



FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE SPLIT

Doc. dr. sc. Ranko Goić, dipl.ing.

Damir Jakus, dipl.ing.

Ivan Penović, dipl.ing.

Distribucija električne energije

interna skripta

Split, 2008.

1	POLOŽAJ DISTRIBUCIJSKE MREŽE U EES-U I OSNOVNE ZNAČAJKE DISTRIBUCIJSKE MREŽE	1
1.1	Elektroenergetski sustav i elektroenergetske mreže	1
1.2	Osnovne značajke distribucijske mreže	6
2	STRUKTURA I KONFIGURACIJA DISTRIBUCIJSKIH MREŽA I TRAFOSTANICA	11
2.1	Struktura 10(20) kV distribucijskih mreža	11
2.2	Struktura 35(30) kV distribucijskih mreža	14
2.3	Struktura niskonaponskih distribucijskih mreža	16
2.4	Distribucijske trafostanice	18
2.4.1	Trafostanice SN/NN	18
2.4.2	Trafostanice SN/SN	23
2.4.3	Trafostanice VN/SN	25
2.5	Primjer konfiguracije 35 kV mreže i TS 35/10 kV i pripadne napojne mreže 110 kV i TS 110/x kV	28
3	ELEMENTI DISTRIBUCIJSKE MREŽA	31
3.1	Nadzemni vodovi	31
3.2	Kabelski vodovi	38
3.3	Transformatori	42
3.4	Potrošači	49
3.4.1	Vrste i karakteristike pojedinačnih trošila	49
3.4.2	Dnevni dijagram opterećenja i varijacije opterećenja	50
3.5	Ostali elementi distribucijske mreže (kondenzatorske baterije i prigušnice)	53
4	ELEKTRIČKI PARAMETRI I NADOMJESNE SCHEME ELEMENATA DISTRIBUCIJSKIH MREŽA	55
4.1	Sustav simetričnih komponenata	55
4.1.1	Transformacija u sustav simetričnih komponenata	56
4.1.2	Pretvorba matrice impedancija u simetrične komponente	58
4.1.3	Fizikalno značenje impedancija u sustavu simetričnih komponenata	59
4.2	Impedancija i nadomjesna shema voda	62
4.2.1	Direktna i inverzna impedancija nadzemnog voda	63
4.2.2	Nulta impedancija nadzemnog voda	64
4.2.3	Poprečna admitancija voda	65
4.3	Impedancija i nadomjesna shema transformatora	67
4.3.1	Dvonamotni transformator	67
4.3.2	Tronamotni transformator	70
4.4	Ekvivalentna shema potrošača	72
4.5	Ekvivalentna shema i parametri paralelne kondenzatorske baterije i prigušnice	73
4.6	Ekvivalentna shema i parametri aktivne (pojne) mreže	73
5	PRORAČUN KVAROVA U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI	82
5.1	Tropolni kratki spoj	82
5.2	Dvopolni kratki spoj (K2) i dvopolni kratki spoj sa zemljom (K2Z)	85
5.3	Zemljospoj u neuzemljenoj srednjenaponskoj mreži	85
5.4	Zemljospoj (kratki spoj) u srednjenaponskoj mreži uzemljenoj preko malog otpora	89
5.5	Jednopolni kratki spoj u niskonaponskoj mreži	90

6 PRORAČUN STACIONARNIH STANJA	102
6.1 Aproksimativni proračun tokova snaga i struja u distribucijskoj mreži	102
6.2 Aproksimativni proračun padova napona	104
6.3 Dimenzioniranje presjeka vodiča	107
6.4 Proračun gubitaka snage i energije	108
6.4.1 Gubici radne snage u vodovima	108
6.4.2 Gubici radne snage u transformatoru	109
6.4.3 Gubici radne energije	112
7 NISKONAPONSKE MREŽE	123
7.1 Vrste NN mreža s obzirom na uzemljenje TS 10(20)/0.4 kV i instalacija potrošača	124
7.2 Proračun opterećenja u niskonaponskoj mreži	126
7.3 Dimenzioniranje niskonaponskih vodova	130
7.4 Zaštitne mjere u niskonaponskoj mreži i TS 10(20)/0.4 kV	140
7.5 Uzemljenje u niskonaponskim mrežama	149
8 KOMPENZACIJA JALOVE SNAGE	154
9 REGULACIJA NAPONA U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI	164
10 XX	170
11 XX	171
LITERATURA	172

1 POLOŽAJ DISTRIBUCIJSKE MREŽE U EES-U I OSNOVNE ZNAČAJKE DISTRIBUCIJSKE MREŽE

1.1 Elektroenergetski sustav i elektroenergetske mreže

Elektroenergetski sustav (EES) sastoji se od 4 osnovne cjeline:

- **Elektrane (izvori električne energije)** različitih vrsta u kojima se proizvodi električna energija. Kao sastavni dio elektroenergetske mreže, svaka elektrana ima:
 - **Električne generatore** (najčešće sinkroni generator, a ponekad i asinkroni generator u slučaju manje instalirane snage), koji proizvodi električnu energiju i aktivni je element mreže, te se u ekvivalentnoj shemi reprezentira kao naponski izvor s odgovarajućom „unutrašnjom“ impedancijom,
 - „**Blok**“ **transformatore** (osim u slučaju kad je nazivni napon generatora jednak nazivnom naponu voda na koji je elektrana priključena), preko kojeg se električna energija proizvedena u generatoru transformira na naponski nivo voda na koji je elektrana priključena.

Elektrane (generatori) većih snaga priključuju se na prijenosnu mrežu, dok se elektrane manjih snaga priključuju na distribucijsku mrežu („distribuirani izvori“) ili direktno na instalacije potrošača („potrošačke elektrane“).

- **Prijenosna mreža** kojom se električna energija transportira od elektrana do distribucijske mreže i velikih potrošača, te razmjenjuje snaga između povezanih elektroenergetskih sustava. Prijenosna mreža sastoji se od zračnih i kablskih vodova visokog napona (najčešće 110 kV i više) i rasklopnih postrojenja (transformatorske stanice koje omogućavaju transformaciju električne energije iz mreže jednog naponskog nivoa u mrežu drugog naponskog nivoa i razdjelna postrojenja u kojima se učvori nekoliko vodova). Kao sastavni dio elektroenergetske mreže, u prijenosnoj mreži se pojavljuju:
 - **Zračni i kablски vodovi** kojima se električna energija prenosi između dva rasklopna postrojenja, najčešće na velike udaljenosti (od nekoliko kilometara do nekoliko stotina kilometara i više)
 - „**Mrežne**“ **transformatore** preko kojih se električna energija transformira iz jednog naponskog nivoa u drugi, i to:
 - između dvije podmreže unutar prijenosne mreže (npr. 400/220 kV, 220/110 kV, 400/110 kV),
 - iz prijenosne mreže u distribucijsku mrežu (npr. 110/35 kV, 110/10 kV),
 - iz prijenosne mreže u električno postrojenje velikog industrijskog potrošača (npr. 110/6 kV).
- **Distribucijska mreža** kojom se električna energija preuzeta iz prijenosne mreže ili manjih elektrana priključenih na distribucijsku mrežu distribuira do srednjih i malih potrošača priključenih na distribucijsku mrežu. Distribucijska mreža se kao i prijenosna mreža sastoji od

zračnih i kablskih vodova (ali manjih nazivnih napona, najčešće ispod 110 kV) i rasklopnih postrojenja (također manjih nazivnih napona u odnosu na prijenosnu mrežu).

Distribucijska mreža obično se dijeli na dvije cjeline:

- Srednjenaponska distribucijska mreža (najčešće nazivnih napona 10kV, 20kV, 35kV),
- Niskonaponska distribucijska mreža (najčešće nazivnog napona 0.4 kV)

Kao sastavni dio elektroenergetske mreže, u distribucijskoj mreži se pojavljuju:

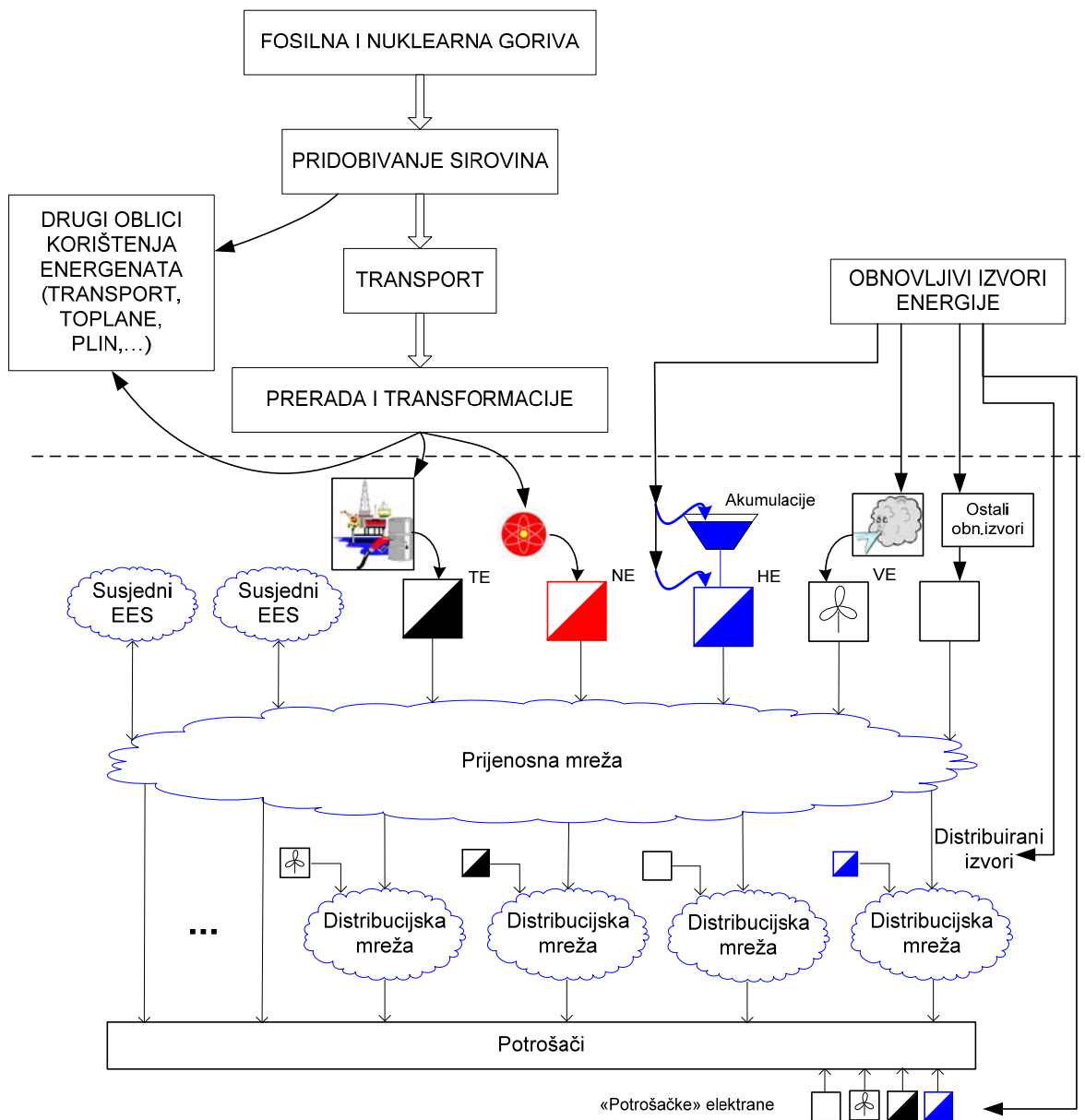
- **Zračni i kablški vodovi** kojima se električna energija prenosi na udaljenosti koje su daleko manje u odnosu na prijenosnu mrežu (od nekoliko desetaka metara do nekoliko desetaka kilometara)
- **„Distribucijske“ transformatore** preko kojih se električna energija transformira iz jednog naponskog nivoa u drugi, i to:
 - između dvije podmreže unutar distribucijske mreže (npr. 35/10 kV, 10/0.4kV),
 - iz distribucijske mreže u električno postrojenje industrijskog potrošača (npr. 35/6 kV, 10/0.4 kV).
- **Potrošači električne energije** koji preuzimaju električnu energiju iz prijenosne ili distribucijske mreže i troše je za vlastite potrebe, tj. za napajanje različitih vrsta električnih trošila. Dakle, potrošač viđen od strane elektroenergetske mreže na koju je priključen, predstavlja svaki objekt koji je priključen na mrežu i koji iz mreže uzima radnu i reaktivnu energiju, ali je također i sastavni dio mreže koji se ovisno o pogonskim karakteristikama može reprezentirati kao impedancija fiksnog iznosa neovisno o naponu u priključnom čvoru ili oduzimanje fiksnog iznosa radne i jalove snage u priključnom čvoru, tako da se odgovarajuća impedancija mijenja ovisno o stvarnom naponu u priključnom čvoru.

Potrošačem u širem smislu se može smatrati i jedan dio prijenosne ili distribucijske mreže u slučaju (vrlo čestom u različitim analizama) da se promatra samo dio elektroenergetskog sustava iznad određenog naponskog nivoa, a svi dijelovi nižih naponskih nivoa se reprezentiraju kao potrošač (potrošači) s fiksnom impedancijom ili snagom. Npr., ako se promatra samo prijenosna mreža, sve distribucijske mreže koje se napajaju električnom energijom iz prijenosne mreže ekvivalentiraju se kao fiksne impedancije ili fiksne snage koje u promatranom čvoru „izlaze“ iz prijenosne mreže.

U analizama distribucijskih ili industrijskih mreža, može se pojaviti i potrošač koji ne predstavlja ekvivalent većeg broja pojedinačnih trošila, već kao pojedinačni potrošač (trošilo). Najčešće se radi o velikim asinkronim motorima kao vrlo čestim elementima industrijskih pogona koji su, kao i generatori, aktivni mrežni elementi.

Na slici 1-1 dana je grafička ilustracija elektroenergetskog sustava u proširenom smislu, koji podrazumijeva sve objekte i uređaje koji su u funkciji proizvodnje, prijenosa, distribucije i potrošnje električne energije.

Primarni izvori (oblici) energije s odgovarajućim postrojenjima, objektima i tehnologijama za pripremu energenata (fosilnih, nuklearnih itd.) ne spadaju u elektroenergetski sustav, budući da se nakon pridobivanja sirovina i primarnih transformacija, transformirani oblici energije mogu upotrijebiti u elektranama za proizvodnju električne energije, ali i za druge namjene.



Slika 1-1 Izvori energije i elektroenergetski sustav

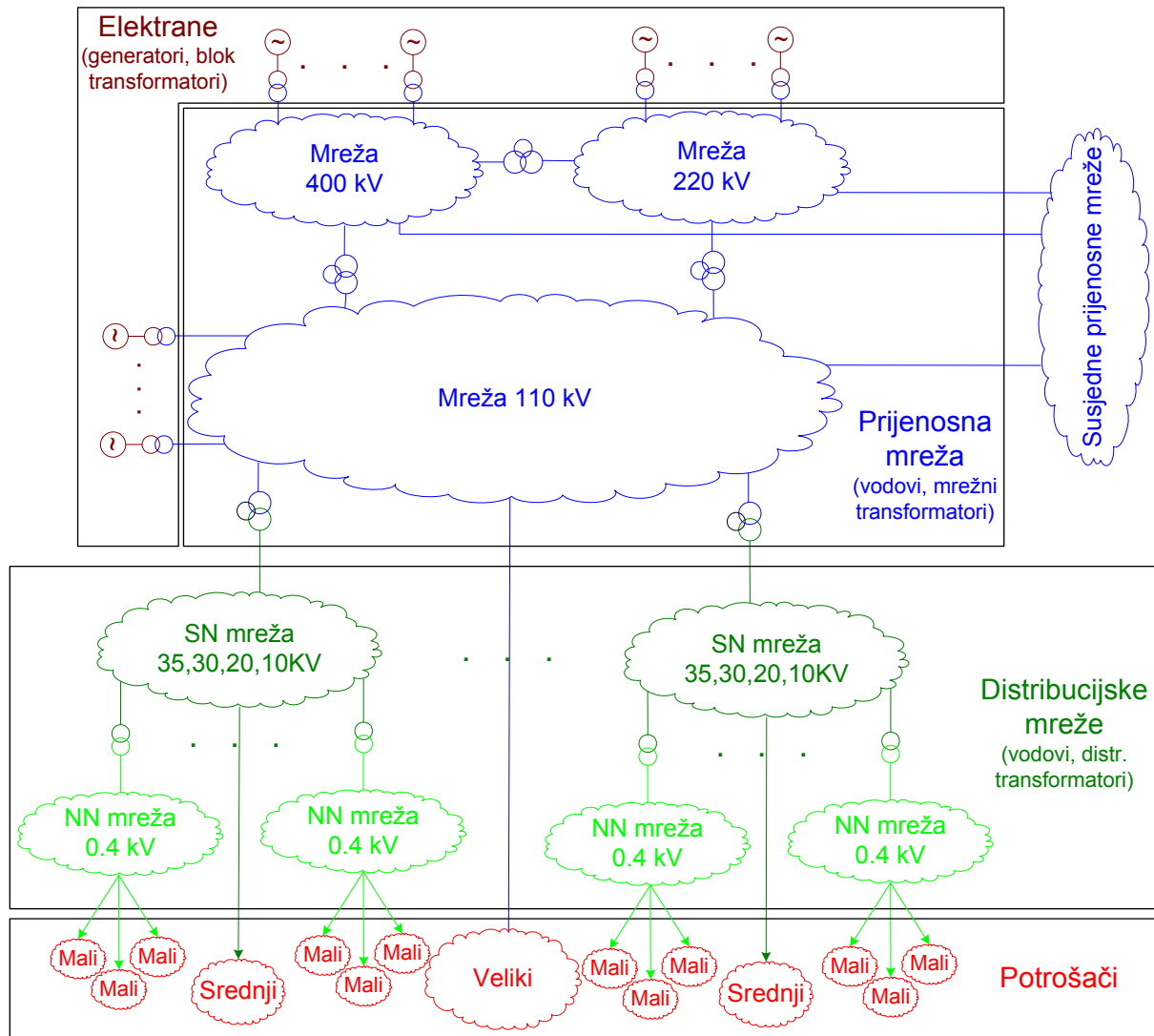
Dakle, elektroenergetska mreža može se definirati kao uži dio elektroenergetskog sustava koja obuhvaća elemente preko kojih se direktno proizvodi, prenosi, distribuira i troši električna energija, tj. generatori, vodovi, transformatori i potrošači („grupni“ ili pojedinačna trošila). Npr., elektrana ili transformatorska stanica u cjelini se može smatrati sastavnim dijelom elektroenergetskog sustava, dok je samo generator i blok transformator u elektrani odnosno transformator u transformatorskoj stanici dio elektroenergetske mreže.

Na slici 1-2 dana je grafička ilustracija elektroenergetske mreže u cjelini, s odgovarajućim komponentama definiranim u prethodnom tekstu.

U različitim analizama elektroenergetske mreže nikada se ne promatra mreža u cjelini, već samo pojedini (manji) dijelovi, dok se ostatak ekvivalentira s većom ili manjom točnošću na fizikalno prihvatljiv način.

Npr. u analizama prijenosne mreže može se promatrati kompletna prijenosna mreža jedne države na način da su uključeni svi generatori i blok transformatori priključeni na prijenosnu mrežu, te svi vodovi i transformatori koji pripadaju prijenosnoj mreži. U tom slučaju se veze s prijenosnim mrežama susjednih država ekvivalentiraju kao aktivni izvori koji mogu isporučivati ili preuzimati električnu energiju, a distribucijske mreže se ekvivalentiraju kao potrošači koji preuzimaju električnu energiju iz prijenosne mreže.

Drugi primjer, ako se analizira srednjenaponska distribucijska mreža, kompletna prijenosna mreža se svodi na jedan ekvivalentan naponski izvor s odgovarajućom impedancijom na mjestu priključka distribucijske mreže na prijenosnu mrežu (transformator 110/35 kV), dok se niskonaponske mreže priključene na promatranu srednjenaponsku mrežu ekvivalentiraju kao potrošači s odgovarajućom impedancijom ili fiksnom snagom koju uzimaju iz srednjenaponske mreže u točki priključka (transformator 10/0.4 kV).



Slika 1-2 Elektroenergetska mreža

Današnje elektroenergetske mreže rade se isključivo u trofaznoj izvedbi frekvencije 50 ili 60 Hz. Takva situacija rezultat je tehničkih i ekonomskih prednosti uočenih i ispitanih krajem 19. stoljeća (izum transformatora, višefaznih struja, asinkronog motora) nakon čega su s vremenom istisnute druge varijante (istosmjerna struja, jednofazna struja, različite frekvencije...), te je započela izgradnja elektroenergetskih mreža koje su povezivale više elektrana i potrošačkih područja (za razliku od početnog razvoja elektrifikacije gdje je jedna elektrana napajala električnom energijom jednu grupu potrošača, bez međusobnog povezivanja).

Izuzetak su istosmjerni prijenosni sustavi (kojih danas ima relativno veliki broj), ali koji se rade samo kao podsustavi velikih trofaznih prijenosnih mreža u slučajevima kad je to tehnički nužno (prijenos kabelskim vodovima na veće udaljenosti, povezivanje dva elektroenergetska sustava koji rade na različitim frekvencijama) ili ekonomski opravdano (prijenos velikih snaga na vrlo velike udaljenosti).

Nazivni naponi elektroenergetskih mreža (i opreme općenito) su standardizirani, ali u različitim državama se ne koriste svi standardni naponski nivoi.

U prijenosnoj mreži Hrvatske koriste se vodovi nazivnog napona 400kV, 220kV i 110kV, dok se u distribucijskoj mreži koriste vodovi nazivnog napona 35kV, 30kV, 20kV, 10kV i 0.4kV. U različitim industrijskim postrojenjima (pogonima) koriste se i naponi 6 kV, 3kV i 1kV, a u elektranama se za nazivne generatorske napone koriste i naponi 4kV, 12kV, 16kV, 25kV itd.

1.2 Osnovne značajke distribucijske mreže

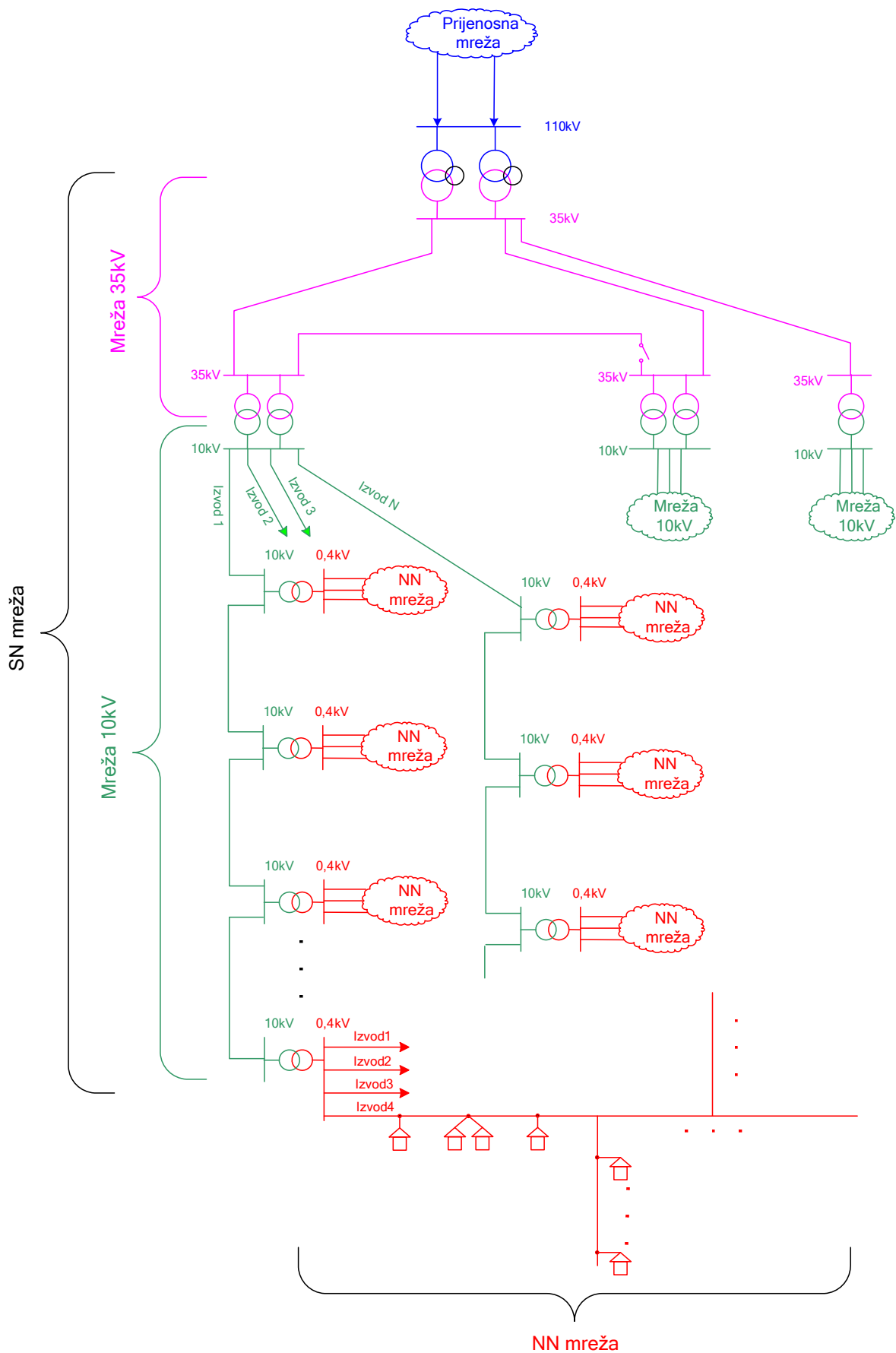
Distribucijska mreža napaja se (preuzima električnu energiju) iz prijenosne mreže u transformatorskim stanicama VN/SN tj. 110/35(30)(20)(10)kV, te služi za distribuciju električne energije do krajnjih (srednjih i malih) potrošača. Dio električne energije distribucijska mreža preuzima i iz manjih elektrana koje su priključene na distribucijsku mrežu.

Osnovne karakteristike distribucijskih mreža su:

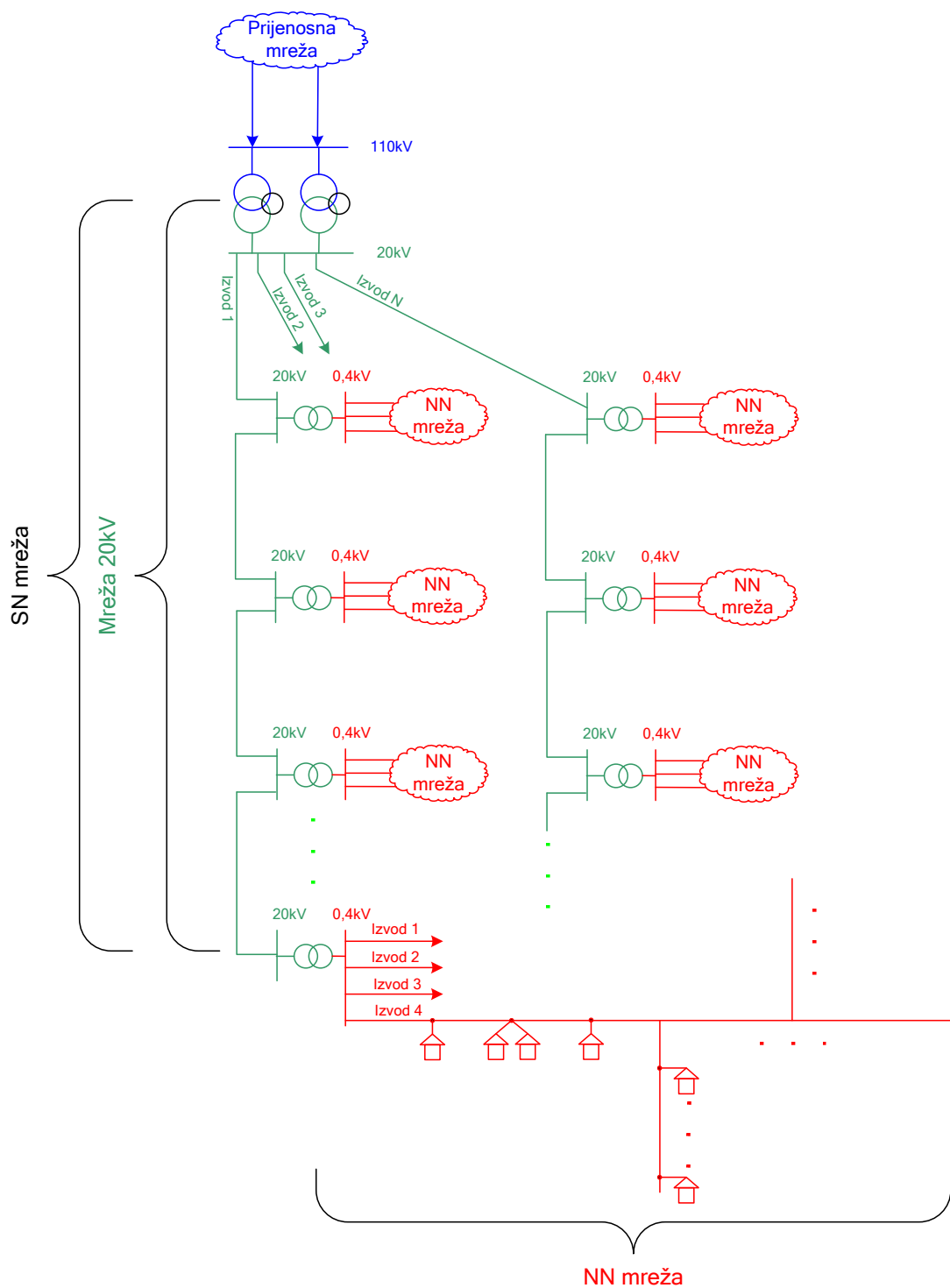
- Niže naponske razine u odnosu na prijenosnu mrežu ($U_n < 110$ kV), budući da je snaga koju prenose daleko manja od snaga koju prenosi prijenosna mreža, tako da nema potrebe za visokim naponskim nivoima.
- Prijenos snage u distribucijskoj mreži odvija se na manjim udaljenostima.
- Distribucijske mreže su većim dijelom otvorene strukture i imaju zrakasti oblik čime je smanjena pogonska sigurnost (u odnosu na prijenosnu mrežu), što je motivirano prvenstveno ekonomskim razlozima.
- Sredjenaponske gradske distributivne mreže su uglavnom upetljane, tako da je u slučaju kvara jednog voda ili transformatora moguće osigurati napajanje iz drugog smjera, s time da je u pogonu uključeno napajanje samo iz jednog smjera, a napajanje iz drugog smjera je rezervno koje se uključuje u slučaju potrebe.
- Niskonaponske mreže (barem u Hrvatskoj) i „seoske“ sredjenaponske mreže nemaju mogućnost dvostranog napajanja.
- Glavni elementi distribucijskih mreža (zračni i kabelski vodovi, trafostanice) su isti kao i kod prijenosnih mreža, samo projektirani za manje nazivne napone, tako da je izvedba jednostavnija.

Osnovna struktura SN distribucijske mreže može biti:

1. Sa dva naponska nivoa (u RH najčešće 35 – 10kV, a na nekim područjima 30 – 10 kV), tj. distribucija električne energije prema niskom naponu se vrši preko dvije transformacije: prvo preko 35 kV-tne, a zatim 10 kV-tne mreže (slika 1-3). 35 kV-tnu mrežu napajaju iz prijenosne mreže transformatori 110/35 kV.
2. S jednim naponskim nivoom (u RH 10kV ili 20kV), na način da se direktnom transformacijom 110/10 ili 110/20 kV eliminira potrebu za 35 kV-tnom mrežom, tj. izbjegnuta je transformacija 35/10(20) kV. Tendencija razvoja distributivne mreže kod nas (i u svijetu također) ide ka smanjenju broja naponskih nivoa, tako da se ovakva izvedba preferira kod izgradnje većine novih i zamjene postojećih distributivnih trafostanica i mreža. Također se nastoji mijenjati 10 kV-tni naponski nivo 20 kV-tnim gdje god je to moguće (slika 1-4).

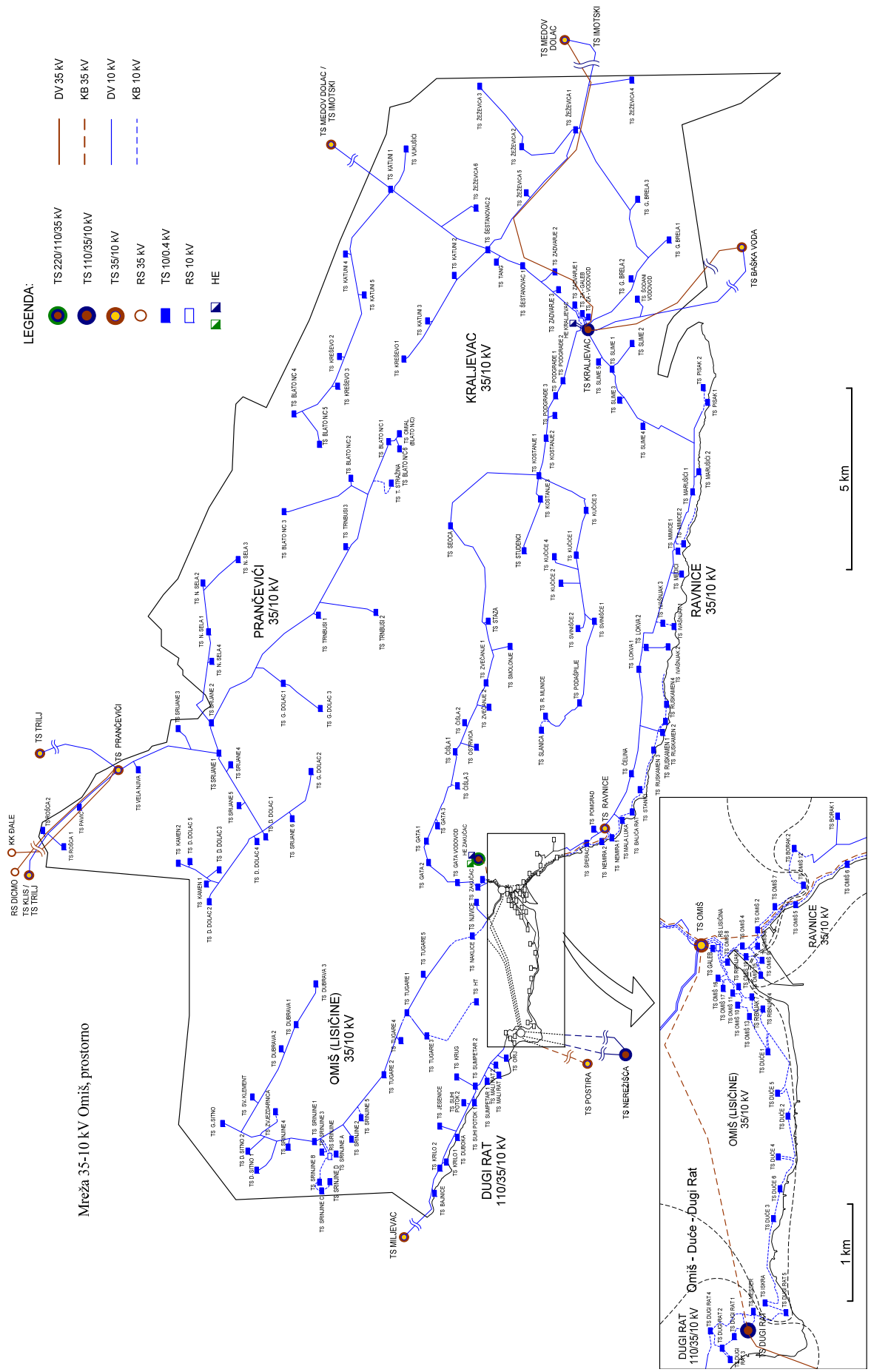


Slika 1-3 Struktura distribucijske mreže s dva naponska nivoa



Slika 1-4 Struktura distribucijske mreže s jednim naponskim nivoom

Primjer realne sredjenaponske distribucijske mreže (šire područje Omiša) s približno točnim geografskim razmještajem dan je na slici 1-5, dok je shematski prikaz mreže 10 kV dan na slici 1-6.

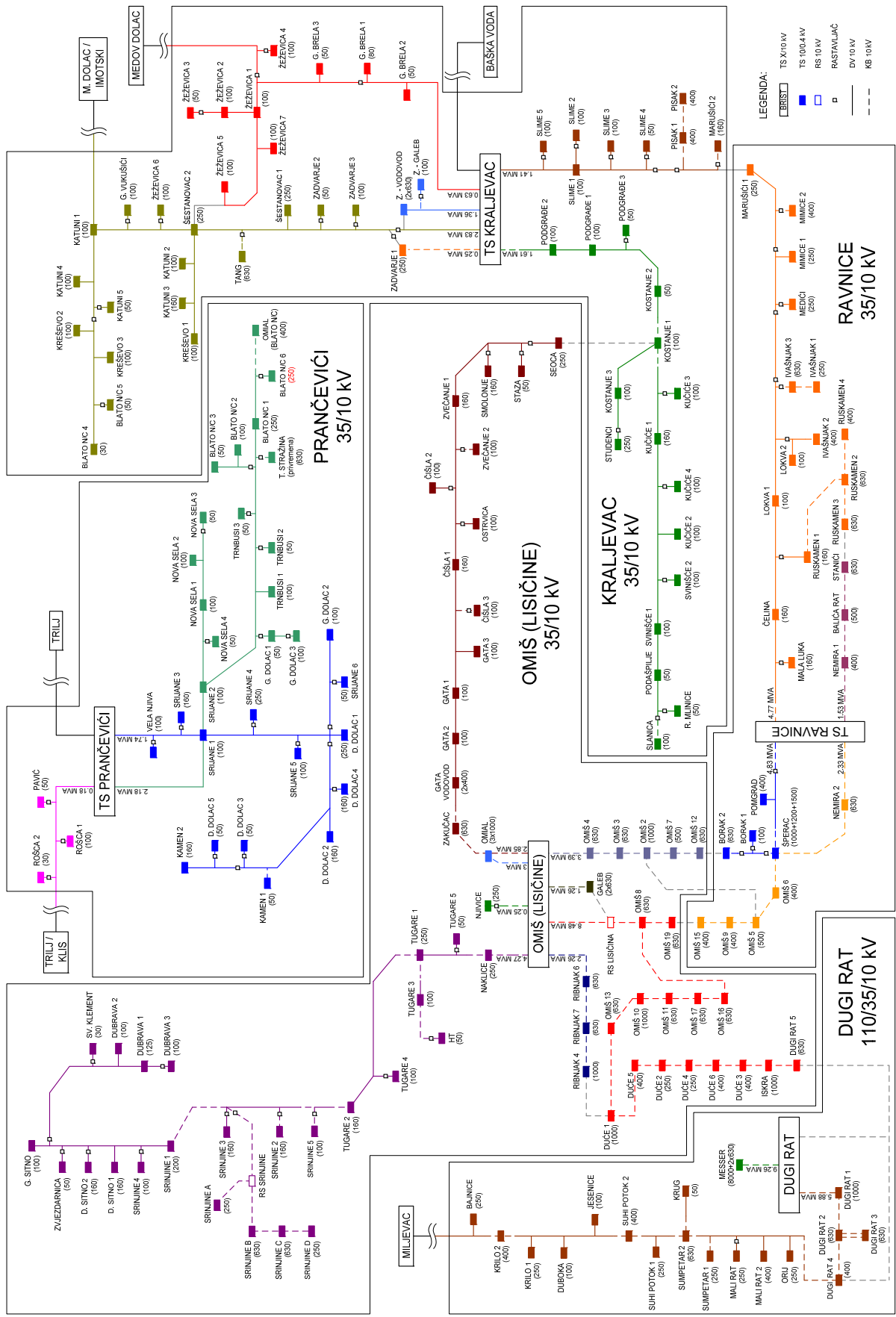


LEGENDA:

- TS 220/110/35 kV
- TS 110/35/10 kV
- TS 35/10 kV
- RS 35 kV
- TS 100.4 kV
- RS 10 kV
- HE
- DV 35 kV
- KB 35 kV
- DV 10 kV
- KB 10 kV

Mreža 35-10 kV Omiš, prostorno

Slika 1-5 Primjer – SN mreža 35-10 kV pogona Omiš (prostorni prikaz)



Slika 1-6 Primjer – SN mreža 10 kV pogona Omis (shematski prikaz)

2 STRUKTURA I KONFIGURACIJA DISTRIBUCIJSKIH MREŽA I TRAFOSTANICA

2.1 Struktura 10(20) kV distribucijskih mreža

10(20) kV-tne distribucijske mreže mogu biti:

A) Jednostrano napajane mreže, kod kojih je napajanje svih vodova moguće samo iz jedne TS x/10(20) kV. Moguće su slijedeće varijante:

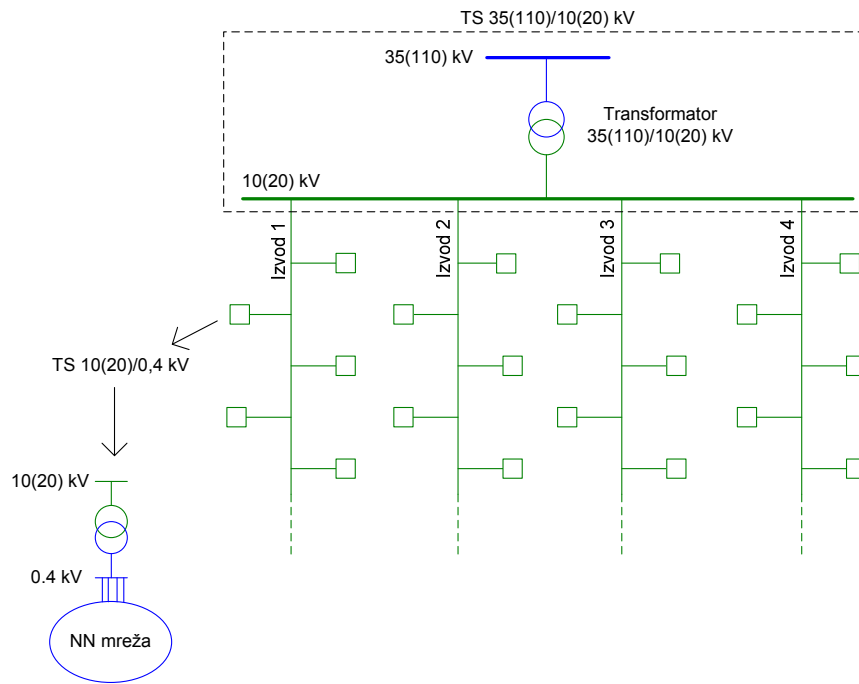
A1) Zrakasta - radijalna mreža (Z – mreža), slika 2-1. Svi srednjenaponski vodovi izlaze radijalno iz TS i nisu međusobno povezani, što znači da ne mogu jedan drugom poslužiti kao rezerva. Ako dođe do prekida napajanja jednog voda u slučaju kvara na istom, sve niskonaponske mreže napajane preko tog voda ostaju bez napajanja.

A2) Prstenasta mreža (P-mreža), slika 2-2. Kod prstenaste mreže, zrakasti izvodi spojeni su razdjelnom stanicom (rasklopno mjesto), pri čemu vodovi predstavljaju rezervu jedan drugom. U normalnom pogonu, rasklopno mjesto je otvoreno, tako da mreža u stvari predstavlja zrakastu mrežu. Ako dođe do kvara (ili isključenja radi održavanja) na nekoj dionici jednog od izvoda, ta dionica se isklapa sa obje strane, a rasklopno mjesto se zatvara, tako da se dio potrošača s jednog voda (oni iza mjesta kvara) napaja preko drugog voda.

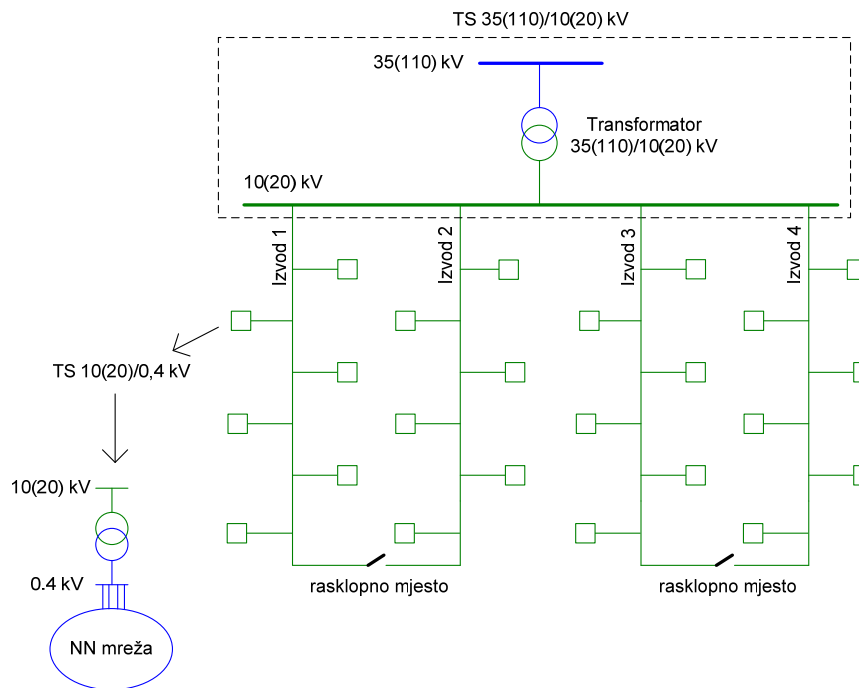
Rasklopnih mjesta može biti i više (npr. u svakoj TS 10(20)/0.4 kV rastavljačima na SN strani se može razdvojiti SN mreža na dva dijela).

Normalni pogon sa zatvorenim rasklopnim mjestom (dvostrano napajanje), iako je tehnički moguć i predstavlja sigurniji način napajanja, rijetko se izvodi jer iziskuje veća ulaganja u opremu (prekidače, zaštitu) i održavanje, što čini ovu izvedbu skupom. Primjenjuje se izuzetno za napajanje potrošača koji su posebno osjetljivi na prekide napajanja.

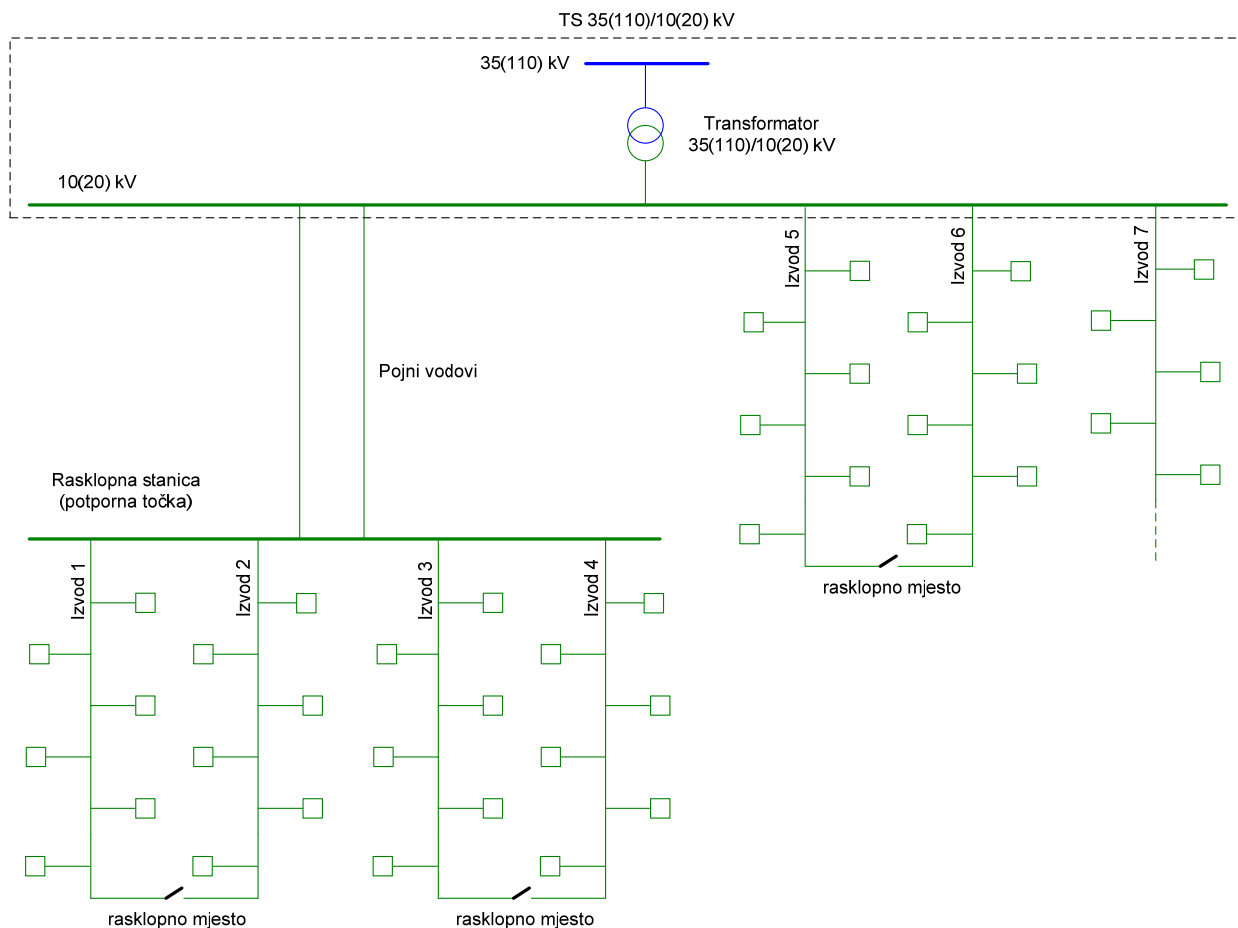
A3) Mreže s potpornom točkom (T-mreža ili TP-mreže ako je ujedno i prstenasta), slika 2-3, imaju izdvojeno rasklopno mjesto (potporna točka), obično vezanu dvostrukim vodom za pojnu TS, iz kojeg se onda napajaju vodovi koji mogu biti zrakasti ili prstenasti. Ovakvo rješenje je obično ekonomski uvjetovano, tj. primjenjuje se ako je cijena izgradnje manja u odnosu na vođenje svih vodova iz trafostanice. Druga je varijanta da se potporna točka formira kao mjesto uvođenja nove TS x/10(20) kV u budućnosti.



Slika 2-1 Zrakasta (radijalna) 10(20) kV mreža



Slika 2-2 Prstenasta 10(20) kV mreža

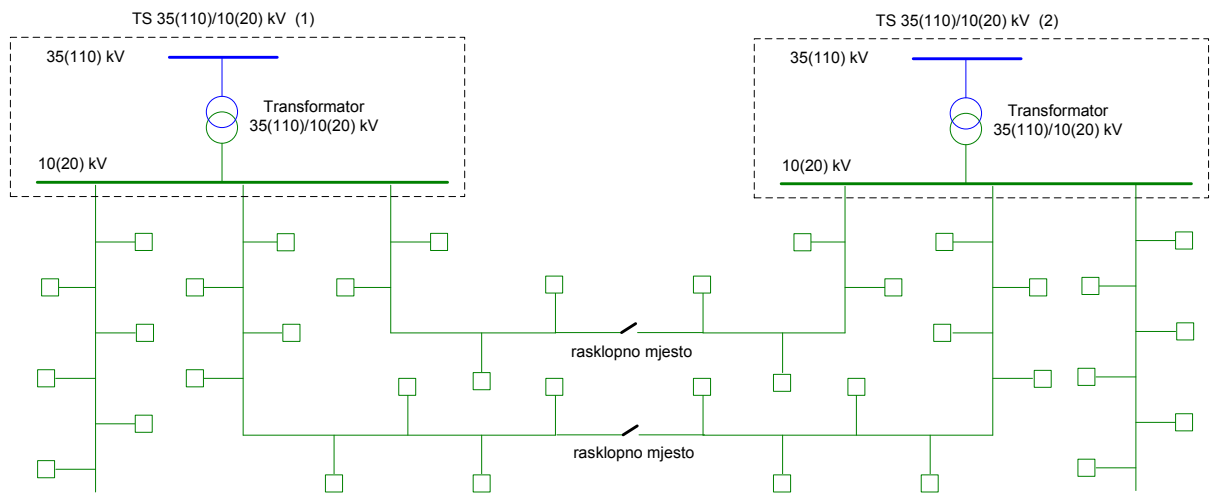


Slika 2-3 Mreža 10(20) kV s potpornom točkom

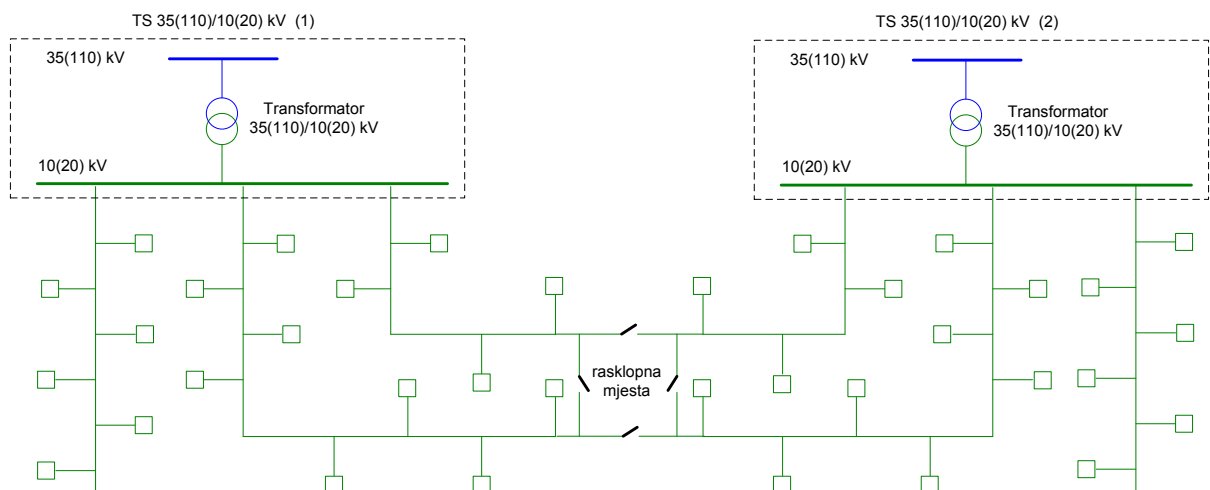
B) Dvostrano napajane mreže, kod kojih je napajanje vodova moguće iz dvije različite TS x/10(20) kV. Moguće su slijedeće izvedbe:

B1) Linijske mreže (L-mreže), slika 2-4. Linijske mreže nastaju spajanjem zrakastih vodova koji izlaze iz dviju pojnih stanica (trafostanica x/10(20) kV). Normalni pogon obično podrazumijeva otvorena rasklopna mjesta. U slučaju kvara na jednoj trafostanici ilivodu, vodovi se mogu napajati iz druge TS.

B2) Kombinirane prstenaste i linijske mreže (PL-mreže), slika 2-5. PL-mreže nastaju od linijskih mreža spajanjem dodatnim vodom u prsten (ili obratno). Na taj način osigurana je dvostruka rezerva, jedna preko voda iz iste trafostanice, a jedna preko voda iz druge trafostanice.



Slika 2-4 Linijska 10(20) kV mreža



Slika 2-5 PL mreža 10(20) kV

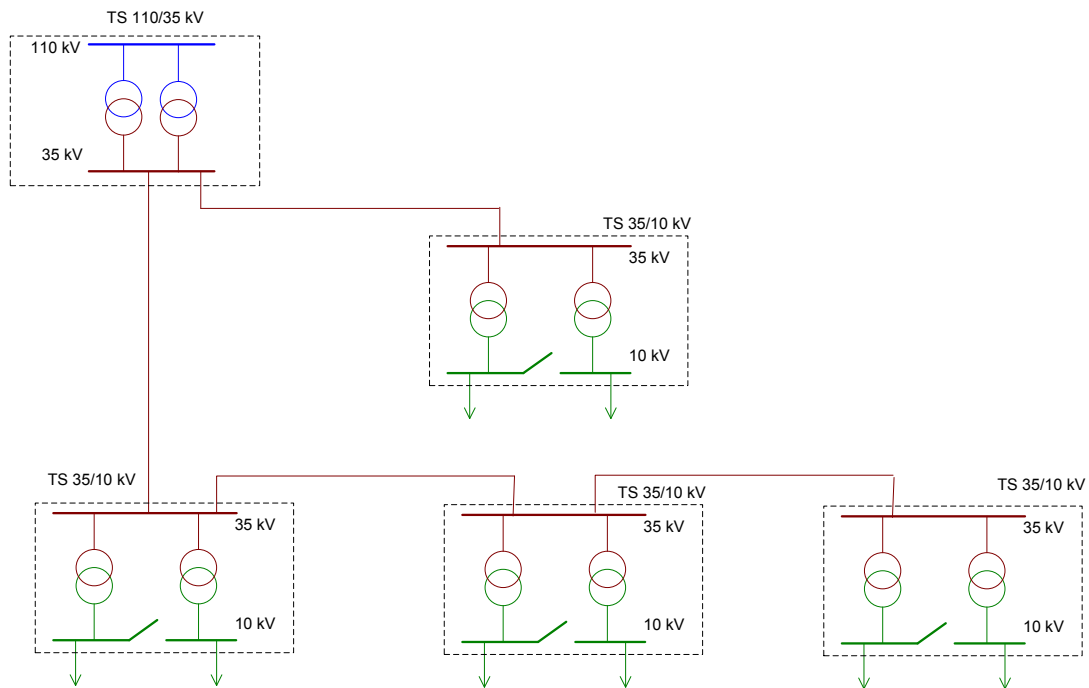
2.2 Struktura 35(30) kV distribucijskih mreža

Struktura 35(30) kV-nih mreža ovisi o brojnim tehničkim uvjetima, ekonomskim mogućnostima i zahtjevima sigurnosti napajanja. Ne postoji neka općenita klasifikacija, a neki tipični primjeri su slijedeći:

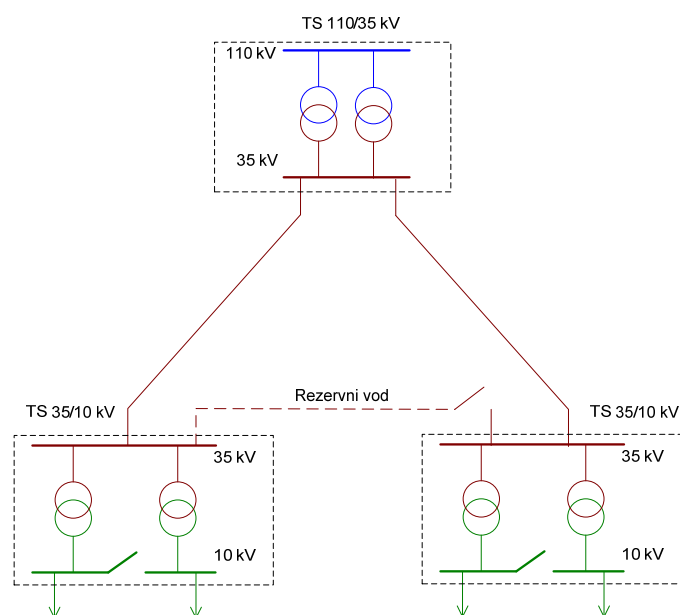
- A) **Zrakaste (radijalne) mreže** su, kao i na 10(20) kV-tnom naponskom nivou, radijalno napajane iz jedne TS 110/35 kV, kao na slici 2-6. Moguće su i neke složenije izvedbe koje omogućavaju rezervno napajanje dijela potrošača sa drugog voda/transformatora u slučaju ispada.
- B) **Prstenaste mreže** omogućavaju dvostruko napajanje svake TS 35/10 kV, na način da se u slučaju kvara na glavnom vodu od TS 110/35 do TS 35/10, napajanje prebaci preko rezervnog

voda koji povezuje dvije TS 35/10 kV. U normalnom pogonu, rezervni vod nije u pogonu (isključen je u jednoj ili obje TS 35/10), slika 2-7.

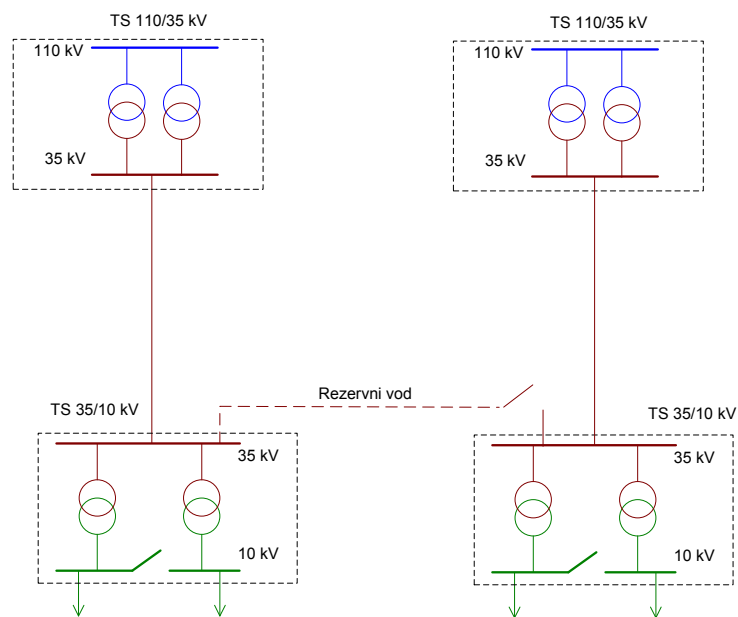
- C) **Linijske mreže** podrazumijevaju mogućnost napajanja TS 35/10 kV iz dvije različite TS 110/35 kV, uz pretpostavku rezervnog voda koji povezuje dvije TS 35/10 kV, slika 2-8. Rezervni vod 35 kV u ovom slučaju je rezerva za ispad jednog voda 35 kV, ali i ispad TS 110/35 kV. U ovom, kao i prethodnom slučaju, vodovi moraju biti dimenzionirani da preuzmu opterećenje (potrošnju) obje TS 35/10 kV.



Slika 2-6 Zrakasta (radijalna) 35 kV mreža



Slika 2-7 Prstenasta 35 kV mreža

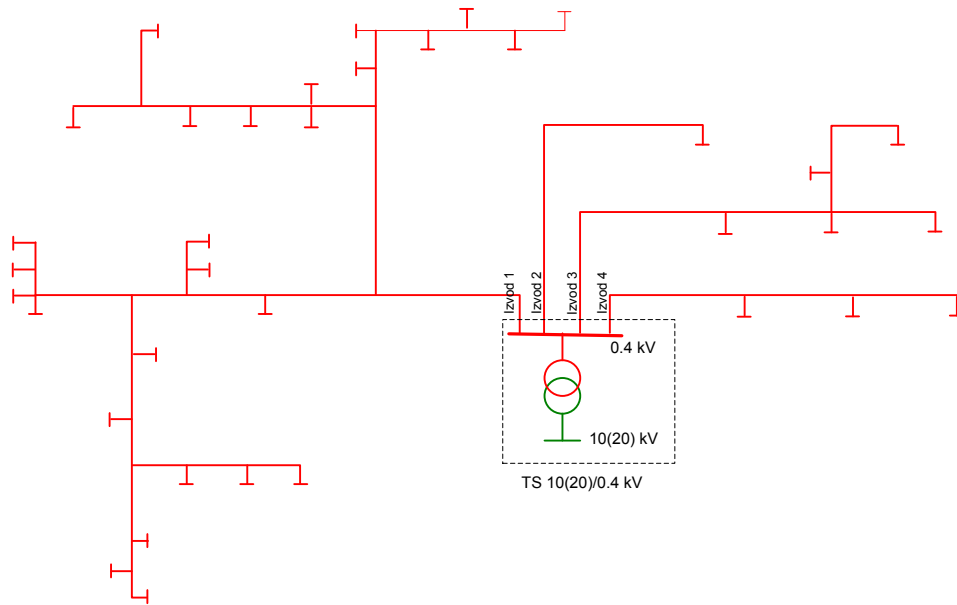


Slika 2-8 Linijska 35 kV mreža

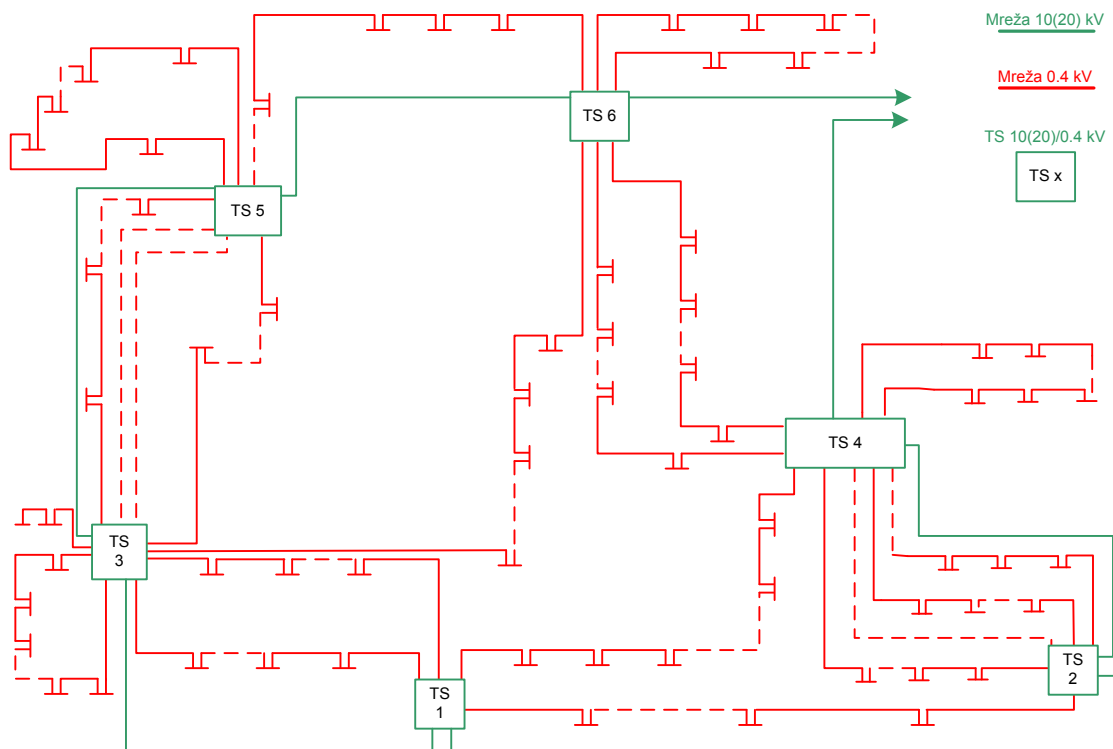
2.3 Struktura niskonaponskih distribucijskih mreža

Niskonaponske distribucijske mreže su najčešće zrakaste, eventualno sa potpornom točkom. U gradovima su moguće i prstenaste i linijske mreže (više pojmih točaka s mogućnošću rezervnog napajanja), ali su redovito u radijalnom pogonu. Njihova struktura je dakle slična kao i struktura prethodno opisanih 10 kV-tnih mreža, a moguće su i uzamčene mreže (sa jednim ili više izvora, tj. TS 10(20)/0.4 kV).

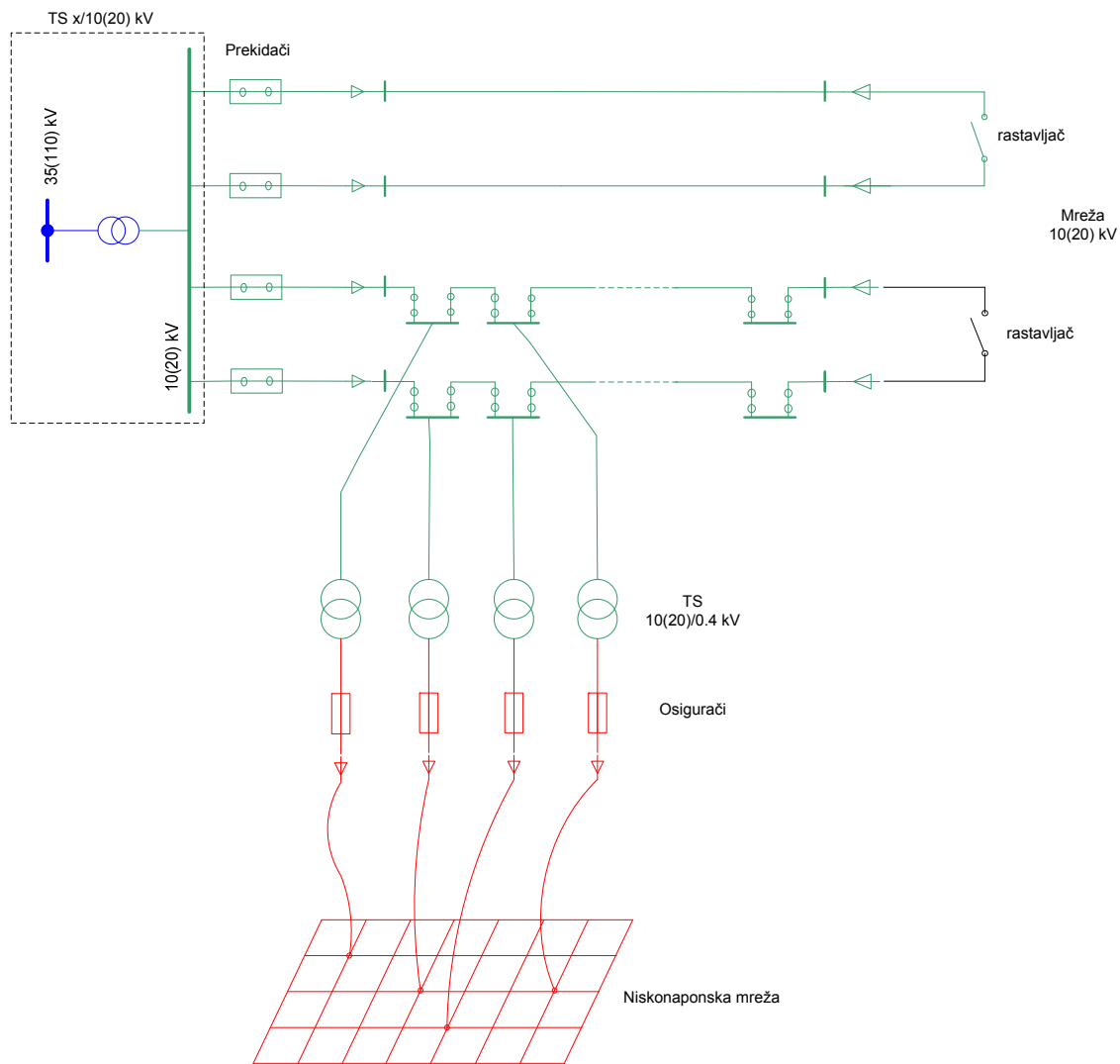
- A) **Radijalne niskonaponske mreže** su najjednostavnije i najekonomičnije, tako da se ovo rješenje najviše koristi u praksi (u Hrvatskoj gotovo isključivo), slika 2-9. Zbog nemogućnosti rezervnog napajanja, kvar na bilo kojem mjestu u mreži izaziva prekid napajanja kompletnog izvoda na kojem se dogodio kvar.
- B) **Uzamčena niskonaponska mreža** ima mogućnost rezervnog napajanja, iz iste ili susjedne TS 10(20)/0.4 kV, tako da je po strukturi ista kao i prstenasta/linijska mreža 10 kV, slika 2-10. U redovnom pogonu isključene su međuveze, tako da je pogon radijalan. Na slici su crtkano označene dionice vodova NN koje su isključene u redovnom pogonu.
- C) **Petljasta niskonaponska mreža** se koristiti u uvjetima gdje je velika površinska gustoća opterećenja i gdje postoje povećani zahtjevi za pouzdanošću isporuke električne energije. Primjer ovakve mreže u sprezi sa srednjenaponskom mrežom prikazan je na slici 2-11. U svaki čvor ove mreže može se priključiti potrošač ili grupa potrošača, a u nekim čvorovima se priključuju TS 10(20)/0.4 kV. Pogon nije radijalan, već su zatvorene sve petlje u NN mreži, ali i petlje preko mreže 10(20) kV.



Slika 2-9 Radijalna niskonaponska mreža



Slika 2-10 Uzamčena niskonaponska mreža s pojnom mrežom 10(20) kV



Slika 2-11 Petljasta niskonaponska mreža s pojnom mrežom 10(20) kV

2.4 Distribucijske trafostanice

Distributivne trafostanice su one koje povezuju:

- srednjenaponsku i niskonaponsku mrežu (SN/NN, tj. 10/0.4kV, 20/0.4 kV i vrlo rijetko 35/0.4kV),
- dvije srednjenaponske mreže (SN/SN, tj. 35/10kV ili 35/20kV),
- a u širem smislu i one koje povezuju visokonaponsku (prijenosnu) i srednjenaponsku distribucijsku mrežu (VN/SN, tj. 110/35kV, 110/20kV ili 110/10kV).

2.4.1 Trafostanice SN/NN

Trafostanice SN/NN redovito se rade kao tipski proizvodi, a mogu biti:

- „stupne“ (postavljene na posebno izvedenom stupu nadzemne 10(20) kV-tne mreže), redovito se koriste u nadzemnim mrežama i manje su snage (50-250kVA)

- izgrađene u posebnom građevinskom objektu, redovito se koriste u kabelskim (gradskim) mrežama, veće su snage (400-1000kVA, 2x630 kVA, 2x1000 kVA,...) a najčešće se izvode kao:
 - tzv. „tornjić“ – stare izvedbe
 - kontejnerska trafostanica (KTS)
 - kontejnerska betonska trafostanica (KBTS)
 - montažna (armirano)betonska trafostanica (MBTS)
 - integrirana unutar zgrade ili građena kao poseban objekt

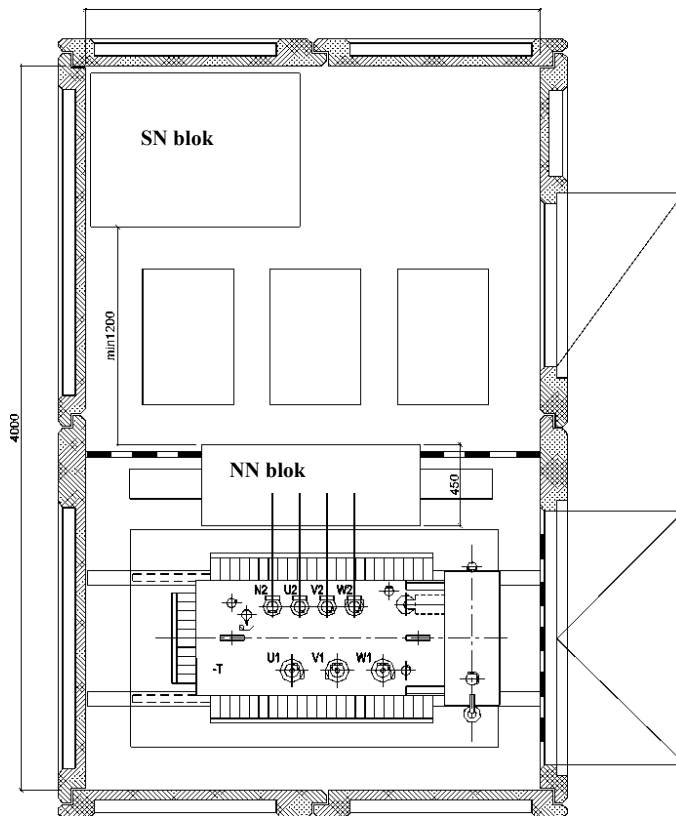
Mogu imati jedan ili više transformatora 10(20)/0.4 kV, a osnovni elementi su:

- građevinski dio odnosno noseći stup
- sustav uzemljenja i gromobranske zaštite
- transformator: uljni ili suhi, snage 50-1000 kVA, grupa spoja Dyn (veće snage) ili Yzn (manje snage)
- srednjenaponsko postrojenje (srednjenaponski sklopni blok) sa običnim ili učinskim rastavljačima, koje može biti klasično (zrakom izolirano) ili SF6 postrojenje, te odvodnicima prenapona ako je priključak sa zračne mreže
- niskonaponsko postrojenje (niskonaponski sklopni blok), najčešće s prekidačem u trafo polju i osiguračima u vodnim poljima, te uređajima za mjerenje, zaštitu itd.
- pomoćni sustavi (sustav istosmjernog napajanja, rasvjeta, klimatizacija...)

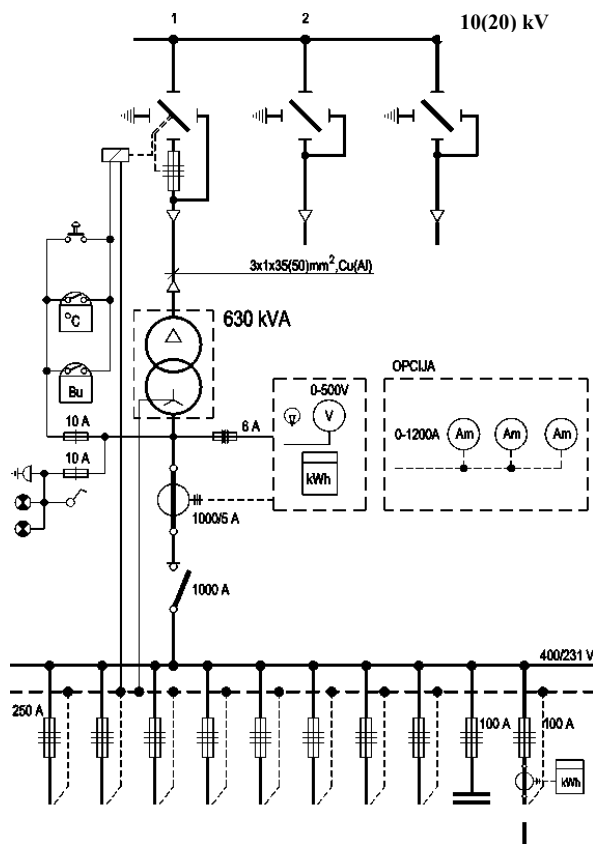
Na slici 2-12 i 2-13 prikazan je primjer dispozicije i jednopolne sheme gradske TS 10/0.4 kV.

Na slici 2-14 i 2-15 prikazana je izvedba stupne TS 10/0.4 kV i odgovarajuća jednopolna shema.

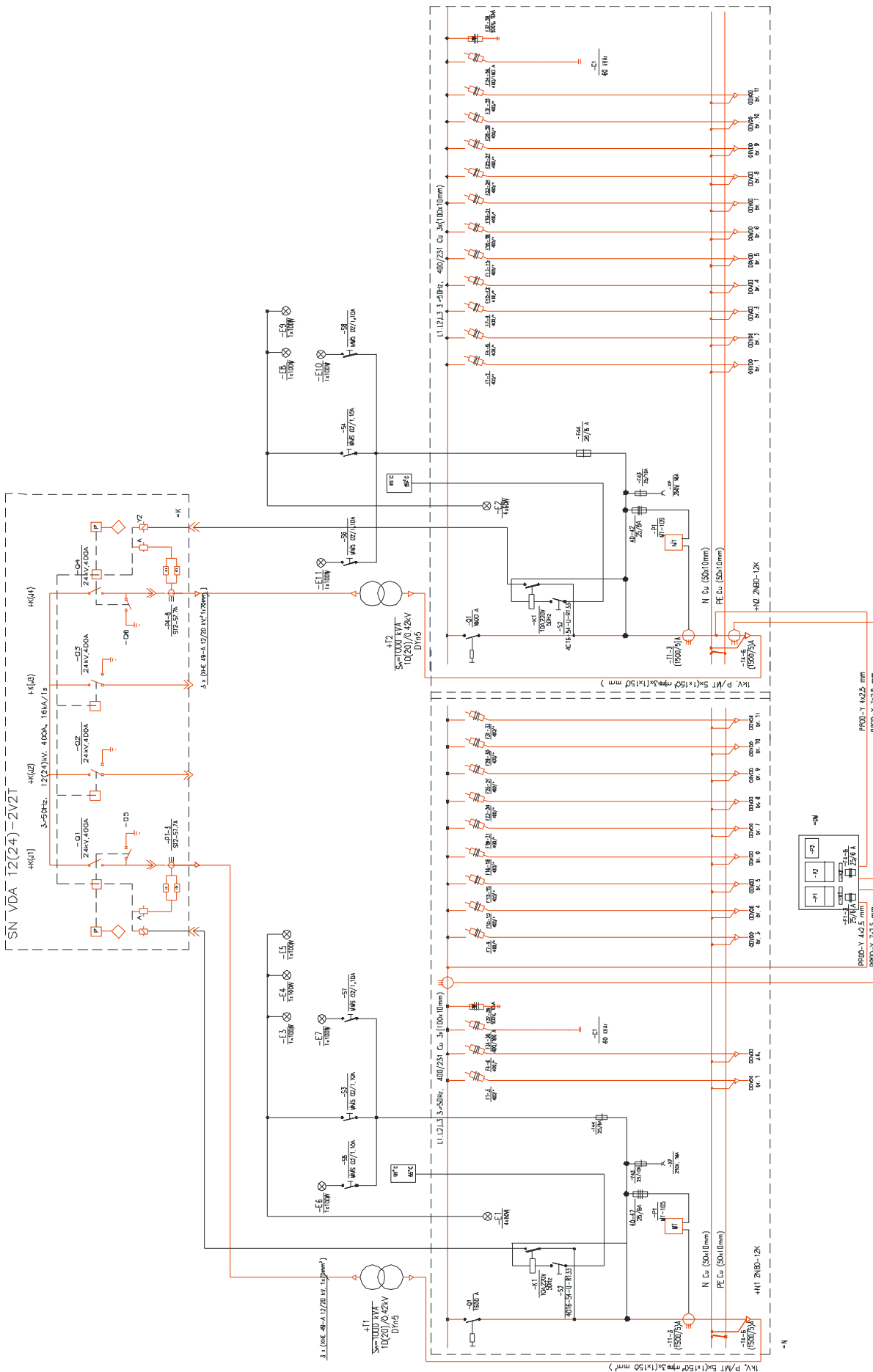
Na slici 2-16 prikazana je detaljna jednopolna shema TS 10(20)/0.4 kV FESB.



Slika 2-12 Dispozicija TS 10(20) kV („gradska“)



Slika 2-13 Jednopolna shema TS 10(20) kV („gradska“)



Slika 2-16 Primjer: jednopolna shema TS 10(20) kV FESB

2.4.2 Trafostanice SN/SN

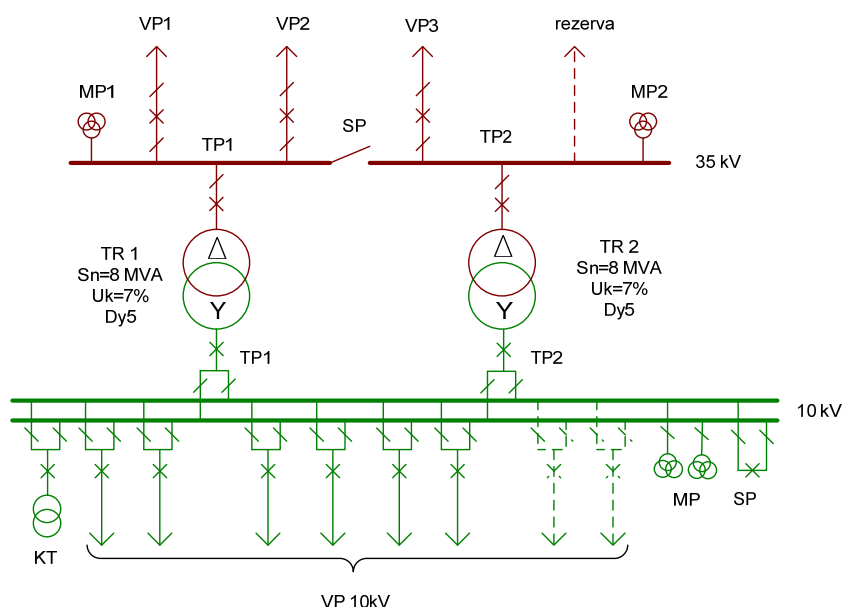
Trafostanice SN/NN (35/10 kV, 35/20 kV) ne rade se kao tipski proizvodi, ali je oprema najčešće standardizirana, kao i jednopolne sheme, osim kod složenih gradskih trafostanica velike instalirane snage.

Redovito imaju 2 transformatora 35/10(20) kV (ponekad jedan ili tri) pojedinačne snage 2.5-16 MVA grupe spoja Dy5 ili Yd5. U slučaju da napajaju veliku kabelsku mrežu, zvjezdište transformatora se uzemljuje preko otpornika ili prigušnice za uzemljenje.

Oba SN postrojenja mogu biti izvedena kao SF6 ili zrakom izolirana, a izvedba sabirnica može biti:

- jednostruke,
- jednostruke, sekcionirane sa sekcionskim rastavljačem,
- dvostruke.

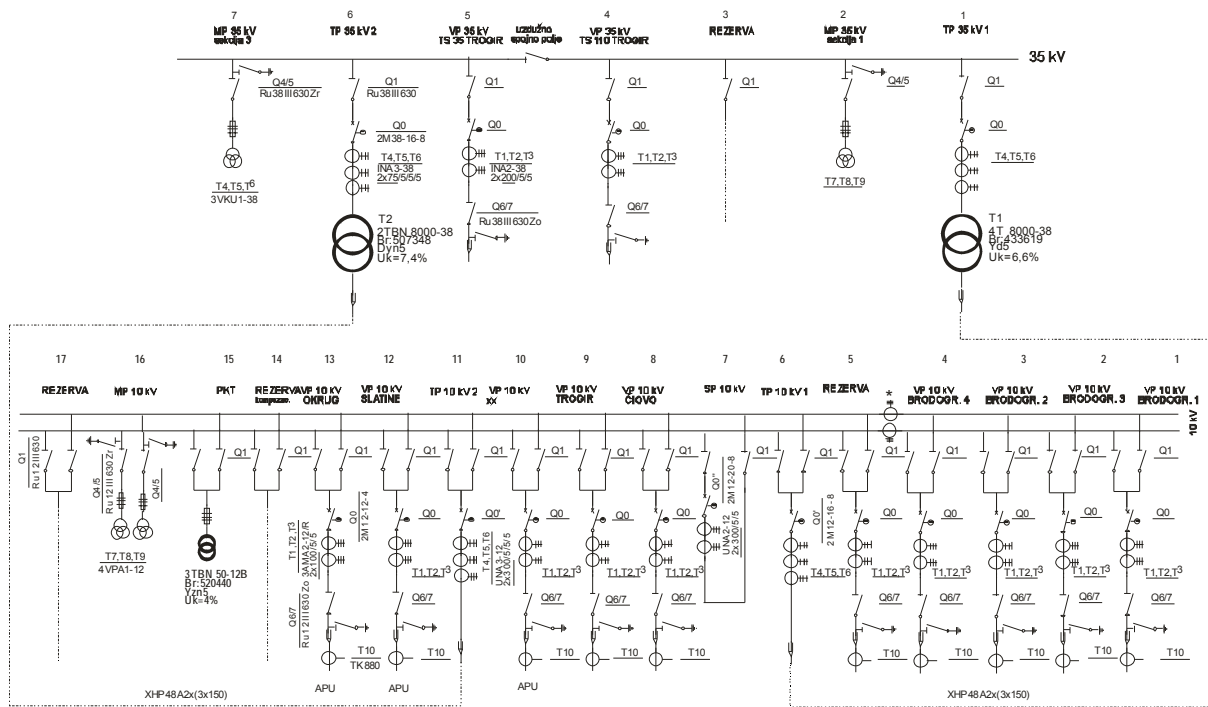
Na slici 2-17 prikazan je primjer TS 35/10(20) kV s izvedbom postrojenja 35 kV sa sekcioniranim jednostrukim sabirnicama, te izvedbom postrojenja 10 kV s dvostrukim sabirnicama.



Slika 2-17 Primjer TS 35/10(20) kV s jednostrukim sekcioniranim sabirnicama 35 kV i dvostrukim sabirnicama 10 kV

Osim 2 SN postrojenja i transformatora, elementi TS 35/10(20) kV su i građevinski dio, sustav uzemljenja i gromobranske zaštite, sustav za daljinsko upravljanje, sustav izmjeničnog i istosmjernog napajanja, pomoćni sustavi (rasvjeta, klimatizacija, protupožarna oprema...)

Na slikama 2-18 i 2-19 prikazan je primjer dispozicije i jednopolne sheme gradske TS 35/10 kV.



Slika 2-19 Jednopolna shema TS 35/10(20) kV

2.4.3 Trafostanice VN/SN

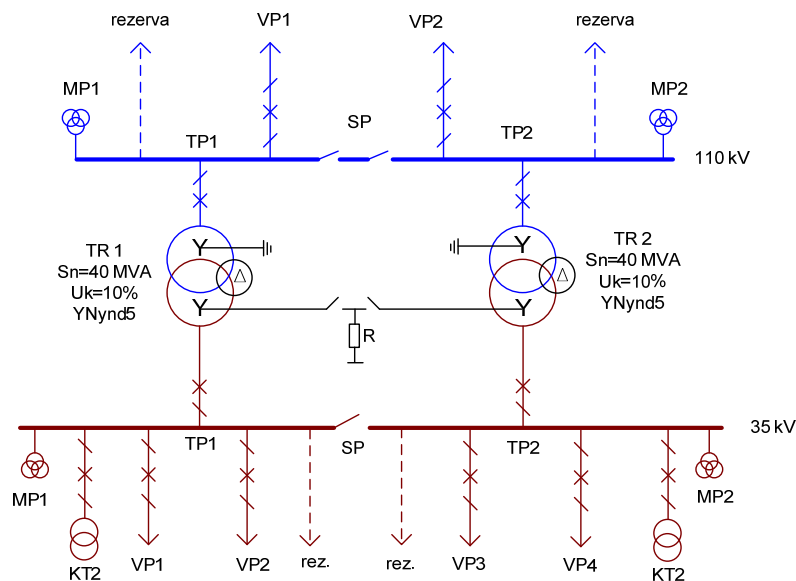
Trafostanice VN/NN (110/35 kV, 110/10 kV, 110/20 kV) imaju funkciju napajanja SN distribucijske mreže, također se ne rade se kao tipski proizvodi, ali je oprema najčešće standardizirana, kao i jednopolne sheme kod većine jednostavnih trafostanica.

Postrojenje 110 kV je otvorenog tipa ili zatvorenog tipa (GIS). Redovito imaju 2 transformatora 110/x kV (ponekad jedan ili tri) pojedinačne snage 20 ili 40 MVA u TS 110/10(20) kV, odnosno 40, 31.5 ili 63 MVA u TS 110/35 kV, grupe spoja YN_{yn}d5 (tronamotni transformatori, tercijar obično naponskog nivoa 10kV i nije opterećen). Zvezdište transformatora je kruto uzemljeno na primarnoj strani, a na sekundarnoj strani je uzemljeno preko otpornika ili prigušnice za uzemljenje.

Izvedba sabirnica može biti:

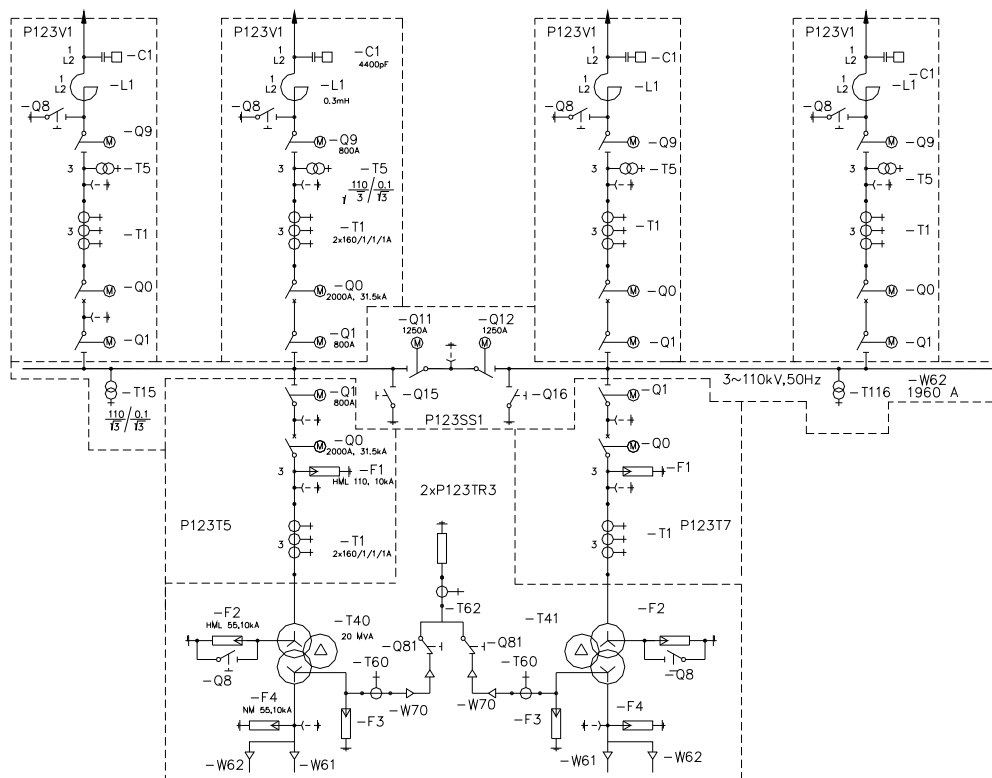
- jednostruke, sekcionirane sa sekcijским rastavljačem,
- dvostruke,
- dvostruke s pomoćnim sabirnicama.

Na slici 2-20 prikazan je primjer TS 110/35 kV s izvedbom postrojenja 110 kV i 35 kV sa sekcioniranim jednostrukim sabirnicama.



Slika 2-20 Primjer TS 110/35 kV s jednostrukim sekcioniranim sabirnicama 110 kV i 35 kV

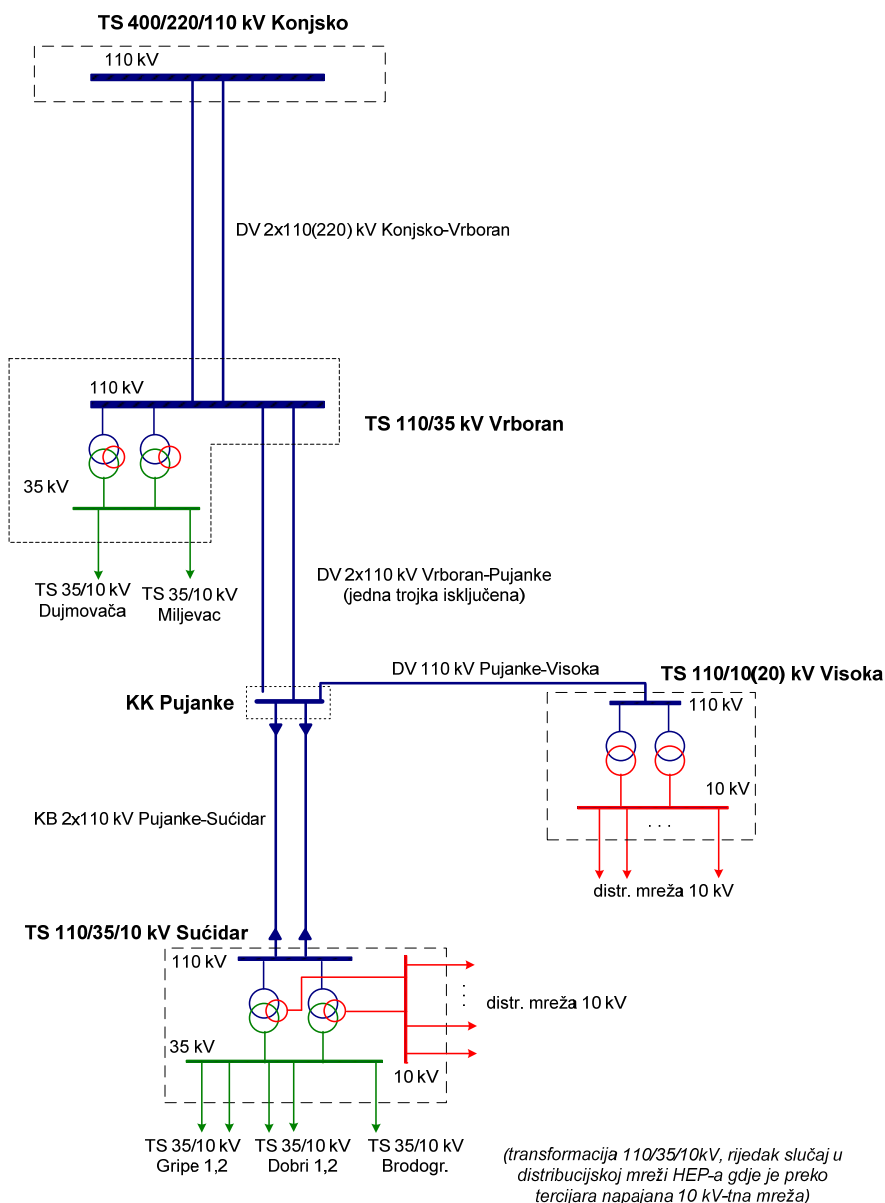
U Hrvatskoj se najčešće grade tipske trafostanice 110/x kV u prema tzv. H-shemi za postrojenje 110 kV (kao na slici 2-20). Jednopolna shema postrojenja 110 kV takve TS prikazana je na slici 2-21, dok je na slikama 2-22 i 2-23 prikazana jednopolna shema postrojenja 35 kV (za TS 110/35 kV) odnosno postrojenja 10(20) kV (u varijanti TS 110/10(20) kV).



Slika 2-21 Postrojenje 110 kV – H shema

2.5 Primjer konfiguracije 35 kV mreže i TS 35/10 kV i pripadne napojne mreže 110 kV i TS 110/x kV

Na slici 2-24 dan je primjer mreže 110 kV koja je u funkciji napajanja TS 110/x kV odnosno pripadne distribucijske mreže užeg područja grada Splita (napomena: na slici je prikazano staro stanje od prije nekoliko godina, tj. prije izgradnje TS 110/10(20) kV Dobri i pripadne kabelske mreže 110 kV).

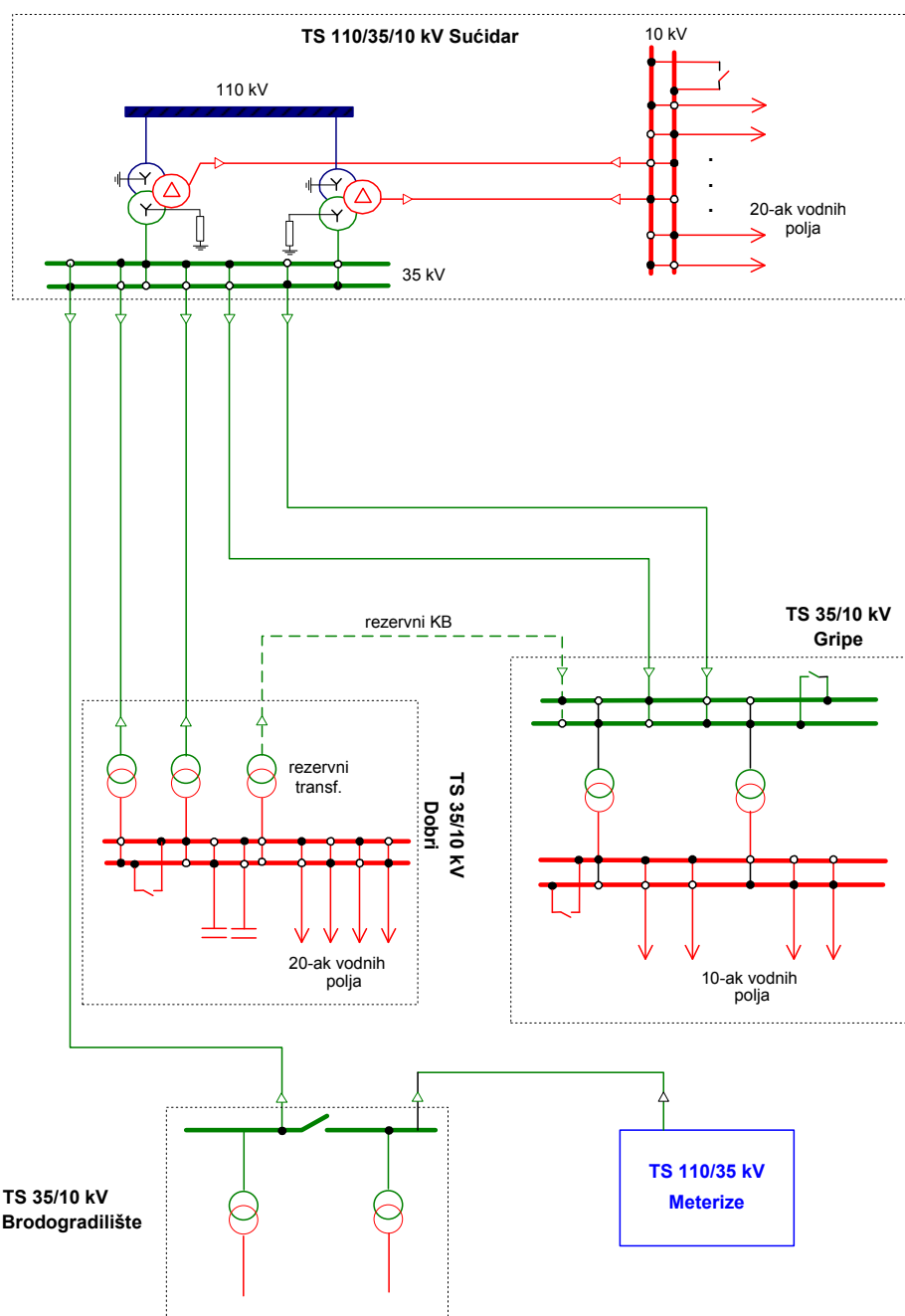


Slika 2-24 Mreža 110 kV i TS 110/x kV napajana iz TS Vrboran

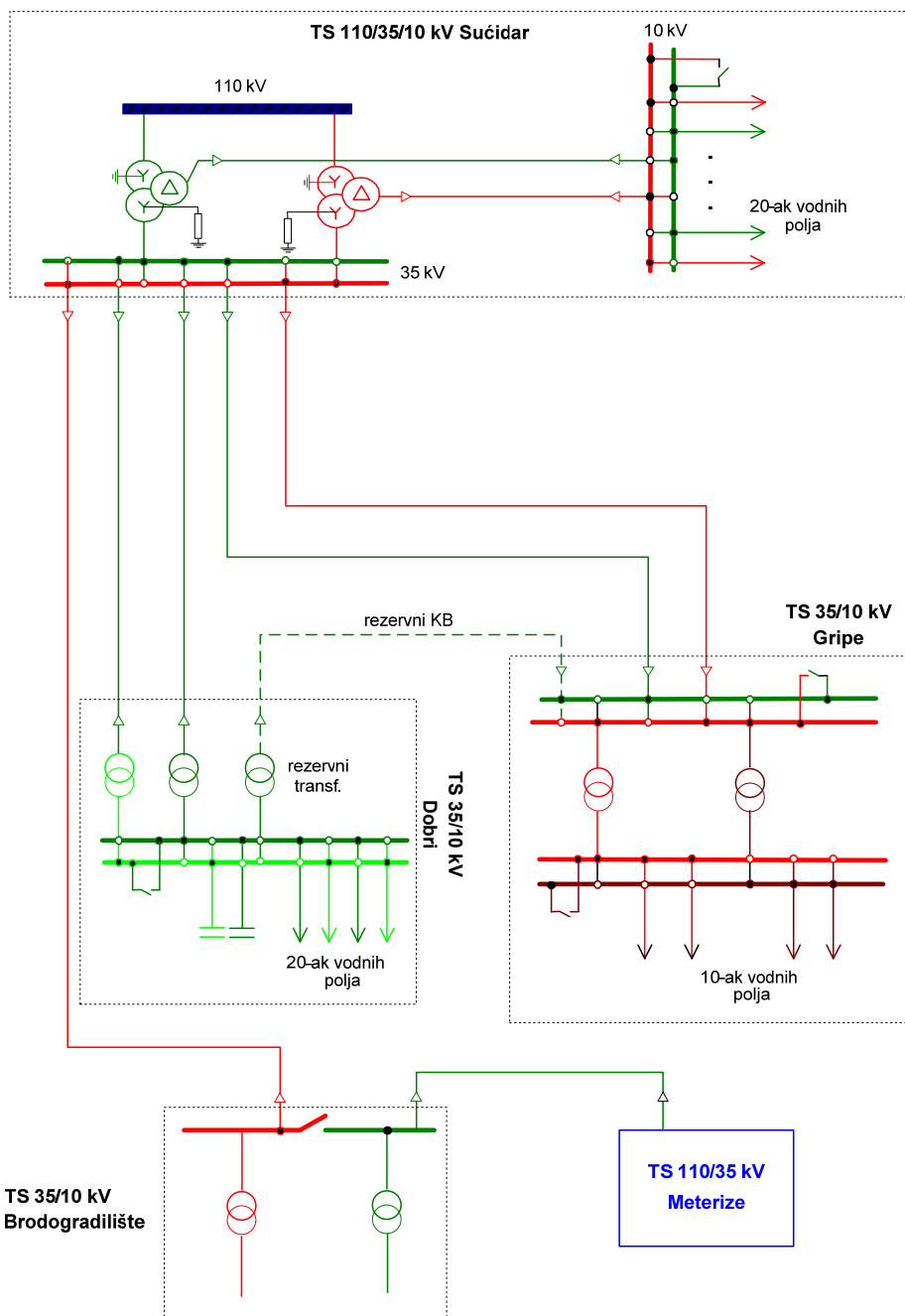
Dio 35 kV-tne mreže grada Splita, koji se napaja iz TS 110/35/10 kV Sučićar prikazan je na slici 2-25 (boje odgovaraju naponskim nivoima). Iz tercijara transformatora TS Sučićar napaja se 10 kV-tna mreža, a sa sekundara (35 kV) se napajaju trafostanice 35/10 kV Dobri i Gripe, te jedan transformator

u TS Brodogradilište, dok se drugi napaja kabelskom vezom iz TS 110/35 kV Meterize. Mreža je u cjelosti kabelska, što je i najčešći slučaj za gradske mreže.

Prema klasifikaciji opisanoj u poglavlju 2.2, ova mreža je kombinacija svih opisanih slučajeva 35 kV-tnih mreža (zrakasta, prstenasta, linijska). Na slici su punim kružićem označene uklopljene veze vodova/transformatora u normalnom pogonu, dok neispunjeni kružić predstavlja otvoreni strujni krug (prekidač/rastavljač), koji se uklapa u slučaju kvara nekog elementa u mreži kako bi se osiguralo rezervno napajanje. Na slici treba uočiti da nijedan element mreže u normalnom pogonu (vod, transformator) ne radi u paraleli, što je na slici 2-26 istaknuto na način da je različitim bojama, tako da boje ne odgovaraju naponskim nivoima već uklopnom stanju mreže.



Slika 2-25 Mreža 35 kV napajana iz TS 110/35/10 kV Sućidar (boje po naponskim nivoima)



Slika 2-26 Mreža 35 kV napajana iz TS 110/35/10 kV Sućidar (boje prema uklopnom stanju)

3 ELEMENTI DISTRIBUCIJSKE MREŽA

3.1 Nadzemni vodovi

Osnovni elementi nadzemnog voda su:

- stup,
- fazni i zaštitni vodiči,
- izolatori (izolatorski lanci),
- temelji,
- uzemljivač,
- spojni, ovjesni i zaštitni pribor.

Distribucijski nadzemni vodovi razlikuju se s obzirom na:

- nazivni napon (0.4 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV),
- broj strujnih krugova – faznih trojki (jednosistemske i dvosistemske),
- materijal (bakar, aluminij, čelik, aluminij-čelik) i način konstrukcije vodiča (žica, uža),
- materijal i konstrukcija stupova (drveni, armiranobetonski, čelično – rešetkasti).

Stupovi

Stupovi osiguravaju vodičima odgovarajuću visinu nad tlom. Opterećeni su mehanički:

- Vertikalno prema dolje djeluje težina vodiča, izolatorskog lanca i eventualno dodatnog tereta na vodičima (npr, led).
- Horizontalno u smjeru trase voda djeluju sile horizontalnog zatezanja vodiča, koje se djelomično ili u cijelosti mogu poništiti.
- Horizontalno okomito na trasu voda djeluje vjetar na vodiče i stupove.

Po položaju u trasi stupovi se dijele na :

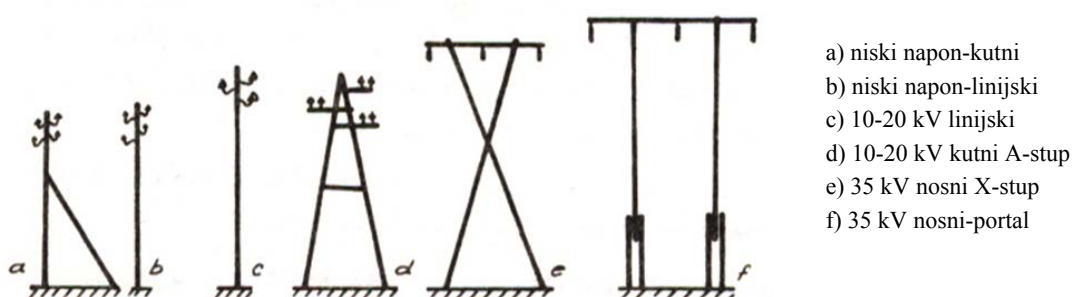
- **linijske**, koji se nalaze u ravnom dijelu vertikalne projekcije trase,
- **kutne**, koji se nalaze na mjestima loma vertikalne projekcije trase.

Po načinu vješanja vodiča stupovi se dijele na :

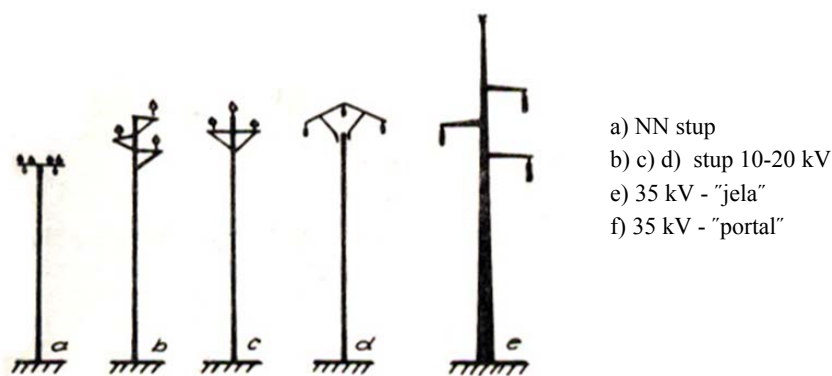
- **nosne** (nosni izolatori i izolatorski lanci), kod kojih se u neporemećenom stanju horizontalne sile u smjeru trase uvijek poništavaju,
- **zatezne** (zatezni izolatori i izolatorski lanci), kod kojih se u neporemećenom stanju horizontalne sile u smjeru trase djelomično poništavaju, tj. uvijek postoji određeni iznos horizontalne sile u jednom smjeru.

Materijali za izradu stupova su:

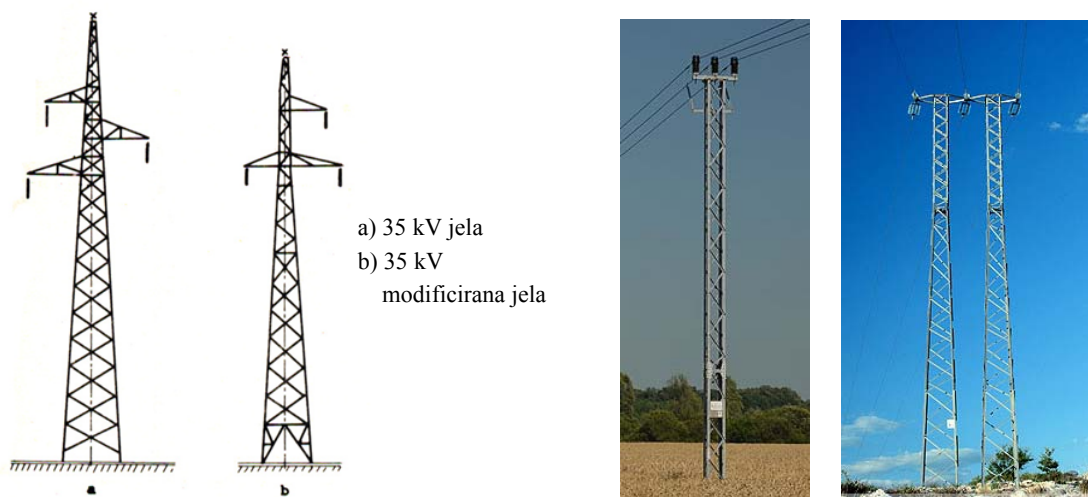
- *Drvo* – karakterizira ga mala težina, brza montaža, relativno je jeftino, ali je kratkog životnog vijeka pa su takvi stupovi dosta skupi u pogonu. Danas se drveni stupovi ne ugrađuju, ali su u distribucijskim mrežama vrlo česti, pogotovo u niskonaponskoj mreži.
- *Armirani beton* – ovakve stupove karakterizira velika težina, dugotrajnost, te mala potreba za održavanjem. U distribucijskoj mreži se koriste za vodove srednjeg i niskog napona. U niskonaponskoj mreži se pretežno koriste betonski stupovi.
- *Čelik (čelično-rešetkasti stupovi)* – u distribucijskoj mreži redovito se koriste za 35 kV mrežu, a vrlo često i za 10(20) kV mrežu. Konstrukcija ovakvih stupova je rešetkasta, i pokazala se jako dobrom s obzirom na mehanička naprezanja. Problem kod čelično-rešetkastih stupova je konstantna izloženost vlazi i zraku pa dolazi do korozije metala (pocinčavanje...).



Slika 3-1 Tipične siluete drvenih stupova



Slika 3-2 Tipične siluete armirano-betonskih stupova



Slika 3-3 Tipične siluete čel.-reš. stupova 35 kV, primjer čel.-reš. stupova 10(20) kV

Vodiči

Vodiči kao osnovni funkcionalni element električnog voda imaju zadatak voditi električnu struju i jedini su aktivni dio voda. Uslijed vlastite težine vodiči su mehanički opterećeni na vlak, a zbog činjenice da se protjecanjem struje kroz vodič stvaraju Jule-ovi gubici to ih čini termički napregnutima.

Vodiči mogu biti izrađeni u obliku žica ili užadi, pri čemu se za prijenos većih snaga koriste isključivo vodiči u obliku užadi. Za izradu električnih vodiča nadzemnih vodova uzimaju se razni materijali, od kojih se traži dobra električna vodljivost, velika mehanička čvrstoća, dobra mogućnost obrade, otpornost od korozije i starenja te prihvatljiva cijena. Sva navedena svojstva ne mogu se naći u samo jednom materijalu (tzv. **homogeni vodiči**), pa se često primjenjuju tzv. **kombinirani vodiči** koji se sastoje iz najmanje dva različita materijala.

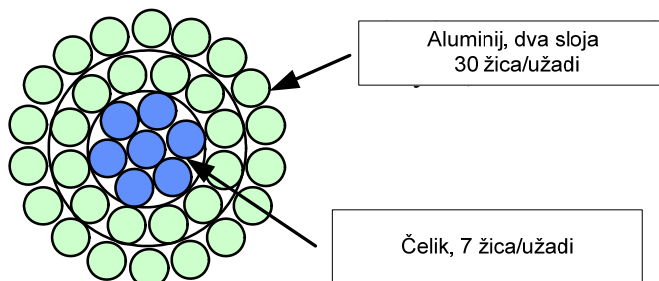
Presjek vodiča i materijal od kojeg je izrađen definiraju maksimalno dozvoljenu struju (I_n) koja smije trajno protjecati vodom u pogonu. Veće struje od nazivnih su dopuštene ali u kraćem vremenu, ovisno o iznosu struje.

Materijali od kojih mogu biti izgrađeni vodiči su:

- *Bakar (Cu)* – ima najbolja električna svojstva.
- *Aluminij (Al)* - danas prevladava kao materijal za izradu vodiča za nadzemne vodove. U električnim svojstvima zaostaje za bakrom, ali ima manju specifičnu težinu i jeftiniji je, zbog čega je praktički istisnuo bakar u gradnji nadzemnih vodova. Osjetljiv je na mehanička oštećenja i relativno lako korodira.
- *Čelik (Fe)* - ima vrlo loša električna, ali dobra mehanička svojstva. Čelični vodiči se često primjenjuju kao zaštitna užad i kod kombiniranih vodiča. Od korozije se štiti pocinčavanjem.
- *Alučel (Al/Č)* - je kombinirani vodič s jezgrom od čelične žice ili užeta i omotačem od žica aluminija. Čelik preuzima mehaničko opterećenje, a aluminij ulogu električnog vodiča. Najčešći omjer presjeka aluminija i čelika je 6:1, ali može biti i manji ukoliko se traži veća mehanička čvrstoća koju daje čelik.

Vodiči u obliku žice (homogeni) upotrebljavaju se samo na vodovima niskog napona za male presjeke i male raspone, i to od bakra presjeka najčešće 16 mm^2 .

Užad su standardna forma za vodiče električnih vodova. Gubljenja su i to im je najveća prednost pred žicama istog presjeka. Normalnom izvedbom užeta smatra se ono uže kojem su sve žice istog presjeka. Zbog blagog spiralnog sukanja dužina žice je 2–3 % veća od dužine užeta.



Slika 3-4 Presjek Alužel užeta

Presjeci užeta su normirani nizom: 10, 16, 25, 35, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 300, ... itd. To su nazivni presjeci, a stvarni presjeci nešto odstupaju od navedenih, a uzimaju se iz tablica. Kod presjeka za Al/Č uže misli se samo na presjek aluminijskog plašta, ali se navede i presjek čelične jezgre. Tako su npr. za Al/Č uže normirani sljedeći presjeci: 16/2,5; 25/4; 35/6; 50/8; 70/12; 95/15; 150/25; 185/32; 210/40; 240/40; 300/50; 360/57; 490/65; ... itd.

Izolatori

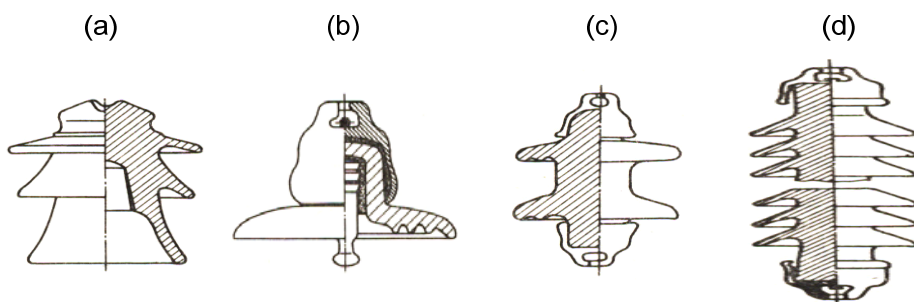
Izolatori imaju dvojaku ulogu:

- električki izoliraju vodiče od stupa,
- mehanički drže vodiče u određenom položaju, te prenose mehaničke sile s vodiča na stup.

Opterećeni su električno i mehanički, a kod pojave električnog luka i termički. Materijali za izradu izolatora su: porculan, steatit, kaljeno staklo i kompozitni materijali.

Izolatori se sastoje od izolacijskih i metalnih dijelova. Po načinu kako nose vodiče dijele se na:

- potporne (zvonaste), koje se danas rade samo manje naponske nivoe (0.4 kV)
- ovjesne (lančaste) – izolator se formira povezivanjem ovjesnih jedinica.



a) potporni izolator, b) ovjesni izolator – kapasti, c) ovjesni izolator – masivni, d) ovjesni izolator - štapni

Slika 3-5 Vrste izolatora



a) porculanski izolatori, b) stakleni izolatori

Slika 3-6 Primjeri izolatora

Zaštitno uže i uzemljenje stupa

Uzemljenje nadzemnog voda u širem smislu obuhvaća cijeli sistem kojem pripada zaštitno uže (ako ga ima), sam uzemljivač, te međusobni galvanski spojevi metalnih dijelova koji nisu pod naponom.

Zaštitno (dozemno, gromobransko) uže ima višestruku funkciju :

- štiti fazne vodiče od direktnog udara munje (povećanje pogonske sigurnosti voda),
- doprinosi pouzdanom radu zaštite kod kratkih spojeva prema zemlji,
- galvanski povezuje uzemljivače svih stupova i time poboljšava cjelokupni sustav uzemljenja voda.

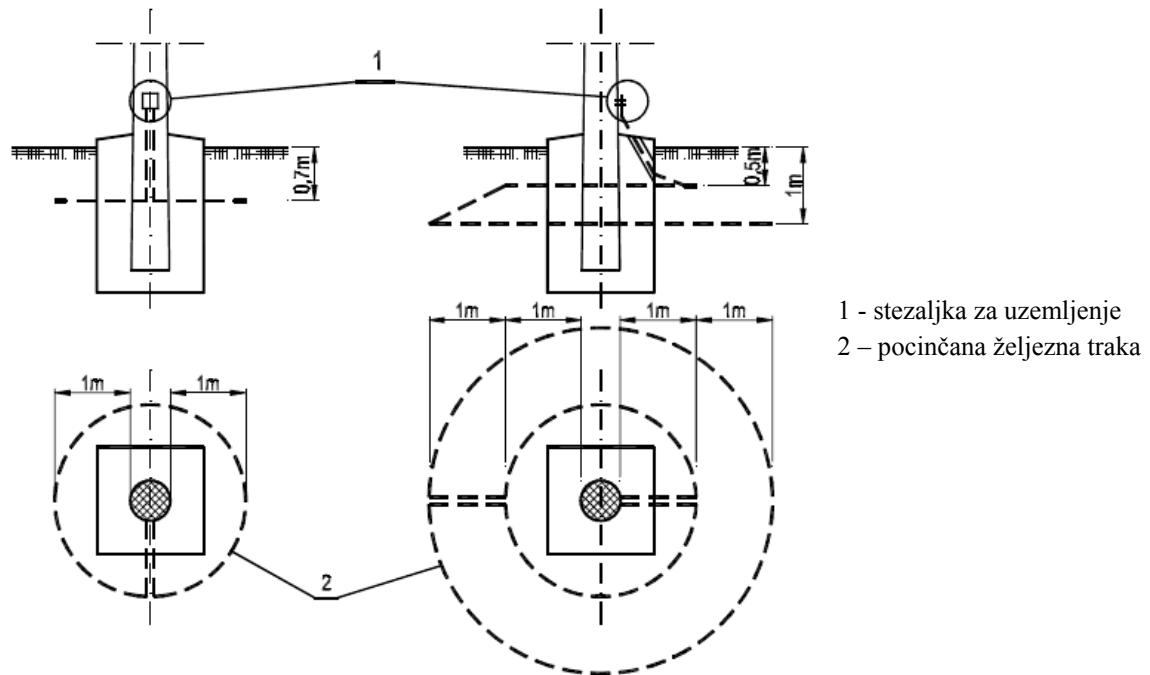
Prvu funkciju ispunjava i uže iz čelika, ali za ostale dvije je poželjno da zaštitno uže bude od bolje vodljivog materijala. Zaštitno uže mora na svakom stupu biti pouzdano povezano s uzemljivačem, bilo preko samog stupa (čelično – rešetkasti ili armirano – betonski stup), bilo preko posebnog dozemnog voda duž stupa (armirano – betonski stup kod kojeg nema metalne veze kroz armaturu stupa).

Kod starijih dalekovoda, najčešće se upotrebljavalo čelično zaštitno uže (presjeka npr. 50 ili 95 mm²), dok se danas redovito ugrađuju zaštitna užad s kombiniranim, bolje vodljivim materijalima, npr. AlMg1E/Č 95/55 mm².

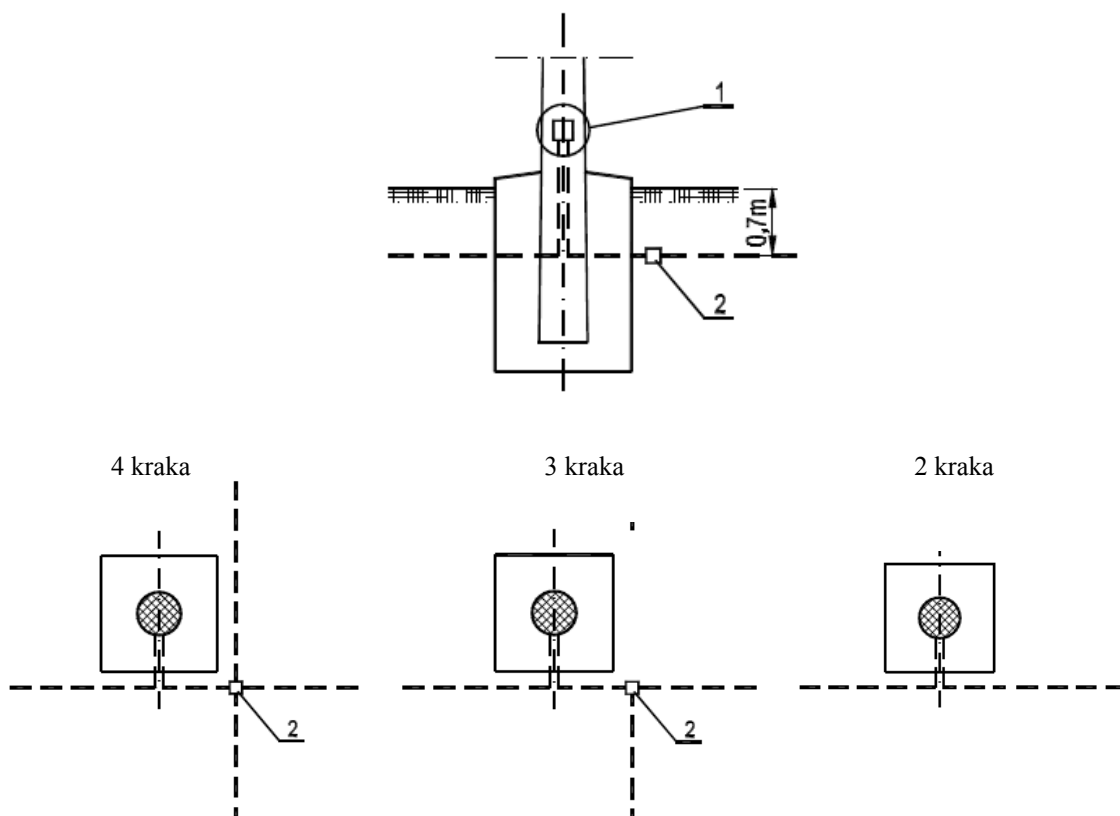
Zaštitno uže u distribucijskim mrežama stavlja se na 35(30) kV dalekovode, dok se u mrežama 10(20) kV ne koristi.

Uzemljivač odnosno uzemljenje u užem smislu ima zadatak da uspostavi galvansku vezu sa zemljom uz minimalni prijelazni otpor. Za uzemljenje stupova u distribucijskoj mreži koriste se trakasti uzemljivači – bakreno uže ili pocinčana željezna traka. Najčešće se koriste :

- prstenasti uzemljivači s jednim prstenom ili dva prstena.
- zrakasti uzemljivači s 2-4 kraka



Slika 3-7 Prstenasti uzemljivač distribucijskog dalekovodnog stupa



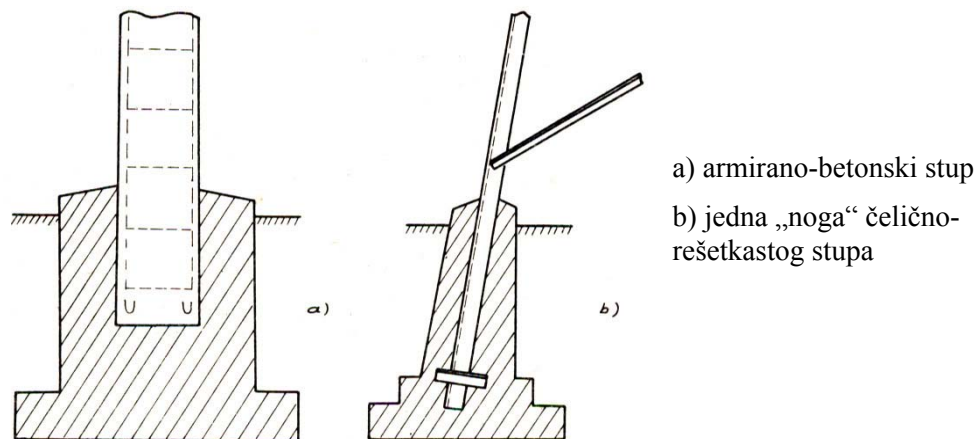
Slika 3-8 Zrakasti uzemljivač distribucijskog dalekovodnog stupa

Temelji

Uloga je temelja da sve sile sa stupa prenesu na tlo. Pri tome temelji mogu biti napregnuti vertikalno prema dolje (na pritisak), na izvlačenje i na prevrtanje. Oblik i veličina temelja ovisi o vrsti i veličini naprezanja, te o vrsti tla.

Drveni i neki lakši tipovi tvornički proizvedenih armirano – betonskih stupova ukopavaju se neposredno u tlo bez posebnih temelja. Stabilnost stupa se u tom slučaju postiže pomoću dijela stupa koji se ukopava. Da bi se drveni stupovi zaštitili od propadanja u tlu, katkad se temelje pomoću betonskih nogara ili temelja.

Armirano–betonski i čelično–rešetkasti stupovi imaju temelje od nearmiranog ili armiranog betona. Stupovi s više "nogu" (portalni armirano–betonski i svi čelično–rešetkasti stupovi) mogu imati jedan temelj za cijeli stup (monolitni temelj), ili za svaku "nogu" poseban temelj (raščlanjeni temelj).



Slika 3-9 Temelji betonskih i čelično-rešetkastih stupova

3.2 Kabelski vodovi

Osnovni električni parametri kabela su:

- *Nazivni napon U_n* – napon za kojeg je projektirana izolacija kabela.
- *Nazivna struja I_n* – dozvoljeno strujno opterećenje za odgovarajući tip i presjek kabela u nazivnim uvjetima.
- *Dozvoljeno strujno opterećenje kabela I_l* - najveća struja kojom se kabel može trajno opteretiti uvjetovana dozvoljenim zagrijavanjem kabela s obzirom na stvarne uvjete polaganja (mjesto, okolina, razmak, blizina ostalih kabela, temperatura okoline...).
- *Radni otpor, induktivitet i kapacitet kabela.*

Prednosti kabela u odnosu na nadzemne vodove su:

- nema vizualne degradacije prostora, osim prilikom instalacije kabela,
- imaju veću pogonsku pouzdanost zbog činjenice da nisu izloženi udarima gromova i ostalim atmosferskim utjecajima,
- zaštićeni su od namjernog uništavanja.

Nedostaci kabela u odnosu na nadzemne vodove su:

- najčešće daleko veće cijene u odnosu na cijenu dalekovoda,
- u slučaju kvara koji može nastupiti negdje na kabelu, teže je locirati mjesto kvara, a potrebno je i daleko više vremena za uklanjanje kvara.

Osnovni djelovi kabela su fazni vodič, poluvodljivi sloj, izolacija, ispuna, vodljivi zaslon (plašt) i vanjski omotač. Ovisno o izvedbi i namjeni, mogući su i dodatni djelovi i eventualno izostanak nekog nabrojenog dijela (npr. vodljivi zaslon).

Fazni vodiči se izrađuju u vidu užeta. Konstrukcija užeta slična je kao kod zračnih vodova. Materijali iz kojih se izrađuju fazni vodiči su bakar i aluminij.

Izolacija kabela dolazi iznad faznog vodiča. Danas se uglavnom radi o krutoj izolaciji (jedna od varijanti je i izolacija plinom ili uljem). Najčešće korišteni materijal za izradu krute izolacije kabela danas je umreženi polietilen.

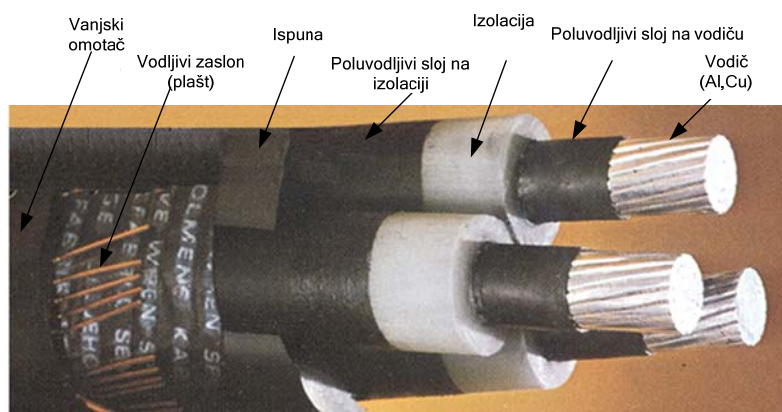
Vodljivi plašt se nalazi iznad izolacije kabela. On se najčešće radi kao:

- omot iz okruglih bakrenih žica omotanih helokoidno, preko kojih je također omotana u suprotnom smjeru tanka bakrena traka
- dvije bakrene trake omotane helokoidno u suprotnim smjerovima.

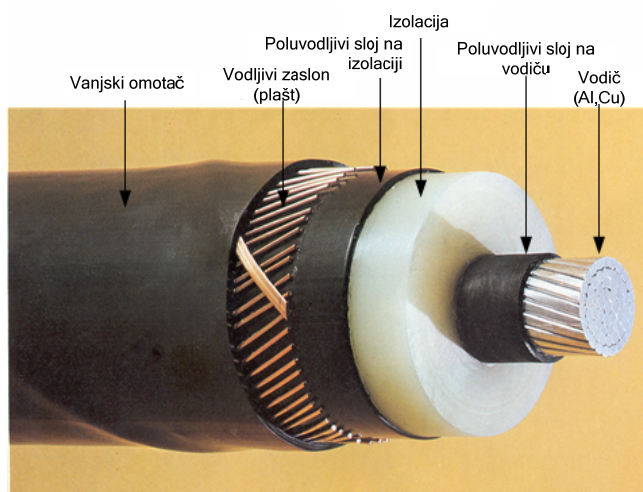
Iznad vodljivog plašta kabela postavlja se vanjski omotač. Obično je izrađen iz nekog izolacijskog materijala, primjerice PVC-a ili običnog polietilena, a služi za zaštitu kabela od vanjskih utjecaja (mehanička oštećenja, vlaga...).

Kabeli se prema izvedbi mogu podijeliti na:

- Trožilni (višežilni) kabel – u jednom kabelu ugrađena su tri (ili više) fazna vodiča, međusobno izolirana.
- Jednožilni kabel – u kabelu se nalazi jedan fazni vodič, a trofazni sustav onda čine tri jednožilna kabela.



Slika 3-10 Trožilni kabel



Slika 3-11 Jednožilni kabel

Prema mjestu polaganja kabeli se dijele na:

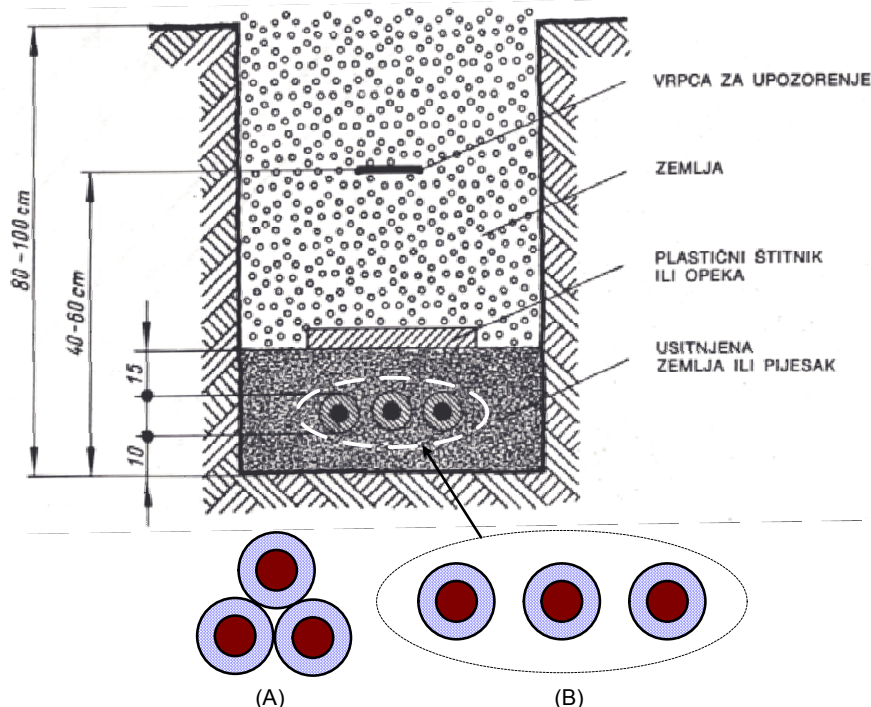
- Podzemni kabeli
- Podmorski kabeli
- Zračni kabeli

Podzemni kabeli

Podzemni kabeli se polažu u kabelaške rovove. Polaganje kabela i njegovo zatrpavanje mora biti pažljivo provedeno. Oblikuje se tzv. kabelaška posteljica od sitno zrnastog materijala (nula). Bitan je materijal koji dobro odvodi toplinu (važno je zbog odvođenja topline iz kabela, što se mora kontrolirati termičkim proračunom zagrijavanja kabela).

Jednožilni kabeli se polažu u rovove na jedan od slijedećih načina:

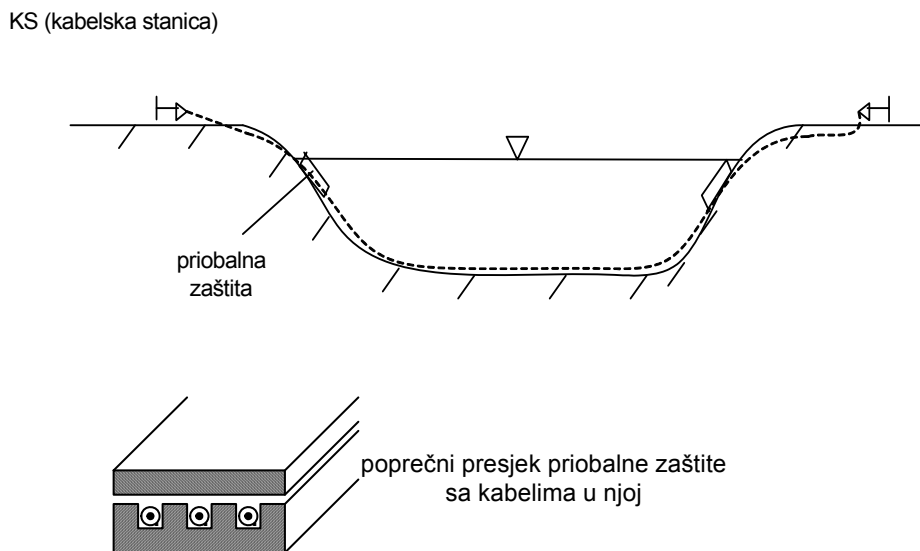
- *Polaganje u trokutni spoj* znači da se tri jednožilna kabela međusobno dodiruju (vezuju se vrpcom), zbog čega se povećava toplinsko opterećenje odnosno djelomično se smanjuje prijenosna moć kabela.
- *Polaganje u ravnini* znači da je svaki jednožilni kabel udaljen od drugog npr. 20-tak cm, pa su zbog većih udaljenosti kabeli manje toplinski opterećeni, a prijenosna moć kabela je nešto veća, ali se zauzima veći prostor, tj. potrebna je veća širina kabelaškog rova.



Slika 3-12 Kabelaški rov

Podmorski kabeli

Podmorski kabeli se polažu na dnu mora (pomoću posebnih brodova), redovito kao tri jednožilna kabela s većim razmakom između pojedinih kabela da se eventualno mehaničko oštećenje (npr. brodska sidra) ograniči samo na jedan kabel (popravak podmorskog kabela je vrlo skup...). Dijelovi podmorskog kabela na mjestima ulaza i izlaza iz mora su najviše izloženi djelovanju morske vode (abraziji – rad valova). Stoga se ti dijelovi kabela postavljaju u tzv. priobalnu zaštitu. Ona se sastoji iz betonskih blokova sa žljebovima u kojima se postavljaju kabeli.

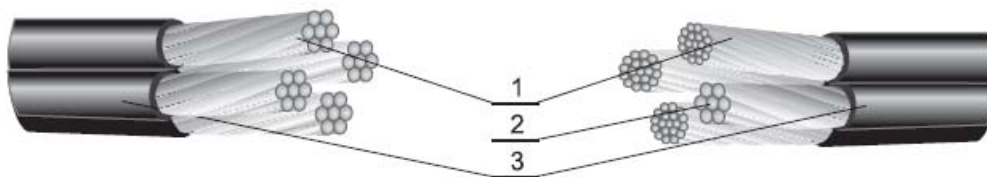


Slika 3-13 Polaganje podmorskog kabela

Zračni kabeli koriste se u specijalnim slučajevima, npr. u rudnicima, tunelima i sl., gdje se postavljaju na kabelske police. Specijalni tip zračnog kabela je samonosivi kabelski snop.

Samonosivi kabelski snop

U niskonaponskim distribucijskim mrežama, za niskonaponske vodove i nadzemne kućne priključke danas se najčešće koristi tzv. samonosivi kabelski snop (SKS) - izolirani zračni vodič. Fazni vodič se izrađuje od kompaktiranog aluminijskog užeta presjeka 16,25,35,50,70 mm², nulti vodič od legure ALMg presjeka cca. 50 i 70 mm², a izolacija je najčešće XLPE.



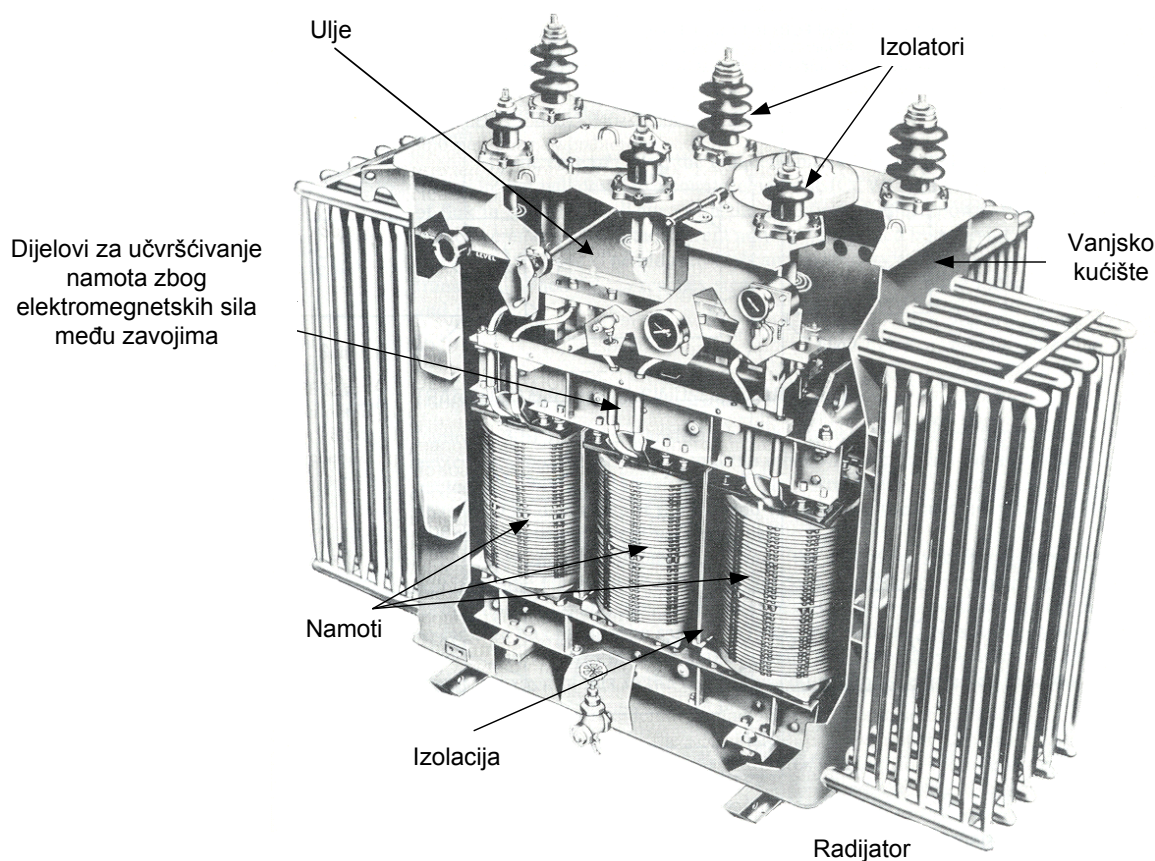
1. Fazni vodič 2. Nul vodič 3. Izolacija

Slika 3-14 Samonosivi kabelski snop

3.3 Transformatori

Osnovni dijelovi transformatora su:

- *Željezna jezgra* – izgrađena od željeznih limova
- *Primarni / sekundarni / (tercijarni) namot* – izgrađeni od zavoja bakrene žice.
- *Izolacija* - ima ulogu izoliranja zavoja iste faze, između različitih namota te između namota i kućišta transformatora.
- *Kućište transformatora* – je ispunjeno uljem (kod uljnih transformatora) koje ima svrhu izolacije te hlađenja namotaja.
- *Dijelovi za učvršćivanje* – služe za učvršćivanje namota zbog pojave odbojnih sila među zavojima namota.
- *Rashladni sustav transformatora* – hladi transformator koji se zagrijava zbog toplinskih gubitaka u bakru i željezu transformatora. Transformatori su najčešće hlađeni zrakom i uljem.



(Napomena: željezna jezgra se nalazi ispod namota i dijelova za učvršćenje, pa nije vidljiva na slici)

Slika 3-15 Dijelovi transformatora

S obzirom na vrstu primjene, transformatori se mogu podijeliti na:

1. *Energetske:*

- Blok transformatori – koriste se za spoj generatora s električnom mrežom (s generatorske strane je niži napon)
- Mrežni transformatori – koriste se za povezivanje naponskih nivoa u prijenosnoj mreži ili prijenosne i distribucijske mreže: 400/220 kV, 400/110 kV, 220/110 kV, 110/35(30)(20)(10) kV
- Distribucijski transformatori – koriste se za povezivanje naponskih nivoa u distribucijskoj mreži: 35(30)/10(20) kV, 35(30)/0.4 kV, 10(20)/0.4 kV

2. Mjerne:

- *Naponski* – služe za snižavanje napona do razine (npr. napon 100V) pri kojoj se napon može mjeriti konvencionalnim mjernim uređajima. Sekundar takvih transformatora je slabo opterećen jer su na njega uglavnom spojeni različiti releji i mjerni uređaji za mjerenje napona.
- *Strujni* - služe za snižavanje struje do razine (npr. 1A ili 5A) pri kojoj se struja može mjeriti konvencionalnim mjernim uređajima. Sekundar takvih transformatora je slabo opterećen jer su na njega uglavnom spojeni različiti releji i mjerni uređaji za mjerenje struje.

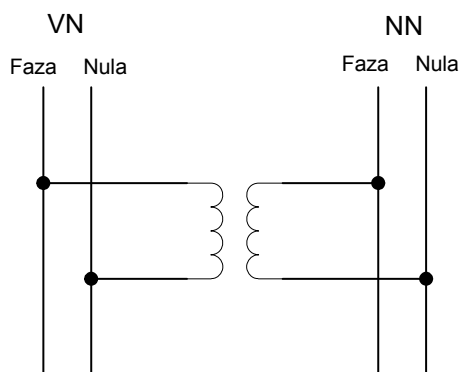
3. Specijalne namjene (npr. transformatori za zavarivanje, transformatori za pretvaračke pogone...)

S obzirom na broj faza, transformatori se mogu podijeliti na:

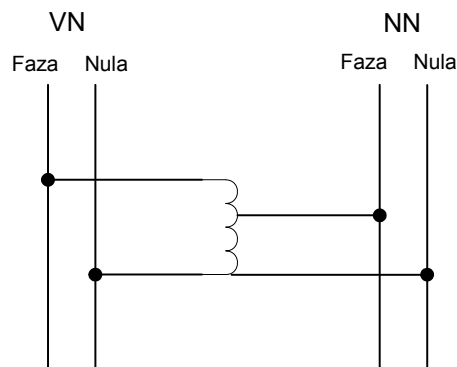
1. **Jednofazni** - transformiraju napon/struju samo jedne faze. Za transformaciju trofaznog napona/struje, koristi se kombinacija tri jednofazne jedinice. Za potrebe trofazne transformacije potrebno je utrošiti znatno više materijala (željeznih limova) nego što je to slučaj kod trofaznih izvedbi transformatora.
2. **Trofazni** – transformiraju napon/struju trofaznog sustava. U slučaju kvara na transformatoru, potrebno je zamijeniti čitavu jedinicu. S obzirom na broj i vrstu namota, trofazni transformatori se mogu podijeliti na:
 - *Dvonamotni* – imaju dvije naponske razine.
 - *Tronamotni* – imaju tri naponske razine.
 - *Autotransformatori* – se još nazivaju transformatorima u štednom spoju (zbog uštede bakra u takvim izvedbama), a imaju samo jedan namot za svaku fazu (na jednoj strani se koriste svi namoti, a na drugoj strani samo dio namota čime se postiže željeni prijenosni omjer).
3. **Višefazni** – transformiraju napon/struju višefaznih sustava.

Vrste transformatora s obzirom na vezu među namotima su:

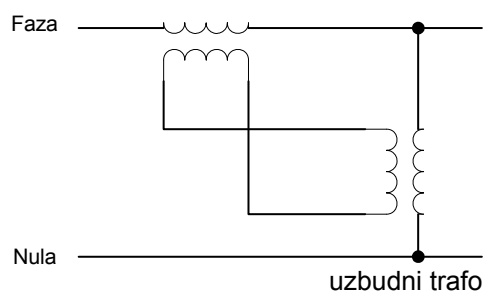
1. klasični paralelni transformator



2. Autotransformator



3. Booster transformator (transformator za poprečnu regulaciju napona)



Slika 3-16 Vrste transformatora s obzirom na vezu među namotima

Nazivne veličine dvonamotnih distribucijskih transformatora su:

- Nazivni primarni/sekundarni napon U_{1n}/U_{2n} (kV)
- Nazivna primarna/sekundarna struja I_{1n}/I_{2n} (A)
- Nazivna snaga S_n (MVA)
- Napon kratkog spoja u_k (%)
- Gubici praznog hoda P_k i gubici kratkog spoja P_o (kW)
- Struja praznog hoda i_o (%)

Prijenosni odnos energetskog transformatora je:

$$p = \frac{U_{n1}}{U_{n2}}$$

Iz nazivnih podataka transformatora slijede nazivne struje:

Na višenaponskoj strani:

$$I_{n1} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{n1}}$$

Na niženaponskoj strani :

$$I_{n2} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{n2}}$$

Grupa spoja transformatora definira se na sljedeći način:

- za višenaponske namote spojene u trokut koristi se slovo D, a za niženaponske namote spojene u trokut koristi se malo slovo d
- za višenaponske namote spojene u zvijezdu koristi se slovo Y, a za niženaponske namote spojene u zvijezdu koristi se malo slovo y
- treća varijanta je spoj namota u tzv. cik-cak spoj (obično za sekundar transformatora 10/0.4 kV manje snage), čija je oznaka slovo z

Budući da spoj trokut-zvijezda izaziva fazni pomak između struja i napona u jednom i drugom namotu, zadaje se taj fazni pomak pomoću tzv. satnog broja. Npr., Dy5 – znači da su višenaponski namoti transformatora spojeni u trokut, a niženaponski namoti u zvijezdu, te da struje i naponi na višenaponskoj strani transformatora prethode strujama i naponima na niženaponskoj strani za:

$$5 \times 30^\circ = 150^\circ .$$

Zvjezdšte visokonaponskog namota se označava velikim slovom N, a zvjezdšte niskonaponskog namota se označava malim slovom n. Ako je transformator uzemljen na jednoj ili obje strane, malo ili veliko slovo n stavlja se uz oznaku one strane koja je uzemljena, npr.

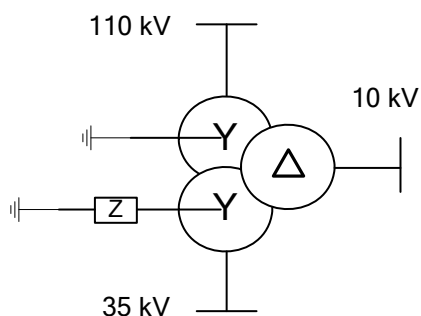
Dyn5 – uzemljenje sekundara

YNd7 – uzemljenje primara

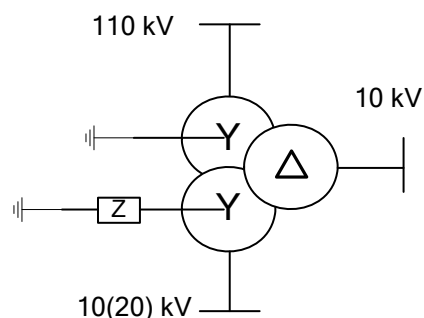
Uzemljenje transformatora

Zvjezdšte transformatora može biti direktno uzemljeno ($Z=0$), neuzemljeno ($Z=\infty$), uzemljeno preko radnog otpora ($Z=R$) ili preko induktivnog otpora ($Z=jX$). Na sljedećim slikama dati su mogući tipovi uzemljenja za neke tipične distribucijske transformatore.

110/35 kV



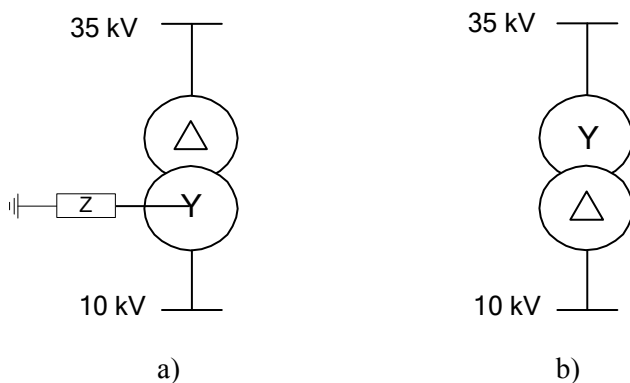
110/10(20) kV



Slika 3-17 Uzemljenje transformatora 110/x kV

110 kV-tna strana je najčešće direktno uzemljena, a sekundar može biti uzemljen preko impedancije iznosa:

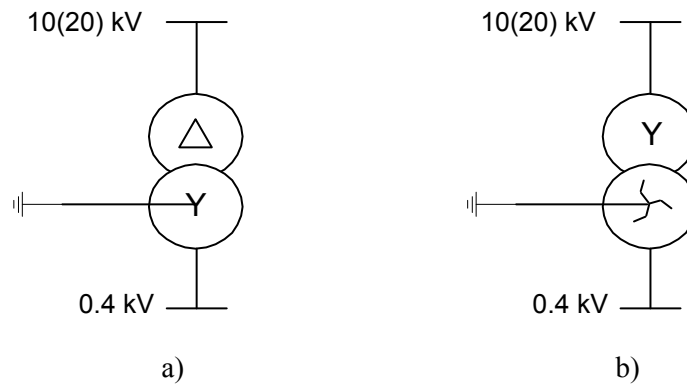
- $Z=\infty$ (neuzemljeno, često u mreži 10 kV, rijetko u mreži 35 kV)
- $Z=R$ (uzemljeno preko otpornika, redovito u mreži 35 kV, ponekad u mreži 10(20) kV)
- $Z=jX$ (uzemljeno preko prigušnice, ponekad u mreži 10(20) kV)



Slika 3-18 Uzemljenje transformatora 35/10 kV

Za spoj transformatora prema varijanti a) vrijedi za impedanciju Z prethodno navedeni slučajevi (neuzemljeno, uzemljeno preko malog otpora ili reaktancije), pri čemu se najčešće koristi varijanta neuzemljene 10 kV strane.

Kod spoja transformatora prema varijanti b) uzemljenje sekundara je moguće samo preko posebnog transformatora ili prigušnice za uzemljenje.



Slika 3-19 Uzemljenje transformatora 10(20)/0.4 kV

Kod transformatora 10/0.4 kV, niskonaponska strana je uvijek uzemljena, osim u specifičnim slučajevima kad je izolirana.

Regulacija napona preko energetskih transformatora može se vršiti na dva načina:

- pod naponom (za transformatore prijenosnog omjera 110/X kV)
- bez napona (za transformatore prijenosnog omjera 35/10 i 10/0.4 kV)

Automatska regulacija pod naponom izvodi se na strani višeg napona (promjenom broja namota VN strane), na osnovu referentnog napona kojeg je potrebno održavati na strani nižeg napona.

Napon se mjeri i uspoređuje sa željenim referentnim naponom. U slučaju odstupanja izmjenog i referentnog napona, automatika djeluje na regulacijsku preklopku na VN strani transformatora. Promjena položaja regulacijske preklopke vrši se ako je

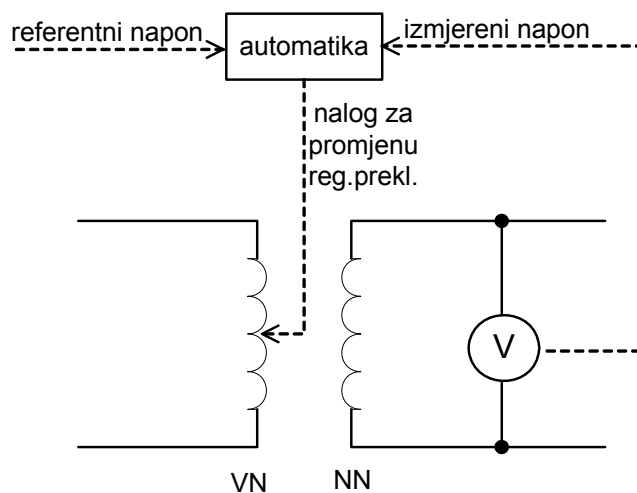
$$|V_{izmj} - V_{ref}| > \Delta V_{reag}$$

gdje su:

V_{izmj} – mjereni napon

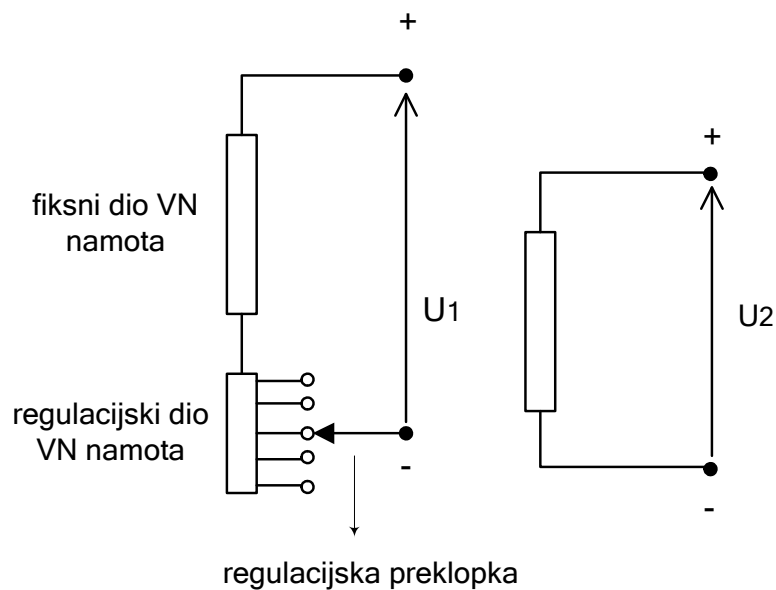
V_{ref} – referentni napon

ΔV_{reag} – razlika napona na koju reagira automatika



Slika 3-20 Princip rada automatske regulacije napona na transformatoru

Regulaciju prijenosnog omjera transformatora omogućava posebno izvedena primarna strana namota na fiksni i regulacijski dio. Regulacijskom preklopkom za čiji pomak daje nalog gore opisana automatika, određuje se pogonski prijenosni omjer transformatora kojim se održava referentni napon.



Slika 3-21 Izvedba namota regulacijskog transformatoru

Transformatori 110/35/10 kV se obično izvodi u nazivnom prijenosnom omjeru $110 \pm 15 \times 1.5\%$ / 36.75 / 10.5 kV, sa automatskom regulacijom.

Transformatori 35/10 kV se obično izvode sa prijenosnim omjerom 35/10.5 kV, sa beznaponskom regulacijom $\pm 2 \times 2.5\%$.

Transformatori 10/0.4 kV se obično izvode sa prijenosnim omjerom 10/0.4 kV, sa beznaponskom regulacijom $\pm 2 \times 2.5\%$.

3.4 Potrošači

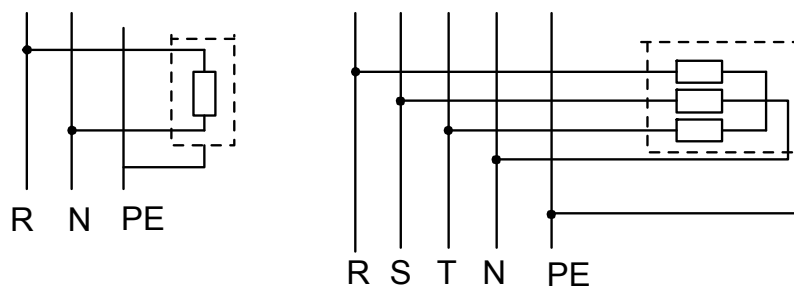
Pod potrošačem električne energije podrazumijeva se grupa trošila (električnih uređaja) koji su na odgovarajući način priključeni na prijenosnu ili distribucijsku mrežu, odakle uzimaju potrebnu električnu energiju za svoj rad. Potrošačem u širem smislu podrazumijeva se i bilo kakva povezana grupa manjih potrošača. Npr. sve krajnje potrošače u niskonaponskoj mreži koji se napajaju iz jedne trafostanice 10/0.4 kV, 10 kV mreža „vidi“ kao jedan potrošač priključen na TS 10/0.4 kV.

Potrošači se razlikuju prema:

- načinu priključka na mrežu (trofazni, dvofazni, jednofazni priključak),
- naponskom nivou preko kojeg su priključeni na električnu mrežu:
 - velepotrošači priključeni direktno na prijenosnu mrežu,
 - industrijski potrošači, uslužne ustanove i ostali veći potrošači priključeni na srednjenaponsku mrežu (10,20,35 kV),
 - niskonaponski potrošači (kućanstva, obrti, usluge, rasvjeta itd.).
- tehničkim karakteristikama,
- tarifama (ugovorima) po kojima plaćaju energiju (radnu i jalovu), te snagu.

3.4.1 Vrste i karakteristike pojedinačnih trošila

Pojedinačne trošila mogu biti jednofazna ili trofazna.



Slika 3-22 Jednofazno i trofazno trošilo

Osnovne vrste pojedinačnih trošila su:

- termička trošila,
- rasvjeta,
- elektromotori,
- elektronički uređaji.

U specijalna trošila spadaju:

- elektrolučne peći i uređaji za zavarivanje
- veliki asinkroni motori,

- veliki pretvarači,
- elektrovučna postrojenja,
- itd...

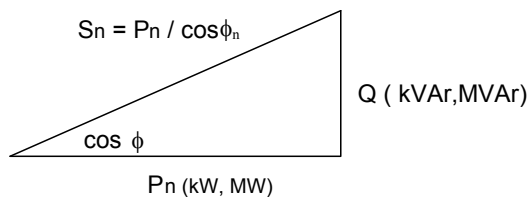
Nazivni podaci svakog trošila su:

P_n – nazivna snaga (trofazna ili jednofazna)

$\cos \varphi_n$ – nazivni faktor snage

U_n – nazivni napon

Iz nazivnih podataka i trokuta snaga slijede vrijednosti za nazivnu struju trošila:



$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cos \varphi_n U_n} \quad (\text{za trofazno trošilo})$$

$$I_n = \frac{P_n}{\cos \varphi_n V_n} \quad (\text{za jednofazno trošilo})$$

gdje je:

U_n – nazivni linijski napon na koji je priključeno trošilo.

V_n – nazivni fazni napon na koji je priključeno trošilo.

3.4.2 Dnevni dijagram opterećenja i varijacije opterećenja

Dnevni dijagram opterećenja (potrošnje) predstavlja promjenu snage nekog potrošača tijekom dana pri čemu snaga (opterećenje) u pojedinom trenutku ovisi o brojnim faktorima, kao što su:

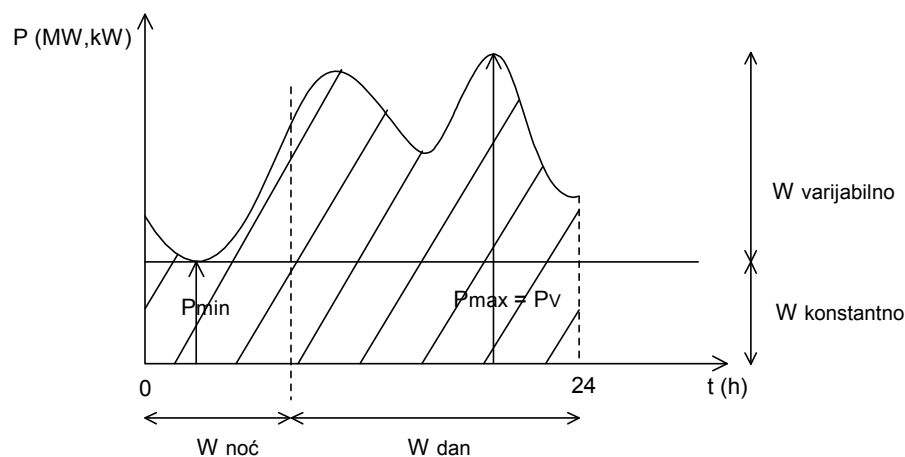
- struktura potrošača/trošila,
- dobu dana/godine,
- klimatski uvjeti (geografska lokacija), itd...

Dnevni dijagram opterećenja se najčešće odnosi na potrošnju koja je pridružena jednoj trafostanici (tj. svih potrošača koji se napajaju iz trafostanice), nekog šireg potrošačkog područja (npr. jedne županije, regije) ili EES-a u cjelini.

Šrafirana površina ispod krivulje predstavlja ukupnu potrošenu energiju tijekom dana:

$$W = \int_0^{24} P(t) \cdot dt$$

Donji dio, ograničen minimalnom radnom snagom, predstavlja tzv. konstantnu energiju (W_{konst}), a gornji dio predstavlja tzv. varijabilnu energiju (W_{var}). Dijagram se na drugi način može podijeliti na noćnu energiju ($W_{\text{noć}}$) i dnevnu energiju (W_{dan}). Maksimalna radna snaga P_{max} (odnosno vršna snaga P_v) je najveća snaga tijekom dana.



Slika 3-23 Dnevni dijagram opterećenja

Veličine karakteristične za dnevni dijagram opterećenja su:

- omjer P_{\max} / P_{\min}
- faktor opterećenja (m):

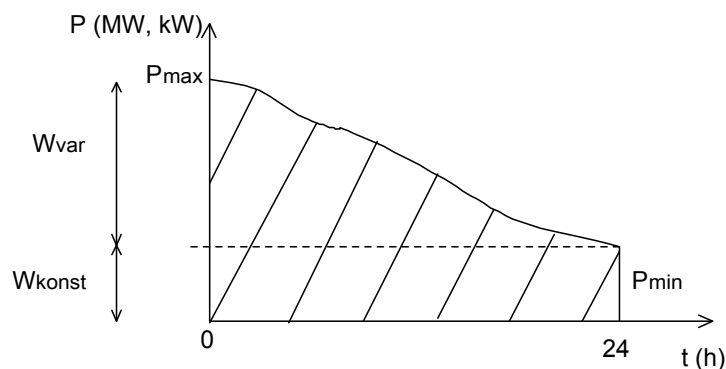
$$m = \frac{W_{\text{uk}}}{P_{\max} \times T}, \text{ gdje je: } W_{\text{uk}} - \text{ukupno potrošena energija tijekom dana}$$

T – ukupno vrijeme (24 h)

- upotrebno vrijeme (T_u):

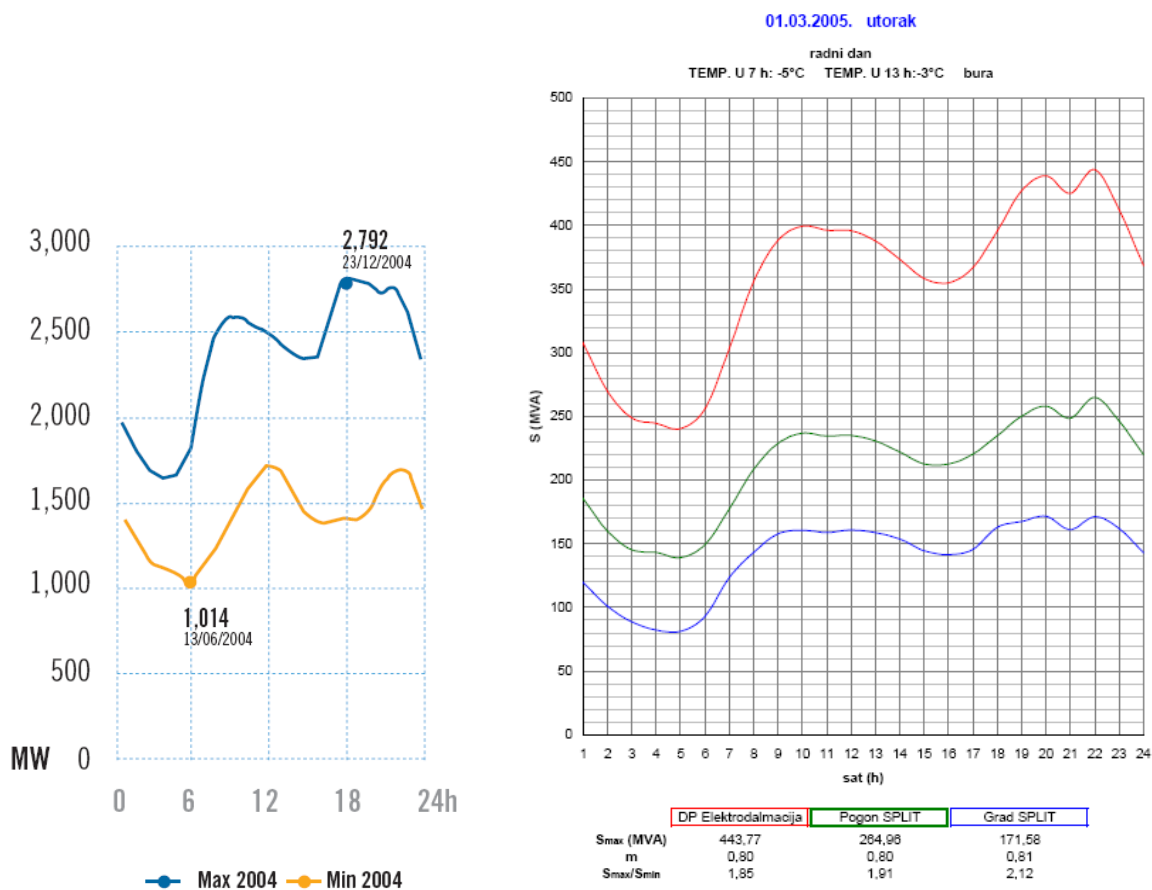
$$T_u = \frac{W_{\text{uk}}}{P_{\max}}$$

Krivulja trajanja opterećenja dobije se iz dnevnog dijagrama slaganjem snaga po veličini.

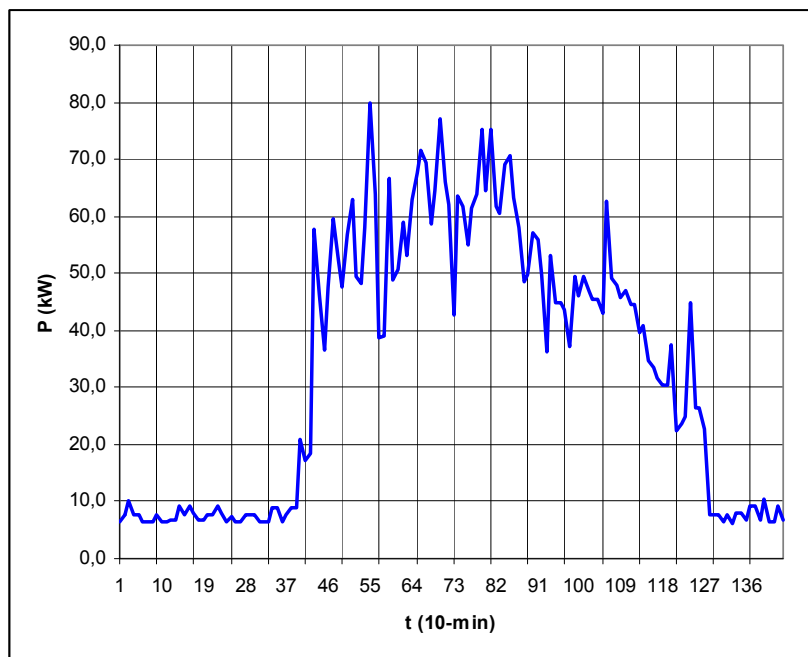


Slika 3-24 Krivulja trajanja opterećenja

Zahtjevi za električnom energijom od strane potrošača stalno se mijenjaju tokom jednog dana, tjedna, mjeseca, sezone, godine. Varijacije tijekom dana prvenstveno su vezane za noć/dan, dok su varijacije tijekom tjedna vezane za radni/neradni dan. Mjesečno odnosno sezonske varijacije potrošnje prvenstveno ovise o električnoj energiji koja se koristi za grijanje i hlađenje, te rasvjetu. Potrošnja većine industrijskih potrošača je neovisna o sezoni, dok je potrošnja električne energije za rasvjetu, grijanje ili pak kondicioniranje zraka u znatnoj mjeri ovisna o godišnjem dobu.



Slika 3-25 Primjer - dnevni dijagram opterećenja EES-a Hrvatske za 2004.g. (minimalni, maksimalni), dnevni dijagram opterećenja za DP Elektrodalmaciju za 2005.g. (dan s najvećom potrošnjom)

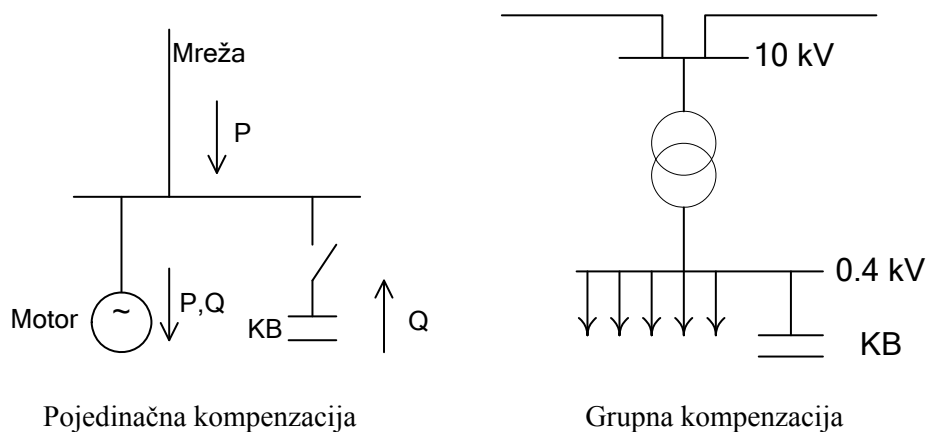


Slika 3-26 Primjer - dnevni dijagram opterećenja restorana FESB 15.1.2008. (jedan izvod NN mreže napajane iz TS 10/0.4 kV FESB), 10-minutna registracija opterećenja

3.5 Ostali elementi distribucijske mreže (kondenzatorske baterije i prigušnice)

Kondenzatorske baterije u distribucijskim mrežama služe za kompenzaciju jalove snage (smanjenje jalove snage koju potrošač uzima iz mreže) i za poboljšanje naponskih prilika. Spajaju se paralelno na mrežu. U ovisnosti o konzumu razlikuje se:

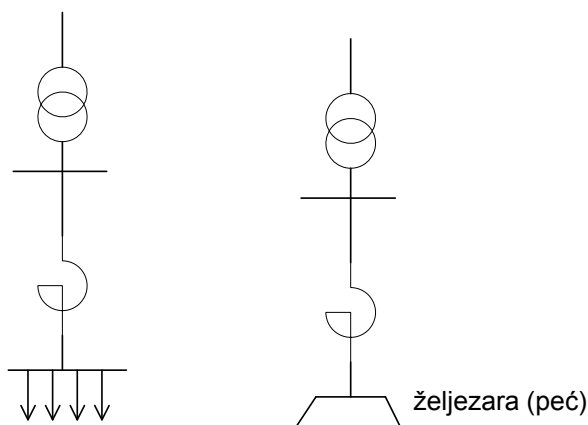
- o pojedinačna kompenzacija, tj. kompenzacija jalove snage pojedinačnog trošila
- o grupna kompenzacija, tj. kompenzacija jalove snage grupe trošila



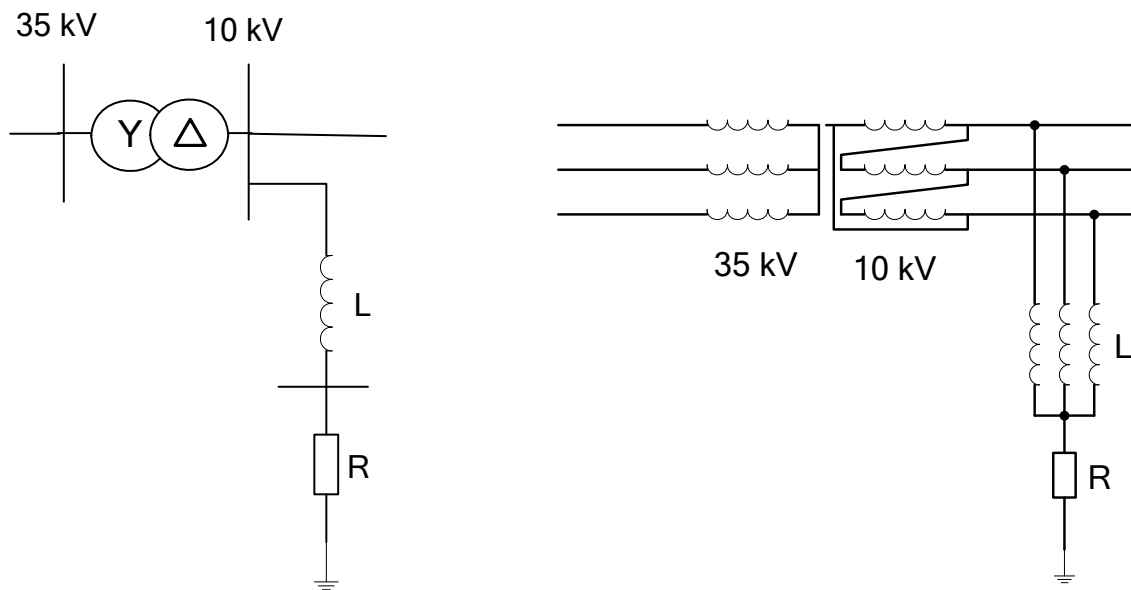
Slika 3-27 Kompenzacija jalove snage pomoću kondenzatorskih baterija

U distributivnim mrežama razlikuju se dvije vrste prigušnica (obje se vrlo rijetko koriste...):

- o serijske prigušnice – koriste se za smanjenje struje kratkog spoja
- o paralelna prigušnica – koristi se za uzemljenje nul točke kada treba izvesti umjetno zvjezditište



Slika 3-28 Serijska prigušnica



Slika 3-29 Paralelna prigušnica za uzemljenje (jednopolna i trolna shema)

4 ELEKTRIČKI PARAMETRI I NADOMJESNE SCHEME ELEMENATA DISTRIBUCIJSKIH MREŽA

4.1 Sustav simetričnih komponentata

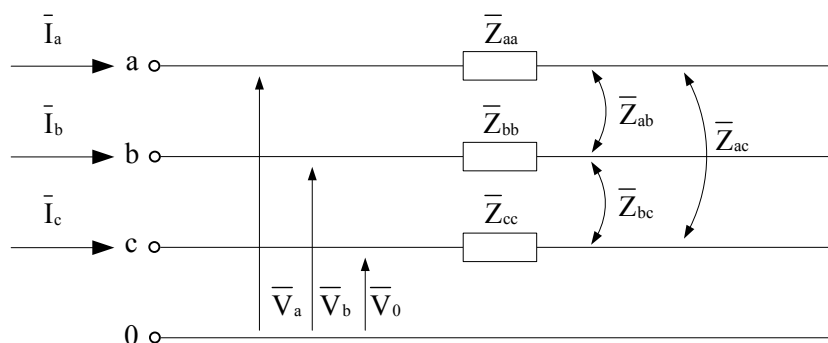
Simetrični trofazni sustav ili općenito simetrični višefazni sustav može se promatrati kao jednofazni sustav i tako pojednostavniti proračun. Pretpostavke da su impedancije, naponi i struje simetrični ne moraju uvijek biti ispunjene, pa se mora računati s nesimetričnim impedancijama i admitancijama, kojima su posljedica nesimetrični naponi i struje iako su proizvedene EMS-e generatora simetrične. Tada se proračun mora provesti na trofaznoj nadomjesnoj shemi. Ako se još tome dodaju međusobni utjecaji kod vodova, dobiju se vrlo složeni matematički izrazi.

Ako se u mreži pojavljuju nesimetrije, moguće je primjeniti matematičku transformaciju originalnog sustava (napona, struja, impedancija) u neki drugi sustav komponentata. Pri tome se struje, naponi, impedancije i snage pretvaraju u odgovarajuće veličine novog sustava komponentata po utvrđenim pravilima transformacije. Dobiju se nove jednadžbe, kojima odgovaraju nadomjesne sheme komponentata. Račun se provodi u sustavu komponentata, a rezultati se vraćaju natrag u originalni, odnosno prirodni sustav.

Transformacija originalnog sustava ima smisla ako se dobije shema prikladnija za proračun. To mogu biti npr. međusobno nezavisne jednofazne sheme komponentata, koje su međusobno vezane na mjestu nesimetrije.

Originalni sustav je u osnovi također sustav komponentata, jer se sastoji od faza kao komponentata. Trofazni sustav stoga može biti označen kao **abc** ili **RST** sustav komponentata. Tada prijelaz u sustav komponentata ne znači ništa drugo nego transformaciju jednog sustava komponentata u drugi.

Na slici 4-1 prikazan je trofazni sustav s induktivnom vezom među fazama.



Slika 4-1 Struje, naponi i impedancije u trofaznom sustavu

Odnosi napona i struje iskazani jednadžbama :

$$\bar{V}_a = \bar{Z}_{aa} \bar{I}_a + \bar{Z}_{ab} \bar{I}_b + \bar{Z}_{ac} \bar{I}_c$$

$$\bar{V}_b = \bar{Z}_{ba} \bar{I}_a + \bar{Z}_{bb} \bar{I}_b + \bar{Z}_{bc} \bar{I}_c$$

$$\bar{V}_c = \bar{Z}_{ca} \bar{I}_a + \bar{Z}_{cb} \bar{I}_b + \bar{Z}_{cc} \bar{I}_c$$

ili

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{ac} \\ \bar{Z}_{ba} & \bar{Z}_{bb} & \bar{Z}_{bc} \\ \bar{Z}_{ca} & \bar{Z}_{cb} & \bar{Z}_{cc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix}$$

ili

$$\begin{bmatrix} \bar{V}^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}^{abc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}^{abc} \end{bmatrix}$$

Ovakav sustav ne možemo prikazati jednofazno. Transformiramo ga zato u neki drugi sustav komponenata, pri čemu je osnovni cilj oslobađanje međusobnog utjecaja s obzirom na parametre $\begin{bmatrix} \bar{Z}^{abc} \end{bmatrix}$. U proračunima elektroenergetskih mreža za takvu namjenu najpogodnija je transformacija u sustav simetričnih komponenata.

4.1.1 Transformacija u sustav simetričnih komponenata

Neka su zadana tri kompleksna vektora napona: \bar{V}_a , \bar{V}_b , \bar{V}_c . Općenito se svaki od ova tri vektora može rastaviti na po tri nova vektora (ukupno 9 vektora):

$$\bar{V}_a = \bar{V}_{a0} + \bar{V}_{a1} + \bar{V}_{a2}$$

$$\bar{V}_b = \bar{V}_{b0} + \bar{V}_{b1} + \bar{V}_{b2}$$

$$\bar{V}_c = \bar{V}_{c0} + \bar{V}_{c1} + \bar{V}_{c2}$$

Ako uzmemo da novi vektori zadovoljavaju slijedeće uvjete:

$$\bar{V}_{a0} = \bar{V}_{b0} = \bar{V}_{c0} = \bar{V}_0$$

$$\bar{V}_{a1} = \bar{V}_1 \quad \bar{V}_{a2} = \bar{V}_2$$

$$\bar{V}_{b1} = a^2 \bar{V}_1 \quad \bar{V}_{b2} = a \bar{V}_2$$

$$\bar{V}_{c1} = a \bar{V}_1 \quad \bar{V}_{c2} = a^2 \bar{V}_2$$

gdje je

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

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

slijedi:

$$\bar{V}_a = \bar{V}_0 + \bar{V}_1 + \bar{V}_2$$

$$\bar{V}_b = \bar{V}_0 + a^2 \bar{V}_1 + a \bar{V}_2$$

$$\bar{V}_c = \bar{V}_0 + a \bar{V}_1 + a^2 \bar{V}_2$$

što znači da su svi fazni naponi izraženi s kombinacijama 3 nova vektora (mogu se pripisati fazi a). U matričnom obliku je:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix}$$

ili

$$\begin{bmatrix} \bar{V}^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}^{012} \end{bmatrix}$$

Matrica transformacije $\begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix}$ prevodi sustav simetričnih komponenata u originalni sustav. Ako prethodnu jednadžbu pomnožimo sa $\begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix}^{-1}$ s lijeve strane, dobijemo:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}^{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{V}^{abc} \end{bmatrix}$$

ili

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix}$$

Matrica transformacije $\begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix}^{-1}$ prevodi originalni sustav u sustav simetričnih komponenata.

Dakle, umjesto s tri fazna napona $\bar{V}_a, \bar{V}_b, \bar{V}_c$, računamo s tri nova napona $\bar{V}_0, \bar{V}_1, \bar{V}_2$, koji se nazivaju nulti, direktni i inverzni napon.

Transformacija struje identična je transformaciji napona.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}^{012} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}^{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{I}^{abc} \end{bmatrix}$$

Dakle, i za struje, umjesto s tri fazne struje $\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$, računamo s tri nove struje $\bar{I}_0, \bar{I}_1, \bar{I}_2$, koje se nazivaju nulta, direktna i inverzna struja.

Matričnu jednadžbu koja definira odnose napona i struje u originalnom sustavu (slika 10-1) izrazimo simetričnim komponentama:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}^{abc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}^{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}^{012} \end{bmatrix} \quad / \begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}^{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Z}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}^{012} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}^{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}^{012} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}^{012} \end{bmatrix}$$

Dakle, matrica impedancija u sustavu simetričnih komponenata je :

$$\begin{bmatrix} \bar{Z}^{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Z}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} \bar{Z}^{012} \end{bmatrix}$ je matrica vlastitih i međusobnih impedancija u sustavu simetričnih komponenata, koja daje odnose simetričnih komponenata napona sa simetričnim komponentama struja. Jednadžbe glase:

$$\bar{V}_0 = \bar{Z}_{00}\bar{I}_0 + \bar{Z}_{01}\bar{I}_1 + \bar{Z}_{02}\bar{I}_2$$

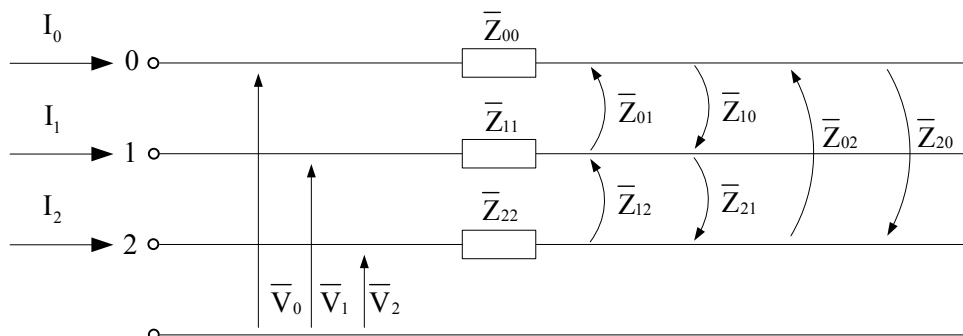
$$\bar{V}_1 = \bar{Z}_{10}\bar{I}_0 + \bar{Z}_{11}\bar{I}_1 + \bar{Z}_{12}\bar{I}_2$$

$$\bar{V}_2 = \bar{Z}_{20}\bar{I}_0 + \bar{Z}_{21}\bar{I}_1 + \bar{Z}_{22}\bar{I}_2$$

ili

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{00} & \bar{Z}_{01} & \bar{Z}_{02} \\ \bar{Z}_{10} & \bar{Z}_{11} & \bar{Z}_{12} \\ \bar{Z}_{20} & \bar{Z}_{21} & \bar{Z}_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

Matricu $\begin{bmatrix} \bar{Z}^{012} \end{bmatrix}$ prikažimo grabljastim nadomjesnim sklopom prema slici 4-2.



Slika 4-2 Struje, naponi i impedancije u sustavu simetričnih komponenata

4.1.2 Pretvorba matrice impedancija u simetrične komponente

Račun trofaznog sustava u originalu je račun s punim matricama 3x3, tj. postoje vandijagonalni elementi, što ima za posljedicu npr. da za izračun napona u jednoj fazi treba poznavati struje u svim fazama.

Nakon transformacije u simetrične komponente također se dobije matrica impedancije dimenzija 3x3, ali u određenim slučajevima je ona dijagonalna. To ima za posljedicu da se nulti, direktni i inverzni sustav mogu promatrati odvojeno (svaki za sebe jednofazno).

Matrica $\begin{bmatrix} \bar{Z}^{012} \end{bmatrix}$ je dijagonalna tj. vrijedi $\bar{Z}_{01} = \bar{Z}_{02} = \bar{Z}_{10} = \bar{Z}_{12} = \bar{Z}_{20} = \bar{Z}_{21} = 0$ ako je ispunjen uvjet:

$$1) \bar{Z}_{aa} = \bar{Z}_{bb} = \bar{Z}_{cc} = \bar{Z}_s$$

i ako je za dijagonalne članove matrice $\begin{bmatrix} \bar{Z}^{abc} \end{bmatrix}$ ispunjen jedan od slijedeća dva uvjeta:

$$\bar{Z}_{ab} = \bar{Z}_{ac} = \bar{Z}_{bc} = \bar{Z}_m, \text{ tj.}$$

$$2a) \begin{bmatrix} \bar{Z}^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_s & \bar{Z}_m & \bar{Z}_m \\ \bar{Z}_m & \bar{Z}_s & \bar{Z}_m \\ \bar{Z}_m & \bar{Z}_m & \bar{Z}_s \end{bmatrix}$$

$$\bar{Z}_{ab} = \bar{Z}_{ac} = \bar{Z}_{bc} = 0, \text{ tj.}$$

$$2b) \left[\bar{Z}^{abc} \right] = \begin{bmatrix} \bar{Z}_s & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_s & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_s \end{bmatrix}$$

U slučaju 2a) nakon simetrične transformacije dobije se:

$$\left[\bar{Z}^{012} \right] = \left[\bar{S} \right]^{-1} \left[\bar{Z}^{abc} \right] \left[\bar{S} \right] = \left[\bar{S} \right]^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Z}_s & \bar{Z}_m & \bar{Z}_m \\ \bar{Z}_m & \bar{Z}_s & \bar{Z}_m \\ \bar{Z}_m & \bar{Z}_m & \bar{Z}_s \end{bmatrix} \left[\bar{S} \right] = \begin{bmatrix} \bar{Z}_s + 2\bar{Z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_s - \bar{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_s - \bar{Z}_m \end{bmatrix}$$

$$\bar{Z}_0 = \bar{Z}_s + 2\bar{Z}_m$$

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \bar{Z}_s - \bar{Z}_m$$

Slučaj 2a) javlja se kod potpuno prepletenog voda, što znači da se transformacijom u simetrične komponente dobije dijagonalna matrica i da su nulti, direktni i inverzni sustavi međusobno nezavisni. Također, direktna i inverzna impedancija su jednake, što općenito vrijedi za sve „pasivne“ elemente mreže. U slučaju da vod nije prepleten, transformacijom u simetrične komponente neće se dobiti dijagonalna matrica, ali će vandijagonalni elementi kod realnog voda biti vrlo mali (u odnosu na dijagonalne), što znači da se u određenim proračunima mogu zanemariti.

U slučaju 2b) nakon simetrične transformacije dobije se:

$$\left[\bar{Z}^{012} \right] = \left[\bar{S} \right]^{-1} \left[\bar{Z}^{abc} \right] \left[\bar{S} \right] = \left[\bar{S} \right]^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Z}_s & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_s & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_s \end{bmatrix} \left[\bar{S} \right] = \begin{bmatrix} \bar{Z}_s & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_s & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_s \end{bmatrix}$$

$$\bar{Z}_0 = \bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \bar{Z}_s$$

Slučaj 2b) imamo kod transformatora, prigušnica, kondenzatora. Originalna matrica impedancija je dijagonalna, pa je i matrica impedancija u sustavu simetričnih komponenata također dijagonalna i ista kao i original, tj. transformacijom se ništa ne mijenja.

Dakle, u prethodnim primjerima, koji su u redoviti u praksi, dobijemo dijagonalnu matricu impedancija u sustavu simetričnih komponenata, te svaku komponentu možemo promatrati nezavisno:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{V}_0 \\ \Delta \bar{V}_1 \\ \Delta \bar{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \bar{V}_0 = \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_0 \text{ (nulti sustav)}$$

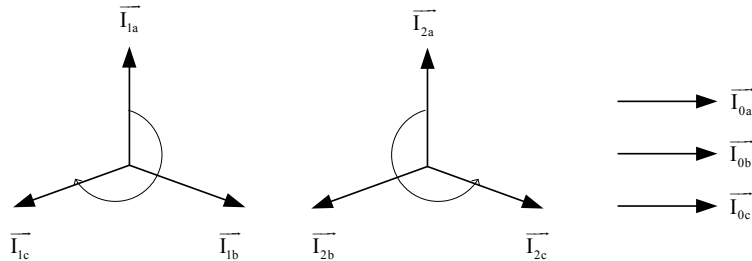
$$\Delta \bar{V}_1 = \bar{Z}_1 \cdot \bar{I}_1 \text{ (direktni sustav)}$$

$$\Delta \bar{V}_2 = \bar{Z}_2 \cdot \bar{I}_2 \text{ (inverzni sustav)}$$

4.1.3 Fizikalno značenje impedancija u sustavu simetričnih komponenata

Fizikalno se simetrične komponente mogu interpretirati na slijedeći način:

- o direktni sistem: trofazni simetrični sistem sa redosljedom faza kao u simetričnom trofaznom sistemu (u smjeru kazaljke na satu)
- o inverzni sistem: trofazni simetrični sistem sa obrnutim redosljedom faza (obrnuto od smjera kazaljke na satu)
- o nulti sistem: istofazni sistem, tj. nema faznog zakreta između napona i struja u fazama



Slika 4-3 Struje u sustavu simetričnih komponenata

Predstavljanjem trofaznog sustava direktnim, inverznim i nultim sustavom moguće je definirati direktnu, inverznu i nultu impedanciju, kako je u prethodnim poglavljima izvedeno. Njihovo fizikalno značenje, a ujedno i način na koji se mogu mjerenjem odrediti je sljedeće:

Impedancija direktnog sustava

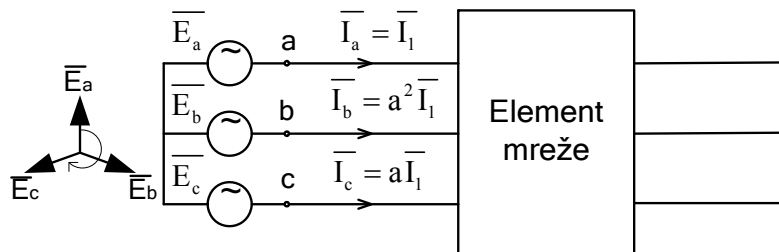
Impedancija direktnog sustava određuje se na način da se na element narine simetrični trofazni sustav napona direktnog redosljeda, oblika:

$$\bar{E}_a = \bar{E}_1, \quad \bar{E}_b = a^2 \bar{E}_1, \quad \bar{E}_c = a \bar{E}_1,$$

a kako za direktni sustav vrijedi (s obzirom da je simetričan!)

$$\bar{I}_{1a} + \bar{I}_{1b} + \bar{I}_{1c} = 0,$$

shema za određivanje direktne impedancije nekog elementa mreže je sljedeća (element mreže je kratko spojen, tako da su struje koje će poteći fazama rezultat samo impedancije elementa mreže, uzorkovane narinutim direktnim naponom) :



Direktnu impedanciju dobijemo kao kvocijent napona i struje jedne faze.

$$\bar{Z}_1 = \frac{\bar{E}_a}{\bar{I}_a} = \frac{\bar{E}_1}{\bar{I}_1},$$

tj. direktnu impedanciju možemo interpretirati kao impedanciju jedne faze elementa mreže koju „vidi” simetričan naponski izvor direktnog redosljeda narinut na taj element mreže.

Impedancija inverznog sustava

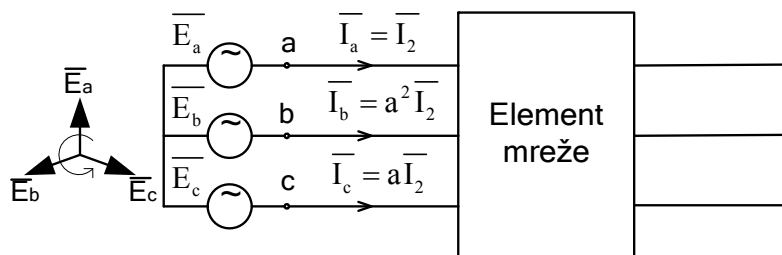
Impedancija inverznog sustava određuje se na način da se na element narine simetrični trofazni sustav napona inverznog (obrnuto) redosljeda, oblika:

$$\overline{E}_a = \overline{E}_2, \quad \overline{E}_b = a\overline{E}_2, \quad \overline{E}_c = a^2\overline{E}_2,$$

a kako za inverzni sustav vrijedi (s obzirom da je simetričan!)

$$\overline{I}_{2a} + \overline{I}_{2b} + \overline{I}_{2c} = 0,$$

shema za određivanje inverzne impedancije nekog elementa mreže je sljedeća (element mreže je kratko spojen, tako da su struje koje će poteći fazama rezultat samo impedancije elementa mreže, uzorkovane narintim inverznim naponom) :



Inverznu impedanciju dobijemo kao kvocijent napona i struje jedne faze.

$$\overline{Z}_2 = \frac{\overline{E}_a}{\overline{I}_a} = \frac{\overline{E}_2}{\overline{I}_2},$$

tj. inverznu impedanciju možemo interpretirati kao impedanciju jedne faze elementa mreže koju „vidi” simetričan naponski izvor inverznog redosljeda narint na taj element mreže.

Impedancija nultog sustava

Impedancija nultog sustava određuje se na način da se na početak elementa narine nulti napon oblika

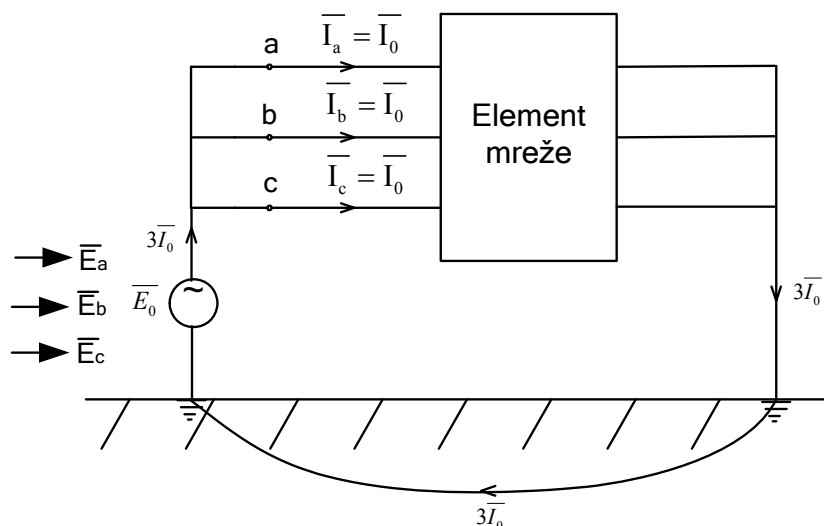
$$\overline{E}_a = \overline{E}_b = \overline{E}_c = \overline{E}_0,$$

tj. isti napon (bez faznog pomaka) u svim fazama.

S obzirom da u ovom slučaju mogu proteći samo istofazne struje, element mreže mora biti uzemljen, tako da će kroz uzemljenje proteći zbroj tri fazne struje, tj. vrijedi:

$$\overline{I}_a + \overline{I}_b + \overline{I}_c = 3\overline{I}_0,$$

Pri čemu je sa $3\overline{I}_0$ označena struja koja odlazi u zemlju.



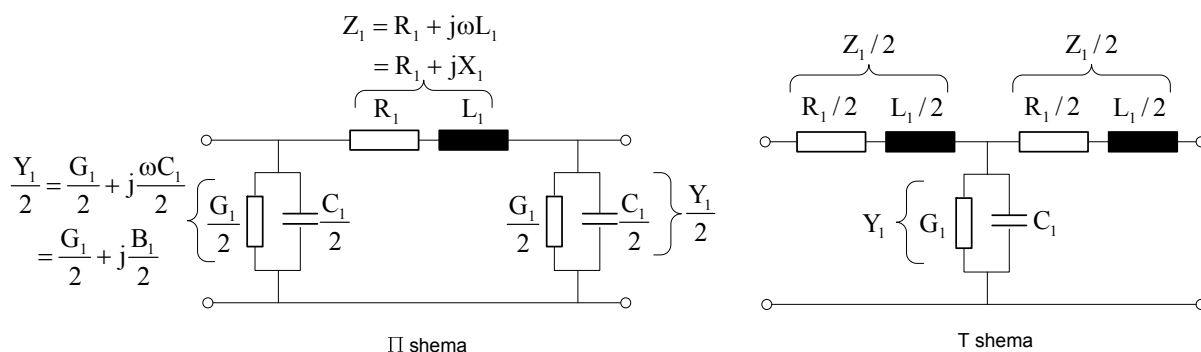
Nultu impedanciju dobijemo kao kvocijent napona i struje jedne faze.

$$\bar{Z}_0 = \frac{\bar{E}_a}{\bar{I}_a} = \frac{\bar{E}_0}{\bar{I}_0},$$

tj. nultu impedanciju možemo interpretirati kao impedanciju jedne faze elementa mreže koju „vidi” istofazni naponski izvor narinut na taj element mreže.

4.2 Impedancija i nadomjesna shema voda

Vod se najčešće prikazuje ekvivalentnom π - shemom ili rjeđe T-shemom:



Slika 4-4 Ekvivalentne sheme voda

Nazivne veličine voda (koje se mogu izračunati na osnovu poznatih konstrukcijskih karakteristika) su:

R_1 (Ω/km) - jedinični radni otpor

X_1 (Ω/km) - jedinična reaktancija

G_1 (S/km) - jedinična poprečna radna vodljivost (konduktancija)

B_1 (S/km) - jedinična poprečna kapacitivna vodljivost (susceptancija)

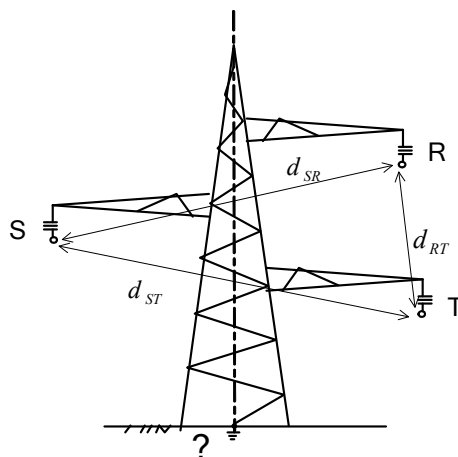
Množenjem jediničnih parametara s dužinom voda L (km), dobiju se odgovarajuća uzdužna impedancija i poprečna admitancija voda:

$$Z_v = (R_1 + jX_1) \cdot L \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$Y_v = (G_1 + jB_1) \cdot L \text{ (S)}$$

4.2.1 Direktna i inverzna impedancija nadzemnog voda

Da bi se odredile direktna, inverzna i nulta impedancija voda potrebno je poznavati geometriju stupa na kojima su postavljeni fazni vodiči, duljinu i promjer vodiča te vrstu terena iznad kojeg se vodovi nalaze.



Slika 4-5 Stup bez zaštitnog vodiča

Stup se nalazi iznad terena prosječnog specifičnog električnog otpora tla ρ [Ωm]. Geometrija stupa predstavljena je udaljenostima između pojedinih vodiča (d_{SR} , d_{RT} , d_{ST}).

Direktna impedancija voda iznosi:

$$\overline{Z_d} = \frac{\overline{E_d}}{I_d} = R_1 \cdot l + j \frac{\omega \mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{d_m}{d_s},$$

gdje su:

R_1 [Ω/m] – jedinični djelatni otpor faznog vodiča pri pogonskoj temperaturi vodiča (obično 80°C). Uzima se iz kataloških podataka odgovarajućeg užeta ili se računa iz presjeka vodiča (S) i specifične vodljivosti (κ) materijala vodiča :

$$R_1 = \frac{1}{\kappa \cdot S}$$

l [m] – duljina voda

$$\omega = 2\pi f, f=50\text{Hz}$$

μ_0 - permeabilnost prostora , $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Vs/Am}$

d_m [m] – međusobna SGU (srednja geometrijska udaljenost) faznih vodiča, određuje se pomoću relacije :

$$d_m = \sqrt[3]{d_{RS} \cdot d_{RT} \cdot d_{ST}}$$

d_s [m] – vlastita SGU faznog vodiča u [m]:

$$d_s = 0,78 \cdot r_V,$$

pri čemu je

r_V [m] – polumjer faznog vodiča.

Vodovi su stacionarni elementi, pa je inverzna impedancija jednaka direktnoj.

$$\overline{Z}_i = \overline{Z}_d$$

4.2.2 Nulta impedancija nadzemnog voda

Nulta impedancija voda bez zaštitnog vodiča je:

$$\overline{Z}_0 = \frac{\overline{E}_0}{I_0} = R_1 \cdot l + 3 \frac{\omega \mu_0 l}{8} + j \frac{3 \omega \mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D_e}{\sqrt[3]{d_s \cdot d_m^2}},$$

gdje su:

D_e [m] – ekvivalentna duljina prodiranja povratne struje u tlu:

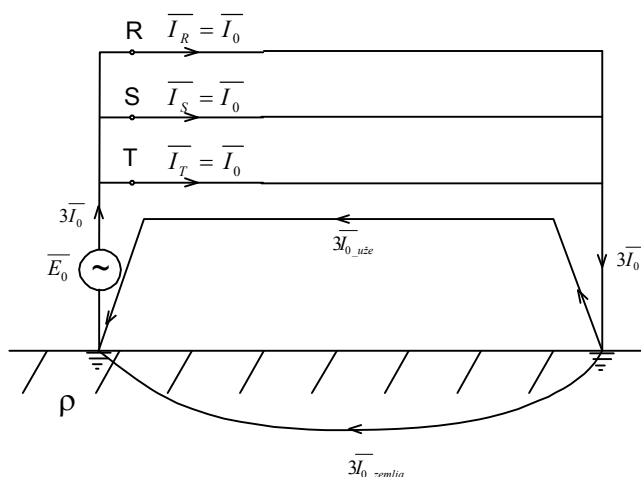
$$D_e = 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad [\text{m}],$$

pri čemu ju:

ρ – prosječna vrijednost specifičnog el. otpora tla, u [Ωm]

f – pogonska frekvencija mreže ($f=50$ Hz)

Nulta impedancija nadzemnog voda sa zaštitnim (dozemnim) užetom određuje se uzimajući u obzir povratni put nulte struke kroz zemlju i kroz zaštitno uže.



Slika 4-6 Tokovi nultih struja na vodu sa zaštitnim užetom

Sa slike je vidljivo da se struja $3I_0$ grana na dio koji prolazi kroz zemlju i dio koji prolazi kroz zaštitno uže. Nulta impedancija voda sa zaštitnim užetom određuje se na sljedeći način:

$$\overline{Z_0} = 3 \left(\overline{Z_{f1}} - \frac{\overline{Z_{fz1}^2}}{Z_{z1}} \right)$$

$$\overline{Z_{f1}} = \frac{R_{f1}}{3} + \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{\sqrt[3]{d_s^f \cdot (d_m^f)^2}}$$

$$\overline{Z_{z1}} = R_{z1} + \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{d_s^z} \quad ,$$

$$\overline{Z_{fz1}} = \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{d_m^{fz}}$$

gdje su:

R_{f1} i R_{z1} – radni otpori faznog odnosno zaštitnog vodiča

$$D_e = 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

d_s^f – vlastita SGU faznog vodiča :

$$d_s^f = 0.78 r_v$$

d_m^f – međusobna SGU faznih vodiča:

$$d_m^f = \sqrt[3]{d_{RS} \cdot d_{RT} \cdot d_{ST}}$$

d_s^z – vlastita SGU zaštitnog vodiča:

$$d_s^z = \frac{r_z}{\sqrt[4]{e^{\mu_r}}}$$

gdje je

r_z – polumjer zaštitnog užeta

μ_r – relativna permeabilnost materijala od kojeg je napravljeno zaštitno uže

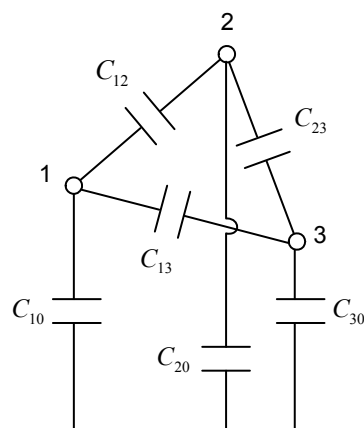
d_m^{fz} – SGU faznih vodiča u odnosu na zatjetni:

$$d_m^{fz} = \sqrt[3]{d_{R-Z} \cdot d_{S-Z} \cdot d_{T-Z}}$$

4.2.3 Poprečna admitancija voda

Poprečne admitancija voda definirana je slijedećim komponentama:

- vodljivošću prema zemlji (obično je vrlo mala, pa se zanemaruje)
- kapacitetom između pojedinih vodiča, te vodiča i zemlje



Slika 4-7 Kapaciteti trofaznog voda

C_{ij} su kapaciteti između pojedinih faza, dok su C_{i0} kapaciteti faze prema zemlji. Općenito su svi navedeni kapaciteti različiti, ali se može približno uzeti:

$$C_{12} = C_{23} = C_{13} = C_m$$

$$C_{10} = C_{20} = C_{30} = C_Z$$

Uz ovakvu pretpostavku, može se izvesti da je direktni kapacitet (ili pogonski kapacitet):

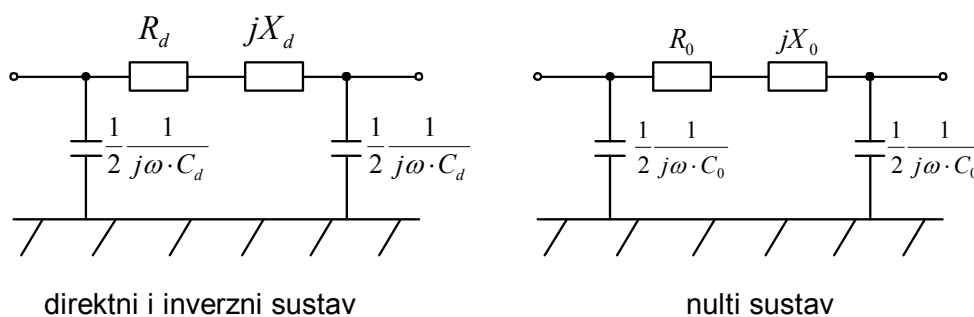
$$C_d = C_Z + 3C_m$$

Dok je nulti kapacitet

$$C_0 = C_Z$$

Direktni i nulti kapacitet voda, kao i uzdužne impedancije, mogu se računati iz geometrije stupa ili koristiti kataloške podatke.

Jednofazna shema direktnog i nultog sustava prikazana je na sljedećoj slici.



Slika 4-8 Ekvivalentna shema voda u direktnom, inverznom i nultom sustavu

Osim kapaciteta, često se koriste i kapacitivne vodljivosti, tj.

$C_d \omega \rightarrow B_d$ direktna kapacitivna vodljivost (susceptancija)

$C_0 \omega \rightarrow B_0$ nulta kapacitivna vodljivost (susceptancija)

Za trožilne kabele i zračne vodove obično vrijedi omjer:

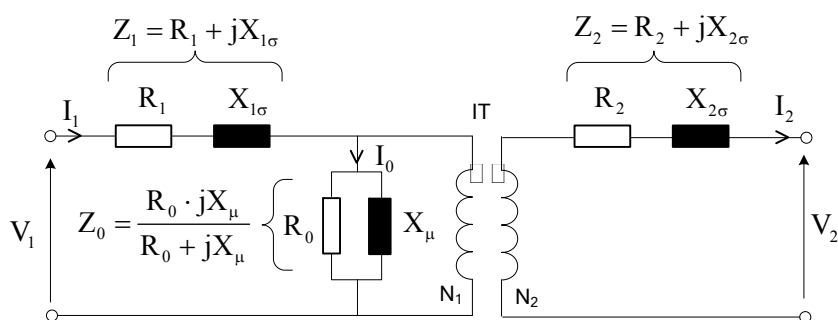
$$C_d \approx \frac{4}{7} C_0.$$

Za jednožilne kabele je $C_m = 0$, pa je $C_d = C_0$.

4.3 Impedancija i nadomjesna shema transformatora

4.3.1 Dvonamotni transformator

Ekvivalentna shema dvonamotnog transformatora prikazana je na slici 4-9. Impedancija primarne snage označena je sa Z_1 , dok je impedancija sekundarne strane označena sa Z_2 . Obje impedancije sačinjava radni otpor (R_1, R_2) i rasipna reaktancija ($X_{1\sigma}, X_{2\sigma}$) pojedinog namota transformatora. Sa Z_0 označena je tzv. poprečna grana koja reprezentira reaktivne gubitke koje nastaju uslijed struje magnetiziranja (X_μ) i radne gubitke u željezu transformatora (R_0). Transformacija napona na ekvivalentnoj shemi prikazana je idealnim transformatorom (IT).



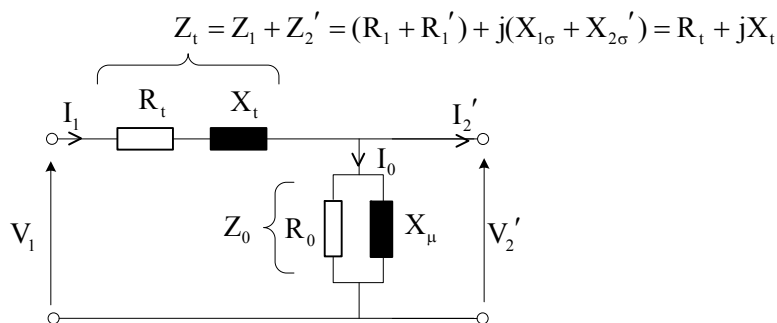
Slika 4-9 Ekvivalentna jednofazna shema dvonamotnog transformatora

„Reduciranjem“ na primarnu ili sekundarnu stranu, množenjem (dijeljenjem) impedancija s kvadratom prijenosnog omjera transformatora, transformator i cijela mreža se može svesti na jedan naponski nivo, a transformator se u tom slučaju prikazuje ekvivalentnom shemom bez idealnog transformatora, kao na slici 4-10:

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2},$$

$$Z_1' = Z_1 \cdot \left(\frac{1}{p}\right)^2 \text{ (reduciranje primarne impedancije na sekundarnu stranu)}$$

$$Z_2' = Z_2 \cdot p^2 \text{ (reduciranje sekundarne impedancije na primarnu stranu)}$$



Slika 4-10 Ekvivalentna jednofazna Γ shema dvonamotnog transformatora

Parametri Γ sheme mogu se direktno računati iz nazivnih podataka transformatora:

U_{n1}, U_{n2} (kV) - nazivni primarni i sekundarni napon

S_n (MVA) - nazivna prividna snaga transformatora

u_k (%) - napon kratkog spoja transformatora

P_k, P_0 (kW) – nazivni gubici kratkog spoja i praznog hoda transformatora

i_0 (%) - postotna struja praznog hoda (struja magnetiziranja) transformatora

Uzdužna impedancija:

$$Z_t = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (\Omega)$$

$$R_t = P_k \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (\Omega)$$

$$X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2} \quad (\Omega)$$

Poprečna impedancija:

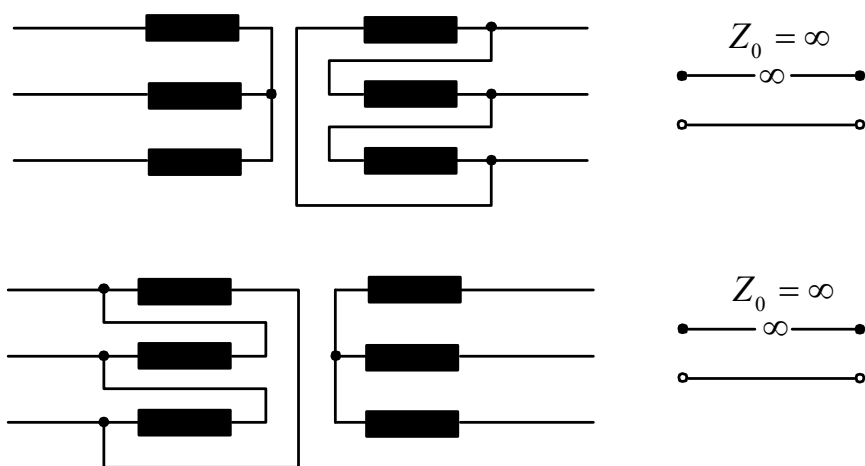
$$R_0 = \frac{U_n^2}{P_0} \quad (\Omega)$$

$$X_\mu = \frac{100}{i_0} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (\Omega)$$

U gornjim izrazima za U_n može se uvrstiti U_{n1} ili U_{n2} , ovisno o tome da li se transformator ekvivalentira reduciranjem na primarnu ili sekundarnu stranu. Sve snage potrebno je izraziti u MVA ili MW, a napone u kV da bi se rezultat dobio u Ω .

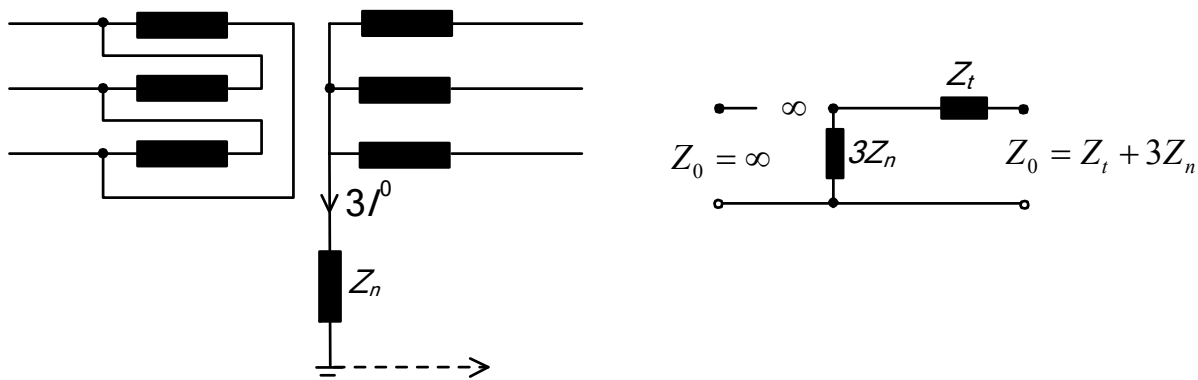
Prethodni izrazi vrijede za direktnu i inverznu impedanciju. Nulta impedancija transformatora ovisi o načinu uzemljenja zvjezdišta transformatora. U distribucijskim mrežama najčešće se koriste slijedeće varijante:

U varijanti grupe spoja Yd ili Dy (transformatori 35/10 kV) kod kojih nije uzemljeno zvjezdište, nulta komponenta struja se ne može zatvoriti ni s jedne strane, tako da je nulta impedancija beskonačna.



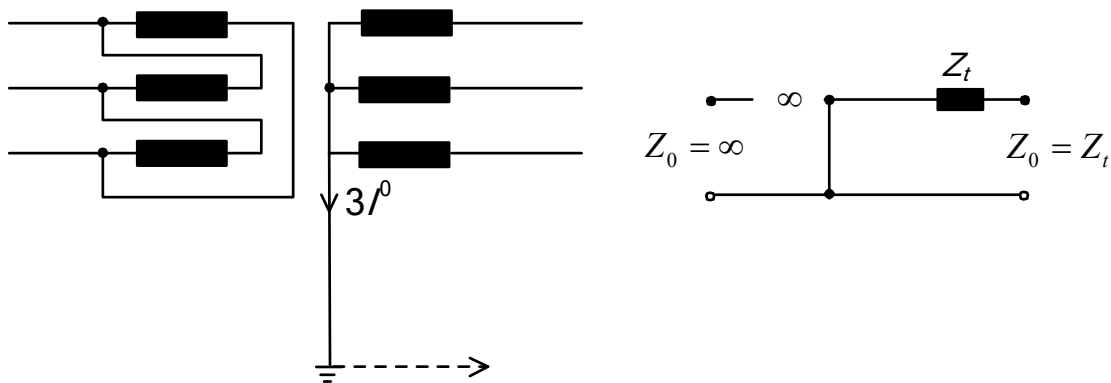
Slika 4-11 Ekvivalentna nulta shema transformatora u grupi spoja Yd i Dy

U varijanti grupe spoja Dyn (transformatori 35/10 kV) kod kojih je uzemljeno zvjezdište sekundara preko impedancije Z_n (radni otpor R ili prigušnica jX), nulta komponenta struja se može zatvoriti sa sekundarne strane, pa je nulta impedancija jednaka zbroju direktne impedancije transformatora i impedancije za uzemljenje $3Z_n$ gledano sa sekundara, dok je s primarne strane beskonačna, slika 4-12.



Slika 4-12 Ekvivalentna nulta shema transformatora u grupi spoja Dyn sa zvjezdištem sekundara uzemljenim preko impedancije Z_n

U varijanti grupe spoja Dyn (transformatori 10(20)/0.4 kV) kod kojih je direktno uzemljeno zvjezdište sekundara, nulta komponenta struja se može zatvoriti sa sekundarne strane, pa je nulta impedancija jednaka direktnoj impedanciji transformatora gledano sa sekundara, dok je s primarne strane beskonačna, slika 4-13. Isto vrijedi i za transformator 10(20)/0.4 kV u grupi spoja Yzn.



Slika 4-13 Ekvivalentna nulta shema transformatora u grupi spoja Dyn sa direktno uzemljenim zvjezdištem sekundara

4.3.2 Tronamotni transformator

Tronamotni energetski transformatori u distribucijskim mrežama se koriste u varijantama 110/35(30)/10 kV i 110/10(20)/10 kV, tj. kao veza prema prijenosnoj mreži. U Hrvatskoj se tercijarni namot najčešće ne koristi za napajanje distribucijske mreže, dok u nekim zemljama (npr. BiH) se redovito koriste i sekundarni i tercijarni namot.

Kod tronamotnog transformatora postoje dvije transformacija napona (primar-sekondar, primar-tercijar), a redukcija impedancija sekundara i tercijara na primarnu stranu (i obrnuto) radi se na isti način kao i kod dvonamotnog transformatora, samo preko prijenosnog omjera p_1 (primar-sekondar) i p_2 (primar-tercijar):

$$p_1 = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$p_2 = \frac{N_1}{N_3} = \frac{U_1}{U_3} = \frac{I_3}{I_1}$$

$$Z_2' = Z_2 \cdot p_1^2$$

$$Z_3' = Z_3 \cdot p_2^2$$

Ekvivalentna shema tronamotnog transformatora s impedancijama reduciranim na primarnu stranu prikazana je na slici 4-14 (proširena Γ shema), čiji se parametri mogu direktno računati iz nazivnih podataka tronamotnog transformatora:

U_{n1}, U_{n2}, U_{n3} (kV) - nazivni primarni, sekundarni i tercijarni napon

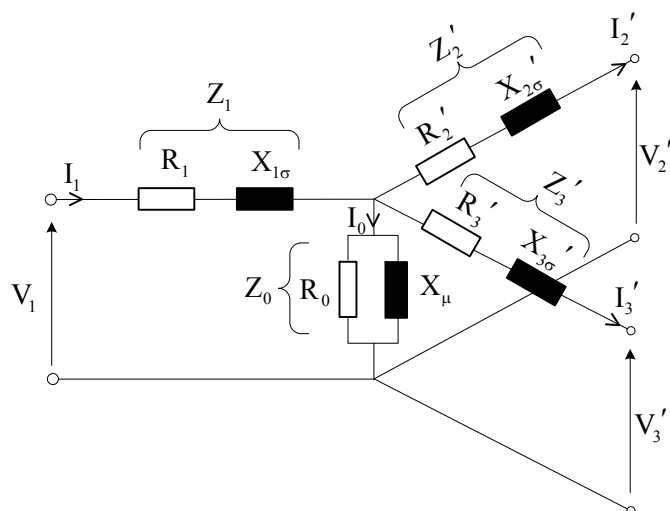
S_{n1}, S_{n2}, S_{n3} (MVA) - nazivna prividna snaga primarnog, sekundarnog i tercijarnog namota

$u_{k12}, u_{k13}, u_{k23}$ (%) - naponi kratkog spoja primar-sekondar, primar-tercijar i sekundar-tercijar

$P_{k12}, P_{k13}, P_{k23}$ (kW) - nazivni gubici kratkog spoja primar-sekondar, primar-tercijar i sekundar-tercijar

P_0 (kW) - nazivni gubici praznog hoda transformatora

i_0 (%) - postotna struja praznog hoda (struja magnetiziranja) transformatora



Slika 4-14 Ekvivalentna jednofazna Γ shema tronamotnog transformatora

Prvo se računaju impedancije parova namota, pri čemu se za nazivnu snagu uvrštava manja od dvije vrijednosti odgovarajućeg para namota:

$$Z_{12} = \frac{u_{k12}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{\min(S_{n1}, S_{n2})} \quad (\Omega) \quad Z_{13} = \frac{u_{k13}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{\min(S_{n1}, S_{n3})} \quad (\Omega) \quad Z_{23} = \frac{u_{k23}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{\min(S_{n2}, S_{n3})} \quad (\Omega)$$

$$R_{12} = P_{k12} \cdot \frac{U_n^2}{\min(S_{n1}, S_{n2})} \quad (\Omega) \quad R_{13} = P_{k13} \cdot \frac{U_n^2}{\min(S_{n1}, S_{n3})} \quad (\Omega) \quad R_{23} = P_{k23} \cdot \frac{U_n^2}{\min(S_{n2}, S_{n3})} \quad (\Omega)$$

$$X_{12} = \sqrt{Z_{12}^2 - R_{12}^2} \quad (\Omega) \quad X_{13} = \sqrt{Z_{13}^2 - R_{13}^2} \quad (\Omega) \quad X_{23} = \sqrt{Z_{23}^2 - R_{23}^2} \quad (\Omega)$$

Na osnovu izraza:

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2$$

$$Z_{13} = Z_1 + Z_3$$

$$Z_{23} = Z_2 + Z_3$$

konačno se dobiju izrazi za impedancije pojedinih namota:

$$Z_1 = \frac{1}{2} \cdot (Z_{12} + Z_{13} - Z_{23})$$

$$Z_2 = \frac{1}{2} \cdot (Z_{12} + Z_{23} - Z_{13})$$

$$Z_3 = \frac{1}{2} \cdot (Z_{13} + Z_{23} - Z_{12})$$

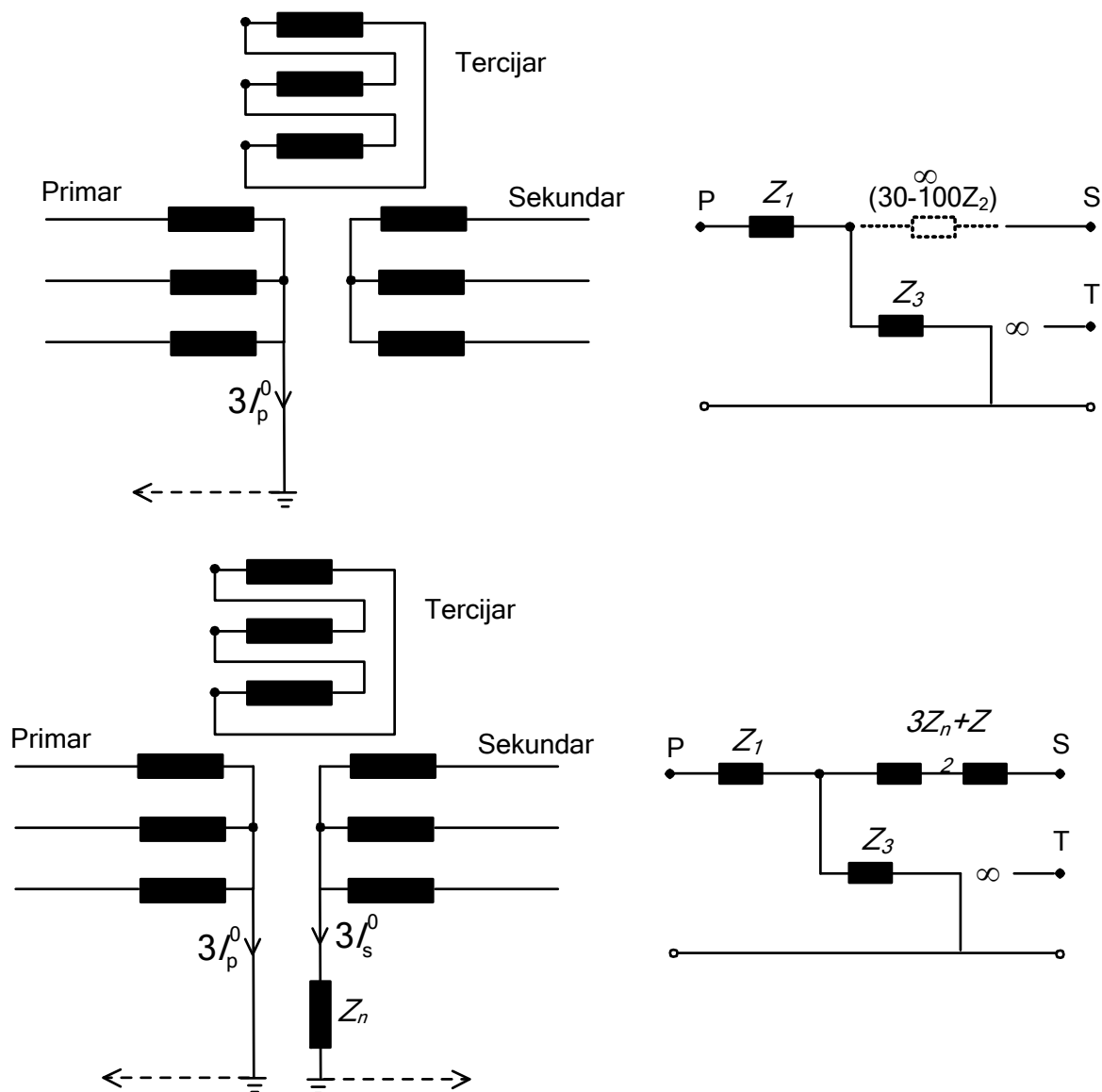
Poprečna impedancija je kao i kod dvonamotnog transformatora:

$$R_0 = \frac{U_n^2}{P_0} \quad (\Omega)$$

$$X_\mu = \frac{100}{i_0} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (\Omega)$$

U gornjim izrazima za U_n se može uvrstiti U_{n1} , U_{n2} , ili U_{n3} ovisno o tome da li se transformator ekvivalentira reduciranjem na primarnu, sekundarnu ili tercijarnu stranu.

Prethodni izrazi vrijede za direktnu i inverznu impedanciju tronamotnog transformatora. Nulta impedancija transformatora ovisi o načinu uzemljenja zvjezdišta transformatora. U distribucijskim mrežama gotovo isključivo se koristi varijanta grupe spoja YNynd (transformatori 110/35/10 kV, 110/10(20)/10 kV) kod kojih je direktno uzemljeno zvjezdište primara, a zvjezdište sekundara je uzemljeno preko impedancije Z_n (radni otpor R ili prigušnica jX) ili je neuzemljeno. Nulta komponenta struja se može zatvoriti sa primarne strane, a sa sekundarne samo u slučaju da je zvjezdište uzemljeno preko impedancije Z_n , slika 4-15.



Slika 4-15 Ekvivalentna nulta shema transformatora u grupi spoja DNYnd s direktno uzemljenim zvjezdištem primara i zvjezdištem sekundara uzemljenim preko impedancije Z_n

4.4 Ekvivalentna shema potrošača

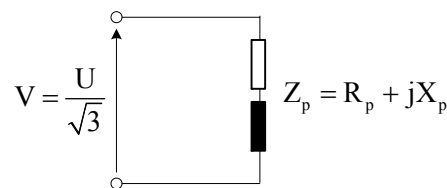
Potrošač, bez obzira da li se radi o „grupnom” potrošaču ili pojedinačnom trošilu, definiran je fiksnom impedancijom $Z_p=R_p+jX_p$ (Ω) ili fiksnom snagom $S_p=P_p+jQ_p$ (MVA). Ekvivalentna shema prikazana

je na slici 4-16, a u slučaju da je zadan fiksnom snagom, odgovarajuća impedancija, pri linijskom naponu U na potrošaču, može se izračunati na slijedeći način:

$$S_p = \sqrt{3} \cdot U \cdot I^* = \sqrt{3} \cdot U \cdot \left(\frac{U}{\sqrt{3} Z_p} \right)^* = \frac{U \cdot U^*}{Z_p^*} = \frac{U^2}{Z_p^*}$$

$$Z_p^* = \frac{U^2}{S_p}$$

$$Z_p = \frac{U^2}{S_p^*} = \frac{U^2}{P_p - jQ_p} \quad (\Omega)$$

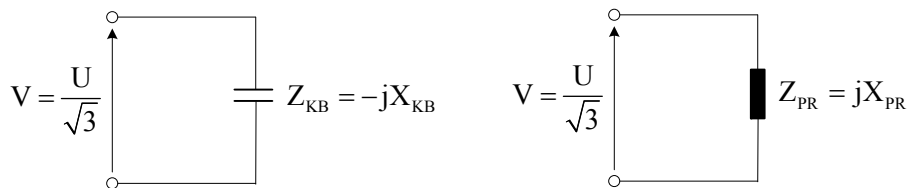


Slika 4-16 Ekvivalentna shema potrošača

4.5 Ekvivalentna shema i parametri paralelne kondenzatorske baterije i prigušnice

Kondenzatorske baterije definirane su nazivnom jalovom snagom Q_n (MVar) i nazivnim naponom U_n . Ista je situacija s prigušnicom. Ekvivalentna shema prikazana je na slici 4-17, a odgovarajuće impedancije računaju se na slijedeći način:

$$X_{KB} = X_{PR} = \frac{U_n^2}{Q_n} \quad (\Omega)$$



Slika 4-17 Ekvivalentna shema paralelnog kondenzatora i prigušnice

4.6 Ekvivalentna shema i parametri aktivne (pojne) mreže

Kod proračuna elektroenergetske mreže redovito se promatra samo jedan dio mreže, a ostatak se na odgovarajući način ekvivalentira. U slučaju aktivne mreže, potrebno je izračunati njenu odgovarajuću impedanciju $Z_m = R_m + jX_m$. Direktna i inverzna impedancija aktivne mreže se računa na osnovu poznate snage trolnog kratkog spoja S_{k3} (MVA) na mjestu ekvivalentiranja i omjera R/X impedancije aktivne mreže, dok je za proračun nulte impedancije potrebno poznavati i snagu jednopolnog kratkog spoja:

$$Z_m^d = \frac{U_n^2}{S_{K3}} \quad (\Omega)$$

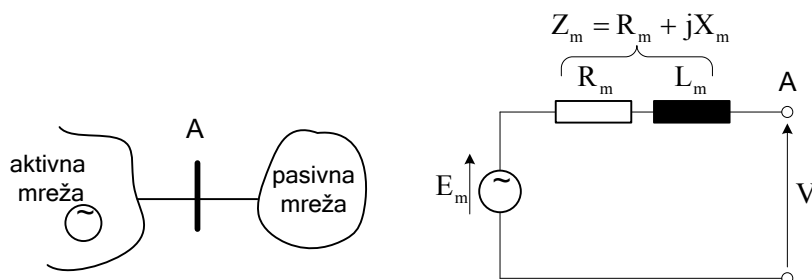
$$Z_m^0 = U_n^2 \left(\frac{3}{S_{K1}} - \frac{2}{S_{K3}} \right) \quad (\Omega)$$

$$X_m^d = \frac{Z_m^d}{\sqrt{\left(\frac{R}{X}\right)^2 + 1}}$$

$$X_m^0 = \frac{Z_m^0}{\sqrt{\left(\frac{R}{X}\right)^2 + 1}}$$

$$R_m^d = \sqrt{Z_m^{d2} - X_m^{d2}}$$

$$R_m^0 = \sqrt{Z_m^{02} - X_m^{02}}$$



Slika 4-18 Ekvivalentna shema aktivne (pojne) mreže

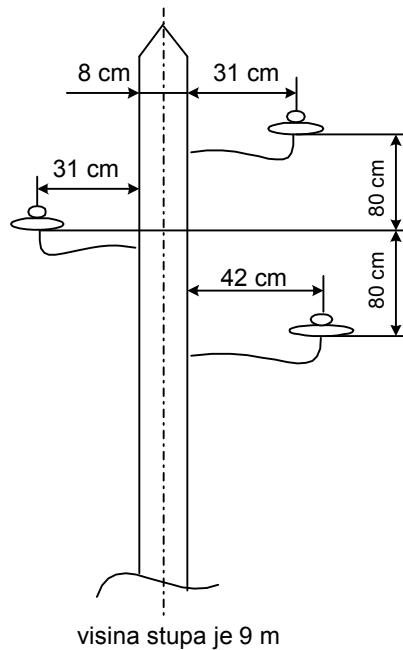
ZADATAK 1

Odredi jedinične impedancije direktnog, inverznog i nultog redosljeda nadzemnog voda nazivnog napona $U_n = 10$ kV. Fazni vodiči su izrađeni iz Cu i presjeka su 16 mm^2 . Postavljeni su na stupovima, kojih je geometrija glave prikazana na slici. Vod nema zaštitno uže. Prosječni specifični el. otpor tla duž navedenog voda iznosi $\rho = 200 \Omega\text{m}$. Za fazni vodič Cu 16 mm^2 uzeti:

$$R_1 = 1.123 \Omega/\text{km} \text{ pri } 20^\circ\text{C}$$

$$d = 5.1 \text{ mm} \text{ (nazivni promjer užeta)}$$

Trajno dopuštena struja u ovim vodičima – uz nadtemperaturu 40°C ($\vartheta = 80^\circ\text{C}$) iznosi $I_T = 115 \text{ A}$.



Rješenje

Jedinični djelatni otpor može se preračunati na pogonsku temperaturu voda $\vartheta = 80^\circ\text{C}$ množeći kataloški podatak o jediničnom djelatnom otporu pri 20°C sa sljedećim koeficijentom:

$$k_\vartheta = 1 + \alpha(\vartheta - 20^\circ)$$

gdje je

α – temperaturni koeficijent el. otpora, koji za Cu iznosi

$$\alpha = 0.00382 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

(za Al/Č $\alpha = 0.004 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)

Stoga je:

$$k_\vartheta = 1 + 0.00382 \cdot (80 - 20) = 1.23$$

$$R_1 = R_l \cdot k_\vartheta = 1.123 \Omega / \text{km} \cdot 1.23 = 1.381 \Omega / \text{km}$$

Jedinične impedancije direktnog i inverznog redosljeda računaju se preko slijedećeg izraza:

$$\overline{Z}_{d1} = \overline{Z}_{i1} = \frac{\overline{Z}_d}{l} = \frac{\overline{Z}_i}{l} = R_l + j \frac{\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \ln \frac{d_m}{d_s}$$

$$d_{RS} = \sqrt{(42 - 31)^2 + (80 + 80)^2} = 160,38 \text{ cm}$$

$$d_{RT} = \sqrt{(31 + 8 + 31)^2 + 80^2} = 106,30 \text{ cm}$$

$$d_{ST} = \sqrt{(42 + 8 + 31)^2 + 80^2} = 113,85 \text{ cm}$$

$$d_m = \sqrt[3]{160,38 \cdot 106,30 \cdot 113,85} = 124,74 \text{ cm}$$

d_s - vlastita SGU faznog vodiča; jednaka je iznosu:

$$d_s = 0,78 \cdot r_v = 0,78 \cdot \frac{d}{2} = 0,78 \cdot \frac{5,1}{2} = 1,99 \text{ mm} \approx 0,2 \text{ cm}$$

$$\omega = 2\pi f = 100\pi \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} = 4\pi \cdot 10^{-4} \frac{Vs}{Akm}$$

Uvrštanjem se dobiva:

$$\overline{Z}_{d1} = \overline{Z}_{i1} = 1,381 + j \frac{100\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-4}}{2\pi} \ln \frac{124,74}{0,2} = 1,381 + j0,404 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Jedinična nulta impedancija voda bez zaštitnog užeta iznosi:

$$\overline{Z}_{01} = \frac{\overline{Z}_0}{l} = R_1 + 3 \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{3\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{\sqrt[3]{d_s \cdot d_m^2}}$$

$$D_e = 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 658 \sqrt{\frac{200}{50}} = 1316 \text{ m}$$

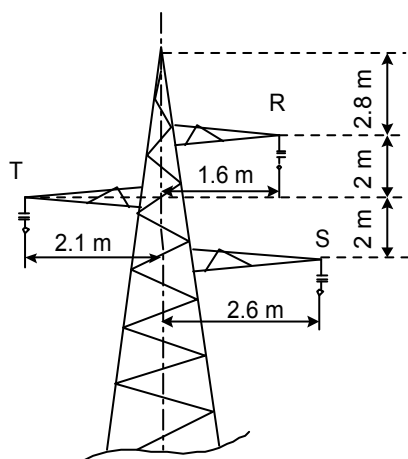
$$\sqrt[3]{d_s \cdot d_m^2} = \sqrt[3]{0,2 \text{ cm} \cdot 124,74^2} = 14,6 \text{ cm} = 0,146 \text{ m}$$

Uvrštanjem se dobiva:

$$\begin{aligned} \overline{Z}_{01} &= 1,381 + 3 \cdot \frac{100\pi \text{ s}^{-1} \cdot 4\pi \cdot 10^{-4} \frac{Vs}{Akm}}{8} + j3 \cdot \frac{100\pi \text{ s}^{-1} \cdot 4\pi \cdot 10^{-4} \frac{Vs}{Akm}}{2\pi} \ln \frac{1316}{0,146} = \\ &= 1,529 + j1,716 \Omega / \text{km} \end{aligned}$$

ZADATAK 2

Odredi jedinične impedancije direktnog, inverznog i nultog redosljeda nadzemnog voda nazivnog napona $U_n = 35 \text{ kV}$. Fazni vodiči su iz Al/Č presjeka $120/21 \text{ mm}^2$. Postavljeni su na čelično-rešetkastim stupovima oblika “jela”. Geometrija glave stupa je prikazana na slici.



Prosječni specifični el. otpor tla duž trase navedenog voda iznosi $\rho = 500 \Omega\text{m}$. Traženu jediničnu nultu impedanciju voda odredi u slučajevima da :

- vod nema zaštitno uže
- ima zaštitno uže od čelika presjeka 35 mm^2 .

Iz kataloških podataka za Al/Č $120/21 \text{ mm}^2$ uzeti:

$$R_1 = 0,235 \Omega/\text{km pri } 20^\circ\text{C}$$

$$d = 15,7 \text{ mm (nazivni promjer užeta)}$$

$$\alpha = 0.004 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \text{ (za Al/Č)}$$

Trajno dopuštena struja u vodičima – uz nadtemperaturu 40°C ($\vartheta = 80^\circ\text{C}$) iznosi $I_T = 345 \text{ A}$.

Iz kataloških podataka za Č 35 mm^2 uzeti:

$$R_1 = 4,285 \Omega/\text{km pri } 20^\circ\text{C}$$

$$d = 7,5 \text{ mm (nazivni promjer užeta)}$$

$$\alpha = 0.0048 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \text{ (za čelik)}$$

$$\mu_r = 30$$

Rješenje

Navedeni jedinični djelatni otpor faznog vodiča se preračunava na pogonsku temperaturu voda $\vartheta = 80^\circ\text{C}$ sa koeficijentom:

$$k_\vartheta = 1 + \alpha(\vartheta - 20^\circ)$$

$$k_\vartheta = 1 + 0.004 \cdot (80 - 20) = 1.24$$

$$R_1 = R_1 \cdot k_\vartheta = 0,235 \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right] \cdot 1.24 = 0,291 \Omega / \text{km}$$

$$\overline{Z}_{d1} = \overline{Z}_{i1} = R_1 + j \frac{\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \ln \frac{d_m}{d_s}$$

$$d_m = \sqrt[3]{d_{RS} \cdot d_{RT} \cdot d_{ST}}$$

$$d_{RS} = \sqrt{(2,6 - 1,6)^2 + 1^2} = 4,123m$$

$$d_{RT} = \sqrt{(1,6 + 2,1)^2 + 2^2} = 4,206m$$

$$d_{ST} = \sqrt{(2,1 + 2,6)^2 + 2^2} = 5,108m$$

$$d_m = \sqrt[3]{4,123 \cdot 4,206 \cdot 5,108} = 4,458m$$

$$d_s = 0,78 \cdot r_v = 0,78 \cdot \frac{d}{2} = 0,78 \cdot \frac{15,7}{2} = 6,1mm$$

$$\omega = 2\pi f = 100\pi \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} = 4\pi \cdot 10^{-4} \frac{Vs}{Akm}$$

Uvrštanjem se dobiva:

$$\overline{Z}_{d1} = \overline{Z}_{i1} = 0,291 + j \frac{100\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-4}}{2\pi} \ln \frac{4,458 \cdot 10^3}{6,1} = 0,291 + j0,414 \text{ } \Omega/km$$

Direktna/inverzna impedancija ne ovise o zaštitnom užetu. Nulta impedancija voda ovisi o zaštitnom užetu. Odredit će se jedinične nulte impedancije u slučajevima pod a) i b).

a) Jedinična nulta impedancija voda bez zaštitnog užeta računa se pomoću izraza:

$$\overline{Z}_{01} = R_1 + 3 \frac{\omega \mu_0}{8} + j \frac{3\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{\sqrt[3]{d_s \cdot d_m^2}}$$

$$D_e = 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 658 \sqrt{\frac{500}{50}} = 2080,78m$$

$$\sqrt[3]{d_s \cdot d_m^2} = \sqrt[3]{6,1 \cdot 10^{-3} m \cdot 4,458^2 m^2} = 0,495m$$

Uvrštanjem se dobiva:

$$\begin{aligned} \overline{Z}_{01} &= 0,291 + 3 \cdot \frac{100\pi s^{-1} \cdot 4\pi \cdot 10^{-4} \frac{Vs}{Akm}}{8} + j3 \cdot \frac{100\pi s^{-1} \cdot 4\pi \cdot 10^{-4} \frac{Vs}{Akm}}{2\pi} \ln \frac{2080,78m}{0,495m} = \\ &= 0,438 + j1,573\Omega/km \end{aligned}$$

b) Odgovarajuća nulta impedancija voda sa 3 fazna vodiča i 1 zaštitnim užetom određuje se pomoću sljedećeg izraza:

$$\overline{Z}_{01} = 3 \left(\overset{\circ}{Z}_{f1} - \frac{\overset{\circ}{Z}_{f1}^2}{\overset{\circ}{Z}_{z1}} \right)$$

$$\overline{Z_{f1}} = \frac{R_{f1}}{3} + \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{\sqrt[3]{d_s^f \cdot (d_m^f)^2}}$$

$$\overline{Z_{z1}} = R_{z1} + \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{d_s^z}$$

$$\overline{Z_{fz1}} = \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{d_m^{fz}}$$

Ovdje su:

$$R_{f1} = 0,291 \text{ } \Omega/\text{km} \quad R_{z1} = 4,285 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$\frac{\omega\mu_0}{8} = \frac{100\pi s^{-1} \cdot 4\pi \cdot 10^{-4} \frac{Vs}{Akm}}{8} = 0,049 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$D_e = 2080,78 \text{ m} \quad , \quad d_s^f = 6,1 \text{ mm} \quad , \quad d_m^f = 4,458 \text{ m}$$

$$\sqrt[3]{d_s^f \cdot d_m^{f2}} = 0,495 \text{ m}$$

$$d_s^z = \frac{r_z}{\sqrt[4]{e^{\mu_r}}} = \frac{d_z}{2\sqrt[4]{e^{\mu_r}}} = \frac{7,5\text{mm}}{2\sqrt[4]{e^{30}}} = 2,07 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$d_m^{fz} = \sqrt[3]{d_{R-Z} \cdot d_{S-Z} \cdot d_{T-Z}} \text{ , gdje su}$$

$$d_{R-Z} = \sqrt{1,6^2 + 2,8^2} = 3,225\text{m}$$

$$d_{S-Z} = \sqrt{2,1^2 + (2 + 2,8)^2} = 5,239\text{m}$$

$$d_{T-Z} = \sqrt{2,6^2 + (4 + 2,8)^2} = 7,280\text{m}$$

$$d_m^{fz} = \sqrt[3]{3,225 \cdot 5,239 \cdot 7,280} = 4,973\text{m}$$

Uvrštenjem se dobiva:

$$\overline{Z_{f1}} = \frac{0,291}{3} + 0,049 + j \frac{100\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-4}}{2\pi} \ln \frac{2080,78\text{m}}{0,495\text{m}} = 0,146 + j0,524\Omega / \text{km}$$

$$\overline{Z_{z1}} = 4,285 + 0,049 + j \frac{100\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-4}}{2\pi} \ln \frac{2080,78\text{m}}{2,07 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 4,334 + j1,302\Omega / \text{km}$$

$$\overline{Z_{fz1}} = 0,049 + j \frac{100\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-4}}{2\pi} \ln \frac{2080,78\text{m}}{4,973\text{m}} = 0,049 + j0,379\Omega / \text{km}$$

Daljnim uvrštenjem se dobiva:

$$\begin{aligned} \overline{Z_{01}} &= 3 \left(0,146 + j0,524 - \frac{(0,382 \angle 82,6^\circ)^2}{4,525 \angle 16,7^\circ} \right) = 3 \left(0,146 + j0,524 - \frac{0,146 \angle 165,2^\circ}{4,525 \angle 16,7^\circ} \right) = \\ &= 0,519 + j1,521\Omega / \text{km} \end{aligned}$$

Vidi se da zaštitno uže povećava djelatni otpor nulte impedancije voda, a smanjuje njenu nultu reaktanciju!

ZADATAK 3

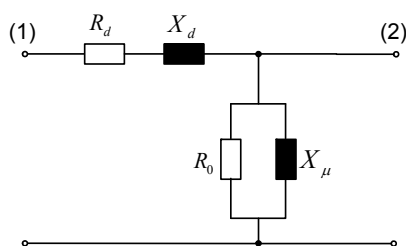
U TS 35/10 kV ugrađen je energetski transformator sa sljedećim tehničkim podacima: $U_{n1} = 35$ kV, $U_{n2} = 10$ kV, $S_n = 4$ MVA, $u_k = 6\%$, $P_k = 30,2$ kW, $i_0 = 0,68\%$, $P_0 = 4,83$ kW, grupa spoja Dy5.

Odredi njegove impedancije direktnog, inverznog i nultog redosljeda. Traženu nultu impedanciju transformatora odredi u slučajevima da je zvjezdište 10 kV namota:

- izolirano,
- uzemljeno preko radnog otpornika iznosa $R_n = 60 \Omega$

Rješenje

Γ – shema transformatora, s parametrima reduciranim na primarnu stranu (35kV):



$$R_d = P_k \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_n^2} = 30,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{35^2}{4^2} = 2,31 \Omega$$

$$Z_d = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_n} = \frac{6}{100} \cdot \frac{35^2}{4} = 18,38 \Omega$$

$$X_d = \sqrt{Z_d^2 - R_d^2} = \sqrt{18,38^2 - 2,31^2} = 18,22 \Omega,$$

$$R_0 = \frac{U_{n1}^2}{P_0} = \frac{35^2}{4,83 \cdot 10^{-3}} = 253,6 \text{ k}\Omega,$$

$$X_\mu = \frac{100}{i_0} \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_n} = \frac{100}{0,68} \cdot \frac{35^2}{4} = 45,04 \text{ k}\Omega.$$

Isti parametri računati na sekundarnu stranu ($U_{n2} = 10$ kV):

$$R_d'' = R_d \left(\frac{U_{n2}}{U_{n1}} \right)^2 = 2,31 \left(\frac{10}{35} \right)^2 = 0,188 \Omega$$

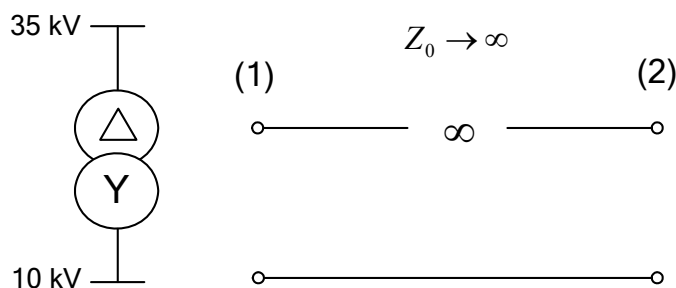
$$X_d'' = X_d \left(\frac{U_{n2}}{U_{n1}} \right)^2 = 18,22 \left(\frac{10}{35} \right)^2 = 1,487 \Omega$$

$$R_0'' = R_0 \left(\frac{U_{n2}}{U_{n1}} \right)^2 = 253,6 \left(\frac{10}{35} \right)^2 = 20,70 \text{ k}\Omega$$

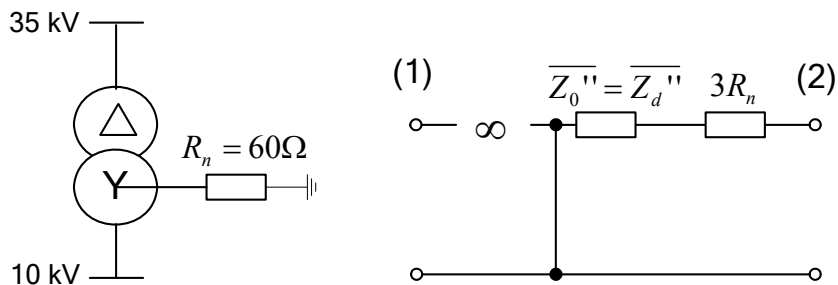
$$X_{\mu}'' = X_{\mu} \left(\frac{U_{n2}}{U_{n1}} \right)^2 = 45,04 \left(\frac{10}{35} \right)^2 = 3,67 \text{ k}\Omega$$

Nulta impedancija transformatora ovisi o grupi spoja, te o načinu uzemljenja zvjezdišta transformatora.

- a) Zvjezdište 10 kV namota je izolirano, pa se ne može razviti nulti sustav struja niti sa strane trokuta (35 kV) niti sa strane zvijezde (10 kV). Nulta impedancija je tada beskonačna, tj. $Z_0 = \infty$



- b) Zvjezdište 10 kV namota je uzemljeno preko malog djelatnog otpornika $R_n = 60 \Omega$. Tada se sa 10 kV-tne strane može zatvoriti nulti sustav struja. Odgovarajuća nadomjesna shema transformatora za nulti redosljed s parametrima preračunatim na NN stranu (10 kV) je:



Slijedi:

$$\overline{Z}_0'' = \overline{Z}_d'' = R_d'' + jX_d'' = 0,188 + j1,487 \Omega$$

$$3R_n = 3 \cdot 60 = 180 \Omega$$

Tj. ukupna nulta impedancija sekundarne strane (na 10 kV) iznosi:

$$\overline{Z}_t^0 = 3R_n = 180,188 + j1,487 \Omega$$

Napomena: vidi se da kod ovakvog uzemljenja neutralne točke transformatora možemo zanemariti impedanciju transformatora u odnosu na daleko veću nultu impedanciju otpora za uzemljenje, tj. može se uzeti:

$$\overline{Z}_t^0 = 3R_n = 180 \Omega$$

5 PRORAČUN KVAROVA U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

Najčešći kvarovi u distribucijskim (i općenito elektroenergetskim) mrežama su kratki spojevi trolpolni (K3), jednopolni (K1), dvopolni (K2) i dvopolni kratki spoj sa istovremenim spojem sa zemljom (K2Z). Iznosi struja kratkog spoja u mreži ovise o topologiji mreže, uklopnom stanju mreže i elektrana, kao i tehničkim karakteristikama svih elemenata mreže.

Proračun struja, snaga i napona kratkog spoja u praksi se redovito koristi prvenstveno

- o za potrebe projektiranja odnosno dimenzioniranja visokonaponskih mreža i postrojenja, budući da za vrijeme kratkog spoja dolazi do najvećih strujnih opterećenja elemenata mreža i postrojenja (što uzrokuje odgovarajuća mehanička i termička opterećenja),
- o za potrebe udešenja zaštite, tj. podešavanja iznosa struja na koje reagira zaštita i vremena nakon kojeg reagira zaštita.

U proračunu struja kratkog spoja za potrebe projektiranja i odabira opreme, mreža se redovito modelira s topologijom kakva se planira u budućnosti, nakon izgradnje novih dijelova mreže i postrojenja u slijedećem srednjoročnom razdoblju, tj. 10-20 godina unaprijed.

Kod proračuna struja kratkog spoja za potrebe udešenja zaštite, uzima se postojeća topologija mreže, a proračun se vrši za redovno uklopno stanje mreže kojima se dobija određeni raspon struja kratkog spoja, tzv. minimalna i maksimalna vrijednost struje kratkog spoja.

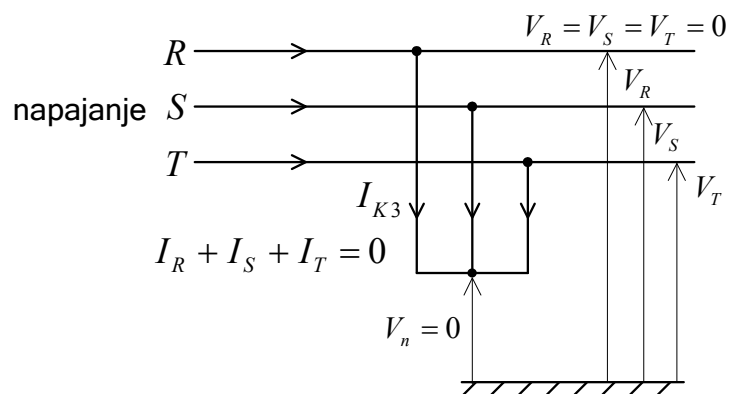
U distribucijskoj mreži, s obzirom na njen radijalni pogon, napajanje je uvijek jednostrano, pa tako i struju kratkog spoja na mjestu kvara uvijek čini samo jedna komponenta i to ona koja dolazi iz smjera napajanja!

5.1 Tropolni kratki spoj

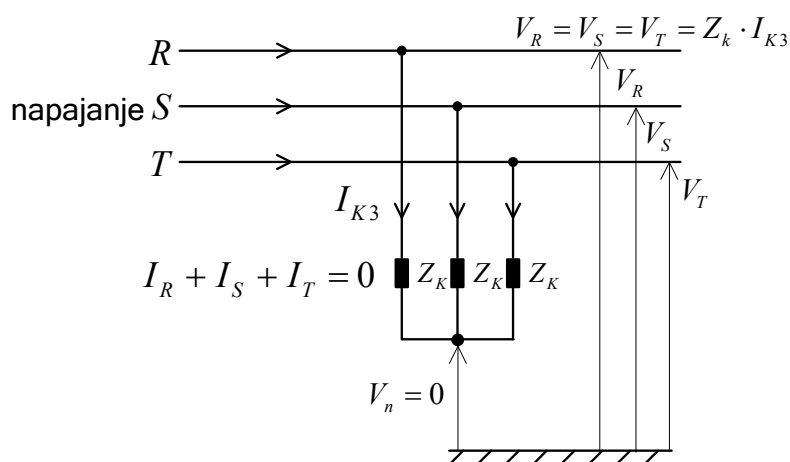
Tropolni kratki spoj nastaje kratkim spajanjem svih triju faza. To je jedini simetrični kratki spoj, tj. struje u svim fazama su iste. Zbog toga je dovoljno promatrati samo jednu fazu odnosno direktnu impedanciju mreže koja definira vrijednost struje kratkog spoja.

S obzirom na impedanciju kvara, trolpolni kratki spoj može biti:

- a) metalni trolpolni kratki spoj, bez impedancije kvara (slika 5-1)
- b) trolpolni kratki spoj preko impedancije kvara (slika 5-2)



Slika 5-1 Metalni trolpolni kratki spoj



Slika 5-2 Trolpolni kratki spoj preko impedancije Z_k

Struja trolpolnog kratkog spoja u varijanti a) je:

$$I_{K3} = \frac{U_n}{\sqrt{3}Z_d},$$

pri čemu je :

U_n – nazivni linijski napon

Z_d – direktna impedancija mreže od mjesta napajanja (pojne točke) do mjesta kvara

Izraz za struju trolpolnog kratkog spoja preko impedancije kvara Z_k je:

$$I_{K3} = \frac{U_n}{\sqrt{3}(Z_d + Z_k)}$$

Za potrebe projektiranja mreža i postrojenja, tj. odabira opreme, uz nazivni linijski napon u izrazu za proračun struje trolpolnog kratkog spoja, dodaje se faktor c, čiji iznos ovisi o naponskim nivou na kojemu se računa kratki spoj, te namjeni proračuna (minimalna ili maksimalna struja kvara):

$$I_{K3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}Z_d}$$

Prema propisima IEC909, iznosi faktora c dani su u slijedećoj tablici.

Tablica 1: Naponski faktor c

Nazivni napon (Un)	c _{max} (za proračun I ^k _{max})	c _{min} (za proračun I ^k _{min})
100-1000 V	1,05*	0,95
	1,10**	0,95
Iznad 1 kV	1,10	1,00

* za niskonaponske mreže sa tolerancijom napona +6%

** za niskonaponske mreže sa tolerancijom napona +10%

Udarne struja trolnog kratkog spoja je maksimalna tjemena vrijednost struje kratkog spoja, a mjerodavna je za dimenzioniranje opreme s obzirom na mehaničko naprezanje za vrijeme kratkog spoja. Sastoji se od istosmjerne komponente i izmjenične komponente koja je najveća u slučaju kad kratki spoj nastane u trenutku kad je napon jednak nuli. Pojavljuje se jedan poluperiod nakon nastanka kratkog spoja u slučaju zanemarivog udjela radne komponente impedancije kvara, a nešto ranije ukoliko je radna komponenta impedancije kvara značajnija (kratki spoj daleko od generatora, što je karakteristično za distribucijske mreže). Udarne struja računa se prema slijedećoj formuli:

$$I_u = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k3},$$

gdje je:

χ - faktor udarne struje

I_{k3} – izmjenična komponenta struje kvara

Faktor udarne struje može se analitički odrediti pomoću formule:

$$\chi = 1.02 + 0.98 \cdot e^{\frac{-3R_d}{X_d}},$$

gdje se omjer R/X može računati na nekoliko načina, a najjednostavniji (aproksimativni) je da se uzima se omjer R/X iz ukupne impedancije kvara ($R/X = \text{Re}(Z_k) / \text{Im}(Z_k)$), a izračunati faktor χ se tada množi s faktorom 1,15.

Snaga trolnog kratkog spoja definirana je izrazom:

$$S_{K3} = \sqrt{3} \cdot I_{K3} \cdot U_n$$

Za odabir prekidača koristi se rasklopna snaga trolnog kratkog spoja (osim u slučaju da je struja jednopolnog kratkog spoja veća).

5.2 Dvopolni kratki spoj (K2) i dvopolni kratki spoj sa zemljom (K2Z)

Dvopolni kratki spoj (K2) nastaje kratkim spajanjem dvije faze. U slučaju dodatnog spoja jedne faze sa zemljom, naziva se dvopolni kratki spoj sa zemljom (K2Z). To je nesimetrični kratki spoj čiju vrijednost određuje direktna i inverzna impedancija mreže. Kao i trolni kratki spoj, K2 i K2Z može biti:

- a) metalni kratki spoj, bez impedancije kvara
- b) kratki spoj preko impedancije kvara

Primjenom sustava simetričnih komponenti i relacija koje vrijede za dvopolni kratki spoj dobiva se izraz za struju dvopolnog kratkog spoja:

$$I_{K2} = \frac{U_n}{Z_d + Z_i} \text{ ili,}$$

s obzirom da je u distribucijskoj mreži inverzna komponenta impedancije redovito jednaka direktnoj:

$$I_{K2} = \frac{U_n}{2Z_d},$$

Iznos struje dvopolnog kratkog spoja preko impedancije kvara Z_k je:

$$I_{K2} = \frac{U_n}{2Z_d + Z_k}$$

Ako se izraz za K2 izvede preko izraza za K3, dobije se:

$$Z_d \approx Z_i \Rightarrow I_{K2} = \frac{U_n}{2Z_d} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}Z_d} = 0.86 \cdot I_{K3},$$

tj. struja dvopolnog kratkog spoja je 86% od iznosa struje trolnog kratkog spoja, što znači da je K2 uvijek manji od K3.

5.3 Zemljospoj u neuzemljenoj srednjenaponskoj mreži

Zemljospoj je spoj faznog vodiča sa zemljom u mreži s izoliranim zvjezdima energetskih transformatora (zbog tog se obično ne zove kratki spoj već zemljospoj). Kod zemljospoja, dominantne veličine koje određuju iznos struje kvara su nulti kapaciteti vodova budući da se struja kvara koja protječe kroz zemlju ne može zatvoriti kroz zvjezdišta transformatora, već samo kroz nulte kapacitete vodova (kapaciteti faznih vodiča prema zemlji).

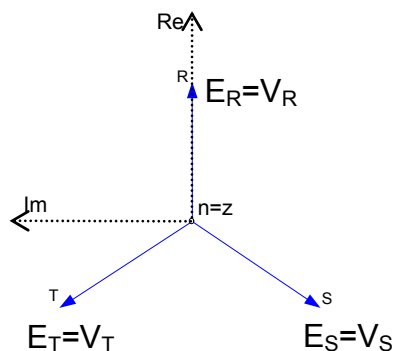
Pod pretpostavkom da su nulti kapaciteti približno jednaki, tj. da vrijedi:

$$C_{0R} = C_{0S} = C_{0T} = C_0,$$

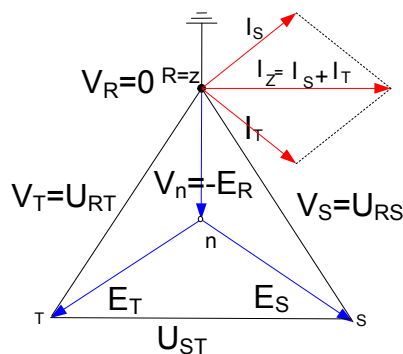
prilike za vrijeme zemljospoja prikazane su na sljedećoj slici, te na fazorskom dijagramu. Radi se o metalnom zemljospoju, bez prijelaznog otpora.

Oznake na slici su:

E_R, E_S, E_T – naponi izvora (dekundara transformatora x/SN)



Prije kvara



Za vrijeme kvara

Slika 5-4 Vektorski dijagram struja i napona u normalnom pogonu i prilikom zemljospoja u fazi R

Iz fazorskog dijagrama slijedi:

$$\bar{V}_T = \sqrt{3} \cdot E_f \cdot e^{j150^\circ}$$

$$\bar{V}_S = \sqrt{3} \cdot E_f \cdot e^{j210^\circ}$$

Dalje je:

$$\bar{I}_S = \bar{V}_S \cdot j \cdot \omega \cdot C_0 = \sqrt{3} \cdot E_f \cdot e^{j210^\circ} \cdot e^{j90^\circ} \cdot \omega C_0 = \sqrt{3} \cdot E_f \omega C_0 \cdot e^{j300^\circ}$$

$$\bar{I}_T = \bar{V}_T \cdot j \cdot \omega \cdot C_0 = \sqrt{3} \cdot E_f \cdot e^{j150^\circ} \cdot e^{j90^\circ} \cdot \omega C_0 = \sqrt{3} \cdot E_f \omega C_0 \cdot e^{j240^\circ}$$

$$\bar{I}_z = \bar{I}_S + \bar{I}_T = \sqrt{3} \cdot E_f \omega C_0 \cdot e^{j300^\circ} + \sqrt{3} E_f \omega C_0 \cdot e^{j240^\circ} =$$

$$= \sqrt{3} E_f \omega C_0 (e^{j300^\circ} + e^{j240^\circ}) = \sqrt{3} E_f \omega C_0 (\cos 300^\circ + j \sin 300^\circ + \cos 240^\circ + j \sin 240^\circ) =$$

$$= \sqrt{3} E_f \omega C_0 \left(\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -j \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} E_f \omega C_0 = -j E_f \omega \cdot 3 C_0$$

Dakle : $\bar{I}_z = -j E_f \omega \cdot 3 C_0$

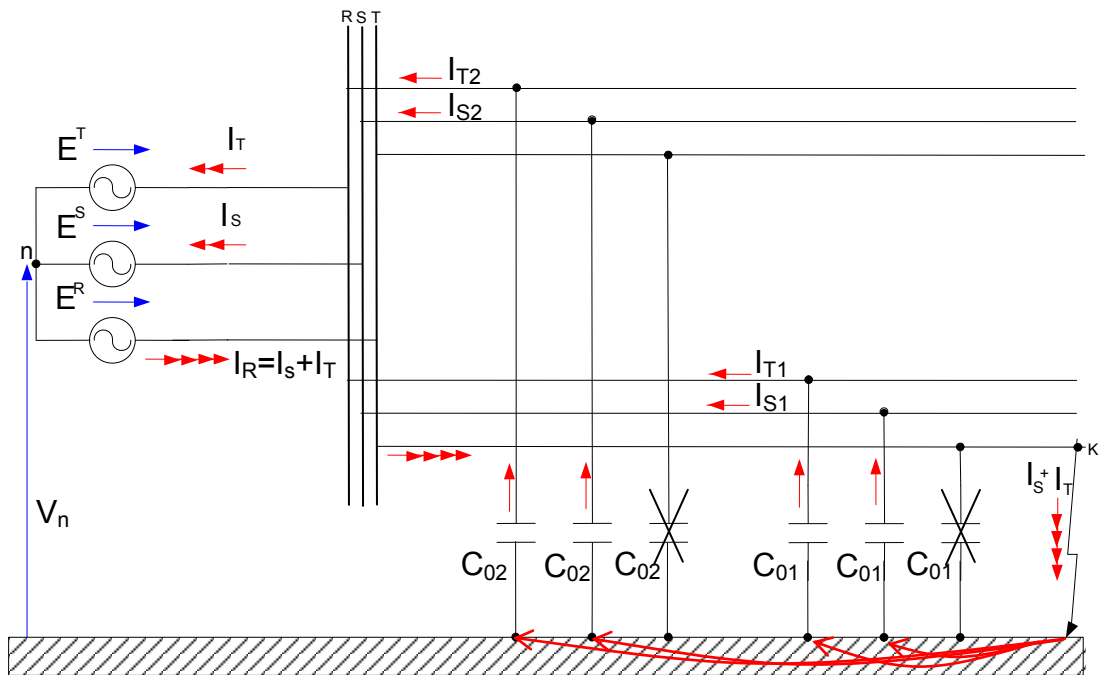
Kako je: $E_f = V_n = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$, $C_0 = \sum C_0^i$ (kapaciteti svih vodova u SN mreži u kojoj je nastupio kvar, slika 5-5)

Slijedi :

$$\bar{I}_z = -j V_n \cdot 3 \omega \cdot \sum C_0^i$$

Modul / iznos struje zemljospoja iznosi:

$$I_z = V_n \cdot 3 \omega \cdot \sum C_0^i$$



Slika 5-5 Struje i naponi pri zemljospoju u fazi R – slučaj s dva SN voda

Za slučaj da je zemljospoj nastupio preko prelaznog otpora tada je napon faze u kvaru na mjestu kvara

$$V_R = I_Z \cdot R_P = V_K$$

Napon zvjezdišta je tada:

$$V_n = V_K - E_R$$

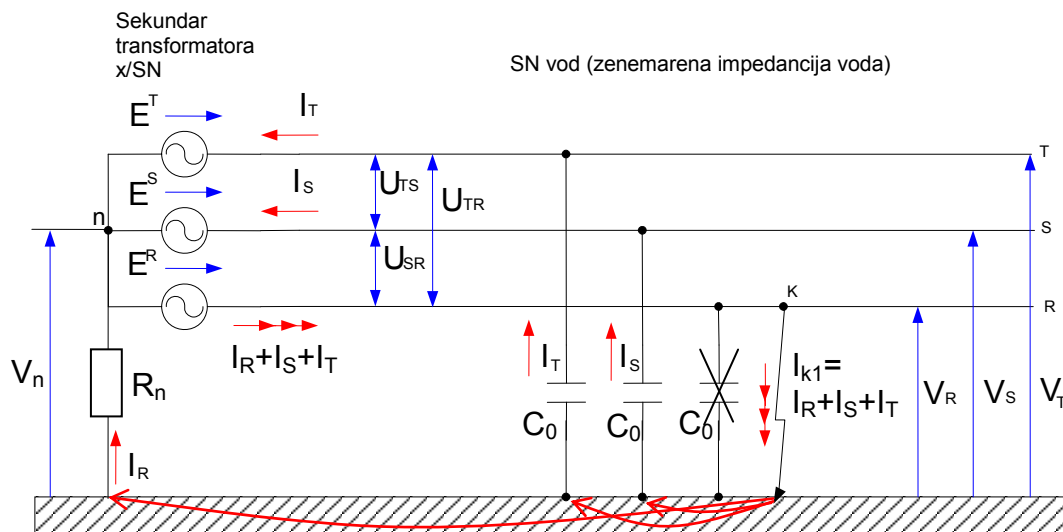
Za srednjenaponske mreže u kojima zvjezdište nije uzemljeno, sa pretežno nadzemnim vodovima, ukupni nulti kapacitet je mali pa je i struja relativno malena i iznosi do nekoliko desetaka ampera. Kod velikih kabelskih SN mreža (gradske mreže), struja zemljospoja može doseći relativno velike iznose (preko 100A).

U slučaju malih struja zemljospoja, zemljospojna zaštita se udešava na način da ne djeluje trenutno (u nekim slučajevima uopće ne reagira, već se samo signalizira zemljospoj), budući da se često radi o tzv. prolaznim kvarovima, tako da nema potrebe za isključenjem voda koji je u kvaru. Ukoliko u takvom slučaju zemljospoj potraje duže vrijeme, znači da se ne radi o prolaznom kvaru, pa se vod isključuje dok se ne ukloni kvar.

U slučaju velikih kapacitivnih struja kvara, onemogućeno je samogašenje struje zemljospoja, javljaju se prenaponi i u konačnici se zemljospoj usljed prenapona i porasta napona zdravih faza često pretvara u dvostruki kratki spoj. Također, u slučaju velikih struja zemljospoja, iste se mogu provoditi u zemlju preko uzemljivača TS 10(20)/0.4 kV što može uzrokovati visok potencijal uzemljivača koji se preko nul vodiča iznosi u niskonaponsku mrežu. Zbog toga se takvi zemljospoji moraju otkloniti u što kraćem roku, a jedan od načina zaštite je uzemljenje zvjezdišta transformatora preko malog otpora, nakon čega je struja zemljospoja dominantno radnog karaktera, lako se registrira i štiti (isključuje) vod koji je u kvaru.

5.4 Zemljospoj (kratki spoj) u srednjenaponskoj mreži uzemljenoj preko malog otpora

Ukoliko se zvjezdište transformatora uzemli preko otpora čiji je otpor znatno veći od ukupne impedancije koju čine nulti kapaciteti mreže, povećava se struja zemljospoja budući da u tom slučaju postoji još jedan povratni put struje kroz radni otpor i zvjezdište transformatora (slika 5-6).



Slika 5-6 Struje i naponi pri zemljospoju u fazi R, zvjezdište uzemljeno preko malog otpora

S mjesta kvara, „vidi se“ paralelna veza radnog otpora R i impedancije $-j \cdot 2 \cdot \frac{1}{\omega C_0}$.

Budući da iznos otpora R odabire tako da bude:

$$R \ll \left| -j \cdot 2 \cdot \frac{1}{\omega C_0} \right|, \text{ a minimalno } R < \frac{1}{3} \left| -j \cdot 2 \cdot \frac{1}{\omega C_0} \right|,$$

radna komponenta struje kroz otpor R će biti znatno veća u odnosu na kapacitivne struje koje teku kroz faze S i T, tako da će i ukupna struja biti dominantno radnog karaktera i definirana iznosom otpora R:

$$I_{k1} \approx \frac{V_n}{R_n} = \frac{U_n}{\sqrt{3} R_n}$$

Npr. za uzemljenje 10 kV-tne mreže može se uzeti $R_n = 40 \Omega$, pa je

$$I_{k1} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 40} = 144 \text{ A } (\approx 150 \text{ A})$$

Npr. za 35 kV redovito se uzima $R_n = 70 \Omega$, pa je

$$I_{k1} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 70} = 289 \text{ A } (\approx 300 \text{ A})$$

Točan proračun se vrši prema općenitoj formuli:

$$I_{K1} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{2Z_d + Z_0 + 3R_n + 3Z_K}$$

pri čemu je:

$2Z_d$ - dvostruka direktna (direktna + inverzna) i nulta impedancija mreže (pojna mreža + TS + vod),

Z_0 - nulta impedancija mreže (pojna mreža + TS + vod),

R_n - djelatni otpor preko kojeg se uzemljuje zvjezdište,

Z_K - impedancija na mjestu kvara.

Osim varijante s neuzemljenim zvjezdištem i zvjezdištem uzemljenim preko malog otpora, u svijetu se često koristi i varijanta rezonantnog uzemljenja (preko tzv. Petersenove prigušnice). Osnovni princip kompenzacije struje zemljospoja svodi se na poništenje dozemnih kapaciteta upotrebom prigušnice kojom se uzemljuje zvjezdište transformatora. Ukoliko se odgovarajuća impedancija prigušnice odabere na način da vrijedi:

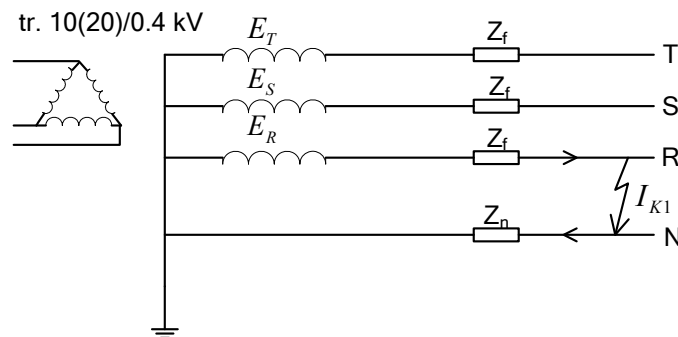
$$\omega L_n = \frac{1}{\omega \sum C_0'}$$

sa mjesta zemljospoja „vidi se“ beskonačna impedancija (paralelna rezonancija prigušnice za uzemljenje i kapaciteta svih vodova), tako da na mjestu kvara ne teče struja, nego samo u LC krugu.

Najveća prednost kompenzacijske prigušnice je samogasivost većine zemljospoja i potpuna bezopasnost za prenošenje visokih potencijala uzemljivača u NN mrežu, a glavni nedostatak je kompliciranija relejna zaštita visoka cijena.

5.5 Jednopolni kratki spoj u niskonaponskoj mreži

Zvjezdište sekundara transformatora 10(20)/0.4 kV je redovito uzemljeno, što omogućava nastajanje jednopolnog kratkog spoja (slika 5-7).



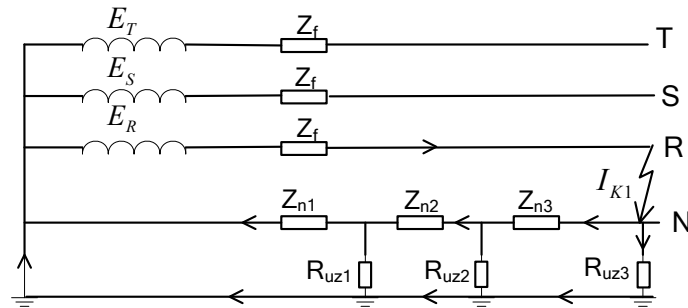
Slika 5-7 Jednopolni kratki spoj u niskonaponskoj mreži

Općeniti izraz za proračun struje jednopolnog kratkog spoja je:

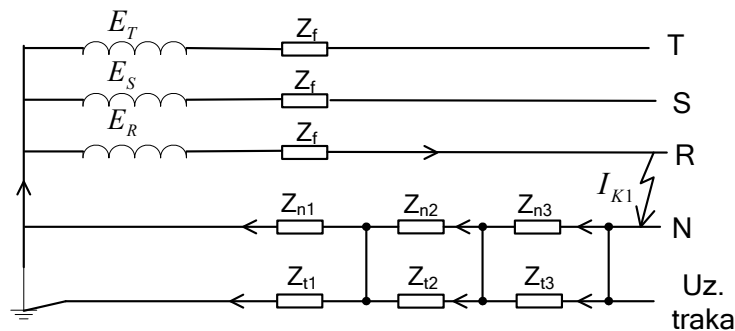
$$I_{K1} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{Z_d + Z_i + Z_0} \approx \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{2Z_d + Z_0},$$

gdje su Z_d i Z_0 direktna odnosno nulta impedancija mreže od pojne točke do mjesta kvara.

U slučaju uzemljenja nul vodiča duž trase nadzemnog NN voda ili polaganja dodatnih traka za uzemljenje (koja se redovito polaže uz kableske vodove), struja se može zatvoriti kroz zemlju i kroz traku, kao što je prikazano na slijedećim slikama:



Slika 5-8 Zatvaranje struje jednopolnog kratkog spoja kroz nul vodič i zemlju (uzemljivače stupova)



Slika 5-9 Zatvaranje struje jednopolnog kratkog spoja kroz nul vodič i traku za uzemljenje

Direktna komponenta impedancije mreže preko koje se napaja jednopolni kratki spoj u NN mreži se sastoji iz:

- impedancije niskonaponskog voda: Z_{NNV}^d
- impedancije TS 10/0.4 kV: Z_{TS}^d
- impedancije srednjenaponskog voda (preračunato na 0.4kV-nu stranu): Z_{SNV}^d
- ekvivalentne impedancije pojne mreže (može se praktički uvijek zanemariti: $Z_m^d=0$).

Budući da je TS 10/0.4 kV praktički uvijek u grupi spoja Dyn odnosno Yzn, nulta impedancija mreže koja napaja jednopolni kratki spoj u NN mreži se sastoji od:

- impedancija niskonaponskog voda (u kojoj može sudjelovati impedancija faznog vodiča, nul vodiča, impedancija trake za uzemljenje, uzemljivači stupova): Z_{NNV}^0

- o impedancija TS 10/0.4 kV: Z_{TS}^0

Dakle, struja I_{K1} se može računati pomoću izraza:

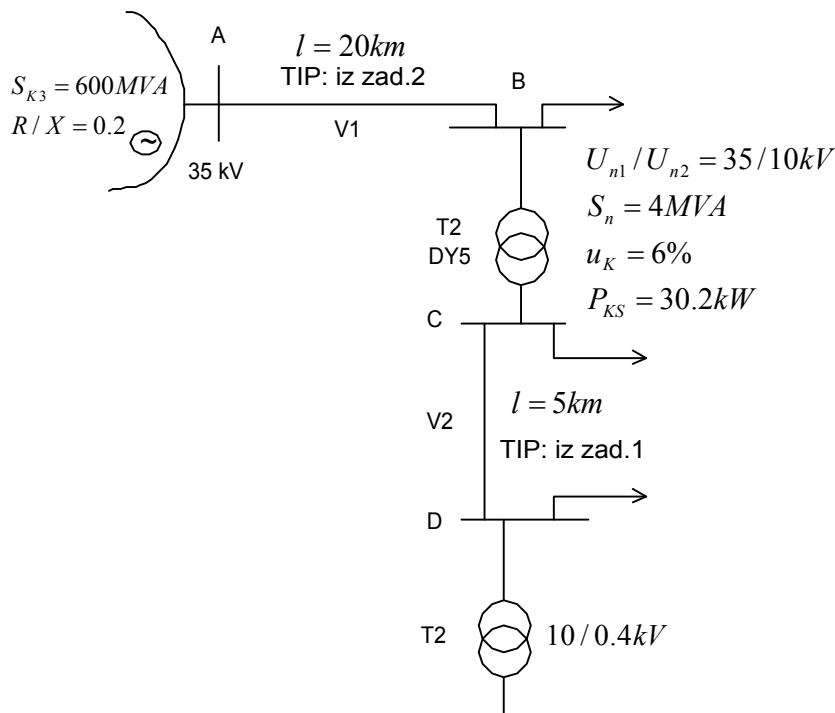
$$I_{K1} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{2(Z_{NNV}^d + Z_{TS}^d + Z_{SNV}^d + Z_m^d) + Z_{NNV}^0 + Z_{TS}^0}$$

↓
može se zanemariti...

ZADATAK 4

Za mrežu sa slike izračunati:

- struju i snagu trolnog kratkog spoja (K3) za čvorove A,B,C,D te na pola voda V2
- iznose struja u svim elementima mreže u slučaju I_{K3} na čvoru D
- struju trolnog kratkog spoja (K3) za čvorove C i D, uz zanemarenu impedanciju mreže ($Z_m = 0$); usporediti razliku u odnosu na varijantu a) u kojoj je uvažena impedancija pojne mreže
- struju dvopolnog kratkog spoja (K2) za čvorove A,B,C,D te na pola voda V2



- Impedancije elemenata mreže su:

$$Z_{V2|10} = Z_{dV2} \cdot l = (1,381 + j0,404) \cdot 5 = 6,905 + j2,04 \Omega$$

$$Z_{V2|35} = Z_{V2|10} \cdot \left(\frac{35}{10}\right)^2 = 84,59 + j25 \Omega$$

$$Z_{V1}|_{35} = Z_{dV1} \cdot l = (0,291 + j0,414) \cdot 20 = 5,82 + j8,28\Omega$$

$$Z_{V1}|_{10} = Z_{V1}|_{35} \cdot \left(\frac{10}{35}\right)^2 = 0,475 + j0,676\Omega$$

$$Z_{T1}|_{10} = R_d + jX_d = P_k \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_n^2} + j \frac{u_x}{100} \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_n} = 0,188 + j1,487\Omega$$

$$Z_{T1}|_{35} = P_k \cdot \frac{U_{n2}^2}{S_n^2} + j \frac{u_x}{100} \cdot \frac{U_{n2}^2}{S_n} = 2,3 + j18,22\Omega$$

$$Z_m|_{35} = \frac{U_n^2}{S_{K3}} = \frac{35^2}{600} = 2,042\Omega$$

$$X_m|_{35} = \frac{Z_m}{\sqrt{\left(\frac{R}{X}\right)^2 + 1}} = 2\Omega, \quad R_m|_{35} = X_m|_{35} \cdot \frac{R}{X} = 0,4\Omega$$

$$Z_m|_{35} = 0,4 + j2\Omega$$

$$Z_m|_{10} = Z_m|_{35} \cdot \left(\frac{10}{35}\right)^2 = 0,0327 + j0,163\Omega$$

a) Struje I_{K3} i snage S_{K3} po čvorovima:

Čvor A (35 kV):

$$Z_d^A = Z_m|_{35} = 0,4 + j2\Omega$$

$$I_{K3}^A = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d^A} = \frac{35}{\sqrt{3}(0,4 + j2)} = 9,9 \angle -78,7^\circ \text{ kA}$$

$$S_{K3}^A = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{K3}^A = \sqrt{3} \cdot 35 \cdot 9,9 = 600 \text{ MVA}$$

Čvor B (35 kV):

$$Z_d^B = Z_m|_{35} + Z_{V1}|_{35} = 6,22 + j10,28$$

$$I_{K3}^B = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d^B} = \frac{35}{\sqrt{3}(6,22 + j10,28)} = 1,682 \angle -58,8^\circ \text{ kA}$$

$$S_{K3}^B = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{K3}^B = \sqrt{3} \cdot 35 \cdot 1,682 = 101,9 \text{ MVA}$$

Čvor C (10 kV):

$$Z_d^C = Z_m|_{10} + Z_{V1}|_{10} + Z_{T1}|_{10} =$$

$$= 0,0327 + j0,163 + 0,475 + j0,676 + 0,188 + j1,487 = 0,696 + j2,326\Omega$$

$$I_{K3}^C = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d^C} = \frac{10}{\sqrt{3}(0,696 + j2,326)} = 0,68 - j2,27 \text{ kA} = 2,378 \angle -73,3^\circ \text{ kA}$$

$$S_{K3}^C = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{K3}^C = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2,378 = 41,2 \text{ MVA}$$

Čvor D (10 kV):

$$Z_d^C = Z_m|_{10} + Z_{V1}|_{10} + Z_{T1}|_{10} + Z_{V2}|_{10} = Z_d^C + Z_{V2}|_{10} = 7,6 + j4,37 \Omega$$

$$I_{K3}^D = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d^D} = \frac{10}{\sqrt{3}(7,6 + j4,37)} = 0,57 - j0,33 \text{ kA} = 0,659 \angle -29,39^\circ \text{ kA}$$

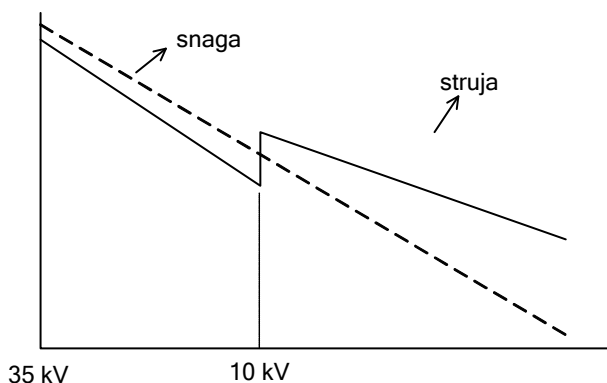
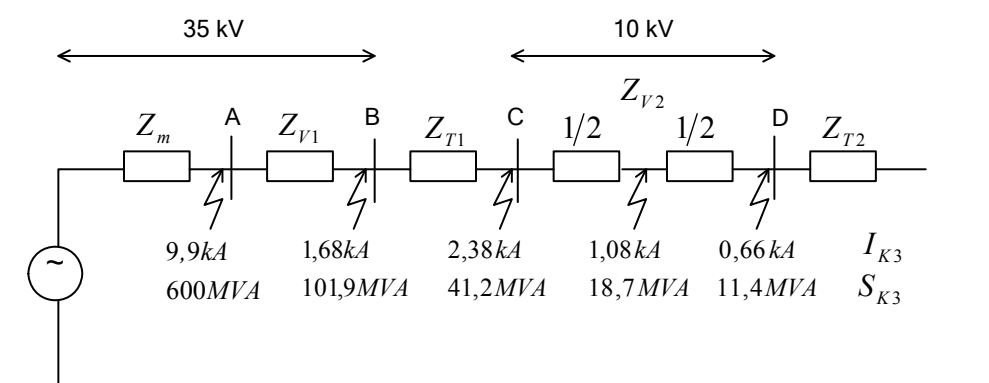
$$S_{K3}^D = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{K3}^D = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,659 = 11,4 \text{ MVA}$$

Na pola voda V2:

$$Z_d = Z_m|_{10} + Z_{V1}|_{10} + Z_{T1}|_{10} + \frac{Z_{V2}|_{10}}{2} = 4,148 + j3,346 \Omega$$

$$I_{K3} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d} = \frac{10}{\sqrt{3}(4,148 + j3,346)} = 0,84 - j0,68 \text{ kA} = 1,08 \angle -38,9^\circ \text{ kA}$$

$$S_{K3} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{K3} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 1,08 = 18,7 \text{ MVA}$$



b) Struje u svim elementima mreže i naponi svih čvorova u slučaju troležnog kratkog spoja u čvoru D

Struje:

$$I_{K3}^D = 0,659 \angle -29,39^\circ \text{ (izračunato u prvom dijelu zadatka)}$$

$$I_{V2} = 0,659 \text{ kA}$$

$$I_{T1}|_{10} = 0,659 \text{ kA}$$

$$I_{T1}|_{35} = I_{T1}|_{10} \cdot \frac{10}{35} = 0,188 \text{ kA}$$

$$I_{V1} = I_{T1}|_{35} = 0,188 \text{ kA}$$

$$I_m = I_{V1} = 0,188 \text{ kA}$$

Naponi:

$V_D=0$ (kratki spoj je u točki D)

$$V_C = I_{K3}^D \cdot Z_{V2} = 4,74 \angle -13,4^\circ = \frac{8,21}{\sqrt{3}} \angle -13,4^\circ \text{ kV}$$

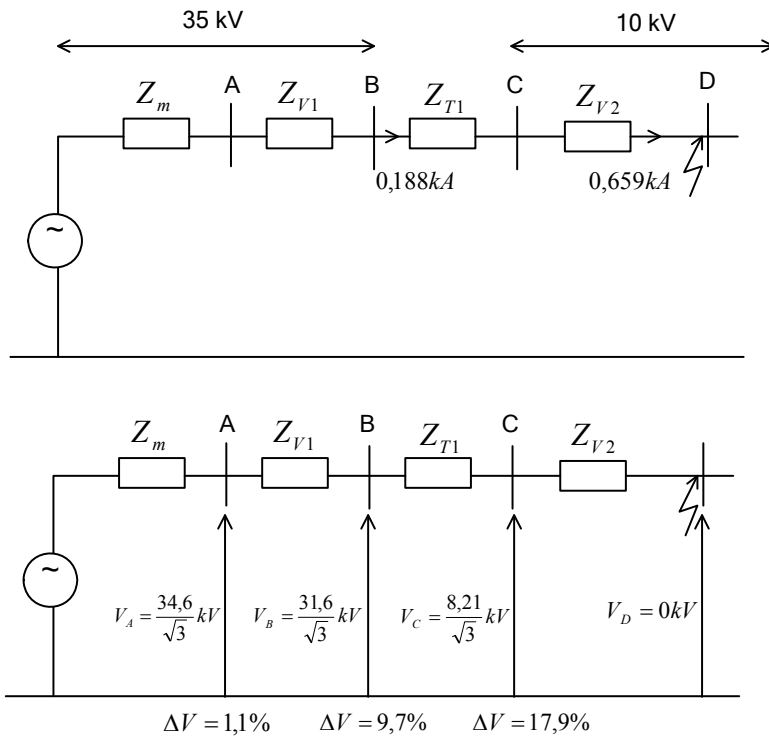
$$V_B|_{10} = I_{K3}^D \cdot (Z_{V2}|_{10} + Z_{T1}|_{10}) = 5,218 \angle -3,4^\circ \text{ kV}$$

$$V_B|_{35} = V_B|_{10} \cdot \frac{35}{10} = 18,26 \angle -3,4^\circ = \frac{31,63}{\sqrt{3}} \angle -3,4^\circ \text{ kV}$$

$$V_A|_{10} = I_{K3}^D \cdot (Z_{V2}|_{10} + Z_{T1}|_{10} + Z_{V1}|_{10}) = 5,702 \angle -0,13^\circ \text{ kV}$$

$$V_A|_{35} = V_A|_{10} \cdot \frac{35}{10} = 19,96 \angle -0,13^\circ = \frac{34,57}{\sqrt{3}} \angle -0,13^\circ \text{ kV}$$

Napomena: Kutevi struja i napona u 35 kV-tnoj mreži izračunati su bez uvažavanja zakreta kuta kojeg uvjetuje grupa spoja transformatora 35/10 kV



c) Uz zanemarenje impedancije pojne mreže struje I_{K3} na čvorovima C i D su:

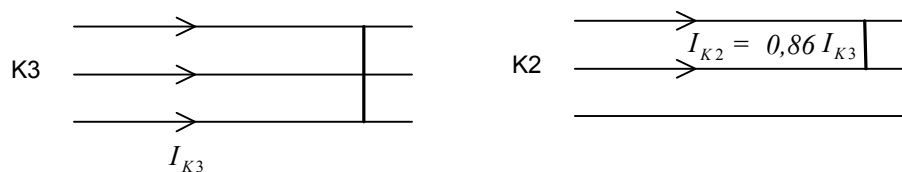
$$|I_{K3}^C| = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_{V1}|_{10} + Z_{T1}|_{10})} = 2,55 \text{ kA}$$

Usporedbom ove vrijednosti sa prije dobivenom vrijednošću struje I_{K3} na čvoru C bez zanemarenja Z_m , vidi se da greška iznosi 7%.

$$|I_{K3}^D| = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_{V1}|_{10} + Z_{T1}|_{10} + Z_{V2}|_{10})} = 0,667 \text{ kA}$$

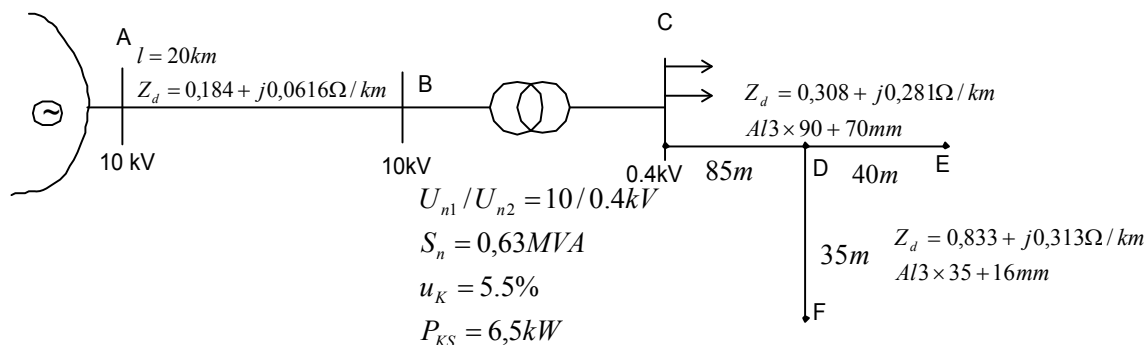
Uspoređivanjem na isti način kao u prethodnom slučaju dobiva se greška od 1,2%.

e) Pri dvopolnom kratkom spoju (I_{k2}), struje iznose 0,86% odnosu na trolpolni kratki spoj



ZADATAK 5

Izračunati struju trolpolnog kratkog spoja na niskonaponskom izvodu u točkama C, E i F, uz pretpostavku da je $Z_m = 0$.



Rješenje

Kako su čvorovi u kojima se računa KS na 0,4 kV-tnom naponskom nivou, potrebno je sve veličine preračunati na 0,4 kV.

$$Z_{V_SN}|_{10} = Z_{dV_SN} \cdot l = (0,184 + j0,0616) \cdot 15 = 2,76 + j0,92 \Omega$$

$$Z_{V_SN}|_{0,4} = Z_{V_SN}|_{10} \cdot \left(\frac{0,4}{10}\right)^2 = 0,0044 + j0,0015 \Omega$$

$$|Z_T| = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{0,4^2}{0,63} = 0,014 \Omega$$

$$R_T = P_{ks} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2} = 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,4^2}{0,63^2} = 0,0026 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 0,0137 \Omega$$

$$Z_T = 0,0026 + j0,0137 \Omega$$

$$Z_{NN_CD} = Z_d \cdot l = (0,308 + j0,281) \cdot 0,085 = 0,0262 + j0,0239 \Omega$$

$$Z_{NN_DE} = Z_d \cdot l = (0,308 + j0,281) \cdot 0,04 = 0,0123 + j0,0112 \Omega$$

$$Z_{NN_DF} = Z_d \cdot l = (0,833 + j0,313) \cdot 0,035 = 0,0292 + j0,011 \Omega$$

$$I_{K3}^C = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d} = \frac{U_n}{\sqrt{3} (Z_{V_SN}|_{0,4} + Z_T)} = \frac{0,4}{\sqrt{3} (0,007 + j0,0152)} =$$

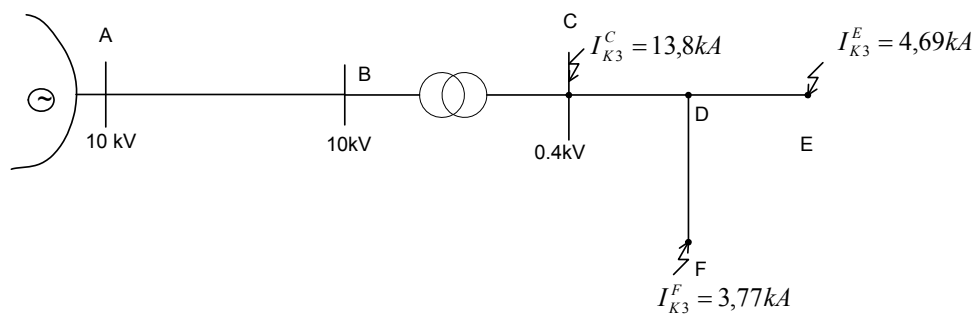
$$= 5,79 - j12,53 \text{ kA} = 13,8 \angle -65,2^\circ \text{ kA}$$

$$I_{K3}^E = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d} = \frac{U_n}{\sqrt{3} (Z_{V_SN}|_{0,4} + Z_T + Z_{NN_CD} + Z_{NN_DE})} = \frac{0,4}{\sqrt{3} (0,0317 + j0,0377)} =$$

$$= 3,02 - j3,59 \text{ kA} = 4,69 \angle -49,9^\circ \text{ kA}$$

$$I_{K3}^F = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d} = \frac{U_n}{\sqrt{3}(Z_{V_SN}|_{0.4} + Z_T + Z_{NN_CD} + Z_{NN_DF})} = \frac{0.4}{\sqrt{3}(0,0485 + j0,0374)} =$$

$$= 2,98 - j2,3 \text{ kA} = 3,77 \angle -37,6^\circ \text{ kA}$$



ZADATAK 6

Za mrežu iz zadatka 5 izračunati:

- struje jednopolnog kratkog spoja na niskonaponskom izvodu u čvorovima C, E i F uz pretpostavku $Z_m = 0$
- struju jednopolnog kratkog spoja na niskonaponskom izvodu u čvoru C uz uvaženu Z_m , preko parametara:
 $S_{K3} = 100 \text{ MVA}$, $S_{K1} \approx 0 \text{ MVA}$, $R/X = 0$
- Koliko je metara moguće produljiti podizvod D-F da struja I_{K1} u točki F bude iznad 300 A?

Podaci nultih impedancija su:

N.N. vod Al 3*95+70 mm : $Z_0 = 1,62 + j1,12 \Omega/\text{km}$

N.N. vod Al 3*35+16 mm : $Z_0 = 6,24 + j1,25 \Omega/\text{km}$

TS 10/0.4 kV : uzeti $Z_0 = Z_d$.

Rješenje

Iz zadatka 5 poznate su vrijednosti direktnih impedancija:

$$Z_{dV_SN}|_{10} = 2,76 + j0,92 \Omega$$

$$Z_{dV_SN}|_{0.4} = 0,0044 + j0,0015 \Omega$$

$$Z_T^d = Z_T^0|_{0.4} = 0,0026 + j0,0137 \Omega$$

a)

Čvor C:

$$Z^d = Z_{V-SN}^d|_{0,4} + Z_T^d|_{0,4} = 0,007 + j0,0152\Omega$$

$$Z^0 = Z_T^0|_{0,4} = 0,0026 + j0,0137\Omega$$

$$I_{K1}^C = \frac{\sqrt{3}U_n}{2Z_d + Z_0} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,4}{0,0166 + j0,0441} = 5,18 + j13,76kA = 14,7 \angle -69,4^\circ \text{ kA}$$

Čvor E:

$$Z_{C-E}^0 = Z^0 (\Omega / km) \cdot l(km) = (1,62 + j1,12) \cdot 0,125 = 0,2025 + j0,14\Omega$$

$$Z_{C-E}^d = Z_{C-D}^d + Z_{D-E}^d = 0,0385 + j0,0351\Omega \text{ (iz zadatka 5)}$$

$$Z^d = Z_{V-SN}^d|_{0,4} + Z_T^d|_{0,4} + Z_{C-E}^d = 0,0455 + j0,0503\Omega$$

$$Z^0 = Z_T^0|_{0,4} + Z_{C-E}^0 = 0,2051 + j0,1537\Omega$$

$$I_{K1}^E = \frac{\sqrt{3}U_n}{2Z_d + Z_0} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,4}{0,2961 + j0,2544} = 1,35 - j1,16kA = 1,77 \angle -40,7^\circ \text{ kA}$$

Čvor F:

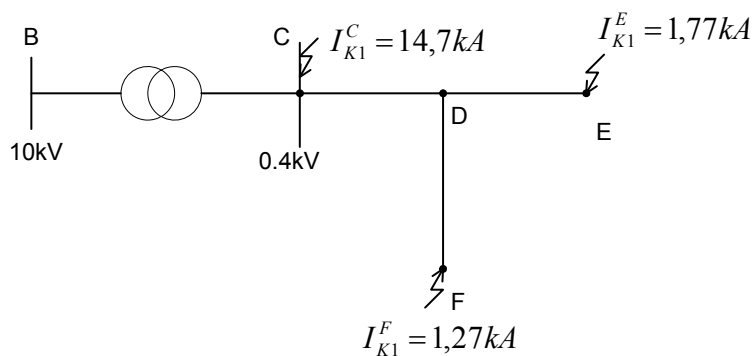
$$Z_{C-F}^0 = Z_{C-D}^0 + Z_{D-F}^0 = (1,62 + j1,12) \cdot 0,085 + (6,24 + j1,25) \cdot 0,035 = 0,3561 + j0,139\Omega$$

$$Z_{C-F}^d = Z_{C-D}^d + Z_{D-F}^d = 0,0554 + j0,0349\Omega \text{ (iz zadatka 5)}$$

$$Z^d = Z_{V-SN}^d|_{0,4} + Z_T^d|_{0,4} + Z_{C-F}^d = 0,0624 + j0,0501\Omega$$

$$Z^0 = Z_T^0|_{0,4} + Z_{C-F}^0 = 0,3587 + j0,1527\Omega$$

$$I_{K1}^F = \frac{\sqrt{3}U_n}{2Z_d + Z_0} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,4}{0,4835 + j0,2529} = 1,125 - j0,59kA = 1,27 \angle -27,6^\circ \text{ kA}$$



b)

Budući da su za pojnu mrežu 10 kV zadani podaci $S_{K3} = 100 \text{ MVA}$, $S_{K1} \approx 0 \text{ MVA}$, $R/X = 0$, vrijedi:

$$X_m|_{10} = Z_m = \frac{U_n^2}{S_{K3}} = \frac{10^2}{100} = 1\Omega$$

$$X_m|_{0,4} = X_m|_{10} \cdot \left(\frac{0,4}{10}\right)^2 = 0,004\Omega$$

Do točke C, nulta i direktna impedancija iznose:

$$Z^0 = Z_T^0|_{0,4} = 0,0026 + j0,0137\Omega$$

$$Z^d = Z_{V-SN}^d|_{0,4} + Z_T^d|_{0,4} + jX_m|_{0,4} = 0,007 + j0,0192\Omega$$

$$I_{K1}^C = \frac{\sqrt{3}U_n}{2Z_d + Z_0} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,4}{0,0166 + j0,0521} = 3,846 - j12,07kA = 12,67\angle -72,3^\circ \text{ kA}$$

c)

Mora biti $I_{K1} = 0,3 \text{ kA}$ u točki G (nakon produljenja podizvoda od točke F do nove točke G)

- nulta i direktna impedancija se povećavaju za impedanciju niskonaponskog izvoda F-G duljine l , istog tipa kao i D-F, pa je dodatna impedancija:

$$Z_{F-G}^0 = (6,24 + j1,25) \cdot l$$

$$Z_{F-G}^d = (1,62 + j1,12) \cdot l$$

$$I_{K1}^G = \frac{\sqrt{3}U_n}{2Z_d + Z_0} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{2(Z_F^d + Z_{F-G}^d) + Z_F^0 + Z_{F-G}^0} = \frac{\sqrt{3}U_n}{(2Z_F^d + Z_F^0) + (2Z_{F-G}^d + Z_{F-G}^0)}$$

$$0,3 = \left| \frac{\sqrt{3} \cdot 0,4}{(0,4835 + j0,2529) + 2(1,62 + j1,12) \cdot l + (6,24 + j1,25) \cdot l} \right|$$

$$0,3 = \left| \frac{\sqrt{3} \cdot 0,4}{(0,4835 + j0,2529) + l(9,48 + j3,49)} \right|$$

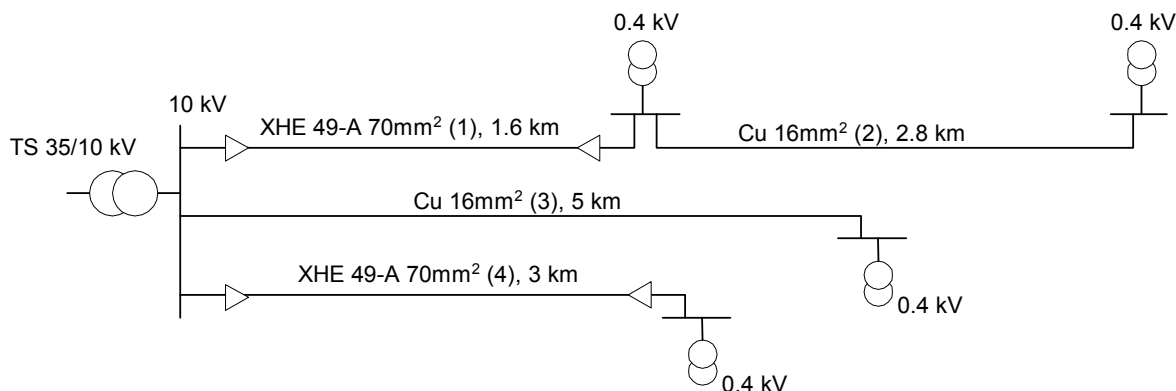
Rješavanjem gornje jednadžbe s jednom nepoznanicom (razlaganjem nazivnika na realni i imaginarni dio) dobiva se $l = 0,174 \text{ km}$.

ZADATAK 7

Zadana je kombinirana nadzemno/kabelska 10 kV mreža s podacima prema slici. Nadzemne dionice su ostvarene sa faznim vodičima iz bakra presjeka 16 mm^2 , s podacima navedenim u zadatku 1. Visina drvenog stupa (do gornjeg nosača izolatora) iznosi 9 m. Kabelski vodovi su s izolacijom iz umreženog polietilena, tipa XHE 49-A $3 \cdot 1 \cdot 70 \text{ mm}^2$. Odredite struju zemljospoja do kojeg je došlo na sredini 10 kV zračnog voda broj 3. Nulti kapaciteti vodova su:

- za zračni vod: $C_{0zv} = 3,995 \cdot 10^{-9} \text{ F/km}$

- za kabelske vodove: $C_{0KB} = 0,20 \cdot 10^{-6} F / km$.



Rješenje

Odgovarajući kapaciteti (po fazi) zračnih vodova 2 i 3 iznose:

$$C_0^2 = C_{0ZV} \cdot l_2 = 3,995 \cdot 10^{-9} F / km \cdot 2,8 km = 11,186 \cdot 10^{-9} F$$

$$C_0^3 = C_{0ZV} \cdot l_3 = 3,995 \cdot 10^{-9} F / km \cdot 5 km = 19,975 \cdot 10^{-9} F$$

Kapacitet (po fazi) kabelskih vodova 1 i 4 iznose:

$$C_0^1 = C_{0KB} \cdot l_1 = 0,20 \cdot 10^{-6} F / km \cdot 1,6 km = 0,32 \cdot 10^{-6} F = 320 \cdot 10^{-9} F$$

$$C_0^4 = C_{0KB} \cdot l_4 = 0,20 \cdot 10^{-6} F / km \cdot 3 km = 0,6 \cdot 10^{-6} F = 600 \cdot 10^{-9} F$$

Ukupni nulti kapacitet mreže (po fazi) iznosi:

$$C_{0uk} = \sum_{i=1}^4 C_0^i = (320 + 11,186 + 19,975 + 600) \cdot 10^{-9} = 951,16 \cdot 10^{-9} F$$

Struja zemljospoja I_Z računa se pomoću izraza:

$$I_z = V_n \cdot 3\omega \cdot \sum_{i=1}^4 C_0^i = V_n \cdot 3\omega \cdot C_{0uk}$$

pri čemu je:

$$V_n = \frac{10}{\sqrt{3}} kV = 5,773 kV$$

Struja zemljospoja je:

$$I_Z = 5,773 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 100\pi \cdot 0,951 \cdot 10^{-6} = 5,17 \text{ A}$$

6 PRORAČUN STACIONARNIH STANJA

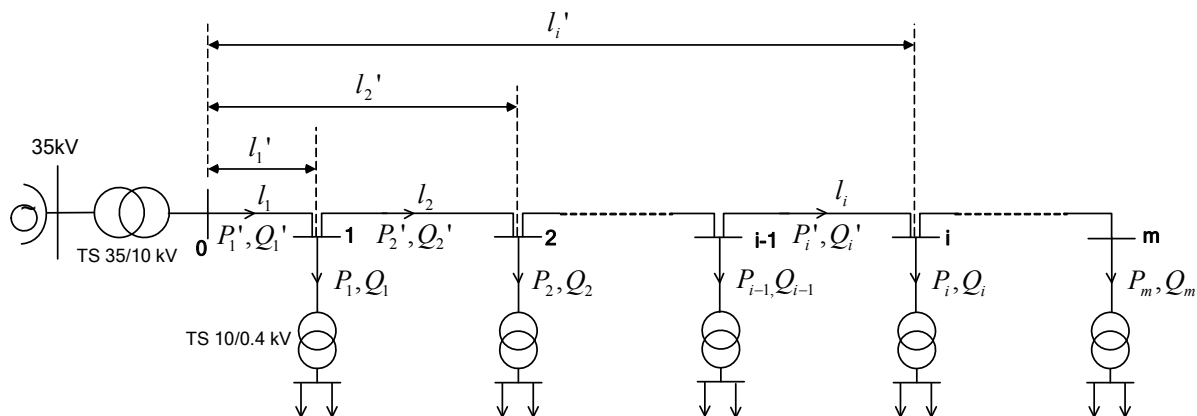
Proračun stacionarnog stanja distribucijske mreže podrazumijeva:

- raspodjelu tokova radnih i jalovih snaga po elementima dijela distribucijske mreže
- proračun apsolutnih i relativnih padova napona u mreži
- proračun strujnog opterećenja elemenata distribucijske mreže i dimenzioniranje presjeka vodiča i snage transformatora
- proračun gubitaka radne (eventualno jalove) snage i energije u mreži

Proračuni se mogu raditi aproksimativnim metodama („ručno“), što podrazumijeva određena zanemarenja i pojednostavljenje modela distribucijske mreže, ili numeričkim metodama pomoću odgovarajućeg softvera.

6.1 Aproksimativni proračun tokova snaga i struja u distribucijskoj mreži

Na slijedećoj slici prikazana je srednjenaponska distributivna mreža sa označenim snagama i duljinama dionica.



Slika 6-1 Tokovi snaga u distribucijskoj mreži - oznake

Oznake na slici imaju sljedeća značenja:

l_i - duljina i -te dionice voda, $i \in [1, m]$,

l_i' - duljina voda od početka voda (pojne trafostanice) do i -tog potrošača ($i \in [1, m]$):

$$l_i' = \sum_{k=1}^i l_k$$

P_i, Q_i - djelatna i jalova snaga i -tog ($i \in [1, m]$) potrošača priključenom u čvoru i (potrošači u ovom primjeru su TS 10/0.4 kV)

P_i', Q_i' - djelatna i jalova snaga koja protječe i -tom dionicom voda, $i \in [1, m]$

S obzirom na radijalno (jednostrano) napajanje, snage koje teku i-tom dionicom voda jednake su zbroju snaga svih potrošača „desno“ od i-te dionice:

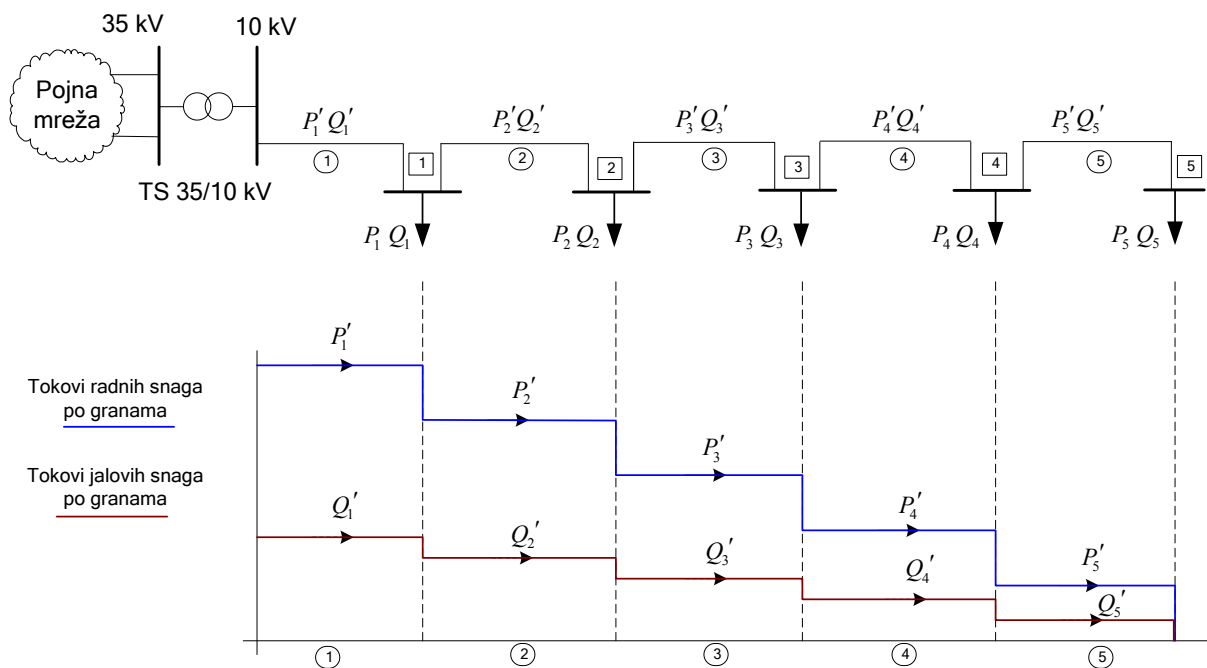
$$P_i' = \sum_{k=i}^m P_k$$

$$Q_i' = \sum_{k=i}^m Q_k$$

tj. na opisani način mogu se dobiti tokovi radnih i jalovih snaga koje teku pojedinim dionicama mreže ukoliko je poznata snaga potrošača u svakom čvoru.

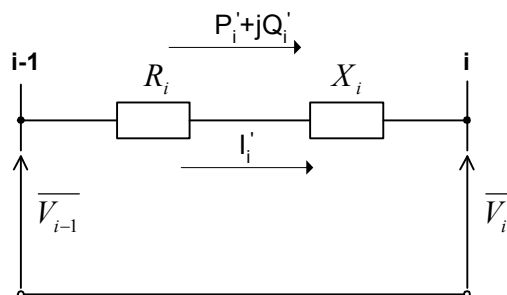
Ovo je aproksimativni proračun jer su zanemareni gubici u vodovima (oni inače mogu iznositi do nekoliko % ukupne snage).

Na slijedećoj slici prikazan je grafički rezultat ovakvog proračuna, tj. tokovi radnih i jalovih snaga kroz dionice 10 kV voda (5 dionica i 5 potrošača). Prvom dionicom voda protječu snage jednake sumi snaga svih potrošača priključenih na vod, na drugoj dionici snage su umanjene za potrošnju prvog potrošača itd. Najopterećenija je uvijek prva dionica voda.



Slika 6-2 Grafički prikaz tokova snaga u radijalnoj distribucijskoj mreži (izvod 10 kV)

Na slijedećoj slici prikazana je i-ta dionica voda s odgovarajućim oznakama.



Slika 6-3 i-ta dionica voda - oznake

Ovdje su:

R_i - radni otpor i-te dionice voda:

$$R_i = r_1 \cdot l_i$$

r_1 - jedinični radni otpor voda:

$$r_1 = \frac{1}{\kappa \cdot q}$$

κ – specifična električna vodljivost materijala od kojeg je izrađen vod (pri pogonskoj temperaturi)

q – površina poprečnog presjeka faznog vodiča

X_i - reaktancija i-te dionice voda:

$$X_i = x_1 \cdot l_i$$

x_1 - jedinična reaktancija voda

$\overline{V}_{i-1}, \overline{V}_i$ - naponi na početku i kraju i-te dionice voda (čvorovi i-1, i)

\overline{I}_i' - struja koja protječe i-tom dionicom voda

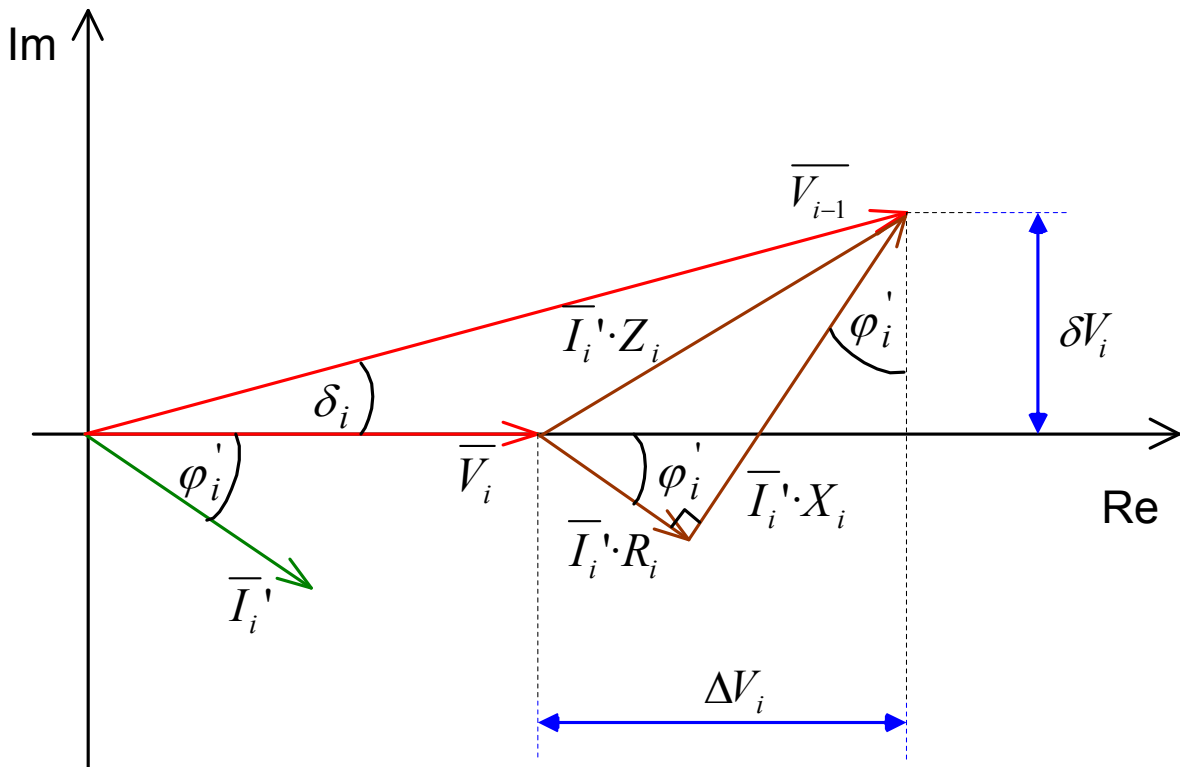
Ukoliko je poznata radna i jalova snaga koje protječe i-tom dionicom voda, odgovarajuća struja dionice je:

$$I_i' = \frac{S_i'^*}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{(P_i' + jQ_i')^*}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

tj. može se odrediti struja koja teče svakom dionicom voda (uz zanemarenje gubitaka i pad napona).

6.2 Aproximativni proračun padova napona

Iz slike 6-3 za i-tu dionicu voda može se iscrtati fazorski dijagram prikazan na sljedećoj slici :



Slika 6-4 Fazorski dijagram struja i napona i-te dionice voda

Pad napona na i-toj dionici čini radna i jalova komponenta, ali se isti može rastaviti na projekcije na realnoj i imaginarnoj osi (sa referentnim naponom na početku dionice).

Iz fazorskog dijagrama slijedi:

$$\begin{aligned}\Delta V_i &= I_i' \cdot R_i \cdot \cos \varphi_i' + I_i' \cdot X_i \cdot \sin \varphi_i' \\ \delta V_i &= I_i' \cdot X_i \cdot \cos \varphi_i' - I_i' \cdot R_i \cdot \sin \varphi_i' \\ V_{i-1} &= \sqrt{(V_i + \Delta V_i)^2 + \delta V_i^2}\end{aligned}$$

Zadnji izraz se može napisati u sljedećem obliku:

$$V_{i-1} = (V_i + \Delta V_i) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\delta V_i}{V_i + \Delta V_i} \right)^2}$$

Obično je zadovoljena sljedeća nejednakost:

$$\left(\frac{\delta V_i}{V_i + \Delta V_i} \right)^2 \ll 1$$

pa slijedi:

$$V_{i-1} \approx V_i + \Delta V_i$$

Stoga se pad napona na i-toj dionici računa pomoću sljedećeg izraza:

$$\Delta V_i = I_i' \cdot R_i \cdot \cos \varphi_i' + I_i' \cdot X_i \cdot \sin \varphi_i' \quad / \cdot 3V_i$$

$$3V_i \cdot \Delta V_i = 3 \cdot V_i \cdot \bar{I}_i \cdot \cos \varphi_i \cdot R_i + 3V_i \cdot \bar{I}_i \cdot \sin \varphi_i \cdot X_i$$

$$3V_i \cdot \Delta V_i = P_i \cdot R_i + Q_i \cdot X_i$$

$$\sqrt{3} \cdot V_i \cdot \sqrt{3} \cdot \Delta V_i = P_i \cdot R_i + Q_i \cdot X_i$$

gdje su:

$$\sqrt{3} \cdot V_i = U_i \text{ - linijski napon } i\text{-tog potrošača}$$

$$\sqrt{3} \cdot \Delta V_i = \Delta U_i \text{ - linijski pad napona na } i\text{-toj dionici}$$

Dakle,

$$U_i \cdot \Delta U_i = P_i \cdot R_i + Q_i \cdot X_i \quad / : U_i$$

$$\Delta U_i = \frac{P_i \cdot R_i}{U_i} + \frac{Q_i \cdot X_i}{U_i}$$

Ukupni linijski pad napona na cijelom vodu jednak je sumi padova napona na svim dionicama voda, tj:

$$\Delta U = \sum_{i=1}^m \Delta U_i$$

Uvrštenjem se dobiva ukupan pad napona na kraju voda:

$$\Delta U = \sum_{i=1}^m \frac{P_i \cdot R_i}{U_i} + \sum_{i=1}^m \frac{Q_i \cdot X_i}{U_i}$$

Naponi na potrošačima (u čvorovima) duž voda će se neznatno razlikovati (njihova razlika najčešće su unutar dozvoljenog pada napona, npr. $\pm 5\%$), pa se može aproksimirati:

$$U_1 \approx U_2 \approx \dots \approx U_i \approx \dots \approx U_m \approx U_n$$

U tom slučaju je:

$$\Delta U = \frac{1}{U_n} \left(\sum_{i=1}^m P_i \cdot R_i + \sum_{i=1}^m Q_i \cdot X_i \right)$$

Dozvoljeni pad napona na vodu se obično daje u %, kako slijedi:

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100,$$

tj.

$$\Delta U = \frac{\Delta U\%}{100} \cdot U_n$$

Uvrštenjem u gornju jednadžbu slijedi:

$$\frac{\Delta U\%}{100} \cdot U_n = \frac{1}{U_n} \left(\sum_{i=1}^m P_i \cdot R_i + \sum_{i=1}^m Q_i \cdot X_i \right),$$

tj.

$$\Delta U\% = \frac{100}{U_n^2} \left(\sum_{i=1}^m P_i' \cdot R_i + \sum_{i=1}^m Q_i' \cdot X_i \right)$$

Ukoliko su fazni vodiči promatranog trofaznog voda istoga presjeka i ako je geometrija voda ista u svim dionicama, tada vrijedi:

$$R_i = r_1 \cdot l_i$$
$$X_i = x_1 \cdot l_i, i \in [1, m]$$

pa se prethodni izraz može napisati u sljedećem obliku:

$$\Delta U\% = \frac{100}{U_n^2} \left(r_1 \sum_{i=1}^m P_i' \cdot l_i + x_1 \sum_{i=1}^m Q_i' \cdot l_i \right)$$

Napomena:

Može se pokazati da se gornja jednadžba može napisati i u sljedećem obliku (preko snaga potrošača P_i , Q_i i ukupne duljine voda od TS do potrošača l_i'):

$$\Delta U\% = \frac{100}{U_n^2} \left(r_1 \sum_{i=1}^m P_i \cdot l_i' + x_1 \sum_{i=1}^m Q_i \cdot l_i' \right)$$

6.3 Dimenzioniranje presjeka vodiča

Pod pojmom dimenzioniranja vodova podrazumijeva se određivanje minimalnog standardnog presjeka vodiča koji osigurava:

- da je struja najopterećenije dionice pri vršnom opterećenju manja od nazivne struje vodiča
- da je najveći pad napona u mreži manji od dozvoljenog

Ukoliko je zadan dozvoljeni pad napona trofaznog voda u % ($\Delta U\%$), tada se iz prethodnog izraza može izračunati odgovarajući presjek voda. Dobiva se:

$$r_1 = \frac{1}{\kappa \cdot q}$$

$$\Delta U\% = \frac{100}{U_n^2} \left(\frac{1}{\kappa \cdot q} \sum_{i=1}^m P_i' \cdot l_i + x_1 \sum_{i=1}^m Q_i' \cdot l_i \right) \quad \therefore \frac{U_n^2}{100}$$

$$\frac{\Delta U\%}{100} \cdot U_n^2 = \frac{1}{\kappa \cdot q} \sum_{i=1}^m P_i' \cdot l_i + x_1 \sum_{i=1}^m Q_i' \cdot l_i$$

$$\frac{1}{\kappa \cdot q} \sum_{i=1}^m P_i' \cdot l_i = \frac{\Delta U\%}{100} \cdot U_n^2 - x_1 \sum_{i=1}^m Q_i' \cdot l_i$$

Prema tome je:

$$q = \frac{\sum_{i=1}^m P_i' \cdot l_i}{\kappa \cdot \left(\frac{\Delta U\%}{100} \cdot U_n^2 - x_1 \sum_{i=1}^m Q_i' \cdot l_i \right)}$$

Ukoliko se radi o jednofaznomvodu sa “m” dionica, tada vrijede slični izrazi izvedeni za trofazni vod. Potrebno je samo u navedenim izrazima promijeniti sljedeće:

- trofazne snage P_i i Q_i s odgovarajućim jednofaznim snagama P_i' , Q_i'
- linijski napon U_n zamijeniti s faznim naponom $V_n/2$.

Slijedi:

$$\Delta V = \frac{2}{V_n} \left(\sum_{i=1}^m P_i' \cdot l_i + \sum_{i=1}^m Q_i' \cdot l_i \right) = \frac{2}{V_n} \left(r_1 \sum_{i=1}^m P_i' \cdot l_i + x_1 \sum_{i=1}^m Q_i' \cdot l_i \right)$$

Uz pad napona izražen u postocima slijedi:

$$\Delta V\% = \frac{\Delta V}{V_n} \cdot 100 \Rightarrow \Delta V = \frac{\Delta V\%}{100} \cdot V_n$$

$$\frac{\Delta V\%}{100} \cdot V_n = \frac{2}{V_n} \left(r_1 \sum_{i=1}^m P_i' \cdot l_i + x_1 \sum_{i=1}^m Q_i' \cdot l_i \right)$$

odnosno,

$$\Delta V\% = \frac{200}{V_n^2} \left(r_1 \sum_{i=1}^m P_i' \cdot l_i + x_1 \sum_{i=1}^m Q_i' \cdot l_i \right)$$

Uz $r_1 = \frac{1}{\kappa \cdot q}$ slijedi odgovarajući presjek jednofaznog voda:

$$q = \frac{\sum_{i=1}^m P_i' \cdot l_i}{\kappa \cdot \left(\frac{\Delta V\%}{200} \cdot V_n^2 - x_1 \sum_{i=1}^m Q_i' \cdot l_i \right)}$$

Nakon što se iz tablica izabere potreban presjek (prvi veći od izračunatog minimalno potrebnog presjeka), može se izvršiti dodatna provjera na temelju stvarne vrijednosti reaktancija vodiča x_1 . Također je potrebno provjeriti i odabrani presjek na dozvoljenu strujnu opteretivost vodiča.

6.4 Proračun gubitaka snage i energije

Radni otpori vodova i transformatora uzrokuju gubitke radne snage i energije u distributivnoj mreži. Njihova veličina je uvjetovana tehničkim karakteristikama vodova i transformatora, te iznosom snage koja protječe elementom.

6.4.1 Gubici radne snage u vodovima

Gubici radne snage u vodovima ovise o radnom otporu voda, koji se može smatrati fiksni, te kvadratu struje koja teče vodom, koja je promjenljiva (ovisi o potrošnji):

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot I^2 \cdot r_1 \cdot l = 3 \left(\frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n} \right)^2 \cdot r_1 \cdot l$$

$$\Delta P = \frac{r_1 \cdot l}{U_n^2} \cdot S^2$$

$$U_n \text{ (kV)}, S \text{ (MVA)} \Rightarrow \Delta P \text{ (MW)}$$

U slučaju više (N) paralelnih vodova istog tipa, gubici su:

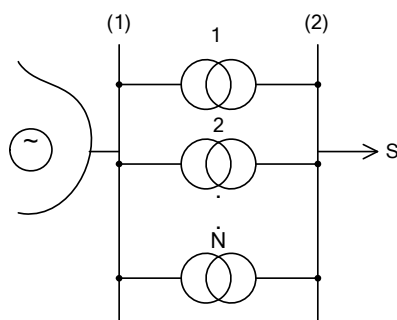
$$\Delta P = N \cdot 3 \left(\frac{I}{N} \right)^2 \cdot R = \frac{1}{N} \cdot 3 \cdot I^2 \cdot R$$

$$\Delta P = \frac{r_1 \cdot l}{N \cdot U_n^2} \cdot S^2$$

tj. gubici se proporcionalno smanjuju s brojem vodova u paraleli.

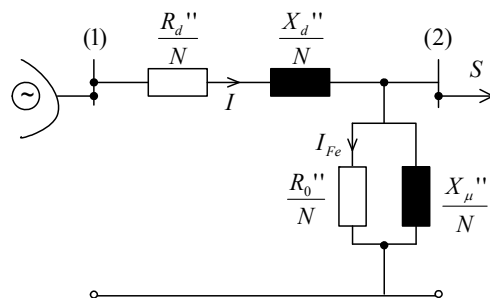
6.4.2 Gubici radne snage u transformatoru

Neka je u jednoj trafostanici ugrađeno općenito N jednakih transformatora koji rade u paraleli, kao na sljedećoj slici. Nazivni podaci svih transformatora su isti : U_{n1} , U_{n2} , S_n , P_k , P_0



Slika 6-5 Distribucijska trafostanica sa N jednakih transformatora u paraleli

Sa S je označeno ukupno prividno opterećenje trafostanice (snaga koju uzimaju potrošači). Nadomjesna shema navedene trafostanice dana je na sljedećoj slici:



Slika 6-6 Nadomjesna shema trafostanice sa N jednakih transformatora

Pripadni parametri su reducirani na niženaponsku stranu (napon U_{n2}). Radni gubici snage nastaju na otporima R_d'' i R_0'' . Odgovarajući otpori su:

$$R_d'' = P_k \frac{U_{n2}^2}{S_n^2}$$

$$R_0'' = \frac{U_{n2}^2}{P_0}$$

Ukupna struja koja protječe transformatorami je (struja pripadnog potrošačkog područja koje se napaja iz trafostanice):

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{n2} \cdot I \Rightarrow I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{n2}}$$

Veličina R_d'' predstavlja ukupni radni otpor namota transformatora. Namoti su izrađeni iz bakra, pa se gubici u namotima transformatora zovu gubicima u bakru (P_{Cu}):

$$P_{Cu} = 3 \cdot I^2 \cdot \frac{R_d''}{N} = 3 \left(\frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{n2}} \right)^2 \cdot \frac{1}{N} \cdot P_k \cdot \frac{U_{n2}^2}{S_n^2} = 3 \cdot \frac{S^2}{3 \cdot U_{n2}^2} \cdot \frac{P_k}{N} \cdot \frac{U_{n2}^2}{S_n^2} = \frac{P_k}{N} \left(\frac{S}{S_n} \right)^2$$

Dakle,

$$P_{Cu} = \frac{P_k}{N} \left(\frac{S}{S_n} \right)^2$$

Radni otpor R_0'' predstavlja gubitke u jezgri transformatora, do kojih dolazi usljed vrtložnih struja i gubitaka histereze. Jezgra je izrađena od feromagnetskog materijala (Fe), pa se ti gubici obično zovu gubici u željezu (P_{Fe}):

$$P_{Fe} = 3 \cdot V_{n2} \cdot I_{Fe}$$

gdje je

$$I_{Fe} = \frac{V_{n2}}{\frac{R_0''}{N}} = N \frac{V_{n2}}{R_0''}$$

Uvrštanjem se dobiva:

$$P_{Fe} = 3 \cdot V_{n2} \cdot N \cdot \frac{V_{n2}}{R_0''} = 3N \frac{\left(\frac{U_{n2}}{\sqrt{3}} \right)^2}{R_0''} = 3N \frac{U_{n2}^2}{3R_0''} = N \frac{U_{n2}^2}{\frac{U_{ns}^2}{P_0}} = N \cdot P_0$$

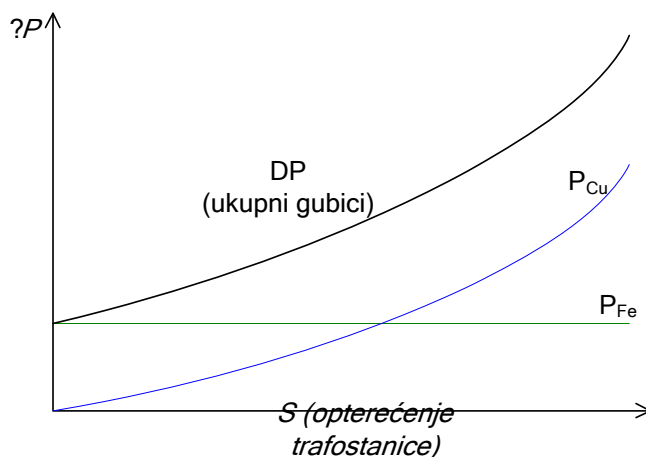
Dakle,

$$P_{Fe} = N \cdot P_0.$$

Ukupni gubici radne snage u trafostanici sa N uključenih transformatora iznose:

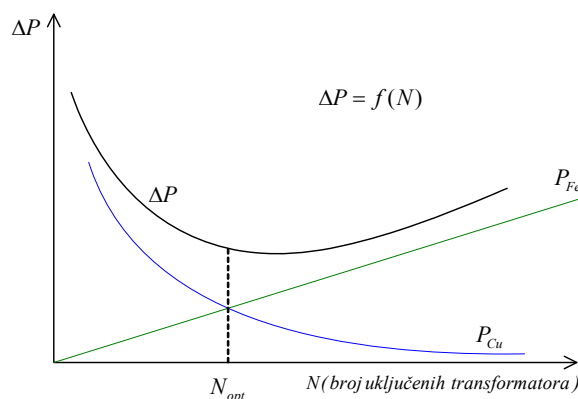
$$\Delta P = P_{Cu} + P_{Fe} = \frac{P_k}{N} \cdot \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 + N \cdot P_0$$

Gubici radne snage u trafostanici sastoje se od konstantnog iznosa gubitaka praznog hoda, te iznosa koji ovisi o kvadratu snage (struje) kojom je opterećena trafostanica, slika 6-7.



Slika 6-7 Ovisnost gubitaka snage u trafostanici o opterećenju trafostanice (transformatora)

Za određenu snagu opterećenja trafostanice gubici radne snage ΔP u trafostanici su ovisni o broju uključenih transformatora. To je grafički prikazano na slici 6-8.



Slika 6-8 Ovisnost gubitaka snage u trafostanici o broju uključenih transformatora u paraleli (za fiksno opterećenju trafostanice)

Za odrediti optimalan broj uključenih transformatora pri kojem se dobiju najmanji gubici radne snage u trafostanici (N_{opt}), potrebno je derivirati izraz za gubitke po varijabli N (broj transformatora) i izjednačiti ga s nulom (nužan uvjet ekstrema – optimuma):

$$\frac{d\Delta P}{dN} = 0$$

$$-\frac{P_k}{N^2} \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 + P_0 = 0$$

$$N^2 = \frac{P_k}{P_0} \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \Rightarrow N_{opt} = \frac{S}{S_n} \sqrt{\frac{P_k}{P_0}}$$

Izvedeni izraz za optimalan broj uključenih transformatora u TS u praksi je vrlo teško primjeniti, budući da ovisi o opterećenju trafostanice (S) koje je promjenljivo, a postoje i dodatni razlozi koji uvjetuju uključenost transformatora u TS (u distribucijskoj mreži transformatori obično ne rade u paraleli).

6.4.3 Gubici radne energije

Gubici radne energije, npr. tijekom jedne godine, teoretski se mogu odrediti pomoću izraza:

$$\Delta W = \int_0^T \Delta P dt$$

gdje je T broj sati u godini, =8760 h.

Budući da je snaga promjenljiva u vremenu, dobiva se:

$$\Delta W = \int_0^T \frac{r_1 \cdot l}{N \cdot U_n^2} \cdot S(t)^2 \cdot dt = \frac{r_1 \cdot l}{N \cdot U_n^2} \int_0^T S(t)^2 \cdot dt \quad (\text{za vod})$$

$$\Delta W = \int_0^T \left[\frac{P_k}{N} \left(\frac{S(t)}{S_n} \right)^2 + N \cdot P_0 \right] \cdot dt = \frac{P_k}{N} \left(\frac{1}{S_n} \right)^2 \int_0^T S(t)^2 \cdot dt + N \cdot P_0 \cdot T \quad (\text{za transformator})$$

Postoje dvije metode koje se uobičajeno primjenjuju za proračun gubitaka energije (odnosi se na gubitke na vodu i gubitke u bakru transformatora, budući da su gubici u željezu transformatora konstantni):

A) Jednostavna metoda proračuna pomoću aproksimativnih izraza koji uzima u obzir gubitke snage pri vršnom opterećenju i upotrebno vrijeme (ili faktor opterećenja):

$$W_g = \left[a \cdot T_u + (1-a) \cdot \frac{T_u^2}{T} \right] \cdot P_g^{\max}, \quad T_u = \frac{W}{P^{\max}}$$

ili

$$W_g = \left[a \cdot m + (1-a) \cdot m^2 \right] \cdot T \cdot P_g^{\max}, \quad m = \frac{W}{P^{\max} \cdot T},$$

gdje su:

T (h) – vremenski period za koji se računaju gubici energije

W_g (kWh) – gubici energije u elementu mreže za promatrani vremenski period T

W (kWh) – ukupna potrošnja energije u promatranom periodu T, tj. energija koja u godini dana prođe kroz element mreže

P^{\max} (kW) – vršna snaga u promatranom periodu T, tj. maksimalna snaga koja u vremenu T protječe kroz element mreže

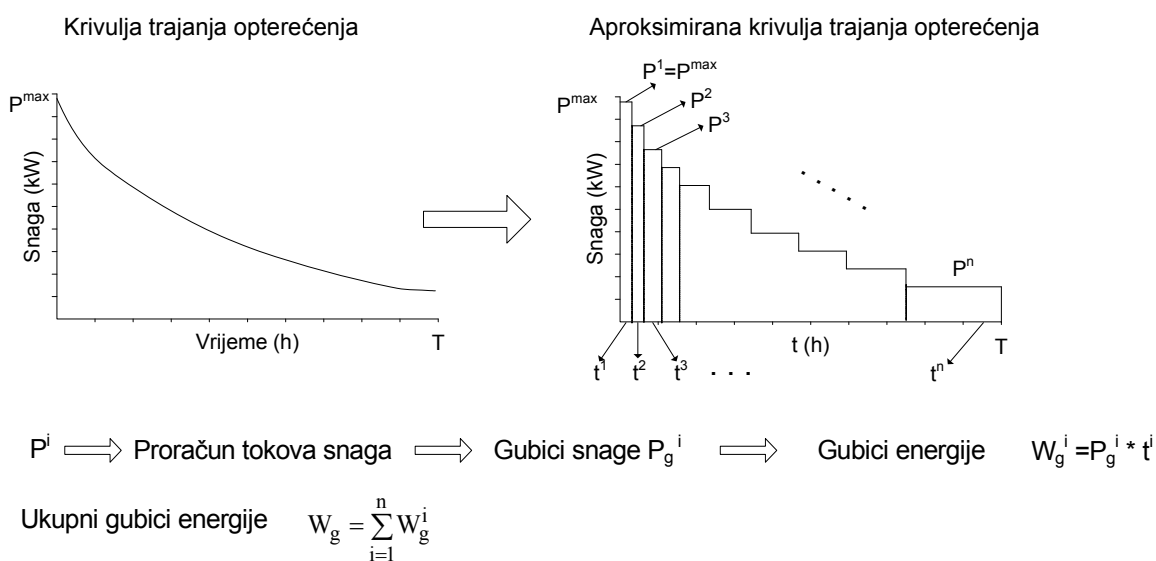
P_g^{\max} (kW) – gubici snage u elementu mreže za vrijeme vršnog opterećenja

T_u (h) – upotrebno vrijeme

m – faktor opterećenja

a – konstanta koja se u distributivnim mrežama, ovisno o obliku krivulje trajanja opterećenja, obično kreće u granicama 0.15-0.20, a najčešće se pretpostavlja iznos 0.17

B) Točna metoda podrazumijeva poznavanje krivulje vremenske promjene snage opterećenja elementa mreže tijekom čitavog razdoblja T. Najčešće se radi preko krivulje trajanja opterećenja u promatranom periodu koja se aproksimira sa određenim brojem konstantnih segmenata. Za svaku vrijednost opterećenja u tako aproksimiranoj krivulji vrši se proračun naponskih prilika i tokova snaga u mreži iz kojeg slijede i ukupni gubici snage u mreži. Množenjem s vremenom trajanja promatranog segmenta dobiju se gubici energije za promatrani podperiod, a zbrajanjem gubitaka energije u svim podperiodima dobiju se ukupni gubici energije za čitavi period. Opisani postupak ilustriran je na slijedećoj slici.

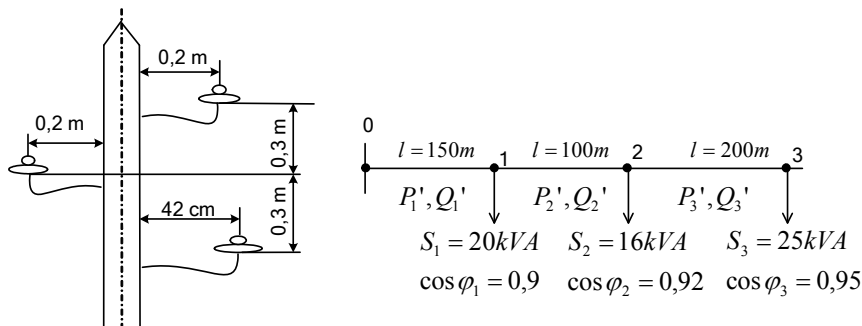


Slika 6-9 Linearizacija krivulje trajanja opterećenja i slijed proračuna gubitaka energije

Ova metoda, uz dovoljno dobru diskretizaciju krivulje trajanja opterećenja, je bolja i točnija od prethodne, ali traži bolju pripremu ulaznih parametara (poznavanje krivulje trajanja opterećenja što često nije moguće) i vremenski je zahtjevnija.

ZADATAK 8

Trofazni zračni niskonaponski vod ($U_n = 380 \text{ V}$) s faznim vodičima iz Cu presjeka $q = 16 \text{ mm}^2$ sastoji se od tri dionice. Fazni vodiči su smješteni na drvenim stupovima s geometrijskim rasporedom prema slici. Na slici su prikazane i duljine pojedinih dionica, te odgovarajuća opterećenja.



Odrediti:

- pad napona u % na kraju voda i kontrolu s obzirom na maksimalno dozvoljeni pad napona od 10%
- kontrolu strujnog opterećenja prve dionice u odnosu na dozvoljenu struju zračnog voda Cu 16 mm^2 koja iznosi 115 A
- presjek samonosivog kablenskog snopa (SKS) koji treba zamijeniti navedeni zračni vod, da pad napona pri navedenom opterećenju bude $\leq 5\%$. Za SKS, budući da su fazni vodiči blizu jedan drugoga pa je njihov induktivitet relativno mali, pretpostaviti $x_1 = 0$

Rješenje:

a)

Izraz za proračun pada napona na trofaznom vodu:

$$\Delta u\% = \frac{100}{U_n^2} \left(r_1 \sum_{i=1}^m P_i' l_i + x_1 \sum_{i=1}^m Q_i' l_i \right)$$

Ovdje su:

$$U_n = 380 \text{ V}, \quad m = 3$$

$$r_1 = \frac{1}{\kappa \cdot q}$$

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_{20} [1 + \alpha(\vartheta - 20)]} = \frac{\kappa_{20}}{1 + \alpha(\vartheta - 20)}$$

$$\kappa_{20} = 56 \text{ Sm/mm}^2, \alpha = 0,00382^\circ\text{C}^{-1}, \vartheta = 80^\circ\text{C}$$

$$\kappa = \frac{56}{1 + 0,00382(80 - 20)} = 45,56 \text{ Sm/mm}^2$$

$$r_1 = \frac{1}{45,56 \cdot 16} = 1,372 \Omega / \text{km}$$

$$X_1 = \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt[3]{d_{RS} \cdot d_{RT} \cdot d_{ST}}}{d_s}$$

$$d_{RS} = 0,6 \text{ m}, \quad d_{RT} = \sqrt{0,4^2 + 0,3^2} = 0,5 \text{ m}, \quad d_{ST} = \sqrt{0,4^2 + 0,3^2} = 0,5 \text{ m}$$

$$\sqrt[3]{d_{RS} \cdot d_{RT} \cdot d_{ST}} = \sqrt[3]{0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,5} = 0,53 \text{ m}$$

$$q = 16 \text{ mm}^2 \Rightarrow r_V = \frac{5,1 \text{ mm}}{2} = 2,55 \text{ mm}$$

$$d_s = 0,78 \cdot r_V = 1,99 \text{ mm}$$

$$X_1 = \frac{100\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \ln \frac{0,53 \cdot 10^3}{1,99} = 0,351 \Omega / \text{km}$$

Snage potrošača u čvorovima:

$$P_1 = S_1 \cos \varphi_1 = 20 \cdot 0,9 = 18 \text{ kW}$$

$$\cos \varphi_1 = 0,9 \Rightarrow \varphi_1 = 25,84^\circ$$

$$Q_1 = S_1 \sin \varphi_1 = 20 \cdot \sin 25,84^\circ = 8,7 \text{ kVAr}$$

Sličnim proračunom, dobijemo

$$P_2 = 14,72 \text{ kW}, Q_2 = 6,27 \text{ kVAr}$$

$$P_3 = 23,75 \text{ kW}, Q_3 = 7,84 \text{ kVAr}$$

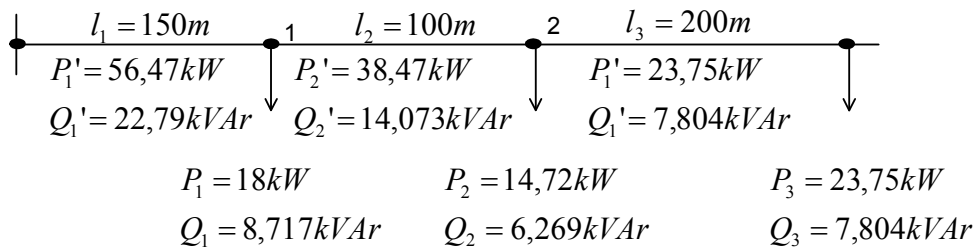
Kako je

$$P_i' = \sum_{k=i}^m P_k \quad Q_i' = \sum_{k=i}^m Q_k$$

možemo pisati da za krajnju točku voda (3) vrijedi

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 P_i' \cdot l_i &= P_1' \cdot l_1 + P_2' \cdot l_2 + P_3' \cdot l_3 = \\ &= 56,47 \text{ kW} \cdot 150 \text{ m} + 38,47 \text{ kW} \cdot 100 \text{ m} + 23,75 \text{ kW} \cdot 200 \text{ m} = 17067,5 \text{ kWm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 Q_i' \cdot l_i &= Q_1' \cdot l_1 + Q_2' \cdot l_2 + Q_3' \cdot l_3 = \\ &= 22,79 \text{ kVAr} \cdot 150 \text{ m} + 14,073 \text{ kVAr} \cdot 100 \text{ m} + 7,804 \text{ kVAr} \cdot 200 \text{ m} = 6386,6 \text{ kVAr m} \end{aligned}$$



Uvrštavanjem se dobiva :

$$\Delta u_{1-3} \% = \frac{100}{380^2} \left(1,372 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 17067,5 \text{ kWm} + 0,351 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 6386,6 \text{ kVAr m} \right) = 17,77\%$$

tako da imamo prekoračenje dozvoljenog pada napona ($17,77\% - 10\% = 7,77\%$)

Krajnji potrošač (u čvoru 3) ima napon:

$$\Delta u \% = \frac{U_n - U}{U_n} \cdot 100$$

$$17,77 = \frac{380 - U}{380} \cdot 100 \Rightarrow U = 312,5 \text{ V} \quad (V_f = \frac{312,5}{\sqrt{3}} = 180,4 \text{ V})$$

b)

Strujno opterećenje prve dionice

$$P_1' = 56,47 \text{ kW} \quad Q_1' = 22,79 \text{ kVAr}$$

Slijedi iz trokuta snaga

$$S_1' = \sqrt{P_1'^2 + Q_1'^2} = \sqrt{56,47^2 + 22,79^2} = 60,906 \text{ kVA}$$

$$S_1' = \sqrt{3} U_n I_1' \Rightarrow I_1' = \frac{S_1'}{\sqrt{3} U_n} = \frac{60,906 \cdot 10^3 \text{ VA}}{\sqrt{3} \cdot 380 \text{ V}} = 95,5 \text{ A}$$

Dakle,

$I_1' = 95,5 \text{ A} < 115 \text{ A}$ koliko iznosi trajna dopuštena struja za $q = 16 \text{ mm}^2$ (Cu), tako da je presjek voda zadovoljavajući s obzirom na strujno opterećenje.

c)

S obzirom na nedopušteno veliki pad napona na vodu, zamijenit će se isti samonosivim kabelskim snopom sa Al vodičima. Potrebno je odrediti presjek samonosivog kabelskog snopa da pad napona od TS do krajnjeg potrošača bude 5%.

Koristi se izraz:

$$q = \frac{\sum_{i=1}^m P_i \cdot l_i'}{\kappa \cdot \left(\frac{\Delta u \%}{100} \cdot U_n^2 - x_1 \sum_{i=1}^m Q_i \cdot l_i' \right)}$$

Budući da se po pretpostavci u zadatku uzima $X_1 \approx 0$, gornji izraz tada prelazi u oblik:

$$q = \frac{\sum_{i=1}^m P_i \cdot l_i'}{\kappa \cdot \frac{\Delta u \%}{100} \cdot U_n^2}$$

Ovdje su:

$$\sum_{i=1}^3 P_i \cdot l_i' = P_1 \cdot l_1' + P_2 \cdot l_2' + P_3 \cdot l_3' = 17067,5 \text{ kWm}$$

$$\kappa = 45,56 \text{ S m/mm}^2$$

$$\Delta u \% = 5\% , \quad U_n = 380 \text{ V}$$

Uvrštanjem se dobiva

$$q = \frac{17067,5 \cdot 10^3 \text{ kWm}}{45,56 \text{ S} \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{5}{100} \cdot 380^2 \text{ V}^2} = 51,9 \text{ mm}^2$$

Dakle, treba odabrati kabelski snop sa vodičima iz Al presjeka $q > 51,9 \text{ mm}^2$, tj. standardni presjek:

$$q = 70 \text{ mm}^2.$$

Trajno dopuštena struja za SKS 70 mm² iznosi $I_t = 198 \text{ A} > 95,5 \text{ A}$

Napomena:

Uvrštanjem reaktancije odabranog vodiča presjeka $q = 70 \text{ mm}^2$, koja iznosi oko $0.085 \Omega/\text{km}$, dobili bi nešto veći iznos potrebnog presjeka ($56,1 \text{ mm}^2$), dakle grešku u proračunu od cca. 10%, ali odabrani presjek od 70 mm^2 i u tom slučaju zadovoljava.

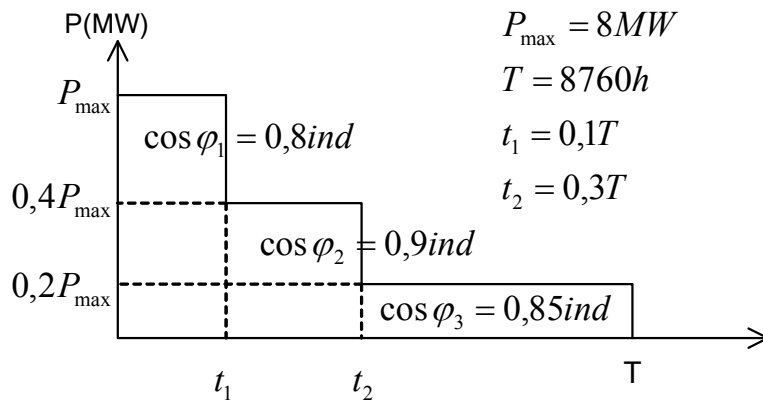
Domaći rad:

- izračunati koliki je utjecaj jalove snage na pad napona u mreži: za varijantu sa starim zračnim vodom izračunati pad napona u slučaju da je faktor snage svih potrošača $\cos\varphi=1$, tj. da potrošači ne uzimaju jalovu snagu
- koliko % se može povećati snaga potrošača (proporcionalno svi potrošači i uz iste faktore snage) da s novim SKS vodom budemo u granici dozvoljenog pada napona (10%)
- ako je iza trećeg potrošača potrebno priključiti novog potrošača, izgradnjom 4. dionice voda (s istim tipom SKS voda), na udaljenosti od 400m, koliku maksimalnu radnu snagu

(uz faktor snage 0.95) možemo dozvoliti uz uvjet da na kraju voda bude pad napona 10%.

ZADATAK 9

TS 35/10 kV posjeduje tri jednaka transformatora. Njihovi tehnički podaci dani su u zadatku 3. Godišnji dijagram trajanja opterećenja potrošačkog područja napajanog iz trafostanice prikazan je na slici.



Odredi:

- godišnje gubitke električne energije u trafostanici u slučaju da je raspored uključenih transformatora 3 (razdoblje 0- t_1), 2 (razdoblje t_1 - t_2), 1 (razdoblje t_2 - T): apsolutno i postotno u odnosu na ukupno prenesenu energiju prema potrošačima
- godišnje gubitke električne energije u trafostanici za slučaj da su tijekom cijele godine uključena sva tri transformatora
- ukoliko je prosječna jedinična cijena el. energije $c_1 = 0,08 \text{ €/kWh}$, izračunati odgovarajuće troškove gubitaka električne energije za varijante a) i b).

Rješenje

Iz zadatka 3 slijedi:

$$S_n = 4 \text{ MVA}, P_k = 30,2 \text{ kW} \text{ i } P_0 = 4,83 \text{ kW}.$$

Godišnji gubici djelatne energije u trafostanici određuju se izrazom:

$$\Delta W = \int_0^T \Delta P dt$$

pri čemu je:

$$\Delta P = \frac{P_k}{N} \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 + N \cdot P_0.$$

a)

Za raspored uključenih transformatora prema a), dobiva se:

$$\begin{aligned} \Delta W_a &= \int_0^{t_1} \left[\frac{P_k}{N'_{opt}} \left(\frac{S_{max}}{S_n} \right)^2 + N'_{opt} \cdot P_0 \right] \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{P_k}{N''_{opt}} \left(\frac{S'}{S_n} \right)^2 + N''_{opt} \cdot P_0 \right] \cdot dt + \\ &+ \int_{t_2}^T \left[\frac{P_k}{N'''_{opt}} \left(\frac{S''}{S_n} \right)^2 + N'''_{opt} \cdot P_0 \right] \cdot dt = \\ &= \left[\frac{P_k}{N'_{opt}} \cdot \left(\frac{S_{max}}{S_n} \right)^2 + N'_{opt} \cdot P_0 \right] \cdot t_1 + \left[\frac{P_k}{N''_{opt}} \cdot \left(\frac{S'}{S_n} \right)^2 + N''_{opt} \cdot P_0 \right] \cdot (t_2 - t_1) + \\ &+ \left[\frac{P_k}{N'''_{opt}} \cdot \left(\frac{S''}{S_n} \right)^2 + N'''_{opt} \cdot P_0 \right] \cdot (T - t_2) \end{aligned}$$

Uvrstanjem konkretnih vrijednosti slijedi:

$$\begin{aligned} \Delta W_a &= \left[\frac{30,2}{3} \cdot \left(\frac{10}{4} \right)^2 + 3 \cdot 4,83 \right] \cdot 0,1 \cdot 8760 + \left[\frac{30,2}{2} \cdot \left(\frac{3,56}{4} \right)^2 + 2 \cdot 4,83 \right] \cdot (0,3 - 0,1) \cdot 8760 + \\ &+ \left[\frac{30,2}{1} \cdot \left(\frac{1,88}{4} \right)^2 + 1 \cdot 4,83 \right] \cdot (1 - 0,3) \cdot 8760 = 176210,02 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Dakle,

$$\boxed{\Delta W_a = 176210,02 \text{ kWh}}$$

Potrošnja prema intervalima:

$$0 \leq t \leq t_1:$$

$$8 \text{ MW} \cdot 876 \text{ h} = 7008 \text{ MWh}$$

$$t_1 \leq t \leq t_2:$$

$$3,2 \text{ MW} \cdot 1752 \text{ h} = 5606,4 \text{ MWh}$$

$$t_2 \leq t \leq T:$$

$$1,6 \text{ MW} \cdot 6132 \text{ h} = 9811,2 \text{ MWh}$$

Ukupna potrošnja je 22425,4 MWh. Postotni gubici el. energije su:

$$\Delta W_a \% = \frac{176,2}{22425,4} \cdot 100 = 0,8\%$$

b)

Godišnji gubici el. energije, kada su tijekom cijele godine uključena sva tri transformatora, iznose:

$$\Delta W_b = \int_0^{t_1} \left[\frac{P_k}{3} \left(\frac{S_{max}}{S_n} \right)^2 + 3 \cdot P_0 \right] \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{P_k}{3} \left(\frac{S'}{S_n} \right)^2 + 3 \cdot P_0 \right] \cdot dt + \int_{t_2}^T \left[\frac{P_k}{3} \left(\frac{S''}{S_n} \right)^2 + 3 \cdot P_0 \right] \cdot dt =$$
$$= \frac{P_k}{3} \left[\left(\frac{S_{max}}{S_n} \right)^2 \cdot t_1 + \left(\frac{S'}{S_n} \right)^2 \cdot (t_2 - t_1) + \left(\frac{S''}{S_n} \right)^2 \cdot (T - t_2) \right] + 3P_0T$$

Uvrštanjem brojčanih vrijednosti dobiva se:

$$\Delta W_b = \frac{30,2}{3} \left[\left(\frac{10}{4} \right)^2 \cdot 0,1 \cdot 8760 + \left(\frac{3,56}{4} \right)^2 \cdot (0,3 - 0,1) \cdot 8760 + \left(\frac{1,88}{4} \right)^2 \cdot (1 - 0,3) \cdot 8760 \right] +$$
$$+ 3 \cdot 4,83 \cdot 8760 = 209653,42 kWh$$

Dakle,

$$\boxed{\Delta W_b = 209653,42 kWh}$$

Iz dobivenih rezultata je vidljivo $\Delta W_a < \Delta W_b$.

c)

Odgovarajući troškovi gubitaka električne energije u trafostanici mogu se odrediti prema izrazu:

$$C = c_1 \cdot \Delta W.$$

Stoga je:

Za pogonski režim a):

$$C_a = c_1 \cdot \Delta W_a = 0,08 \text{ €/kWh} \cdot 176210,02 \text{ kWh} = 14096,80 \text{ €}$$

Za pogonski režim b):

$$C_b = c_1 \cdot \Delta W_b = 0,08 \text{ €/kWh} \cdot 209653,42 \text{ kWh} = 16772,27 \text{ €}$$

Odgovarajuća ušteda u slučaju rada u pogonskom režimu a) iznosi:

$$\Delta C = C_a - C_b = 16772,27 - 14096,80 = 2675,47 \text{ €}$$

ZADATAK 10

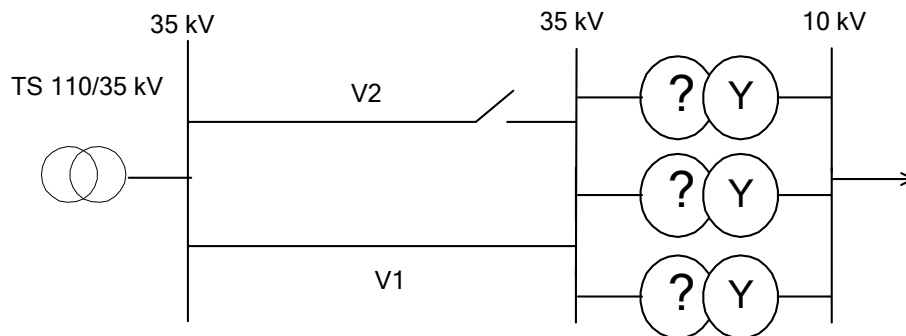
TS iz prethodnog zadatka se napaja 35 kV zračnim vodom. Izračunati gubitke snage i energije na vodu i odgovarajuće tokove u slučaju kada se:

a) napajanje vrši jednim 35 kV vodom,

b) napajanje vrši sa dva 35 kV voda u paraleli.

Podaci za vodove su:

$$r_1 = 0,2\Omega/km, l = 20km.$$



Rješenje

a)

$$1. S = 10 \text{ MVA}$$

$$\Delta P = \frac{r_1 \cdot l}{U_n^2} \cdot S^2 = \frac{0,2 \cdot 20}{(35)^2} \cdot 10^2 = 327 \text{ kW}$$

$$2. S = 3,56 \text{ MVA}$$

$$\Delta P = \frac{r_1 \cdot l}{U_n^2} \cdot S^2 = \frac{0,2 \cdot 20}{(35)^2} \cdot 3,56^2 = 41 \text{ kW}$$

$$3. S = 1,88 \text{ MVA}$$

$$\Delta P = \frac{r_1 \cdot l}{U_n^2} \cdot S^2 = \frac{0,2 \cdot 20}{(35)^2} \cdot 1,88^2 = 12 \text{ kW}$$

Energija:

$$\begin{aligned} \Delta W &= \Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot (t_2 - t_1) + \Delta P_3 (T - t_2) = \\ &= 0,327 \cdot 876 + 0,041 \cdot 1752 + 0,012 \cdot 6132 = 431,9 \text{ MWh} \end{aligned}$$

$$\Delta W\% = \frac{432}{22425} \cdot 100 = 1,93\%$$

Troškovi

$$\Delta C = c_1 \cdot \Delta W = 0,08 \text{ €/kWh} \cdot 431,9 \cdot 10^3 \text{ kWh} = 34552 \text{ €}$$

b)

2 voda: gubici snage i energije dvostruko su manji:

1. $S = 10 \text{ MVA}$

$$\Delta P = 163,5 \text{ kW}$$

2. $S = 3,56 \text{ MVA}$

$$\Delta P = 20,5 \text{ kW}$$

3. $S = 1,88 \text{ MVA}$

$$\Delta P = 6 \text{ kW}$$

Energija:

$$\Delta W = 216 \text{ MWh}$$

$$\Delta W\% = 0,96\%$$

Troškovi

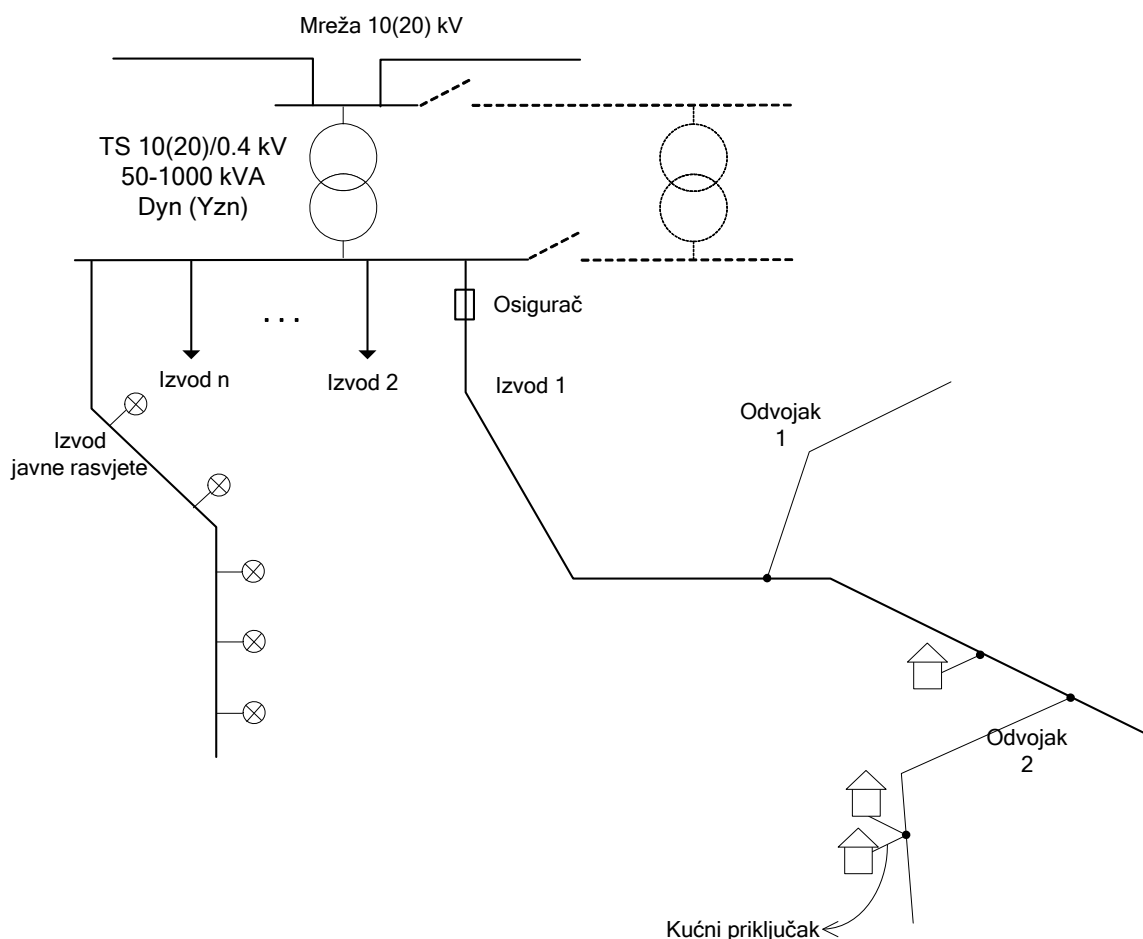
$$\Delta C = 17276 \text{ €}$$

Razlika troškova a) – b) = 17276 €/godišnje

7 NISKONAPONSKE MREŽE

Značaj niskonaponskih distributivnih mreža prvenstveno je u tome što se na niskom naponu (400 odnosno 380 V) napaja velika većina potrošača. Osim toga, izgradnja i održavanje niskonaponske mreže i trafostanica 10/0.4 kV, s obzirom na veličinu odnosno njihovu brojnost u jednom EES-u, predstavlja najznačajniji dio distribucijske djelatnosti.

Na slici 7.1 prikazana je osnovna struktura niskonaponske distribucijske mreže. Ona se napaja iz TS 10/0.4 kV koja najčešće ima jedan ili rjeđe dva transformatora. Transformatori su direktno uzemljeni na niskonaponskoj strani. Niskonaponskim izvodima napajaju se potrošači. Izvodi za napajanje javne rasvjete obično su odvojeni, osim u nekim slučajevima viševodičkih izvoda kad se s tri faze napajaju ostali potrošači, a s jednom ili dvije dodatne faze rasvjeta. Međutim, i u takvom slučaju, javna rasvjeta je poseban strujni krug, s eventualno zajedničkim nul vodičem.



Slika 7-1 Primjer niskonaponske mreže

Niskonaponske mreže mogu biti:

- Nadzemna mreža sa klasičnim golim vodičima
- Nadzemna mreža sa izoliranim vodičima (samonosivi kabelski snop – SKS)
- Kabelska mreža

7.1 Vrste NN mreža s obzirom na uzemljenje TS 10(20)/0.4 kV i instalacija potrošača

S obzirom na sustav uzemljenja, niskonaponske mreže se razlikuju prema načinu uzemljenja sekundara trafostanice 10/0.4, te prema načinu uzemljenja potrošača i niskonaponskih instalacija. Moguće su varijante TN, TT i IT mreža.

Prvo slovo označava uzemljenje transformatora: T-direktno uzemljeno, I-izolirano.

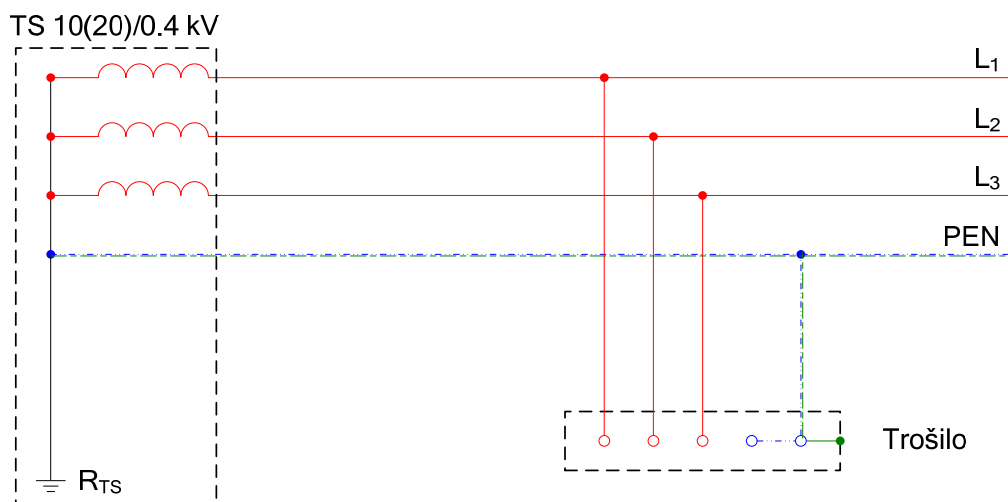
Drugo slovo označava način uzemljenja vodljivih dijelova potrošačkih uređaja: T-direktno uzemljenje na vlastiti uzemljivač, N-uzemljenje preko nultog ili zaštitnog vodiča.

Dodatne oznake u TN mrežama odnose se na nulti (N) i zaštitni (PE) vodič:

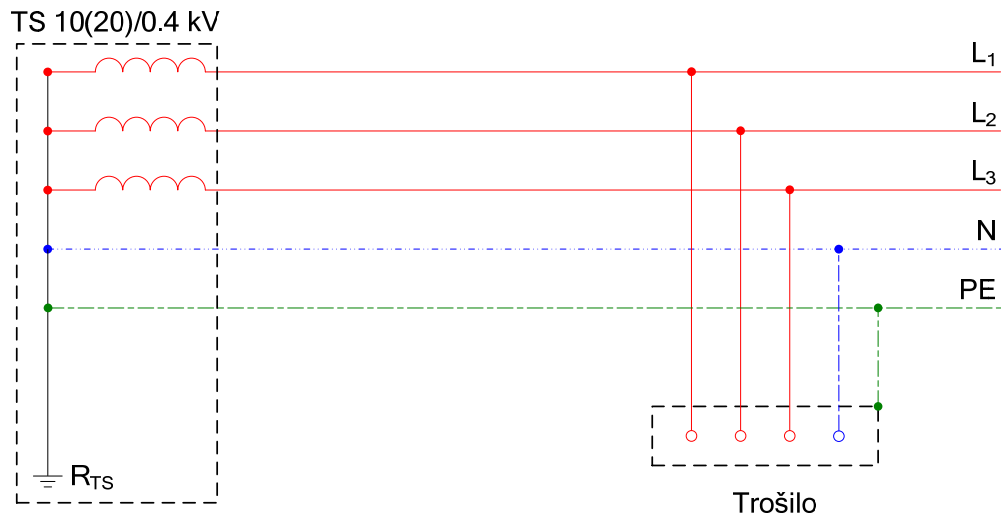
S – nul vodič i zaštitni vodič u cijeloj mreži su odvojeni (pogonska struja ne teče kroz zaštitni vodič),

C – nul vodič i zaštitni vodič su izvedeni kao jedan vodič kroz kojeg teče pogonska struja i struja u slučaju kvara.

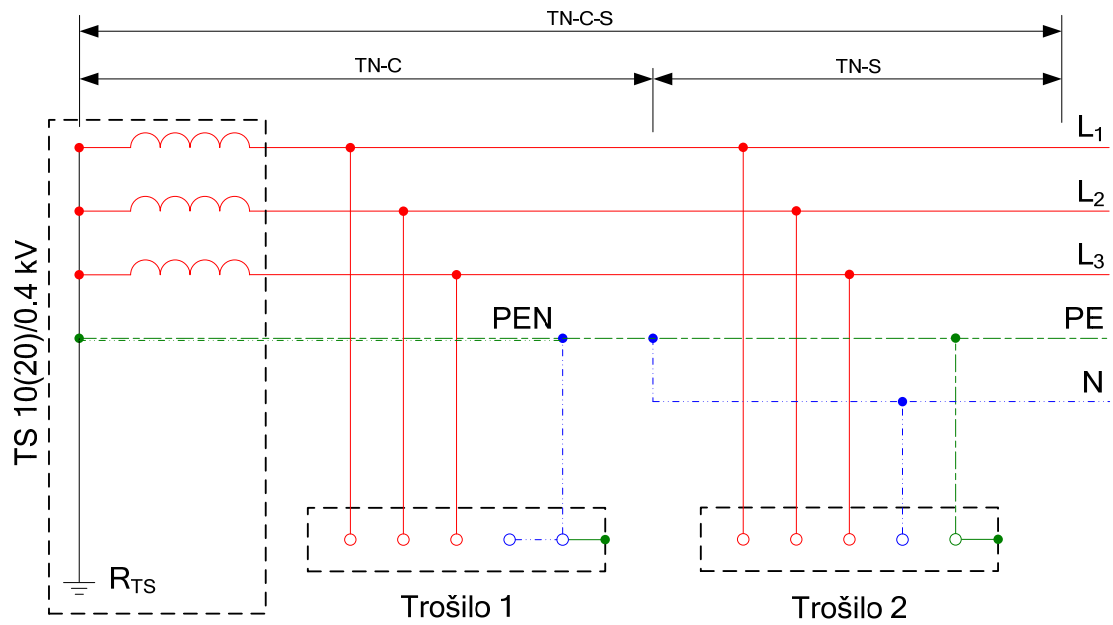
Navedene varijante prikazane su na slijedećim slikama.



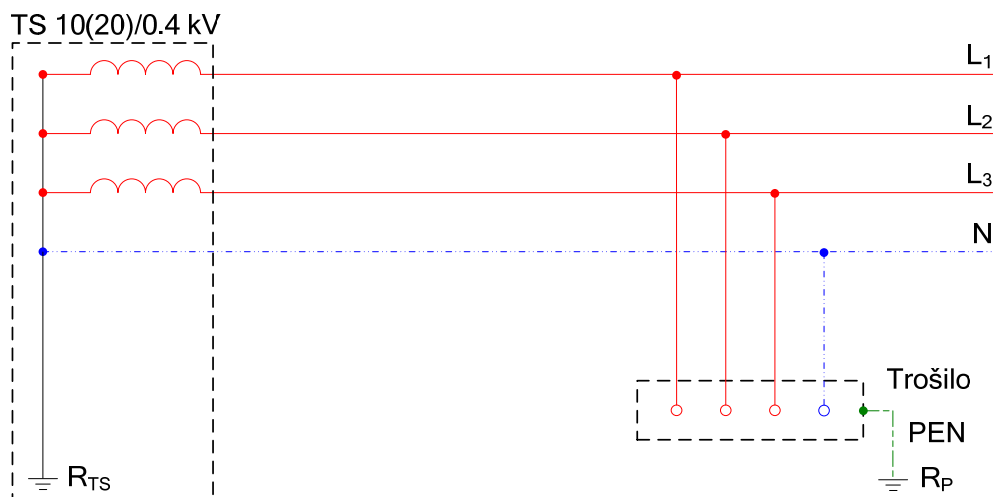
Slika 7-2 TN-C mreža



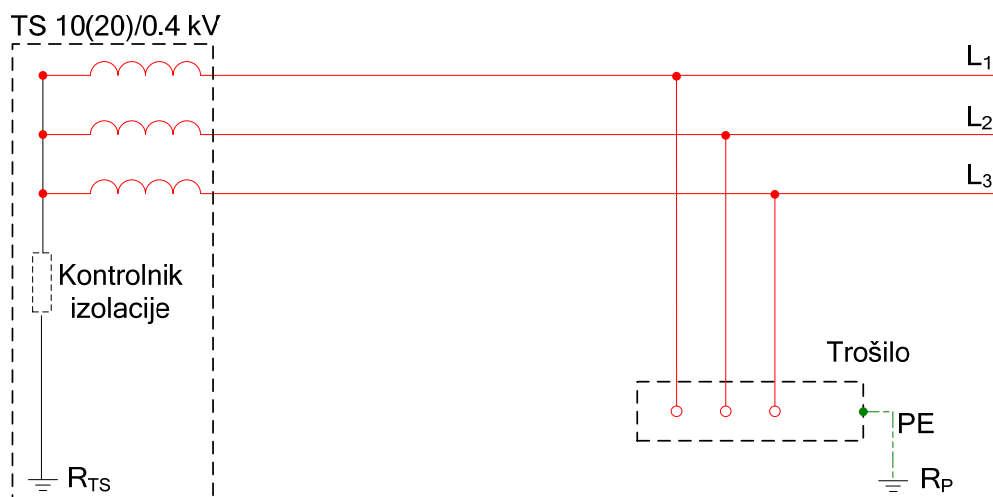
Slika 7-3 TN-S mreža



Slika 7-4 TN-C-S mreža



Slika 7-5 TT mreža



Slika 7-6 IT mreža

7.2 Proračun opterećenja u niskonaponskoj mreži

Potrošači u niskonaponskoj mreži obično se dijele u tri glavne kategorije:

- kućanstva
- javna rasvjeta
- ostali potrošači (uslužne djelatnosti, obrtničke i manje industrijske radnje itd.)

Kućanstva i ostali potrošači se najčešće priključuju trofazno, a javna rasvjeta jednofazno.

Osnovni parametri koje treba poznavati kod potrošača je radna snaga i faktor snage (ili jalova snaga) koju uzimaju iz mreže. U proračunima opterećenja i padova napona u mreži, niskonaponski potrošači se uvijek modeliraju s određenim faktorom istovremenosti koji definira vršno opterećenje grupe potrošača u odnosu na zbroj vršnih opterećenja pojedinačnih potrošača.

Za planiranje potrošnje i opterećenja niskonaponskih izvoda i trafostanica, obično se koriste odgovarajući normativi potrošnje, tj. vršne snage za karakteristične grupe potrošača.

Kućanstva

Svako kućanstvo opisuju 2 parametra:

P_{inst} - instalirana snaga kućanstva

f_p - faktor potražnje koji definira vršno opterećenje jednog kućanstva:

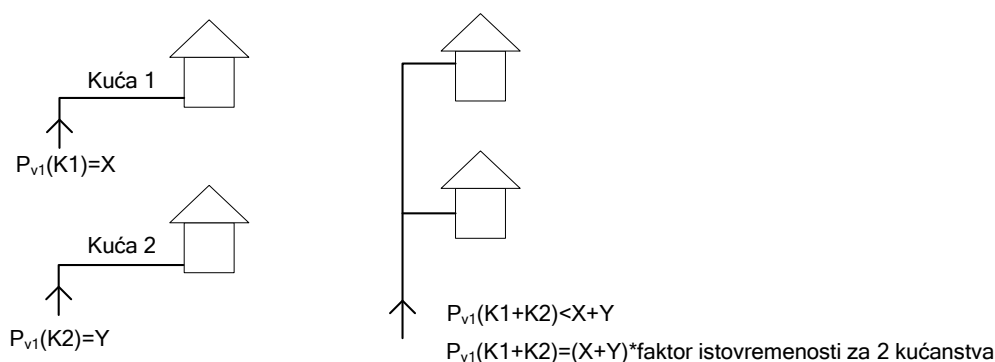
Vršno opterećenje (snaga) jednog kućanstva iznosi:

$$P_{v1} = P_{inst} \cdot f_p$$

Vršno opterećenje općenito može dosta varirati od jednog do drugog kućanstva, a prvenstveno ovisi o:

- standardu
- lokaciji (grad/selo, klimatski uvjeti, raspoloživost ostalih energenata)
- posjedovanje limitatora, itd.

Budući da vršno opterećenje grupe kućanstava ne nastupa istovremeno, ono se ne računa kao aritmetički zbroj svih vršnih opterećenja, što je ilustrirano na slijedećoj slici:



Slika 7-7 Pojedinačno vršno opterećenje dva kućanstva i zbirno vršno opterećenje

Općenito, omjer

$$\frac{\text{Vršna snaga grupe kućanstava}}{\text{Zbroj pojedinačnih vršnih snaga}}$$

je sve manji što je broj kućanstava veći.

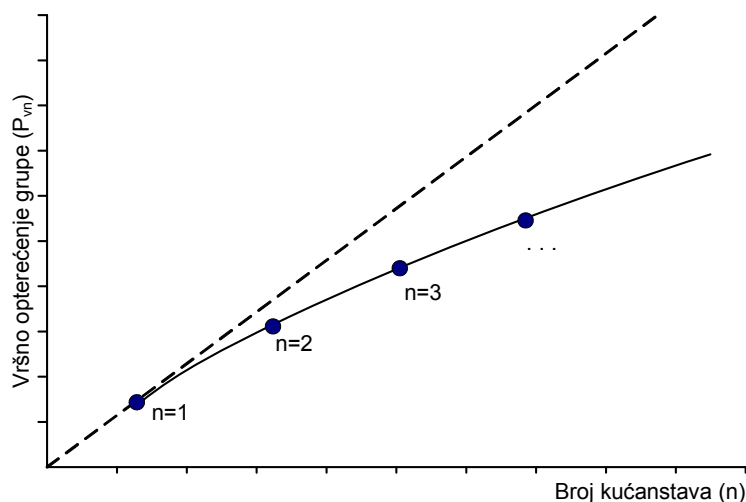
Ako se pretpostavi da se na promatranom izvodu nalaze kućanstva približno jednakih karakteristika (P_{inst}, f_p), vršno opterećenje grupe kućanstava računa se preko formule (Ruscova formula):

$$P_{vn} = P_{v1} (f_{\infty} \cdot n + (1 - f_{\infty}) \cdot \sqrt{n}) \quad , \quad \text{gdje je:}$$

n- broj kućanstava u promatranjoj grupi

f_{∞} - faktor istodobnosti za vrlo velik (teoretski beskonačan) broj kućanstava.

Odgovarajuća krivulja vršnog opterećenja grupe kućanstava u ovisnosti o broju kućanstava prikazana je na slijedećoj slici (puna linija). Crtkana linija pokazuje linearnu ovisnost koja bi vrijedila u slučaju da je faktor istovremenosti 1.



Slika 7-8 Usporedba vršnog opterećenja grupe kućanstava uz uvažavanje faktora istovremenosti i bez njega

Na osnovu izračunatog vršnog opterećenja grupe od n kućanstava, može se dobiti ekvivalentno opterećenje (udio) pojedinog kućanstva:

$$P_1 = \frac{P_{vn}}{n}$$

Npr. ako je vršno opterećenje jednog kućanstva 10 kW, a niskonaponskim izviđanjem se napaja 64 takva kućanstva, njihovo vršno opterećenje (vršno opterećenje izviđanja) nije 640 kW, već uz pretpostavku $f_{\infty} = 0.17$ iznosi:

$$P_{v64} = P_{v1} (f_{\infty} \cdot n + (1 - f_{\infty}) \cdot \sqrt{n}) = 10 (0.17 \cdot 64 + (1 - 0.17) \cdot \sqrt{64}) = 120 \text{ kW}$$

U ovom slučaju faktor istovremenosti je $120/640=0,1875$.

Doprinos jednog kućanstva ukupnom vršnom opterećenju bio bi $120/64=1,875$ kW.

Druga varijanta Rusck-ove formule je:

$$P_{vn} = A \cdot n + B \cdot \sqrt{n}, \text{ gdje su:}$$

$$A = P_{v1} \cdot f_{\infty}$$

$$B = P_{v1} \cdot (1 - f_{\infty})$$

Ako se u promatranoj grupi potrošača nalazi više različitih (nehomogenih) grupa potrošača, vršno opterećenje ukupne grupe računa se na sljedeći način:

Ukupno vršno opterećenje:

$$P_{vn} = \sum_{i=1}^k A_i \cdot n_i + \sqrt{\sum_{i=1}^k B_i^2 \cdot n_i}$$

n – ukupni broj kućanstava

n_i – broj kućanstava u i -toj grupi, $\sum n_i = n$

k – broj grupa

A_i, B_i – konstante za i -tu grupu

Vršno opterećenje pojedinačne (i -te) grupe:

$$P_{vn_i} = A_i \cdot n_i + B_i \cdot \sqrt{n_i}$$

Ekvivalentno opterećenje (udio) jednog kućanstva, računato za svaku grupu posebno:

$$P_{l_i} = \frac{P_{vn_i}}{n_i \cdot \sum_{j=1}^k P_{vn_j}}$$

Javna rasvjeta i ostali potrošači

Faktor istovremenosti za javnu rasvjetu je 1 (osim u posebnim slučajevima), tako da je snaga pojedinog rasvjetnog tijela jednaka nazivnoj snazi, a vršno opterećenje je zbroj svih snaga.

Potrošači koji spadaju u kategoriju ostalih potrošača posebno se računaju. Oni su zadani vlastitom vršnom snagom (P_v), faktorom istovremenosti prema ostalim potrošačima (f_i) i faktorom snage ($\cos\varphi$). Faktor istovremenosti je različit od 1 u slučaju da vršno opterećenje promatranog potrošača ne nastupa istovremeno sa vršnim opterećenjem ostalih potrošača u mreži (kućanstava i/ili javne rasvjete). U čvoru u kojem su priključeni, ostali potrošači sudjeluju s opterećenjem:

$$P_{v_i} = P_v \cdot f_i$$

Jalova snaga

Odgovarajuća opterećenja jalovom snagom pojedinih čvorišta mreže dobiju se iz izračunate radne snage i zadanog faktora snage ($\cos\varphi$):

$$Q_i = P_i \operatorname{tg}\varphi = P_i \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi}$$

Proračun vršnog (strujnog) opterećenja niskonaponskog izvoda

Za proračun vršnog opterećenja niskonaponskog izvoda potrebno je izvršiti prethodno opisan proračun vršnog opterećenja grupe kućanstava koji se napajaju sa izvoda, čemu se pribraja opterećenje ostalih potrošača, posebno za radnu i jalovu snagu. Ukupno strujno opterećenje izvoda približno iznosi (uz zanemarene gubitke u mreži i padove napona):

$$|I_v| = \frac{\sqrt{P_v^2 + Q_v^2}}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \text{ gdje je:}$$

P_v – vršno opterećenje izvoda radnom snagom

Q_v – vršno opterećenje izvoda jalovom snagom

U_n – nazivi linijski napon mreže

ili, u slučaju pretpostavljenog jednakog faktora snage za sve potrošače u mreži,

$$|I_v| = \frac{P_v}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi}$$

Odabir snage transformatora

Odabir minimalno potrebne snage transformatora u TS 10(20)/0.4 kV računa se na osnovu vršnog opterećenja svih potrošača koji napaja TS, faktora rezerve i dopuštenog preopterećenja transformatora. Moguće je više pristupa, od kojih je najčešći slijedeći:

U slučaju da ima više niskonaponskih izvoda, ukupno vršno opterećenje kućanstava određuje se pomoću Rusc-ove formule, ali računajući broj kućanstva na svim izvodima. Naime, zbrajanjem vršnih opterećenja svih izvoda ne bi bio uvažen faktor istovremenosti potrošnje kućanstava na različitim izvodima. Ukupnom vršnom opterećenju kućanstava dodaje se vršno opterećenje ostalih potrošača (sa uračunatim faktorima istodobnosti) i opterećenja izvoda javne rasvjete. Na osnovu izračunatog ukupnog vršnog opterećenja niskonaponske mreže, računa se minimalno potrebna snaga transformatora (uz pretpostavku istog faktora snage svih potrošača):

$$S_n > \frac{P_{v_mreže}}{r_{pre} \cdot (1 - r_{rez}) \cdot \cos \varphi},$$

gdje je

$P_{v_mreže}$ – ukupno vršno opterećenje mreže

$\cos \varphi$ - prosječni faktor snage

r_{pre} – faktor dopuštenog preopterećenja transformatora (npr. 1.4, tj. 140%)

r_{rez} – faktor rezerve (npr. 0.2, tj. 20% rezerve)

7.3 Dimenzioniranje niskonaponskih vodova

Dimenzioniranje izvoda niskog napona vrši se na osnovu slijedećih kriterija:

A) Najveće strujno opterećenje

Na osnovu izračunatog strujnog vršnog opterećenja (I_v), tj. struje kojom je opterećena prva dionica izvoda, računa se minimalno potreban presjek vodiča, na način da zadovolji uvjet:

$$I_n \geq \frac{I_v}{C_t \cdot C_m \cdot C_p} \quad \text{u slučaju kablenskog izvoda}$$

$$I_n \geq \frac{I_v}{C_t} \quad \text{u slučaju nadzemnog voda}$$

I_n – strujna opteretivost vodiča u normalnim uvjetima (nazivna struja vodiča)

C_t – korekcijski faktor utjecaja temperature okoline

C_m – korekcijski faktor utjecaja specifičnog toplinskog otpora okoline

C_p – korekcijski faktor utjecaja načina polaganja kabela:

$$C_p = C_{p1} \cdot C_{p2} \cdot C_{p3}$$

C_{p1} – korekcijski faktor s obzirom na broj i razmak kabela

C_{p2} – korekcijski faktor s obzirom na vrstu zaštitnog pokrova

C_{p3} – korekcijski faktor s obzirom na broj cijevi pri polaganju paralelnih kabela u zasebnim cijevima

U slučaju različitih presjeka vodiča na izvodu (npr. na odvojcima), proračun je potrebno napraviti za svaku početnu dionicu gdje se mijenja presjek.

B) Pad napona u mreži

Presjek vodiča niskonaponske mreže mora se odabrati na način da najveći pad napona u mreži bude manji od maksimalno dozvoljenog postotnog pada napona (npr. 6%). Proračun se vrši za krajnje potrošače u mreži (na glavnom izvodu i svim odvojcima).

Aproksimativni izraz za postotni pad napona je:

$$\Delta u\% = \frac{100}{U_n^2} \left(\sum_i P_i' \cdot R_i + \sum_i Q_i' \cdot X_i \right), \text{ gdje su:}$$

P_i' , Q_i' – radna i jalova snaga i-te dionice, računaju se sve dionice od početka izvoda do krajnjeg potrošača

R_i , X_i – radni i induktivni otpor i-te dionice

U_n – nazivi linijski napon mreže

U slučaju istog presjeka svih dionica, može se računati sa jediničnim radnim i induktivnim otporom vodiča (r , x) i duljinama dionica (l_i):

$$\Delta u\% = \frac{100}{U_n^2} \left(r \cdot \sum_i P_i' \cdot l_i + x \cdot \sum_i Q_i' \cdot l_i \right)$$

Ili u slučaju pretpostavljenog jednakog faktora snage svih potrošača:

$$\Delta u\% = \frac{100}{U_n^2} \cdot (r + x \cdot \tan \varphi) \cdot \sum_i P_i' \cdot l_i$$

Za jednofazne potrošače (uz uvrštenje faznog napona i jednofaznih snaga P_i'), vrijedi:

$$\Delta v\% = \frac{200}{V_n^2} \cdot (r + x \cdot \tan \varphi) \cdot \sum_i P_i' \cdot l_i$$

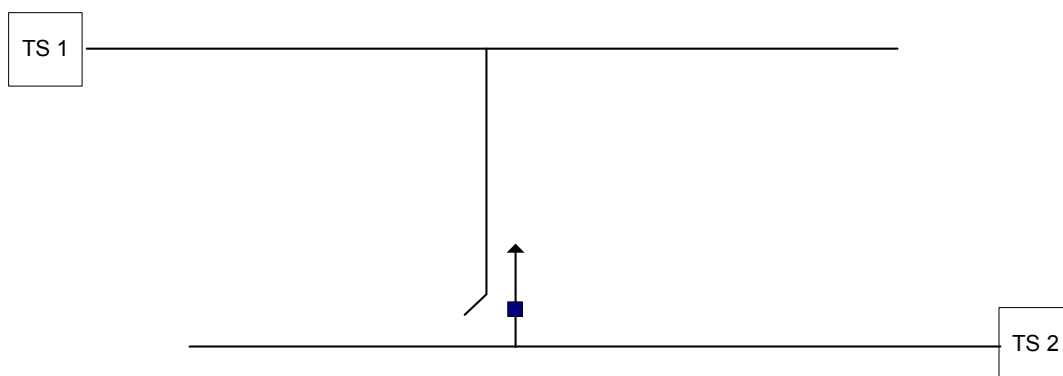
Najveći postotni pad napona mora zadovoljiti uvjet:

$$\Delta u\%_{\max} \leq \Delta u\%_{\text{dozvoljeno}}$$

C) Dodatni uvjeti dimenzioniranja

U nekim specifičnim slučajevima, na dimenzioniranje presjeka vodiča mogu utjecati:

- problemi sa dosegom zaštite, koji se mogu riješiti povećanjem presjeka vodiča (iako ima i drugih mogućnosti)
- zahtjevi rezervnog napajanja, npr. potrošača na nekom drugom izvodu (moguće i druge TS 10/0.4) za kojeg je potrebno osigurati rezervno napajanje; u ovom slučaju se obično vrši samo kontrola na strujno opterećenje (slika 7-9)
- napajanje dijela potrošača koji se u budućnosti planiraju priključiti na neku drugu (novu) TS 10/0.4, itd.



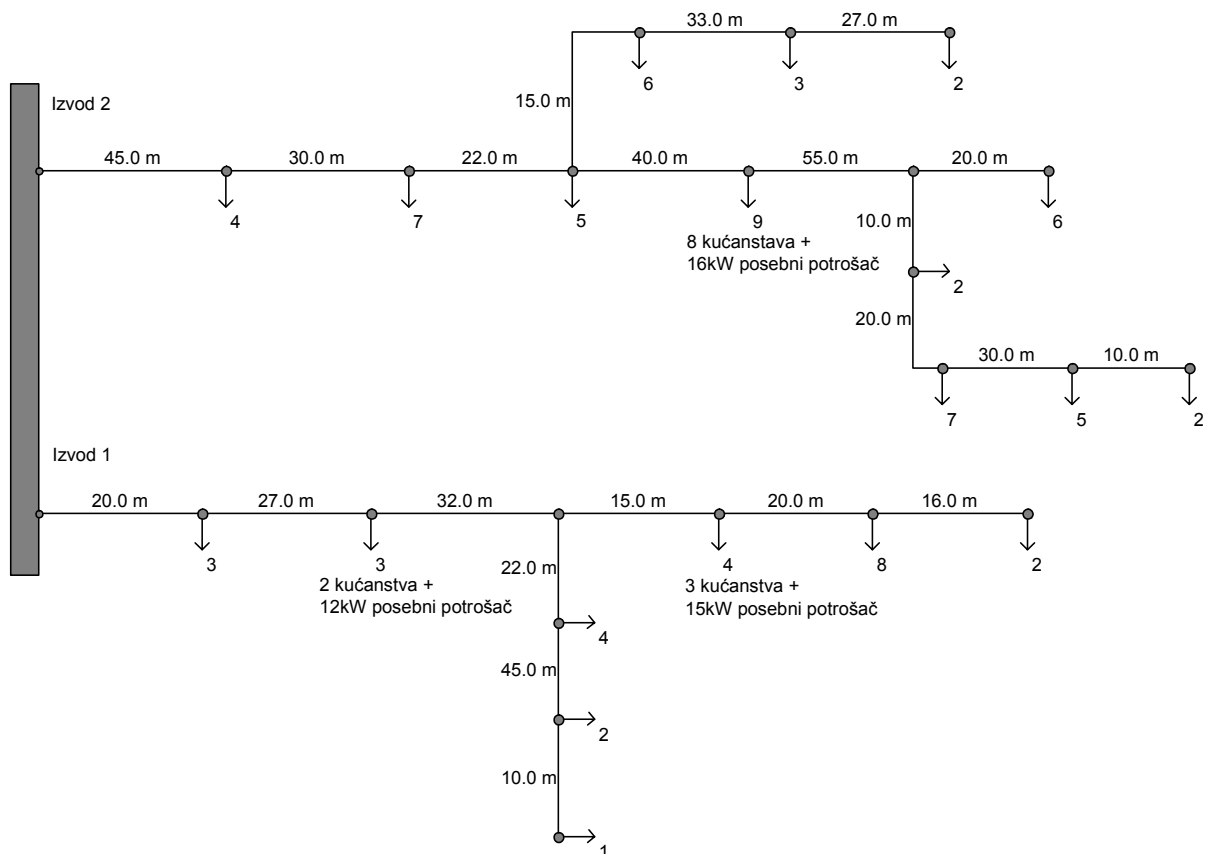
Slika 7-9 Osnovno napajanje potrošača iz TS 2 i rezervno napajanje iz TS 1

ZADATAK 11

Izračunati:

- Presjek nadzemnog vodiča Al 3*X + X za glavni izvod i podizvode, uz dozvoljeni pad napona: 6%
- Snagu TS 10/0.4 (faktor rezerve 25%, dozvoljeno preopterećenje transformatora 140%)

Jednopolna shema mreže:



Podaci elemenata mreže:

Trafo:

10/0.4 kV

Grupa spoja: Dyn5

Snaga: ?

NN vodovi :

Duljine dionica: dane su u metrima na slici

Tip vodiča: Al 3*? + ?

Standardni presjeci, otpori i nazivne struje:

Presjek (mm ²)	Rd (Ω)	Xd (Ω)	In (A)
3* 25+ 16	1.181	0.325	121
3* 35+ 16	0.833	0.313	149
3* 35+ 25	0.833	0.313	149
3* 50+ 16	0.595	0.302	185
3* 50+ 25	0.595	0.302	185
3* 50+ 35	0.595	0.302	185
3* 70+ 25	0.437	0.29	226
3* 70+ 35	0.437	0.29	226
3* 70+ 50	0.437	0.29	226
3* 95+ 50	0.308	0.281	283
3* 95+ 70	0.308	0.281	283

Potrošnja :

Kućanstva (broj kućanstava u svakom čvoru prikazan je na slici)

- vršna snaga jednog kućanstva $P_{v1} = 8 \text{ kW}$

- faktor snage : $\cos\varphi = 0,98$

- $f_{\infty} = 0,17$

Ostali potrošači

- snage ostalih potrošača dane su u kW na slici

- faktor snage : $\cos\varphi = 0,98$

- faktor istovremenosti sa ostalim potrošačima $f_i = 1$

Rješenje

Proračun opterećenja:

Izvod 1:

$n = 25, P_{v1} = 8 \text{ kW}, f_{\infty} = 0,17$

Vršna snaga na nivou izvoda:

$$P_{vn} = 8 \cdot (0,17 \cdot 25 + (1 - 0,17) \cdot \sqrt{25}) = 67,2 \text{ kW}$$

Udio jednog kućanstva u vršnoj snazi izvoda:

$$P_1 = \frac{P_{vn}}{n} = \frac{67,2}{25} = 2,7 \text{ kW}$$

Množenjem P_{v1} sa brojem kućanstava u svakom čvoru dobije se ekvivalentna potrošnja za svaki čvor.

Izvod 2:

Istim proračunom, dobije se:

$n = 57, P_{vn} = 127,65 \text{ kW}, P_1 = 2,24 \text{ kW}$

Odgovarajuća opterećenja jalovom snagom dobiju se iz zadanog faktora snage ($\cos\varphi = 0,98$)

$$Q_1 = P_1 \operatorname{tg}\varphi = P_1 \frac{\sqrt{1 - \cos^2\varphi}}{\cos\varphi}$$

$$Q_1 = 2,7 \cdot \frac{\sqrt{1 - 0,98^2}}{0,98} = 0,5 \text{ kW} \text{ - (izvod 1); } Q_1 = 2,24 \cdot \frac{\sqrt{1 - 0,98^2}}{0,98} = 0,45 \text{ kW (izvod 2)}$$

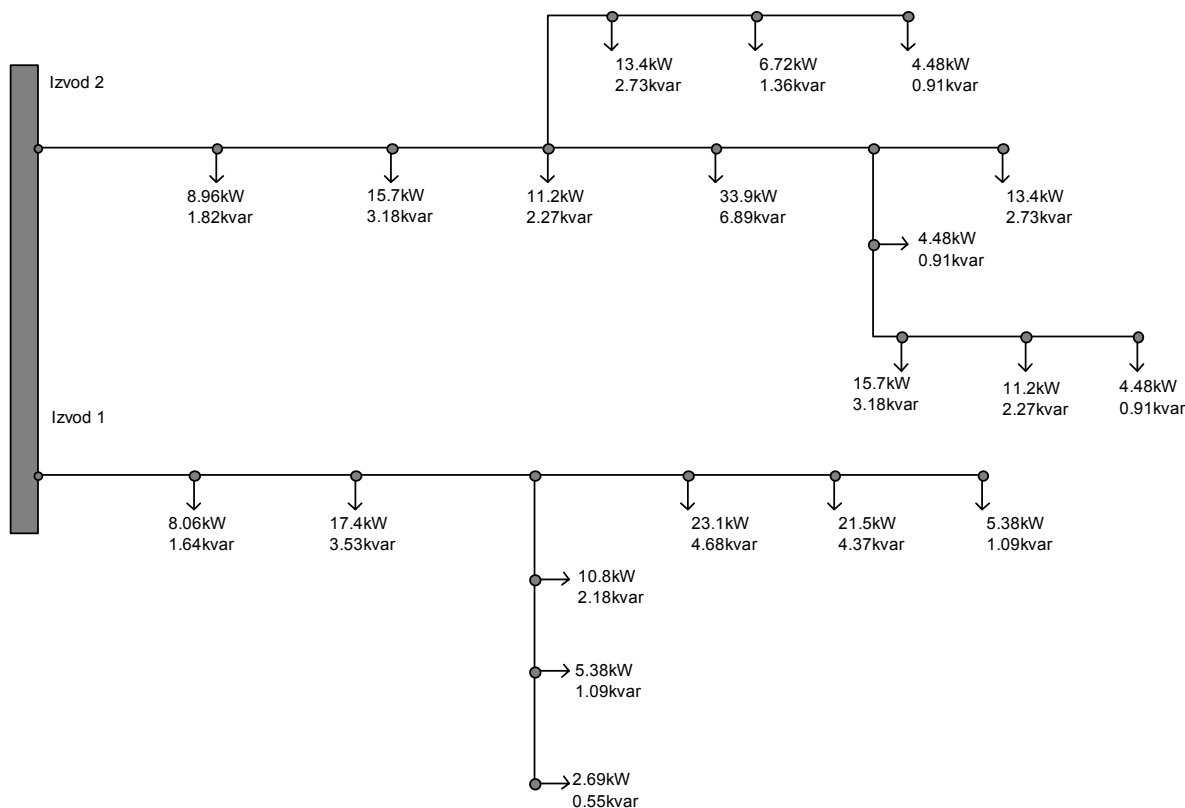
Ostali potrošači:

U primjeru su zadana tri ostala potrošača sa radnom snagom i faktorom snage. Potrebno je još izračunati njihovu jalovu snagu:

	P_{inst}	f_i	$\cos\varphi$	P_{ost}	Q_{ost}
(1)	12	1	0,98	12	2,4
(2)	15	1	0,98	15	3,1
(3)	16	1	0,98	16	3,2

Izračunate vrijednosti P_{ost} i Q_{ost} pribrojene su potrošnji kućanstava i zajedno prikazane na sljedećoj slici.

Napomena: Rezultati prikazani na sljedećoj slici, kao i na ostalim slikama u ovom zadatku, nisu računati ručno već pomoću računala. Zato se neke vrijednosti neznatno razlikuju od onih koje bi se dobile ručnim proračunom.



Odabir vodiča:

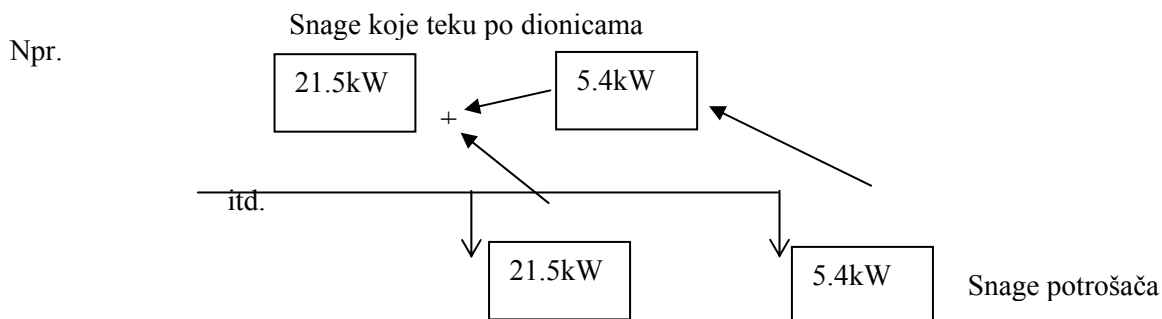
Slijedi provjera strujnog opterećenja:

Inicijalni odabir vodiča:

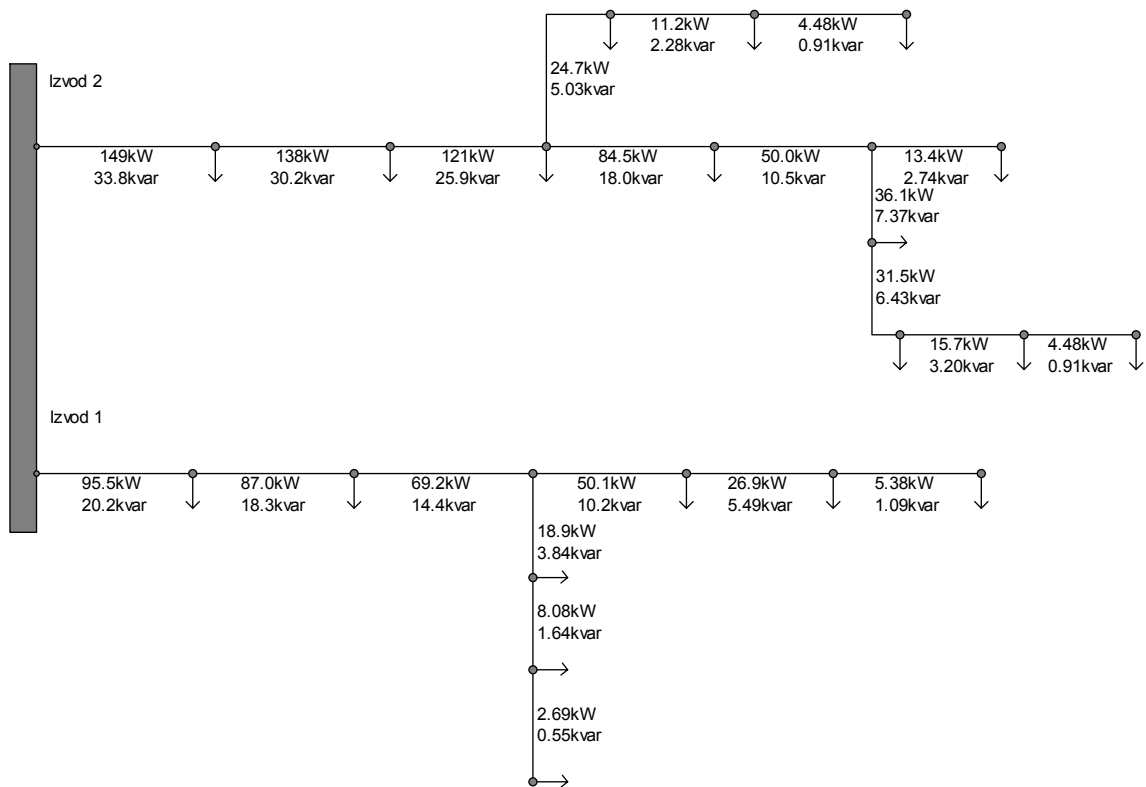
Izvodi: Al **3x95 + 70**

Podizvodi: Al **3x35 + 16**

Na osnovu izračunatog opterećenja čvorova računaju se aproksimativno (jer nisu uzeti u obzir gubici) tokovi snaga na način da se zbrajaju opterećenja od kraja prema početku izvoda:



Na opisani način dobiju se snage koje teku kroz sve dionice izvoda. Na donjoj slici prikazane su tako izračunate snage.



Na osnovu izračunatih tokova snaga računaju se struje kroz svaku dionicu:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \text{ gdje su}$$

P, Q - snage koje teku kroz dionicu

U_n - nazivni napon mreže

I – struja kroz dionicu

Dovoljno je izračunati struju prve dionice glavnog izvoda i svakog podizvoda

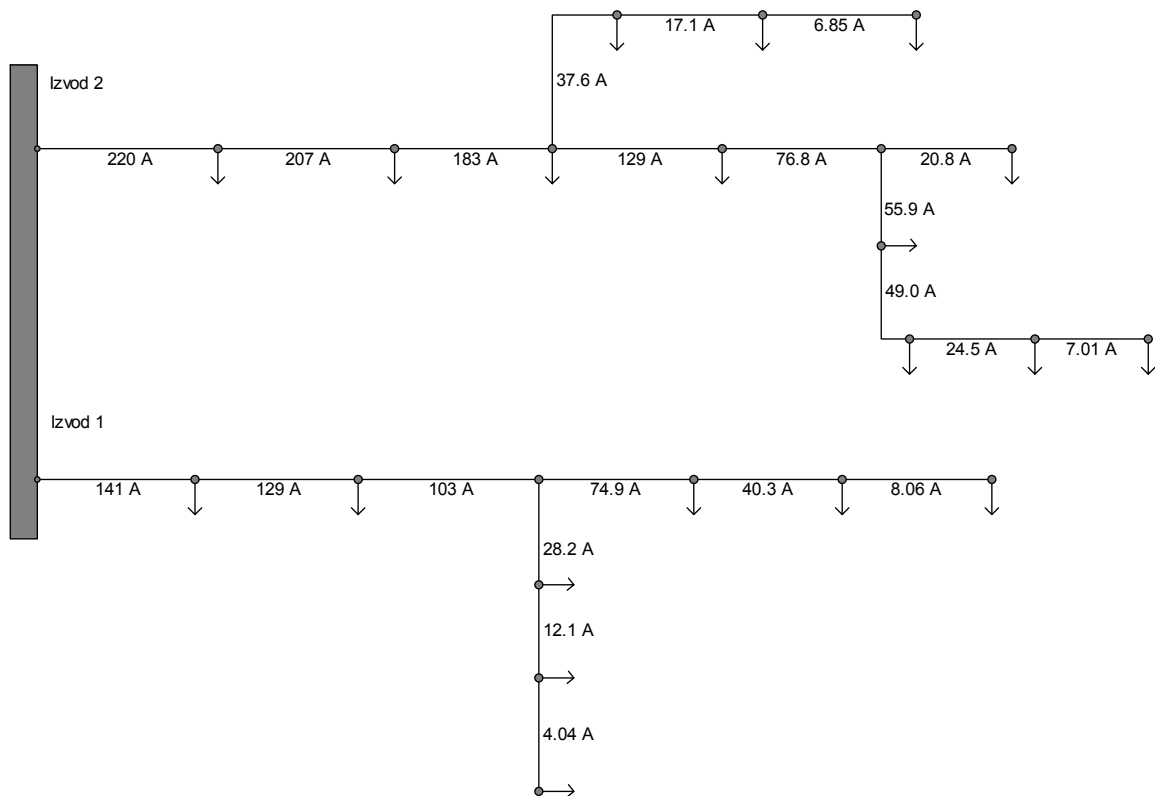
Npr.

- za izvod 1, dionica 1:

$$P = 94,2 \text{ kW}, Q = 19,1 \text{ kVA}, U_n = 400 \text{ V}, l=20\text{m}$$

$$I = \frac{\sqrt{94,2^2 + 19,1^2 \cdot 10^3}}{\sqrt{3} \cdot 400} = 138,7 \text{ A}$$

Na sljedećoj slici prikazane su izračunate struje za svaku dionicu u amperima.



Dozvoljena struja za vodič Al 3x95 + 70 je 283 A, a za Al 3x35 + 16 je 149 A, tako da odabrani presjeci zadovoljavaju s obzirom na strujno opterećenje, budući je:

$$I_{n(95\text{mm}^2)}=283\text{A} < I_{v2}=220\text{A} < I_{v1}=141\text{A}$$

$$I_{n(35\text{mm}^2)}=149\text{A} < I_{v_podizvoda}= 37.6 ; 55.9; 28.2\text{A}$$

Proračun padova napona:

Za svaku dionicu u mreži, pad napona se računa preko:

$$\Delta U = \frac{P_i \cdot r_i \cdot l_i + Q_i \cdot x_i \cdot l_i}{U_n} = \frac{l_i}{U_n} (P_i \cdot r_i + Q_i \cdot x_i), \text{ gdje je}$$

r_i, x_i – jedinični radni i induktivni otpor i-te dionice

P_i, Q_i – radna i jalova snaga koja teče i-tom dionicom

l_i – duljina i-te dionice

U_n – nazivni linijski napon mreže

Oduzimanjem izračunatih padova napona dionica od početka prema kraju izvoda dobiju se naponi svih čvorova.

Npr. (izvod 1)

-dionica 1:

$P = 94,2 \text{ kW}$, $Q = 19,1 \text{ kW}$, $l = 20 \text{ m}$, $r = 0,308 \Omega/\text{km}$, $x = 0,281\Omega/\text{km}$

$$\Delta U = \frac{l}{U_n} (P \cdot r + Q \cdot x) = \frac{20}{400} (94,2 \cdot 0,308 + 19,1 \cdot 0,281) = 1,72 \text{ V}$$

$$U_1 = U_n - \Delta U = 400 - 1,72 = 398,3 \text{ V} \quad (\text{napon čvora 1})$$

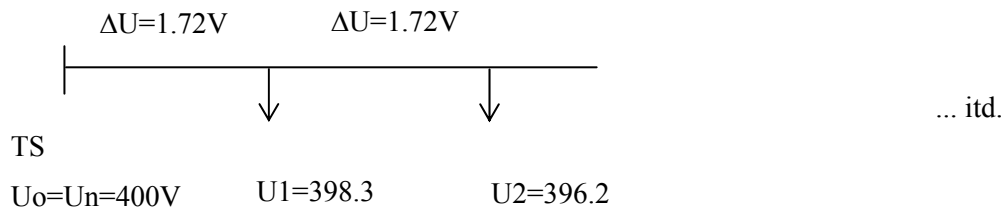
-dionica 2 :

$$P = 86,1 \text{ kW}, Q = 17,5 \text{ kW}, l = 27 \text{ m}, r = 0,308 \Omega/\text{km}, x = 0,281 \Omega/\text{km}$$

$$\Delta U = \frac{27}{400} (86,1 \cdot 0,308 + 17,5 \cdot 0,281) = 2,12 \text{ V}$$

$$U_2 = U_1 - \Delta U = 398,3 - 2,12 = 396,2 \text{ V}$$

itd.



Postotni pad napona:

$$\Delta u\% = \frac{U_n - U}{U_n} \cdot 100$$

Npr.

- za prvi čvor:

$$\Delta u\% = \frac{400 - 398,3}{400} \cdot 100 = 0,43\%$$

- za drugi čvor:

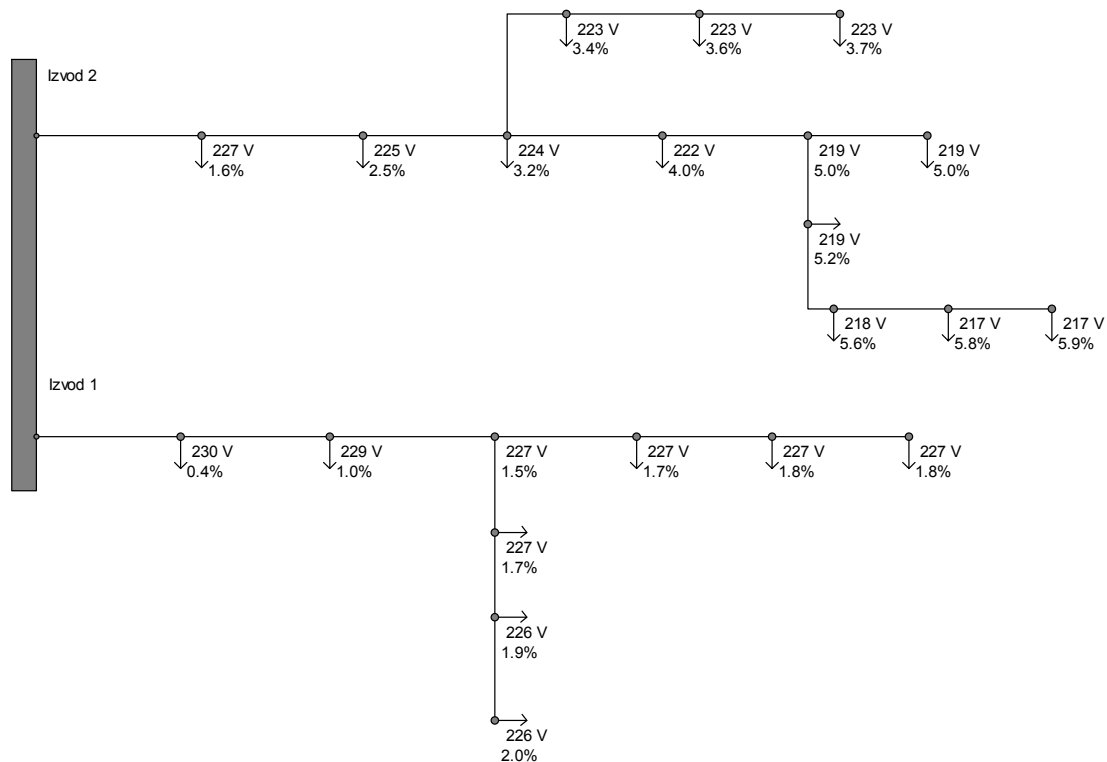
$$\Delta u\% = \frac{400 - 396,2}{400} \cdot 100 = 0,96\%$$

itd.

Za provjeru maksimalnog pada napona dovoljno je računati samo pad napona na krajnjim potrošačima. Postotni pad napona za krajnje točke na izvodu i odvojcima računa se preko formule (različiti presjeci izvoda i podizvoda!):

$$\Delta u\% = \frac{100}{U_n^2} \left(\sum_i P_i \cdot R_i + \sum_i Q_i \cdot X_i \right)$$

Izračunati fazni naponi svih čvorova prikazani su na sljedećoj slici. Na slici je osim linijskih napona čvorova, prikazan i postotni pad napona za svaki čvor.



Najveći pad napona na izvodima su:

Izvod 1:

$$U_{\min} = 226 \text{ V (fazno)} = 391,4 \text{ V (linijski)} \quad ; \quad \Delta U_{\max} \% = 2,0\%$$

Izvod 2:

$$U_{\min} = 217 \text{ V (fazno)} = 375,9 \text{ V (linijski)} \quad ; \quad \Delta U_{\max} \% = 5,9\%$$

Budući da su maksimalni padovi napona manji od 6%, odabrani presjek vodiča zadovoljava kriterij dozvoljenog pada napona u mreži, pa se inicijalno pretpostavljeni tipovi odnosno presjeci vodiča izvoda i podizvoda mogu uzeti kao konačni.

Napomena: s obzirom na proračun strujnog opterećenja, moglo se uzeti i manje presjeka, ali oni ne bi zadovoljavali uvjet dozvoljenog pada napona. Odabrani presjeci su najmanji koji zadovoljavaju i strujni i naponski uvjet (pod pretpostavkom da za oba izvoda moramo odabrati isti presjek).

Odabir snage transformatora

Ukupno vršno opterećenje niskonaponske mreže (82 kućanstva, $f_{\infty}=0.17$, vršna snaga $P_{v1}=8 \text{ kW}$, snaga ostalih potrošača 41 kW, faktor snage svih potrošača $\cos\varphi=0.98$):

$$P_{v_mreže} = P_{v1} (f_{\infty} \cdot n + (1 - f_{\infty}) \cdot \sqrt{n}) + P_{ostalih}$$

$$P_{v_mreže} = 8(0.17 \cdot 82 + (1 - 0.17) \cdot \sqrt{82}) + 41 = 171.6 + 41 = 212.6 \text{ kW}$$

Minimalno potrebna snaga transformatora ($r_{rez}=0.25$, $r_{pre}=1.4$):

$$S_n > \frac{P_{v_mreže}}{r_{pre} \cdot (1 - r_{rez}) \cdot \cos\varphi} > \frac{212.6}{1.4 \cdot (1 - 0.25) \cdot 0.98} > 206.6 \text{ kVA}$$

Prema tome, potrebno je odabrati tipski transformator snage 250 kVA.

7.4 Zaštitne mjere u niskonaponskoj mreži i TS 10(20)/0.4 kV

Zaštitne mjere u niskonaponskoj mreži obuhvaćaju:

- Zaštitu od previsokog napona dodira
 - direktni dodir podrazumijeva dodir dijela mreže koji je u normalnom pogonu pod naponom
 - indirektni dodir podrazumijeva dodir dijela mreže/instalacija koji u normalnom pogonu nije pod naponom, ali se na njemu može pojaviti napon u slučaju kvara (najčešće jednopolnog kratkog spoja)
- Zaštitu elemenata mreže od strujnog preopterećenja
- Zaštitu od mehaničkih i dinamičkih naprezanja
- Prenaponsku zaštitu
- Ostale zaštite (protupožarna i sl.)

Zaštita od previsokih napona dodira može se ostvariti:

- nulovanjem
- zaštitnim uzemljenjem
- zaštitnim izoliranjem
- zaštitnim strujnim ili naponskim sklopkama
- mjerama izjednačavanja potencijala (u niskonaponskim instalacijama)
- kombinacijom navedenih mjera

U donjoj tablici navedene su osnovne mjere zaštite od direktnog i indirektnog dodira:

Tablica 2: Zaštita od direktnog i indirektnog dodira

Zaštita od direktnog dodira	
Potpuna zaštita	Djelomična zaštita
- izoliranje - prekrivanje - omatanje - povećani razmak (npr. nadzemni vodovi)	- zapreke - smanjeni razmak
Dozvoljena u svim slučajevima, za nestručne osobe obavezna	Dozvoljena samo uvjetno (npr. u zatvorenim pogonskim prostorima)
Zaštita od direktnog dodira	
Iskapčanje	Signalizacija
TN sistem - nadstrujna zaštita - FID-ova sklopka TT sistem - FID-ova sklopka	IT sistem - kontrolnik izolacije
Opće izjednačenje potencijala, dodatno izjednačenje potencijala kod posebnih uvjeta	

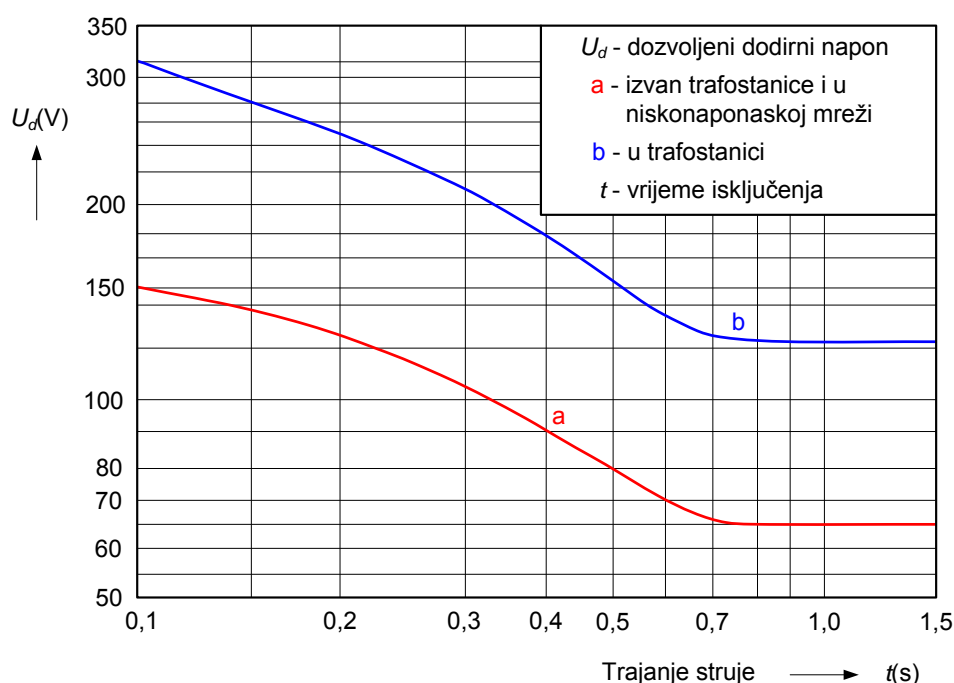
Najbitniji elementi u niskonaponskoj mreži koji utječu na zaštitu od previsokih indirektnih napona dodira su:

- Uzemljenje TS 10/0.4, niskonaponske mreže i potrošačkih objekata na način kako definiraju odgovarajući propisi.
- Ispravno odabrani osigurači niskonaponskih izvoda, prvenstveno prema kriteriju dosega zaštite.

Dozvoljeni naponi dodira, pri kvaru koji se isključuje u vremenu većem od 1 sekunde, iznose:

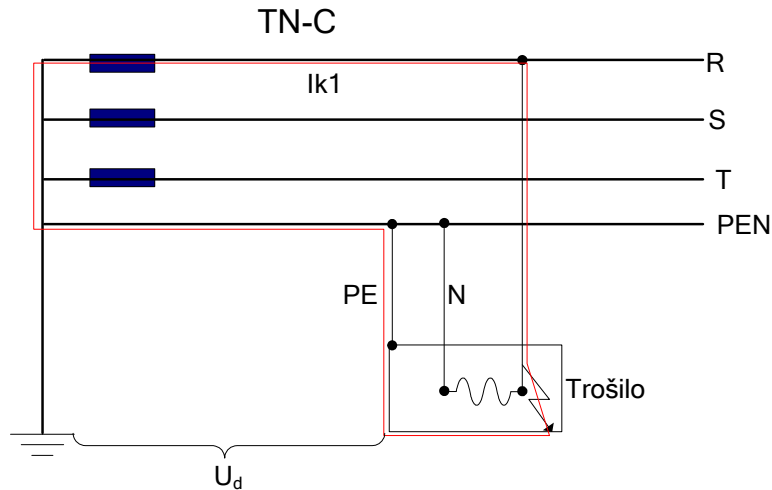
- 125 V u TS 10(20)/0.4
- 65 V izvan TS

Ako je vrijeme isključenja kvara manje od 1 sekunde, navedeni iznosi graničnih dozvoljenih napona su veći, a definirani su preko odgovarajućih krivulja u ovisnosti o vremenu isključenja kvara.

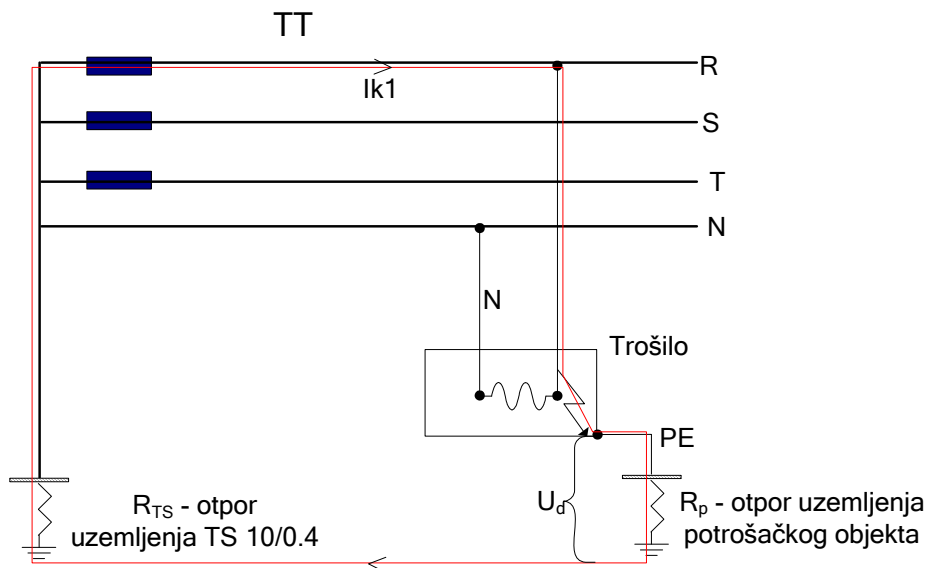


Slika 7-10 Dozvoljeni naponi dodira u ovisnosti o trajanju kvara (prema postojećim propisima u RH)

Pri jednopolnom kratkom spoju (faza – nul vodič), nastaje određeni potencijal prema zemlji koji se pojavljuje na kućištima nulovanih električnih uređaja. Najveća vrijednost potencijala nul vodiča je na mjestu kvara, a prvenstveno ovisi o otporima uzemljenja u mreži, impedancijama faznog i nul vodiča, te udaljenosti mjesta kvara od TS 10/0.4. Na slijedećim slikama prikazane su pojednostavljene sheme jednopolnog kratkog spoja u TN i TT mreži, sa odgovarajućim stazama struja kvara.



Slika 7-11 Jednopolni kvar u TN mreži



Slika 7-12 Jednopolni kvar u TT mreži

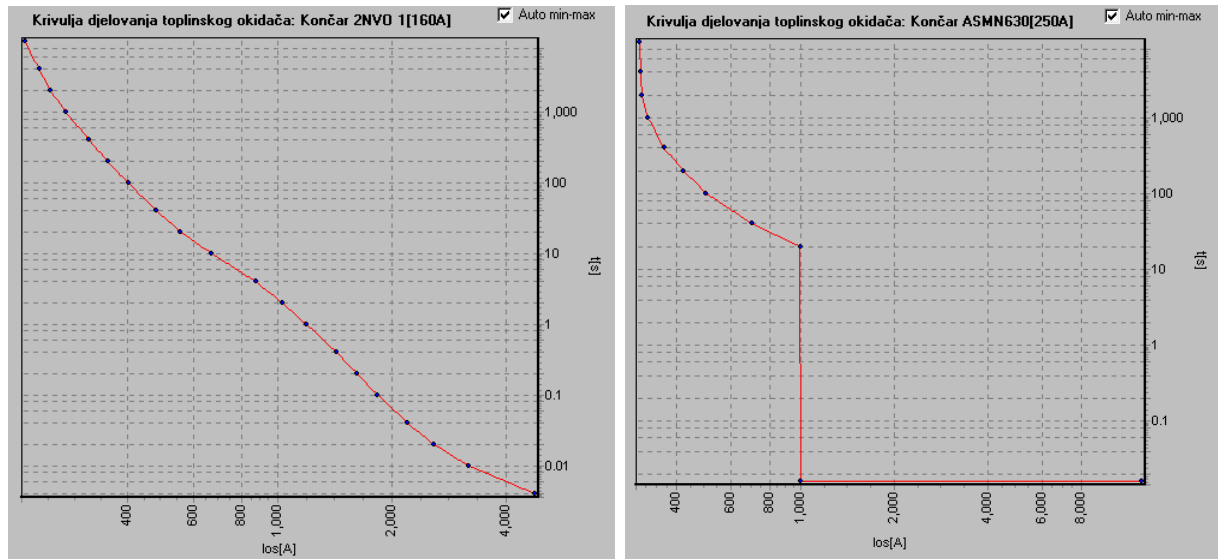
Na iznos napona dodira u TN mreži najviše utječe impedancija nul vodiča, a u TT mrežama otpor uzemljenja potrošačkog objekta.

Potencijal na mjestu kvara se uvijek može točno izračunati, ali budući da treba poznavati veliki broj ulaznih parametara, najčešće se nakon izgradnje mreže vrše odgovarajuća mjerenja, na osnovu kojih se poduzimaju dodatne mjere smanjenja napona dodira u slučaju da izmjerene vrijednosti prelaze dopuštene iznose.

Niskonaponski izvodi štite se od preopterećenja i kratkog spoja, osiguračima/prekidačima koji se postavljaju na početku svakog izvoda. Zaštitni uređaji su:

- a) topljivi osigurači sa vremenski zavisnom zaštitnom karakteristikom

- niskoučinski (obično do $I_n=200A$)
 - visokoučinski (do $I_n=2000A$)
- b) prekidači (sklopke) sa vremenski zavisnom (bimetal) i vremenski nezavisnom zaštitnom karakteristikom (elektromagnetski relej)
- sa podesivom nazivnom strujom i strujom okidanja
 - sa fiksnom nazivnom strujom i strujom okidanja (automatski osigurači)
- c) prekidači (sklopke), sa kontrolnim članom u nul vodiču (prekidanje u slučaju struje u nul vodiču veće od podešene)



Slika 7-13 Krivulja djelovanja (I-t karakteristika) rastalnog osigurača i automatskog osigurača - sklopke

Odabrani osigurač na izvodu mora zadovoljiti sljedeće kriterije:

- 1) Vršno opterećenje izvoda (struja) mora biti manja od nazivne prorađne struje osigurača

$$I_{vršno} < I_n$$

Ovaj uvjet osigurava da osigurač ne isključuje izvod za vrijeme normalnih opterećenja

- 2) Nazivna struja osigurača mora biti manja od nazivne struje voda na kojem se nalazi

$$I_n(\text{osigurač}) < I_n(\text{vod})$$

Ovim uvjetom se štiti vodič od preopterećenja

- 3) Kriterij termičke čvrstoće. Za svaku točku u mreži mora biti zadovoljen uvjet:

$$t_{OS} = t_{dop} \leq a \left(\frac{S}{I_{k3 \max}} \right)^2$$

S (mm) - presjek vodiča

I_{k3} (kA) - struja kratkog spoja

a - konstanta ovisna o materijalu i izvedbi voda

Bakreni vodiči $a = 0,013 - 0,018$

Aluminijski vodiči $a = 0,006 - 0,007$

t_{OS} (s) - vrijeme pregaranja osigurača; očitava se iz karakteristike pregaranja osigurača u ovisnosti o iznosu I_{k3} .

Gornja jednadžba se može pisati u obliku:

$$t_{OS} = t_{dop} \leq \left(\frac{I_{k3sek}}{I_{k3}} \right)^2, \text{ gdje je}$$

I_{k3sek} - dopuštena struja 1-sekundnog trolejnog kratkog spoja (uračunat presjek vodiča i konstanta a

Ovaj uvjet osigurava da vrijeme reagiranja osigurača u kratkom spoju bude manje od vremena potrebnog za taljenje vodiča pri kratkom spoju, tj. da osigurač dovoljno brzo reagira. Uvjet se provjerava za sve dionice u mreži, a pri ručnom proračunu se može ograničiti na prvu i zadnju dionicu svakog izvoda i odvojka.

- 4) Kriterij dosega zaštite. Osigurač mora reagirati na kratki spoj u bilo kojoj točki mreže, tj. njegova nazivna proradna struja mora biti manja od najmanje vrijednosti struje jednopolnog kratkog spoja u mreži (struje jednopolnog kratkog spoja su uvijek manje od trolejnog na krajevima izvoda i podizvoda). Pri tom se obično uzima i određena rezerva, tj. koeficijent sigurnosti. Uvjet sigurnosti prorade osigurača je.

$$I_{k1} \geq k \cdot I_{OS}$$

$I_{OS} = I_n$ - nazivna (proradna) struja osigurača

k - sigurnosni koeficijent :

$k=2,5$ za rastalne osigurače

$k=1,25$ za automatske prekidače

$k=0,5-1,0$ za automatske prekidače sa kontrolnim članom u nul vodiču

I_{k1} - izračunata struja jednopolnog KS

Uvjet se provjerava za sve krajnje točke u mreži (krajevi izvoda i podizvoda). Ukoliko nije zadovoljena gornja nejednadžba, može se napraviti detaljniji proračun kojim se može uvažiti utjecaj:

- impedancije traka za uzemljenje na smanjenje nulte impedancije
- impedancije otpora uzemljenja (TS, stupova i potrošača) na smanjenje nulte impedancije
- struje potrošača na povećanje minimalne struje

U slučaju da se ne može odabrati osigurač koji zadovoljava sve navedene kriterije, može se:

- ugraditi dodatni osigurač niže nazivne struje (1.6-2 puta) na izvodu, tzv. linijski osigurač
- ugraditi automatski osigurač/prekidač (manji koeficijent k povećava doseg zaštite)
- izvršiti dodatno uzemljenje nul vodiča duž izvoda
- povećati presjek nul vodiča i/ili faznog vodiča
- za dio mreže koji nije štićen predvidjeti posebni izvod ili prebaciti na napajanje iz neke druge TS

Za provjeru navedenih kriterija, potrebno je poznavati:

- 1) Parametre osigurača:
 - nazivnu struju
 - I-t karakteristiku
- 2) Vršno opterećenje izvoda
- 3) Nazivnu (termičku) struju vodiča niskonaponskog izvoda
- 4) Struje tropskog kratkog spoja u niskonaponskoj mreži:

$$I_{k3} = \frac{U_L}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_T + R_{SNV} + R_{nn})^2 + (X_T + X_{SNV} + X_{nn})^2}}$$

gdje su:

U_L - linijski napon mreže

R_T, X_T - direktni radni i induktivni otpor transformatora preračunat na 0.4 kV-nu stranu

R_{SNV}, X_{SNV} - direktni radni i induktivni otpor srednjenaponskog voda računat na 0.4 kV-noj strani

R_{nn}, X_{nn} - direktni radni i induktivni otpor niskonaponskog voda od trafostanice do mjesta gdje se računa kratki spoj

- 5) Struje jednopolnog kratkog spoja u niskonaponskoj mreži

$$I_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot C_1 \cdot U_L}{\sqrt{(2R_T + R_T^0 + 2R_{SNV} + 2R_{nn} + R_{nn}^0)^2 + (2X_T + X_T^0 + 2X_{SNV} + 2X_{nn} + X_{nn}^0)^2}}$$

gdje su:

R_T^0, X_T^0 - nulta impedancija transformatora

R_{nn}^0, X_{nn}^0 - nulta impedancija niskonaponskog voda računata od trafostanice do mjesta kvara

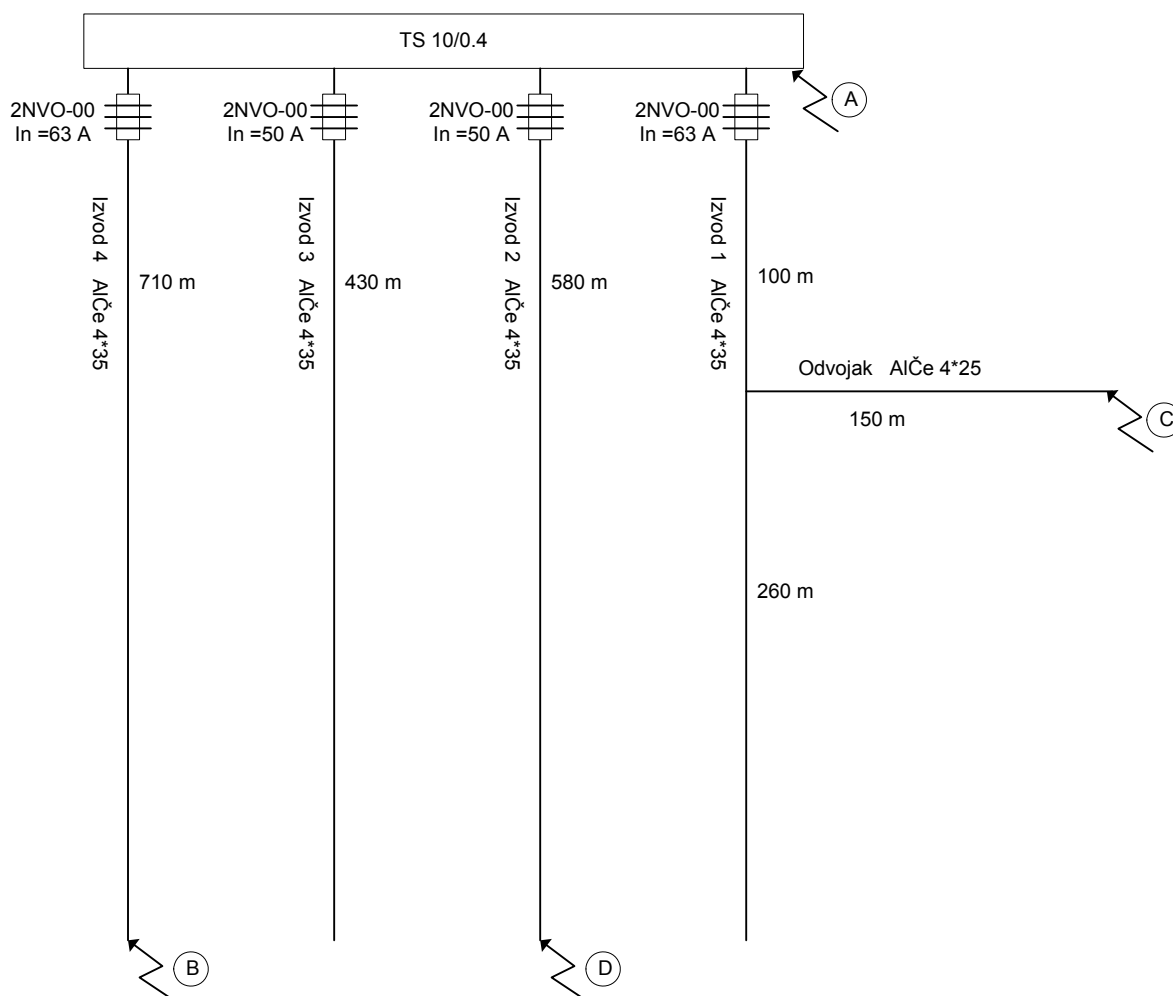
C_1 - faktor koji se uzima pri proračunu I_{k1} (= 0,95 pri proračunu minimalnog jednopolnog KS)

ZADATAK 12

Za niskonaponsku mrežu napajanu iz TS 10/0.4 kV sa slike provjeriti kriterije valjanosti odabranih osigurača s obzirom na kriterije:

- termičke čvrstoće
- dosega zaštite

Provjeru izvršiti u naznačenim točkama, a po potrebi i u dodatnim točkama ukoliko neki od kriterija nije zadovoljen za određeni izvod. Pretpostaviti da su prva dva kriterija odabira osigurača zadovoljena (kriteriji vršnog opterećenja izvoda i nazivne struje vodiča).



Podaci:

Napon: $U_L=400\text{V}$

Direktna impedancija SN voda (računata na 0.4 kV): $0.0107+j0.0057\ \Omega$

Direktna impedancija transformatora (računata na 0.4 kV): $0.0309+j0.056\ \Omega$

Nulta impedancija transformatora (računata na 0.4 kV): $0.01545+j0.0056\ \Omega$

Direktna impedancija NN voda AlČe 35mm²: $0.937+j0.322\ \Omega/\text{km}$

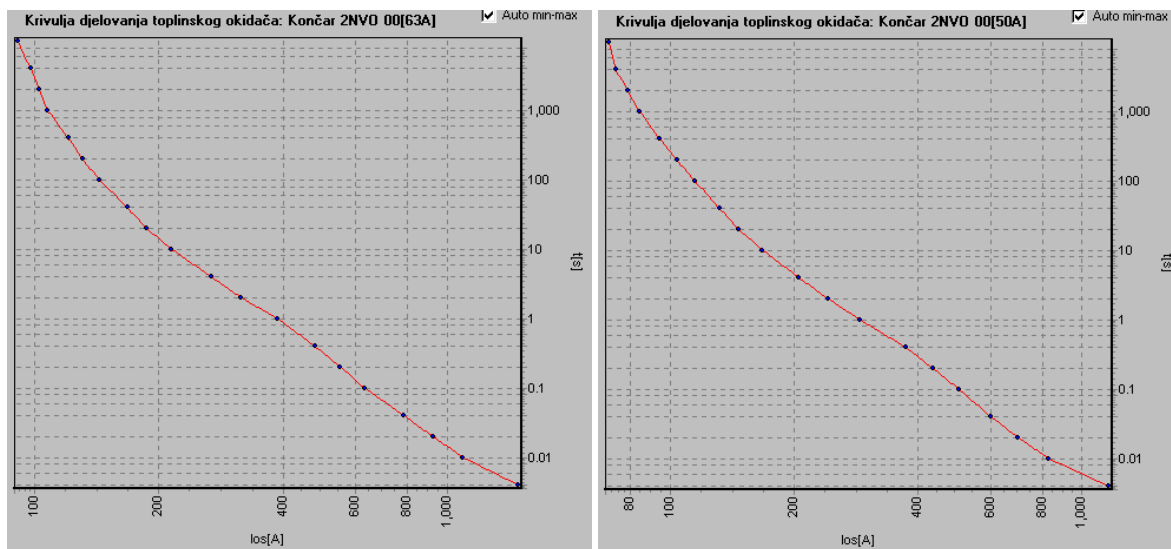
Direktna impedancija NN voda AlČe 25mm²: 1.35+j0.345 Ω/km

Nulta impedancija NN voda AlČe 35mm²: 3.748+j1.288 Ω/km

Nulta impedancija NN voda AlČe 25mm²: 5.00+j1.38 Ω/km

Konstanta a za AlČe: a=0.007

I-t krivulje osigurača:



Napomena: Proračun struja trofaznog i jednofaznog kratkog spoja je izostavljen, dane su samo vrijednosti struja u točkama za koje se provjerava pojedini kriterij.

a) Proračun termičke čvrstoće:

Proračun će se izvršiti na osnovu struje trofaznog kratkog spoja za četiri karakteristične točke:

1. Točka A, na početku izvoda, uz kontrolu osigurača nazivne struje 50 odnosno 63 A
2. Točka B, na kraju najduljeg izvoda kojeg pokriva osigurač nazivne struje 63 A
3. Točka C, na kraju odvojka na prvom izvodu (zbog manjeg presjeka)
4. Točka D, na kraju najduljeg izvoda kojeg pokriva osigurač nazivne struje 50 A

Točka A:

$$I_{k3}(A)=3105 \text{ A}$$

Prema karakteristici osigurača $I_n=63 \text{ A}$, $t=f(I_{k3})$, vrijeme pregaranja za struju od 3105 A je 4ms, a za osigurač $I_n=50 \text{ A}$ je također 4ms.

Najveće dopušteno vrijeme pregaranja osigurača je:

$$t_{\text{dop}} = a \cdot \left(\frac{S}{I_{k3}} \right)^2 = 0.007 \cdot \left(\frac{35}{3.105} \right)^2 = 0.889 \text{ s}$$

Budući da je vrijeme pregaranja (4 ms) manje od dopuštenog (0.889 s), za točku A i oba osigurača, kriterij termičke čvrstoće je zadovoljen za sve izvode u slučaju kratkog spoja na početku izvoda.

Točka B:

$$I_{k3}(B)=302.4 \text{ A}$$

Prema karakteristici osigurača $I_n=63 \text{ A}$, $t=f(I_{k3})$, vrijeme pregaranja za struju od 302.4 A je 2.43s.

Najveće dopušteno vrijeme pregaranja osigurača je:

$$t_{\text{dop}} = a \cdot \left(\frac{S}{I_{k3}} \right)^2 = 0.007 \cdot \left(\frac{35}{0.3024} \right)^2 = 93.8 \text{ s}$$

Budući da je vrijeme pregaranja (2.43 s) manje od dopuštenog (93.8 s), za točku B, kriterij termičke čvrstoće je zadovoljen.

Točka C:

$$I_{k3}(C) = 628 \text{ A}$$

Prema karakteristici osigurača $I_n = 63 \text{ A}$, $t = f(I_{k3})$, vrijeme pregaranja za struju od 628 A je 0.1 s.

Najveće dopušteno vrijeme pregaranja osigurača je:

$$t_{\text{dop}} = a \cdot \left(\frac{S}{I_{k3}} \right)^2 = 0.007 \cdot \left(\frac{25}{0.628} \right)^2 = 11.1 \text{ s}$$

Budući da je vrijeme pregaranja (0.1 s) manje od dopuštenog (11.1 s), za točku C, kriterij termičke čvrstoće je zadovoljen.

Točka D:

$$I_{k3}(D) = 363.3 \text{ A}$$

Prema karakteristici osigurača $I_n = 50 \text{ A}$, $t = f(I_{k3})$, vrijeme pregaranja za struju od 363.3 A je 0.44 s.

Najveće dopušteno vrijeme pregaranja osigurača je:

$$t_{\text{dop}} = a \cdot \left(\frac{S}{I_{k3}} \right)^2 = 0.007 \cdot \left(\frac{35}{0.3633} \right)^2 = 65 \text{ s}$$

Budući da je vrijeme pregaranja (0.44 s) manje od dopuštenog (65 s), za točku D, kriterij termičke čvrstoće je zadovoljen.

b) Proračun dosega zaštite

Proračun će se izvršiti na osnovu struje jednopolnog kratkog spoja za tri karakteristične točke:

1. Točka B, na kraju najduljeg izvoda kojeg pokriva osigurač nazivne struje 63 A
2. Točka C, na kraju odvojka na prvom izvodu (zbog manjeg presjeka)
3. Točka D, na kraju najduljeg izvoda kojeg pokriva osigurač nazivne struje 50 A

Faktor k za rastalne osigurače je: $k = 2.5$

Mora biti ispunjen uvjet: $I_{k1} \geq I_{os} \cdot k$

Točka B:

$$I_{k1}(B) = 143.9 \text{ A}$$

$$I_{os}(I_n) = 63 \text{ A}$$

Budući da je $I_{k1} (143.9 \text{ A}) < I_{os}(63 \text{ A}) \cdot 2.5 = 157.5$, kriterij dosega zaštite za točku B nije zadovoljen, tj. odabrani osigurač ne može djelotvorno štititi izvod 4. S obzirom na malo odstupanje, u ovom slučaju je potrebno izvršiti dodatne provjere (doprinos otpora uzemljenja i/ili struje potrošača na produljenje dosega zaštite) ili pokušati s nekim drugim osiguračem. Osigurač manje nazivne struje (npr. 50A) zadovoljio bi ovaj kriterij, ali pitanje je da li zadovoljava kriterij vršnog opterećenja!

Zbog ovakvog rezultata proračuna, potrebno je i za izvod 1 izvršiti provjeru dosega za krajnju točku (uz već predviđenu provjeru u točki C)

Točka C:

$$I_{k1}(C) = 346.6 \text{ A}$$

$$I_{os}(I_n) = 63 \text{ A}$$

Budući da je $I_{k1} (346.6 \text{ A}) > I_{os}(63 \text{ A}) \cdot 2.5 = 157.5$, kriterij dosega zaštite za točku C je zadovoljen.

Krajnja točka prvog izvoda:

$$I_{k1}=292 \text{ A}$$

$$I_{os} (I_n) = 63 \text{ A}$$

Budući da je $I_{k1} (292 \text{ A}) > I_{os}(63 \text{ A}) * 2.5 = 157.5$, kriterij dosega zaštite za krajnju točku izvoda 1 je zadovoljen.

Točka D:

$$I_{k1}(D)=184.9 \text{ A}$$

$$I_{os} (I_n) = 50 \text{ A}$$

Budući da je $I_{k1} (184.9 \text{ A}) > I_{os}(50 \text{ A}) * 2.5 = 125$, kriterij dosega zaštite za točku D je zadovoljen, a zbog manje duljine, zadovoljen je i za krajnju točku trećeg izvoda.

7.5 Uzemljenje u niskonaponskim mrežama

Pod pojmom uzemljenja podrazumijeva se povezivanje vodljivih djelova iznad zemlje sa zemljom. To se izvodi pomoću različitih vrsta uzemljivača ukopanih u zemlju, s kojom se mora ostvariti što bolji spoj.

Uzemljenje djelova električne mreže naziva se **radno uzemljenje**, a uzemljenje dijelova konstrukcija, trošila i sl. kroz koje u normalnom pogonu ne teče struja, naziva se **zaštitno uzemljenje**. Radno uzemljenje se koristi kako bi se neka točka u električnoj mreži svela na "nulti potencijal" zemlje, u odnosu na kojega se računaju potencijali točaka koji su pod naponom. Zaštitno uzemljenje se koristi za zaštitu od proticanja struje kvara u slučaju dodira metalnih dijelova koji mogu doći pod napon (napon dodira) u slučaju kvara.

U slučaju kvara, kroz uzemljivač protječe struja nastavljajući svoj tok ka okolnoj zemlji, mijenjajući pri tom stanje potencijala u neposrednoj okolini. Spoj uzemljivača prema okolnoj zemlji nije idealan, tako da se na njemu javlja prijelazni električni otpor – **otpor uzemljivača**, koji u stvari predstavlja otpor između dvije ekvipotencijalne površine: konstrukcije uzemljivača i udaljene zemlje gdje se gubi gradijent potencijala. Iznos otpora uzemljivača ovisi o obliku, veličini i ostalim konstrukcijskim karakteristikama uzemljivača, specifičnog otpora okolnog tla, te karakteristikama ostalih metalnih dijelova vezanih na uzemljivač koji zajedno čine sustav uzemljenja. Specifični otpor tla može se kretati u vrlo širokom rasponu, od 20-40 Ω za močvarno zemljište, do 3000 Ω , pa i više u slučaju kamenjara, betona i sl. Uzemljivači se obično izvode iz pocinčanih željeznih traka, a mogu se oblikovati na različite načine.

Uzemljenje TS 10/0.4 može se izvesti kao:

- Združeno (zaštitno i radno) uzemljenje
- Odvojeno zaštitno uzemljenje TS 10/0.4 od radnog uzemljenja niskonaponske mreže

Uzemljenje se redovito izvodi kao združeno ukoliko je izvedbom uzemljenja osiguran uvjet zaštite od opasnih napona dodira:

$$R_{zdr} \leq \frac{U_d}{I_1},$$

gdje je :

R_{zdr} – ukupni otpor združenog uzemljenja

U_d – dozvoljeni napon dodira,

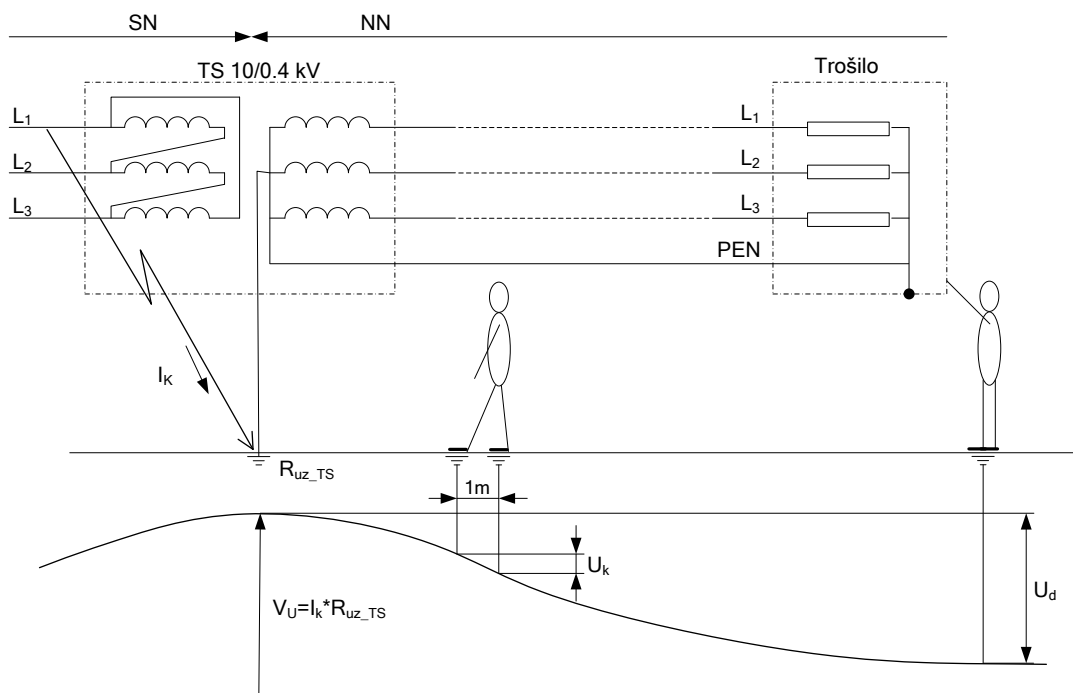
I_1 – struja jednopolnog kvara u srednjenaponskoj mreži (uz eventualno uračunat redukcijski faktor srednjenaponskog voda)

U slučaju da navedeni uvjet nije moguće ispuniti, razdvaja se zaštitno od radnog uzemljenja, tako da radno uzemljenje mora udovoljiti primjenjene zaštitne mjere na niskom naponu, a zaštitno uzemljenje uvjet:

$$R_{zaš} \leq \frac{1200}{I_1}$$

Ako mreža 10(20) kV radi s izoliranim zvjezdištem, te se zemljospoj isključuje u vremenu kraćem od 2 sata, također se primjenju navedeni uvjeti, uz uvrštenje kapacitivne struje zemljospoja ($I_1=I_c$). Ako trajanje zemljospoja nije ograničeno na 2 sata, propisi nalažu razdvajanje radnog od zaštitnog uzemljenja, uz zadovoljenje drugog uvjeta, te uvjeta radnog uzemljenja:

$$R_{rad} \leq \frac{65}{I_c}$$



Slika 7-14 Napon dodira i napon koraka u NN mreži prilikom zemljospoja na 10(20) kV dijelu TS 10(20)/0,4 kV

Proračun otpora združenog uzemljenja općenito mora uzeti u obzir slijedeće komponente sustava uzemljenja:

- 1) uzemljivač same TS 10/0.4 kV koji može sadržavati:
 - o jedan do tri kvadratna prstena oko TS,

- dva do četiri kraka duljine 5-30 m,
 - nekoliko sondi
- 2) kratki trakasti uzemljivači kojima se uzemljuje nul vodič niskonaponske nadzemne mreže
 - 3) dugački trakasti uzemljivači koji se polažu uz niskonaponske kabele, a vezani su na nul vodič mreže niskog napona
 - 4) temeljni uzemljivači potrošačkih objekata
 - 5) nulovani betonski stupovi niskonaponskih vodova

Navedeni elementi koji čine sustav uzemljenja imaju svoj otpor uzemljenja, a ukupna impedancija združenog uzemljenja računa se uvažavanjem doprinosa svih navedenih komponenti.

$$\frac{1}{Z_{zdr}} = \frac{1}{R_{TS}} + \sum \frac{1}{R_{ktu}^i} + \sum \frac{\sigma^i}{Z_{dtu}^i} + \sum \frac{1}{R_t^i} + \sum \frac{1}{R_b^i},$$

gdje je:

Z_{zdr} – impedancija združenog uzemljenja

R_{TS} – otpor zaštitnog uzemljenja TS

R_{ktu} – otpor kratkog trakastog uzemljivača

Z_{dtu} – impedancija dugačkog trakastog uzemljivača

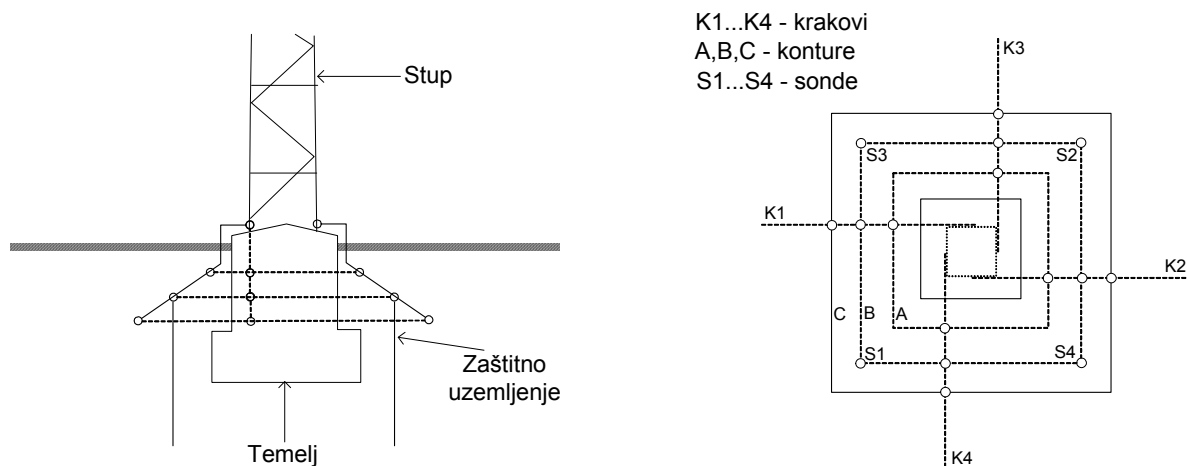
σ - faktor utjecaja međusobno bliskog polaganja više uzemljivačkih traka ($\sigma \leq 1$)

R_t – otpor temeljnog uzemljivača

R_b – otpor nulovanog betonskog stupa

Budući da većina impedancija uzemljenja ima izrazito radni karakter, obično se i ukupna impedancija združenog uzemljenja računa kao čisto radna impedancija ($R_{zdr} \approx Z_{zdr}$).

Na slijedećoj slici prikazana je opća shema izvedbe uzemljenja TS 10/0.4 koja se nalazi na čelično-rešetkastom stupu, a koje se može sastojati od više kontura, krakova i sondi (slika 7-15).



Slika 7-15 Opća shema uzemljenja stupne trafostanice

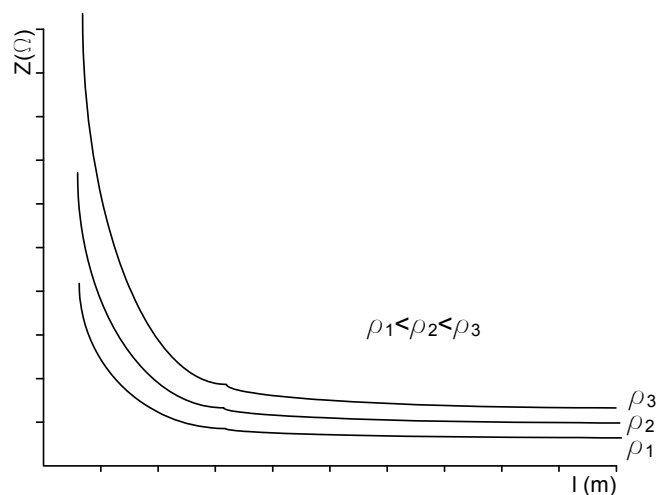
Otpor pojedinačnog uzemljivača može se aproksimativno prikazati kao produkt specifičnog otpora tla ρ (Ωm) i konstante uzemljivača c_r (1/m) koja ovisi o geometriji uzemljivača:

$$R_i = \rho \cdot c_r^i$$

Konstanta c_r za temeljne uzemljivače može se aproksimativno prikazati u ovisnosti o ukupnoj površini obuhvaćenoj uzemljivačem (S) i ukupnom duljinom trake u temelju (L):

$$c_r = \frac{0.33}{\sqrt{S}} + \frac{0.87}{L}$$

Za dugačke trakaste uzemljivače koji se polažu uz kabele, impedancija ovisi i o duljini trake. Na slijedećoj slici prikazan je primjer krivulja ovisnosti impedancije uzemljenja dugačkih trakastih uzemljivača o duljini i specifičnom otporu tla.



Slika 7-16 Impedancija dugih trakastih uzemljivača

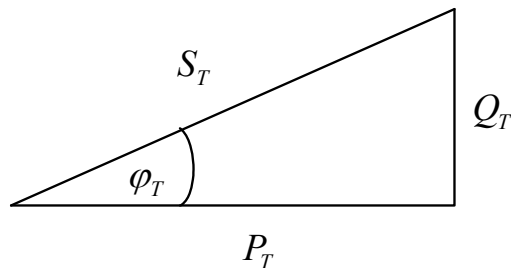
Otpori uzemljenja betonskih stupova (kod nadzemne NN mreže) mogu se aproksimativno računati preko formule:

$R_b = 0.255 \cdot \rho + 12.58$, gdje je ρ specifični otpor tla

Da bi betonski stupovi mreže niskog napona djelovali kao dodatni uzemljivači, njihova armatura mora biti vezana na nul vodič, tj. stupovi moraju biti nulovani.

8 KOMPENZACIJA JALOVE SNAGE

Trošila uz djelatnu snagu redovito uzimaju i jalovu (reaktivnu) snagu induktivnog karaktera. Posebno velika induktivna trošila su električni motori. Oni uzimaju iz mreže značajnu induktivnu komponentu struje, koja im je potrebna za stvaranje magnetskog toka.



Slika 8-1 Trokut snaga potrošača

Induktivna komponenta struje potrošača zaostaje za naponom za 90° , dok je radna komponenta struje u fazi sa naponom. To je prikazano na sljedećoj fazorskoj slici, pri čemu su oznake sljedeće:

V_n – fazni napon potrošača (u primjeru asinkroni motor): $V_n = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$

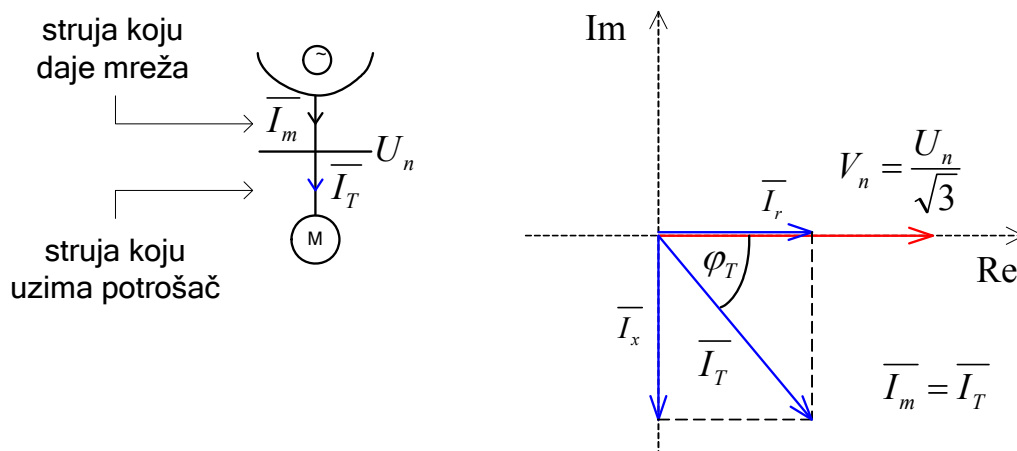
U_n – nazivni linijski napon mreže na koju je priključen potrošač

\bar{I}_T - nazivna struja trošila koja se sastoji od:

I_r – radne komponente (u fazi je s naponom potrošača)

I_x – induktivne komponente (zaostaje za naponom za 90°).

φ_T – fazni pomak između nazivnog napona i nazivne struje potrošača ($=\varphi_m \angle(V_n, I_m)$).



Slika 8-2 Fazorski dijagram struja i napona potrošača

Struja koju daje mreža (I_m) jednaka je struji koju uzima potrošač. Dalje se može pisati:

$$\bar{I}_T = I_r - j \cdot I_x$$

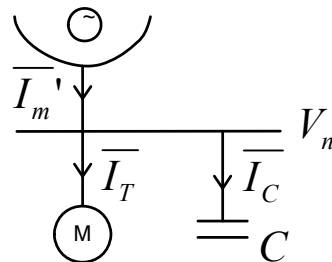
Dalje je:

$$I_r = I_T \cdot \cos \varphi_T = I_m \cdot \cos \varphi_m$$

$$I_x = I_T \cdot \sin \varphi_T = I_m \cdot \sin \varphi_m$$

Obje komponente struje potrošača (I_r i I_x) dolaze iz pripadne pojne mreže.

Ako se paralelno potrošaču na iste sabirnice priključi kondenzatorska baterija kapaciteta C , ona će iz mreže uzimati kapacitivnu struju I_C :



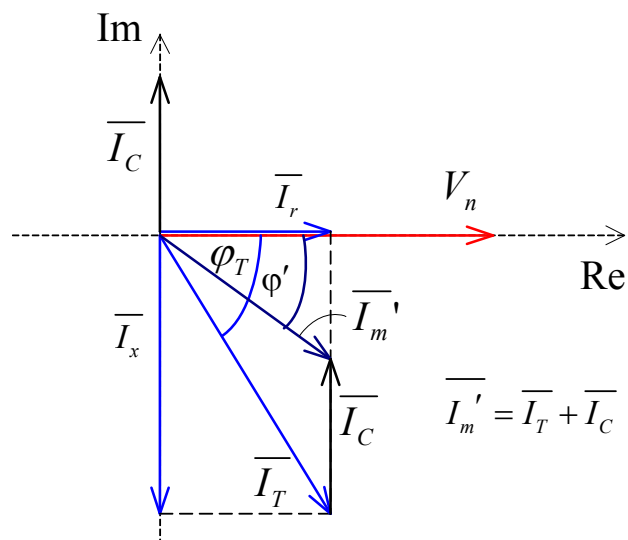
Slika 8-3 Priključak kondenzatorske baterije paralelno potrošaču

Kapacitivna struja će prethoditi naponu mreže za 90° . Potrošač i dalje za svoj rad uzima struju \bar{I}_T , koja je ista kao i prije:

$$\bar{I}_T = I_r - j \cdot I_x$$

Struja iz mreže u ovom slučaju je zbroj struje potrošača i struje kondenzatorske baterije:

$$\bar{I}_m' = \bar{I}_T + \bar{I}_C$$



Slika 8-4 Fazorski dijagram struja i napona potrošača i kondenzatorske baterije

Iz fazorskog dijagrama je vidljivo da se smanjila struja koja dolazi iz mreže za dio reaktivne struje koju je dala kondenzatorska baterija.

$$|\overline{I_m}'| < |\overline{I_m} = \overline{I_T}|.$$

Također se povećao (popravio) faktor snage mreže, unatoč tome što potrošač i dalje uzima potrebnu induktivnu struju I_x , koja mu je potrebna za normalni rad.

$$\varphi' < \varphi_T,$$

Ovo smanjenje jalove struje (snage) koja je prije dolazila iz mreže zove se kompensacija reaktivne snage i ona se (najčešće) provodi ugradnjom kondenzatorskih baterija paralelno trošilu ili grupi trošila (potrošaču) koji uzima značajnu jalovu snagu.

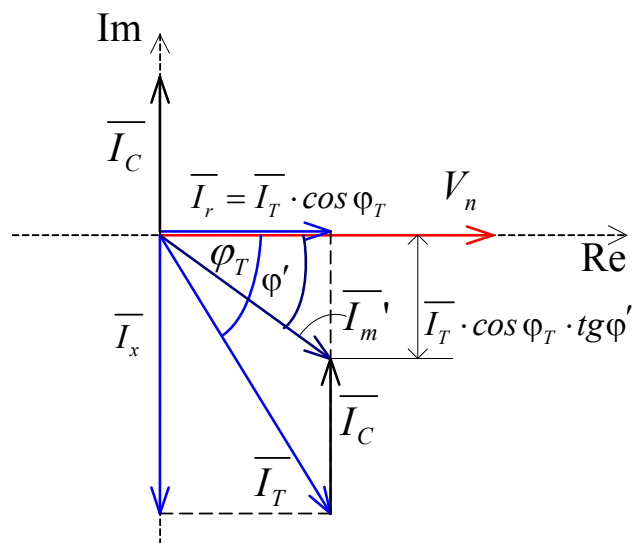
Potrebna nazivna jalova snaga Q_{Cn} kondenzatorske baterije, u slučaju kad je ista spojena u zvijezdu, može se odrediti na sljedeći način (uz poznate nazivne podatke potrošača: $S_T, U_n, \cos\varphi_T$):

Nazivna struja potrošača je:

$$S_T = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_T \Rightarrow I_T = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_n}.$$

Također se polazi od zadanog (željenog) faktora snage koji je potrebno imati nakon ugradnje kondenzatorske baterije ($\cos\varphi'$), što je kod potrošača najčešće uvjetovano ekonomskim razlozima (npr. $\cos\varphi'=0.95$, što je granica iznad koje se ne plaća jalova energija).

Dakle, traži se nazivna snaga kondenzatorske baterije (Q_{Cn}) i odgovarajući kapacitet po fazi baterije (C).



Slika 8-5 Fazorski dijagram za određivanje potrebne snage i kapaciteta kondenzatorske baterije

Iz fazorskog dijagrama slijedi:

$$\begin{aligned}
I_x &= I_C + I_T \cdot \cos \varphi_T \cdot \operatorname{tg} \varphi' \\
I_x &= I_T \cdot \sin \varphi_T \\
I_T \cdot \sin \varphi_T &= I_C + I_T \cos \varphi_T \cdot \operatorname{tg} \varphi' \\
I_C &= I_T (\sin \varphi_T - \cos \varphi_T \cdot \operatorname{tg} \varphi') \\
I_C &= I_T \cos \varphi_T (\operatorname{tg} \varphi_T - \operatorname{tg} \varphi')
\end{aligned}$$

Ako zadnju jednadžbu pomnožimo sa $3V_n$, dobiva se:

$$\begin{aligned}
3 \cdot V_n \cdot I_C &= 3 \cdot V_n \cdot I_T \cos \varphi_T (\operatorname{tg} \varphi_T - \operatorname{tg} \varphi') \\
Q_{Cn} &= S_T \cos \varphi_T (\operatorname{tg} \varphi_T - \operatorname{tg} \varphi') = P_T (\operatorname{tg} \varphi_T - \operatorname{tg} \varphi')
\end{aligned}$$

pri čemu je P_T djelatna snaga trošila.

Kapacitet po fazi kondenzatorske baterije spojene u spoj zvijezda može se odrediti pomoću slijedećeg izraza:

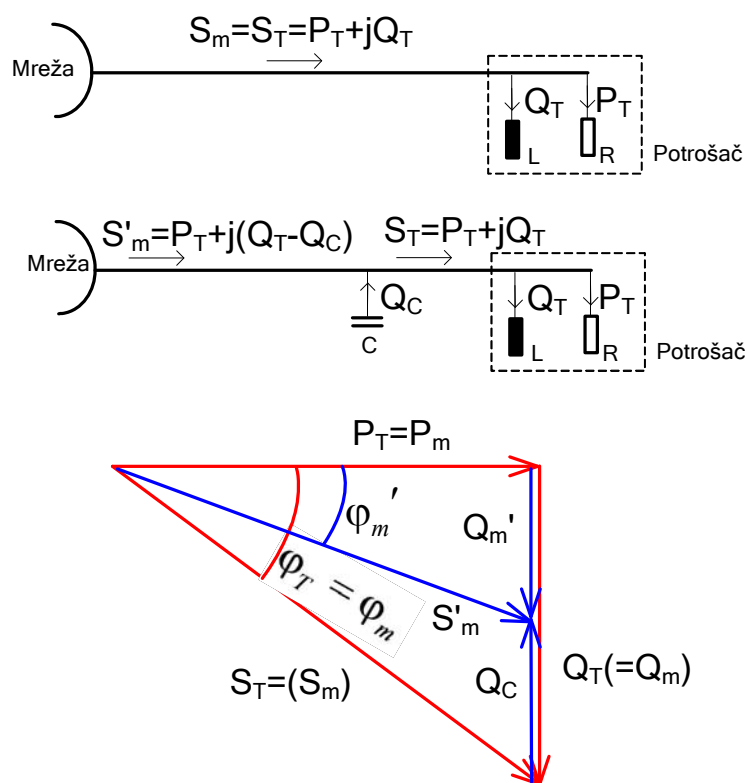
$$\begin{aligned}
V_n &= I_C \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} \\
C &= \frac{I_C}{\omega \cdot V_n} = \frac{\frac{Q_{cn}}{3 \cdot V_n}}{\omega \cdot V_n} = \frac{Q_{cn}}{\omega \cdot 3 \cdot V_n^2} = \frac{Q_{cn}}{\omega \cdot U_n^2} = \frac{P_T (\operatorname{tg} \varphi_T - \operatorname{tg} \varphi')}{\omega \cdot U_n^2}
\end{aligned}$$

gdje su:

I_C – struja koja kod nazivnog faznog napona V_n teče kondenzatorskom baterijom

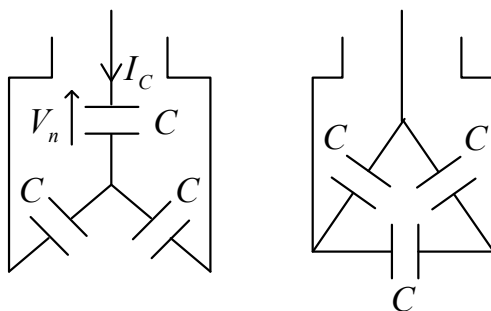
ω – kružna frekvencija, $\omega = 2\pi f$, $f = 50\text{Hz}$.

Osnovni princip kompenzacije jalove snage može se prikazati i preko dijagrama snaga :



Slika 8-6 Tokovi snaga kod potrošača s kompenzacijom jalove snage

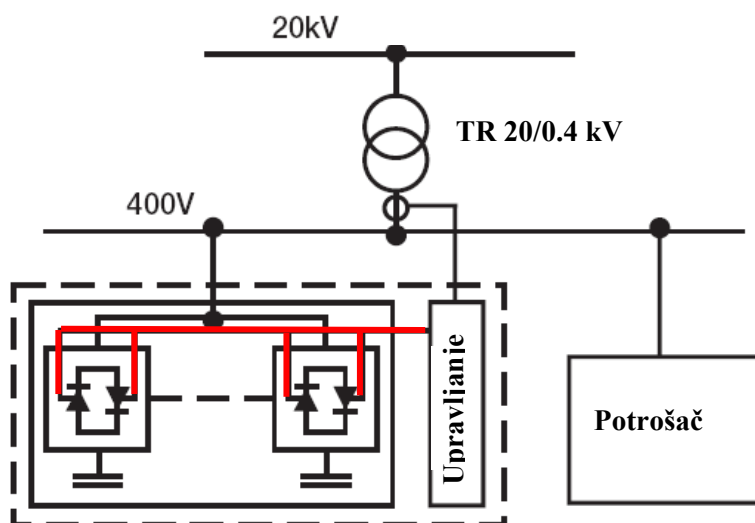
Kondenzatorske baterije su simetrični trofazni uređaji. One sadrže kondenzatore u svakoj fazi, koji mogu biti spojeni u spoj zvijezdu ili u spoj trokut:



Slika 8-7 Spoj kondenzatorske baterije u zvijezdu i trokut

Kod spoja kondenzatorskih baterija u spoj zvijezdu dobiveno zvjezdište se najčešće ne uzemljuje. Kondenzatorske baterije se redovito rade u više „stupnjeva“, tj. na način da ukupni kapacitet čine nekoliko paralelno spojenih trofaznih grupa, tako da je moguće uključiti jedan ili više stupnjeva. Na taj način se dobije mogućnost odabira snage kondenzatorske baterije ovisno o potrebama (tj. ovisno o jalovoj snazi potrošača kojeg se kompenzira). Uključivanje pojedine paralelne grupe/stupnja kontrolora automatika, na način da se mjeri (promjenljiva) jalova snaga potrošača i uključuje najpovoljniji broj grupa, tako da ukupna snaga kondenzatorske baterije bude što bliža optimalnoj jalovoj snazi za kompenzaciju na željenom faktoru snage (prema prethodnom izrazu). Bolja (i skuplja)

varijanta je automatsko kontinuirano upravljanje snagom kondenzatorske baterije (kompenzacijskog uređaj) pomoću tiristora:



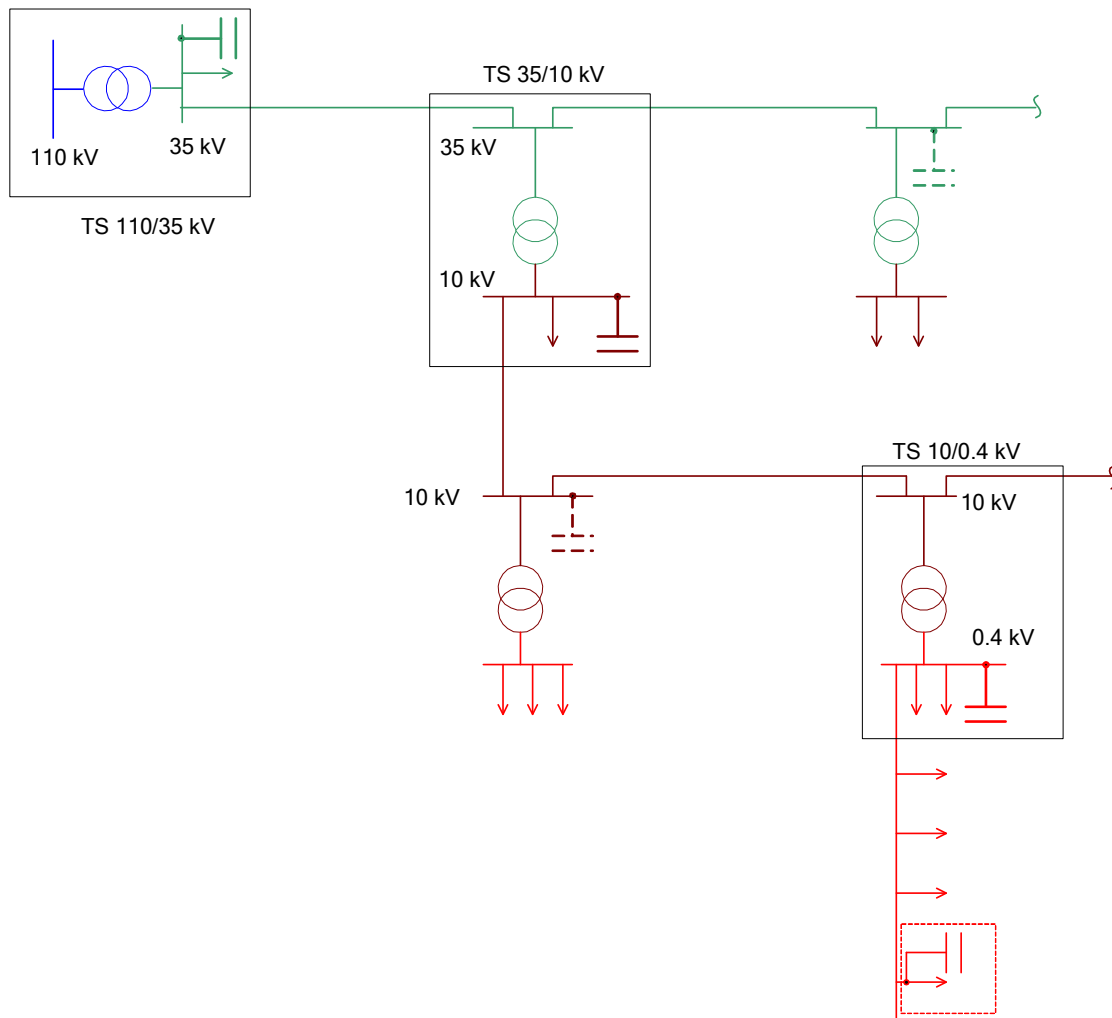
Slika 8-8 Automatska regulacija snage kondenzatorske baterije (TSC – Thyristor switched capacitors)

Općenito, kompenzacija jalove snage može biti:

- o za pojedinačna trošila, kao što je prethodno opisano na prethodnom primjeru motora
- o grupna, tj. kompenzacija jalove snage dijela mreže odnosno kompenzacija potrošnje jalove snage koju troši više potrošača u mreži, ali i sama mreža (gubici jalove snage na vodovima, a posebno transformatorima)

o se tiče mjesta ugradnje kondenzatorske baterije, najbolje/najdjelotvornije je ugraditi što bliže potrošaču koje uzima iz mreže jalovu snagu, budući se na taj način mreža maksimalno rasterećuje tokova jalovih snaga. Kondenzatorske baterije se redovito ugrađuju u trafostanicama VN/SN, SN/SN i SN/NN, i to najčešće na strani nižeg napona. Primjeri ugradnje kondenzatorske baterije dani su na slici 8-9. Kompenzacijom reaktivne snage:

- o smanjuju se troškovi za jalovu energiju pojedinačno kompenziranih potrošača
- o poboljšavaju se naponske prilike u mreži (smanjuju se padovi napona u mreži),
- o smanjuje se strujno opterećenje elemenata mreže,
- o smanjuju se gubici radne snage (energije) u mreži.



Slika 8-9 Mjesta ugradnje kondenzatorskih baterija u mreži

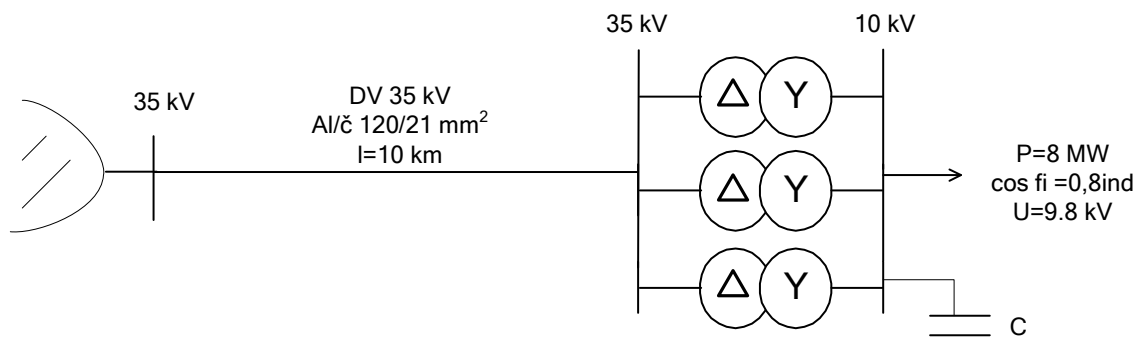
ZADATAK 13

U TS 35/10 kV s podacima zadanim u zadatku 9., treba na sabirnicama 10 kV ugraditi kondenzatorsku bateriju koja će pri maksimalnom opterećenju $P_{max}=8$ MW popraviti faktor snage sa $\cos\varphi_1=0,8_{ind}$ na $\cos\varphi_2=0,95_{ind}$. Odrediti odgovarajuću nazivnu snagu i kapacitet kondenzatorske baterije, ako je ona spojena u zvijezdu.

Pretpostaviti napon na 10 kV-tnim sabirnicama 9.8 kV (linijski), i to nakon ugradnje kondenzatorske baterije, te u tom slučaju izračunati:

- napon na početku i kraju DV 35 kV
- struju u DV 35 kV
- gubitke snage u DV 35 kV (sa i bez kompenzacije)

Podaci 35 kV-tnog voda dani su na slici, uz $R_{dv1}=0,237\Omega$, $X_{dv1}=0,338\Omega$. Za transformatore 35/10 kV vrijedi $R_t=0,188\Omega$, $X_t=1,487\Omega$ (računato na 10 kV-tnom naponskom nivou).



Rješenje

Postojeći i željeni faktor snage odgovaraju slijedećim kutevima:

$$\cos\varphi_1=0,8 \rightarrow \varphi_1=36,9^0$$

$$\cos\varphi_2=0,95 \rightarrow \varphi_2=18,2^0$$

Potrebna snaga kondenzatorske baterije za popravak kuta φ_1 na φ_2 uz snagu potrošnje 8 MW iznosi:

$$Q_{cn} = P_T (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) = 8(\operatorname{tg}36,9^0 - \operatorname{tg}18,2^0) = 8(0,75 - 0,328) = 3,376 \text{ MVar} = 3376 \text{ kVar}$$

Kapacitet kondenzatorske baterije (jedne faze) iznosi:

$$C = \frac{Q_{cn}}{U_n^2 \cdot \omega} = \frac{3376 \cdot 10^3 \text{ VAr}}{(10 \cdot 10^3 \text{ V})^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ s}^{-1}} = 1,075 \cdot 10^{-4} \frac{\text{As}}{\text{V}} = 1,075 \cdot 10^{-4} \text{ F} = 107,5 \mu\text{F}$$

a) Napon na početku i kraju DV 35 kV

Struja koju uzima potrošač:

$$|I_T| = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{8}{\sqrt{3} \cdot 9,8 \cdot 0,85} = 589 \text{ A},$$

dok je njen kut definiran faktorom snage (0.8ind), tako da je:

$$I_T = 589 \angle -36,9^0$$

Struja koju uzima kondenzatorska baterija je:

$$I_c = j\omega C \cdot V = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 107,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{9,8 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = j191 \text{ A} = 191 \angle 90^0$$

Ukupna struja koja iz transformatora mora doći na 10 kV-tne sabirnice je zbroj struje potrošača i struje kondenzatorske baterije i iznosi:

$$I_m = I_T + I_c = 498 \angle -19^0$$

Napon na kraju DV 35 kV (u stvari na 35 kV-tnim sabirnicama u TS 35/10 kV) jednak je naponu na 10 kV-tnim sabirnicama uvećan za pad napona na transformatorima:

$$V_{DV_kraj} = V_{TS_10} + I_m \cdot \frac{R_l + jX_l}{3} = \dots = 5,77 \angle 2,2^0 \text{ kV}$$

(Napomena: nije uvažen zakret kuta usljed grupe spoja transformatora Dy)

Preračunato na 35 kV-tni naponski nivo, napon iznosi:

$$V_{DV_kraj}|_{35kV} = 5.77 \cdot \frac{35}{10} = 20.2kV$$

Linijski:

$$U_{DV_poč}|_{35kV} = 20.2kV \cdot \sqrt{3} = 35kV$$

Napon na početku DV 35 kV jednak je naponu na kraju DV uvećan za pad napona na DV:

$$V_{DV_poč} = V_{DV_kraj} + I_m \cdot (R_{dv} + jX_{dv})|_{10kV} = \dots = 5.91 \angle 3.1^\circ kV$$

Preračunato na 35 kV-tni naponski nivo, napon iznosi:

$$V_{DV_poč}|_{35kV} = 5.91 \cdot \frac{35}{10} = 20.7kV$$

Linijski:

$$U_{DV_poč}|_{35kV} = 20.7kV \cdot \sqrt{3} = 35.8kV$$

b) Struja 35 kV-tnog DV:

Jednaka je struji I_T , preračunatoj na 35 kV:

$$I_{DV} = I_T \cdot \frac{10}{35} = 498 \cdot \frac{10}{35} = 142A$$

c) Gubici snage na 35 kV-tnom DV:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot 498^2 \cdot 2.37 = 176kW$$

(Napomena: struja i radni otpor voda uzeti su na 10 kV-tnom naponskom nivou)

U slučaju da nema kondenzatorske baterije, vod (i transformatori također) bi bio opterećen punom strujom potrošača od 589 A. U tom slučaju gubici na vodu bili bi

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot 589^2 \cdot 2.37 = 245kW$$

Napomena: ukupan pad napona na DV+TR može se aproksimativno izračunati i bez kompleksnog računa, koristeći izraz za pad napona:

$$\Delta U = \frac{P' \cdot R + Q' \cdot X}{U}$$

Napon na potrošaču (linijski), sveden na 35 kV je:

$$U_{TS_10}|_{35kV} = 9.8 \cdot \frac{35}{10} = 34.3kV$$

Napon na početku voda 35 kV veći je za pad napona na DV i TR:

$$U_{DV_poč}|_{35kV} = U_{TS_10kV}|_{35kV} + \Delta U|_{DV+TR} \approx 34.3kV + \frac{P_i \cdot (R_{DV} + R_{TR} / 3) + (Q_i - Q_{cn}) \cdot (X_{DV} + X_{TR} / 3)}{34.3} =$$

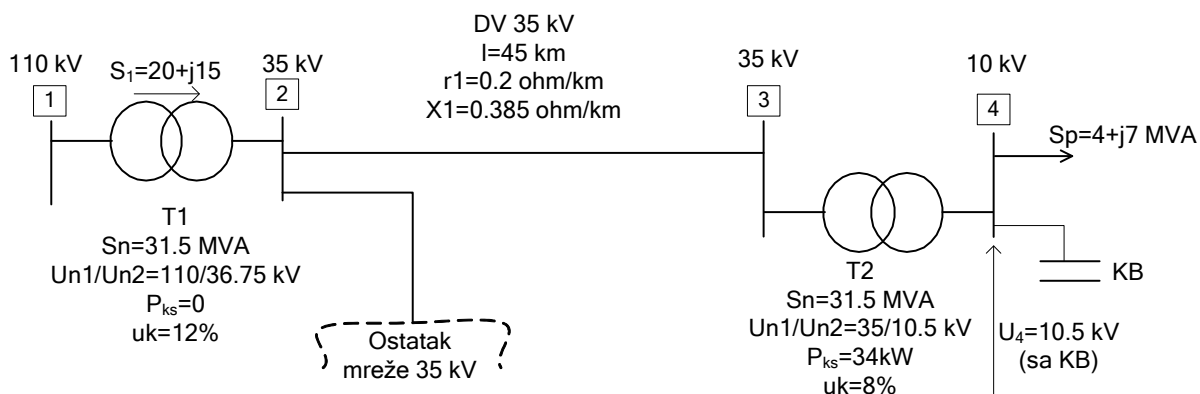
$$34.3kV + \frac{8 \cdot 2.43 + 2.63 \cdot 3.88}{34.3} = 34.3 + 0.86 = 35.16kV$$

ZADATAK 14

Za mrežu sa slike (napajanje TS 35/10 kV iz mreže 110 kV i DV 35 kV), preko koje se napaja potrošač 10 kV snage $S_p=4+j7$ MVA, odrediti:

- a) Snagu kondenzatorske baterije priključene na 10 kV sabirnice (čvor 4), ako je napon na primaru transformatora T1 konstantan i iznosi $U_1=111.1$ kV, transformator je opterećen snagom $S_1=20+j15$ MVA, te uz uvjet da napon na 10 kV sabirnicama bude $U_2=10.5$ kV
- b) Gubitke radne snage na transformatoru T2 i DV 35 kV (sa i bez kompenzacije)

Kompletan račun provesti s aproksimativnim izrazom za pad napona (bez kompleksnog računa).



9 REGULACIJA NAPONA U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

Nazivni napon može se definirati kao napon za koji je određeni element mreže projektiran i pri kojem je predviđeno da bude najčešće u pogonu. Rad svih elemenata mreže pod nazivnim naponom osigurava, u prosjeku, optimalne uvjete rada mreže. Ukoliko stvarni (pogonski) napon bitnije odstupa od nazivnog, to dovodi do poremećaja u funkcioniranju elemenata mreže i potrošača, prekomjernog naprezanja izolacije (u slučaju povišenih napona), povećanja gubitaka u mreži itd.

Zbog ekonomičnosti izgradnje i održavanja mreže, nazivni naponi su standardizirani na relativno mali broj naponskih razina. Zato se i izvedba svih trošila mora prilagoditi standardnim naponskim razinama, osim u slučajevima preciznog prilagođenja optimalnom naponu za pojedine specijalne potrošače (npr. elektrolučne peći, elektrovuča, ali i sva elektronička trošila), i to pomoću specijalnih transformatora, prigušnica, ispravljača i sl.

U pogonu mreže dešavaju se česte promjene - varijacije napona, koje mogu biti:

- **Polagane (spore)**, koje su rezultat normalnih promjena potrošnje tijekom dana ili nepredviđenih događaja uslijed poremećaja regulacije napona u cijeloj mreži ili dijelu mreže
- **Nagle**, do kojih dolazi uslijed naglih promjena potrošnje ili kvarova u mreži

U normalnom pogonu mreže, pogonski napon je ograničen s gornje strane odgovarajućom izolacijskom razinom elemenata mreže. Za sredjenaponske mreže je to obično oko 20% u odnosu na nazivni napon (osim kod nas za 35 kV-tni napon gdje je ograničenje 8,6%). Minimalno dozvoljeni pogonski napon se definira propisima za svaku naponsku razinu, na osnovu pogonskih razloga (tehničkih i ekonomskih), te zaštite potrošača.

Pad napona na nekom elementu mreže može se aproksimativno izraziti preko:

$$\Delta U = \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U}$$

gdje je:

R, X – radni i induktivni otpor elementa mreže

P, Q – radna i jalova snaga koja prolazi elementom mreže

U – linijski napon

Prema tome, padovi napona u mreži mogu se smanjiti:

- povećanjem pogonskog napona (U)
- smanjenjem reaktancije mreže (X)
- smanjenjem tokova jalovih snaga u mreži (Q)

Povećanje pogonskog napona može se realizirati:

- odgovarajućom regulacijom napona kojom se u već izgrađenoj mreži nastoji održavati pogonski napon što bliže maksimalno dopuštenom pogonskom naponu
- izgradnjom mreže slijedećeg višeg naponskog nivoa (npr. zamjena 10kV sa 20kV)

Smanjenje reaktancije mreže može se postići:

- izgradnjom paralelnih vodova i/ili transformatora
- konstruiranjem transformatora sa manjim naponom kratkog spoja ili s većom snagom
- postavljanjem kabela umjesto zračnog voda
- kompenzacijom reaktancije vodova (serijski kondenzatori, samo u prijenosnim mrežama)

Smanjenje tokova jalove snage u mreži postiže se kompenzacijom jalove snage, koja treba biti što bliže mjestu potrošnje jalove snage. U distribucijskoj mreži to su najčešće paralelno priključene kondenzatorske baterije (statičke ili tiristorski regulirane).

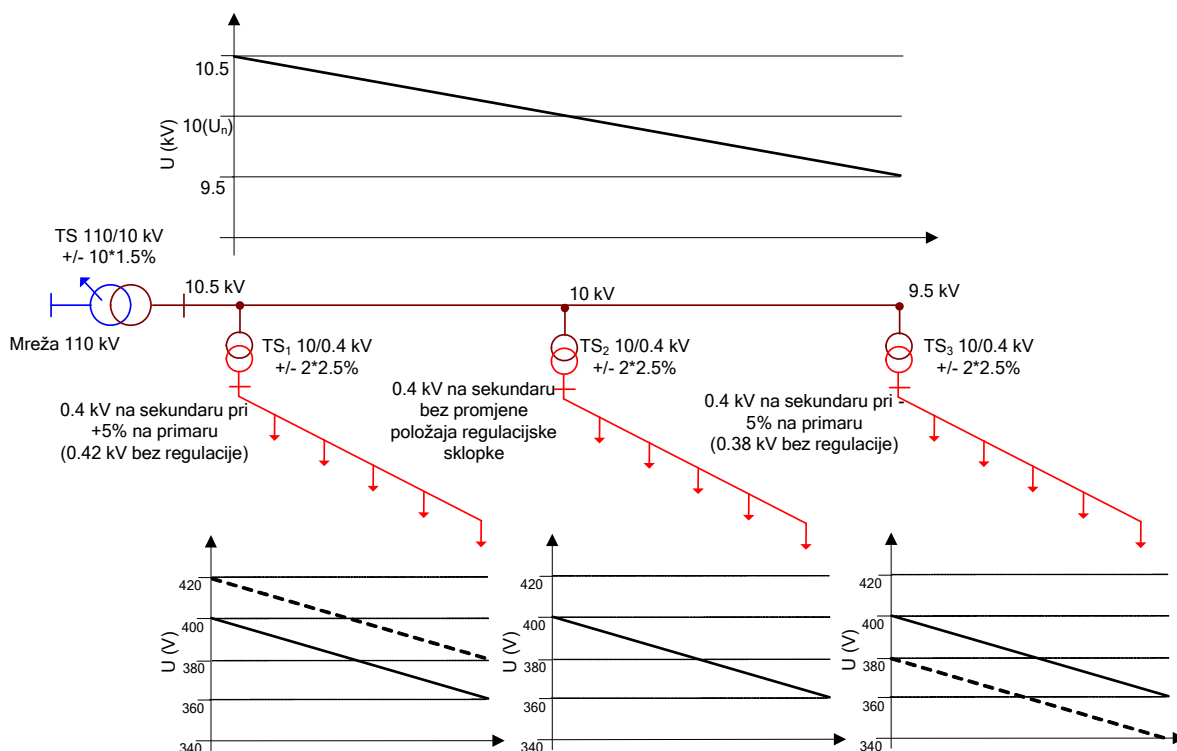
U distribucijskim mrežama, praktički jedini način regulacije napona je promjenom prijenosnog omjera transformatora. Transformatori promjenu prijenosnog omjera mogu vršiti pod opterećenjem (kod nas samo za transformatore 110/x kV) ili u beznaponskom stanju (transformatori SN/SN ili SN/NN). Automatska regulacija prijenosnog omjera pod opterećenjem omogućava da se na sekundaru transformatora 110/x održava željeni napon (unutar određenih granica), automatskim prebacivanjem regulacijske preklopke na primaru sa ciljem održavanja željenog napona na sekundaru. Na taj način se na sekundaru (odnosno pojnoj točki sredjenaponske mreže) održava uvijek isti napon, bez obzira na nivo potrošnje u distribucijskoj mreži.

Transformatorima SN/SN odnosno SN/NN, može se mijenjati prijenosni omjer ručnim prebacivanjem preklopke na željeni položaj, u beznaponskom stanju. To se obično radi za dulji vremenski period, budući da svaka promjena prijenosnog omjera zahtjeva isključenje transformatora. Osnovni ciljevi regulacije su održavanje srednjeg napona na potrošačima tijekom određenog perioda što bliže nazivnom naponu, te smanjenje odstupanja od nazivnog napona.

Na slici 9-1 ilustriran je osnovni princip regulacije napona u distribucijskoj mreži. Transformator 110/10 kV ima mogućnost automatske regulacije koja je postavljena da regulira napon sekundara na napon 10,5 kV. Na taj način se postiglo da primar najbližeg transformatora 10/0.4 ima nešto veći napon od nazivnog (10,5 kV), onaj na sredini mreže ima nazivni napon (10 kV), a zadnji nešto niži od nazivnog (9.5 kV), i to zbog padova napona u 10 kv-tnoj mreži, što je prikazano dijagramom napona duž 10 kV-tnog voda. Tako je u 10 kV-tnoj mreži osiguran prosječni napon jednak nazivnom naponu mreže.

Ako bi svi transformatori 10/0.4 kV radili sa nazivnim prijenosnim omjerom, srednji transformator bi na sekundaru imao 0,4 kV, prvi 0,42 kV, a zadnji 0,38 kV. Međutim, ako se za prvi transformator postavi regulacijska preklopka na +5%(primar), smanjiti će se napon na sekundaru na 0,4 kV, dok bi postavljanjem regulacijske preklopke zadnjeg transformatora na -5%(primar) dobili povećanje napona na sekundaru na 0,4kV. Drugim riječima, statičkom regulacijom na transformatorima 10/0.4 kV osigurava se smanjenje napona na sekundarima transformatora bliskih pojnoj točki odnosno povećanje napona sekundara na udaljenijim transformatorima. Na tri donja dijagrama prikazan je naponski profil niskonaponske mreže za slučajeve bez regulacije (crtkano) i sa regulacijom (puna linija). U slučaju bez regulacije, svi niskonaponski potrošači napajani iz prvog transformatora 10/0.4 kV imaju napon veći od nazivnog (u rasponu 380-420 V, prosječno 400 V), dok svi niskonaponski potrošači napajani iz zadnjeg transformatora 10/0.4 kV imaju napon manji od nazivnog (u rasponu 340-380 V, prosječno 360 V). Sa prethodno opisanom regulacijom, niskonaponski potrošači napajani iz svih TS 10/0.4 kV imaju napon u rasponu 360-400 V, a prosječno 380 V, što odgovara nazivnom naponu. U oba slučaja,

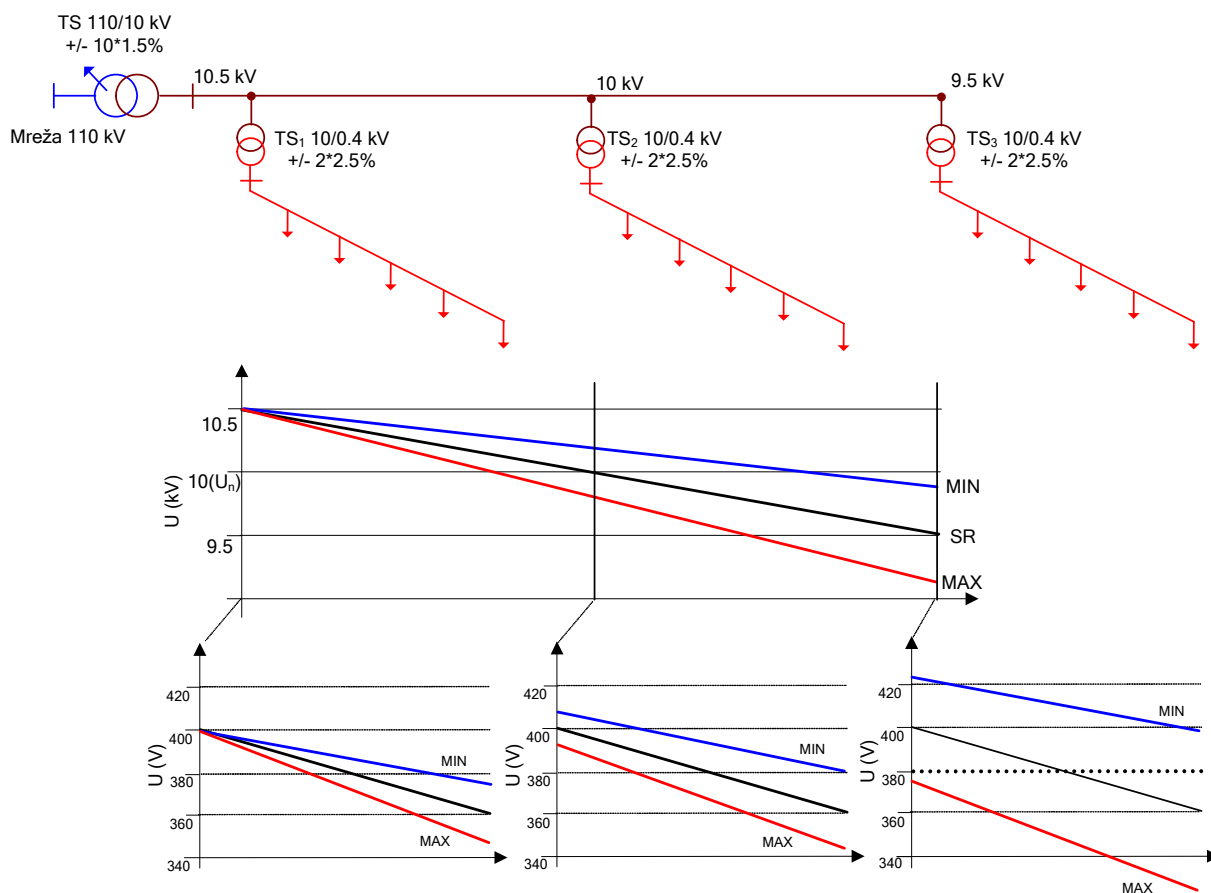
kad se računa prosjek napona na svim potrošačima, dobije se ista vrijednost (380 V, tj. nazivni napon), ali su odstupanja daleko veća u slučaju da se na svim transformatorima 10/0.4 kV ostavi nazivni prijenosni omjer. Dakle, pravilnim odabirom položaja regulacijske preklopke u TS 10/0.4, ovisno o udaljenosti od pojne točke i opterećenju niskonaponske mreže, mogu se teoretski postići prosječno optimalne naponske prilike kod potrošača.



Slika 9-1 Regulacija napona u distribucijskoj mreži: naponske prilike pri srednjem opterećenju mreže

Dodatni je problem što opisana situacija vrijedi za određeni nivo potrošnje, koji se tijekom dana mijenja, a također i tijekom godine. Smanjenjem potrošnje naponi će rasti u sredjenaponskoj i niskonaponskoj mreži. Također je povećanjem potrošnje naponi padati, tako da će naponi pojedinih potrošača varirati u određenim granicama, i to najviše na najudaljenijim potrošačima. Transformator 110/x i dalje drži zadani napon od 10.5 kV na sekundaru, ali dalje u mreži varijacije napona rastu. Isto vrijedi za niskonaponsku mrežu. To je prikazano na slici 9-2, s naponskim profilima za minimalno i maksimalno opterećenje mreže, tako da područje između u stvari prikazuje raspon napona u pojedinoj točki mreže.

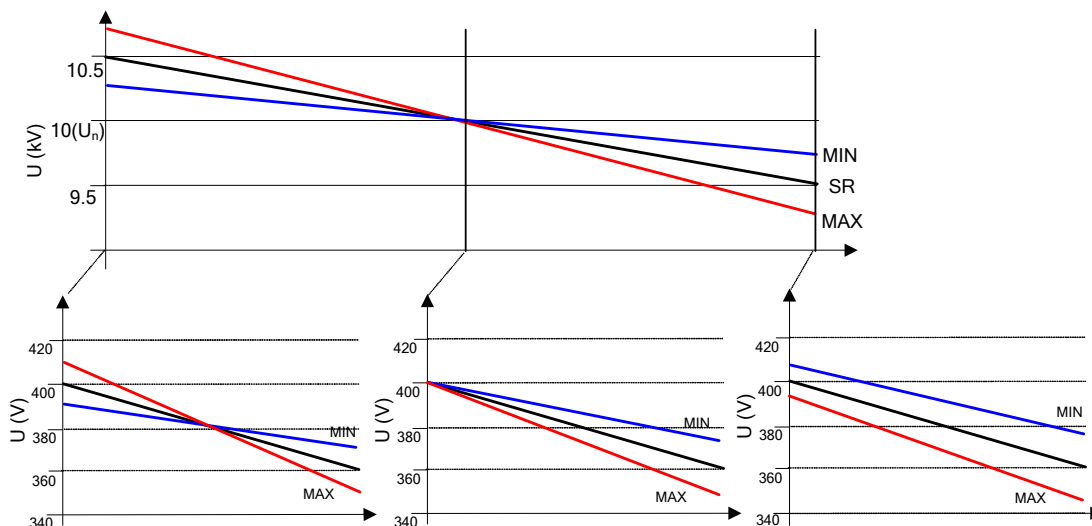
Sa slike je vidljivo da u slučaju veće varijacije potrošnje ovakav način regulacije napona nije baš najbolji, budući da u niskonaponskoj mreži napajanoj iz krajnjih trafostanica varijacije napona mogu biti vrlo velike.



Slika 9-2 Naponske prilike pri varijaciji potrošnje od minimalne do maksimalne, uz održavanje konstantnog napona na sekundaru TS 110/10 kV

Bolje bi rješenje bilo kad bi se napon na sekundaru TS 110/10 kV regulirao na način da održava konstantan napon negdje na sredini srednjenaponske mreže umjesto na početku. Npr. da se na sredini srednjenaponskog voda (s obzirom na opterećenje) održava konstantan (nazivni) napon.

U tom slučaju naponske prilike u mreži, pri varijaciji potrošnje od minimalne do maksimalne, izgledale bi približno kao na slici 9-3. Jasno, ovakvo rješenje je teže i skuplje izvesti u praksi. Također, postoji tehnički problem vezan za različite karakteristike (duljine, opterećenja) izvoda 10 kV koji se napajaju iz TS 110/10 kV, tako da bi ovakvo rješenje bilo izvedivo samo u slučaju da postoji samo jedan izvod 10 kV ili da su svi približno podjednake karakteristike.



Slika 9-3 Naponske prilike pri varijaciji potrošnje od minimalne do maksimalne, uz održavanje konstantnog napona na sredini voda 10kV

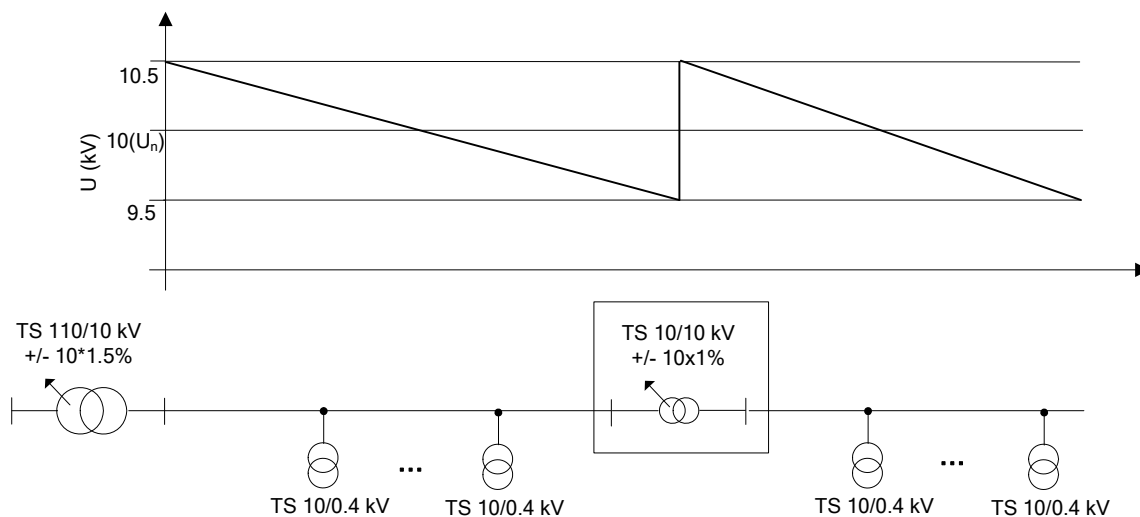
Jedno od rješenja koje se primjenjuje je automatska regulacija napona na transformatoru 110/x kV ovisno o potrošnji: ne održava se uvijek konstantni napon, već se napon prilagođava opterećenju mreže. Za vrijeme visokih opterećenja (veći padovi napona u mreži) napon na sekundaru transformatora 110/10 kV održava se na maksimalno dozvoljenoj vrijednosti (npr. 10.8 kV) kako bi se „pokrili” padovi napona u dubini mreže. Za vrijeme niskih opterećenja mreže, napon na sekundaru transformatora 110/10 održava se na nešto nižoj vrijednosti (npr. 10.2 kV), kako bi se onemogućilo povećanje napona u NN mrežama napajanih s krajnjih TS 10/0.4 kV kod koji je statičkom regulacijom podešeno povećanje napona.

Za dobru regulaciju napona u distributivnoj mreži postoje i dodatna ograničenja:

- padovi napona na transformatorima
- regulacijski opseg transformatora 110/x
- kolebanja napona u prijenosnoj mreži (110 kV)

Dodatni načini regulacije napona u distributivnoj mreži su:

- kondenzatorskim baterijama, koje osim kompenzacije jalove snage, poboljšavaju i naponske prilike u mreži
- uzdužnim regulacijskim transformatorima (booster transformatori) na trasi srednjenaponskog voda (slika 9-4), s jediničnim nazivnim prijenosnim omjerom (npr. 10/10 kV), i regulacijskim dijelom (npr. $\pm 10 \times 1\%$, tako da je u krajnjim položajima regulacijske preklopke, prijenosni omjer 9/10 kV odnosno 11/10 kV)



Slika 9-4 Regulacija napona na sredjenaponskom vodu uzdužnim (booster) transformatorom

Za domaći rad: u modelu 10 kV distribucijske mreže za lab.vježbu 1, simulirati ugradnju booster transformatora ispred sabirnica S3 i provjeriti njegov efekt na regulaciju napona u mreži (mogućnost održavanja nazivnog napona na sabirnici S3, bez ugradnje kondenzatorskih baterija). Podaci za booster transformator: prijenosni omjer $10 \pm 10 \times 1\% / 10$ kV, $S_n = 1.5$ MVA, $u_k = 5\%$, zanemareni gubici praznog hoda, gubici kratkog spoja i struja praznog hoda.

10 XX

Xx

11 XX

Xx

LITERATURA