestira kao diferencijalna struja. Naime, struja magnetiziranja ulazi s jedne strane štićenog objekta ali ne izlazi s druge strane, što diferencijalna zaštita tumači kao diferencijalnu struju (struju kvara unutar štićenog objekta). Slična situacija je prethodno opisana i javlja se kod kvara unutar štićenog područja i jednostranog napajanja.

Struja magnetiziranje može poprimiti značajne vrijednosti u ovim slučajevima, koje prelaze vrijednost osnovnog podešenja proradne karakteristike diferencijalnog releja. Stoga bi diferencijalni relj djelovao. Isključenje transformatora od strane diferencijalnog relja pri njegovom uključenju u prazni hod bilo bi pogrešno. Stoga je potrebno osigurati njegovo blokiranje pri uključivanju energetskog transformatora u stanje praznog hoda. U tu svrhu koristi se postojanje značajnog iznosa struje **drugog harmonika** u struji uklapanja transformatora. Slika 4.1-8 prikazuje karakteristični izgled krivulje struje magnetiziranja, pri ukapčanju energetskog transformatora u stanje praznog hoda.



Slika 4.1-8 Grafički izgled karakteristične krivulje struje magnetiziranja energetskog transformatora pri ukapčanju u prazni hod.

Struja magnetiziranja, koja u većoj ili manjoj mjeri sadrži udio 2. harmonika, javlja se u sljedećim situacijama:

- a) ukapčanje transformatora u prazni hod,
- b) nagli ispad tereta ili isključenje bliskog kratkog spoja,
- c) uključenje paralelnog transformatora u prazni hod (simpatetičko magnetiziranje).

Jednako tako, pri porastu napona u mreži (ili promjeni regulacijske preklopke višenaponskog namota kod transformatora s regulacijom napona) javlja se u struji praznog hoda transformatora značajni udio struje neparnih harmonika (*treći i peti harmonik*). Ova činjenica se također koristi za blokiranje djelovanja diferencijalne zaštite. Naduzbuda transformatora (engl.: overexcitation), koja je praćena većim ili manjim udjelom 3. i 5. harmonika u struji energetskog transformatora, javlja se u sljedećim situacijama:

- a) kod povišenja napona u mreži,
- b) kod smanjenja frekvencije u mreži.

Za otkrivanje spomenutih struja drugog, trećeg i petog harmonika rabe se odgovarajući pojasni filteri koji se nalaze u sastavu diferencijalnog releja. Oni mogu biti izvedeni (kod numeričkog releja) u vidu odgovarajućeg softvera koji provodi kontinuiranu Fourierovu transformaciju nad strujama te na taj način određuje sadržaj (udio) pojedinih harmonika.

Valja naglasiti da se kod modernih energetskih transformatora novijih izvedbi, zbog upotrebe vrlo kvalitetnih feromagnetskih limova kao i zbog optimiranja njihove izvedbe, značajno smanjuje udio drugog harmonika u struji magnetiziranja energetskog transformatora. Javlja se stoga problem pri identificiranju stanja ukapčanja u prazni hod energetskog transformatora korištenjem postupka analize udjela drugog harmonika. Javljuju se stoga neke nove metode prepozvanja ovog stanja.

Jedna od popularnih metoda bazirana je na umjetnim neuronskim mrežama (engl.: Artificial Neural Networks, ANN). Naime, umjetna neuronska mreža se trenira (bilo stvarnim podacima mjerena struje ukapčanja energetskog transformatora ili podacima koji su rezultat numeričkih proračuna prijelaznog procesa ukapčanja transformatora) da nauči „prepoznati“ stanje ukapačanja energetskog transformatora u prazni hod. Osnovni koncept umjetnih neuronskih mreža dan je u Prilogu A. Valja naglasiti da je ovaj pristup još uvijek u fazi razvoja i trenutno ne postoji na tržištu numerički diferencijalni releji koji bi implementirali ovaj pristup.

Na kraju treba reći, da se nakon djelovanja diferencijalne zaštite energetski transformator ne smije ponovno uključiti na mrežu prije nego li se on ispita i utvrđi uzrok djelovanja diferencijalne zaštite.

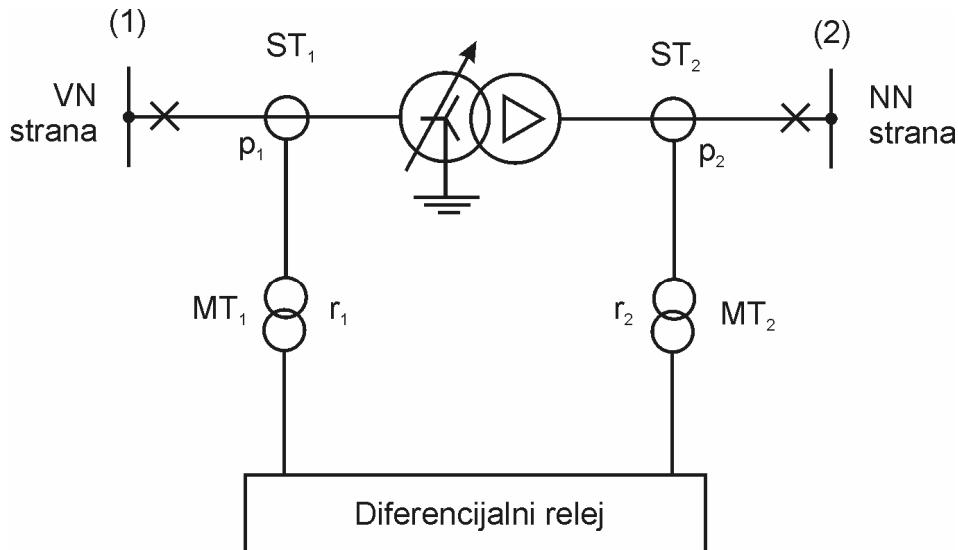
4.1.2. Diferencijalna zaštita dvonamotnog transformatora

Dvonamotni trofazni energetski transformatori se vrlo često koriste u elektroenergetskom sustavu, posebice u distribucijskoj mreži te kao blok transformatori u elektranama. Diferencijalna zaštita dvonamotnog energetskog transformatora primjenjuje se u tzv. dvije točke i opisati će se u nastavku. Slika 4.1-9 grafički ilustrira pojednostavljenu jednopolnu nadomjesnu shemu priključka diferencijalne zaštite dvonamotnog energetskog transformatora.

Osnovni podaci dvonamotnog energetskog transformatora jesu:

S_n – nazivna snaga,

U_{n1} – nazivni napon VN strane,
 U_{n2} – nazivni napon NN strane,
 regT – opseg regulacije VN namota energetskog transformatora u %-cima,
grupa spoja (npr. YNd5).



Slika 4.1-9 Pojednostavljena jednopolna nadomjesna shema priključka diferencijalne zaštite dvonamotnog energetskog transformatora.

Oznake upotrijebljene na slici 4.1-9 imaju sljedeća značenja:

- ST₁ – strujni transformator na VN strani energetskog transformatora,
- ST₂ – strujni transformator na NN strani energetskog transformatora,
- p₁ – prijenosni omjer strujnog transformatora ST₁,
- p₂ – prijenosni omjer strujnog transformatora ST₂,
- MT₁ – strujni međutransformator između strujnog transformatora ST₁ i diferencijalnog releja,
- MT₂ – strujni međutransformator između strujnog transformatora ST₂ i diferencijalnog releja,
- r₁ – prijenosni omjer strujnog međutransformatora MT₁,
- r₂ – prijenosni omjer strujnog međutransformatora MT₂,
- i_{nr} – nazivna struja diferencijalnog releja (1 A ili 5 A).

Pri projektiranju diferencijalne zaštite dvonamotnog transformatora potrebno je, između ostalog, odrediti i sljedeće veličine:

- prijenosne omjere strujnih transformatora ST₁ i ST₂ ($p_1 = ?$ i $p_2 = ?$),
- prijenosne omjere strujnih međutransformatora MT₁ i MT₂ ($r_1 = ?$ i $r_2 = ?$) i njihove grupe spoja.

Nazivni prijenosni omjer strujnog transformatora (ST₁ i ST₂) definiran je općenito sljedećim izrazom:

$$p_i = \frac{I_{1n}}{i_{1n}} \quad (4.1-10)$$

u kojem su:

I_{1n} – nazivna primarna struja strujnog transformatora u A,

i_{1n} – nazivna sekundarna struja strujnog transformatora u A (može biti 1 A ili 5 A).

Izbor nazivne primarne struje I_{1n} strujnog transformatora ST₁ provodi se na temelju nazivne struje energetskog transformatora na njegovoj višenaponskoj (VN) strani. Nazivna struja energetskog transformatora na njegovoj VN strani određuje se sljedećim izrazom:

$$I_{nTR1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{n1}} \quad (4.1-11)$$

odnosno, ukoliko je riječ o regulacijskom transforamtoru koristi se sljedeći izraz:

$$I_{nTR1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_1} \quad (4.1-12)$$

pri čemu je:

$$U_1 = \sqrt{U_{1\max} \cdot U_{1\min}} \quad (4.1-13a)$$

$$U_1 = 2 \cdot \frac{U_{\max} \cdot U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} \quad (4.1-13b)$$

gdje su: $U_{1\max}$ – maksimalni napon na VN strani energetskog transformatora, $U_{1\min}$ – minimalni napon na VN strani energetskog transformatora. Ovi naponi posljedica su regulacije napona (regulacijska preklopka) na VN strani energetskog transformatora. Valja naglasiti da je relacija (4.1-13b) preporučena od strane proizvođača releja SIEMENS.

Na temelju izračunate vrijednosti I_{nTR1} , korištenjem izraza (4.1-11) ili pak (4.1-12), određuje se nazivna primarna struja I_{1n} strujnog transformatora ST₁. Koriste se pritom podaci o standardnim vrijednostima nazivnih primarnih struja strujnih transformatora iz tablice 2.1.1 (vidjeti podpoglavlje 2.1.1). Valja naglasiti da se pri izboru standardne vrijednosti nazivne primarne struje strujnog transformatora (tablica 2.1.1) treba voditi računa i o činjenici da su strujni transformatori građeni tako da trajno mogu izdržati strujno preopterećenje u iznosu od 20 %.

Već je prethodno bilo spomenuto da nazivna sekundarna struja (i_{1n}) strujnog transforamtora ST₁, temeljem tablice 2.1.2 (vidjeti podpoglavlje 2.1.1) može imati vrijednost 1 A ili 5 A. Njen izbor ovisit će prvenstveno o duljini i vrsti sekundarnog ožičenja (na potezu sekundar strujnog transformatora ST₁ – diferencijalni relej), naponskoj razini, kao i o nazivnoj struci diferencijalnog releta (i_{nr}).

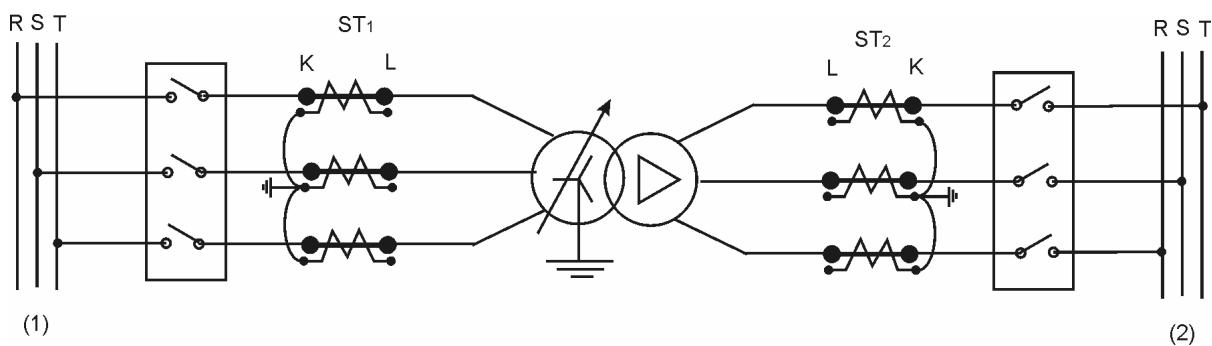
Izbor nazivne primarne struje I_{1n} strujnog transformatora ST_2 provodi se na temelju nazivne struje energetskog transformatora na njegovoj niženaponskoj (NN) strani. Nazivna struja energetskog transformatora na njegovoj NN strani određuje se sljedećim izrazom:

$$I_{nTR2} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{n2}} \quad (4.1-14)$$

Ako na NN strani energetskog transformatora postoji mogućnost regulacije napona, odgovarajući napon u izrazu (4.1-14) se računa kao srednja geometrijska vrijednost maksimalnog i minimalnog napona, kako je to pokazano u izrazu (4.1-13) za slučaj regulacije napona na VN strani. Na temelju relacije (4.1-11) a uvažavajući standardne vrijednosti nazivnih primarnih struja iz tablice 2.1.1 (vidjeti podpoglavlje 2.1.1) određuje se nazivna primarna struja (I_{1n}) strujnog transformatora ST_2 . Ponovno valja uvažiti činjenicu da su strujni transformatori građeni tako da trajno mogu izdržati strujno preopterećenje u iznosu od 20 %.

Kao što je već spomenuto, i nazivna sekundarna struja (i_{2n}) strujnog transformatora ST_2 , temeljem tablice 2.1.2 (vidjeti podpoglavlje 2.1.1) može imati vrijednost 1 A ili 5 A. Njen izbor ovisit će ponovno o duljini i vrsti sekundarnog ožičenja (na potezu sekundar strujnog transformatora ST_2 – diferencijalni relej), naponskoj razini, kao i o nazivnoj struci diferencijalnog releja (i_{nr}).

Zajednička europska praksa (izuzev Velike Britanije, Rusije i Rumunjske) jest da se sekundarni namoti strujnih transformatora redovito spajaju u spoj zvijezda. Zvjezdiste je pritom okrenuto prema sabirnicama i uzemljeno. Ilustracija načina spoja i uzemljenja sekundarnih namota strujnih transformatora prikazana je na slici 4.1-10. Uzemljuju se, dakle, "k" stezaljke strujnih transformatora, kao što je to pokazano na slici 4.1-10.

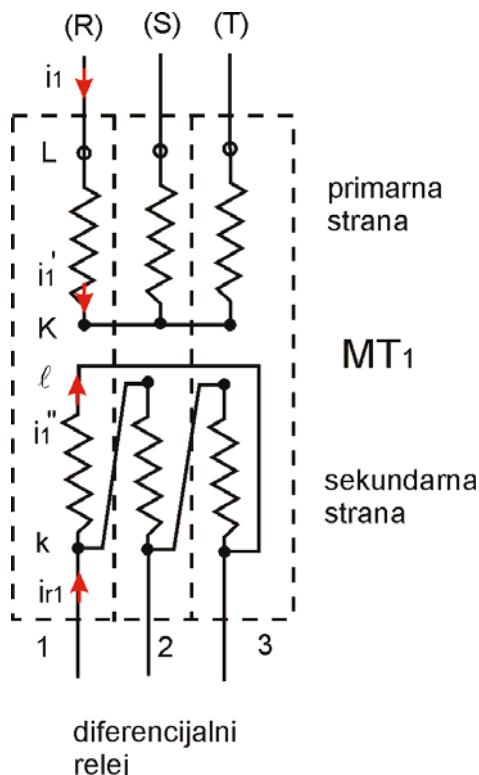


Slika 4.1-10 Ilustracija načina spoja i uzemljenja sekundarnih namota strujnih transformatora.

Strujni međutransformatori, kao što je prethodno rečeno, služe za prilagođenje sekundarnih struja strujnih transformatora ispred i iza energetskog transformatora (ST_1 i ST_2) po iznosu i faznom kutu. Redovita je praksa da se primjenjuju dva strujna međutransformatora (po jedan sa svake strane dvonamotnog energetskog transformatora). Oni se primjenjuju kao samostalne fizičke jedinice kod projektiranja diferencijalne zaštite energetskih transformatora, u slučaju da je diferencijalni relej elektromehaničke ili statičke izvedbe. U slučaju numeričkog diferencijalnog releja nije potrebna fizička primjena strujnih

međutransformatora. Njihova uloga se u tom slučaju zadaje softverski (algoritamski u samom numeričkom releju).

Strujni međutransformatori za primjenu u diferencijalnoj zaštiti izvode se kao jednofazne jedinice. Odgovarajućim spajanjem triju međutransformatora dobije se trofazni međutransformator. Ovo je grafički ilustrirano na slici 4.1-11. Na spomenutoj slici prikazan je konkretno strujni međutransformator MT_1 , koji se nalazi između glavnog strujnog transformatora ST_1 i diferencijalnog releja (vidjeti također i sliku 4.1-9).



Slika 4.1-11 Shema spoja tri jednofazna strujna međutransformatora kod primjene u diferencijalnoj zaštiti dvonamotnih transformatora.

Oznake primijenjene na slici 4.1-11 imaju sljedeća značenja:

- i_1 – sekundarna struja strujnog transformatora ST_1 ,
- i_1' - primarna struja jednog jednofaznog strujnog međutransformatora,
- i_i'' - sekundarna struja jednog jednofaznog strujnog međutransformatora,
- i_{rl} – struja diferencijalnog releja.

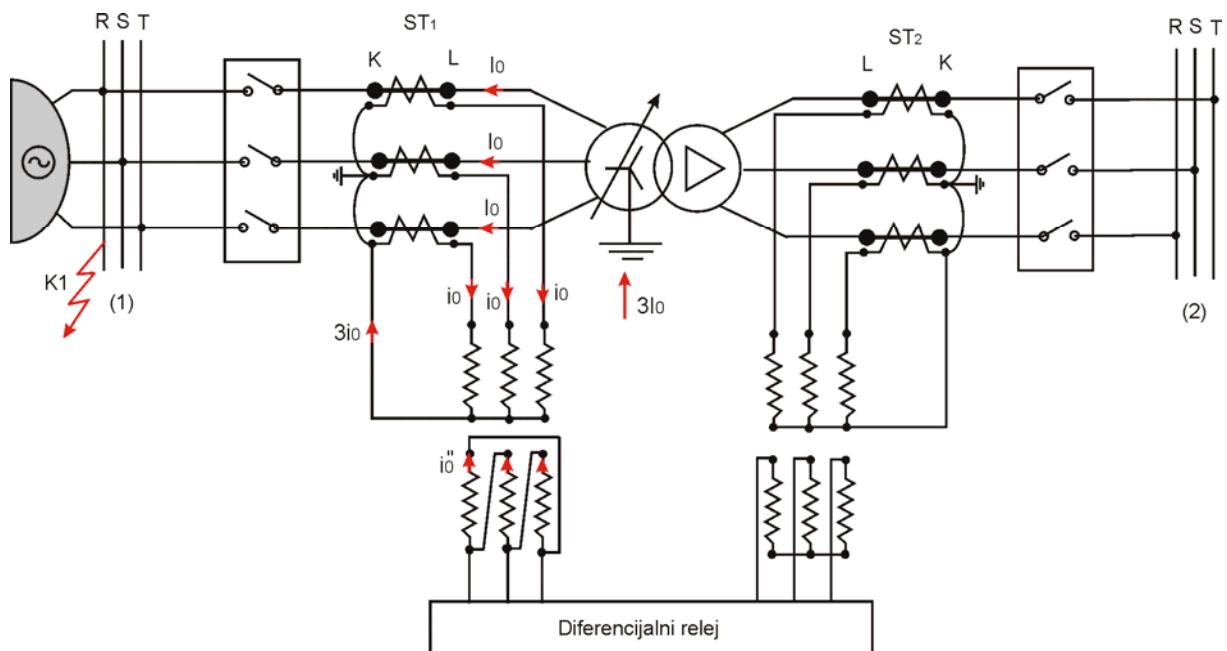
Budući da su strujni mređutransformatori jednofazne jedinice prijenosni omjer im je definiran odnosnom struja koje teku kroz pojedini jednofazni strujni međutransformator, kako slijedi:

$$r_1 = \frac{i_1'}{i_1''} \quad (4.1-15)$$

Na kraju valja naglasiti da, temeljem simbolike i oznaka primijenjenih na slici 4.1-11, struja diferencijalnog releja za konkretni slučaj spoja strujnog međutransformatora iznosi:

$$i_{r1} = \sqrt{3} \cdot i_r'' \quad (4.1-16)$$

Namoti jednofaznih strujnih međutransformatora mogu biti međusobno spojeni u spoj zvijezda ili pak u spoj trokut. Ovo je također prikazano na slici 4.1-11. Primarni namoti međutransformatora spajaju se redovito u spoj zvijezda. Pritom se ovo zvjezdnište spaja s odgovarajućim zvjezdništem sekundarnih namota strujnih transformatora i uzemljuje samo na jednom mjestu. Tropolna shema spoja strujnih međutransformatora i načina uzemljenja njihova zvjezdništa prikazana je na slici 4.1-12.



Slika 4.1-12 Tropolna shema spoja strujnih međutransformatora i način uzemljenja njihova zvjezdništa.

Na dotičnoj slici se upravo uočava usvojena praksa spajanja sekundarnih namota strujnih transformatora i primarnih namota strujnih međutransformatora u zvijezdu te njihovo međusobno povezivanje i uzemljenje na samo jednom mjestu. Za fazno prilagođenje (izjednačenje faznih pomaka) preostaju stoga samo različiti spojevi sekundarnih namota strujnih međutransformatora.

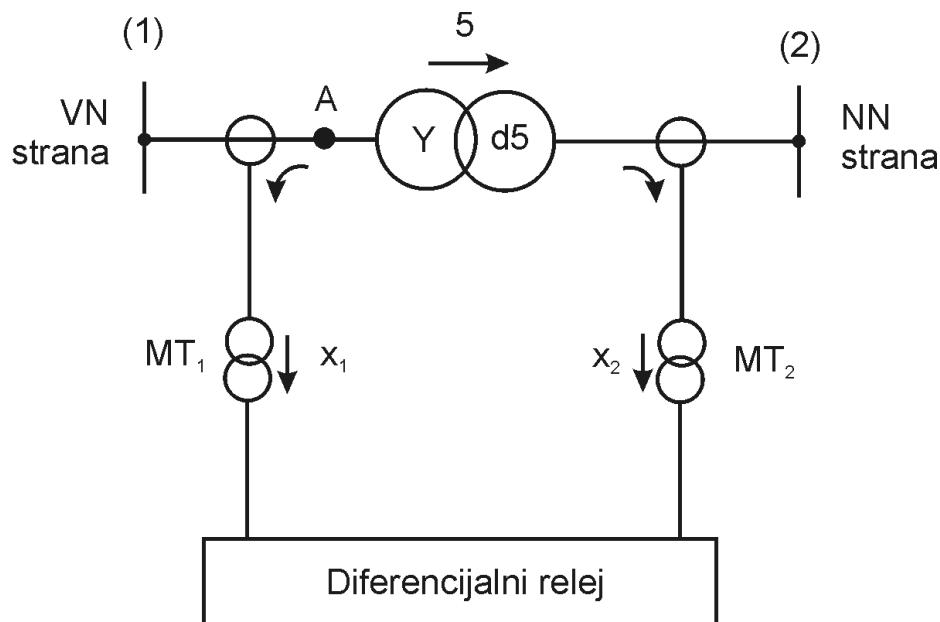
Spajanjem primarnih namota strujnih međutransformatora u spoj zvijezda i uzemljenjem navedenih zvjezdništa omogućeno je zatvaranje nulte komponente sekundarne struje kroz primarni namot međutransformatora MT₁ (vidjeti sliku 4.1-12). Ova nulta komponenta sekundarne struje posljedica je primjerice nastupa jednopolnoga kratkog spoja na VN strani energetskog transformatora, izvan zone štićenja diferencijalne zaštite. Da se navedena nulta komponenta struje ne bi prenosila na stranu međutransformatora gdje je priključen diferencijalni relaj, potrebno je sekundarni namot dotičnog strujnog međutransformatora (MT₁) spojiti u spoj trokut. Unutar ovog trokuta zatvara se spomenuta

nulta komponenta struje i ne ulazi u diferencijalni relej. To je povoljno jer bi ona mogla izazvati krivu proradu diferencijalne zaštite.

Prema tome, ako je zvjezdni energetski transformator na promatranoj strani uzemljeno (VN strana u promatranom primjeru energetskog transformatora sa slike 4.1-9 i 4.1-12), ili postoji vjerojatnost da će se uzemljiti, odgovarajući strujni međutransformator treba biti grupe spoja zvijezda – trokut, tj. diferencijalni relej se treba nalaziti iza namota spojenih u trokut. Ovo je zorno ilustrirano na slici 4.1-12.

Što se tiče spoja sekundarnih namota strujnog međutransformatora MT_2 on može biti takav da su struje koja ulaze i izlaze iz diferencijalnog releja – tijekom normalnog pogona, kao i za vrijeme kvarova izvan štićenog područja – međusobno u fazi. U konkretnom slučaju to može biti spoj zvjezda (vidjeti sliku 4.1-12).

Strujnim međutransformatorima MT_1 i MT_2 određeni su dakle načini spojeva primarnih i sekundarnih namota. Pri odabiru spomenutih grupa spoja valja poštivati prethodno navedena pravila. Preostaje stoga još odrediti njihove satne brojeve koji su, naravno, vezani uz odabrane grupe spoja njihovih namota. Na slici 4.1-13 prikazan je štićeni energetski transformator grupe spoja $YNd5$. Potrebno je, dakle, odrediti grupe spoja (satne brojeve) međutransformatora MT_1 i MT_2 .



Slika 4.1-13 Određivanje grupa spoja strujnih međutransformatora MT_1 i MT_2 .

Novo uvedene oznake primjenjene na slici 4.1-13 imaju sljedeća značenja:

- x_1 – satni broj strujnog međutransformatora MT_1 ,
- x_2 – satni broj strujnog međutransformatora MT_2 .

Neka se uoči proizvoljna točka A (vidjeti sliku 4.1-13). Od te točke do diferencijalnog releja postoje dva puta kojima se zatvara struja. Da bi se u normalnom stanju, kao i u slučaju kvara

izvan štićenog područja, moglo uspoređivati istofazne struje koje ulaze i izlaze iz diferencijalnog releja mora biti zadovoljena sljedeća jednakost:

$$x_1 = 5 + x_2 \quad (4.1-17)$$

Moguća rješenja jednadžbe (4.1-17), koja zadovoljavaju uvjete postavljene prethodno izrabranim grupama spoja namota strujnih međutransformatora, jesu:

- a) $x_2 = 0 \Rightarrow x_1 = 5$
- b) $x_2 = 6 \Rightarrow x_1 = 11$

U slučaju pod a) strujni međutransformator MT_1 jest grupe spoja Yd5, dok je strujni međutransformator MT_2 grupe spoja Yy0. Ovo rješenje ujedno je i grafički ilustrirano na slici 4.1-12.

U slučaju pod b) strujni međutransformator MT_1 jest grupe spoja Yd11, dok je strujni međutransformator MT_2 grupe spoja Yy6. Rješenja pod a) i b) su jednakov vrijedna i mogu se primjeniti u spomenutom slučaju projektiranja diferencijalne zaštite dvonamotnog energetskog transformatora grupe spoja YNd5.

Strujnim međutransformatorima MT_1 i MT_2 preostaje još odrediti samo nazivne prijenosne omjere r_1 i r_2 , respektivno. Naime, prethodno određenim grupama spoja (i satnim brojevima) strujnih međutransformatora MT_1 i MT_2 osigurano je prilagođenje sekundarnih struja (strujnih transformatora ST_1 i ST_2) po faznom kutu (faznom pomaku). Odabriom nazivnih prijenosnih omjera strujnih međutransformatora MT_1 i MT_2 ostvariti će se i potrebno prilagođenje sekundarnih struja po iznosu (amplitudi). Na taj način omogućeno je da u diferencijalni reley ulaze sekundarne struje koje su međusobno prilagodene i po iznosu i po faznom kutu.

Nazivni prijenosni omjer strujnih međutransformatora određuje se iz uvjeta da sekundarne struje međutransformatora koje teku kroz stabilizacijsku granu releja budu u normalnom pogonu jednake po iznosu (naravno i po fazi), te da kod nazivnog opterećenja energetskog transformatora kroz reley teče nazivna struja releja. Koristi se pritom općenito sljedeći izraz:

$$r_j = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{nj} \cdot p_j} \left/ k_{sp} \cdot i_{nr} \right. ; \quad j = 1, 2. \quad (4.1-18)$$

pri čemu su:

r_j – nazivni prijenosni omjer strujnog međutransformatora priključenog na j -toj, $j = 1, 2$, strani energetskog transformatora,

S_n – nazivna snaga energetskog transformatora u kVA,

U_{nj} – nazivni napon j -te, $j = 1, 2$, strane energetskog transformatora u kV; ukoliko je energetski transformator regulacijski može se koristiti odgovarajuća srednja geometrijska vrijednost maksimalnog i minimalnog pripadnog napona, sukladno relaciji (4.1-13),

p_j – nazivni prijenosni omjer strujnog transformatora na j -toj, $j = 1, 2$, strani energetskog transformatora,

k_{sp} – koeficijent spoja sekundarnih namota promatranog strujnog međutransformatora.
 i_{nr} – nazivna struja diferencijalnog releja (1 A ili 5 A).

Vrijednost koeficijenta spoja sekundarnih namota (k_{sp}) određuje se kako slijedi:

$$k_{sp} = 1 \quad (4.1-19)$$

za spoj u zviježdu sekundarnih namota strujnog međutransforamtora, odnosno,

$$k_{sp} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4.1-20)$$

za spoj u trokut sekundarnih namota strujnog međutransforamtora.

U konkretnom slučaju dvonamotnog energetskog transformatora, prikazanog na slikama 4.1-9 i 4.1-12, nazivni prijenosni omjeri strujnih međutransformatora MT_1 i MT_2 računaju se respektivno pomoću sljedećih izraza:

- strujni međutransformator MT_1 ($j = 1$):

$$r_1 = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{n1} \cdot p_1} \Bigg/ \frac{i_{nr}}{\sqrt{3}} \quad (4.1-21)$$

- strujni međutransformator MT_2 ($j = 2$):

$$r_2 = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{n2} \cdot p_2} \Bigg/ i_{nr} \quad (4.1-22)$$

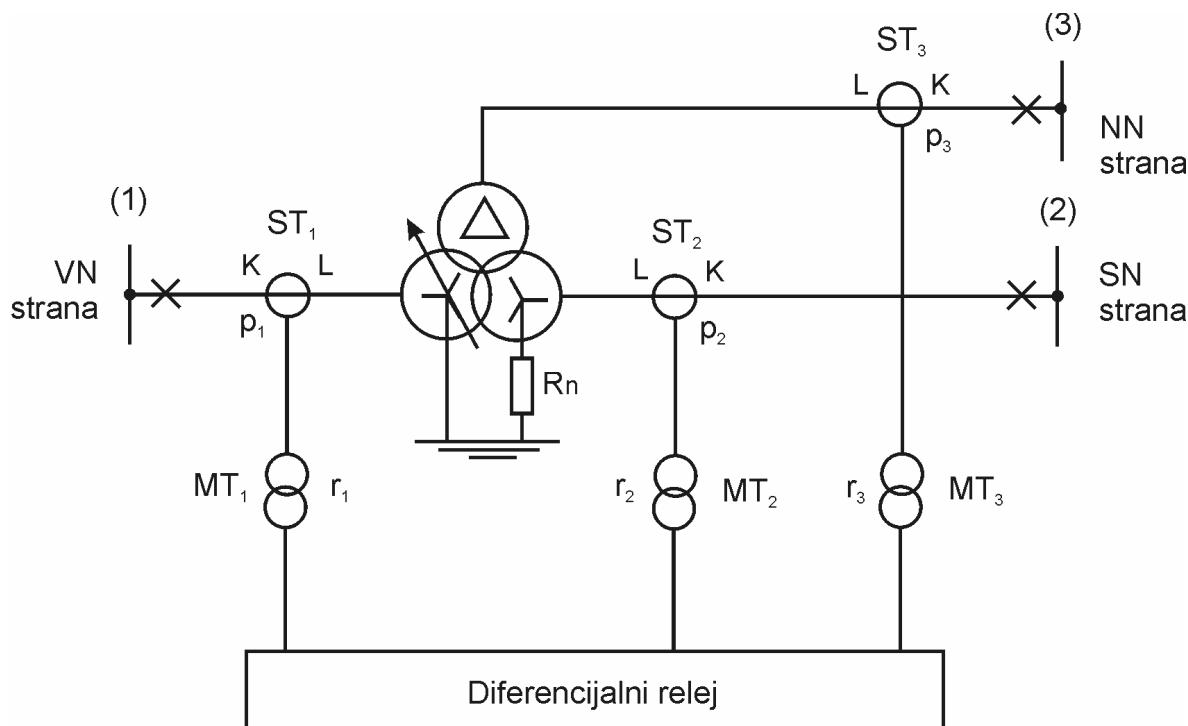
Na kraju valja spomenuti da su strujni međutransformatori, kao jednofazne jedinice, građeni tako da je moguće vrlo precizno podešavati njihove nazivne prijenosne omjere.

4.1.3. Diferencijalna zaštita tronamotnog transformatora

Diferencijalna zaštita tronamotnog energetskog transformatora slijedi iste principe ustanovljene kod prethodno razmatrane diferencijalne zaštite dvonamotnog transformatora. Jedina razlika jest u tome što sada postoje tri namota (primar, sekundar i tercijar) te je stoga projektiranje diferencijalne zaštite nešto složenije. Riječ je o primjeni diferencijalne zaštite u tzv. tri točke.

Ukoliko pak tercijarni namot nije dostupan (nisu izvedeni priključci namota izvan kotla transforamtora) tronamotni transformator se u tom slučaju štiti diferencijalnom zaštitom na gotovo identičan način kako je to pokazano u slučaju dvonamotnog energetskog transformatora (u tzv. dvije točke).

Slika 4.1-14 prikazuje jednopolnu shemu tronamotnog energetskog transformatora štićenog diferencijalnom zaštitom. Na dotičnoj slici prikazan je, dakle, kompletan sustav diferencijalne zaštite koji uključuje strujne transformatore, strujne međutransformatore i sam diferencijalni relej. Na istoj slici prikazani su i tipični načini uzemljenja namota tronamotnog energetskog transformatora. Riječ je ovdje ponovno o stabiliziranoj diferencijalnoj zaštiti, koja posjeduje identičnu radnu karakteristiku koja je prethodno predstavljena (vidjeti podpoglavlje 4.1.1).



Slika 4.1-14 Jednopolna shema tronamotnog energetskog transformatora štićenog diferencijalnom zaštitom.

Osnovni podaci tronamotnog energetskog transformatora jesu:

- nazivni naponi višenaponskog (VN), srednjenačinskog (SN) i niženaponskog (NN), tj. tercijarnog namota U_{n1} , U_{n2} i U_{n3} ,
- opseg regulacije napona na VN strani,
- nazivne snage višenaponskog, srednjenačinskog i niženaponskog / tercijarnog namota S_{n1} , S_{n2} i S_{n3} ,
- grupa spoja (npr. YNyn0,d5).

Oznake upotrijebljene na slici 4.1-14 imaju sljedeća značenja:

ST_1 – strujni transformator na višenaponskoj (VN) strani energetskog transformatora,
 ST_2 – strujni transformator na srednjenačinskoj (SN) strani energetskog transformatora,

ST_3 – strujni transformator na niženaponskoj (NN) / tercijarnoj strani energetskog transformatora,

p_1 – prijenosni omjer strujnog transformatora ST_1 ,

p_2 – prijenosni omjer strujnog transformatora ST₂,
 p_3 – prijenosni omjer strujnog transformatora ST₃,
MT₁ – strujni međutransformator između strujnog transformatora ST₁ i diferencijalnog releja,
MT₂ – strujni međutransformator između strujnog transformatora ST₂ i diferencijalnog releja,
MT₃ – strujni međutransformator između strujnog transformatora ST₃ i diferencijalnog releja,
r₁ – prijenosni omjer strujnog međutransformatora MT₁,
r₂ – prijenosni omjer strujnog međutransformatora MT₂,
r₃ – prijenosni omjer strujnog međutransformatora MT₃,
R_n – mali djelatni otpornik za uzemljenje SN mreže i ograničenje popratne struje jednopolnoga kratkog spoja obično na vrijednost od 300 A,
i_{nr} – nazivna struja diferencijalnog releja (1 A ili 5 A).

Pri projektiranju diferencijalne zaštite tronamotnog energetskog transformatora potrebno je, između ostalog, odrediti i sljedeće veličine:

- prijenosne omjere strujnih transformatora ST₁, ST₂ i ST₃ ($p_1 = ?$, $p_2 = ?$ i $p_3 = ?$),
- grupe spoja i prijenosne omjere strujnih međutransformatora MT₁, MT₂ i MT₃ ($r_1 = ?$, $r_2 = ?$ i $r_3 = ?$).

Nazivni prijenosni omjer strujnog transformatora (ST₁, ST₂ i ST₃) definiran je općenito sljedećim izrazom:

$$p_i = \frac{I_{1n}}{i_{1n}} \quad (4.1-23)$$

u kojem su:

I_{1n} – nazivna primarna struja strujnog transformatora u A,
i_{1n} – nazivna sekundarna struja strujnog transformatora u A (može biti 1 A ili 5 A).

Izbor nazivne primarne struje I_{1n} strujnog transformatora ST₁ provodi se na temelju nazivne struje energetskog transformatora na njegovoj višenaponskoj (VN) strani. Nazivna struja energetskog transformatora na njegovoj VN strani određuje se sljedećim izrazom:

$$I_{n1TR} = \frac{S_{n1}}{\sqrt{3} \cdot U_{n1}} \quad (4.1-24)$$

odnosno, ukoliko je riječ o regulacijskom transformatoru koristi se ponovno sljedeći izraz:

$$I_{n1TR} = \frac{S_{n1}}{\sqrt{3} \cdot U_1} \quad (4.1-25)$$

pri čemu je:

$$U_1 = \sqrt{U_{1\max} \cdot U_{1\min}} \quad (4.1-26a)$$

ili

$$U_1 = 2 \cdot \frac{U_{\max} \cdot U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} \quad (4.1-26b)$$

gdje su: $U_{1\max}$ – maksimalni napon na VN strani energetskog transformatora, $U_{1\min}$ – minimalni napon na VN strani energetskog transformatora. Ovi naponi posljedica su regulacije napona (regulacijska preklopka) na VN strani energetskog transformatora.

Na temelju izračunate vrijednosti I_{n1TR} , korištenjem izraza (4.1-24) ili pak (4.1-25), određuje se nazivna primarna struja I_{1n} strujnog transformatora ST₁. Koriste se pritom podaci o standardnim vrijednostima nazivnih primarnih struja strujnih transformatora iz tablice 2.1.1 (vidjeti podpoglavlje 2.1.1). Valja naglasiti da se pri izboru standardne vrijednosti nazivne primarne struje strujnog transformatora (tablica 2.1.1) treba voditi računa i o činjenici da su strujni transformatori građeni tako da trajno mogu izdržati strujno preopterećenje u iznosu od 20 %.

Već je spomenuto da nazivna sekundarna struja (i_{1n}) strujnog transformatora ST₁, temeljem tablice 2.1.2 (vidjeti podpoglavlje 2.1.1) može imati vrijednost 1 A ili 5 A. Njen izbor ovisit će prvenstveno o duljini i vrsti sekundarnog ožičenja (na potezu sekundar strujnog transformatora ST₁ – diferencijalni relej), naponskoj razini, kao i o nazivnoj strui diferencijalnog releja (i_{nr}).

Izbor nazivne primarne struje I_{1n} strujnog transformatora ST₂ provodi se na temelju nazivne struje energetskog transformatora na njegovoj srednjenačinskoj (SN) strani. Nazivna struja energetskog transformatora na njegovoj SN strani određuje se sljedećim izrazom:

$$I_{n2TR} = \frac{S_{n2}}{\sqrt{3} \cdot U_{n2}} \quad (4.1-27)$$

pri čemu je vidljivo da je sada korištena nazivna snaga SN namota tronamotnog energetskog transformatora. Na temelju izračunate vrijednosti I_{n2TR} , korištenjem izraza (4.1-27), određuje se nazivna primarna struja I_{1n} strujnog transformatora ST₂. Koriste se pritom podaci o standardnim vrijednostima nazivnih primarnih struja strujnih transformatora iz tablice 2.1.1 (vidjeti podpoglavlje 2.1.1), kao i činjenica da su strujni transformatori građeni tako da mogu trajno izdržati 20 %-tno strujno preopterećenje.

Nazivna sekundarna struja strujnog transformatora ST₂ odabire se također iz tablice 2.1.2 (vidjeti podpoglavlje 2.1.1) i može imati vrijednost 1 A ili 5 A. Njen izbor također će ovisiti prvenstveno o duljini i vrsti sekundarnog ožičenja (na potezu sekundar strujnog transformatora ST₂ – diferencijalni relej), naponskoj razini, kao i o nazivnoj strui diferencijalnog releja (i_{nr}).

Izbor nazivne primarne struje I_{1n} strujnog transformatora ST₃ provodi se na temelju nazivne struje energetskog transformatora na njegovoj niženenačinskoj (NN) / tercijarnoj strani.

Nazivna struja energetskog transformatora na njegovoj NN strani određuje se sljedećim izrazom:

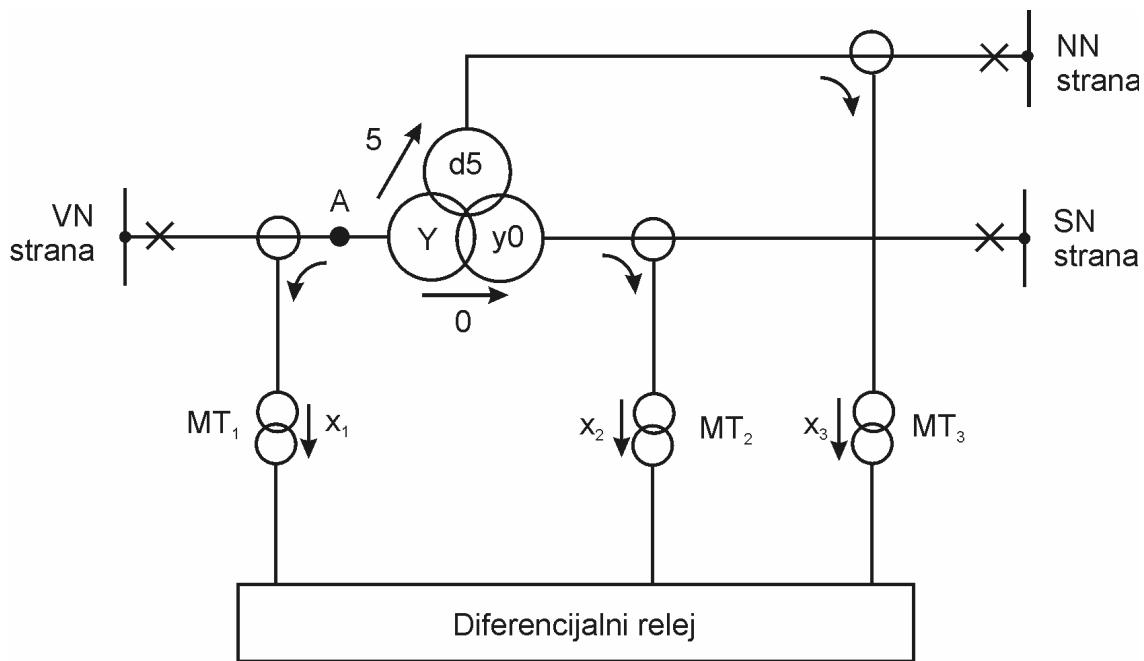
$$I_{n3TR} = \frac{S_{n3}}{\sqrt{3} \cdot U_{n3}} \quad (4.1-28)$$

Sve prethodno rečeno o izboru nazivne primarne i nazivne sekundarne struje strujnih transformatora ST₁ i ST₂ vrijedi i u slučaju strujnog transformatora ST₃. Njegova nazivna primarna struja bira se iz tablice 2.1.1 temeljem izraza (4.1-28), uvažavajući dozvoljeno trajno strujno preopterećenje u iznosu od 20 %. Nazivna sekundarna struja može imati vrijednost 1 A ili 5 A.

Što se tiče načina spajanja sekundarnih namota strujnih transformatora ST₁, ST₂ i ST₃, vrijedi sve prije rečeno u slučaju dvonamotnog energetskog transformatora. Naime, poštuje se europska praksa da se sekundarni namoti strujnih transformatora spajaju isključivo u spoj zvijezda i uzemljuju na strani "k" stezaljke. Pritom je naravno stezaljka "K" (odnosno "k") okrenuta prema sabirnicama, kako je to i pokazano na slici 4.1-14.

Kod izbora načina spajanja namota strujnih međutransformatora MT₁, MT₂ i MT₃ također se koristi ista praksa usvojena kod štićenja dvonamotnog energetskog transformatora. To znači da se primarni namoti strujnih međutransformatora MT₁, MT₂ i MT₃ spajaju u spoj zvijezda. Zvjezdni primarni namoti strujnih međutransformatora (npr. MT₁) se spaja sa zvjezdni sekundarni namoti odgovarajućeg strujnog transformatora (npr. ST₁) i zajedno uzemljuje u samo jednoj točki. Sekundarni namoti strujnih međutransformatora MT₁, MT₂ i MT₃ mogu biti spojeni u spoj zvijezda ili trokut. To će ovisiti o načinu uzemljenja zvjezdista tronamotnog energetskog transformatora. I ovdje ponovno vrijedi sve prethodno rečeno o izoliranju nulte komponente struje jednopolnoga kratkog spoja (vidjeti podpoglavlje 4.1.2).

Određivanje grupe spoja (i satnog broja) strujnih međutransformatora provodi se na temelju postupka uvedenog kod primjene diferencijalne zaštite dvonamotnog transformatora (vidjeti podpoglavlje 4.1.2). Slika 4.1-15 grafički ilustrira postupak određivanja grupe spoja (i satnog broja) strujnih međutransformatora MT₁, MT₂ i MT₃.



Slika 4.1-15 Određivanje grupe spoja i satnog broja strujnih međutransformatora MT_1 , MT_2 i MT_3 .

Novo uvedene oznake primjenjene na slici 4.1-15 imaju sljedeća značenja:

x_1 – satni broj strujnog međutransformatora MT_1 ,

x_2 – satni broj strujnog međutransformatora MT_2 ,

x_3 – satni broj strujnog međutransformatora MT_3 ,

Neka se ponovno uoči proizvoljna točka "A" prema slici 4.1-15. Od te točke do diferencijalnog releja postoje sada tri neovisna puta kojima se zatvara struja. Da bi se u normalnom stanju, kao i u slučaju kvara izvan štićenog područja, mogle uspoređivati istofazne struje koje ulaze i izlaze iz diferencijalnog releja moraju biti zadovoljene sljedeće jednakosti:

$$x_1 = 0 + x_2 \quad (4.1-29)$$

$$x_1 = 5 + x_3 \quad (4.1-30)$$

Dakle, vrijedi da je:

$$x_1 = x_2 \quad (4.1-31)$$

$$x_1 = x_3 + 5 \quad (4.1-32)$$

Postoje dva neovisna rješenja sustava danog izrazima (4.1-31) i (4.1-32). Ona glase:

a) $x_3 = 0 \Rightarrow x_1 = 5, x_2 = 5$

b) $x_3 = 6 \Rightarrow x_1 = 11, x_2 = 11$

Rješenja pod a) i b) su jednako vrijedna i mogu se primjeniti u spomenutom slučaju projektiranja diferencijalne zaštite tronamotnog energetskog transformatora grupe spoja

YNyn0,d5. Ukoliko se primjerice usvoje riješenja pod a) radi se o sljedećim grupama spoja strujnih međutransformatora:

MT₁ ... Yd5

MT₂ ... Yd5

MT₃ ... Yy0

Usvoje li se pak riješenja pod b) radit će se o sljedećim grupama spoja strujnih međutransformatora:

MT₁ ... Yd11

MT₂ ... Yd11

MT₃ ... Yy6

Za određivanje nazivnog prijenosnog omjera strujnih međutransformatora MT₁, MT₂ i MT₃ koristi se sljedeći izraz:

$$r_j = \frac{S_{ref}}{\sqrt{3} \cdot U_{nj} \cdot p_j} \sqrt{k_{sp} \cdot i_{nr}} ; \quad j = 1, 2, 3. \quad (4.1-33)$$

pri čemu su:

r_j – nazivni prijenosni omjer strujnog međutransformatora priključenog na j-toj, j = 1, 2, 3, strani energetskog transformatora,

S_{ref} – referentna snaga tronamotnog energetskog transformatora u kVA; povoljno je usvojiti najveću snagu namota energetskog transformatora, tj.:

$$S_{ref} = \max(S_{n1}, S_{n2}, S_{n3}) \quad (4.1-34)$$

U_{nj} – nazivni napon j-te, j = 1, 2, 3, strane energetskog transformatora u kV; ukoliko je energetski transformator regulacijski može se koristiti odgovarajuća srednja geometrijska vrijednost maksimalnog i minimalnog pripadnog napona, sukladno relaciji (4.1-26),

p_j – nazivni prijenosni omjer strujnog transformatora na j-toj, j = 1, 2, 3, strani energetskog transformatora,

k_{sp} – koeficijent spoja sekundarnih namota promatranog strujnog međutransformatora.

i_{nr} – nazivna struja diferencijalnog releja (1 A ili 5 A).

Vrijednost koeficijenta spoja sekundarnih namota (k_{sp}) određuje se kako slijedi:

$$k_{sp} = 1 \quad (4.1-35)$$

za spoj u zvijezdu sekundarnih namota strujnog međutransformatora, odnosno,

$$k_{sp} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4.1-36)$$

za spoj u trokut sekundarnih namota strujnog međutransformatora.

U konkretnom slučaju tronamotnog energetskog transformatora, prikazanog na slikama 4.1-14 i 4.1-15, nazivni prijenosni omjeri strujnih međutransformatora MT_1 , MT_2 i MT_3 računaju se respektivno pomoću sljedećih izraza:

- strujni međutransformator MT_1 ($j = 1$):

$$r_1 = \frac{S_{n1}}{\sqrt{3} \cdot U_{n1} \cdot p_1} \left/ \frac{i_{nr}}{\sqrt{3}} \right. \quad (4.1-37)$$

- strujni međutransformator MT_2 ($j = 2$):

$$r_2 = \frac{S_{n1}}{\sqrt{3} \cdot U_{n2} \cdot p_2} \left/ \frac{i_{nr}}{\sqrt{3}} \right. \quad (4.1-38)$$

- strujni međutransformator MT_3 ($j = 3$):

$$r_3 = \frac{S_{n1}}{\sqrt{3} \cdot U_{n3} \cdot p_3} \left/ \frac{i_{nr}}{\sqrt{3}} \right. \quad (4.1-39)$$

Na kraju valja spomenuti da su strujni međutransformatori, kao jednofazne jedinice, građeni tako da je moguće vrlo precizno podešavati njihove nazivne prijenosne omjere.

4.2. Termička zaštita energetskog transformatora

Transformatori (dvonamotni i tronamotni) su toplinski vrlo osjetljivi elementi. Oni se u pogonu zagrijavaju uslijed gubitaka u njima. Razlikuju se pritom:

- gubici u jezgri i gubici u namotima.

Gubici u jezgri transformatora posljedica su vrtložnih struja i histereze. Oni nisu ovisni o opterećenju transformatora. Gubici u namotima su pak ovisni o opterećenju transformatora. Oni rastu s porastom opterećenja transformatora. Može stoga nastupiti nedozvoljeno toplinsko naprezanje transformatora. Povećanje unutarnje temperature transformatora ima negativne posljedice na njegovu životnu dob. Naime, povećanjem radne temperature transformatora smanjuje se životna dob njegove izolacije. Da se to ne dogodi koristi se toplinska / termička zaštita energetskog transformatora. Njena osnovna zadaća je zaštiti transformator od strujnog preopterećenja.

Termička zaštita nosi IEC oznaku $\vartheta >$, odnosno, ANSI oznaku 49. Ona je često realizirana uz pomoć radne karakteristike štićenog objekta (energetskog transformatora), koja je opisana primjerice sljedećim izrazom:

$$t = \tau \cdot \ln \frac{\left(\frac{I}{k \cdot I_N} \right)^2 - \left(\frac{I_{pre}}{k \cdot I_N} \right)^2}{\left(\frac{I}{k \cdot I_N} \right)^2 - 1} \quad (4.2-1)$$

pri čemu su:

- t – vrijeme djelovanja dotične zaštite, (min); ona može djelovati na upozorenje (alarmiranje) i/ili na isključenje energetskog transformatora,
- τ - vremenska konstanta zagrijavanja energetskog transformatora (min),
- I – struja opterećenja energetskog transformatora (sekundarna vrijednost), A
- I_{pre} – prethodno strujno opterećenje energetskog transformatora (sekundarna vrijednost), A
- I_N – nazivna struja dotične zaštite, A
- k – koeficijent, koji se određuje sljedećim izrazom:

$$k = \frac{I_{n1}}{I_N \cdot p_i} \quad (4.2-2)$$

gdje su: I_{n1} – nazivna struja energetskog transformatora na njegovoj VN strani, p_i – nazivni prijenosni omjer pripadnog strujnog transformatora.

Valja naglasiti da vremenska konstanta zagrijavanja energetskog transformatora (τ) nije stalna. Naime, brže se zagrijava namot nego li transformatorsko ulje. Zbog toga je vremenska konstanta zagrijavanja namota (kreće se u području 5 \div 10 minuta) manja od vremenske konstante zagrijavanja transformatorskog ulja (60 \div 180 minuta). O tome valja voditi računa pri podešavanju termičke zaštite energetskog transformatora.

Termička zaštita može se podesiti na način da kod manjih prekoračenja (nadtemperatura) djeluje na signalizaciju s dužim vremenom odgode djelovanja, dok kod većih preopterećenja energetskog transformatora djeluje (s kraćim vremenskim zatezanjem) na njegovo isključenje. Način podešavanja parametara termičke zaštite ovisit će o konkretnom releju koji je primijenjen, kao i o konkretnom energetskom transformatoru (njegovoj nazivnoj snazi važnosti).

4.3. Nadstrujne zaštite energetskog transformatora

Uz diferencijalnu zaštitu energetskog transformatora koja je ujedno i njegova osnovna / temeljna zaštita, još se može koristiti i nadstrujna zaštita, kao pričuvna (engl.: back-up) zaštita. Ona mora u svakom slučaju djelovati s određenim vremenskim zatezanjem (vremenskom odgodom) da dopusti djelovanje diferencijalnoj zaštiti, koja djeluje trenutno (bez vremenske odgode, tj. s vlastitim vremenom djelovanja relejnog uređaja uvećanim za vrijeme djelovanja samog prekidača, što zajedno iznosi oko 100 ms). Ukoliko diferencijalna

zaštita energetskog transformatora zakaže iz bilo kojeg razloga, tada nadstrujna zaštita treba isključiti energetski transformator.

Koriste se pritom najčešće sljedeće nadstrujne zaštite:

- niskopodesiva nadstrujna zaštita (IEC $I >$, ANSI 51),
- visokopodesiva nadstrujna zaštita (IEC $I >>$, ANSI 50)

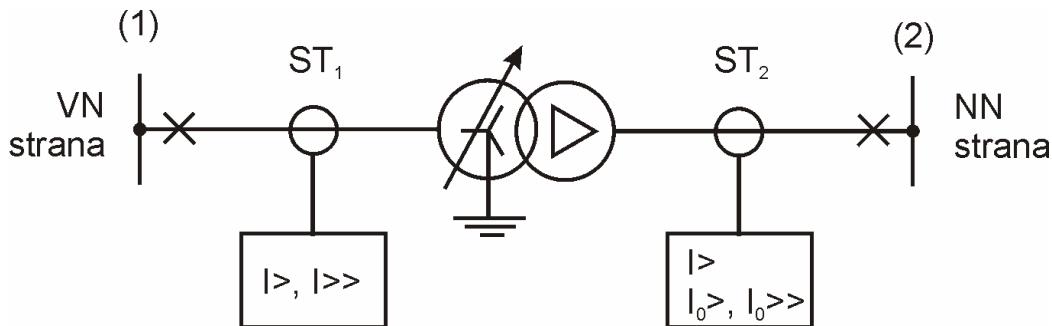
za zaštitu od međufaznih kratkih spojeva, te:

- niskopodesiva homopolarna nadstrujna zaštita (IEC $I_0 >$, ANSI 51N),
- visokopodesiva homopolarna nadstrujna zaštita (IEC $I_0 >>$, ANSI 50N).

za zaštitu od kratkih spojeva sa zemljom.

Od spomenutih homopolarnih nadstrujnih zaštita obično se koristi samo jedna, budući da je u distributivnim mrežama struja jednopolnoga kratkog spoja ograničena na 300 A. Ako se pritom primjene obje zaštite, koriste se najčešće s istim podešenjima.

Valja naglasiti da je i ovdje riječ o nadstrujnim zaštitama koje posjeduju vremenski neovisnu radnu karakteristiku (engl.: definite time), a koje su detaljno tretirane u poglavljju 2. Jednopolna shema priključka navedenih relejnih zaštita, u slučaju štićenja dvonamotnog (npr. distributivnog) energetskog transformatora, prikazana je na slici 4.3-1. Uočava se da se spomenute nadstrujne zaštite spajaju dijelom na strujni transformator na višenaponskoj (VN) strani a dijelom na strujni transformator na niženaponskoj (NN) strani energetskog transformatora.



Slika 4.3-1 Jednopolna shema priključka nadstrujnih zaštita dvonamotnog energetskog transformatora.

Na sličan način ostvarila bi se i nadstrujna zaštita tronamotnog energetskog transformatora. Osim ovdje spomenutih relejnih zaštita još se može primijeniti i osjetljiva usmjereni homopolarna nadstrujna zaštita, kao dodatna zaštita od kratkih spojeva sa zemljom (IEC $\tilde{I}_0 >$, ANSI 67N). U tom slučaju, nju je potrebno osim na strujne transformatore još priključiti i na naponske transformatore. Također, za zaštitu energetskog transformatora od kratkih spojeva sa zemljom može se koristiti i tzv. REF zaštita (engl.: Restricted Earth Fault protection). Ukoliko je zvjezdni transforamtor uzemljeno preko malog djelatnog otpornika mogu se primijeniti i posebne zaštite vezane uz taj otpornik. To su prije svega zaštita od premoštenja malog djelatnog otpornika te zaštita od tzv. visokoomskih kvarova.

U nastavku se kratko navode teorijske podloge proračuna podešenja mjernog i vremenskog člana spomenutih nadstrujnih zaštite energetskog transformatora ($I_p >$, $I_{K\min} >$ i $I_{0>}$). Uvažava se pritom jednopolna shema priključka spomenutih zaštite prema slici 4.3-1 (zaštite priključene na VN stranu dvonamotnog energetskog transformatora).

4.3.1. Niskopodesiva nadstrujna zaštita

Osnovnu zonu niskopodesive nadstrujne zaštite u ovom slučaju predstavlja sam energetski transformator koji se njome štiti. Pričuvnu (susjednu) dionicu pak predstavlja susjedni vod koji izlazi sa sabirnica na koje je spojen energetski transformator.

Proračun primarne proradne vrijednosti (podešenja) mjernog člana niskopodesive nadstrujne zaštite ($I_p >$) energetskog transformatora provodi se temeljem sljedećeg izraza:

$$\frac{k_s \cdot I_{p\max}}{a \cdot p_i} \leq I_p \leq \frac{I_{K\min}}{k_{os} \cdot p_i} \quad (4.3-1)$$

gdje su:

I_p – primarna proadna vrijednost mjernog člana niskopodesive nadstrujne zaštite,
 k_s – koeficijent sigurnosti; njegova vrijednost može se odabrati iz sljedećeg područja:

$$k_s \in [1.1 \div 1.2] \quad (4.3-2)$$

$I_{p\max}$ – maksimalna pogonska struja energetskog transformatora jednaka je nazivnoj struci energetskog transformatora na njegovoj višenaponskoj (VN) strani; određuje se pomoću sljedećeg izraza:

$$I_{p\max} = I_{n1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{n1}} \quad (4.3-3)$$

pri čemu su: S_n i U_{n1} – nazivna snaga i nazivni napon višenaponskog (VN) namota energetskog transformatora, respektivno; ako postoji regulacija napona na VN strani energetskog transformatora tada se njegova maksimalna pogonska struja računa iz gornjeg izraza uz najmanji napon ($U_{1\min}$),

a – omjer otpuštanja dotične zaštite ($a < 1$),

$I_{K\min}$ – minimalna vrijednost struje kvara (dopolni kratki spoj) na mjestu ugradnje dotične zaštite pri njegovom nastupu na kraju osnovne i susjedne dionice; osnovnu dionicu predstavlja sam energetski transformator; bira se pritom konfiguracija incidentne prijenosne mreže s minimalnim uvrštenjem njenih elemenata,

k_{os} – koeficijent osjetljivosti; usvajaju se sljedeće njegove vrijednosti kod spomenutih kvarova na kraju:

- osnovne zone (dionice) štićenja:

$$k_{os} \geq 1.5 \quad (4.3-4)$$

- susjedne zone (dionice) štićenja:

$$k_{os} \geq 1.2 \quad (4.3-5)$$

p_i – nazivni prijenosni omjer pripadnog strujnog transformatora na koji je spojena niskopodesiva nadstrujna zaštita.

Vrijeme odgode djelovanja spomenute niskopodesive nadstrujne zaštite ($I>$) mora biti selektivno s relevantnim zaštitama niže u (distributivnoj) mreži, dakle, na vodovima koji izlaze sa sabirnica (na koje je priključen razmatrani energetski transformator). Dakle, vrijeme odgode djelovanja zaštite $I>$ energetskog transformatora mora biti dulje od najdužeg vremena odgode djelovanja istovrsnih zaštita (niskopodesiva nadstrujna zaštita) vodova koji izlaze s njegovih NN sabirnica. Koristi se pritom selektivni vremenski interval (Δt) za diskriminiranje među vremenskim podešenjima niskopodesivih nadstrujnih zaštita ($I>$) na vodovima i samom energetskom transformatoru. Na kraju valja još jednom naglasiti da je ovdje riječ o pričuvnoj zaštiti.

4.3.2. Visokopodesiva nadstrujna zaštita

Temeljna zadaća visokopodesive nadstrujne zaštite ($I>>$) je djelovati pri nastupima međufaznih kvarova unutar osnovne zone štićenja, koju u ovom slučaju predstavlja sam energetski transformator. Dakle, visokopodesiva nadstrujna zaštita "vidi" kvarove isključivo unutar samog transformatora. Ona mora imati vremensku odgodu djelovanja jer se prednost daje diferencijalnoj zaštiti.

Proračun primarne proradne vrijednosti (podešenja) mjernog člana visokopodesive nadstrujne zaštite ($I>>$) provodi se pomoću sljedećeg izraza:

$$I_p = \frac{k_s \cdot I_{K\max}}{p_i} \quad (4.3-6)$$

gdje je:

$I_{K\max}$ – maksimalna struja kvara (tropolni kratki spoj) na mjestu ugradnje dotične zaštite pri njegovom nastupu na kraju osnovne dionice (NN sabirnice energetskog transformatora); bira se pritom konfiguracija incidentne prijenosne mreže s maksimalnim uvrštenjem njenih elemenata,

k_s – koeficijent sigurnosti ($k_s > 1$); on ovisi o točnosti poznavanja struje $I_{K\max}$,

p_i – nazivni prijenosni omjer pripadnog strujnog transformatora na koji je spojena zaštita $I>>$.

Budući da prednost djelovanja pri unutarnjem kvaru energetskog transformatora ima njegova diferencijalna zaštita, visokopodesiva nadstrujna zaštita ($I>>$) mora imati vremensku odgodu djelovanja. Obično se usvaja da je vrijeme njene odgode djelovanja jednako vremenu djelovanja diferencijalne zaštite (vlastito vrijeme djelovanja diferencijalnog releja i pripadnog prekidača, koje zajedno obično iznosi cca 100 ms) uvećanom za selektivni vremenski interval (koji iznosi od 0,3 s do 0,5 s ovisno o izvedbi / generaciji reljnog uređaja).

4.3.3. Homopolarna nadstrujna zaštita

Homopolarna nadstrujna zaštita (niskopodesiva $I_0>$ ili visokopodesiva $I_0>>$) služi za zaštitu energetskog transformatora od kratkih spojeva sa zemljom. Riječ je također o pričuvnoj zaštiti. Obično se koristi samo jedna od spomenutih nadstrujnih zaštita (niskopodesiva ili visokopodesiva).

Proračun primarne proradne vrijednosti (podešenja) mjernog člana homopolarne nadstrujne zaštite energetskog transformatora provodi se najčešće pomoću sljedećeg izraza:

$$I_{p0} = k_s \cdot (0.06 \div 0.1) \cdot I_{2n} \quad (4.3-7)$$

gdje su:

k_s - koeficijent sigurnosti veći od jedinice,

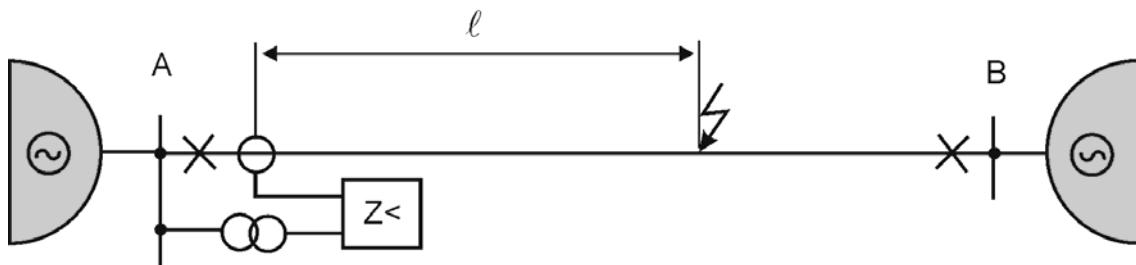
I_{2n} – nazivna sekundarna struja pripadnog strujnog transformatora na koji je spojena homopolarna nadstrujna zaštita.

Podešenje vremenskog člana homopolarne nadstrujne zaštite energetskog transformatora mora biti selektivno s preostalim vremenskim podešenjima homopolarnih nadstrujnih zaštita na vodovima niže u mreži. Dakle, vrijeme odgode djelovanja homopolarne nadstrujne zaštite energetskog transformatora mora biti dulje od najduljeg vremena odgode djelovanja istovrsne zaštite (homopolarna nadstrujna zaštita) vodova koji izlaze s njegovih NN sabirница. Koristi se pritom selektivni vremenski interval za diskriminiranje među vremenskim podešenjima spomenutih homopolarnih nadstrujnih zaštita na vodovima i energetskom transformatoru.

5. DISTANTNA ZAŠTITA

Distantna zaštita najčešće se koristi za zaštitu vodova u visokonaponskim prijenosnim mrežama. Razvila se iz potrebe što bržeg eliminiranja kratkih spojeva u mreži. Naročito u petljastim mrežama napajanim s više strana, kakve su upravo prijenosne mreže. Njen osnovni zaštitni uredaj jest distantni relej. IEC oznaka distantne zaštite jest $Z <$, dok je ANSI oznaka 21. Distantna zaštita priključuje se na strujne i naponske transformatore.

Kao kriterij djelovanja distantna zaštita koristi vrijednosti napona i struje na mjestu ugradnje distantnog releja, dakle, na mjestu priključka releja na **strujne i naponske transformatore**. Ona djeluje na isključenje prekidača u vodnom polju u kojem je priključena. Zbog veće učinkovitosti (bržeg isklapanja kvarova i bolje selektivnosti), distantne zaštite ugrađene na oba kraja visokonaponskih vodova mogu međusobno komunicirati. Ova komunikacija provodi se posebnim komunikacijskim vodom koji može biti optički vod (npr. OPGW zaštitno uže) ili pak telekomunikacijski vod. Slika 4.1 grafički ilustrira način priključka distantne zaštite visokonaponskog voda.



Slika 5.1 Jednopolna shema priključka distantne zaštite visokonaponskog voda.

Vrijeme djelovanja distantne zaštite proporcionalno je udaljenosti / distanci (ℓ) između mjesta nastupa kratkog spoja i mjesta ugradnje distantnog releja. Također, mjerena impedancija distantne zaštite između mjesta nastupa kratkog spoja i mjesta ugradnje distantnog releja proporcionalna je udaljenosti / distanci (ℓ). Otuda i naziv ovoj zaštiti, odnosno, relejnom uređaju: distantna zaštita, odnosno, distantni relej.

Distantni relej je složeni zaštitni uređaj, koji se sastoji od više članova. To su najčešće: poticajni ili pobudni član, usmjerni član, mjerni član, vremenski član, izvršni član i pomoćni članovi. **Poticajni član** stavlja u pokret rad distantne zaštite u slučaju pojave kratkog spoja i time priključuje mjerni i usmjerni član na potrebne struje i napone. **Usmjerni član** nadzire smjer snage kratkog spoja. Ako ona teče od sabirnica prema štićenom vodu, on omogućuje djelovanje distantne zaštite, dok u suprotnom smjeru (snage) blokira njeno djelovanje. **Mjerni član** je priključen na struju i napon te mjeri impedanciju (općenito) između mjesta nastupa kratkog spoja i mjesta ugradnje distantnog releja. Ova mjerena impedancija je proporcionalna udaljenosti između mjesta nastupa kratkog spoja i mjesta ugradnje distantnog releja. Ukoliko je mjerena impedancija manja od podešene vrijednosti impedancije na mjernom članu, mjerni član daje nalog izvršnom članu, podsvrstvom vremenskog člana. **Vremenski član** osigurava vremensko stupnjevanje djelovanja distantne zaštite (selektivnost) u ovisnosti o udaljenosti mjesta kratkog spoja od mjesta ugradnje distantnog releja. **Izvršni član** ima zadaću djelovati,

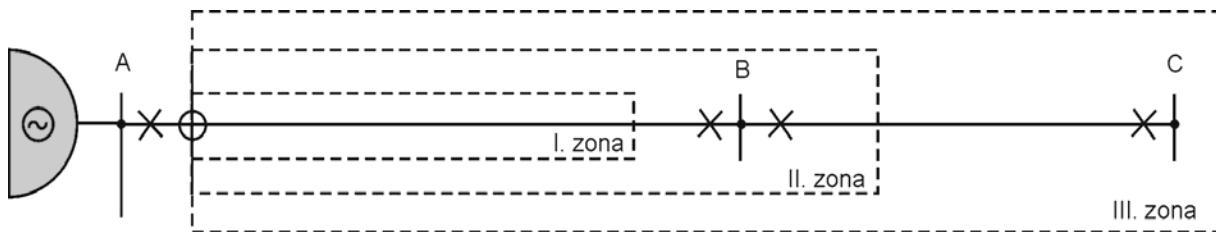
po nalogu mjernog ili vremenskog člana, na isključenje prekidača i odgovarajuću signalizaciju prorade diferencijalnog releja. On prvenstveno djeluje na odgovarajući isklopni svitak prekidača. **Pomoćni članovi** služe za različite pomoćne svrhe, poput: signalizacije djelovanja, spriječavanja pogrešnih djelovanja, automatsko ponovno uklljučivanje, ispitivanje releja u pogonu i tome sl.

Distantna zaštita razlikuje stanje kvara na štićenom vodu, u odnosu na stanje normalnog pogona, temeljem mjerene impedancije – koja pak odgovara udaljenosti mesta kvara od sabirnica (na koje je priključena spomenuta distantna zaštita). Mjerenje udaljenosti od sabirnica do mesta kvara (odnosno mjereno odgovarajuće impedancije) sadrži u sebi određenu pogrešku. Dakle, nije sa potpunom sigurnošću moguće utvrditi točno mjesto nastupa kvara (kratkog spoja) na vodu. Osim toga, mogući su nastupi raličitih vrsta kratkih spojeva na vodu (međufazni kratki spojevi i kratki spojevi sa zemljom). Pritom kod kratkih spojeva dolazi do pojave električnog luka, čiji otpor utječe na promjenu mjerene impedancije. Nadalje, kod kratkih spojeva sa zemljom dolaze do utjecaja i nazočni uzemljivači stupova dalekovoda, koji također dodatno utječu na vrijednost mjerene impedancije. Ovo može imati za posljedicu da mjereno mjesto kvara koje "vidi" distantna zaštita ne odgovara stvarnom mjestu nastupa kvara (kratkog spoja).

Zbog svega prethodno rečenog, distantna zaštita djeluje na principu **zaštitnih zona**. Ona posjeduje redovito više zaštitnih zona. Osnovnu zonu (I. zona, odnosno, I. stupanj) distantne zaštite predstavlja određeni dio štićenog voda. Naime, nije moguće – iz prethodno izloženih razloga – u I. zonu (I. stupanj) distantne zaštite smjestiti ukupnu duljinu štićenog voda, jer bi moglo doći do prelaza / prekoračenja dotične zone preko sabirnica na kraju štićenog voda i isključenja kvarova na susjednom vodu (elementu). Ovo nije dobro, jer time nije ispunjen uvjet selektivnosti (naime, prednost ima distantna zaštita susjednog voda koja mora prva isključiti kvar na njemu). Distantna zaštita u svojoj I. zoni djeluje bez vremenske odgode i isključuje kravove u najkraćem mogućem vremenskom roku.

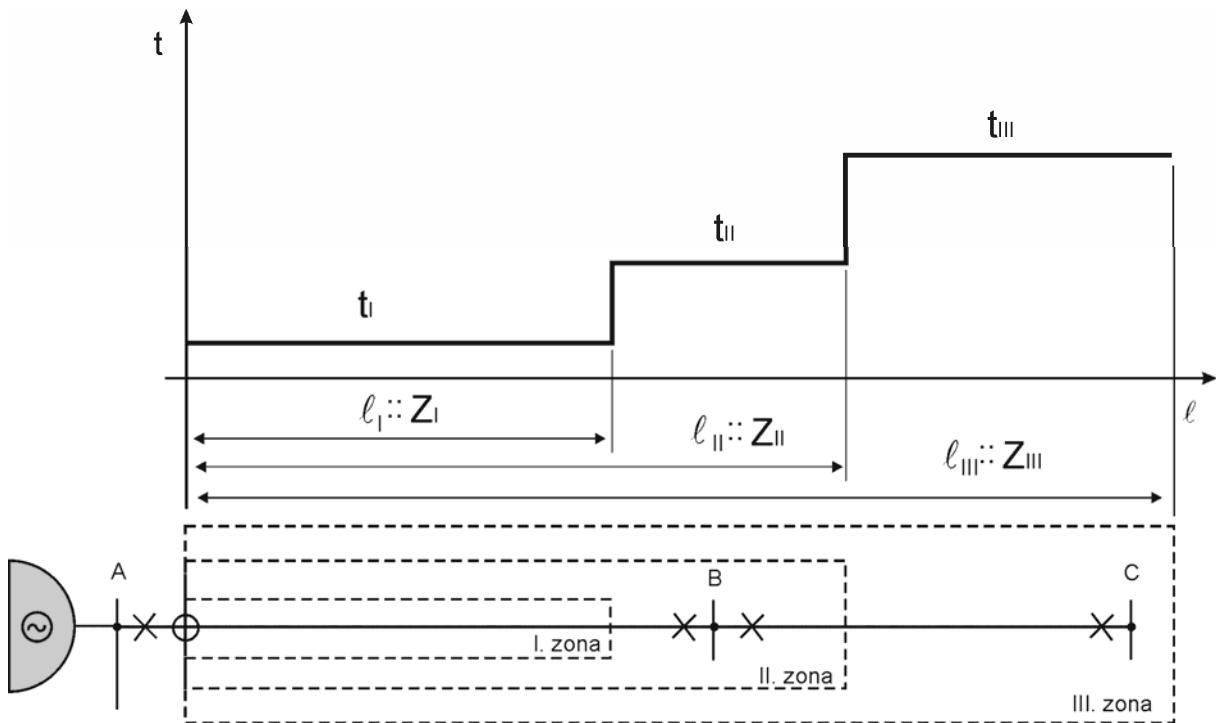
II. zona (II. stupanj) distantne zaštite mora sigurno prijeći / prekoračiti sabirnice na kraju štićenog voda i prekriti jedan dio susjednog voda (elementa), ali ne smije dosegnuti sabirnicu na njegovom kraju. Ukoliko postoji više vodova (u sujednom postrojenju), II. stupanj distantne zaštite ne smije prekoračiti najkraćeg od njih. Dakle, potrebna je koordinacija dosega distantnih zaštita susjednih vodova.

III. zona (III. stupanj) distantne zaštite mora sigurno prijeći (prekoračiti) kompletan susjedni vod (element), odnosno, ukoliko postoji više vodova, mora prekriti najduži od njih. Zona II. i III. distantne zaštite predstavlja rezervnu (back-up) zaštitu distantnim zaštitama koje se nalaze u susjednim vovodima. Sve navedene zone štićenja imaju usmjerenje prema naprijed, dakle, u smjeru štićenog voda. Grafička ilustracija zaštitnih zona distantne zaštite prikazana je na slici 5.2. Riječ je o distanom releju ugrađenom na vodu A-B u stanici / postrojenju A. On "gleda" prema sabirnici B, duž štićenog voda A-B.



Slika 5.2 Grafička ilustracija zaštitnih zona distantne zaštite.

Selektivnost među distantnim zaštitama na različitim krajevima voda, kao i među zonama štićenja, ostvaruje se odgovarajućim vremenskim stupnjevanjem. Primjer vremenske karakteristike distantne zaštite ugrađene u postrojenju A na vodu A-B (vidjeti sliku 5.2) prikazan je na slici 5.3. Na slici 5.3 uočava se selektivnost među zaštitnim zonama koja je ostvarena upotrebom vremenog zatezanja (dulje vrijeme odgode djelovanja distantne zaštite u višim stupnjevima). Za ostvarenje vremenske diskriminacije među zonama, primjenjuje se odgovarajući selektivni vremenski interval.



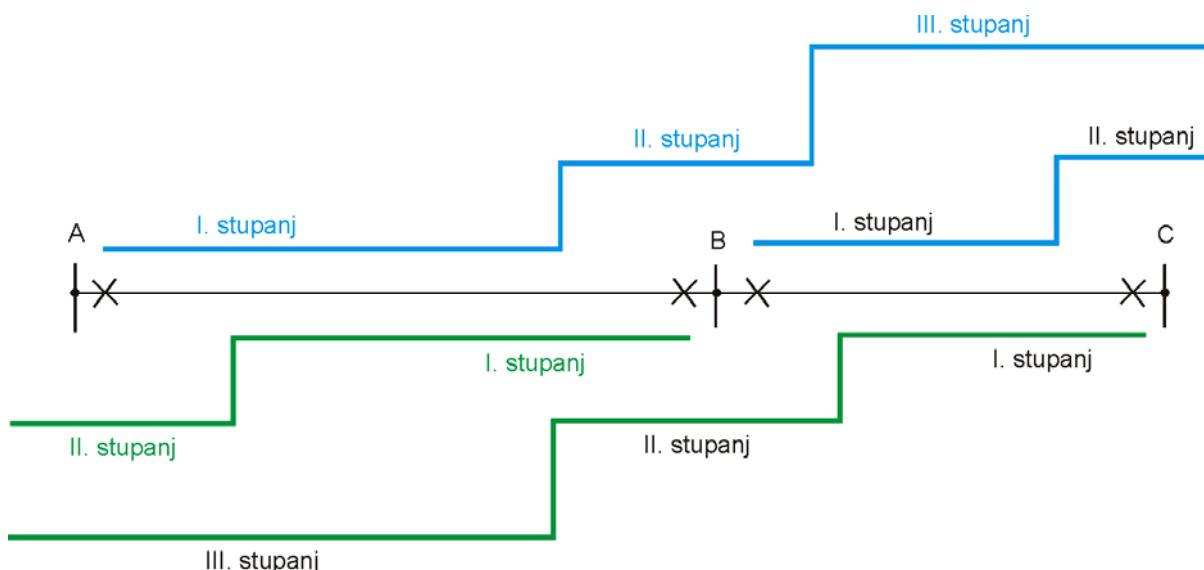
Slika 5.3 Primjer vremenske karakteristike distantne zaštite.

Oznake primjenjene na slici 5.3 imaju sljedeća značenja:

t_I, t_{II}, t_{III} – vremena (odgode) djelovanja u I., II. i III. stupnju distantnog releja; pritom vrijeme t_I predstavlja tzv. vlastito vrijeme releja uvećano za vrijeme djelovanja prekidača (najkraće vrijeme u kojem je moguće isključiti kvar, cca 100 ms),

Z_I, Z_{II}, Z_{III} – proradne impedancije I., II. i III. stupnja distantnog releja; ovim impedancijama proporcionalne su odgovarajuće udaljenosti ℓ_I, ℓ_{II} i ℓ_{III} .

U postrojenju B na vodu A-B postavljena je također distantna zaštita, koja "gleda" u smjeru prema postrojenju A, duž štićenog voda A-B. Ona ima identičnu vremensku karakteristiku, onoj prikazanoj na slici 5.3, samo u suprotnom smjeru. Također, u postrojenju B na vodu B-C postoji istovjetna distantna zaštita koja "gleda" u smjeru štićenog voda B-C (suprotno od distantne zaštite u postrojenju A na vodu A-B). Konačno i u postrojenju C postoji distantna zaštita koja "gleda" duž štićenog voda B-C prema sabirnici B. Sve ove distantne zaštite moraju biti međusobno koordinirane s obzirom na doseg zaštitnih zona i odgovarajuća vremenska zatezanja. One moraju biti koordinirane i sa ostalim nazočnim zaštitama u sustavu, kao i zaštitama ostalih incidentnih elemenata. Slika 5.4 grafički ilustrira koordiniranje vremenskih karakteristika više diferencijalnih releja. U konkretnom slučaju riječ je o četiri diferencijalna releja (po dva na svakom od vodova A-B i B-C), koji kontroliraju četiri prekidača prikazana na slici 5.3.



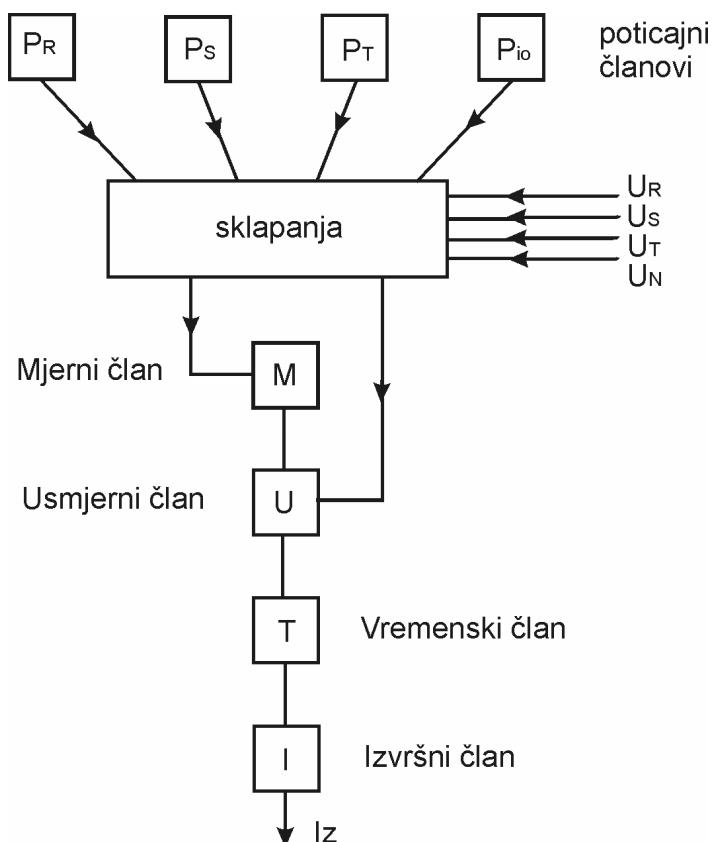
Slika 5.4 Grafička ilustracija koordiniranja vremenskih karakteristika više diferencijalnih releja.

Temeljem prethodno iznesenog (kao i grafičkih prikaza na slikama 5.3 i 5.4), uočava se da postoji određeni dio štićenog voda A-B koji nije zaštićen s najkraćim vremenom isklopa (u I. stupnju), već je štićen u II. stupnju distantne zaštite s nešto dužim vremenom isklopa. Ovo je nužnost koju nameće uvjet selektivnosti. Riječ je ovdje, dakako, o prijenosnim vodovima koji su napajani s obje strane, pri čemu distantna zaštita na oba njegova kraja moraju isključiti vod u kvaru.

Ovaj nedostatak distantne zaštite moguće je nadići korištenjem odgovarajuće komunikacijske sheme djelovanja distantne zaštite. Naime, povezivanjem (najčešće optičkom vezom) distantnih relejnih uređaja na oba kraja štićenog voda, oni međusobno komuniciraju. Realizacijom ove komunikacije među distantnim relejima na oba kraja štićenog voda moguće je ostvariti distantnu zaštitu dotičnog voda u cijeloj njegovoj duljini u najkraćem vremenu isklopa (dakle, u I. stupnju). Riječ je, dakle, o posebnom načinu djelovanja diferencijalne zaštite, tzv. komunikacijskoj shemi diferencijalne zaštite. Moguće je pritom više različitih načina ostvarenja koordiniranja diferencijalnih zaštita, korištenjem spomenute komunikacije,

a u svrhu ostvarenja štićenja cijelokupne duljine voda u I. stupnju. O komunikacijskim shemama distantne zaštite biti će više govora u nastavku.

Glede izvedbe, distantni relej može biti trofazni ili jednofazni. Trofazni distantni relej posjeduje za svaku fazu po jedan mjerni član za međufazne kratke spojeve (R-S, S-T i R-T) i po jedan mjerni član za jednopolne kratke spojeve (R-N, S-N i T-N). Riječ je o vrlo komplikiranom i skupom zaštitnom uređaju. Jednofazni distantni relej, s druge strane, posjeduje samo jedan mjerni član. Jednostavniji je te se stoga najčešće susreće u praksi. Pojednostavljena blok shema djelovanja jednofaznog distantnog releja prikazana je na slici 5.5.



Slika 5.5 Blok shema djelovanja jednofaznog distantnog releja.

Sa dotične slike se uočava da svaka faza ima svoj poticajni član (P_R , P_S i P_T). Pored toga, potreban je član koji razlikuje međufazne kratke spojeve od kratkih spojeva sa zemljom. To je, kod elektromehaničke izvedbe, obično osjetljivi nadstrujni relej, koji je priključen na nultu komponentu struje (P_{io}). U slučaju nastupa međufaznih kratkih spojeva pobuđuju se poticajni članovi u fazama koje su u kvaru i mjerni članovi se preko člana za "sklapanje" priključuju na odgovarajuće napone i struje. Kod kratkih spojeva sa zemljom (jednopolni kratki spoj) pobuđuje se i član P_{io} i mjerni se član (M) preko člana za "sklapanje" priključuje na odgovarajući napon i struju. Način na koji se provodi priključak mjernih članova u slučajevima nastupa međufaznih kratkih spojeva i kratkih spojeva sa zemljom prikazat će se u nastavku. Osim toga, na slici 4.5 prikazani su i vremenski član (T) i izvršni član (I). Pomoćni članovi nisu, zbog jednostavnosti, prikazani na slici 5.5.

U slučaju numeričkog distantnog releja, blok shema djelovanja slična je onoj prikazanoj na slici 5.5. Spomenuti članovi u tom slučaju su realizirani softverski. Sklapanja se provode numeričkim putem unutar algoritma distantne zaštite numeričkog releja. Teorijske podloge tih "sklapanja" ostaju nepromjenjene, a imaju za svrhu dovođenje mjernom članu odgovarajućih struja i napona, ovisno o vrsti kratkog spoja.

5.1. Određivanje mjerene impedancije distantne zaštite

Distantna zaštita određuje / računa impedanciju između mjesta ugradnje distantnog releja (strujni transformator) i mjesta nastupa kvara na štićenom vodu. Ova impedancija određuje se temeljem mjerениh struja i napona koje se dovode distantnom releju (podredstvom strujnih i naponskih transformatora na koje je relej spojen). Riječ je o tzv. mjerenoj impedanciji koju distantni relej koristi kao kriterij razlikovanja mjesta nastupa kvara (kratkog spoja) na štićenom vodu. Naime, mjerena impedancija proporcionalna je duljini između mjesta ugradnje releja i mjesta nastupa kvara. Distantnom releju je stoga, ovisno o vrsti kvara (kratkog spoja) na vodu, potrebno dovesti odgovarajuću kombinaciju struja i napona, temeljem kojih će relej odrediti (tj. izračunati) mjerenu impedanciju do mjesta kvara (i potom donijeti odluku o reagiranju / nereagiranju i u kojem stupnju).

U trofaznim električnim mrežama moguć je nastup sveukupno deset (10) različitih kratkih spojeva. Naime, postoje četiri različita međufazna kratka spoja: tropolni kratki spoj (R-S-T), te tri različita dvopolna kratka spoja (R-S, R-T i S-T). Nadalje, postoje sveukupno šest različitih dozemnih kratkih spojeva i to: tri različita jednopolna kratka spoja (R-N, S-N i T-N), te isto tako i tri različita dvopolna kratka spoja s istodobnim spojem sa zemljom (R-S-N, R-T-N i S-T-N). Za svaki od ovih kratkih spojeva, distantni relej mora mjeriti (računati) odgovarajuću impedanciju kvara, za koju mu trebaju odgovarajuće struje i naponi. Dakle, ovisno o vrsti kratkog spoja, mjernom članu diferencijalnog releja potrebno je dovesti točno odgovarajuće struje i napone iz kojih će proizlaziti vrijednost mjerene impedancije voda do mjesta kvara. Mjerena impedancija koju distantni relej „vidi“ ovisi, dakle, o vrsti kratkog spoja koji se dogodio.

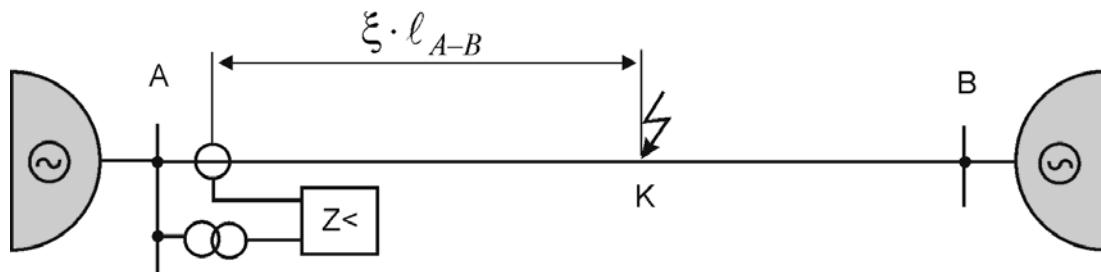
Temeljni princip rada distantne zaštite leži u činjenici da će distantni relej mjeriti (računati) impedanciju do mjesta kvara na vodu (tzv. mjerenu impedanciju) isključivo direktnog redoslijeda, bez obzira na vrstu kratkog spoja. To se osigurava dovođenjem odgovarajućih struja i napona mjernom članu distantnog releja, ovisno o vrsti kvara (kratkog spoja). Drugim riječima, mjernom članu distantnog releja dovodi se takva kombinacija struja i napona ("sklapanjem") da on mjeri **impedanciju direktnog redoslijeda** od mjesta njegove ugradnje do mjesta nastupa kvara.

Ostaje, dakle, odrediti koja kombinacija struja i napona se dovodi mjernom članu distantnog releja za koju vrstu kratkog spoja. U nastavku će se predstaviti teorijske podloge izračuna mjerene impedancije distantnog releja, kako za slučaj nastupa međufaznih kratkih spojeva tako i kod nastupa kratkih spojeva sa zemljom.

5.1.1. Mjerena impedancija kod nastupa međufaznih kratkih spojeva

U međufazne kratke spojeve, kao što je već spomenuto, spadaju tropolni (K3) i dvopolni (K2) kratki spoj. Tropolni kratki spoj je simetričan kvar kod kojega se razvijaju sustavi struja i napona samo direktnog redoslijeda. Dvopolni kratki spoj je nesimetričan kvar. Kod njega se javljaju sustavi struja i napona direktnog i inverznog redoslijeda.

Razmatrati će se stoga u nastavku nastup dvopolnoga kratkog spoja na vodu A-B, na kojem se u postrojenju A nalazi ugrađena distantna zaštita. Razmatrana situacija je grafički ilustrirana na slici 5.1-1. Dvoponi kratki spoj je pritom nastupio između faza S i T štićenog voa (S-T), na nekoj proizvoljnoj udaljenosti gledano od postrojenja A. Smatra se da je mreža bila u stanju idealnog praznog hoda neposredno prije nastupa spomenutog kvara te da je vod dvostrano napajan (riječ je, naime, o vodu u prijenosnoj mreži).



Slika 5.1-1 Grafička ilustracija nastupa dvopolnoga kratkog spoja na štićenom vodu.

Oznake primjenjene na slici 5.1-1 imaju sljedeća značenja:

ξ - parametar koji opisuje dio ukupne duljine štićenog voda A-B (mјeren od sabirnice A) na kojem je nastupio dvopolni kratki spoj:

$$\xi \in [0, 1] \quad (5.1-1)$$

ℓ_{A-B} - ukupna duljina štićenog voda A-B.

Nadomjesna shema fiktivnog sustava promatranog dvopolnog kratkog spoja za mrežu prema slici 5.1-1 prikazana je na slici 5.1-2.

Oznake primjenjene na slici 5.1-2 imaju pritom sljedeća značenja:

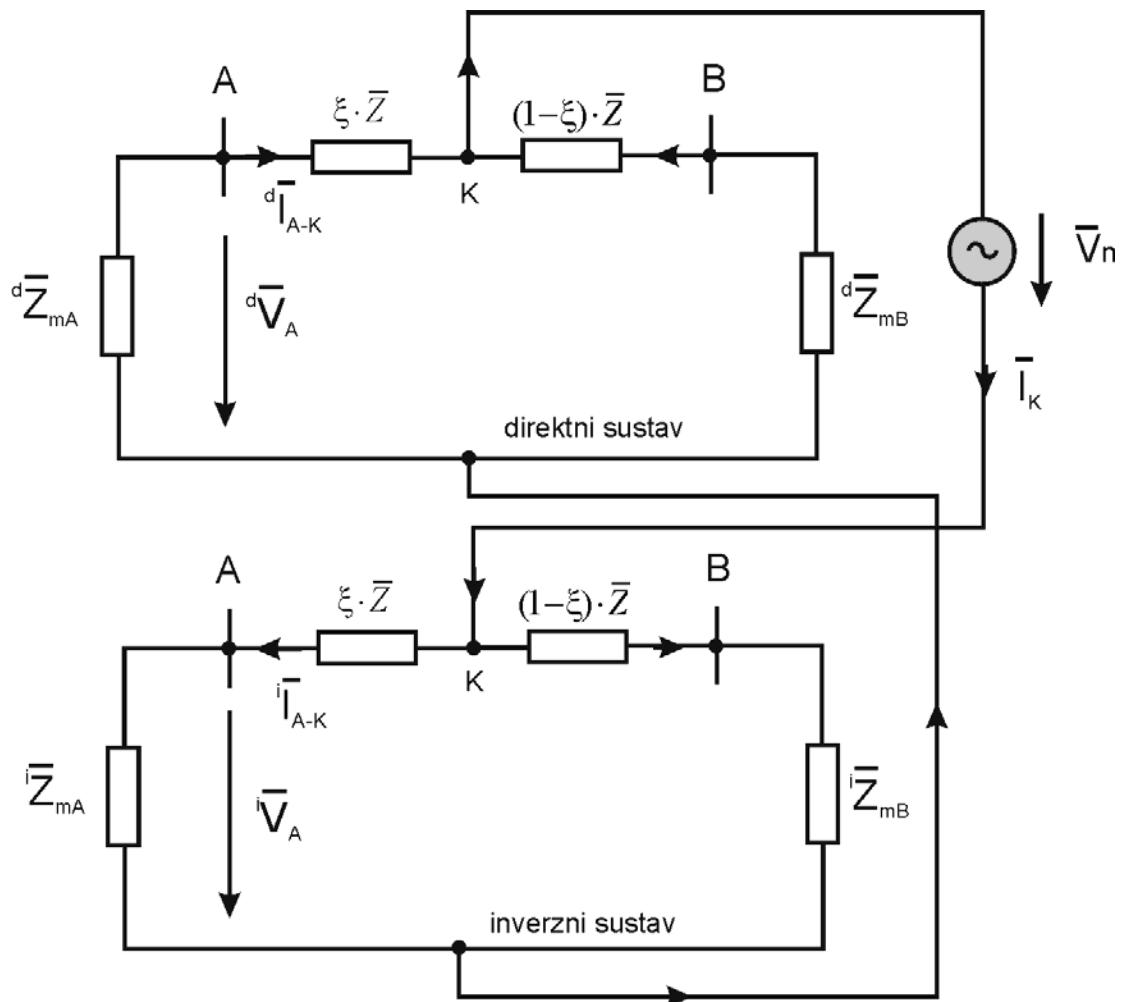
${}^d\bar{Z}_{mA}$, ${}^i\bar{Z}_{mA}$ - nadomjesne impedancije direktnog i inverznog redoslijeda mreže A,

${}^d\bar{Z}_{mB}$, ${}^i\bar{Z}_{mB}$ - nadomjesne impedancije direktnog i inverznog redoslijeda mreže B,

\bar{Z} - impedancija štićenog voda A-B direktnog redoslijeda; vod je stacionarni element mreže pa je stoga njegova inverzna impedancija jednaka direktnoj impedanciji,

\bar{V}_n - fazni napon faze R prije nastupa spomenutog dvopolnog kratkog spoja,

\bar{I}_K - struja dvopolnoga kratkog spoja.



Slika 5.1-2 Nadomjesna shema promatranog dvopolnog kratkog spoja.

Temeljem oznaka i simbolike primijenjene na slici 5.1-2 slijedi:

$$\bar{V}_n - i\bar{I}_{A-K} \cdot (\xi \cdot \bar{Z}) + i\bar{V}_A - d\bar{V}_A - d\bar{I}_{A-K} \cdot (\xi \cdot \bar{Z}) = 0 \quad (5.1-2)$$

odnosno:

$$\bar{V}_n = d\bar{V}_A - i\bar{V}_A + \xi \cdot \bar{Z} \cdot (d\bar{I}_{A-K} + i\bar{I}_{A-K}) \quad (5.1-3)$$

Potrebno je odrediti strujno i naponsko stanje na mjestu ugradnje distantne zaštite (točka A) za vrijeme nastupa promatranog kratkog spoja. Naime, općenito vrijede slijedeće matrične jednadžbe koje opisuju naponsko i strujno stanje na mjestu ugradnje distantnog releja:

$$\begin{Bmatrix} {}^R\bar{V}_A \\ {}^S\bar{V}_A \\ {}^T\bar{V}_A \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{V}_n \\ a^2 \cdot \bar{V}_n \\ a \cdot \bar{V}_n \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} {}^0\bar{V}_A \\ {}^d\bar{V}_A \\ {}^i\bar{V}_A \end{Bmatrix} \quad (5.1-4)$$

$$\begin{Bmatrix} {}^R\bar{I}_{A-K} \\ {}^S\bar{I}_{A-K} \\ {}^T\bar{I}_{A-K} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} {}^0\bar{I}_{A-K} \\ {}^d\bar{I}_{A-K} \\ {}^i\bar{I}_{A-K} \end{Bmatrix} \quad (5.1-5)$$

pri čemu su:

${}^R\bar{V}_A$, ${}^S\bar{V}_A$, ${}^T\bar{V}_A$ - naponi faza R, S i T na mjestu ugradnje distantnog releja za vrijeme nastupa dvopolnoga kratkog spoja,

${}^0\bar{V}_A$, ${}^d\bar{V}_A$, ${}^i\bar{V}_A$ - naponi nultog, direktnog i inverznog redoslijeda na mjestu ugradnje distantnog releja tijekom nastupa dvopolnoga kratkog spoja,

a – kompleksni operator koji ima sljedeću vrijednost:

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5.1-6)$$

${}^R\bar{I}_{A-K}$, ${}^S\bar{I}_{A-K}$, ${}^T\bar{I}_{A-K}$ - struje u fazama R, S i T između čvorišta A i K; ove struje teku strujnim transformatorima na koje je priključena promatrana distantna zaštita; smjer struja je od čvorišta A prema čvorištu K,

${}^0\bar{I}_{A-K}$, ${}^d\bar{I}_{A-K}$, ${}^i\bar{I}_{A-K}$ - struje nultog, direktnog i inverznog redoslijeda između čvorišta A i K; struje su pritom orijentirane od čvorišta A prema čvorištu K.

U konkretnom slučaju ne postoje multi sustavi struja i napona. Struja inverznog sustava (${}^i\bar{I}_{A-K}$), prema slici 5.1-2, orijentirana je od čvorišta K prema čvorištu A (uzima se s negativnim predznakom). U skladu s oznakama i simbolikom primijenjenom na slici 5.1-2 matrične jednadžbe (5.1-4) i (5.1-5) daju:

$$\begin{Bmatrix} {}^R\bar{V}_A \\ {}^S\bar{V}_A \\ {}^T\bar{V}_A \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{V}_n \\ a^2 \cdot \bar{V}_n \\ a \cdot \bar{V}_n \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 0 \\ {}^d\bar{V}_A \\ {}^i\bar{V}_A \end{Bmatrix} \quad (5.1-7)$$

$$\begin{Bmatrix} {}^R\bar{I}_{A-K} \\ {}^S\bar{I}_{A-K} \\ {}^T\bar{I}_{A-K} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 0 \\ {}^d\bar{I}_{A-K} \\ -{}^i\bar{I}_{A-K} \end{Bmatrix} \quad (5.1-8)$$

Iz matrične jednadžbe (5.1-7) može se napisati da je:

$${}^S\bar{V}_A = a^2 \cdot \bar{V}_n - a^2 \cdot {}^d\bar{V}_A - a \cdot {}^i\bar{V}_A \quad (5.1-9)$$

$${}^T\bar{V}_A = a \cdot \bar{V}_n - a \cdot {}^d\bar{V}_A - a^2 \cdot {}^i\bar{V}_A \quad (5.1-10)$$

Oduzimanjem relacije (5.1-10) od (5.1-9) dobiva se:

$${}^S\bar{V}_A - {}^T\bar{V}_A = \bar{V}_n \cdot (a^2 - a) - {}^d\bar{V}_A \cdot (a^2 - a) + {}^i\bar{V}_A \cdot (a^2 - a) \quad (5.1-11)$$

Nakon sređivanja relacija (5.1-11) prelazi u sljedeći oblik:

$${}^S\bar{V}_A - {}^T\bar{V}_A = (a^2 - a) \cdot (\bar{V}_n - {}^d\bar{V}_A + {}^i\bar{V}_A) \quad (5.1-12)$$

Isto tako, iz matrične jednadžbe (5.1-8) može se napisati da je:

$${}^S\bar{I}_{A-K} = a^2 \cdot {}^d\bar{I}_{A-K} - a \cdot {}^i\bar{I}_{A-K} \quad (5.1-13)$$

$${}^T\bar{I}_{A-K} = a \cdot {}^d\bar{I}_{A-K} - a^2 \cdot {}^i\bar{I}_{A-K} \quad (5.1-14)$$

Oduzimanjem relacije (5.1-14) od (5.1-13) dobiva se:

$${}^S\bar{I}_{A-K} - {}^T\bar{I}_{A-K} = {}^d\bar{I}_{A-K} \cdot (a^2 - a) + {}^i\bar{I}_{A-K} \cdot (a^2 - a) \quad (5.1-15)$$

Nakon sređivanja relacija (5.1-15) prelazi u sljedeći oblik:

$${}^S\bar{I}_{A-K} - {}^T\bar{I}_{A-K} = (a^2 - a) \cdot ({}^d\bar{I}_{A-K} + {}^i\bar{I}_{A-K}) \quad (5.1-16)$$

Uvrštenjem relacije (5.1-3) u izraz (5.1-12) slijedi:

$${}^S\bar{V}_A - {}^T\bar{V}_A = (a^2 - a) \cdot [{}^d\bar{V}_A - {}^i\bar{V}_A + \xi \cdot \bar{Z} \cdot ({}^d\bar{I}_{A-K} + {}^i\bar{I}_{A-K}) - {}^d\bar{V}_A + {}^i\bar{V}_A] \quad (5.1-17)$$

Sređivanjem dotičnog izraza dobiva se:

$${}^S\bar{V}_A - {}^T\bar{V}_A = (a^2 - a) \cdot \xi \cdot \bar{Z} \cdot ({}^d\bar{I}_{A-K} + {}^i\bar{I}_{A-K}) \quad (5.1-18)$$

Dijeljenjem izraza (5.1-18) sa (5.1-16) dobiva se:

$$\frac{{}^S\bar{V}_A - {}^T\bar{V}_A}{{}^S\bar{I}_{A-K} - {}^T\bar{I}_{A-K}} = \frac{(a^2 - a) \cdot \xi \cdot \bar{Z} \cdot ({}^d\bar{I}_{A-K} + {}^i\bar{I}_{A-K})}{(a^2 - a) \cdot ({}^d\bar{I}_{A-K} + {}^i\bar{I}_{A-K})} = \xi \cdot \bar{Z} \quad (5.1-19)$$

Dakle, konačno slijedi:

$$\bar{Z}_{mj} = \frac{{}^S\bar{V}_A - {}^T\bar{V}_A}{{}^S\bar{I}_{A-K} - {}^T\bar{I}_{A-K}} = \xi \cdot \bar{Z} \quad (5.1-20)$$

mjerena impedancija, \bar{Z}_{mj} , distantnog releja. Ona je upravo jednaka impedanciji $\xi \cdot \bar{Z}$ između mjesta ugradnje distantnog releja i mjesta nastupa dvopolnoga kratkog spoja (S-T). Potrebno je samo, preko članova za "sklapanje", priključiti mjerni član na linijski napon između faza S i

T i na razliku struja faza S i T. Drugim riječima, distantnom releju je u konkretnom slučaju (dvopolni kratki spoj između faza S i T) potrebno dovesti fazne napone faza S i T, te fazne struje faza S i T. Na osnovu dotičnih veličina (struja i napona) određuje se izrazom (4.1-20) mjerena impedancija, koja je upravo jednaka impedanciji gledanoj od mjesta ugradnje distantnog releja do mjesta nastupa spomenutog kvara.

Analogno provedenom analizom može se pokazati da u slučaju nastupa dvopoljnoga kratkog spoja između faza R i S (R-S) mjernom članu distantnog releja treba dovesti razliku faznih napona faza R i S te razliku faznih struja faza R i S. Isto tako, pri nastupu dvopoljnoga kratkog spoja između faza R i T (R-T), mjernom članu distantnog releja treba dovesti razliku faznih napona između faza R i T te razliku faznih struja faza R i T.

Može se također pokazati, primjenom identične procedure koja je predstavljena za slučaj nastupa dvopoljnoga kratkog spoja, da je i kod nastupa tropoljnoga kratkog spoja (R-S-T) mjerena impedancija, \bar{Z}_{mj} , distantnog releja također dana izrazom (5.1-20).

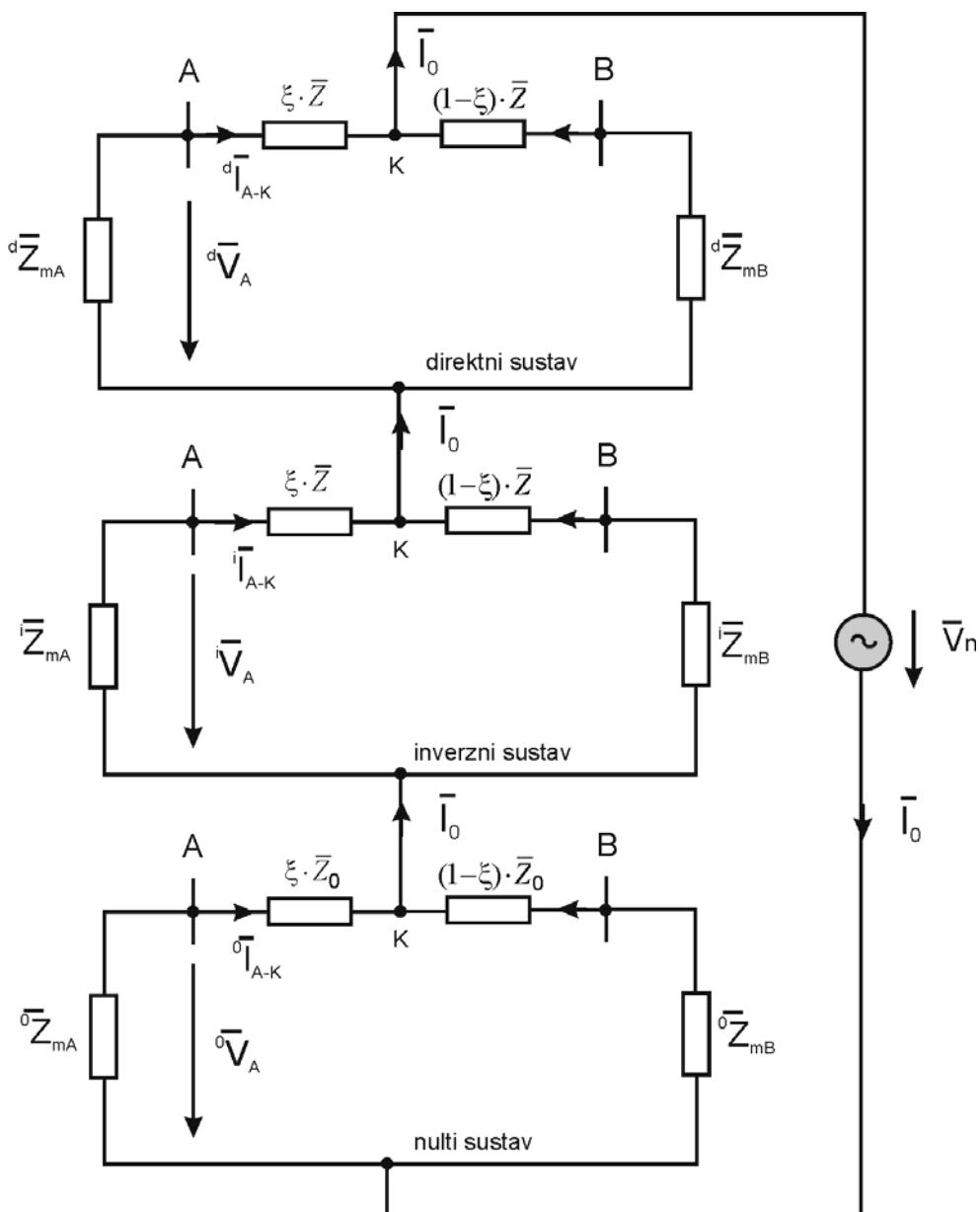
Dakle, relacija (5.1-20) predstavlja temelj za određivanje mjerene impedancije u slučaju nastupa međufaznih kratkih spojeva. Valja naglasiti da, budući da je tropolni kratki spoj simetričan kvar, mjerena impedancija pri nastupu tropoljnog kratkog spoja jest ujedno definirana i omjerom između faznog napona bilo koje faze i fazne struje u toj istoj fazi.

5.1.2. Mjerena impedancija kod nastupa dozemnih kratkih spojeva

U dozemne kratke spojeve, kao što je već spomenuto, spadaju jednopolni kratki spoj (K1) i dvopolni kratki spoj s istodobnim spojem sa zemljom (K2Z). Oba ova kvara su nesimetrični kvarovi, kod kojih se javljaju popratne struje i naponi u sva tri fiktivna nadomjesna sustava: direktnom, inverznom i nultom.

Primjer priklučka mjernog člana distantne zaštite pokazat će se na primjeru nastupa jednopoljnoga kratkog spoja. Jednopolni kratki spoj je, dakle, nesimetričan kvar. Kod njega se, kao što je već rečeno, javljaju sva tri sustava (simetričnih) komponenata struja i napona. Riječ je o direktnom, inverznom i nultom sustavu struja i napona.

Za određivanje odgovarajuće mjerene impedancije promatrati će se ponovno mreža sa slike 5.1-1. Neka je ona u idealnom praznom hodu neposredno prije nastupa kvara, a jednopolni kratki spoj se dogodio između faze R i zemlje (R-N) na nekoj proizvoljnoj udaljenosti od mjesta ugradnje releja (sabirnica A na slici 5.1-1). Nadomjesna shema mreže fiktivnog sustava razmatranog jednopoljnog kratkog spoja, za mrežu sa slike 5.1-1, prikazana je na slici 5.1-3.



Slika 5.1-3 Nadomjesna shema promatranog jednopoljnog kratkog spoja.

Novo uvedene oznake na slici 5.1-3 imaju sljedeća značenja:

${}^0\bar{Z}_{mA}$, ${}^0\bar{Z}_{mB}$ - nadomjesne impedancije nultog redoslijeda za mreže A i B,
 \bar{Z}_0 - nulta impedancija štićenog voda A-B.

Temeljem oznaka i simbolike primijenjene na slici 5.1-3 slijedi:

$$\bar{V}_n - {}^0\bar{V}_A - {}^0\bar{I}_{A-K} \cdot (\xi \cdot \bar{Z}_0) - {}^i\bar{V}_A - {}^i\bar{I}_{A-K} \cdot (\xi \cdot \bar{Z}) - {}^d\bar{V}_A - {}^d\bar{I}_{A-K} \cdot (\xi \cdot \bar{Z}) = 0 \quad (5.1-21)$$

odnosno:

$$\bar{V}_n = {}^0\bar{V}_A + {}^d\bar{V}_A + {}^i\bar{V}_A + \xi \cdot \bar{Z} \cdot ({}^d\bar{I}_{A-K} + {}^i\bar{I}_{A-K}) + \xi \cdot \bar{Z}_0 \cdot {}^0\bar{I}_{A-K} \quad (5.1-22)$$

Naponi faza R, S i T na mjestu ugradnje promatranog distantnog releja (točka A), tijekom nastupa razmatranog jednopolnoga kratkog spoja određuju se pomoću matrične jednadžbe (5.1-4), tj.:

$$\begin{Bmatrix} {}^R\bar{V}_A \\ {}^S\bar{V}_A \\ {}^T\bar{V}_A \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{V}_n \\ a^2 \cdot \bar{V}_n \\ a \cdot \bar{V}_n \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} {}^0\bar{V}_A \\ {}^d\bar{V}_A \\ {}^i\bar{V}_A \end{Bmatrix} \quad (5.1-23)$$

Iz matrične jednadžbe (5.1-23) slijedi napon faze R prema zemlji u slučaju nastupa jednopolnoga kratkog spoja:

$${}^R\bar{V}_A = \bar{V}_n - {}^0\bar{V}_A - {}^d\bar{V}_A - {}^i\bar{V}_A \quad (5.1-24)$$

Uvrštenjem izraza (5.1-22), relacija (5.1-24) prelazi u sljedeći oblik:

$${}^R\bar{V}_A = {}^0\bar{V}_A + {}^d\bar{V}_A + {}^i\bar{V}_A + \xi \cdot \bar{Z} \cdot \left({}^d\bar{I}_{A-K} + {}^i\bar{I}_{A-K} \right) + \xi \cdot \bar{Z}_0 \cdot {}^0\bar{I}_{A-K} - {}^0\bar{V}_A - {}^d\bar{V}_A - {}^i\bar{V}_A \quad (5.1-25)$$

Nakon potrebnog skraćivanja veličina, izraz (5.1-25) prelazi u sljedeći oblik:

$${}^R\bar{V}_A = \xi \cdot \bar{Z} \cdot \left({}^d\bar{I}_{A-K} + {}^i\bar{I}_{A-K} \right) + \xi \cdot \bar{Z}_0 \cdot {}^0\bar{I}_{A-K} \quad (5.1-26)$$

Neka se dobiveni izraz proširi na sljedeći način:

$${}^R\bar{V}_A = \xi \cdot \bar{Z} \cdot \left({}^d\bar{I}_{A-K} + {}^i\bar{I}_{A-K} + {}^0\bar{I}_{A-K} - {}^0\bar{I}_{A-K} \right) + \xi \cdot \bar{Z}_0 \cdot {}^0\bar{I}_{A-K} \quad (5.1-27)$$

U skladu s matričnom jednadžbom (5.1-5) struja faze R glasi:

$${}^R\bar{I}_{A-K} = {}^d\bar{I}_{A-K} + {}^i\bar{I}_{A-K} + {}^0\bar{I}_{A-K} \quad (5.1-28)$$

Temeljem potonje relacije, izraz (5.1-27) prelazi u sljedeći oblik:

$${}^R\bar{V}_A = \xi \cdot \bar{Z} \cdot \left({}^R\bar{I}_{A-K} - {}^0\bar{I}_{A-K} \right) + \xi \cdot \bar{Z}_0 \cdot {}^0\bar{I}_{A-K} \quad (5.1-29)$$

Dalnjim uređenjem dotičnog izraza dobiva se:

$${}^R\bar{V}_A = \xi \cdot \bar{Z} \cdot {}^R\bar{I}_{A-K} + \xi \cdot \bar{Z}_0 \cdot {}^0\bar{I}_{A-K} - \xi \cdot \bar{Z} \cdot {}^0\bar{I}_{A-K} \quad (5.1-30)$$

odnosno:

$${}^R\bar{V}_A = \xi \cdot \bar{Z} \cdot {}^R\bar{I}_{A-K} + \xi \cdot {}^0\bar{I}_{A-K} \cdot (\bar{Z}_0 - \bar{Z}) \quad (5.1-31)$$

Veličina ${}^R\bar{I}_{A-K}$ u izrazu (5.1-31) predstavlja dakako struju u fazi R štićenog voda između mjesta ugradnje distantnog releja i mjesta nastupa jednopolnoga kratkog spoja. Iz relacije (5.1-31) slijedi:

$$\xi \cdot \bar{Z} \cdot \left({}^R\bar{I}_{A-K} + \frac{\bar{Z}_0 - \bar{Z}}{\bar{Z}} \cdot {}^0\bar{I}_{A-K} \right) = {}^R\bar{V}_A \quad (5.1-32)$$

odnosno:

$$\xi \cdot \bar{Z} = \frac{{}^R\bar{V}_A}{{}^R\bar{I}_{A-K} + \frac{\bar{Z}_0 - \bar{Z}}{\bar{Z}} \cdot {}^0\bar{I}_{A-K}} \quad (5.1-33)$$

Proširenjem izraza (5.1-33), kako slijedi:

$$\xi \cdot \bar{Z} = \frac{{}^R\bar{V}_A}{{}^R\bar{I}_{A-K} + \frac{\bar{Z}_0 - \bar{Z}}{3 \cdot \bar{Z}} \cdot 3 \cdot {}^0\bar{I}_{A-K}} \quad (5.1-34)$$

te usvajanjem slijedeće supstitucije:

$$\bar{k}_0 = \frac{\bar{Z}_0 - \bar{Z}}{3 \cdot \bar{Z}} \quad (5.1-35)$$

dotični izraz prelazi u slijedeći oblik:

$$\xi \cdot \bar{Z} = \frac{{}^R\bar{V}_A}{{}^R\bar{I}_{A-K} + \bar{k}_0 \cdot 3 \cdot {}^0\bar{I}_{A-K}} = \bar{Z}_{mj} \quad (5.1-36)$$

Dakle, kod jednopolnoga kratkog spoja mjerni član distantnog releja se priključuje (preko člana za "sklapanje") na fazni napon one faze koja je izložena jednopolnom kratkom spoju i na struju dotične faze uvećanu za dio trostrukе nulte struje koja protječe štićenim vodom između mjesta ugradnje distantnog releja i mjesta nastupa jednopolnoga kratkog spoja. Potonja se struja dobije npr. sumacionim spojem strujnih transformatora, jer vrijedi:

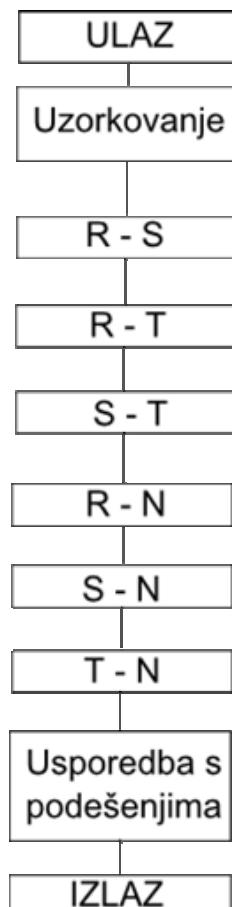
$$3 \cdot {}^0\bar{I}_{A-K} = {}^R\bar{I}_{A-K} + {}^S\bar{I}_{A-K} + {}^T\bar{I}_{A-K} \quad (5.1-37)$$

Drugim riječima, da bi mjerena impedancija, \bar{Z}_{mj} , promatranog distantnog releja bila jednaka impedanciji $\xi \cdot \bar{Z}$ između mjesta ugradnje dotičnog releja i mjesta nastupa jednopolnoga kratkog spoja, mora se mjerom članu distantnog releja dovesti fazni napon faze R (to je faza u kvaru) i struju dotične faze uvećanu za dio trostrukе nulte struje koja protječe mjestom ugradnje spomenutog distantnog releja. Koeficijent \bar{k}_0 , uveden izrazom (5.1-35), naziva se koeficijent nulte struje i ovisi o direktnoj i nultoj impedanciji štićenog voda.

Analogno prethodno provedenoj analizi, može se pokazati da u slučaju nastupa jednopolnoga kratkog spoja u fazi S, dakle (S-N), mjernom članu distantnog releja potrebno je dovesti fazni napon faze S i struju dotične faze uvećanu za dio trostrukе nulte struje koja protječe mjestom ugradnje spomenutog distantnog releja. Isto tako, pri nastupu jednopolnoga kratkog spoja u fazi T, dakle (T-N), mjernom članu distantnog releja potrebno je dovesti fazni napon faze T i struju dotične faze uvećanu za dio trostrukе nulte struje koja protječe mjestom ugradnje spomenutog distantnog releja.

5.1.3. Klasifikacija kvarova

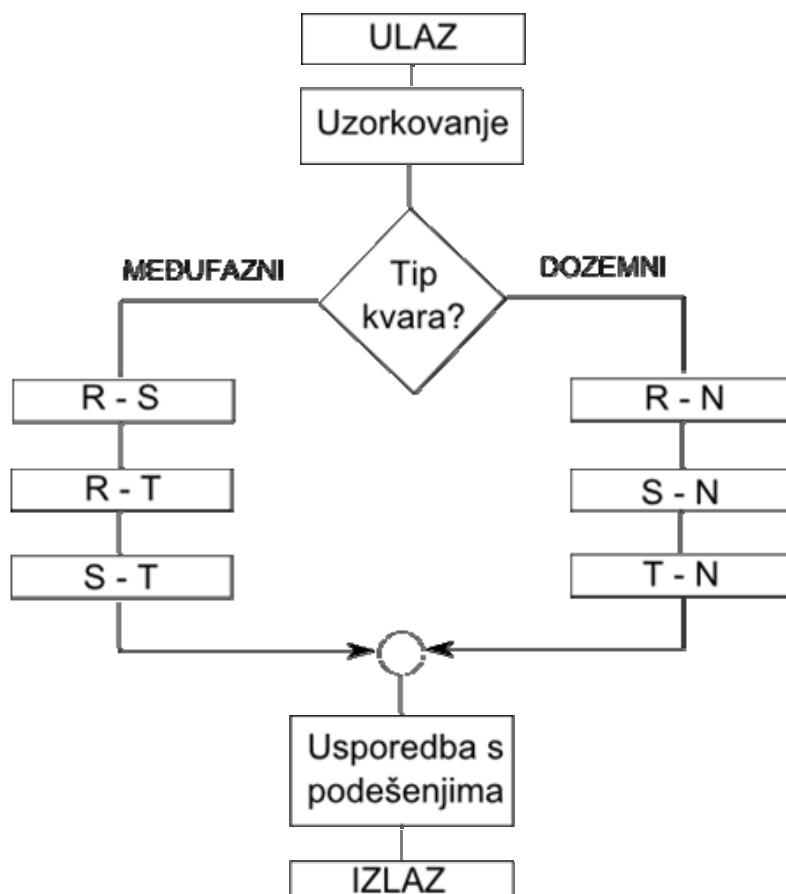
Iz prethodno izložene analize uočava se da se mjerena impedancija distantne zaštite računa na različite načine za različite vrste kvarova te da sveukupno postoji šest različitih relacija koje treba računati u realnom vremenu da bi se odredila vrsta kvara. Naime, svih deset različitih vrsta kvarova mogu se prepoznati korištenjem šest relacija za izračun mjerene impedancije. Numerički distantni relj mora (u realnom vremenu) računati sa strujama i naponima koje mjeri svih šest (kompleksnih) relacija koje definiraju mjerenu impedanciju te vršiti usporedbu s podešenim vrijednostima impedancija I., II. i III. stupnja. Algoritam opisanog koncepta grafički je ilustriran na slici 5.1-4.



Slika 5.1-4 Pojednostavljeni algoritam rada numeričkog distantnog releja.

Valja pritom naglasiti da će pri određenoj vrsti kvara relej računati svih šest mjerjenih impedancija i uspoređivati dobivene vrijednosti s podešenjima (podešenim impedancijama I., II. i III. stupnja distantne zaštite). Međutim, samo će neke od mjerjenih impedancija dati „pravu“ vrijednost mjerene impedancije (ovisno o vrsti kvara koji je nastupio) te će relej djelovati. Ostale mjerene impedancije će imati neke „krive“ vrijednosti koje neće izazvati proradu releja (ove mjerene impedancije imaju redovito velike vrijednosti i izlaze izvan svih proradnih karakteristika distantne zaštite). Uočava se sa slike 5.1-4 da relej mora u realnom vremenu računati svih šest izraza za mjerenu impedanciju, bez obzira na vrstu kvara.

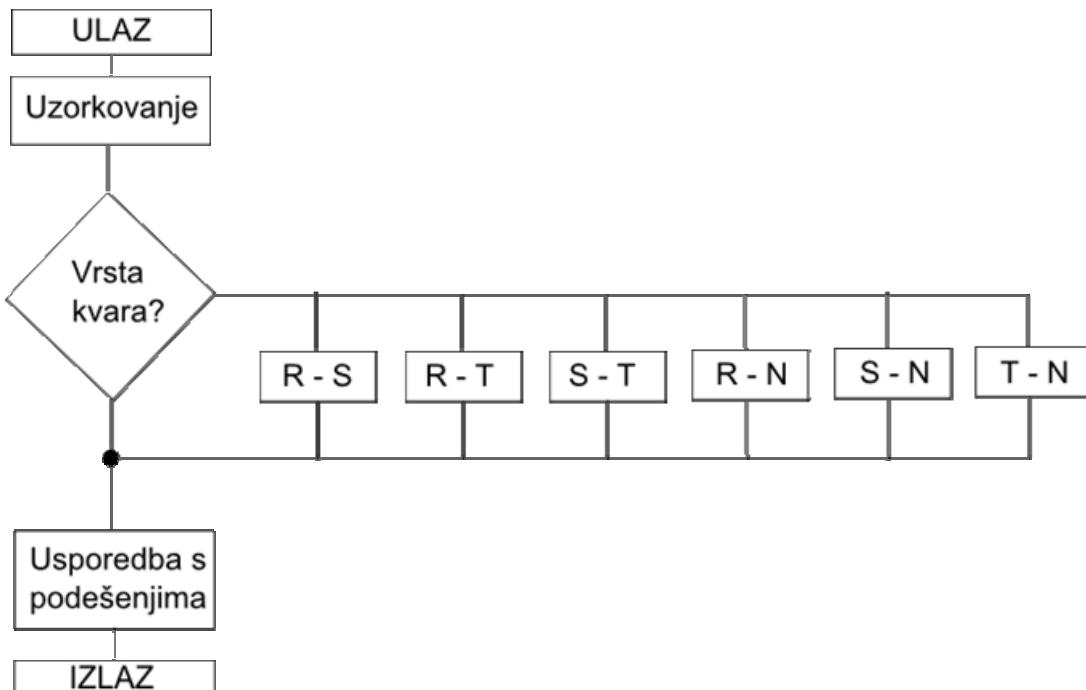
Poboljšanje prethodno izloženog koncepta moguće je separacijom kvarova u dvije grupe: međufazni kratki spojevi i dozemni kratki spojevi. Na taj način, distantni relej mora prvo prepoznati u koju od prethodno navedenih skupina spada kvar koji se dogodio te sukladno tome računati sada samo tri od šest mogućih mjerjenih impedancija. Grafička ilustracija ovog algoritma prikazana je na slici 5.1-5.



Slika 5.1-5 Pojednostavljeni algoritam rada numeričkog distantnog releja s prepoznavanjem tipa kvara.

Valja naglasiti da numerički relej ne zna točno o kojoj vrsti kvara se radi, već samo prepoznaže da li je riječ o međufaznom ili dozemnom kratkom spoju. Koriste se pritom relativno složeni algoritmi za prepoznavanje tipa kvara koji je nastupio na vodu (međufazni ili dozemni).

Drugi koncept koji se koristi kod numeričke distantne zaštite baziran je na potpunom prepoznavanju vrste kvara. Pojednostavljeni algoritam ovog koncepta grafički je ilustriran na slici 5.1-6. Ovdje se korištenjem posebnog algoritma prvo „prepozna“ točna vrsta kvara (od mogućih deset) te se potom računa samo ona mjerena impedancija (od potrebnih šest) koja odgovara toj vrsti kvara. Na ovaj način nije potrebno uvijek računati svih šest kompleksnih izraza za mjerene impedancije, već samo onaj (jedan!) izraz koji odgovara prepoznatoj vrsti kvara koji je nastupio na štićenom elementu (vodu). Ovaj pristup bi trebao ubrzati djelovanje releja, ukoliko se omogući da relaj bude u stanju dovoljno brzo i točno prepoznati vrstu kvara koja je nastupila.

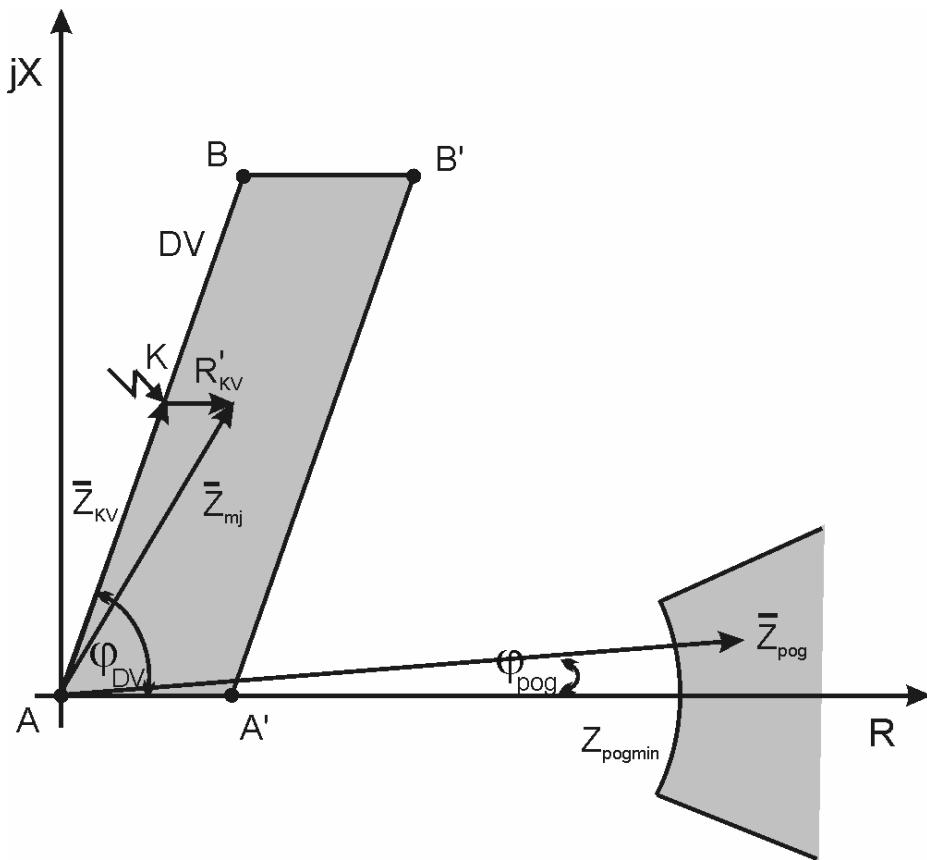


Slika 5.1-6 Pojednostavljeni algoritam rada numeričkog releja koji prepoznae točnu vrstu kratkog spoja na vodu.

U osnovi se učinkovitost i brzina ovog algoritma svodi na ostvarenje što učinkovitijeg (i bržeg) načina prepoznavanja kvarova na vodovima. Postoje različiti algoritmi koji se koriste za prepoznavanje kvarova na vodovima, pri čemu su danas najpopularnije (i najviše obećavaju) oni bazirani na korištenju umjetnih neuronskih mreža (engl.: Artificial Neural Networks, ANN). Algoritmi za prepoznavanje kvarova koji su bazirani na umjetnim neuronskim mrežama su relativno kompleksni i imaju mogućnost „inteligentnog“ prepoznavanja svih različitih vrsta kvarova na štićenim vodovima (uključujući i evoluirajuće kvarove). Međutim, postoji također i niz problema koji je vezan uz primjenu ovih metoda za prepoznavanje vrste kvara, te je stoga ovaj koncept još uvijek u fazi razvoja i trenutno na tržištu ne postoje distantni releji (barem koliko je autoru poznato) koji koriste algoritme bazirane na umjetnim neuronskim mrežama. Osnovni koncepti umjetnih neuronskih mreža prikazani su u Prilogu A.

5.2. Vrste i karakteristike distantnih releja

Distantne releje moguće je klasificirati / dijeliti u odnosu na vrstu zaštitne (proradne) karakteristike koju koriste. Naime, radne karakteristike distantnih releja najpreglednije se prikazuju u kompleksnoj ravnini (R , X), gdje su: R – djelatni otpor, a X – reaktancija. Slika 5.2-1 grafički ilustrira poželjnu (idealnu) proradnu (radnu) karakteristiku distantnog releja.



Slika 5.2-1 Poželjna (idelana) radna karakteristika diferencijalnog releja.

Duljina AB na slici 5.2-1 predstavlja impedanciju direktnog redoslijeda voda A-B, kojeg štiti distantni relaj ugrađen na početku dotičnog voda (točka A). Veličina φ_{DV} na slici 4.2-1 predstavlja kut štićenog voda. Vrijede, naime, sljedeće relacije:

$$\bar{Z} = R_{DV} + jX_{DV} \quad (5.2-1)$$

$$\varphi_{DV} = \arctg \frac{X_{DV}}{R_{DV}} \quad (5.2-2)$$

gdje su:

- R_{DV} – djelatni otpor štićenog voda A-B,
- X_{DV} – reaktancija štićenog voda A-B.

Kod nastupa metalnog kratkog spoja, radna točka releja (definirana koordinatama R i X u kompleksnoj ravnini na slici 5.2-1) kreće se upravo po pravcu AB štićenog voda. Pri nastupu

metalnog kratkog spoja negdje na štićenom vodu (primjerice točka K), radna točka će se, dakle, nalaziti negdje na pravcu AB sa slike 5.2-1. Kod realnih kratkih spojeva postoje i prijelazni otpori na mjestu kvara, kao i otpor električnog luka. Ovi otpori imaju djelatni karakter i na slici 5.2-1 su prikazani duljinama AA' i BB'. Da bi relej djelovao na bilo kojem mjestu voda A-B trebao bi imati proradnu karakteristiku prikazanu osjenčanim područjem na slici 5.2-1. Prema dotičnoj slici slijedi:

$$\bar{Z}_{mj} = \bar{Z}_{KV} + R'_{KV} \quad (5.2-3)$$

gdje su:

- \bar{Z}_{mj} - mjerena impedancija distantnog releja smještenog u točki A; riječ je o mjerenoj impedanciji koja je prezentirana u poglavlju 4.1 i ovisi o vrsti kratkog spoja,
- \bar{Z}_{KV} - impedancija kvara; jednaka je impedanciji voda A-B između točke A (mjesto ugradnje distantnog releja) i mjesta nastupa kratkog spoja (točka K),
- R'_{KV} - djelatni otpor kvara; jednak je zbroju prijelaznog otpora na mjestu kvara i otpora električnog luka.

Na slici 5.2-1 prikazana je i pogonska impedancija, \bar{Z}_{pog} , koju mjeri distantni relej postavljen u točki A u slučajevima normalnog pogona / opterećenja ili dozvoljenog preopterećenja štićenog voda. Prikazano je također na slici 5.2-1 i odgovarajuće područje unutar kojeg se može kretati spomenuta pogonska impedancija (radna točka distantnog releja u normalnom pogonu). Ovo područje s jedne strane omeđeno je tzv. najmanjom pogonskom impedancijom, Z_{pogmin} . Radna točka distantnog releja u normalnom pogonu odlikuje se malim kutem, ϕ_{pog} , jer je faktor snage obično blizak jedinici. Vrijede, naime, sljedeći izrazi:

$$\bar{Z}_{pog} = R_{pog} + jX_{pog} \quad (5.2-4)$$

gdje su:

$$R_{pog} = \frac{U^2 \cdot P}{P^2 + Q^2} \quad (5.2-5)$$

$$X_{pog} = \frac{U^2 \cdot Q}{P^2 + Q^2} \quad (5.2-6)$$

pri čemu je:

- P – djelatna snaga opterećenja štićenog voda A-B,
- Q – reaktivna snaga opterećenja štićenog voda A-B,
- U – linijski napon voda A-B.

Nadalje, vrijedi da je:

$$\varphi_{pog} = \arctg \frac{X_{pog}}{R_{pog}} = \arctg \frac{Q}{P} \quad (5.2-7)$$

Stvarne proradne karakteristike distantnih releja razlikuju se manje ili više od (idealne) karakteristike prikazane na slici 5.2-1. Zbog mogućnosti različitog faznog položaja između struje i napona postoje i različite mogućnosti mjerena mjerene veličine (impedancije ili admitancije). Prema vrsti mjerene veličine distantnog releja, proradne karakteristike dobile su svoje nazive. U tablici 5.2-1 prikazane su mogućnosti različitih načina mjerena mjerene veličine (impedancije ili admitancije) te odgovarajući nazivi pojedinih vrsta distantnih releja.

Tablica 5.2-1 Vrste distantnih releja s obzirom na mjernu veličinu.

Oznaka	Naziv releja	Mjerena veličina	Naziv mjerene veličine
OHM releji	Impedantni	$\frac{U_{KV}}{I_{KV}} = Z_{KV}$	Impedancija
	Rezistatntni	$\frac{U_{KV}}{I_{KV}} \cdot \cos \varphi_{DV} = Z_{KV} \cdot \cos \varphi_{DV} = R_{KV}$	Djelatni otpor
	Reaktantni	$\frac{U_{KV}}{I_{KV}} \cdot \sin \varphi_{DV} = Z_{KV} \cdot \sin \varphi_{DV} = X_{KV}$	Reaktancija
MHO releji	Admitantni	$\frac{I_{KV}}{U_{KV}} = \frac{1}{Z_{KV}} = Y_{KV}$	Admitancija
	Konduktantni	$\frac{I_{KV}}{U_{KV}} \cdot \cos \varphi_{DV} = Y_{KV} \cdot \cos \varphi_{DV} = G_{KV}$	Konduktancija
	Susceptantni	$\frac{I_{KV}}{U_{KV}} \cdot s \sin \varphi_{DV} = Y_{KV} \cdot \sin \varphi_{DV} = B_{KV}$	Susceptancija

Impedantni distantni relej, kao što i sama riječ kazuje, mjeri impedanciju. Dosadašnja izlaganja iznošena su s pretpostavkom da se radi upravo o distantnom releju koji je impedantnog tipa. On je ujedno najjednostavniji tip distantnog releja, jer mjeri odnos napona i struje, neovisno o njihovom faznom položaju. Ispod određene (podešene) mjerene vrijednosti impedantni distantni relej mora djelovati, a iznad nje ne smije. To ujedno predstavlja i kriterij za njegovo podešenje. Kada relej treba djelovati u I. stupnju (I. zona), mora biti zadovoljena sljedeća jednadžba:

$$Z_{KV} \leq Z_I \quad (5.2-8)$$

pri čemu veličina Z_I predstavlja proradnu impedanciju I. stupnja, koja se podešava na distantnom releju. Na dalje, u kompleksnoj ravnini (R, X) vrijedi da je:

$$Z_{KV} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (5.2-9)$$

Uvrštenjem izraza (5.2-9) u (5.2-8) slijedi:

$$\sqrt{R^2 + X^2} \leq Z_I \quad (5.2-10)$$

Kvadriranjem obiju strana nejednakosti (5.2-10) dobiva se:

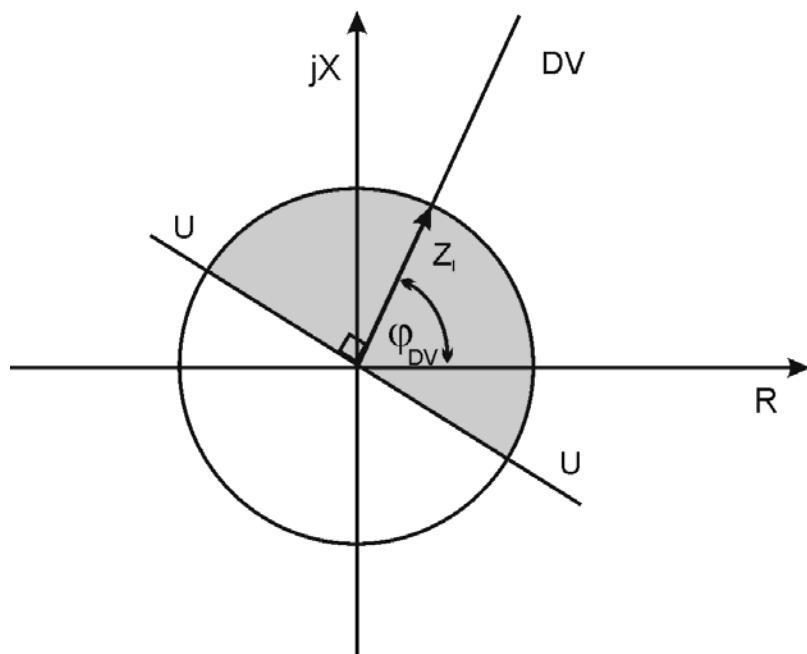
$$R^2 + X^2 \leq Z_I^2 \quad (5.2-11)$$

Izraz (5.2-19) predstavlja jednadžbu centralne kružnice u ravnini (R, X) s radijusom iznosa Z_I . Područje unutar kružnice radijusa Z_I (područje kruga) predstavlja, dakle, područje djelovanja impedantnog distantnog releja. Izvan spomenutog kruga distantna zaštita ne smije djelovati u I. stupnju.

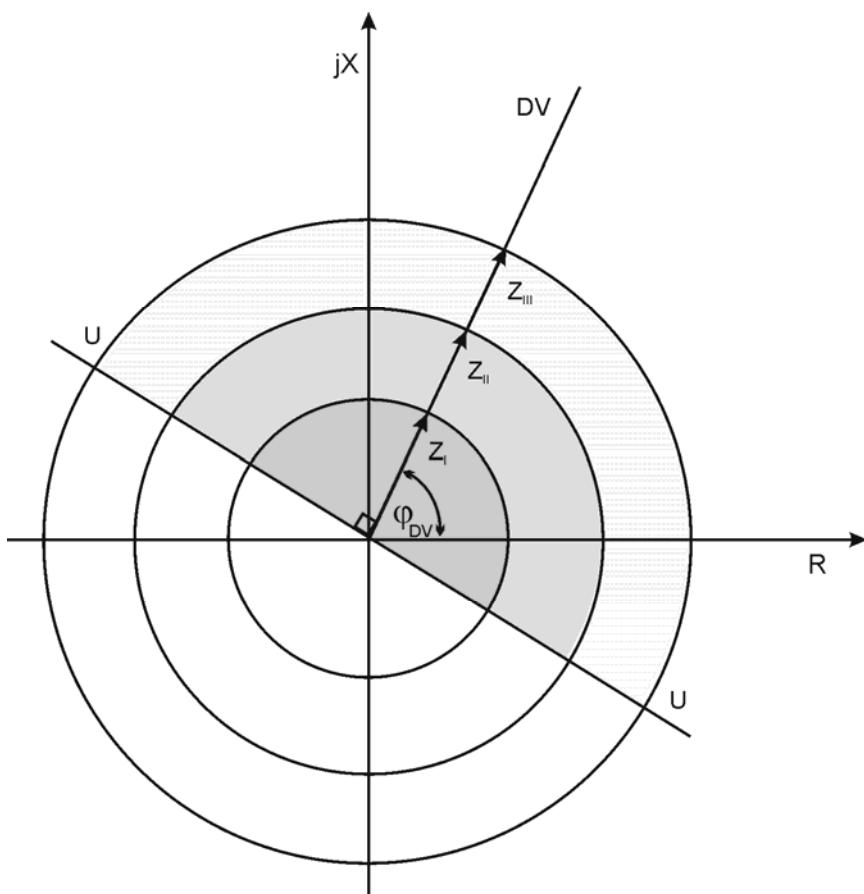
Na slici 5.2-2 prikazana je spomenuta kružnica koja predstavlja proradnu karakteristiku (još se naziva i isklopna karakteristika) impedantnog mjernog člana distantne zaštite. Na dotičnoj slici ucrtan je i pravac štićenog voda (oznaka DV). Mjesto ugradnje distantnog releja jest ishodište koordinatnog sustava (R, X). Budući da je inicijalno područje djelovanja impedantnog mjernog člana distantne zaštite puni krug, na slici 5.2-2 prikazan je i pravac U-U koji predstavlja karakteristiku usmjernog člana. Naime, impedantni distantni relj mora posjedovati vanjski usmjerni član. Karakteristika usmjernog člana okomita je na pravac štićenog voda (DV). Usmjerni član dopušta djelovanje distantne zaštite samo u smjeru štićenog voda, dakle, u smjeru pravca DV na slici 5.2-2. U protivnom, ukoliko je kvar „iza leđa“ distantnom relju, usmjerni član blokira njegovo djelovanje.

Korištenjem karakteristike usmjernog člana, proradna karakteristika impedantnog mjernog člana distantne zaštite za I. stupanj predstavljena je samo gornjom polovicom kruga (osjenčano područje na slici 5.2-2), omeđenog proradnom impedancijom I. stupnja (Z_I). Područje izvan i ispod osjenčanog dijela kruga jest područje u kojem distantna zaštita ne smije djelovati u svojem I. stupnju.

Identično izgledaju i proradne karakteristike impedantnog mjernog člana distantne zaštite za više stupnjeve. Kompletna / potpuna proradna karakteristika impedantnog mjernog člana distantne zaštite za I., II. i III. stupanj prikazana je na slici 5.2-3.



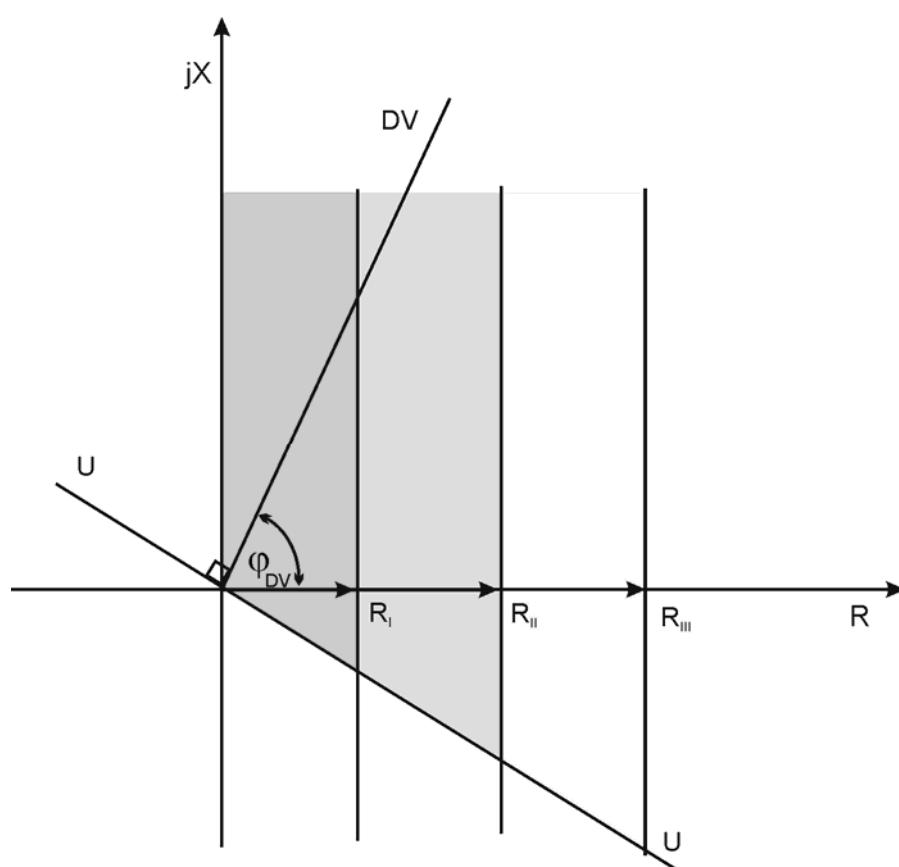
Slika 5.2-2 Proradna karakteristika impedantnog mjernog člana distantne zaštite za I. stupanj (dopunjena usmjernim članom).



Slika 5.2-3 Proradne karakteristike impedantnog mjernog člana distantne zaštite za I., II. i III. stupanj (dopunjene usmjernim članom).

Radi se, dakle, o koncentričnim centralnim kružnicama radijusa Z_I , Z_{II} i Z_{III} , respektivno. Istovremeno je prikazana i karakteristika usmjernog člana, koji je nužan kod ovog tipa distantnog releja. Područja djelovanja impedantanog distantnog releja za I., II. i III. stupanj predstavljena su polukrugovima iznad karakteristike usmjernog člana i prikazana su osjenčano na slici 5.2-3. Područje izvan spomenutih krugova jest područje u kojem distantna zaštita ne smije djelovati.

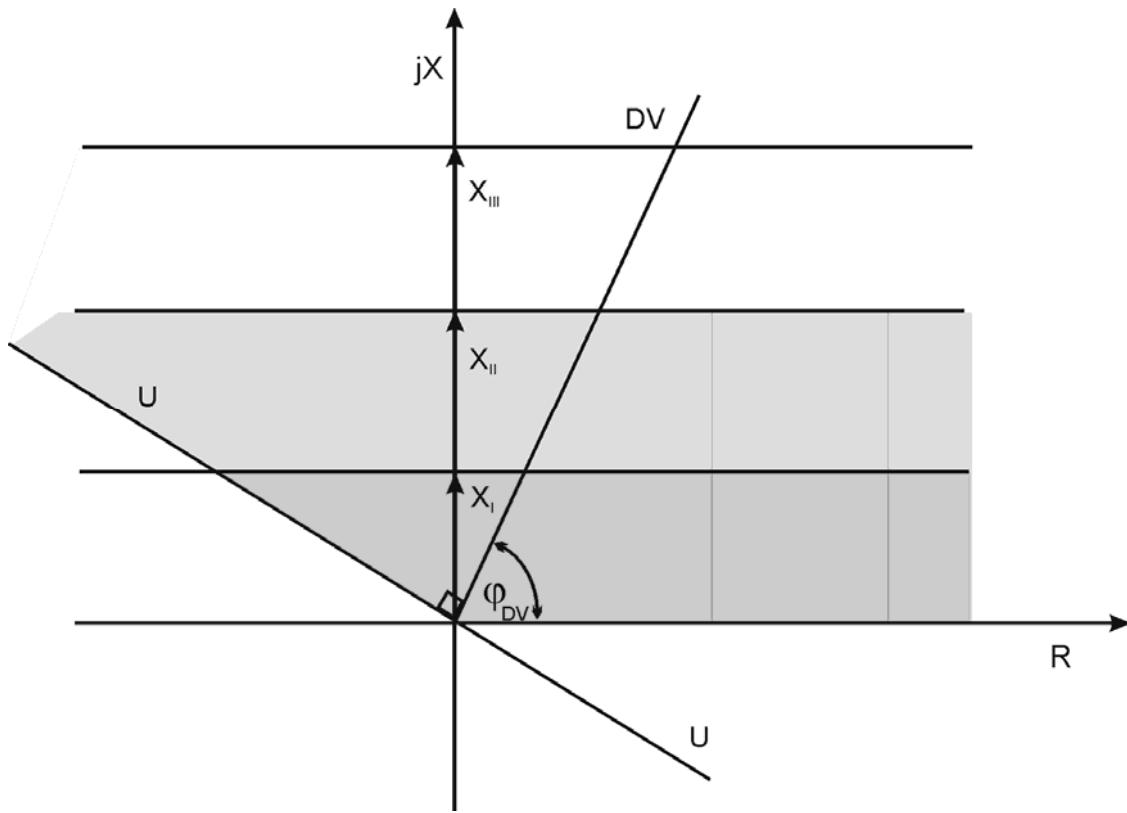
Proradna karakteristika rezistentnog mjernog člana distantne zaštite, za I., II. i III. stupanj prikazana je na slici 5.2-4. Riječ je u ovom slučaju o prvcima koji su paralelni s osi ordinata (jX) i postavljeni su na udaljenosti od ishodišta koordinatnog sustava koja odgovara djelatnom otporu I., II. i III. stupnja. Na dotičnoj slici prikazan je i pravac štićenog voda (DV), kao i karakteristika odgovarajućeg usmjernog člana (pravac U-U). Naime, i ova distantna zaštita mora posjedovati odgovarajući usmjerni član.



Slika 5.2-4 Proradne karakteristike rezistentnog mjernog člana distantne zaštite za I., II. i III. stupanj (dopunjene usmjernim članom).

Na slici 5.2-5 prikazana je kompletan proradna karakteristika reaktantnog mjernog člana distantne zaštite za I., II. i III. stupanj. Riječ je o prvcima koji su paralelni s osi apscisa (R) i postavljeni su na udaljenosti od ishodišta koordinatnog sustava koja odgovara reaktanciji I., II. i III. stupnja. Na dotičnoj slici prikazan je ponovno i pravac štićenog voda (DV), kao i karakteristika odgovarajućeg usmjernog člana (pravac U-U). Naime, i ova distantna zaštita također mora posjedovati odgovarajući usmjerni član.

Prethodno uvedene tri različite vrste mjernih članova distantnog releja zajedničkim imenom se nazivaju OHM releji. Oni zahtjevaju primjenu usmjernog člana, jer ne mogu sami diskriminirati između nastupa kratkog spoja ispred i iza mesta ugradnje distantnog releja.



Slika 5.2-5 Proradne karakteristike reaktantnog mjernog člana distantne zaštite za I., II. i II. stupanj (dopunjene usmjernim članom).

Kao što je navedeno u tablici 5.2-1, postoje i mjerni članovi koji mijere admitanciju umjesto impedancije. Riječ je o tzv. MHO relejima (čitaj MU). Neka se kao primjer odredi proradna karakteristika konduktantnog mjernog člana distantnog releja. Prema njegovoj definiciji, da bi dotični relj djelovao primjerice u svom I. stupnju, mora biti zadovoljena sljedeća relacija:

$$\frac{1}{Z_{KV}} \cdot \cos \varphi_{DV} \geq \frac{1}{R_I} \quad (5.2-12)$$

pri čemu su:

$$\cos \varphi_{DV} = \frac{R}{Z_{KV}} \quad (5.2-13)$$

$$Z_{KV} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (5.2-14)$$

Uvrštenjem izraza (5.2-13) i (5.2-14) u izraz (5.2-12), dobiva se:

$$\frac{R}{R^2 + X^2} \geq \frac{1}{R_I} \quad (5.2-15)$$

odnosno, nakon sređivanja:

$$R^2 - R \cdot R_I + X^2 \leq 0 \quad (5.2-16)$$

Izraz (5.2-16) može se proširiti kako slijedi:

$$R^2 - R \cdot R_I + \left(\frac{R_I}{2}\right)^2 - \left(\frac{R_I}{2}\right)^2 + X^2 \leq 0 \quad (5.2-17)$$

iz kojega konačno slijedi:

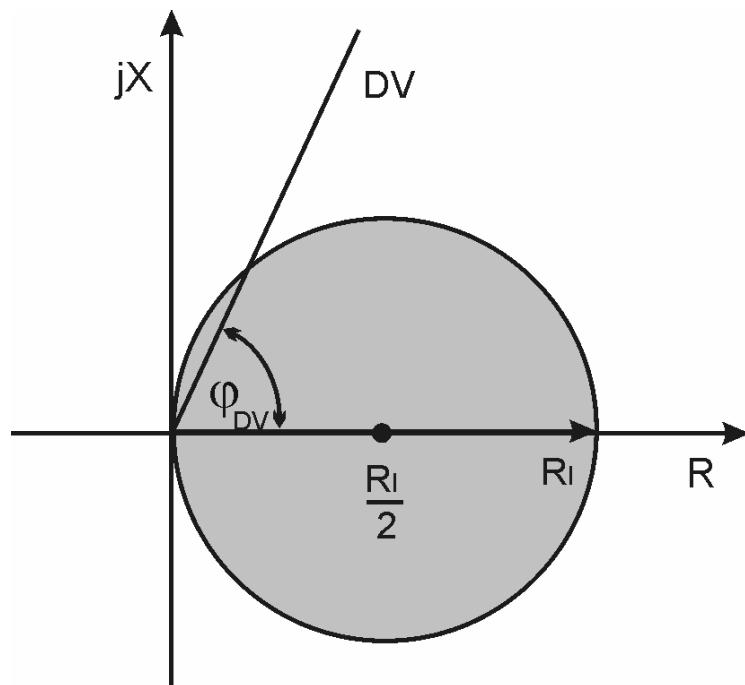
$$\left(R - \frac{R_I}{2}\right)^2 + X^2 \leq \left(\frac{R_I}{2}\right)^2 \quad (5.2-18)$$

Izraz (5.2-18) predstavlja jednadžbu kružnice u ravnini (R, X) sa središtem u točki s koordinatama $\left(\frac{R_I}{2}, 0\right)$ i s radiusom iznosa $R_I / 2$.

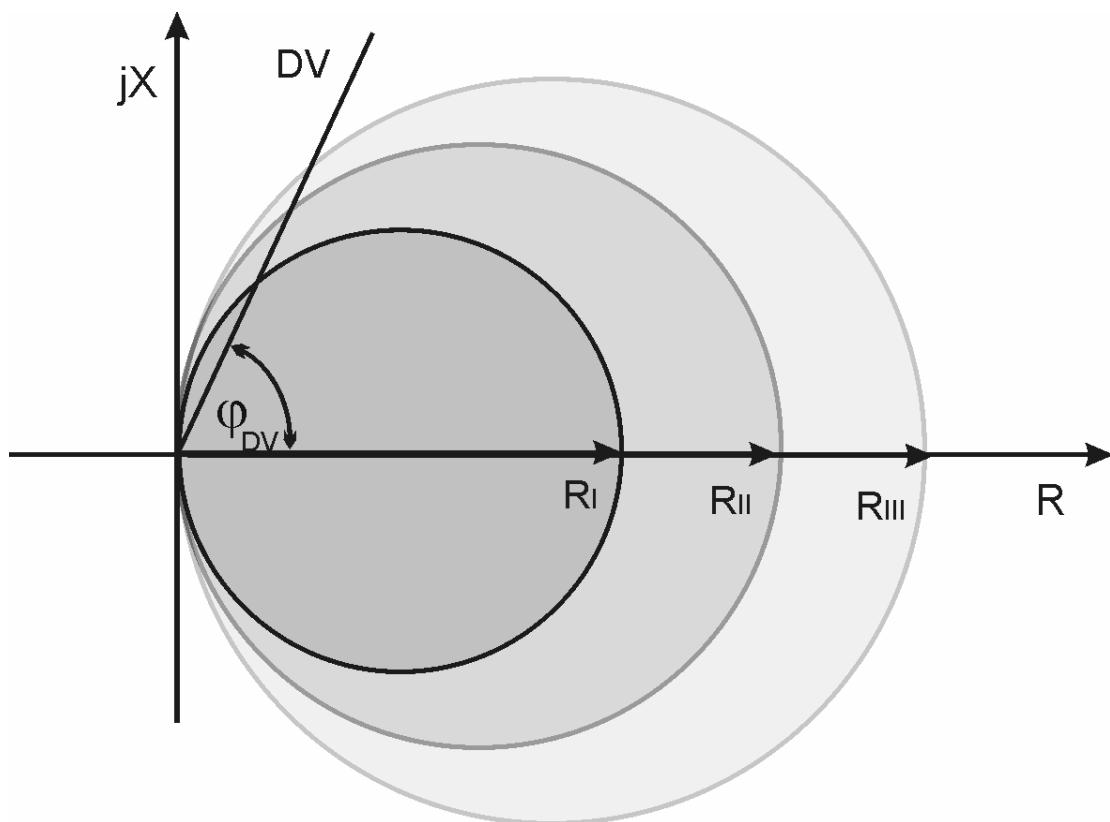
Na slici 5.2-6 prikazana je dotična karakteristika. Dakle, proradna karakteristika mjernog člana konduktantnog releja jest kružnica položena duž osi R u ravnini (R, X) s ishodištem u točki $\left(\frac{R_I}{2}, 0\right)$ i radiusom iznosa $R_I / 2$. Na slici 5.2-6 prikazan je i pravac štićenog voda (oznaka DV).

Osjenčano je na slici 5.2-5 prikazano područje djelovanja distantnog releja u I. stupnju. Uočava se da mjernom članu konduktantnog releja nije potreban vanjski usmjereni član da bi odredio smjer kvara duž štićenog voda. Položaj proradne karakteristike je takav da to sam osigurava (tj. reley ne vidi kvarove „iza leđa“). Ovo je prednost konduktantnog releja u odnosu na primjerice, impedantni reley.

Istovremeno je na slici 5.2-6 prikazana kompletna proradna karakteristika konduktantnog mjernog člana distantnog releta za I., II. i III. stupanj.

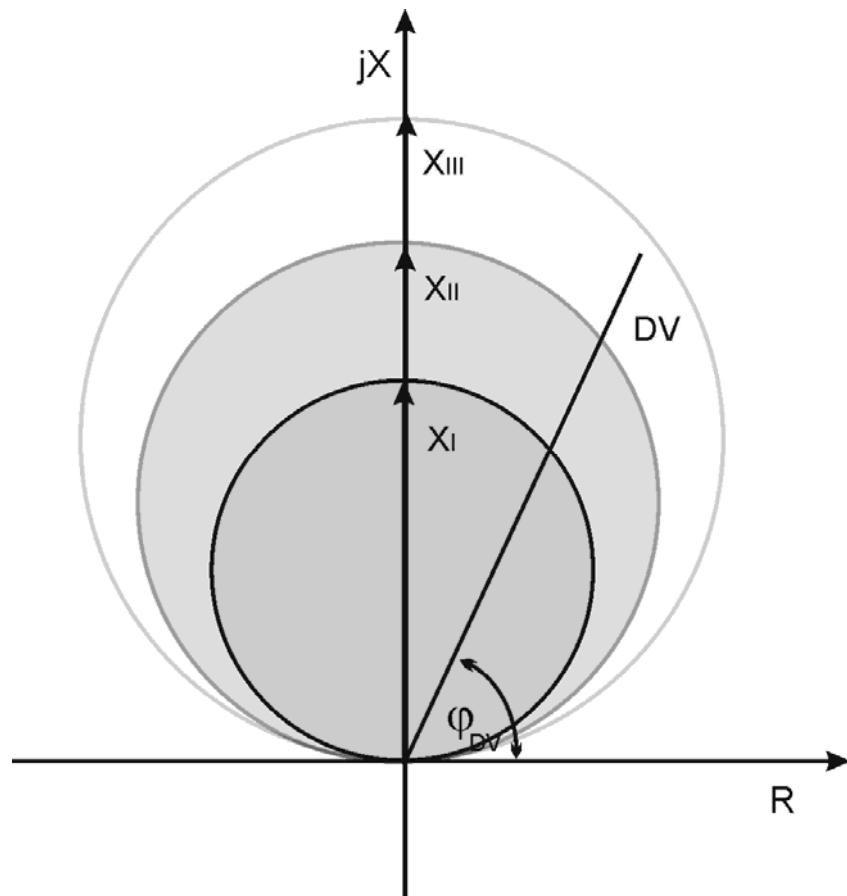


Slika 5.2-5 Proradna karakteristika konduktantnog mjernog člana distantnog releja za I. stupanj.



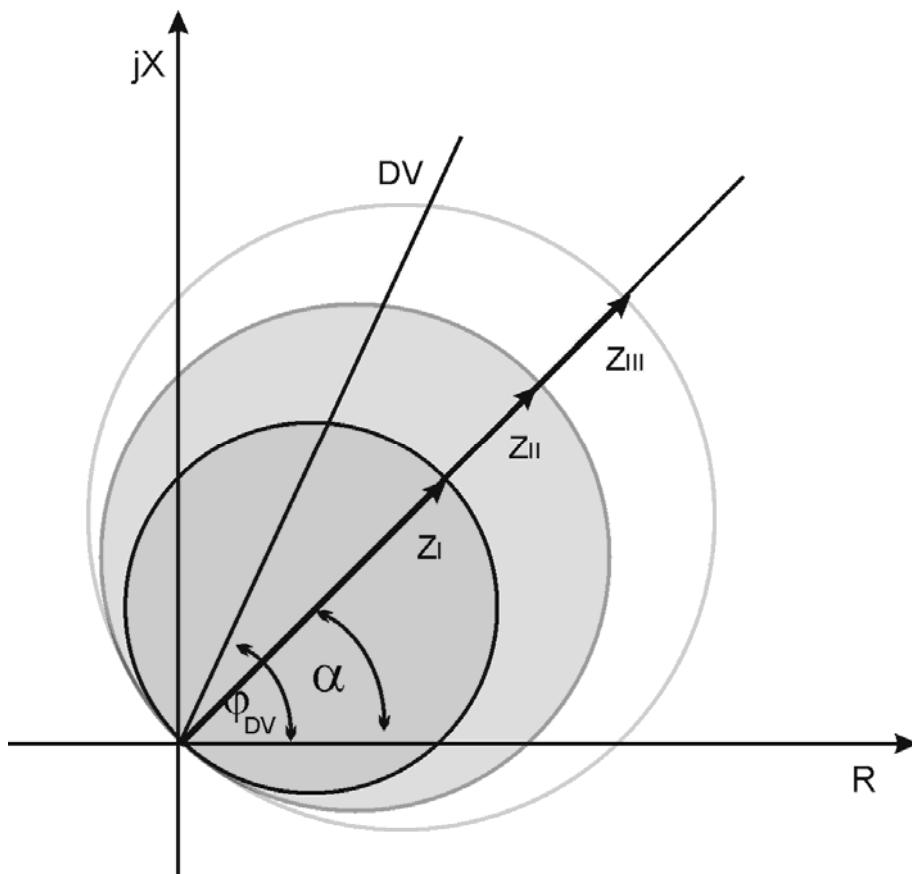
Slika 5.2-6 Proradne karakteristike konduktantnog mjernog člana distantne zaštite za I., II. i III. stupanj.

Na slici 5.2-7 prikazane su proradne karakteristike susceptantnog mjernog člana distantnog releja za I., II. i III. stupanj. Uočava se da je ovdje riječ o kružnicama koje su položene duž koordinatne osi X u kompleksnoj ravnini (R, X). Ni u ovom slučaju nije potrebn upotreba usmjernog člana, jer je proradna karakteristika takva da relej ne vidi kvarove „iza leđa“.



Slika 5.2-7 Proradne karakteristike susceptantnog mjernog člana distantne zaštite za I., II. i III. stupanj.

Na slici 5.2-8 prikazane su proradne karakteristike admitantnog mjernog člana distantnog releja za I., II. i III. stupanj. Uočava se da je ovdje ponovno riječ o kružnicama, koje su sada položene duž pravca definiranog kutem α . Ovaj kut naziva se unutarnjim kutem releja (kut admitantnog mjernog člana releja) i predstavlja jednu od konstrukcijskih značajki samog relejnog uređaja. Promjenom unutarnjeg kuta α može se mijenjati i oblik tj. nagib proradne karakteristike distantnog releja u prvom kvadrantu koordinatnog sustava (R, X). Naime, ovaj kut se može proizvoljno mijenjati / podešavati od strane korisnika relejnog uređaja. Dakle, promjenom kuta α admitantni mjerni član može biti bliže području konduktantnog ili pak susceptantnog mjernog člana distantne zaštite. Također se uočava sa slike 5.2-8 da ni admitantnom mjernom članu distantne zaštite nije potreban vanjski usmjerni član jer je proradna karakteristika takva da relej ne vidi kvarove „iza leđa“. Valja naglasiti da je prije pojave numeričke generacije relejne zaštite, upravo admitantni mjerni član imao najveću / najrašireniju primjenu u distantnim uređajima.

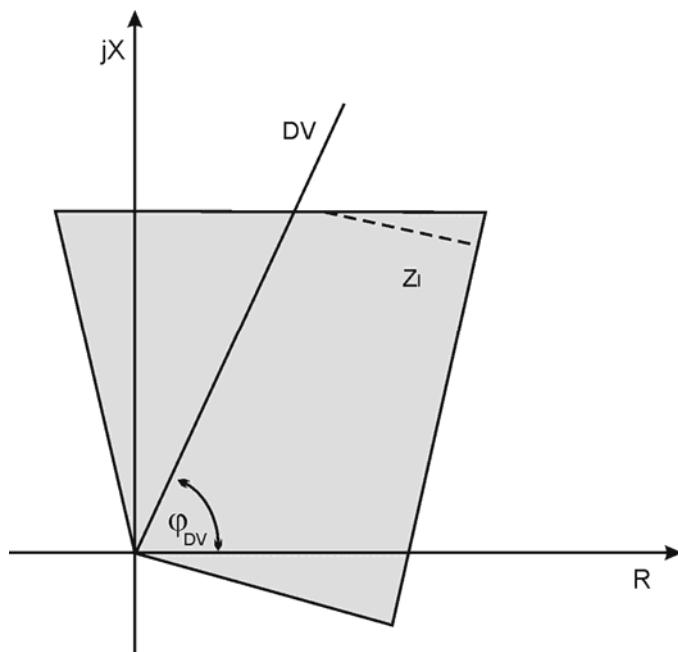


Slika 5.2-8 Proradne karakteristike admitantnog mjernog člana distantne zaštite za I., II. i III. stupanj.

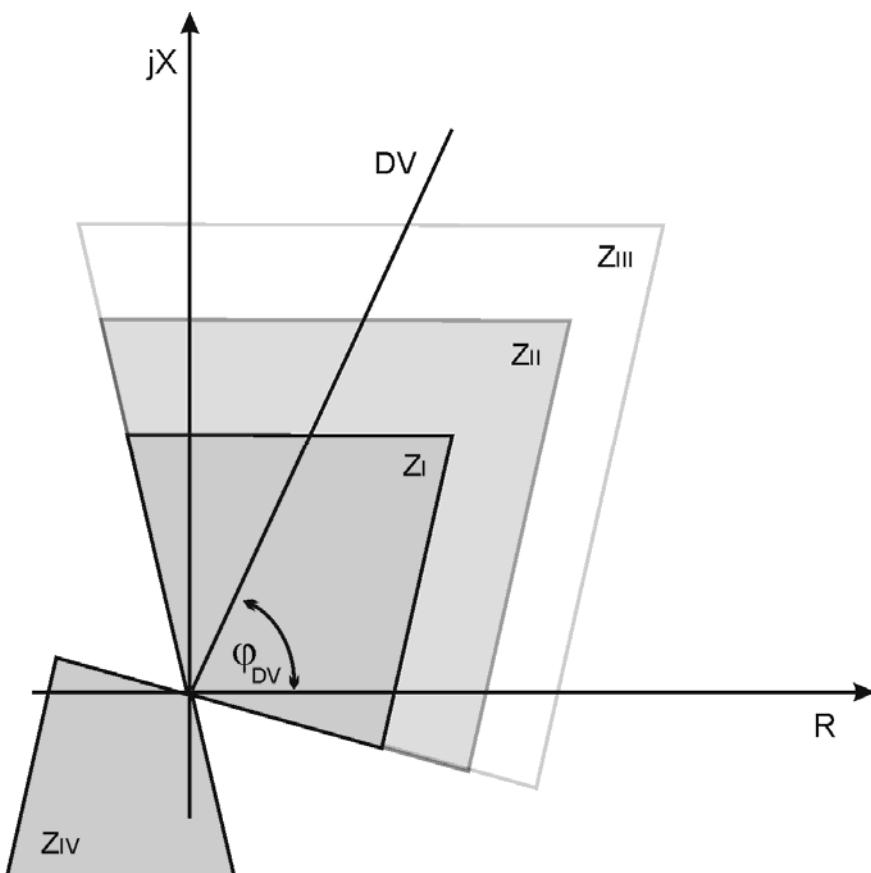
Osim ovdje prikazanih proradnih karakteristika mjernog člana distantne zaštite, koji odgovaraju mjeranim veličinama (tzv. OHM i MHO releji), postoje i složeniji oblici proradnih karakteristika koji su "umjetno" dobiveni. Ovako dobivene „umjetne“ karakteristike pojavile su se s primjenom statičke generacije relejnih uređaja. Mogu se spomenuti primjerice eliptične proradne karakteristike, koje također mogu biti položene duž pravca u prvom kvadrantu kompleksne ravnine (R, X). Mjerni član distantne zaštite može posjedovati i proradne karakteristike oblika tzv. "leća" (engl.: lenses) i neke druge oblike.

Međutim, od najvećeg su značaja tzv. poligonalne (quadrilateralne) proradne karakteristike mjernog člana distantne zaštite. One su se pojavile sa statičkim relejnim zaštitama a svoj puni procvat su doživile s pojavom numeričke generacije relejne zaštite. Kod modernih numeričkih distantnih zaštita koriste se isključivo poligonalne proradne karakteristike. Primjer poligonalne proradne karakteristike mjernog člana I. stupnja distantne zaštite prikazan je na slici 5.2-9. Crtkano je na slici prikazana dodatna mogućnost podešenja proradne karakteristike I. stupnja.

Na slici 5.2-10 prikazana je pak kompletna proradna karakteristika mjernog člana numeričke distantne zaštite, poligonalnog tipa, za I., II., III. i IV. stupanj. Valja uočiti da je proradna karakteristika IV. stupnja usmjerena prema natrag, dakle, gleda "iza leđa" štićenog voda.



Slika 5.2-9 Proradna karakteristika poligonalnog tipa, mjernog člana distantne zaštite za I. stupanj.



Slika 5.2-10 Proradne karakteristike numeričkog releja, poligonalnog tipa, za I., II., III. i IV. stupanj.

Pregledom proradnih karakteristika mjernih članova, prikazanih na slikama 5.2-3 do uključivo 5.2-10, uočava se da se upravo poligonalna (quadrilateralna) proradna karakteristika najviše približila obliku tzv. idealne radne karakteristike prikazane na slici 5.2-1. Danas se stoga u numeričkim zaštitama isključivo koriste poligonalne (quadrilateralne) proradne karakteristike mjernih članova distantnih releja.

5.2.1. Utjecaj otpora na mjestu kvara na rad mjernog člana

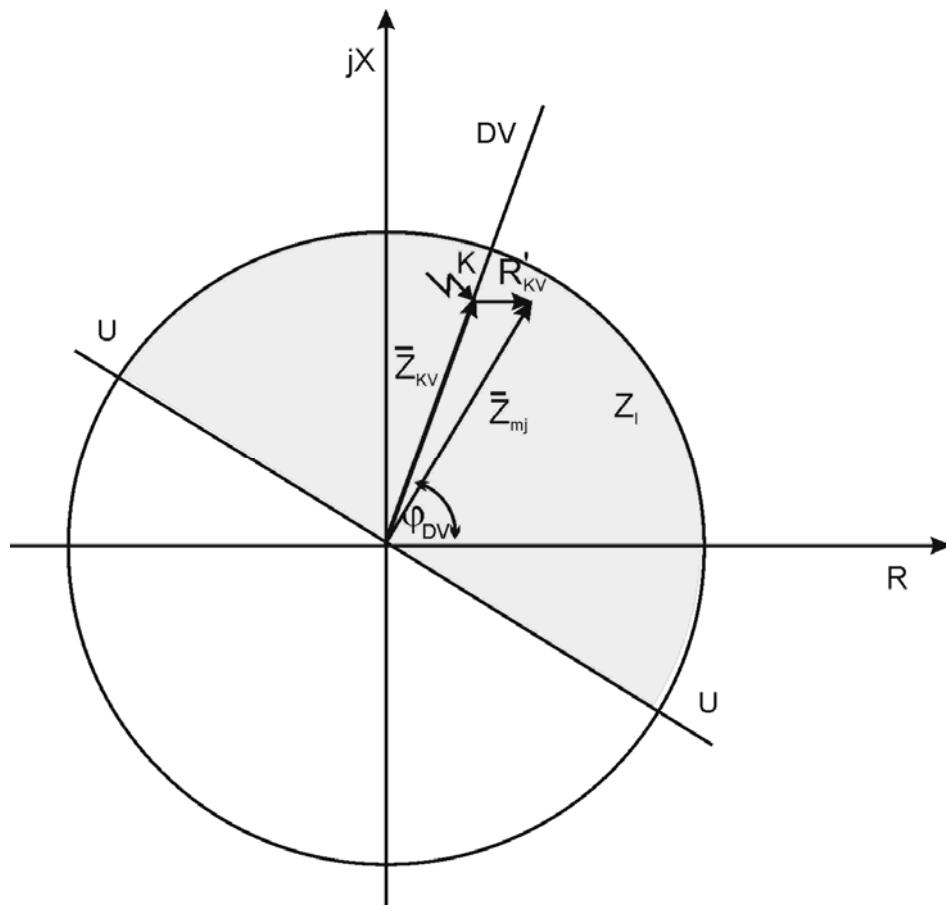
Svaki kratki spoj u mreži praćen je nekim otporom na mjestu kvara. Nastup tzv. metalnih kratkih spojeva izuzetno je rijedak u praksi. Treba, dakle, računati s pojmom određenog otpora na mjestu kvara. Kod međufaznih kratkih spojeva prisutan je otpor električnog luka na mjestu nastupa kvara. Riječ je o radnom otporu, kojeg je moguće procijeniti na temelju empirijskih relacija. On ovisi o naponskoj razini i duljini električnog luka. Kod nastupa dozemnih kratkih spojeva (npr. jednopolnoga kratkog spoja) uz otpor električnog luka dodatno je prisutan i otpor uzemljenja. Ukoliko kvar nastupa na trasi dalekovoda riječ je o otporu uzemljenja dalekovodnog stupa. I u ovim slučajevima je riječ o radnom otporu. On će imati utjecaj na rad mjernog člana distantne zaštite.

Kao što je pokazano na slici 5.2-1, otpor na mjestu kvara pomiče radnu točku mjernog člana u kompleksnoj ravnini (R , X) za određeni iznos (koji odgovara otporu) prema desno (u msmjeru osi R) od karakteristike štićenog voda. Naime, pri nastupu metalnog kratkog spoja, radna točka mjernog člana distantnog releja kreće se upravo po karakteristici štićenog voda (vidjeti sliku 5.2-1). Da bi se razmotrio utjecaj otpora na mjestu kvara na rad mjernog člana distantne zaštite, potrebno je razmotriti proradne karakteristike različitih (prethodno uvedenih) mjernih članova uz prisutnost otpora na mjestu kvara. Stoga je na slici 5.2-11 ponovno prikazana proradna karakteristika impedantnog mjernog člana distantne zaštite.

Oznake upotrijebljene na slici 5.2-11 imaju sljedeća značenja:

- \bar{Z}_{mj} - mjerena impedancija distantnog releja smještenog u točki A,
- \bar{Z}_{KV} - impedancija kvara; jednaka je impedanciji voda A-B između točke A (mjesto ugradnje distantnog releja) i mjesta nastupa kratkog spoja (točka K),
- R'_{KV} - djelatni otpor kvara; jednak je zbroju prijelaznog otpora na mjestu kvara i otpora električnog luka.

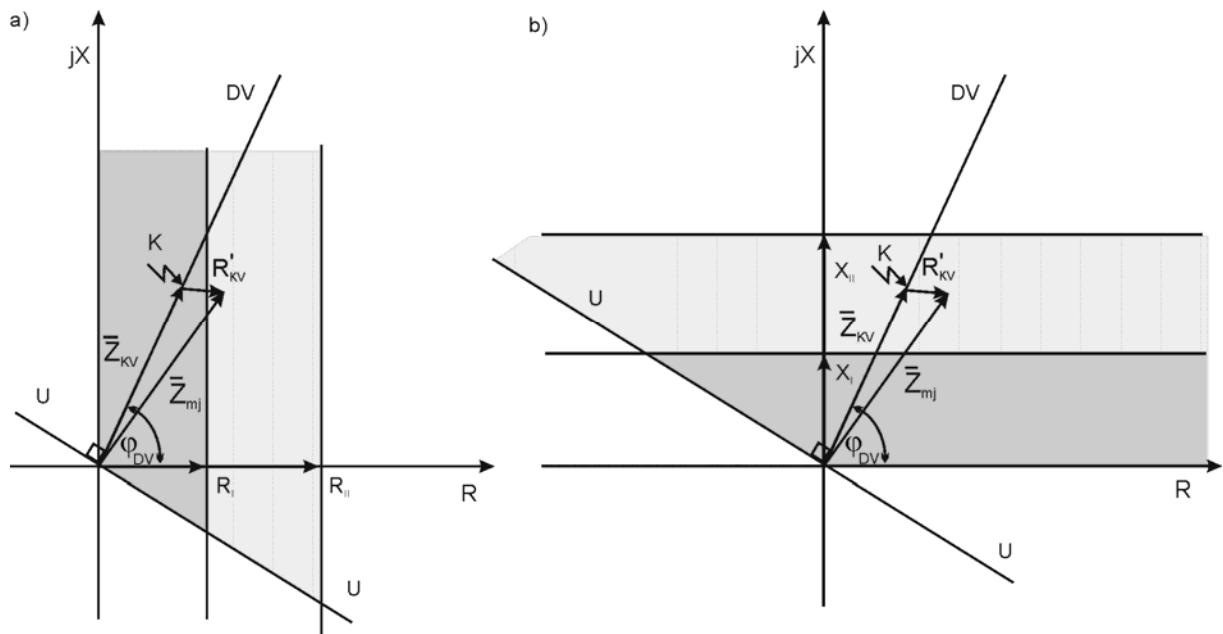
Sa slike 5.2-11 se uočava da prilikom nastupa kratkih spojeva koji su praćeni većim iznosima prijelaznog otpora na mjestu kvara (npr. električni luk + otpor uzemljenja dalekovodnog stupa), može doći do pogrešnog djelovanja distantne zaštite. Naime, u takvima situacijama mjerni član (impedantni) distantne zaštite, kvar koji je nastupio u njegovoj osnovnoj zoni (I. stupanj), "vidi" u svojem II. stupnju. Ovo je naročito izraženo kod kratkih spojeva praćenih manjim kratkospojnim kutevima (i velikim vrijednostima prijelaznog otpora na mjestu kvara). To, naravno, nije u redu.



Slika 5.2-11 Utjecaj otpora na mjestu kvara na mjerenu impedanciju impedantnog mjernog člana distantne zaštite.

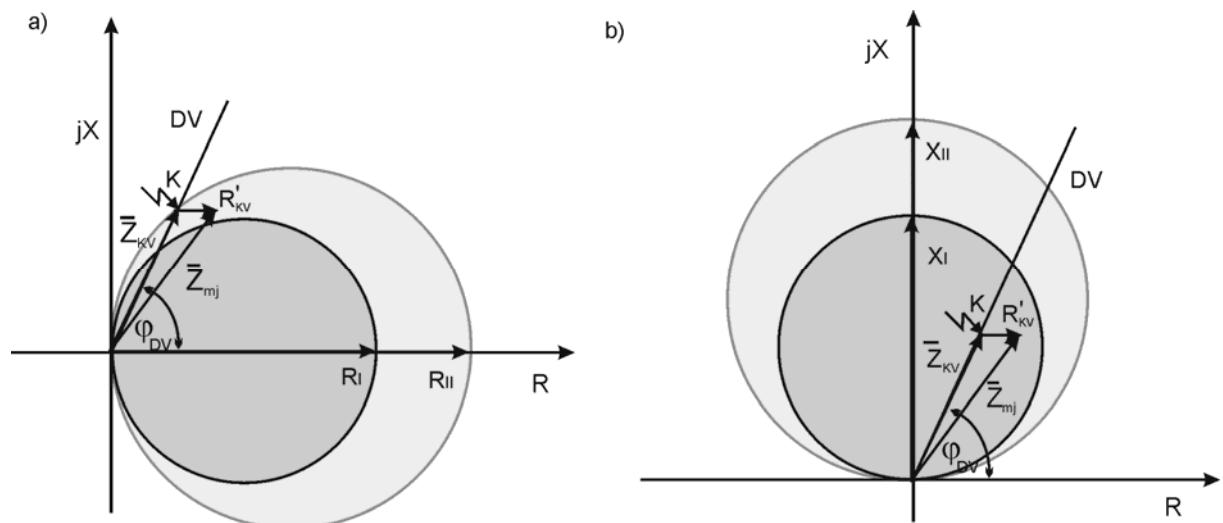
Slika 5.2-12 prikazuje utjecaj otpora na mjestu kvara na djelovanje a) rezistentnog i b) reaktantnog mjernog člana distantne zaštite. Na osnovi prikaza na slici 5.2-12 uočava se da je rezistentni mjerni član (a) izuzetno osjetljiv na iznos (pojavu) prijelaznog otpora na mjestu kvara, dok je reaktantni mjerni član (b) s druge strane potpuno neosjetljiv. Razlog neosjetljivosti reaktantnog mjernog člana na prijelazni (radni) otpor na mjestu kvara leži u činjenici što on mjeri reaktanciju.

Temeljem prikaza na slici 5.2-12 posve je jasno da se rezistentni proradni član distantne zaštite ne smije koristiti na vodovima na kojima se očekuju veći iznosi prijelaznog otpora na mjestu kvara, jer bi to svakako povećalo vjerojatnost od krivih prorada distantnog releja. Ovakve situacije se mogu očekivati, primjerice, kod zračnih prijenosnih vodova (dalekovoda) čiji uzemljivači stupova imaju visoke vrijednosti otpora uzemljenja (jer npr. prelaze preko terena koji ima vrlo visoki specifični električni otpor tla). Kod ovakvih vodova bi svakako bilo poželjno koristiti npr. reaktantni proradni član, ili još bolje, mjerni član s poligonalnom proradnom karakteristikom (numerička generacija distantne zaštite).



Slika 5.2-12 Utjecaj otpora na mjestu kvara na djelovanje a) rezistentnog i b) reaktantnog mjernog člana distantne zaštite.

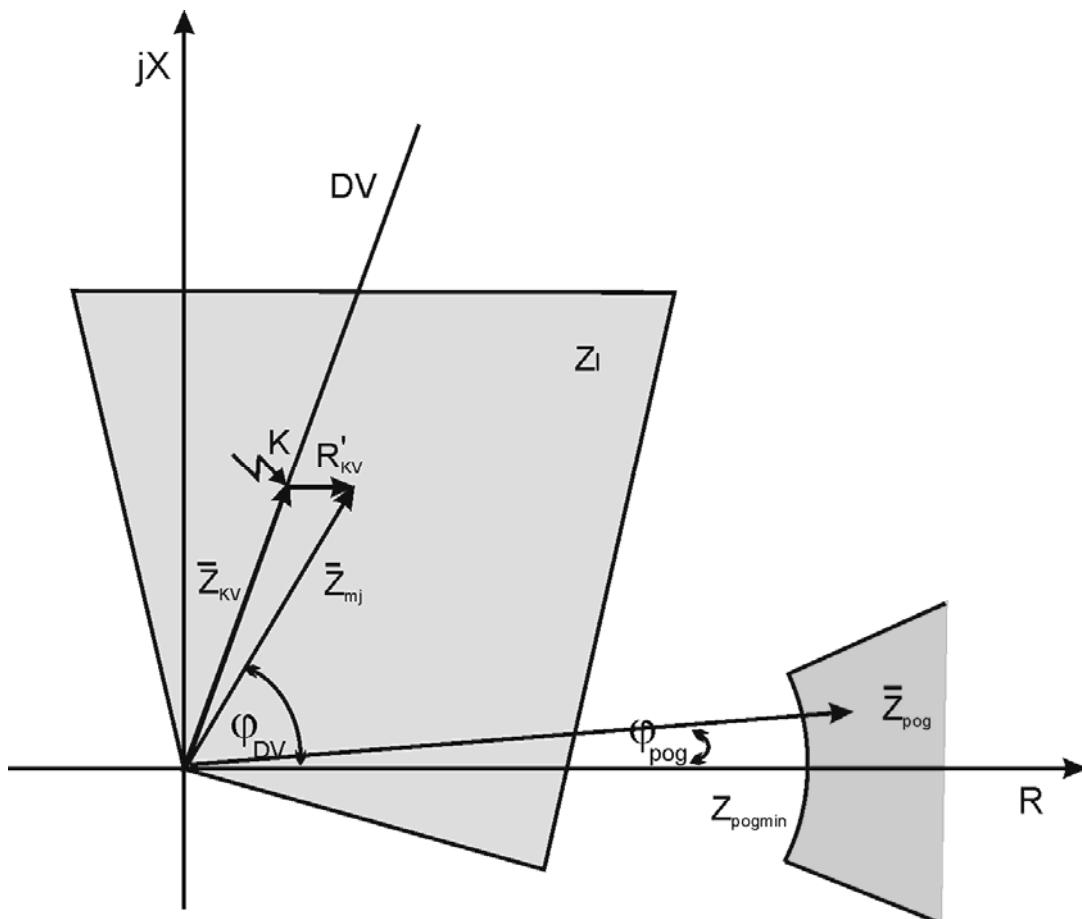
Slika 5.2-13 prikazuje utjecaj otpora na mjestu kvara na djelovanje a) konduktantnog i b) susceptantnog mjernog člana distantne zaštite. Uočava se da je konduktantni mjerični član nešto manje ovisan o prijelaznom otporu na mjestu kvara nego li je to susceptantni mjerični član distantnog releja. To je naročito izraženo kod kratkih spojeva praćenih manjim kratkospojnim kutevima (više je nagnuta karakteristika štićenog voda). Valja pritom imati na umu da se radna točka mjeričnog člana kreće po karakteristici štićenog dalekovoda (oznaka DV) i odlazi uvijek u "desno" (u smjeru koordinatne osi R) za iznos prijelaznog otpora na mjestu kvara.



Slika 5.2-13 Utjecaj otpora na mjestu kvara na djelovanje a) konduktantnog i b) susceptantnog mjernog člana distantne zaštite.

Nadalje, admitantni mjerni član distantne zaštite (prikazan na slici 5.2-8), promjenom unutarnjeg kuta α može biti "nagnut" bliže području konduktantnog ili pak susceptantnog mjernog člana distantne zaštite. Stoga se pogodnim podešavanjem spomenutog unutarnjeg kuta releja, kod admitantnog mjernog člana distantne zaštite, može postići njegova neosjetljivost na prijelazni otpor na mjestu kvara. Ovo podešavanje mora biti prilagođeno konkretnim uvjetima za prijenosni vod koji se namjerava štititi.

Konačno, na slici 5.2-14, prikazana je proradna karakteristika poligonalnog (quadrilateralnog) tipa, uz odgovarajući utjecaj prijelaznog otpora na mjestu kvara.



Slika 5.2-14 Utjecaj otpora na mjestu kvara na djelovanje mjernog člana distantne zaštite koji posjeduje poligonalnu proradnu karakteristiku.

Temeljem slike 5.2-14 uočava se da mjerni član distantne zaštite (numerička zaštita) s poligonalnom proradnom karakteristikom posjeduju izvanrednu otpornost na iznos i pojavu prijelaznog otpora na mjestu nastupa kvara. Poligonalna proradna karakteristika mjernog člana distantne zaštite je stoga najpoželjnija. Upravo je to i razlog zbog kojega numerički releji posjeduju isključivo proradne karakteristike mjernog člana poligonalnog tipa.

Nadalje, valja naglasiti (kao što će se vidjeti i u nastavku ovog izlaganja) da se podešenje proradne (poligonalne) karakteristike numeričke distantne zaštite provodi proračunom proradne reaktancije (imaginarni dio impedancije). Na temelju proradne

reaktancije računa se potom i proradna vrijednost otpora (rezistencije), koje onda zajedno čine proradnu impedanciju u kompleksnoj ravnini (R , X). Osim toga, moguće je posebno podešavati proradnu vrijednost otpora u odnosu na međufazne kratke spojeve a posebno u odnosu na dozemne kratke spojeve. To znači da postoje dvije različite poligonalne karakteristike distantnog releja (za svaki proradni stupanj), pri čemu je jedna mjerodavna za međufazne kratke spojeve a gruga za dozemne kratke spojeve. Proradna karakteristika u odnosu na dozemne kratke spojeve može stoga imati veći doseg u rezistivnom smjeru (veću podešenu vrijednost mjenjenog otpora) i time biti vrlo stabilna u odnosu na pojavu prijelaznog otpora na mjestu kvara.

5.3. Proračun podešenja distantnog releja

Distantna zaštita (IEC oznaka $Z<$, ANSI oznaka 21), kao što je već spomenuto, namijenjena je prvenstveno zaštiti visokonaponskih prijenosnih vodova (dalekovod, kabel) u odnosu na nastupe međufaznih kratkih spojeva (tropolni i dvoljni kratki spojevi) i kratkih spojeva sa zemljom (jednopolni kratki spoj i dvoljni kratki spoj s istodobnim spojem sa zemljom). Osim toga, dotična zaštita trebala bi biti, po mogućnosti, i pričuvna zaštita u odnosu na spomenute kvarove u susjednim visokonapskim vodovima (i transformatorima) prijenosne mreže.

Distantni relej posjeduje obično tri (3) stupnja. Numerički distantni releji posjeduju do pet (5) stupnjeva, od kojih neki mogu imati usmjerenje i prema natrag. Kod podešenja distantne zaštite podrazumijeva se proračun podešenja proradnih impedancija I., II. i III. stupnja distantne zaštite, kao i određivanje vremenskih podešenja I., II. i III. stupnja distantne zaštite. Osim toga, potrebno je odrediti i podešenje proradnog (pobudnog / poticajnog) člana – podimpedantnog mjernog člana – distantne zaštite.

5.3.1. Proračun podešenja proradnih impedancija

Distantni relej, kao što je spomenuto, posjeduje najčešće tri stupnja. Potrebno je, dakle, odrediti / izračunati podešene vrijednosti I., II. i III. stupnja distantne zaštite. Postoje određeni kriteriji prema kojima se vrši spomenuto podešenje I., II. i III. stupnja distantne zaštite.

Distantna zaštita ugrađena u određeno vodno polje (dalekovod, kabel) treba biti podešena na sljedeći način:

- **I. stupanj** treba djelovati pri kvarovima do $\approx 85\%$ duljine štićenog voda, gledano od mjesta ugradnje pripadnog uređaja relejne zaštite; ovaj stupanj usmjerjen je prema naprijed,
- **II. stupanj** treba djelovati pri kvarovima na preostalom dijelu štićenog voda ($\approx 15\%$ duljine štićenog voda koji nije pokriven I. stupnjem), kao i pri kvarovima na sabirnicama susjednog postrojenja (treba pritom sigurno prijeći sabirnice susjednog postrojenja); ovaj stupanj usmjerjen je također prema naprijed,

- **III. stupanj** treba djelovati, po mogućnosti, pri kvarovima koji su nastali dublje u prijenosnoj mreži; on treba prelaziti, ako je moguće, najdulji vod koji izlazi iz susjednog postrojenja; iz navedenog očito slijedi da III. stupanj distantne zaštite predstavlja pričuvnu zaštitu susjednog voda; usmjereno III. stupnja je također prema naprijed.

Prilikom proračuna podešenja pojedinih stupnjeva distantne zaštite polazi se od konfiguracije prijenosne mreže u kojoj se nalazi štićeni vod. Valja pritom sagledati uklopno stanje incidentne mreže te pribaviti tehničke podatke o njenim elementima. Najprije se određuju primarne proradne impedancije spomenutih stupnjeva (I., II. i II. stupanj distantne zaštite), koje se označavaju velikim slovima, Z_I , Z_{II} i Z_{III} . Spomenuti elementi incidentne mreže su pritom vodovi i transformatori. Impedancije vodova i dvonamotnih transformatora računaju se respektivno pomoću sljedećih izraza:

$$Z_v = Z_1 \cdot L \quad (5.3-1)$$

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (5.3-2)$$

u kojima su:

Z_1 – jedinična impedancija voda direktnog redosljeda, Ω/km ,

L – duljina voda, km,

u_k – napon kratkog spoja transformatora, %,

U_n – nazivni napon mreže u kojoj se nalazi promatrana distantna zaštita, kV,

S_n – nazivna snaga transformatora, MVA.

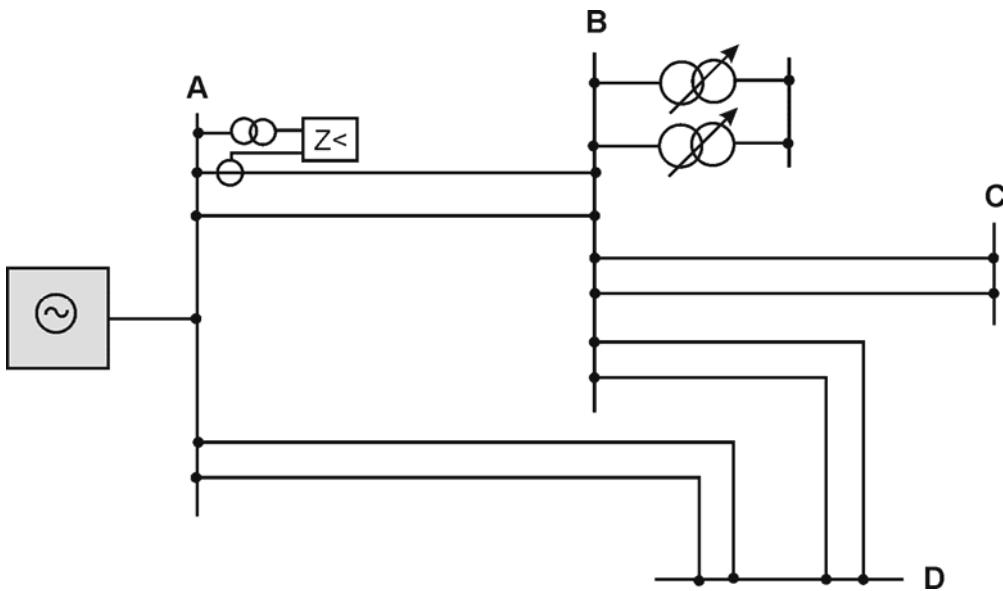
Ukoliko je riječ o regulacijskom transformatoru, tada se računa minimalna i maksimalna impedancija dotičnog dvonamotnog energetskog transformatora, kako slijedi:

$$Z_{T\min} = Z_T \cdot \left(1 - \frac{\text{regT}}{100}\right)^2 \quad (5.3-3)$$

$$Z_{T\max} = Z_T \cdot \left(1 + \frac{\text{regT}}{100}\right)^2 \quad (5.3-4)$$

pri čemu je regT – opseg regulacije napona transformatora u %-cima.

Proračun primarnih proradnih impedancija Z_I , Z_{II} i Z_{III} prikazat će se na konkretnom primjeru. Neka je potrebno izračunati primarne proradne impedancije distantnog releja koji se nalazi na nekom vodu u prijenosnoj mreži. Razmatrana mreža prikazana je na slici 5.3-1. Na dotičnoj slici prikazan je i priključak distantnog releja u stanici (postrojenju) A, na vodu A-B. Dakle, primjenjuje se distantna zaštita voda A-B u postrojenju A. Pretpostavlja se da su poznati tehnički podaci svih elemenata koji su prikazani na slici 5.3-1.



Slika 5.3-1 Distantna zaštita visokonaponskog voda A-B u prijenosnoj mreži.

Primarna proradna impedancija I. stupnja, Z_I , distantnog releja u postrojenju A na vodu A-B (prema slici 5.3-1), podešava se temeljem sljedećeg izraza:

$$Z_I \leq k_{sI} \cdot Z_{A-B} \quad (5.3-5)$$

pri čemu su:

Z_{A-B} – impedancija direktnog redoslijeda štićenog voda A-B.

k_{sI} – koeficijent sigurnosti I. stupnja distantne zaštite; obično se kreće u sljedećem području:

$$k_{sI} \in [0,85 \div 0,9] \quad (5.3-6)$$

Obično se iz potonjeg izraza odabire donja vrijednost, tj. $k_{sI} = 0,85$.

Primarna proadna impedancija II. stupnja, Z_{II} , distantnog releja u postrojenju A na vodu A-B (prema slici 5.3-1) ne smije prelaziti:

- cijelu susjednu dionicu paralelnih vodova B-C, odnosno B-D (vidjeti sliku 5.3-1),
- najmanju impedanciju paralelnih transformatora u sujednom postrojenju B.

Dakle, u konkretnom slučaju, primarna proadna impedancija II. stupnja, podešava se temeljem sljedećeg izraza:

$$Z_{II} \leq \min\left({}^{B-C}Z_{II}, {}^{B-D}Z_{II}, {}^{TR}Z_{II}\right) \quad (5.3-7)$$

gdje su:

${}^{B-C}Z_{II}$ – primarna proradna impedancija II. stupnja distantne zaštite releja u postrojenju A na vodu A-B, gledana u odnosu na paralelne vodove B-C,

- Z_{II}^{B-D} – primarna proradna impedancija II. stupnja distantne zaštite releja u postrojenju A na vodu A-B, gledana u odnosu na paralelne vodove B-D,
- Z_{II}^{TR} – primarna proradna impedancija II. stupnja distantne zaštite releja u postrojenju A na vodu A-B, gledana u odnosu na paralelne transformatore u postrojenju B.

Temeljem relacije (5.3-7), potrebno je, dakle, odabratи **najmanju** od spomenutih primarnih proradnih impedancija. Dotične primarne proradne impedancije navedene u izrazu (5.3-7), računaju se respektivno pomoću sljedećih izraza:

$$Z_{II}^{B-C} \leq k_{sII} \cdot (Z_{A-B} + k_{mII} \cdot Z_I^{B-C}) \quad (5.3-8)$$

$$Z_{II}^{B-D} \leq k_{sII} \cdot (Z_{A-B} + k_{mII} \cdot Z_I^{B-D}) \quad (5.3-9)$$

$$Z_{II}^{TR} \leq k_{sII} \cdot (Z_{A-B} + k_{mII} \cdot Z_{T\min}) \quad (5.3-10)$$

pri čemu su:

- Z_{A-B} – impedancija direktnog redoslijeda štićenog voda A-B.
 k_{sII} – koeficijent sigurnosti II. stupnja; obično se kreće u sljedećem području:

$$k_{sII} \in [0,85 \div 0,9] \quad (5.3-11)$$

Obično se iz potonjeg izraza odabire gornja vrijednost, tj. $k_{sII} = 0,9$.

- Z_I^{B-C} – primarna proradna impedancija I. stupnja za distantnu zaštitu postavljenu na početku voda B-C (postrojenje B); određuje se analogno izrazu (5.3-5),
- Z_I^{B-D} – primarna proradna impedancija I. stupnja za distantnu zaštitu postavljenu na početku voda B-D (postrojenje B); određuje se analogno izrazu (5.3-5),
- k_{mII} – koeficijent međunapajanja (koeficijent grananja) II. stupnja distantne zaštite; vezan je uz konfiguraciju i izdašnost razmatrane mreže; pri njegovom određivanju biraju se takve konfiguracije incidentne mreže pri kojima je zadovoljena sljedeća relacija:

$$k_{mII} \leq 1 \quad (5.3-12)$$

Uočava se da je ovaj koeficijent potrebno posebno odrediti za svaku od prethodno opisanih situacija. Primjerice, za sustav prikazan na slici 5.3-1, pri određivanju koeficijenta međunapajanja II. stupnja u odnosu na vod B-C potrebno je izabrati konfiguraciju mreže kod koje su isključeni svi vodovi i transformatori u susjednom postrojenju (B) kao i jedan od paralelnih vodova A-B, dok u pogonu ostaju samo paralelni vodovi B-C. Koeficijent međunapajanja se tada dobija kao omjer struja u paralelnim vodovima B-C prema struji voda A-B, pri nastupu tropolnoga kratkog spoja (K3) na kraju paralelnih vodova B-C. Na sličan način se tretiraju i preostali slučajevi.

Koefficijent osjetljivosti II. stupnja, k_{IIos} , definiran je sljedećim izrazom:

$$k_{IIos} = \frac{Z_{II}}{Z_{A-B}} \quad (5.3-13)$$

i poželjno je da bude veći od 1,15.

Primarna proradna impedancija III. stupnja, Z_{III} , distantnog releja u postrojenju A na vodu A-B (prema slici 5.3-1), treba – ako je ikako moguće – prelaziti:

- cijelu susjednu dionicu jednog voda B-C, odnosno voda B-D,
- najveću impedanciju jednog transformatora u susjednom postrojenju B.

Dakle, u konkretnom slučaju, primarna proradna impedancija III. stupnja, podešava se temeljem sljedećeg izraza:

$$Z_{III} \geq \max\left({}^{B-C}Z_{III}, {}^{B-D}Z_{III}, {}^{TR}Z_{III}\right) \quad (5.3-14)$$

gdje su:

${}^{B-C}Z_{III}$ – primarna proradna impedancija III. stupnja distantne zaštite releja u postrojenju A na vodu A-B, gledana u odnosu na jedan od paralelnih vodova B-C,

${}^{B-D}Z_{III}$ – primarna proradna impedancija III. stupnja distantne zaštite releja u postrojenju A na vodu A-B, gledana u odnosu na jedan od paralelnih vodova B-D,

${}^{TR}Z_{III}$ – primarna proradna impedancija III. stupnja distantne zaštite releja u postrojenju A na vodu A-B, gledana u odnosu na jedan od paralelnih transformatora u postrojenju B.

Temeljem relacije (5.3-14), potrebno je, dakle, odabratи **najveću** od spomenutih primarnih proradnih impedancija. Dotične primarne proradne impedancije navedene u izrazu (5.3-14), računaju se respektivno pomoću sljedećih izraza:

$${}^{B-C}Z_{III} \geq k_{sIII} \cdot (Z_{A-B} + k_{mIII} \cdot Z_{B-C}) \quad (5.3-15)$$

$${}^{B-D}Z_{III} \geq k_{sIII} \cdot (Z_{A-B} + k_{mIII} \cdot Z_{B-D}) \quad (5.3-16)$$

$${}^{TR}Z_{III} \geq k_{sIII} \cdot (Z_{A-B} + k_{mIII} \cdot Z_{T_{max}}) \quad (5.3-17)$$

pri čemu su:

Z_{A-B} – impedancija direktnog redoslijeda štićenog voda A-B.

k_{sIII} – koeficijent sigurnosti III. stupnja; obično se kreće u sljedećem području:

$$k_{sIII} \in [1,1 \div 1,2] \quad (5.3-18)$$

- Obično se iz potonjeg izraza odabire donja vrijednost, tj. $k_{sIII} = 1,1$.
- Z_{B-C} – impedancija direktnog redoslijeda jednog od paralelnih vodova B-C,
 - Z_{B-D} – impedancija direktnog redoslijeda jednog od paralelnih vodova B-D,
 - Z_{Tmax} – maksimalna impedancija (direktnog redoslijeda) jednog od paralelnih transformatora u susjednom postrojenju B,
 - k_{mIII} – koeficijent međunapajanja (koeficijent grananja) III. stupnja distantne zaštite; vezan je uz konfiguraciju i izdašnost razmatrane mreže; pri njegovom određivanju biraju se takve konfiguracije incidentne mreže pri kojima je zadovoljena sljedeća relacija:

$$k_{mIII} \geq 1 \quad (5.3-19)$$

Uočava se da je i ovaj koeficijent potrebno posebno odrediti za svaku od prethodno opisanih situacija. Primjerice, za sustav prikazan na slici 5.3-1, pri određivanju koeficijenta međunapajanja III. stupnja u odnosu na vod B-C potrebno je izabrati konfiguraciju mreže kod koje su uključeni svi vodovi i transformatori u susjednom postrojenju (B) kao i oba paralelna voda A-B, dok u pogonu ostaje samo jedan od paralelnih vodova B-C (drugi paralelni vod B-C se isključuje). Koeficijent međunapajanja se tada dobija kao omjer struja u preostalom vodu B-C prema strujama paralelnih vodova A-B, pri nastupu tropolnoga kratkog spoja (K3) na kraju voda B-C. Na sličan način se tretiraju i preostali slučajevi.

Sekundarne proradne impedancije distantne zaštite I., II. i III. stupnja označavaju se malim slovom z_I , z_{II} i z_{III} i određuju se temeljem prethodno izračunatih primarnih proradnih impedancija Z_I , Z_{II} i Z_{III} . Koriste se pritom slijedeći izrazi:

- *I. stupanj:*

$$z_I = Z_I \cdot \frac{p_i}{p_u} \quad (5.3-20)$$

- *II. stupanj:*

$$z_{II} = Z_{II} \cdot \frac{p_i}{p_u} \quad (5.3-21)$$

- *III. stupanj:*

$$z_{III} = Z_{III} \cdot \frac{p_i}{p_u} \quad (5.3-22)$$

pri čemu su:

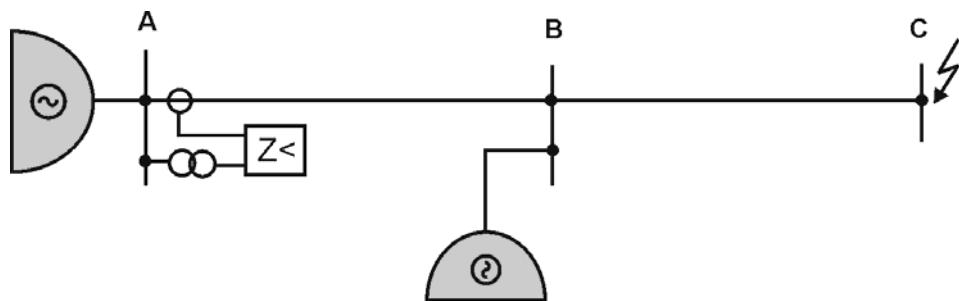
- p_i – nazivni prijenosni omjer strujnog transformatora na koji je priključena razmatrana distantna zaštita,

p_u – nazivni prijenosni omjer naponskog transformatora na koji je priključena razmatrana distantna zaštita.

Sekundarne proradne impedancije, dane izrazima (5.3-20), (5.3-21) i (5.3-22), podešavaju se na uređaju distantne zaštite (distantnom releju).

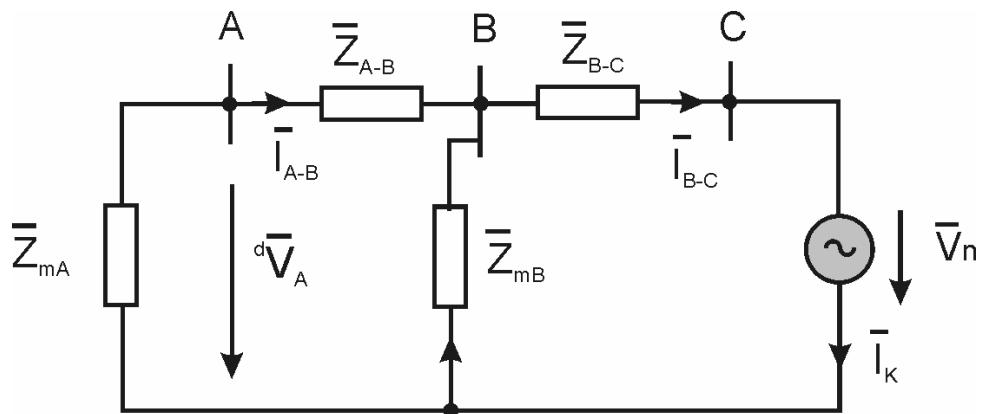
Da bi se moglo izračunati konkretne vrijednosti primarnih proradnih impedancija I., II. i III. stupnja (a potom i sekundarne proradne impedancije), potrebno je poznavati tzv. *koeficijente međunapajanja*. Osnovni princip izbora konfiguracije mreže za određivanje spomenutih koeficijenata međunapajanja je prethodno objašnjen.

U nastavku će se na jednom konkretnom primjeru pokazati način određivanja spomenutih koeficijenata međunapajanja. Neka je stoga zadana mreža prikazana na slici 5.3-2. Promatrat će se nastup tropolnoga kratkog spoja na kraju voda B-C (točka C prema slici 5.3-2). Distantni relj nalazi se u postrojenju A, na štićenom vodu A-B. Prepostavlja se da je mreža bila u idealnom praznom hodu, neposredno prije nastupa promatranoga tropolnog kratkog spoja.



Slika 5.3-2 Primjer određivanja koeficijenta međunapajanja distantne zaštite.

Tropolni kratki spoj je simetričan kvar kod kojeg se javljaju struje i naponi samo direktnog redoslijeda. Na slici 5.3-3 prikazana je odgovarajuća nadomjesna shema fiktivnog sustava promatranog kratkog spoja, za mrežu prema slici 5.3-2.



Slika 5.3-3 Nadomjesna shema fiktivnog sustava za tropolni kratki spoj na kraju voda B-C, prema slici 4.3-2.

Oznake primjenjene na slici 5.3-3 imaju slijedeća značenja:

- \bar{Z}_{mA} - nadomjesna impedancija direktnog redoslijeda mreže A,
- \bar{Z}_{mB} - nadomjesna impedancija direktnog redoslijeda mreže B,
- \bar{Z}_{A-B} - direktna impedancija štićenog voda A-B,
- \bar{Z}_{B-C} - direktna impedancija voda B-C,
- \bar{I}_{A-B} - struja direktnog sustava voda A-B, tijekom nastupa tropolnoga kratkog spoja na kraju voda B-C,
- \bar{I}_{B-C} - struja direktnog sustava voda B-C, tijekom nastupa tropolnoga kratkog spoja na kraju voda B-C,
- ${}^d\bar{V}_A$ - napon na mjestu ugradnje distantne zaštite (točka A), direktnog sustava, pri nastupu spomenutog kvara na kraju voda B-C (točka C),
- \bar{V}_n - fazni napon neposredno prije nastupa spomenutog tropolnoga kratkog spoja.

Temeljem oznaka i simbolike primjenjene na slici 5.3-3 slijedi:

$$\bar{V}_n - {}^d\bar{V}_A - \bar{I}_{A-B} \cdot \bar{Z}_{A-B} - \bar{I}_{B-C} \cdot \bar{Z}_{B-C} = 0 \quad (5.3-23)$$

odnosno:

$$\bar{V}_n = {}^d\bar{V}_A + \bar{I}_{A-B} \cdot \bar{Z}_{A-B} + \bar{I}_{B-C} \cdot \bar{Z}_{B-C} \quad (5.3-24)$$

Naponi faza R, S i T na mjestu ugradnje distantnog releja (točka A) mogu se odrediti korištenjem slijedeće matrične jednadžbe:

$$\begin{Bmatrix} {}^R\bar{V}_A \\ {}^S\bar{V}_A \\ {}^T\bar{V}_A \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{V}_n \\ a^2 \cdot \bar{V}_n \\ a \cdot \bar{V}_n \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} {}^d\bar{V}_A \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5.3-25)$$

Iz dotične matrične jednadžbe, napon faze R na mjestu ugradnje promatranog distantnog releja, tijekom promatranog tropolnog kratkog spoja, iznosi:

$${}^R\bar{V}_A = \bar{V}_n - {}^d\bar{V}_A \quad (5.3-26)$$

Korištenjem (5.3-24), izraz (5.3-26) prelazi u sljedeći oblik:

$${}^R\bar{V}_A = {}^d\bar{V}_A + \bar{I}_{A-B} \cdot \bar{Z}_{A-B} + \bar{I}_{B-C} \cdot \bar{Z}_{B-C} - {}^d\bar{V}_A \quad (5.3-27)$$

odnosno:

$${}^R\bar{V}_A = \bar{I}_{A-B} \cdot \bar{Z}_{A-B} + \bar{I}_{B-C} \cdot \bar{Z}_{B-C} \quad (5.3-28)$$

Dijeljenjem izraza (5.3-28) sa strujom \bar{I}_{A-B} dobiva se mjerena impedancija, Z_{mj} , koju "vidi" mjerni član distantnog releja ugrađen u postrojenju A (na početku štićenog voda A-B), tj. slijedi da je:

$$\bar{Z}_{mj} = \frac{^R V_A}{\bar{I}_{A-B}} = \bar{Z}_{A-B} + \frac{\bar{I}_{B-C}}{\bar{I}_{A-B}} \cdot \bar{Z}_{B-C} \quad (5.3-29)$$

Dotični izraz može se napisati i u slijedećem obliku:

$$\bar{Z}_{mj} = \frac{^R V_A}{\bar{I}_{A-B}} = \bar{Z}_{A-B} + \bar{k}_m \cdot \bar{Z}_{B-C} \quad (5.3-30)$$

pri čemu je:

$$\bar{k}_m = \frac{\bar{I}_{B-C}}{\bar{I}_{A-B}} \quad (5.3-31)$$

traženi koeficijent međunapajanja. Dakle, koeficijent međunapajanja (za distantnu zaštitu na početku štićenog voda) definira se kao omjer struje susjednog voda i struje štićenog voda, pri nastupu tropolnoga kratkog spoja na kraju susjednog voda.

5.3.2. Određivanje vremenskih podešenja distantnog releja

Kao što je već prethodno rečeno, osim podešenja proradnih impedancija I., II. i III. stupnja distantne zaštite, potrebno je odrediti i njihova vremenska podešenja. Vremensko stupnjevanje distantne zaštite potrebno je zbog zadovoljenja kriterija selektivnosti. Primjer vremenske karakteristike distantnog releja prikazan je na slici 5.3.

Vrijeme djelovanja I. stupnja distantne zaštite, t_I , usvaja se što je moguće kraće (tzv. osnovno vrijeme djelovanja releja uvećano za vrijeme dijelovanja pripadnog prekidača). Obično je, pritom, zadovoljena sljedeća relacija:

$$t_I = 0,1 \text{ s} \quad (5.3-32)$$

Vrijeme djelovanja II. stupnja distantne zaštite, t_{II} , određuje se na temelju vremena dijelovanja I. stupnja i odabranog selektivnog vremenskog intervala. Obično je pritom zadovoljena sljedeća relacija:

$$t_{II} = t_I + \Delta t \quad (5.3-33)$$

pri čemu je Δt – selektivni vremenski interval distantne zaštite. U slučaju primjene numeričke ili statičke zaštite on iznosi 0,3 s. Kod elektromehaničkih zaštita on iznosi 0,5 s.

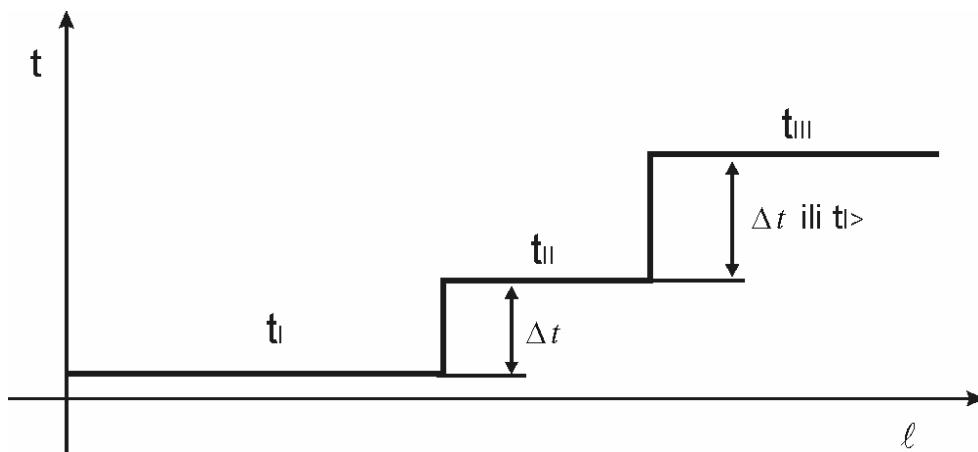
Vrijeme djelovanja III. stupnja distantne zaštite, t_{III} , mora za već usvojeni selektivni vremenski interval (Δt) biti duže od najdužeg vremenskog zatezanja zaštite od vanjskih kvarova energetskog transformatora (nadstrujna zaštita, $I>$) u susjednom postrojenju, ako isti postoje. U tom slučaju vrijedi slijedeća relacija:

$$t_{III} = t_{I>} + \Delta t \quad (5.3-34)$$

gdje je $t_{I>}$ - vrijeme podešeno na nadstrujnoj zaštiti ($I>$) energetskog transformatora. Ukoliko ne postoje energetski transformatori u susjednom postrojenju tada se vrijeme djelovanja III. stupnja distantne zaštite podešava prema slijedećem izrazu:

$$t_{III} = t_{II} + \Delta t \quad (5.3-35)$$

U svakom slučaju, treba osigurati selektivnost među distantnih zaštita u susjednim postrojenjima (na susjednim vodovima), kao i selektivnost između distantnih zaštita i relevantnih nadstrujnih zaštita ($I>$) eventualno nazočnih u mreži. Vremenska karakteristika distantnog releja još jednom je prikazana na slici 5.3-4. Na njoj su zorno ilustrirana vremenska podešenja I., II. i III. stupnja distantnog releja.



Slika 5.3-4 Vremenska karakteristika distantnog releja.

5.3.3. Određivanje proradne vrijednosti poticajnog člana

Osim prethodno određenih vrijednosti podešenja proradnih i vremenskih članova I., II. i III. stupnja distantne zaštite, za potpunu konfiguraciju distantnog releja, potrebno je odrediti i podešenje proradne vrijednosti poticajnog / pobudnog člana (engl.: pickup). Kao poticajni / pobudni član distantnih releja danas se najčešće koristi podimpedantni član (u početku razvoja distantnih releja kao poticajni član koristio se nadstrujni član).

Primarna proradna vrijednost podimpedantnog poticajnog člana, Z_{pot} , mora biti manja od minimalne pogonske impedancije, Z_{pogmin} , nadomjesne mreže na mjestu ugradnje distantnog releja. Dakle, mora biti zadovoljena slijedeća relacija:

$$Z_{pot} < Z_{pog\ min} \quad (5.3-36)$$

Minimalna pogonska impedancija mreže na mjestu ugradnje promatranog distantnog releja, $Z_{pog\ min}$, određuje se pomoću slijedećeg izraza:

$$Z_{pog\ min} = \frac{U_{pog\ min}}{\sqrt{3} \cdot I_{pog\ max}} \quad (5.3-37)$$

gdje su:

$U_{pog\ min}$ – minimalni pogonski napon (V); može se usvojiti sljedeća vrijednost:

$$U_{pog\ min} = 0,9 \cdot U_n \quad (5.3-38)$$

pri čemu je U_n – nazivni napon mreže u kojoj se nalazi promatrani distantni relej,

$I_{pog\ max}$ – maksimalna pogonska struja promatranog / štićenog voda u koji je ugrađena spomenuta distantna zaštita (A); može se usvojiti sljedeća vrijednost:

$$I_{pog\ max} = 1,2 \cdot I_{1n} \quad (5.3-39)$$

pri čemu je I_{1n} – nazivna primarna struja strujnog transformatora ugrađenog u dotični vod u kojem je smještena promatrana distantna zaštita.

Sekundarna proradna vrijednost podimpedantnog poticajnog / pobudnog člana (z_{pot}) podešava se na releju. Određuje se pomoću sljedećeg izraza:

$$z_{pot} = Z_{pot} \cdot \frac{p_i}{p_u} \quad (5.3-40)$$

pri čemu veličine p_i i p_u predstavljaju nazivne prijenosne omjere strujnih i naponskih transformatora preko kojih je priključen promatrani distantni relej.

Ukoliko vrijedi da je:

$$Z_{mj} \leq Z_{pot} \quad (5.3-41)$$

distantni relej se pobuđuje. Tada se preko uređaja za "sklapanje" i usmjerjenog člana (ako je tok kratkog spoja orijentiran iz pravca sabirnica k vodu) aktivira mjerni član, kojemu se ovisno o vrsti kratkog spoja (međufazni kratki spojevi ili kratki spojevi sa zemljom) dovode potrebni naponi i struje. Nakon što je distantni relej pobuđen, on isključuje pripadni mu prekidač u:

- I. stupnju, ako je $Z_{mj} \leq Z_I$,
- II. stupnju, ako je $Z_I < Z_{mj} \leq Z_{II}$,

III. stupnju, ako je $Z_{II} < Z_{mj} \leq Z_{III}$.

Ukoliko pak vrijedi da je:

$$Z_{III} < Z_{mj} \leq Z_{pot} \quad (5.3-42)$$

relej je pobuđen, ali ne isključuje dotični kvar. Konačno, ukoliko vrijedi da je:

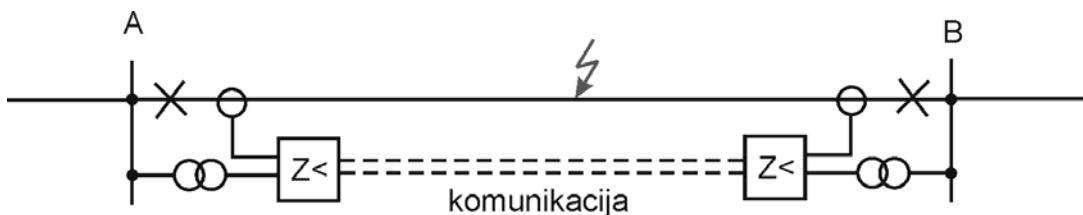
$$Z_{mj} > Z_{pot} \quad (5.3-43)$$

tada se distantni relaj na pobuđuje.

5.4. Komunikacijske sheme distantne zaštite

Distantna zaštita predstavlja temeljnu relajnu zaštitu vodova prijenosnih mreža svih naponskih razina. Riječ je zaštiti koja kombinira mogućnost vrlo brzok isključenja kvarova na štićenom vodu s mogućnošću pričuvnog štićenja. Međutim, ona posjeduje i jedan nedostatak koji je moguće eliminirati. Naime, osnovni nedostatak distantne zaštite leži u činjenici da nije u stanju zaštititi štićeni vod u punoj duljini (100 % duljine voda) s najkraćim mogućim vremenom isklopa kvara (bez namjerne vremenske odgode). Moguće je u I. stupnju zaštititi najviše do 85 % duljine voda. Dakle, preostaje 15 % - 20 % duljine voda na kojem se kvarovi isključuju u II. stupnju (s vremenskim zatezanjem). Ovo vremensko zatezanje posljedica je potrebe za selektivnošću i poželjno bi ga bilo eliminirati.

Distantna zaštita može štititi 100 % duljine voda u svom I. stupnju ako se primjene tzv. komunikacijske sheme. To znači da se distantni reljni uređaji na oba kraja štićenog voda međusobno povežu komunikacijskim kanalom (npr. optičkom ili klasičnom telekomunikacijskom vezom). U tu svrhu može se koristiti primjerice OPGW (engl.: optical ground wire) uže ili PLC (engl.: power-line carrier) sistem. Slika 5.4-1 grafički ilustrira primjenu komunikacijske sheme na visokonaponskom prijenosnom vodu.



Slika 5.4-1 Grafička ilustracija primjene komunikacijske sheme distantne zaštite.

Postoji više vrsta različitih komunikacijskih shema koje se mogu primijeniti. Svima je svrha zaštititi cijelokupnu duljinu štićenog voda u I. stupnju, dakle, bez vremenske odgode isključenja kvara. Riječ je o tzv. vlastitom vremenu djelovanja samog distantnog relaja i vremenu koje je potrebno pripadnom prekidaču da isključi kvar (ukupno oko 100 ms).

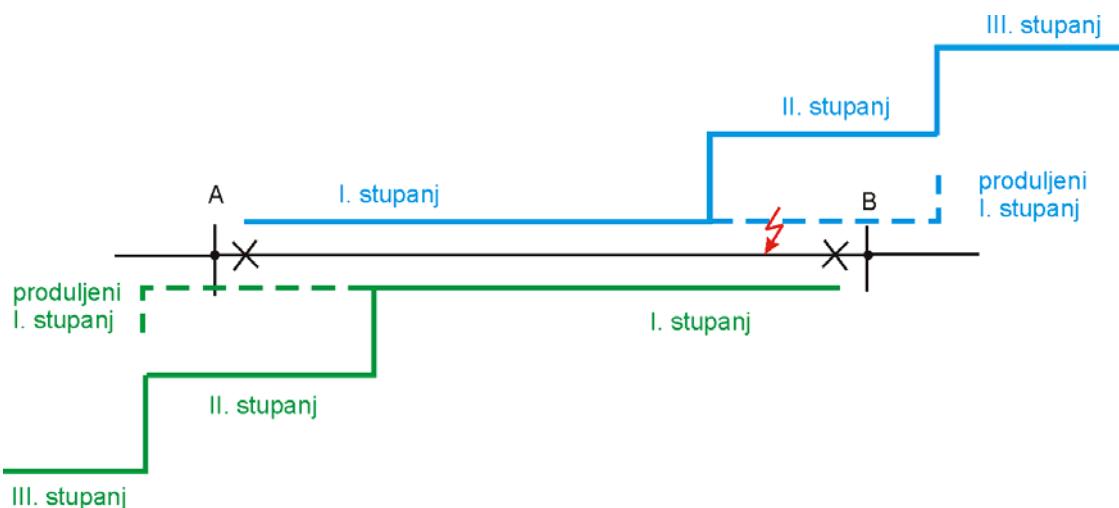
Komunikacijska shema distantne zaštite temelji se načelu da distantna zaštita s jedne strane voda, koja identificira kvar na štićenom vodu u I. stupnju, šalje signal distantnoj zaštiti na drugom kraju voda (komunikacijskom vezom) da djeluje istovremeno na isključenje kvara. Riječ je o prijenosnoj mreži u kojoj su kvarovi redovito napajani s obje strane. Na taj način, ukoliko zaštita na drugom kraju voda i ne "vidi" kvar u svom I. stupnju, ona djeluje na kvar (u I. stupnju) jer je dobila nalog od distantne zaštite na drugom kraju voda.

Suvremeni numerički distantni releji posjeduju mogućnost ostvarenja više različitih vrsta / tipova komunikacijskih shema distantne zaštite. Razlikuju se pritom dva koncepta komunikacijskih shema distantne zaštite:

- engl.: blocking scheme,
- engl. permissive scheme.

Osim toga, numerička zaštita za ostvarenje komunikacijskih shema distantne zaštite posjeduje i poseban stupanj koji se naziva **produljeni I. stupanj**. On pokriva isto područje (doseg) kao i II. stupanj distantne zaštite ali ima vrijeme odgode djelovanja jednako vremenu djelovanja I. stupnja (dakle, djeluje trenutno, odnosno, bez vremenske odgode). Produljeni I. stupanj distantne zaštite koristi se, dakle, isključivo za ostvarenje komunikacijskih shema distantne zaštite i to mu je jedina namjena. Slika 5.4-2 prikazuje vremenske dijagrame distantnih zaštita na oba kraja štićenog voda. Produljeni I. stupanj distantne zaštite prikazan je na slici 5.4-2 crtkano.

Smisao produljenog I. stupnja distantne zaštite jest u povećanju sigurnosti prorada i pravilnog isključenja kvarova na štićenom vodu. Ovo se očituje u činjenici da numerička distantna zaštita koristi produljeni I. stupanj da vidi kvarove izvan svoje I. zone (sve kvarove u II. zoni jer je doseg produljenog I. stupnja jednak dosegu II. stupnja). Postavlja se stoga preduvijet distantnoj zaštiti da može djelovati samo ako vidi kvar u svojem produljenom I. stupnju te ako dobije odgovarajući signal (za djelovanje ili blokadu djelovanja, ovisno o vrsti komunikacijske sheme koja se koristi). Ovime se povećava sigurnost distantne zaštite i povećava vjerojatnost pravilnog isključenja kvarova na ukupnoj duljini štićenog voda.



Slika 5.4-2 Grafička ilustracija vremenskih dijagrama distantnih zaštita na oba kraja štićenog voda.

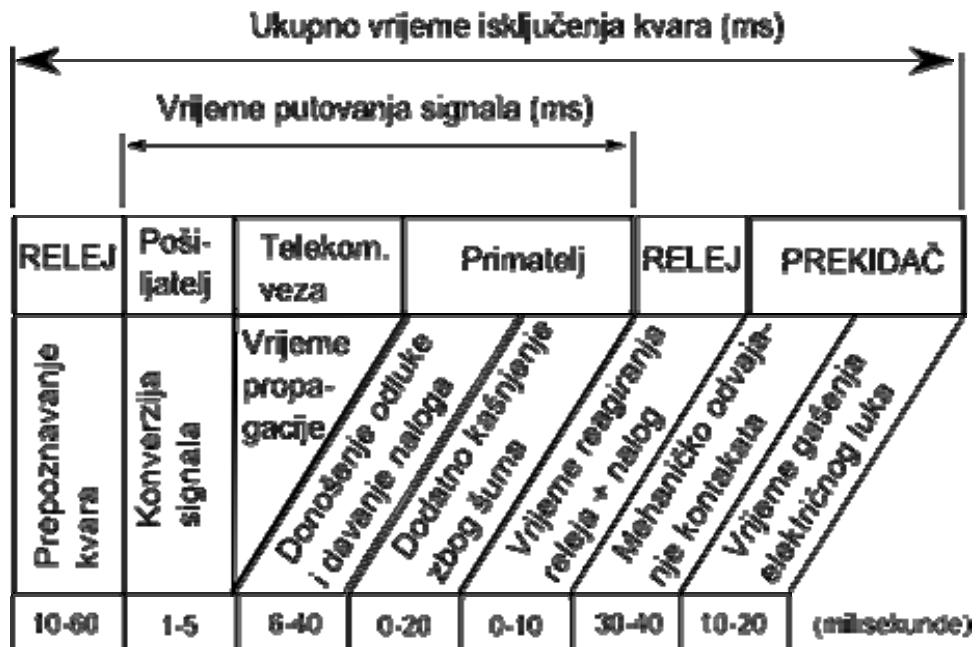
Općenito se može reći da se kod tzv. blocking komunikacijskih shema distantne zaštite šalje signal o blokiranju prorade releja na drugom kraju voda, dok se kod permissive shema šalje signal za djelovanje. Drugim riječima, kod permissive shema relej koji vidi kvar na vodu u svom produljenom I. stupnju neće djelovati dok ne dobije signal za proradu od releja na drugom kraju voda, koji će taj isti kvar vidjeti u svom I. stupnju (osim ako nije riječ o kvaru koji je njemu „iza leđa“, što znači da je kvar izvan štićenog voda). U potonjem slučaju relej ne šalje signal za djelovanje prvom spomenutom releju i nema isključenja voda (jer ni kvar nije na štićenom vodu). Suprotno tome, kod blocking shema, relej će uvijek djelovati kada vidi kvar u svom produljenom I. stupnju, osim ako ne dobije signal (blocking) od zaštite na drugom kraju voda. To bi značilo da bi prvi spomenuti relej djelovao i na kvar koji se dogodio izvan štićenog voda (jer produljeni I. stupanj ima doseg II. stupnja) ukoliko ne bi dobio blocking signal od releja na drugom kraju štićenog voda. Budući da u razmatranom slučaju relej na drugom kraju voda vidi ovaj kvar „iza leđa“, on šalje blocking signal prvom releju i on ne djeluje. Stoga je očito potrebno da zaštita na drugom kraju voda, ukoliko vidi kvar „iza leđa“, pošalje (blocking) signal prvoj spomenutoj zaštiti jer ona u tom slučaju ne smije djelovati.

U nastavku će se ponešto detaljnije opisati jedna od vrlo često korištenih (popularnih) permissive komunikacijskih shema, koja se naziva **PUTT** (engl.: permissive under-reach transfer trip) komunikacijska shema distantne zaštite.

Ova komunikacijska shema za svoje djelovanje koristi, dakle, poseban stupanj distantne zaštite koji se naziva produljeni I. stupanj, koji pokriva isto područje (doseg) kao i II. stupanj distantne zaštite i ima vrijeme djelovanja isto kao i I. stupanj. Način rada PUTT komunikacijske sheme jest sljedeći: pri nastupu kvara u krajnjim djelovima štićenog voda (< 15 % duljine štićenog voda), bliska distantna zaštita ovaj kvar vidi u svojem I. stupnju, dok ga distantna zaštita na drugom kraju štićenog voda vidi u svojem produljenom I. stupnju (ovaj stupanj, dakle, pokriva isto područje kao i II. stupanj). Bliska distantna zaštita koja je proradila u I. stupnju šalje signal distantnoj zaštiti na drugom kraju štićenog voda, koja pritom prorađuje u svojem produljenom I. stupnju. Time se štićeni dalekovod isključuje na oba kraja u najkraćem mogućem vremenu. Valja naglasiti da će distantna zaštita na udaljenom kraju štićenog voda djelovati samo ako je primila signal za isklop i ako istovremeno vidi kvar u svojem produljenom I. stupnju. U protivnom zaštita neće djelovati.

Ukupno vrijeme djelovanja distantne zaštite (na oba kraja štićenog voda), tj. ukupno vrijeme odgode štićenja voda u I. stupnju sastoji se od više komponenti. Ovo vrijeme isključenja sastoji se, dakle, od: vlastitog vremena djelovanja releja, vremena putovanja signala između dvaju releja (koje ovisi o duljini štićenog voda i vrsti telekomunikacijskog kanala) te vlasitog vremena isklopa prekidača. Naime, I. stupanj distantne zaštite nema dodatnog (namjernog) kašnjenja isključenja štićenog voda (tzv. vremenskog zatezanja). Međutim, unatoč tome, kvar neće biti isključen trenutno, već s određenom vremenskom odgodom (obično oko 100-200 ms). Grafička ilustracija ukupnog akumuliranog vremena potrebnog za isključenje kvara distantnom zaštitom (I: stupanj) koja koristi primjerice PUTT komunikacijsku shemu prikazana je na slici 5.4-3. Na dotičnoj slici se vidi udio svake pojedine komponente vremenskog kašnjenja do trenutka konačnog isključenja kvara. Također se uočava da je vrijeme prepoznavanja kvara vrlo kratko. Unutar ovog vremena (10-60 ms)

distantna zaštita mora biti u stanju točno prepoznati kvar i dati nalog distantnoj zaštiti na drugom kraju štićenog voda da isključi taj kvar.



Slika 5.4-3 Grafička ilustracija ukupnog vremena koje je potrebno komunikacijskoj shemi distantne zaštite da isključi kvar na štićenom vodu.

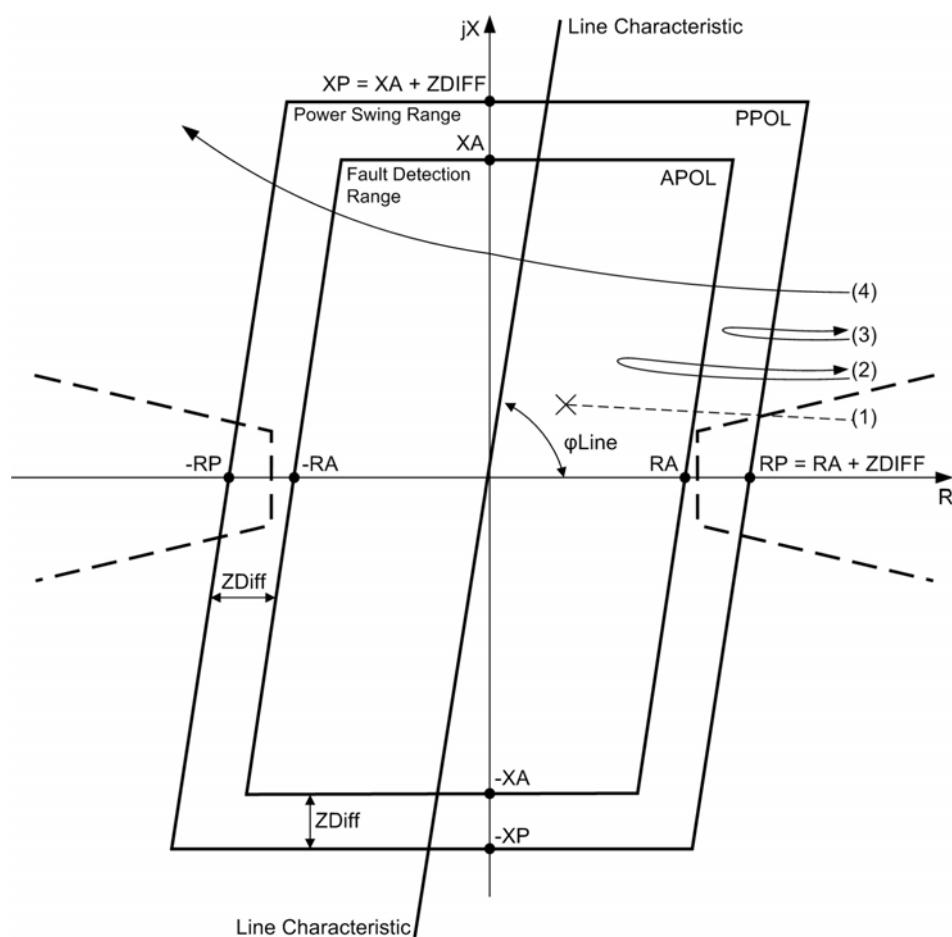
Na temelju slike 5.4-3 postaje posve jasno da je vrijeme isključenja kvara u I. stupnju, korištenjem komunikacijske sheme distantne zaštite, nešto duže od vremena isključenja kvara u I. stupnju bez komunikacijske sheme. Naime, kod klasične distantne zaštite, ukupno vrijeme odgode djelovanja I. stupnja (vlastito vrijeme djelovanja releja i prekidača) procijenjuje se na oko 100 ms. Međutim, s druge strane, korištenje komunikacijske sheme distantne zaštite omogućava štićenje ukupne duljine voda u I. stupnju što je svakako poželjno.

5.5. Detekcija njihanja snage

Pojava kratkih spojeva u prijenosnoj mreži, praćenih uz to automatskim ponovnim uklopom (APU), kao i drugih brzih promjena uklopnih stanja dovodi često do njihanja snage na prijenosnim vodovima koji su incidentni mjestima nastupa spomenutih promjena. Slično se događa primjerice i pri naglim ispadima tereta u mreži. Kod ovakvih dinamičkih promjena stanja prijenosne mreže, distantna zaštita mjeri (na štićenom vodu koji se nalazi u blizini mjesta poremećaja) velike vrijednosti tranzijentnih struja te (naročito ako se nalazi u električnom centru dijela poremećenog sustava) vrlo niske vrijednosti napona. Ovakva kombinacija velikih iznosa struja s malim iznosima naponima znači da je riječ o malim vrijednostima mjerene impedancije. Distantna zaštita stoga može „vjerovati“ da se radi o kratkom spoju u njenoj primjerice III. zoni te da ostale distantne zaštite ne vide dotični „kvar“. Ona može stoga pogrešno djelovati u svojem III. stupnju i pritom isključiti štićeni vod i time određeni dio prijenosnog sustava. Ovo može dovesti do katastrofalnih posljedica, koje u krajnje nepovoljnim slučajevima mogu izazvati lavinski ispad vodova te konačno završiti čak

i s raspadom elektroenergetskog sustava. Ovakve pogrešne prorade distantnih zaštita treba stoga spriječiti. U tu svrhu su moderni numerički reljni uređaji opremljeni posebnom zaštitnom funkcijom blokiranja prorade distantne zaštite pri pojavi njihanja snage u prijenosnoj mreži (engl.: power swing detection).

Njihanje snage može biti simetričan ili pak nesimetričan proces. U potonjem slučaju riječ je o njihanju snage koja je posljedica nastupa dvopolnih ili jednopolnih kratkih spojeva na bliskim prijenosnim vodovima te njihovo isključenje od strane APU-a. Blokiranje prorade distantne zaštite u slučaju detekcije njihanja snage na prijenosnom vodu temeljeno je na trofaznom mjerenu struja i napona. Sam algoritam je vrlo sofisticiran i baziran je na principu **mjerenja brzine promjene vektora mjerene impedancije**. Ukoliko se uoči pojava njihanja snage u mreži, ovaj algoritam blokira proradu distantne zaštite. Slika 5.5-1 prikazuje primjer proradne karakteristike algoritma detekcije njihanja snage.



Slika 5.5-1 Proradna karakteristika algoritma za detekciju njihanja snage.

Prilikom promjene stanja u mreži dolazi i do promjene vektora mjerene impedancije. Ova promjena se odvija na različite načina ovisno o vrsti promjene stanja u mreži (nastup kratkog spoja, ispad tereta, njihanje snage i tome sl.). Stoga algoritam za detekciju njihanja snage vodi računa o brzini i smjeru promjene vektora mjerene impedancije. Tome služi proradna karakteristika na slici 5.5-1. Poligonalna karakteristika APOL na slici 5.5-1 poklapa se dijelom s poligonalnom proradnom karakteristikom posljednjeg korištenog stupnja distantne

zaštite (obično je to proradna karakteristika III. stupnja distantne zaštite). Poligonalna proradna karakteristika PPOL nalazi se izvan nje (izvan APOL) i udaljena je od nje za određeni podesivi iznos impedancije ZDiff (Slika 5.5-1). Mjerenje brzine prolaza vektora mjerene impedancije između karakteristike PPOL i APOL sa slike 5.5-1 predstavlja temelj za detekciju njihanja snage.

Naime, u normalnom pogonu vektor mjerene impedancije nalazi se u području koje je na slici 5.5-1 označeno crtkanom linijom. Pri nastupu kratkog spoja, vektor mjerene impedancije vrlo brzo prelazi u područje djelovanja distantne zaštite (unutar proradne karakteristike). Ovo je prikazano trajektorijom (putanjom) vektora mjerene impedancije koja na slici 5.5-1 nosi oznaku (1). To je „normalan“ slučaj kod kojeg distantna zaštita proraduje. Suprotno tome, kod nastupa njihanja snage u mreži, vektor mjerene impedancije može imati trajektoriju označenu na slici s oznakama (2) ili (3). Ukoliko je pak dio mreže viđen s mjesta ugradnje distantnog releja izgubio sinkronizam, trajektorija vektora mjerene impedancije proći će u potpunosti kroz područje prorade distantne zaštite i ima oznaku (4) na slici 5.5-1. Dakle, trajektorije (2), (3) i (4) ne predstavljaju nastup kratkog spoja već pojavu njihanja snage. Kod njih se također događa da vektor mjerene impedancije uđe u područje proradne karakteristike, međutim njegov ulaz je sporiji nego li treba biti (nego li je u slučaju nastupa kratkog spoja). Brzina ulaza vektora mjerene impedancije unutar područja prorade distantne zaštite mjeri se brzinom prolaza tog vektora između karakteristika PPOL i APOL. Naime, da bi vektor mjerene impedancije ušao u područje prorade mora proći kroz vanjsku poligonalnu karakteriskiku PPOL. U momentu kada vektor mjerene impedancije presječe karakteristiku PPOL starta se određeni vremenski član koji mjeri vrijeme potrebno da vektor presječe proradnu karakteristiku APOL. Ukoliko je to vrijeme dovoljno kratko riječ je o nastupu kratkog spoja. U protivnom, riječ je o pojavi njihanja snage.

U stvarnosti, algoritam detekcije koji se implementira u sklopu numeričke distantne zaštite je znatno složeniji i svoju konačnu odluku donosi na temelju niza dodatnih kriterija. U gornjem tekstu je dano pojednostavljeno obješnjenje spomenute pojave i osnovni preduvijet detekcije njihanja snage. Također, ukoliko se za vrijeme pojave njihanja snage u mreži javi i kratki spoj na razmatranom / štićenom vodu tada se prekida blokada prorade uslijed njihanja snage i relay djeluje na nastali kvar.