

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**SMETNJE U STACIONARNOM POGONU
ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA**

Rijeka, rujan 2016.

Alen Dervišević

0069049737

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**SMETNJE U STACIONARNOM POGONU
ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA**

Mentor: V. pred. mr. sc. Marijana Živić-Đurović, dipl.ing.

Rijeka, rujan 2016.

Alen Dervišević

0069049737

TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike
Br.: 602-05/16-15/57
Rijeka, 13.07.2016.

Z A D A T A K
za završni rad

Pristupnik: Alen Dervišević

Matični broj: : 0069049737
Lokalni matični broj: 14800051

Naziv zadatka:

**SMETNJE U STACIONARNOM POGONU
ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA**

Title (*English*):

Interference in the steady operation of electrical power systems

Polje znanstvenog područja: 2.03. Elektrotehnika
Grana znanstvenog područja: 2.03.01 elektroenergetika

Stacionarni pogon elektroenergetskog sustava. Vrste smetnji u elektroenergetskom sustavu: izobličenje napona, brza kolebanja napona, nesimetrija napona. Nastanak i utjecaj viših harmonika. Proračun nesimetrija uslijed nesimetričnih trošila. Posljedice nesimetrije u mreži.

Mentor:

Predsjednica Povjerenstva:





V. pred. mr. sc. Marijana Živić-Đurović,
dipl.ing.

Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik, dipl.ing.

Student:



Alen Dervišević

Završni radovi moraju biti u skladu s „Uputama za pisanje završnog / diplomskog rada“.

Prema Rješenju od dne. 08.07.2016.

Sadržaj

1. UVOD	4
2. IZOBLIČENJE KRIVULJE STRUJE I NAPONA	2
2.1. Nastanak viših harmonika struje	4
2.2. Izračunavanje viših harmonika napona	7
2.4. Zaštita kondenzatora od rezonancije	15
2.5. Suzbijanje viših harmonika u mreži	17
2.6. Posljedice pojave viših harmonika struje i napona u mreži	22
3. BRZO KOLEBANJE NAPONA	23
3.1. Nastanak brzo promjenjivih struja	24
3.2. Izračunavanje kolebanja napona	26
3.3. Suzbijanje kolebanja napona u mreži	29
3.4. Posljedice kolebanja napona u mreži	38
4. NESIMETRIJE STRUJE I NAPONA	39
4.1. Proračunavanje nesimetrije uslijed nesimetričnih trošila	40
4.2. Nesimetrija izazvana neprepletenim nadzemnim vodovima	47
4.3. Teorem kompenzacije u analizi utjecaja nesimetriranog voda	53
4.4. Posljedice nesimetrije u mreži	63
5. ZAKLJUČAK	64
6. LITERATURA	65

1. UVOD

U ovom radu biti će opisane smetnje u stacionarnom pogonu. Kao osnovne uvjete kvalitete električne energije poznajemo:

- stalnu jednakost napona
- stalnu jednakost frekvencije
- stalnu isporuku po količini i neprekidnosti.

U svakom tehničko-ekonomskom sustavu rad bez rizika nije moguć, pa tako već navedene kvalitete elektroenergetskog sustava nije moguće u potpunosti ispuniti, pa moramo poštivati tolerancije unutar kojih se određene vrijednosti mogu kretati, a da se i dalje smatraju zadovoljavajućim.

Osim već navedenih uvjeta kvalitete moraju se zadovoljiti i drugi uvjet koji se odnose na tzv. onečišćenje električne energije, točnije njenih komponenti, struje i napona. Udio jalove snage i smetnje uslijed kratkog spoja mogu se zanemariti iz ove problematike kao neminovni ali ipak rješivi problemi u stabilnosti isporuke, te nam tako ostaju još tri vrste smetnji koje se javljaju u stacionarnom pogonu mreže. Upravo ta tri preostala problema biti će detaljnije opisana u ovom radu. Te smetnje su:

- izobličenje krivulje struje i napona (distorzija)
- brza kolebanja napona periodičnosti, tzv. flikeri
- nesimetrija struje i napona

2. IZOBLIČENJE KRIVULJE STRUJE I NAPONA

Za razumijevanje ovoga problema može se izostaviti istosmjerna komponenta struje iz razloga što se ona najčešće ne pojavljuje ili je kratkotrajna i zanemariva. Tijekom bavljenja ovim problemom koriste se oznake a, b i c za označavanje faza, f za nazivnu numeričku frekvenciju, $\omega = 2\pi f$ za nazivnu kružnu frekvenciju, N=1,2,3... rang harmonika. Viši harmonici, ovisno o njihovom rangu, tvore simetrične trofazne sustave direktnog, inverznog ili nultog sustava. Iz razloga što su viši harmonici sinusoidni za njih se može koristiti simbolični proračun. Pri korištenju simboličnog proračuna može se zanemariti početni fazni pomak vektora \bar{V}_{aN} prema vektoru osnovnog vala $\bar{V}_{a1} = \bar{V}_a$ ili prema osnovnoj osi. Kada je sustav promatran trofazno mora se prikazati fazni kut od 120° među pojedinim fazama.

Za harmonike ranga N vrijede sljedeći izrazi po fazama:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{aN} &= V_N e^{jN\omega t} \\ \bar{V}_{bN} &= V_N e^{jN(\omega t - \frac{2\pi}{3})} \\ \bar{V}_{cN} &= V_N e^{jN(\omega t - \frac{4\pi}{3})} \quad N=1,2,3\dots\end{aligned}\tag{2.1}$$

Za N=1 dobije se osnovni harmonik. Ako se u izraze 1.1. uvrste rangovi N dobije se:

za N=2:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{a2} &= V_2 e^{j2\omega t} \\ \bar{V}_{b2} &= V_2 e^{j(2\omega t - \frac{4\pi}{3})} \\ \bar{V}_{c2} &= V_2 e^{j(2\omega t - \frac{2\pi}{3})}\end{aligned}\tag{2.2}$$

za N=3:

$$\bar{V}_{a3} = \bar{V}_{b3} = \bar{V}_{c3} = V_3 e^{j3\omega t}\tag{2.3}$$

i tako dalje za ostale N.

Ukoliko se obrati pozornost na eksponent od e može se vidjeti da za N=1 (osnovni harmonik) čini direktni, za N=2 inverzni i za N=3 nulti trofazni sustav. Harmonike koji tvore direktni sustav(d) mogu se računati pomoću formule:

$$N = 3n + 1 \quad (n=0,1,2\dots)\tag{2.4}$$

inverzni(i) sustav:

$$N = 3n - 1 \quad (n=1,2,3\dots)\tag{2.5}$$

nulti(o) sustav:

$$N = 3n \quad (n=1,2,3\dots)\tag{2.6}$$

pa se može prikazati (Tablica 2.1.) pripadnost određenom sustavu prvih nekoliko harmonika.

Tablica 2.1. Pripadnost određenom sustavu prvih 20 harmonika

broj harmonika	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
sustav	d	i	o	d	i	o	d	i	o	d	i	o	d	i	o	d	i	o	d	i

Niz harmonika može se podijeliti na tri skupine:

- parni harmonici struje koji nastaju pri smetnji u mreži (ti harmonici se rijetko pojavljuju i upravo iz tog razloga se u većini slučajeva zanemaruju, iako izazivaju teže posljedice od ostalih harmonika)
- harmonici dijeljivi sa tri (to su svi harmonici koji pripadaju nultom sustavu, nastaju prilikom magnetiziranja zasićenih željeznih jezgri)
- ostali harmonici (oni harmonici čiji je rang neparan a čine inverzni ili direktni sustav, ti harmonici se najčešće analiziraju)

Kao što je već prikazano tablicom 2.1. svaki harmonik ima svoj rang N , i on je idealna sinusoida frekvencije Nf . Svaki harmonik ima različitu amplitudu i sa porastom N amplituda harmonika naglo opada. Najvišu amplitudu ima osnovni harmonik ($N=1$, $f=50\text{Hz}$). Ukoliko se zbroje svi istovremeno postojeći harmonici (npr. napona) u fazi a , i ukoliko nema istosmjernih komponente može se dobiti izraz za konačnu krivulju momentalne vrijednosti napona:

$$u_a = \text{Re} \sum_{N=1}^{\infty} \sqrt{2} U_N e^{j(N\omega t + \phi_N)} \quad (2.7.)$$

gdje je:

N rang harmonika;

$\omega = 2\pi f$ kružna frekvencija osnovnog harmonika;

U_N efektivna vrijednost napona N -tog harmonika;

ϕ_N fazni kut N -tog harmonika u odnosu na realnu os.

Periodična krivulja u_a odstupa od idealne sinusoida $u_a = \text{Re} \sqrt{2} U_1 e^{j(\omega t + \phi_1)}$, te je takva sinusoida izobličena. Faktor izobličenja je mjera za izobličenje koji se određuje izrazom:

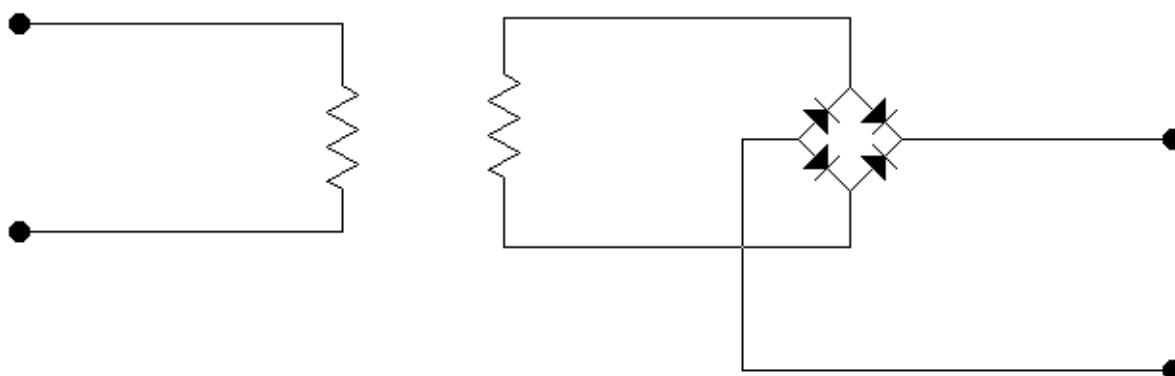
$$D = \frac{\sqrt{\sum_{N=2}^{\infty} U_N^2}}{U_1} \quad (2.8.)$$

2.1. Nastanak viših harmonika struje

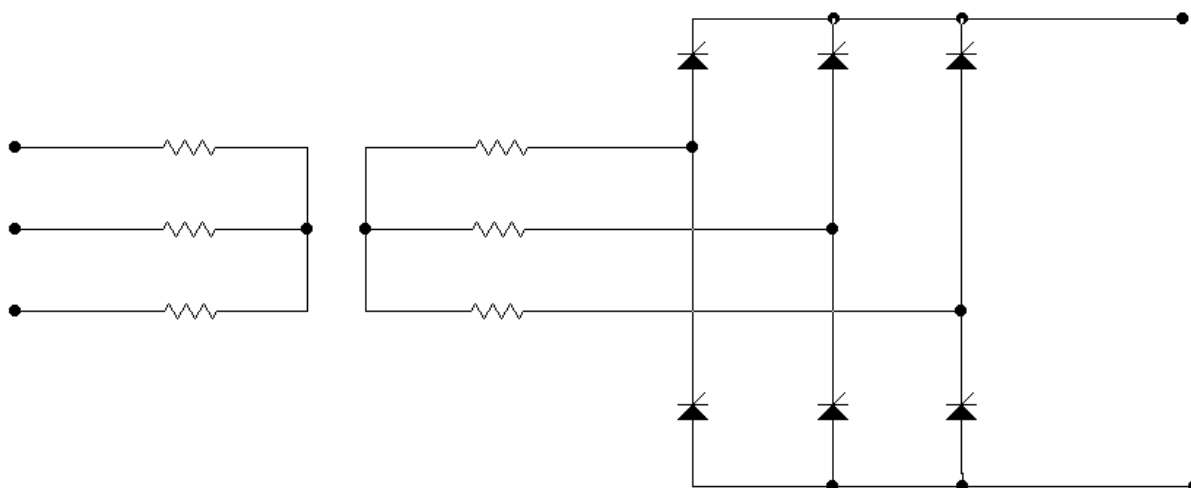
Trošila koja iz mreže uzimaju izobličenu struju predstavljaju generatore viših harmonika i ponašaju se kao idealni strujni izvori. Tipična takva trošila su usmjerivači(konvertori), bilo da rade kao izmjenjivači ili kao ispravljači. Elektrolučne peći su jedne od najpoznatijih generatora viših harmonika. Kod elektrolučnih peći do izobličenja struje dolazi zbog nelinearnog otpora električnog luka koji se pali i gasi u svakoj poluperiodi. Usmjerivači su najintenzivniji generatori viših harmonika struje, pa će se posebno posvetiti pažnja usmjerivačima.

Ovisno o spoju usmjerivača može se znati koji će se harmonici najviše pojavljivati. „najlošiji“ spoj po tom pitanju je jednofazni poluvalni ispravljač koji ima priključen veliki kapacitet na istosmjernoj strani. Kod takvih ispravljača dolazi do opterećenja izmjenične mreže u svakoj pozitivnoj poluperiodi, te se pojavljuje istosmjerna komponenta struje. Intenzitet smetnje kod ovakvih ispravljača je velik, ali zbog male snage trošila njegova apsolutna vrijednost je malena, pa u ovom slučaju ovakve smetnje nemaju posebnu bit. Puno značajniju ulogu imaju usmjerivači u mosnom spoju.

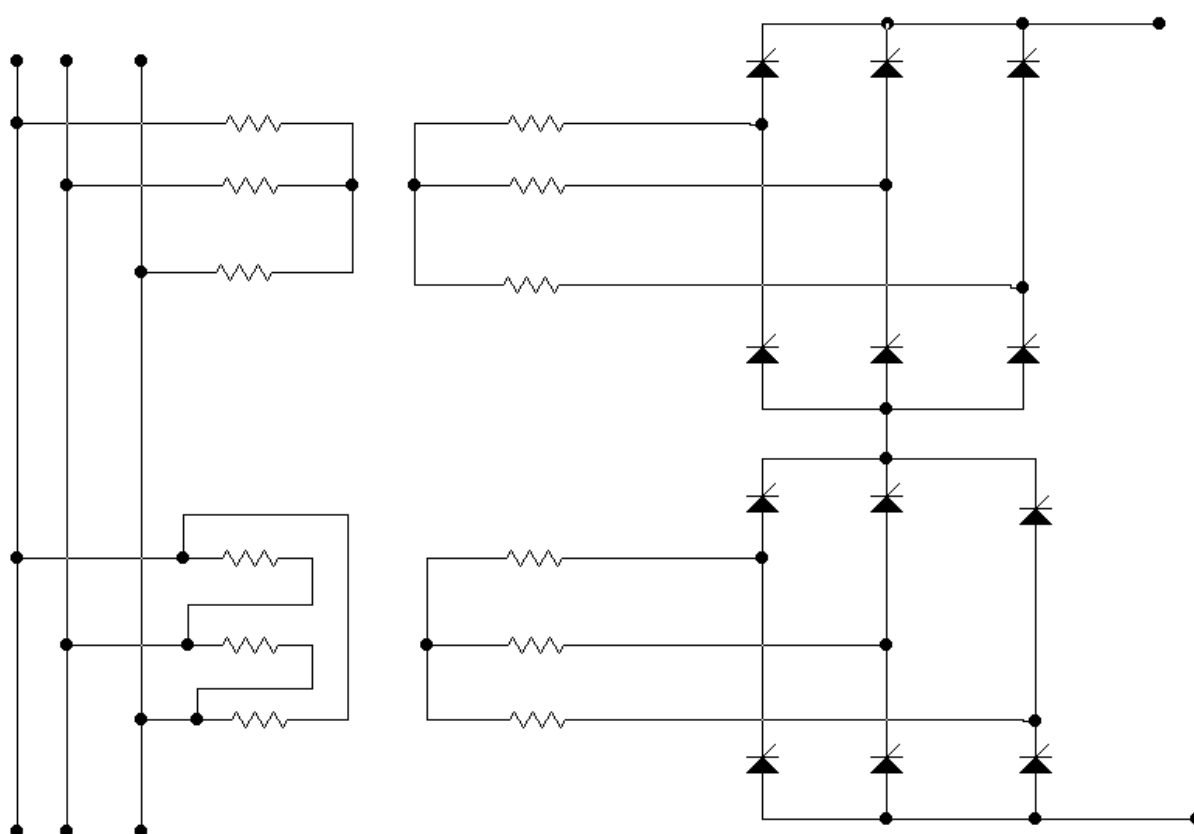
Ovisno o broju grana u usmjerivačkom krugu određuje se broj pulsacija ili pulsni broj koji ćemo označavati sa p . $P=4$ kod jednofaznog Graetzovog spoja koji je prikazan na slici 2.1., a $p=6$ za trofazni spoj koji je prikazan na slici 2.2. Na slici 2.3. prikazan je serijski spoj dvaju trofaznih spojeva i kod takvog spoja p iznosi 12. Najčešće se koriste spojevi prikazani na slikama 2.2. i 2.3.



Slika 2.1. Jednofazni Graetzov spoj



Slika 2.2. Trofazni Graetzov spoj



Slika 2.3. Serijski spoj dva trofazna Graetzova spoja

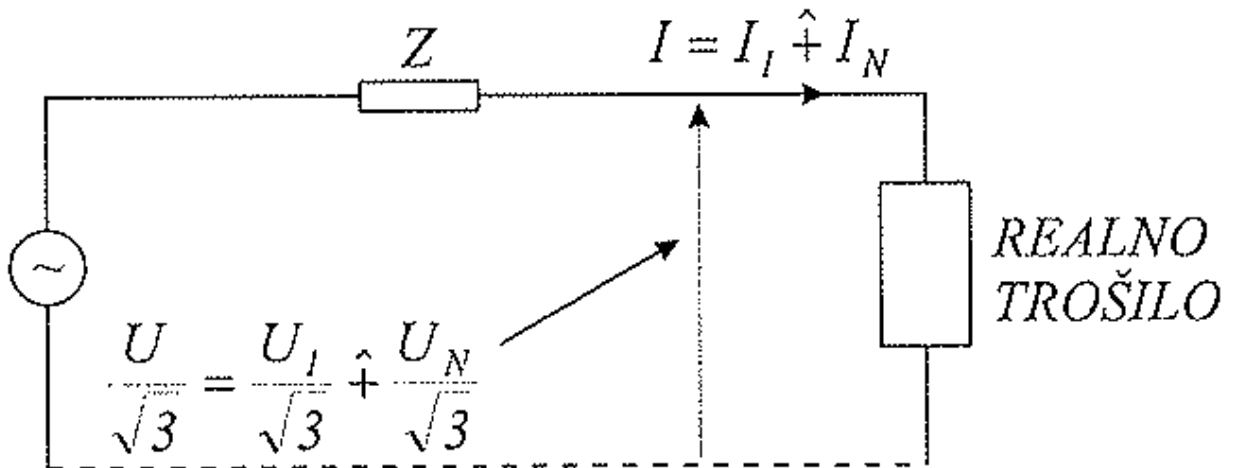
Spojevi prikazani na slikama 2.2. i 2.3. najčešće se koriste iz razloga što je u cilju imati spoj sa što većim p . Povećanjem p otpada sve više harmonika što se može vidjeti po formuli:

$$N = np \pm 1 \tag{2.9.}$$

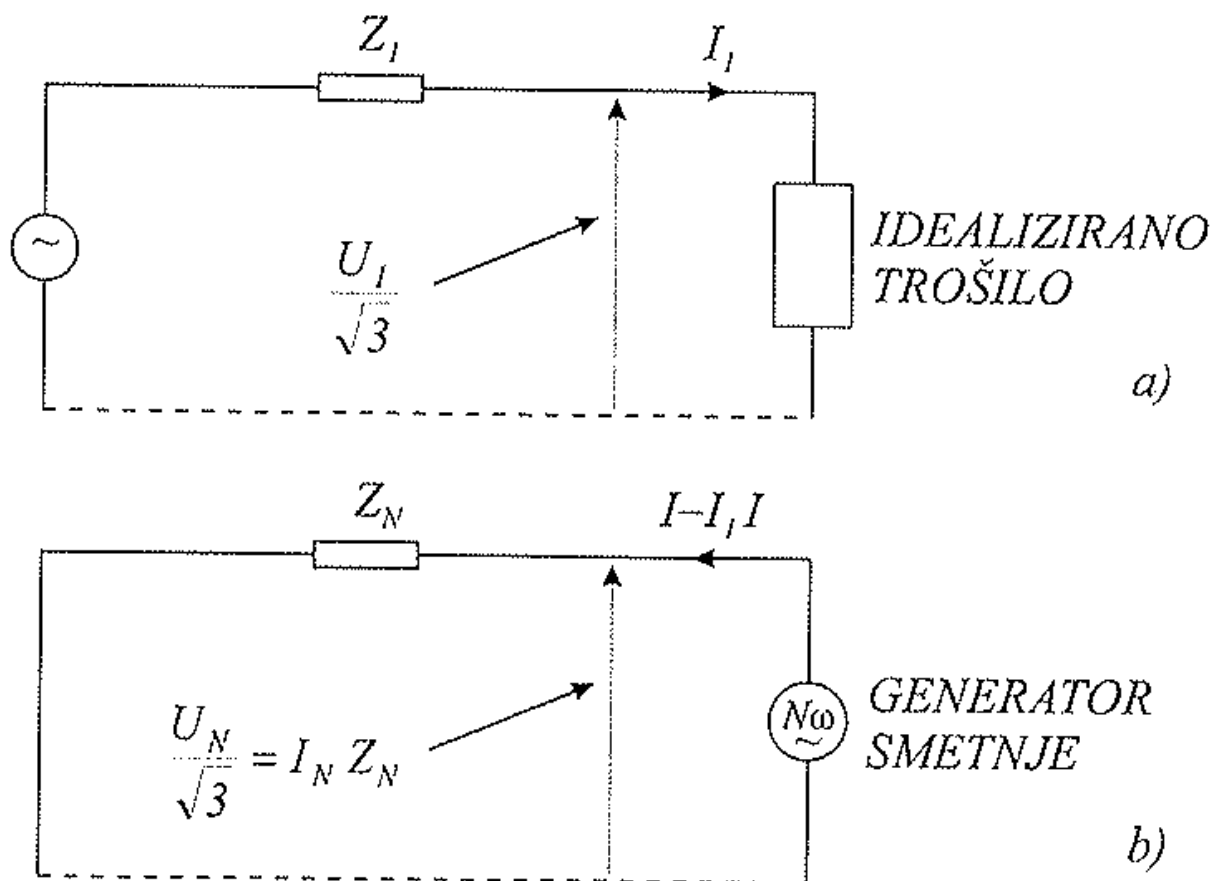
pa tako će spoj na slici 2.2 koji ima $p=6$ generirati harmonike $N=5,7,11,13,17,19,23,25,27,29\dots$, a spoj na slici 2.3. $N=11,13,23,25,35,37\dots$ Spojevi koji imaju p veći od 12 se rijetko koriste zbog velike cijene.

2.2. Izračunavanje viših harmonika napona

Promatrati ćemo djelovanje jednog harmonika ranga N na realni sustav koji je prikazan na slici 2.4. i čije trošilo uzima izobličenu struju. Taj realni sustav možemo prikazati pomoću dva „zamjenska“ sustava koja su prikazana na slikama 2.5.a i 2.5.b. Spoj prikazan na slici 2.5.a ima trošilo koje je idealizirano na način da opterećuje mrežu sa osnovnim harmonikom struje I_1 , dok trošilo iz spoja sa slike 2.5.b generira struju viših harmonika I_N i njime napaja mrežu.



Slika 2.4. Nadomjesna shema realnog sustava s trošilom koji uzima struju izobličenu harmonikom ranga N [1]



Slika 2.5. Nadomjesna shema mreže sa slike 2.4. rastavljene na dva „zamjenska“ sustava [1]

Na slici 2.5.b mreža je prikazana impedancijom Z_N :

$$Z_N = |\overline{Z}_N| = \sqrt{R^2 + (N\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + (NX_1)^2} \quad (2.10.)$$

gdje X_1 predstavlja reaktanciju kod osnovnog harmonika. Kod određivanja Z_N moramo voditi računa da li ćemo koristiti direktnu, inverznu ili nultu impedanciju mreže, a to nam ovisi o tome koji trofazni sustav struje tvori harmonik. Ovakvo promatranje mreže se odnosi na mreže koje imaju djelatne i induktivne otpore.

Nadomjesnu impedanciju mreže sa slike 2.5.a Z_1 možemo računati pomoću snage kratkog spoja u promatranom čvoru:

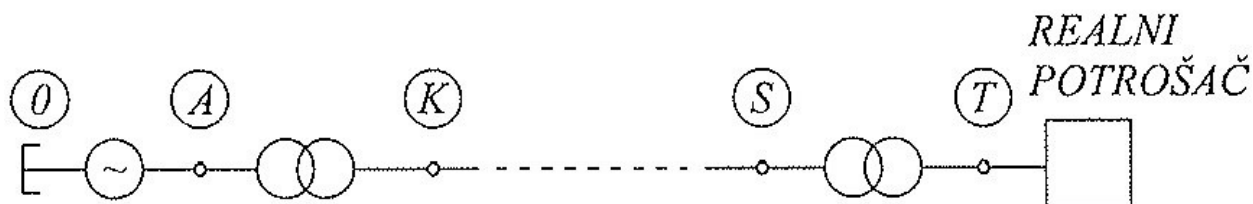
$$Z_1 \doteq \frac{U^2}{S_k} = X_1 \quad (2.11.)$$

Za ovakav proračun uzima se u obzir da su direktna i inverzna impedancija jednake, a da se harmonici koji tvore nulti sustav neće pojavljivati.

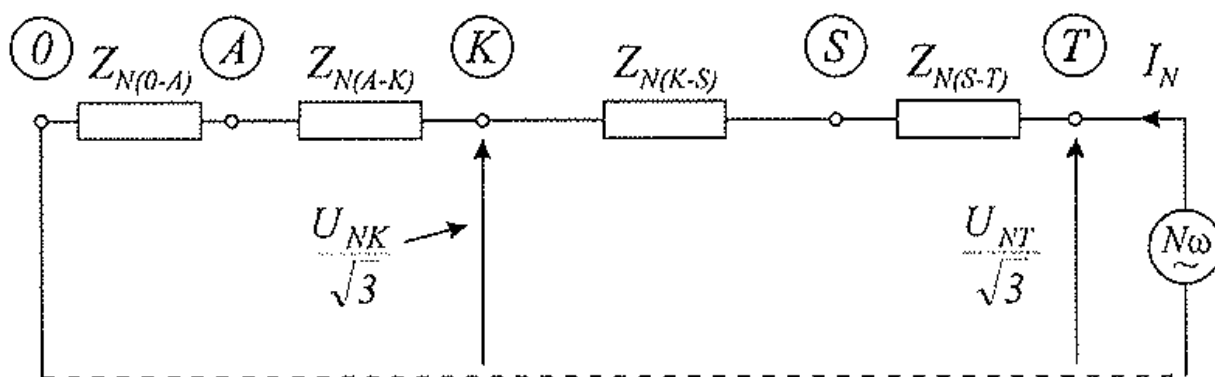
Za svaki harmonik ranga N se može izračunati efektivna vrijednost napona po formuli:

$$U_N = \sqrt{3}I_N Z_N \quad (2.12.)$$

Izračunata efektivna vrijednost U_N se smanjuje kako se udaljavamo od izvora smetnje. To je prikazano prilikama u prijenosnom sustavu 0-T na slici 2.6., odnosno na njegovoj nadomjesnoj shemi za N-ti harmonik na slici 2.7.



Slika 2.6. Prijenosni sustav 0-T [1]



Slika 2.7. Nadomjesna shema prijenosnog sustava sa slike 2.6 za N-ti harmonik [1]

Ako se napon U_{NT} izračunava pomoću formule 2.12., u čvoru K napon N-tog harmonika se može izračunati po formuli:

$$U_{NK} = U_{NT} \frac{Z_{N(0-K)}}{Z_{N(0-T)}} \quad (2.13.)$$

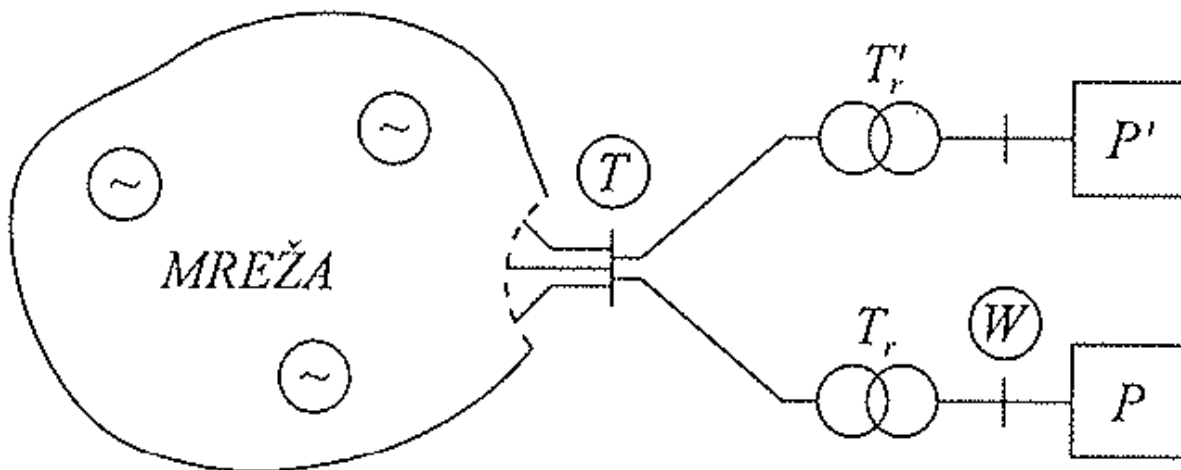
gdje je:

$Z_{N(0-K)}$ ukupna impedancija za N-ti harmonik od zvjezdišta generatora do čvora K

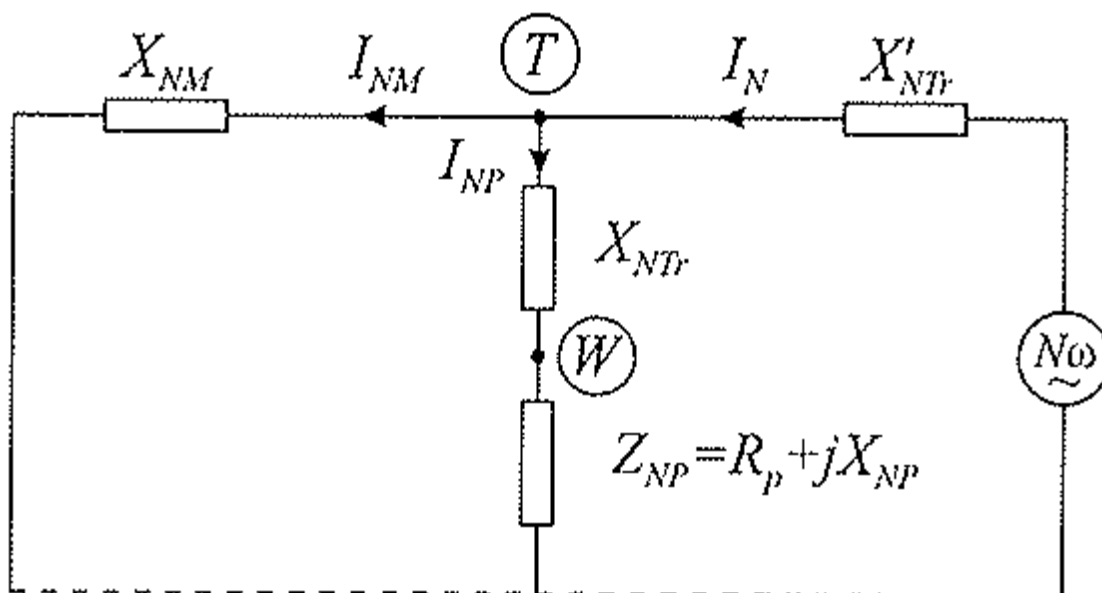
$Z_{N(0-T)}$ ukupna impedancija za N-ti harmonik od zvjezdišta generatora do čvora trošila koje uzima izobličenu struju

Naponi harmonika opadaju kako se udaljavamo od izvora smetnje, pa se tako može analizirati mreža samo u blizini trošila. Tako se može u ovom primjeru ograničiti proračun na čvor T iz kojeg se napaja trošilo i još barem jedan potrošač. Takva analiza mreže je vrlo jednostavna.

Prikaz takve realne mreže se može vidjeti na slici 2.8., a na slici 2.9. je prikazan pripadni ekvivalent za N-ti harmonik te mreže.



Slika 2.8. Shema realne mreže [1]



Slika 2.9. Shema pripadnog ekvivalenta za N-ti harmonik [1]

X_{NM} reaktancija mreže izračunata po formualam 2.10. i 2.11.

P' trošilo koje uzima izobličenu struju u kojoj je sadržana struja N-tog harmonika I_N

P normalni potrošač koji se napaja iz zajedničkog čvora T

X_{NT_r} reaktancija prijenosnog sustava od T do W za N-ti harmonik

Z_{NP} impedancija potrošača P za N-ti harmonik

Struja I_N je postavljena u realnu os i onda napon N-tog harmonika za čvor T u ovom slučaju se računa pomoću formule:

$$\bar{U}_{NT} = \sqrt{3}I_N \frac{jX_{NM}(jX_{NT}r + \bar{Z}_{NP})}{jX_{NM} + jX_{NT}r + \bar{Z}_{NP}} \quad (2.14.)$$

Napon N-tog harmonika u čvoru W se računa pomoću formule:

$$\bar{U}_{NW} = \bar{U}_{NT} \frac{\bar{Z}_{NP}}{jX_{NT}r + \bar{Z}_{NP}} \quad (2.15.)$$

Ostatak struje N-tog harmonika koji teče dalje u mrežu se dobije pomoću izraza:

$$\bar{I}_{NM} = I_N - \bar{I}_{NP} = I_{NP} \frac{jX_{NT}r + \bar{Z}_{NP}}{jX_{NM}} \doteq I_{NP} \frac{X_{NT}r + X_{NP}}{X_{NM}} \quad (2.16.)$$

Sada će se vidjeti na primjeru 6-pulsnog ispravljača koji ima $S_k = 1250MVA$, uz dozvoljeni faktor distorzije 3%, koju najveću snagu S smije imati takav ispravljač.

Potrebno je izračunati snagu S, za nekoliko različitih h, prema izrazu:

$$S = \frac{D_{max}S_k}{\sqrt{h}} \quad (2.17.)$$

gdje je:

D_{max} najveći dozvoljeni faktor distorzije

S_k snaga najmanjeg početnog kratkog spoja u priključenom čvoru trošila

h broj koji pokazuje koliko harmonika želimo ili moramo uzeti u proračun

S najviša dozvoljena snaga ispravljača, ako nisu poduzete tehničke mjere za suzbijanje harmonika

$h=1$

$$S = \frac{D_{max}S_k}{\sqrt{h}} = \frac{0,03 \cdot 1250}{\sqrt{1}} = 37,5MVA$$

$h=2$

$$S = \frac{D_{max}S_k}{\sqrt{h}} = \frac{0,03 \cdot 1250}{\sqrt{2}} = 26,52MVA$$

$h=3$

$$S = \frac{D_{max}S_k}{\sqrt{h}} = \frac{0,03 \cdot 1250}{\sqrt{3}} = 21,65MVA$$

$h=4$

$$S = \frac{D_{max}S_k}{\sqrt{h}} = \frac{0,03 \cdot 1250}{\sqrt{4}} = 18,75MVA$$

$$h=5$$

$$S = \frac{D_{max}S_k}{\sqrt{h}} = \frac{0,03 \cdot 1250}{\sqrt{5}} = 16,77MVA$$

$$h=6$$

$$S = \frac{D_{max}S_k}{\sqrt{h}} = \frac{0,03 \cdot 1250}{\sqrt{6}} = 15,31MVA$$

$$h=7$$

$$S = \frac{D_{max}S_k}{\sqrt{h}} = \frac{0,03 \cdot 1250}{\sqrt{7}} = 14,17MVA$$

$$h=8$$

$$S = \frac{D_{max}S_k}{\sqrt{h}} = \frac{0,03 \cdot 1250}{\sqrt{8}} = 13,26MVA$$

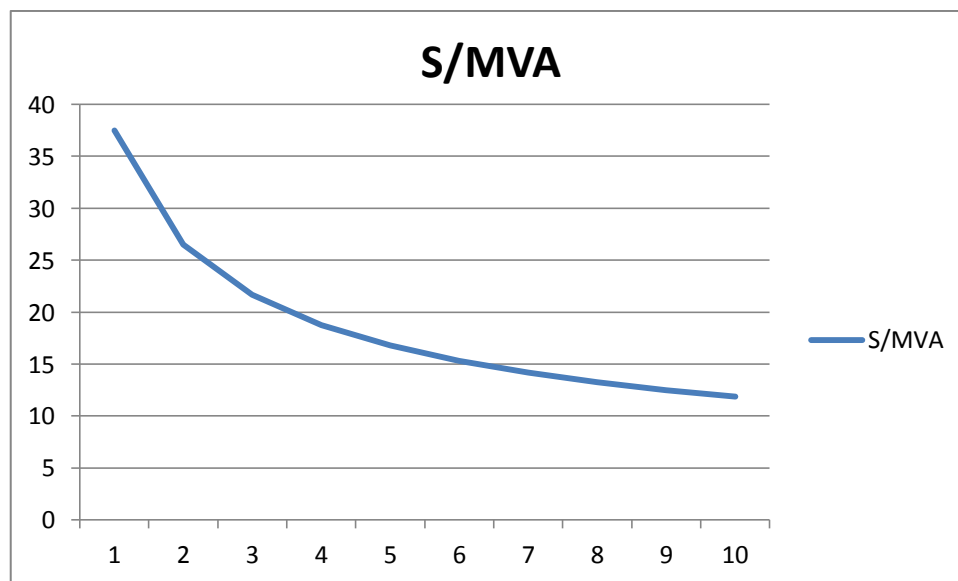
$$h=9$$

$$S = \frac{D_{max}S_k}{\sqrt{h}} = \frac{0,03 \cdot 1250}{\sqrt{9}} = 12,5MVA$$

$$h=10$$

$$S = \frac{D_{max}S_k}{\sqrt{h}} = \frac{0,03 \cdot 1250}{\sqrt{10}} = 11,86MVA$$

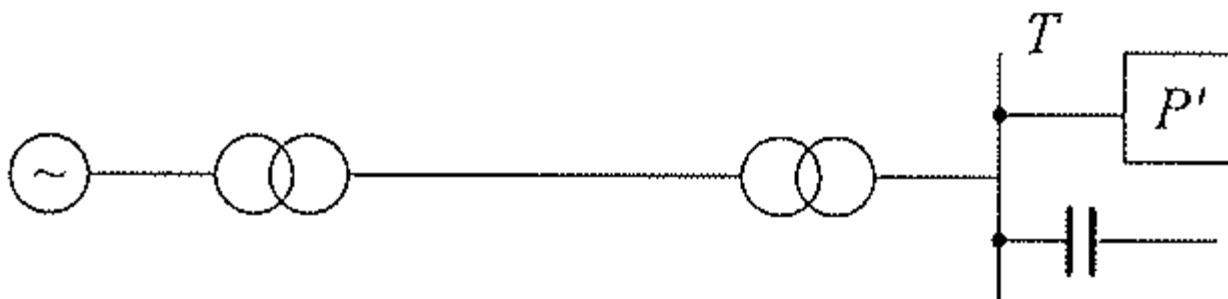
Sada ćemo na slici 2.10. grafički prikazati ovisnost S i h.



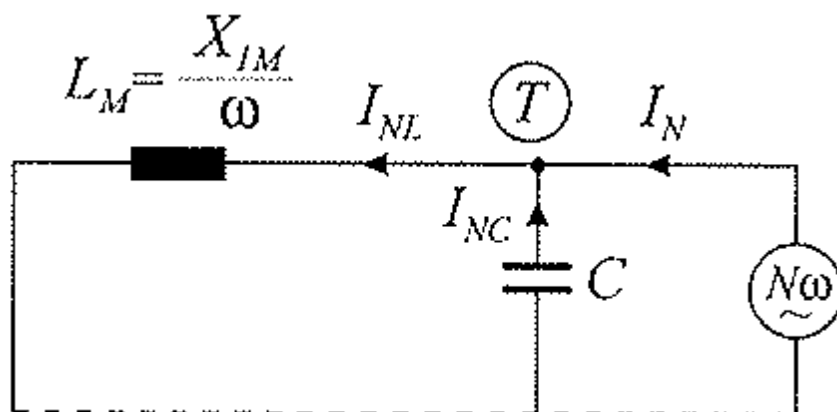
Slika 2.10. Međusobna ovisnost S i h

2.3. Rezonantne pojave

Sve mreže koje su do sada prikazane su bile bez kapaciteta. Često se koriste kompenzacijske kondenzatorske baterije iz razloga što se sa njim popravlja faktor snage koji je inače mal kod trošila koja uzimaju izobličenu struju.



Slika 2.11. Shema jednostavnog sustava s kompenzacijom jalove snage [1]



Slika 2.12. Ekvivalent za harmonike sustava prikazanog na slici 2.11. [1]

Ako se promatra sustav iz čvora T onda ukupnu susceptanciju mreže kod frekvencije ω' se računa po izrazu:

$$jB = \frac{1}{jX} = j\left(-\frac{1}{\omega' L_M} + \omega' C\right) \quad (2.18.)$$

Ukoliko se desna strana izraza 2.18. izjednači sa nulom dobije se rezonantna frekvencija, ω_r , pri kojoj je susceptancija jednaka nuli.

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_M C}} \quad (2.19.)$$

Kod rezonantne frekvencije dolazi do beskonačno velikih struja I_{NL} i I_{NC} . U stvarnosti to neće dozvoliti djelatni otpor gdje pojačanje tih struja može biti najviše trostruko. Snaga kratkog spoja

je promjenjiva, a s obzirom da se pomoću snage kratkog spoja izračunava L_M , pojavljuje se i promjenjiva rezonantna frekvencija. Iz tog razloga se mora provjeriti u kojem rasponu će se pojaviti rezonantna frekvencija.

Prema primjeru sa slike 2.12. će se izračunati rezonantna frekvencija i provjeriti da li dolazi do rezonancije. Pretpostavimo da na sabirnice T koje imaju nazivni napona 110kV priključena je kondenzatorska baterija trofazne snage $Q_C = 40Mvar$ kod 110kV. Uz pretpostavku da je početna snaga trolnog kratkog spoja u čvoru T 1250MVA.

$$C = \frac{Q_C}{U^2 \omega} = \frac{40}{110^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 10,5 \cdot 10^{-6} F$$

$$X_{1M} = \frac{U^2}{S_k} = \frac{110^2}{1250} = 9,68 \Omega$$

$$L_{1M} = \frac{X_{1M}}{\omega} = \frac{9,68}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 3,08 \cdot 10^{-2} H$$

$$\omega_r = \frac{10^6}{\sqrt{10,5 \cdot 30812}} = 1758$$

$$N_r = \frac{\omega_r}{\omega} = \frac{1758}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 5,6$$

Rezonantna frekvencija najbliža je petom harmonika, ali ipak dovoljno daleko da bi došlo do rezonancije.

2.4. Zaštita kondenzatora od rezonancije

Kondenzatorske baterije su jako osjetljive na pojavu viših harmonika napona, pogotovo kod rezonancije kada su ti harmonici višestruko pojačani, pa će u ovom poglavlju biti prikazana zaštita kondenzatora od rezonancije.

Prema izrazu 2.20. može se izračunati kolika efektivna struja teče kroz kondenzatorsku bateriju.

$$I = \sqrt{\sum_{N=1}^N (CN\omega V_N)^2} \quad (2.20.)$$

gdje je:

N rang očekivanog harmonika (1,5,7,11,13...)

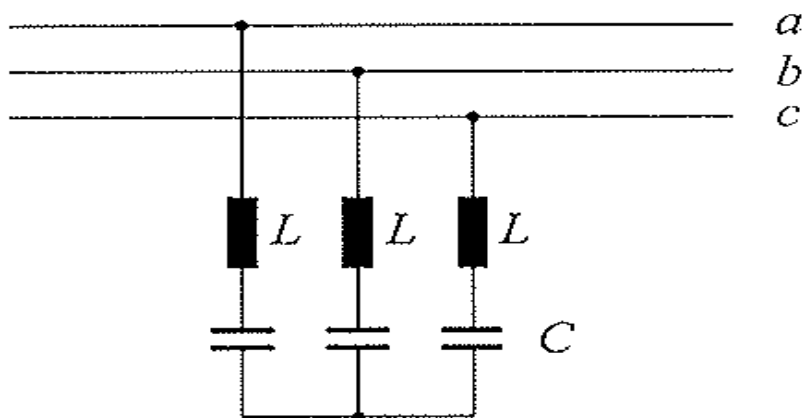
C kapacitet kondenzatora po fazi

$V_N = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$ fazni napon harmonika ranga N na stezaljkama kondenzatorske baterije

Ukoliko se u izraz 2.20. za N uvrsti 1 dobije se struja osnovnog harmonika I_1 . Svi ostali harmonici dodatno opterećuju kondenzatorsku bateriju. Postoje tehnički propisi po kojima ta dodatna opterećenja ne smiju prekoračiti 30%. Relativno povećanje jalove snage kondenzatora uslijed harmonika napona, a prema nazivnoj snazi (snazi kod osnovnog harmonika $N=1$ i nazivnog napona) mora zadovoljiti sljedeći uvjet:

$$1,3 \geq \frac{Q_C}{Q_{Cn}} = \frac{Q_C}{Q_{C1}} = \frac{\sum_{N=1}^N N U_N^2}{U_1^2} \quad (2.21.)$$

U većini slučajeva opterećenje kondenzatora je unutar dozvoljenih granica. Međutim problem se pojavljuje kod rezonancije. Ukoliko se frekvencija nekog generiranog harmonika podudara sa rezonantnom frekvencijom onda kondenzator moramo zaštititi serijskom zaštitnom prigušnicom kao što je prikazano na slici 2.13.



Slika 2.13. Trofazna kondenzatorska baterija sa zaštitnim prigušnicama [1]

Reaktanciju serijskog L-C spoja prikazanog na slici 2.13. računa se prema izrazu:

$$jX = j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (2.22.)$$

Iz izraza 2.22. može se zaključiti da ta reaktancija ovisi o frekvenciji, te će biti jednaka nuli kod rezonantne frekvencije.

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.23.)$$

Kako bi se izbjeglo to da sklop dođe u rezonanciju sa nekim od očekivanih harmonika, odabire se L takav da sa C daje sklop čija će rezonantna kružna frekvencija biti približno 1335, a rezonantna numerička frekvencija približno 212,5Hz. Ukoliko se sada u izraz 2.23. uvrsti umjesto rezonantne kružne frekvencije 1335 dobije se iznos induktiviteta zaštitne prigušnice L koji zadovoljava maloprije navedeni izraz:

$$L = \frac{1}{\omega_r^2 C} = \frac{5,611 \cdot 10^{-7}}{C} H \quad (2.24.)$$

Na primjeru kondenzatorske baterije koja izaziva rezonantne pojave s višim harmonicima u mreži tražiti će se da se izračuna induktivitet zaštitne prigušnice L i nova kapacitativna snaga Q'_C pri 50Hz. Pretpostaviti će se da je trofazne snage kondenzatorske baterije $Q_C = 40Mvar$ pri nazivnom naponu $U_n = 10,5kV$.

$$C = \frac{Q_C}{U^2 \omega} = \frac{40}{10,5^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,155 \cdot 10^{-3} F$$

$$L = \frac{0,5611 \cdot 10^{-6}}{C} = \frac{0,5611 \cdot 10^{-6}}{1155 \cdot 10^{-6}} = 0,4858 \cdot 10^{-3} H$$

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,4858 \cdot 10^{-3} = 0,1526 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{10^3}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,155} = 2,7559 \Omega$$

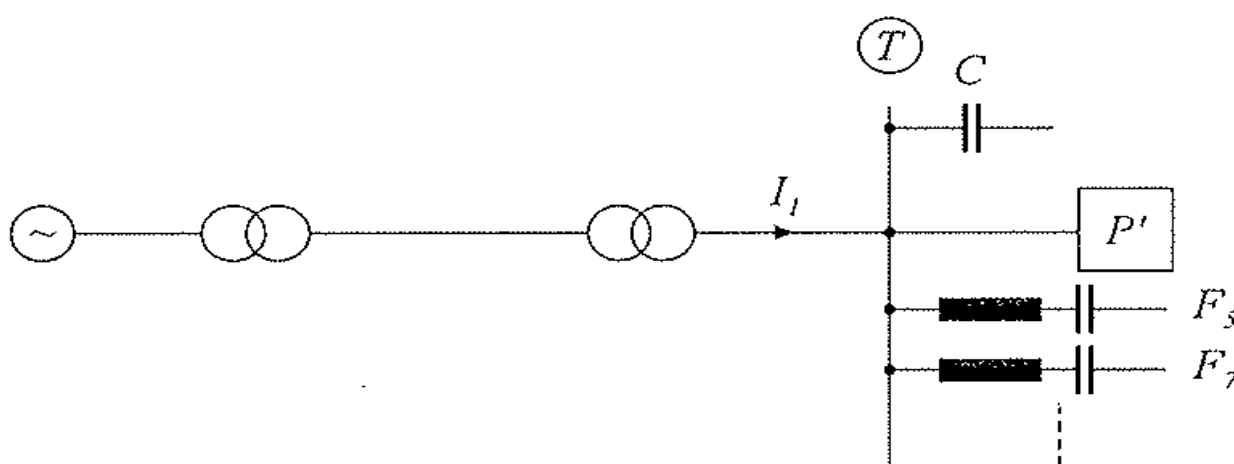
$$Q'_C = \frac{U^2}{X_C - X_L} = \frac{10,5^2 \cdot 10^6}{2,7559 - 0,1526} = 42,35 Mvar$$

2.5. Suzbijanje viših harmonika u mreži

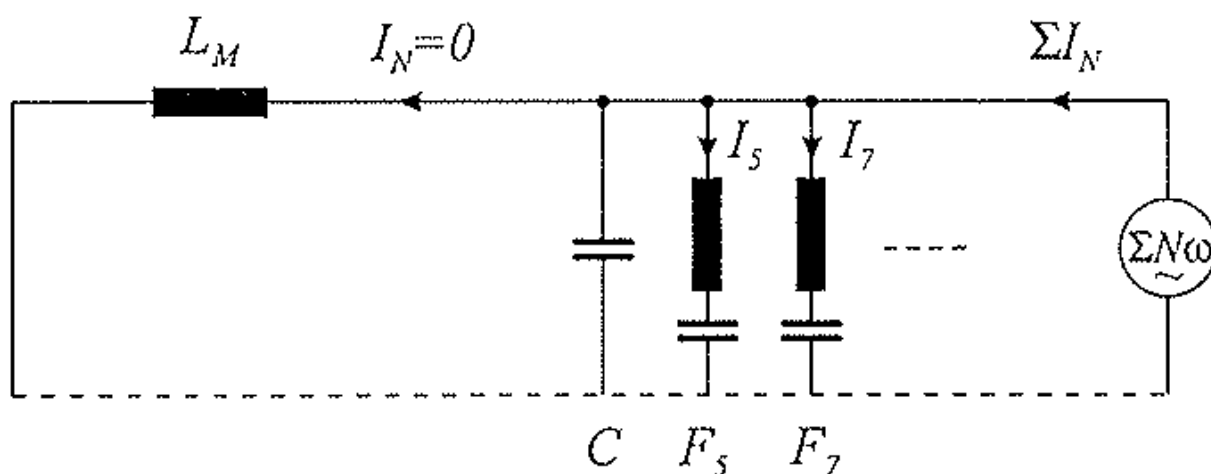
Ukoliko se u mreži pojavljuju viši harmonici koji prekoračuju dopuštenu granicu mora ih se ukloniti. Takve harmonike suzbija se na izvoru kako ne bi nastavili cirkulirati dalje mrežom. To se radi pomoću filtera izvedenih serijskim L-C sklopovima čija je rezonantna frekvencija podešena na frekvenciju harmonika, i takvi filteri se nazivaju apsorpcijskim filterima. Na slici 2.14. prikazan je sustav sa filterima F_5 i F_7 , te sa kondenzatorskom baterijom C za kompenzaciju jalove snage, a na slici 2.15. ekvivalent istog sustava za više harmonike. Ponekad su i sami kondenzatori koje sadrže filteri dovoljni za kompenzaciju jalove snage. Induktivitet filtera se računa prema izrazu:

$$L = \frac{1}{(N\omega)^2 C} \quad (2.25.)$$

gdje je N rang harmonika za koji se proračunava filter.



Slika 2.14. Shema sustava sa filterima [1]



Slika 2.15. Ekvivalent sheme sa slike 2.13. za više harmonike [1]

Kod izračuna vezanih za filtere mora se provjeriti:

- ukupno opterećenje kondenzatora(za osnovni i rezonantni harmonik)
- napon osnovnog harmonika na stezaljkama kondenzatora
- povećanu snagu kompenzacije za osnovni harmonik
- moguće rezoniranje cijelog sustava na osnovni harmonik

Uz pomoć 6-pulsnog ispravljača za napajanje pogona elektrolize prikazanog na slici 2.14. napraviti će se proračuni za:

- parametre filtra za peti i sedmi harmonik sa potrebnim provjerama, pretpostaviti će se da su djelatni otpor u mreži i ostali harmonici zanemarivi
- postizanje ukupne kompenzacije jalove snage do $\cos \varphi = 0,98$
- provjeru rezonira li sustav na osnovni harmonik

Pretpostaviti će se da 6-pulsni ispravljač ima snagu $S = 100MVA$ uz $\cos \varphi = 0,78$, a ispravljačko postrojenje da je priključeno na sabirnice napona 35kV, na kojima je snaga početnog tropskog kratkog spoja $S_k = 1700MVA$.

Za peti harmonik iskoristiti će se izraz 2.26., faktor k će se prema uvjetima rada uzeti 0,8.

$$I_N = \frac{I_1}{N} k \quad (2.26.)$$

$$I_5 = \frac{I_1}{N} k = \frac{S \cdot k}{5 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} = \frac{100 \cdot 0,8}{5 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} = 264A$$

Ova struja u potpunosti prolazi kroz filter za peti harmonik F_5 i opterećuje pripadni harmonik. Sedmi harmonik je odstranjen filtriranjem. S obzirom da je moguće da dođe do preopterećenja kapacitet C filtra neće se izabrati proizvoljno nego će ga se izračunati. Dozvoliti će se prekoračenje kondenzatora do 25%, te će se napona nakon petog harmonika U_5 izraziti pomoću struje I_5 i pripadne reaktancije kondenzatora. Prema izrazu 2.21. dobije se:

$$C = 4,931 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{I_5}{U_1} = 4,931 \cdot \frac{264}{35} \cdot 10^6 = 37,19 \cdot 10^{-6} F$$

Da bi filter rezonirao s petim harmonikom pripadni serijski induktivitet mora biti prema izrazu 2.25.:

$$L = \frac{1}{(N\omega)^2 C} = \frac{10^6}{(5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50)^2 \cdot 37,19} = 10,9 \cdot 10^{-3} H$$

Reaktancija izračunatog serijskog L-C sklopa za osnovni harmonik iznosi:

$$X = \left| \omega L - \frac{1}{\omega C} \right| = |3,424 - 85,591| = 82,2 \Omega$$

Trofazna jalova(kapacitivna) snaga sklopa za osnovni harmonik iznosi:

$$Q^{(5)} = \frac{U^2}{X} = \frac{35^2}{82,2} = 14,9 Mvar$$

Napon osnovnog harmonika na stezaljkama kondenzatora iznosi:

$$35 \cdot \frac{85,591}{82,2} = 36,33kV$$

Napon petog harmonika na stezaljkama kondenzatora iznosi:

$$U_5 = \sqrt{3}I_5X_5 = \frac{\sqrt{3} \cdot 264}{5 \cdot C} = \frac{\sqrt{3} \cdot 264 \cdot 85,591}{5} = 7,827kV$$

Kontrola preopterećenja prema izrazu 2.21. je:

$$\frac{36,44^2 + 5 \cdot 7,827^2}{36,44^2} = 1,23 < 1,25$$

Zadovoljava!

Sada će se račun ponoviti za sedmi harmonik, s time da se polazi od istog kapaciteta kondenzatora kao i ranije.

Struja sedmog harmonika je:

$$I_7 = \frac{5}{7} \cdot I_5 = \frac{5}{7} \cdot 264 = 188,6A$$

Da bi filter rezonirao sa sedmim harmonikom pripadni induktivitet mora iznositi:

$$L = \frac{10^6}{(7 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50)^2 \cdot 37,19} = 5,56 \cdot 10^{-3}H$$

Reaktancija serijskog L-C sklopa za osnovni harmonik iznosi:

$$X = \left| \omega L - \frac{1}{\omega C} \right| = |1,747 - 85,591| = 83,844\Omega$$

Trofazna jalova(kapacitivna) snaga sklopa za osnovni harmonik iznosi:

$$Q^{(7)} = \frac{U^2}{X} = \frac{35^2}{83,844} = 14,61Mvar$$

Napon osnovnog harmonika na stezaljkama kondenzatora iznosi:

$$35 \cdot \frac{85,591}{83,844} = 35,73kV$$

Napon sedmog harmonika na stezaljkama kondenzatora iznosi:

$$U_7 = \sqrt{3}I_7X_7 = \frac{\sqrt{3} \cdot 188,6 \cdot 85,591}{7} = 3,99kV$$

Kontrola preopterećenja:

$$\frac{35,73^2 + 7 \cdot 3,99^2}{35,73^2} = 1,0875 < 1,25$$

Zadovoljava!

Snaga trošila je 100MVA uz $\cos \varphi = 0,78$, pa se to može zapisati:

$$S = 100 \angle 38,74^\circ = 78 + j62,58MVA$$

Nakon kompenzacije do $\cos \varphi = 0,98$ snaga trošila je:

$$S' = 78 + j15,84MVA$$

Kompenzirati treba:

$$\Delta Q = 62,58 - 15,84 = 46,74Mvar$$

Filtri F_5 i F_7 kompenziraju:

$$Q_F = Q^{(5)} + Q^{(7)} = 14,9 + 14,61 = 29,51Mvar$$

Dodatna kondenzatorska baterija treba kompenzirati još:

$$Q_C = \Delta Q - Q_F = 46,74 - 29,51 = 17,23Mvar$$

Pa kondenzator po fazi mora imati kapacitet:

$$C = \frac{Q}{U^2\omega} = \frac{17,23}{35^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 44,7 \cdot 10^{-6}F$$

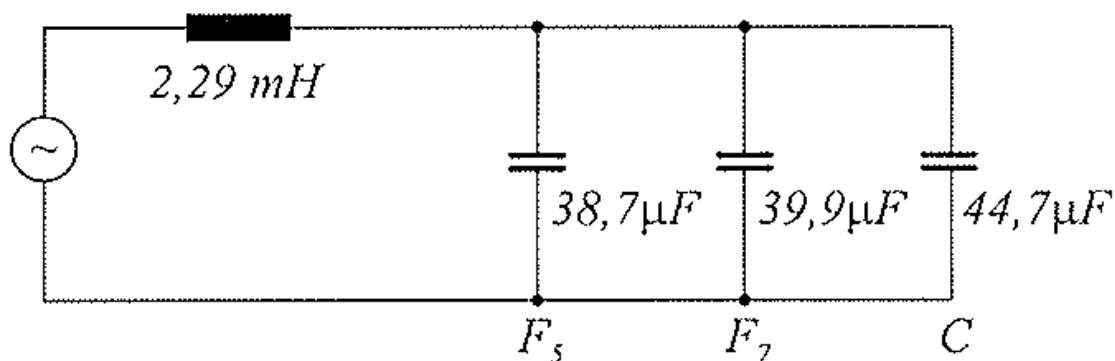
Reaktancija mreže uz $S_k = 1700MVA$ na 35kV je:

$$X_M = \frac{U^2}{S} = \frac{35^2}{1700} = 0,72\Omega$$

Sada se može izračunati i impedanciju mreže:

$$L_M = \frac{X_M}{\omega} = 2,29 \cdot 10^{-3}H$$

Uz isključeno trošilo može se za jednu fazu i osnovni harmonik prikazati ekvivalent na slici 2.16.



Slika 2.16. Ekvivalent mreže zadane u primjeru sa izračunatim vrijednostima [1]

Ukupna vrijednost kapaciteta iznosi:

$$\sum C = 121,3\mu F$$

Rezonantna frekvencija iznosi:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{10^6}{\sqrt{2290 \cdot 151,3}} = 1897,3$$

$$f_r = \frac{\omega_r}{2 \cdot \pi} = 301,96 \text{ Hz}$$

Rezonantna frekvencija je bliska šestom harmoniku, ali šesti harmonik pripada nultom sustavu, a i nema izvora takvog harmonika. Pa prema tome nema opasnosti od rezonancije s osnovnim harmonikom.

Uključeno trošilo zajedno s uključenom kompenzacijom ima $\cos \varphi = 0,98$, dakle ima induktivni karakter. Prema tome ne može rezonirati s induktivitetom mreže, pa kontrolu ne treba ni provoditi.

2.6. Posljedice pojave viših harmonika struje i napona u mreži

Danas je tehnologija veoma razvijena pa se određenim instrumentima mogu izvršiti mjerenja i tako utvrditi izobličenja struje i napona u bilo kojoj točki mreže. Međutim već iz ovog dosta površnog proračuna i analize vidi se da se određeni faktori ne mogu sa sigurnošću točno utvrditi. Može se ustanoviti da što se tiče distorzije ne može se u potpunosti imati uvid u tehničku i ekonomsku stranu ovog problema, ali isto tako može se reći da distorzija ima štetan utjecaj na određene elemente u mreži, ali da postoje tehnička rješenja kojima se taj utjecaj može ukloniti. Distorzija također izaziva i povećanje gubitaka u određenim elementima mreže i aparatima, smanjuje korisnu snagu, te izaziva dodatno zagrijavanje kod kabela i kondenzatora, a samim time i ubrzava starenje dielektrika.

Ukratko može se reći da distorzija struje i napona izaziva:

- kod transformatora, motora, generatora, vodova i kabela dodatne gubitke u vodičima u vidu Jouleove topline
- kod transformatora gubitke u željezu, te mogućnost zasićenosti magnetskog kruga
- kod kondenzatora i kabela dodatne gubitke u dielektricima
- kod kabela dodatne gubitke u vanjskom metalnom oblogu, pogotovo ako se pojavljuju harmonici ranga $N=3n$

Kao posljedice utjecaja distorzije struje i napona može se navesti:

- kod gotovo svih mjernih uređaja, uključujući i brojilo energije, dolazi do smanjena točnosti mjerenja
- kod zaštitnih uređaja može doći do krivog ili nepotrebnog djelovanja
- kod usmjerivača, elektroničkih računala, uređaja za daljinsko upravljanje, elektroničkih uređaja, röntgen aparata i tome slično, javljaju se smetnje funkcioniranja

3. BRZO KOLEBANJE NAPONA

U normalnom režimu rada nije moguće imati konstantno idealan napon. Kod osjetljivih trošila se zamjećuju čak i ona kolebanja koja su spora i unutar dopuštenih granica, ukoliko su ta kolebanja trenutna. Do takvih trenutnih promjena dolazi uključivanjem i isključivanjem potrošača velike snage, kod grube sinkronizacije sinkronih strojeva, kod uključivanja asinkronih motora, kod bliskih ali i kod udaljenih kratkih spojeva itd. Iako se takva kolebanja primjećuju u sustavu većinom ne izazivaju poteškoće.

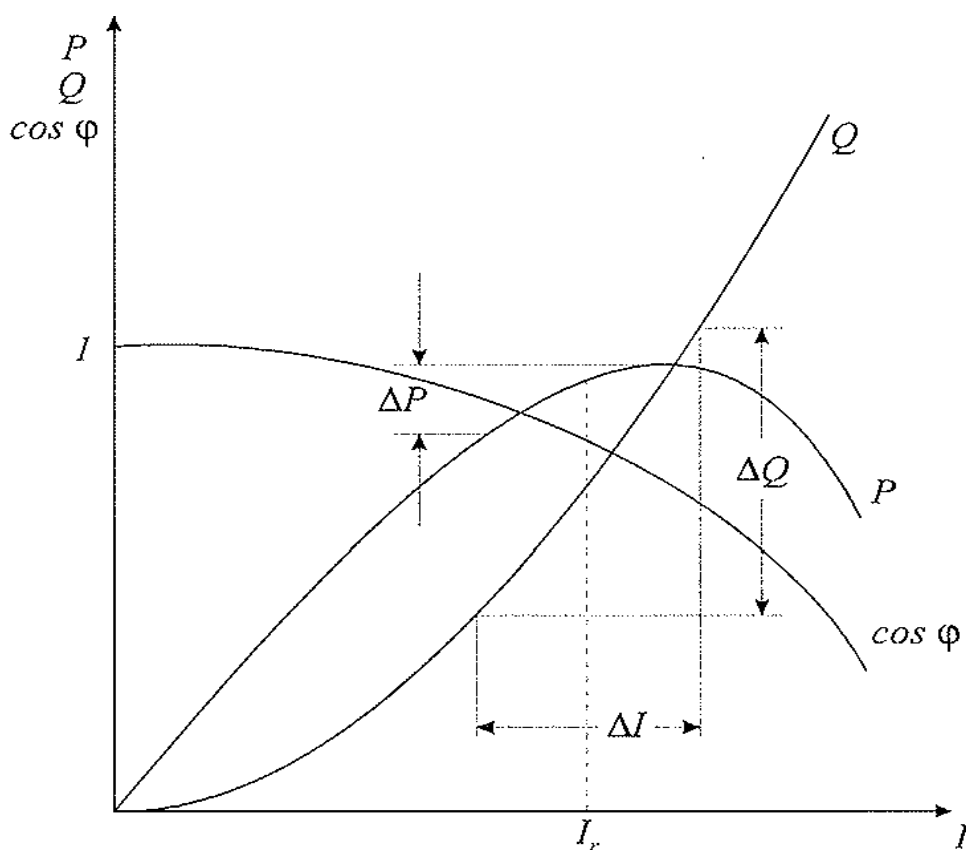
Značajna kolebanja napona su ona brza kolebanja koja imaju prosječnu periodičnost od 0,5 do 25Hz. Takva kolebanja se nazivaju fluktuacija napona ili flikeri. Takva kolebanja se moraju suzbijati jer su nepoželjna s obzirom na njihov negativan utjecaj na određene kategorije trošila. Kod rješavanja ovog problema mora se započeti od trošila koja iz mreže uzimaju brzo promjenjivu struju, koja izaziva promjene napona, te tako ta trošila postaju generatori smetnje.

3.1. Nastanak brzo promjenjivih struja

Promjenom prividne snage kojom trošila opterećuju mrežu može se zaključiti da ta trošila uzimaju brzo promjenjivu struju. Posebno je bitno kolebanje jalove komponente snage iz razloga što zbog induktivnog karaktera uzdužne grane elemenata mreže direktno utječe na napon.

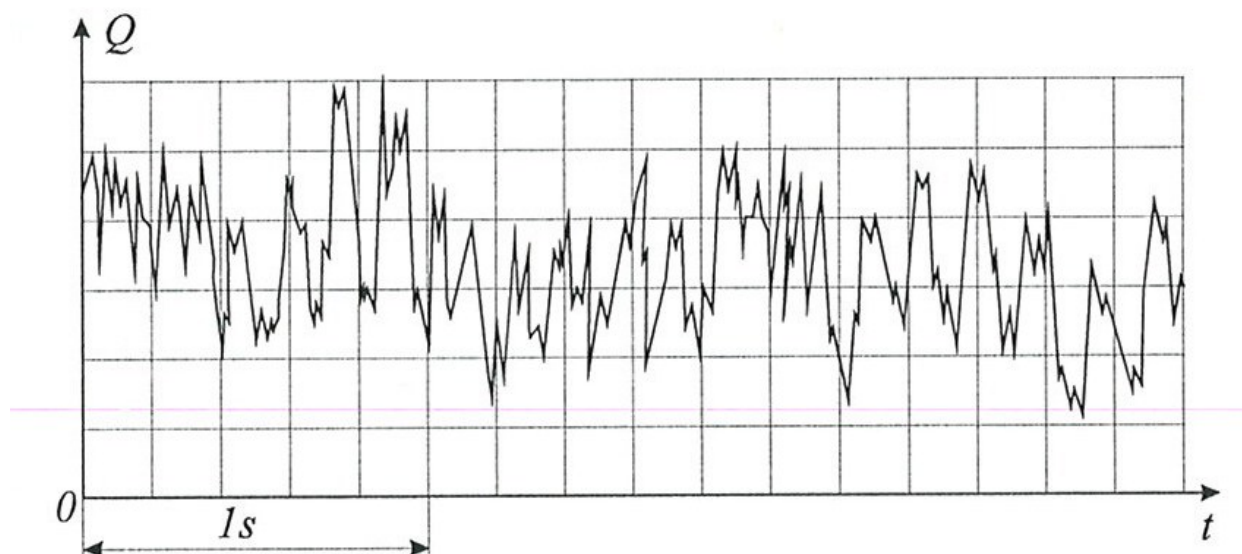
Elektrolučne peći su jedni od najkласičnijih primjera uzročnika brzih kolebanja struja. S obzirom na materijal koji obrađuju elektrolučne peći ovisi koliki će biti intenzitet smetnji, pa tako elektrolučne peći koje se koriste za taljenje i rafiniranje čelika imaju najnemirniji pogon. Kod elektrolučnih peći se izmjenjuju procesi taljenja i rafiniranja. Rad elektrolučnih peći je najnemirniji u početnoj fazi taljenja, dok u fazi rafiniranja za rad elektrolučne peći su potrebne manje snage pa je i sami proces mirniji. Kada elektrolučne peći rade nemirno impedancija elektrolučne peći varira između stanja kratkog spoja i prekida električnog luka.

Iz karakteristika elektrolučne peći koja je prikazana na slici 3.1. može se vidjeti da struja koja je opterećena i koleba oko radne točke I_r u rasponu ΔI izaziva kolebanje jalove snage Q u velikom rasponu ΔQ . Upravo taj raspon ΔQ je znatno veći od raspona djelatne snage ΔP , a promjena napona u mreži reagira na promjenu jalove snage.



Slika 3.1. Pogonske karakteristike elektrolučne peći [1]

Iz svega do sada može se zaključiti da je najbitnija promjena jalove komponente snage, pa se sa tom komponentom počinje u svakom proračunu vezanom za kolebanje napona i struje mreže. Na slici 3.2. može se vidjeti kolebanje jalove snage u elektrolučnoj peći u fazi taljenja. Najviši vrhovi prikazani na slici 3.2. predstavljaju kratki spoj između elektroda dvije faze.



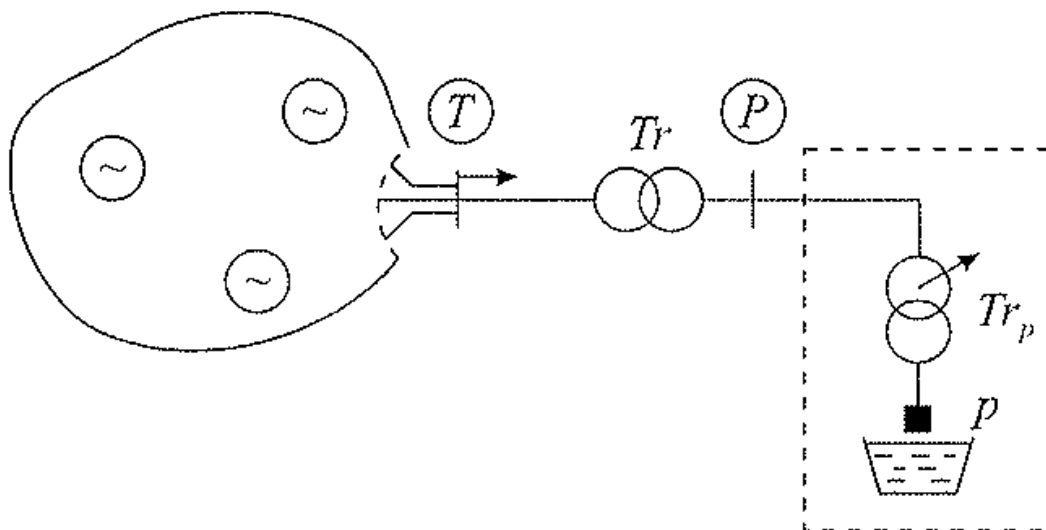
Slika 3.2. Tipična kolebanja jalove snage elektrolučne peći u fazi taljenja [1]

Sa Q_p označava se nazivna jalova snaga elektrolučne peći koja je približno jednaka nazivnoj djelatnoj snazi ($\cos \varphi \approx 0,7$), pa se može očekivati kolebanja jalove snage u fazi taljenja u granicama koje su dane izrazom 3.1.

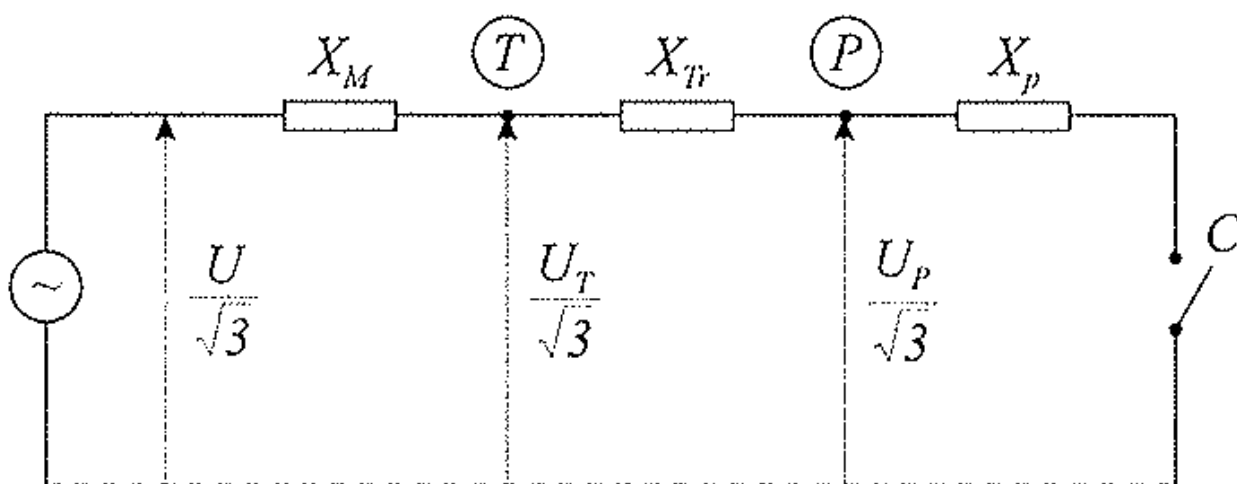
$$Q = Q_p(1 \pm 0,7) \quad (3.1.)$$

3.2. Izračunavanje kolebanja napona

Na slikama 3.3. i 3.4. prikazana je elektrolučna peć spojena u mreži i nadomjesna shema tog spoja. Elektrolučna peć označena je sa p , pripadajući regulacijski pećni transformator sa Tr_p , a njihova pripadajuća reaktancija sa X_p . Međutransformator koji električni dijeli elektrolučnu peć od ostalih potrošača označen je sa Tr . Prekidač C predstavlja simbolički prekidač, iz razloga što rad elektrolučne peći koleba između kratkog spoja i praznog hoda.



Slika 3.3. Elektrolučna peć priključena na mrežu [1]



Slika 3.4. Nadomjesna shema spoja prikazanog na slici 3.3. [1]

Pomoću početne snage trofaznog kratkog spoja S_k u čvoru T može se izračunati reaktancija mreže X_M pomoću izraza 2.11. U trenutku kada je prekidač C otvoren na slici 3.3. dolazi do prekida elektrolučne peći i u čvoru T vlada napon U. Kada je prekidač C zatvoren strujnim krugom teče jalova snaga koja se može izračunati sljedećim izrazom:

$$Q_{kp} = \frac{U^2}{X_M + X_{Tr} + X_p} = \frac{U^2}{\sum X} = S_{kp} \quad (3.2.)$$

To je ujedno i snaga kratkog spoja na vrhovima elektroda elektrolučne peći. U tom trenutku u čvoru T dolazi do kolebanja napona koje je jednako relativnom padu napona:

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_T = \frac{X_M}{X_M + X_{Tr} + X_p} = \frac{X_M}{\sum X} \quad (3.3.)$$

S pomoću izraza 2.11. i 3.2. može se zaključiti da je S_k proporcionalan sa X_M , a obrnuto proporcionalan sa $\sum X$.

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_T = \frac{S_{kp}}{S_{kT}} \quad (3.4.)$$

Pomoću izraza 3.4. ocjenjuje se rizik od kolebanja napona koji izaziva elektrolučna peć u čvoru u kojem su priključeni i ostali potrošači.

U sustavu prikazanome na slici 3.3. pretpostavimo da je na čvor P priključena elektrolučna peć trofazne snage 49,5MVA uz $\cos \varphi = 0,707$ (faza taljenja) uz bazni napon od 35kV.

Transformator Tr ima snagu 50MVA uz $e_k = 0,1$ i povezuje čvorove T i P. Snaga trofaznog kratkog spoja u čvoru T iznosi 1167MVA. Uz sve navedene pretpostavke analizirati će se kolebanje napona u čvorovima P i T koja su izazvana radom elektrolučne peći.

Reaktancija mreže gledano iz čvora T iznosi:

$$X_{MT} = \frac{U^2}{S_{kT}} = \frac{35^2}{1167} = 1,05\Omega$$

Reaktancija transformatora iznosi:

$$X_{Tr} = \frac{e_k \cdot U^2}{S} = \frac{0,1 \cdot 35^2}{50} = 2,45\Omega$$

Reaktancija mreže gledano iz čvora P iznosi:

$$X_{MP} = X_{MT} + X_{Tr} = 1,05 + 2,45 = 3,5\Omega$$

Snaga kratkog spoja u čvoru P iznosi:

$$S_{kp} = \frac{U^2}{X_{MP}} = \frac{35^2}{3,5} = 350 MVA$$

Impedancija peći iznosi:

$$|Z_p| = |R + jX_p| = \sqrt{R^2 + X^2} = \frac{U^2}{S_p} = \frac{35^2}{49,5} = 24,75 \Omega$$

Uz $\cos \varphi = 0,707$ R će biti jednak X_p :

$$R_p = X_p = \frac{Z_p}{\sqrt{2}} = \frac{24,75}{\sqrt{2}} = 17,5 \Omega$$

Gledano od vrha elektroda elektrolučne peći:

$$\sum X = X_{MT} + X_{TR} + X_p = 1,05 + 2,45 + 17,5 = 21 \Omega$$

Pripadna snaga kratkog spoja iznosi:

$$S_{kp} = \frac{U^2}{\sum X} = \frac{35^2}{21} = 58,3 MVA$$

Sada se može izračunati relativno kolebanje napona pomoću izraza 3.4.

Za čvor T:

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_T = \frac{S_{kp}}{S_{kT}} = \frac{58,3}{1167} = 0,05$$

Za čvor P:

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_P = \frac{S_{kp}}{S_{kP}} = \frac{58,3}{350} = 0,167$$

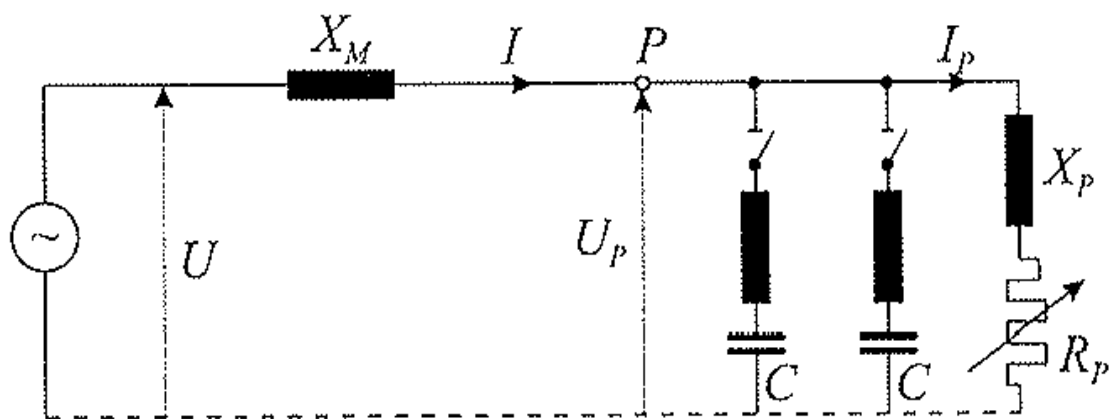
Zaključak je da se povremeno može očekivati kolebanje napona u čvoru T od 5%, a u čvoru P kolebanje napona će iznositi 16,7%.

3.3. Suzbijanje kolebanja napona u mreži

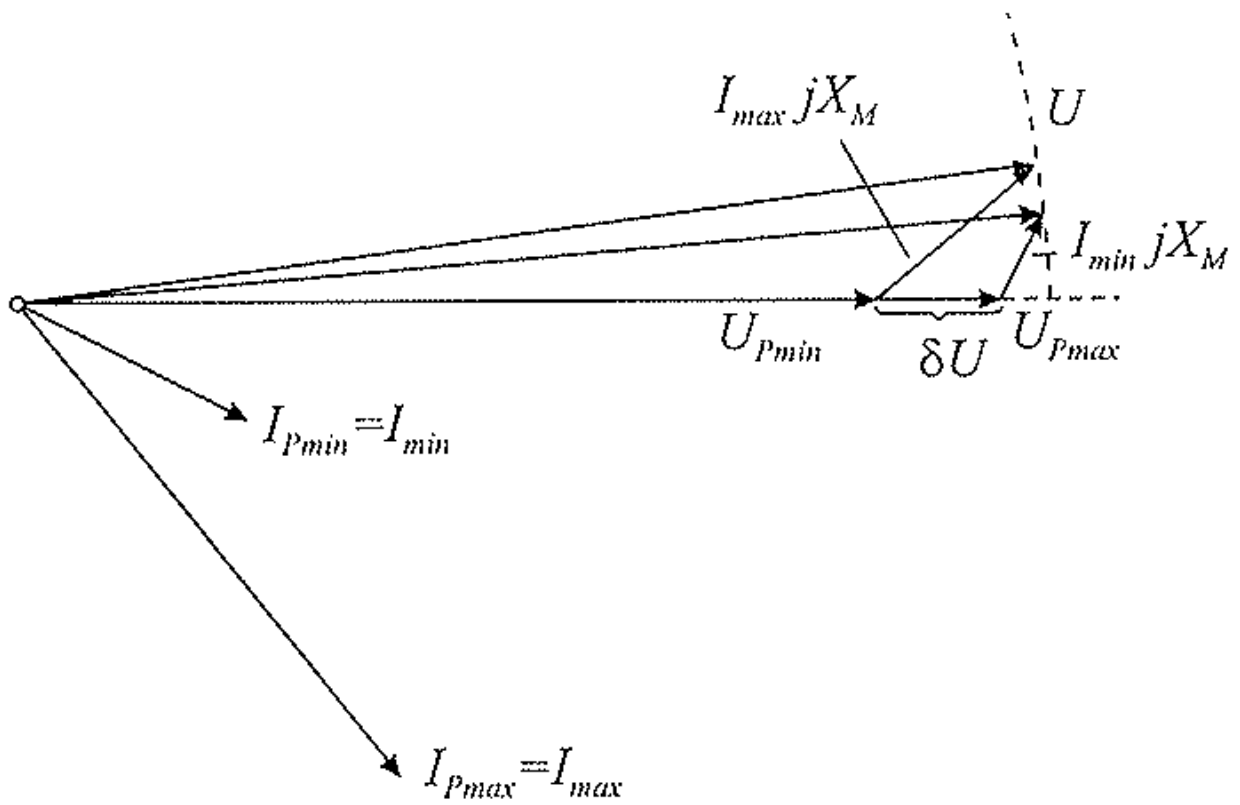
U ovom poglavlju navodi se nekoliko načina kako se može uspješno suzbijati kolebanje napona. Do sad je prikazano kako na kolebanje napona utječe snaga kratkog spoja u čvoru u kojem je priključena elektrolučna peć, pa tako se može doći do prve metode, a to je povećanje snage kratkog spoja. Ta metoda zahtjeva dosta velike financijske troškove, pa je realnije da do istog učinka se pokuša doći na način da se elektrolučnu peć proba spojiti putem međutransformatora na veću naponsku razinu(npr. 110kV).

Na primjer, dvije elektrolučne peći snage 10MW i 12MW su priključene na 35kV sabirnice i mogu se uočiti flikeri koji nepoželjno utječu na rad uređaja automatske regulacije. Međutim, ukoliko se iskoristi transformator snage 30MVA 110/35kV i pomoću njega elektrolučne peći se spoje direktno na 110kV sabirnice uspješno ćemo riješiti problem flikera.

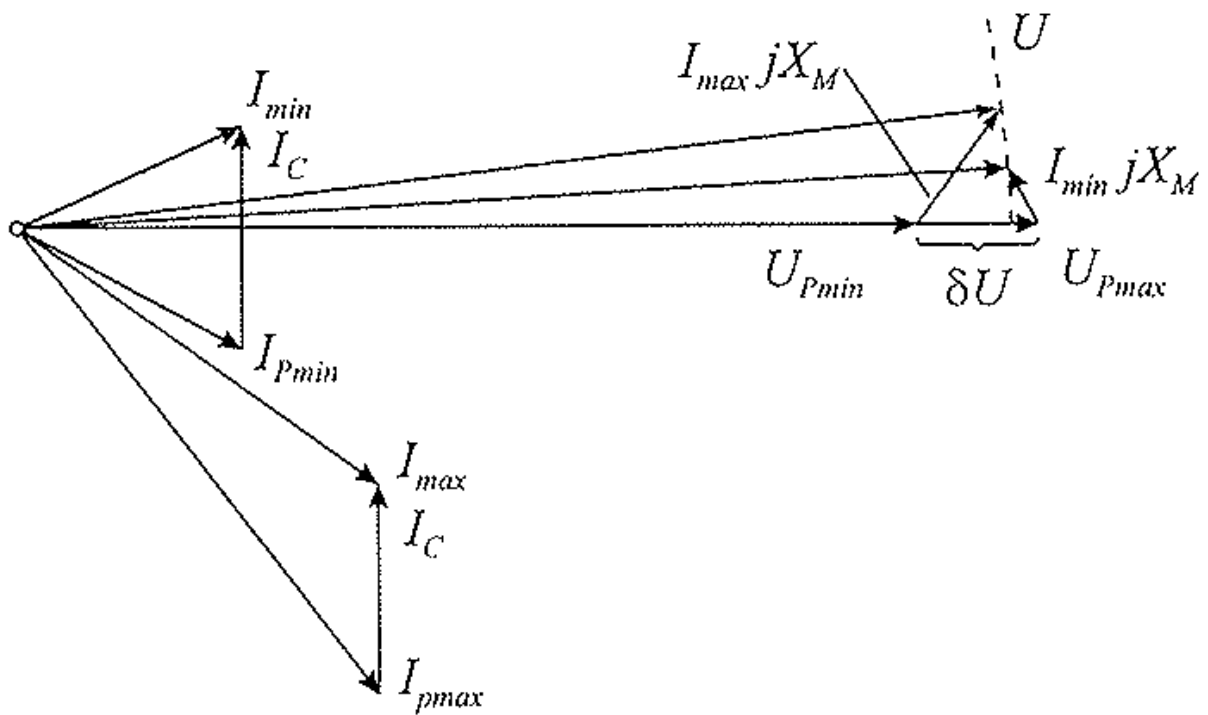
Zna se da kondenzatorske baterije služe za kompenzaciju jalove snage pa se mogu koristiti kao rješenje ovog problema. Međutim sama kondenzatorska baterija umanjuje jalovu snagu koju elektrolučna peć uzima iz mreže, ali ne umanjuje kolebanje napona, pa su za to potrebni dodatni brzi regulacijski uređaji. Da se kolebanje napona(δU) ne smanjuje može se vidjeti na slikama 3.6. i 3.7.



Slika 3.5. Ekvivalent sheme djelovanja kondenzatorske baterije uz elektrolučnu peć [1]

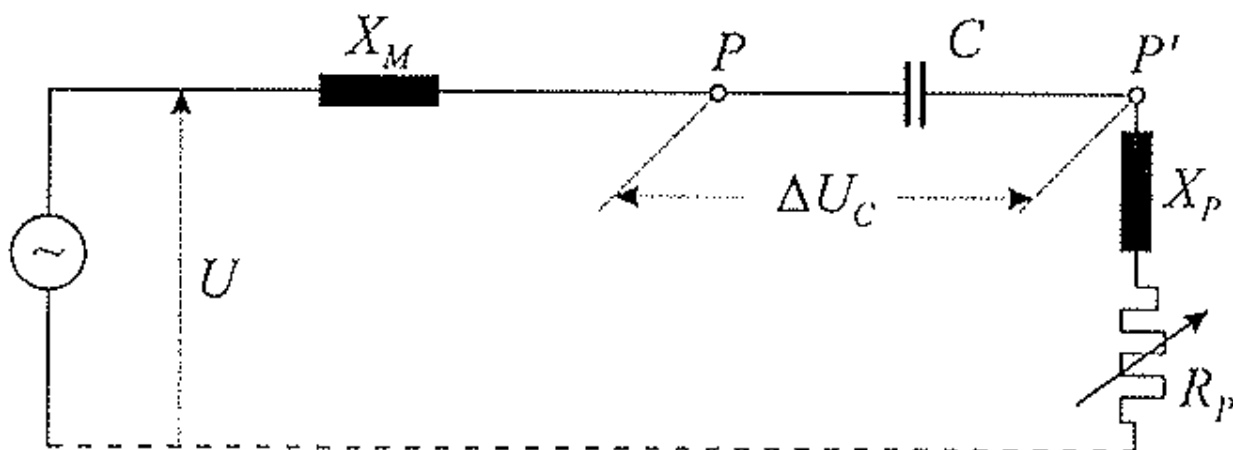


Slika 3.6. Vektorski dijagram bez kondenzatorske baterije uz kolebanje struje opterećenja [1]

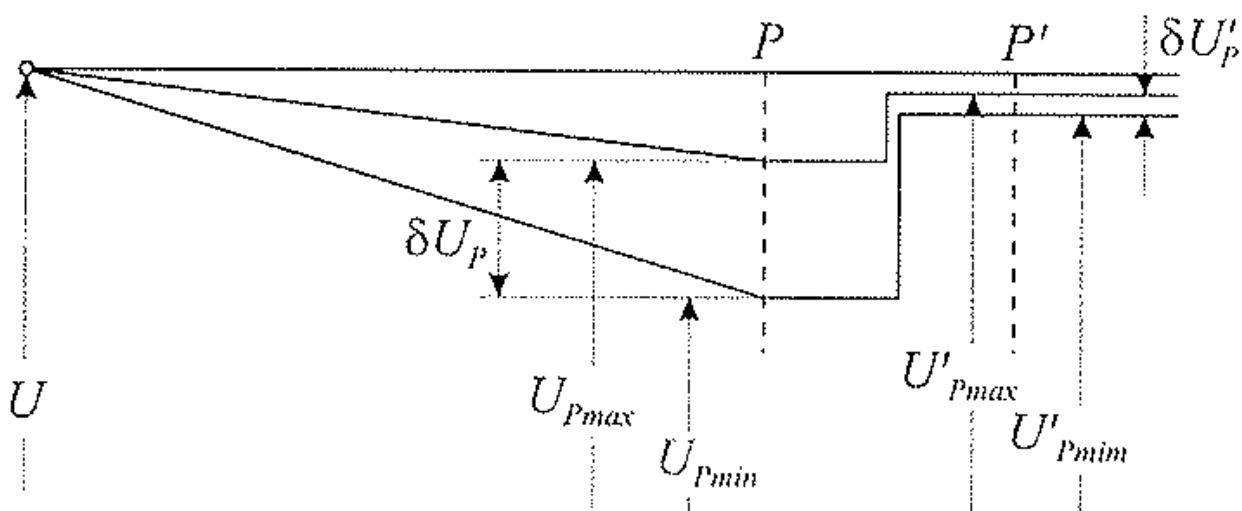


Slika 3.7. Vektorski dijagram kod uključene kondenzatorske baterije [1]

Ukoliko opterećenja imaju induktivne komponente, kao sredstvo za poboljšanje kvalitete napona može se koristiti serijski kondenzator. Sa serijskim kondenzatorom postižu se bolje naponske prilike i smanjuju se brza kolebanja napona, ali tek nakon serijskog kondenzatora. Što znači da postoje pozitivna djelovanja serijskog kondenzatora na elektrolyučnu peć, ali smetnje u preostalom djelu mreže ostaju iste.

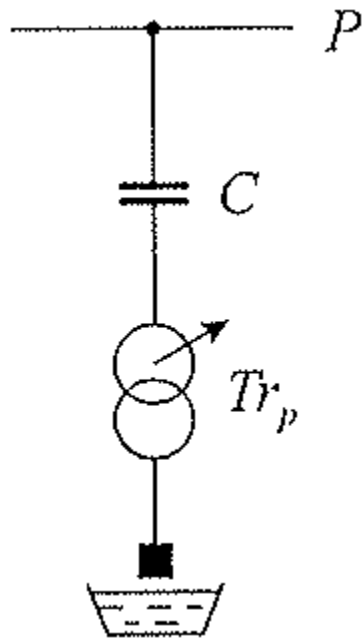


Slika 3.8. Nadomjesna shema priključka elektrolyučne peći preko serijskog kondenzatora [1]

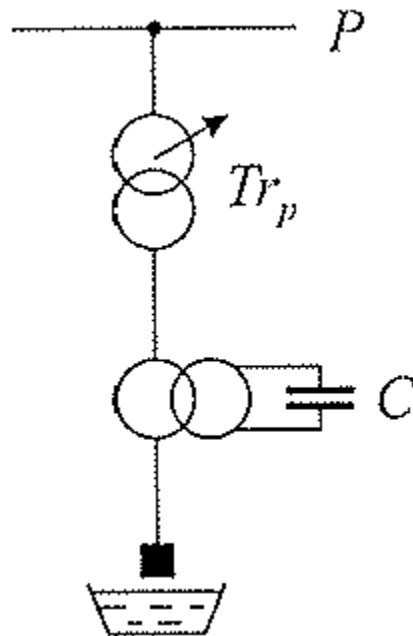


Slika 3.9. Naponske prilike spoja prikazanog na slici 3.8. [1]

Serijski kondenzator se može spojiti ispred i iza pećnog transformatora. Ukoliko se spaja iza pećnog transformatora ne može ga se spojiti direktno u strujni krug zbog vrlo jakih struja pa ga se spaja preko dodatnog transformatora koji se ponaša kao strujni transformator.

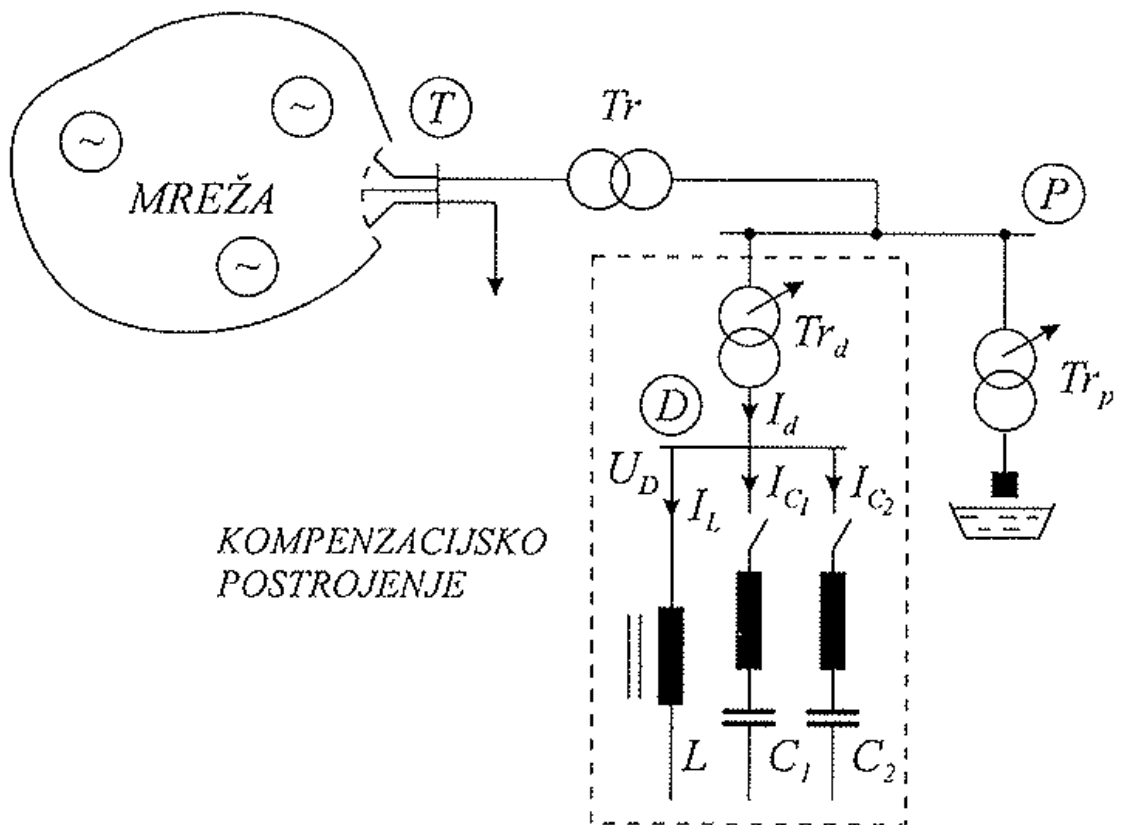


Slika 3.10. Spajanje serijskog kondenzatora ispred pećnog transformatora [1]

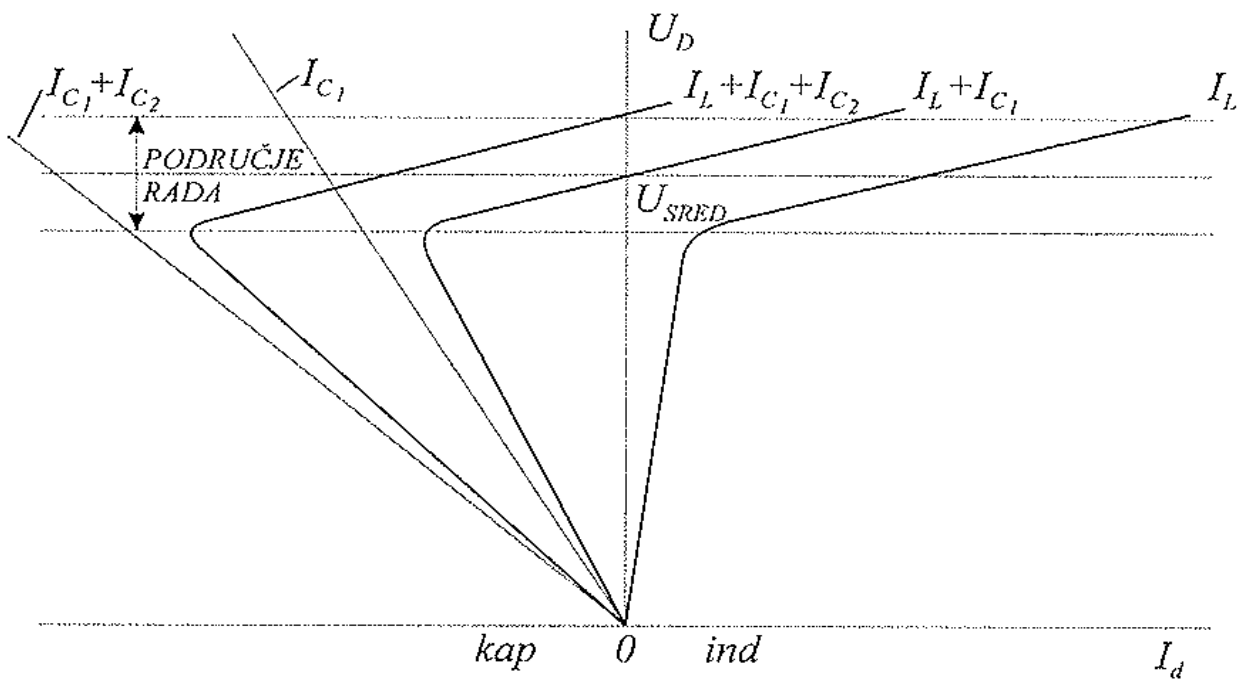


Slika 3.11. Spajanje serijskog kondenzatora iza pećnog transformatora [1]

Sljedeći spoj koji se može koristiti u suzbijanju kolebanja napona je paralelno spojena zasićena prigušnica u zajedničkom djelovanju sa kondenzatorskom baterijom. Takav spoj ima svojstvo spontanog regulacijskog reagiranja.



Slika 3.12. Shema statičko kompenzacijskog postrojenja sa zasićenom prigušnicom [1]



Slika 3.13. U-I karakteristika spoja prikazanog na slici 3.12. [1]

Tr_d dodatni regulacijski transformator

I_d struja kompenzacijskog uređaja

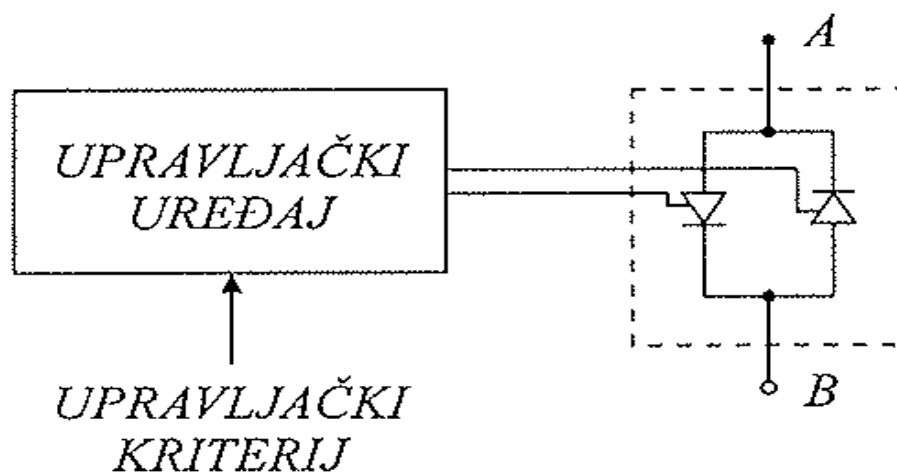
U_D napon na kompenzacijskom uređaju

I_L struja zasićene prigušnice

I_{C_1}, I_{C_2} struja pojedinih dijelova kondenzatorske baterije

Ovakva mreža je induktivno opterećena, pa da ne bi došlo do dodatnog opterećenja induktivnom strujom prigušnice L, dodaju se kondenzatorske baterije C_1 i C_2 . Napon na sabirnicama P i D raste i tako raste induktivna struja zasićene prigušnice. Upravo ta struja izaziva dodatni pad napona na reaktanciji mreže i tako se djelomično kompenzira porast napona. Priključenjem kondenzatorskih baterija U-I karakteristika sa slike 3.13. se pomiče u kapacitativno područje. Ovo rješenje također ima svoje mane kao što je na primjer struja koju uzima zasićena prigušnica. Ta struja je izobličena, pa ovakvo postrojenje postaje izvor viših harmonika struje. U ovakvom postrojenju javljaju se visoki gubici i jako zujanje prigušnice uslijed zasićenosti željezne jezgre. Kao glavne prednosti ovakvog načina rješavanja kolebanja napona može se reći da su jednostavnost (nema dodatnog regulacijskog uređaja) i brzi odziv na promjene napona. Ovakvo postrojenje može se izvesti na više načina.

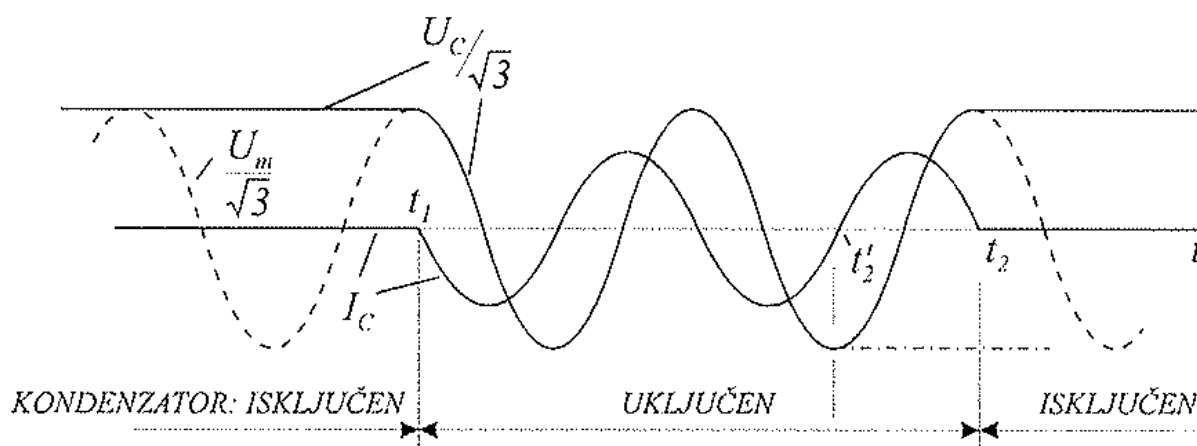
Mogu se koristiti i paralelni kondenzatori sa tiristorskim uključivanjem, koji se izvode od više kondenzatorskih baterija manjeg kapaciteta. Tiristorski prekidač prikazan na slici 3.14. funkcioniše na način da ukoliko je tiristor u vodljivom stanju između A i B nema otpora i prekidač je uključen. Dok u slučaju kada upravljački impuls izostane između A i B otpor postaje beskonačno velik i prekidač je isključen.



Slika 3.14. Tiristorski prekidač [1]

Kondenzatorsku bateriju mora se priključiti preko dodatnog transformatora, jer je priključni napon peći puno veći od napona tiristorskog prekidača. Ukoliko se spoji nekoliko tiristora u seriju dobit će se na porastu napona tiristorskog prekidača.

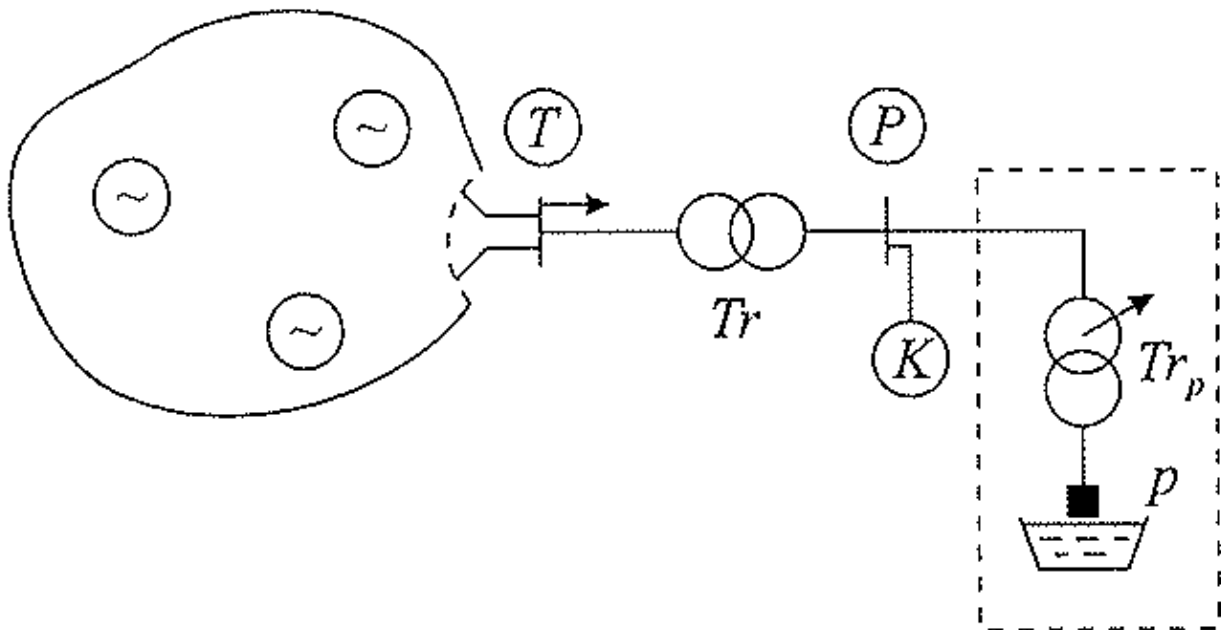
Sa tiristorskim uključivanjem i isključivanjem smanjuju se strujni udari i sklopni prenaponi koji izazivaju klasični prekidači. Na slici 3.15. prikazani su napon i struja u fazi isključivanja i uključivanja kondenzatora pomoću tiristorskih prekidača. Isključena baterija je trajno nabijena na najviši napon mreže ($\frac{\sqrt{2}U_m}{\sqrt{3}}$), a u trenutku t_1 se vrši uključivanje jer se u tom trenutku taj napon poklapa sa naponom mreže. Na istina način se odabire i trenutak isključivanja(t_2) kako bi kondenzator ostao nabijen na isti napon kao i prije isključivanja. Trenutak t_2' označava trenutak kada je također moguće izvršiti isključivanje, ali u tom slučaju kondenzator ostaje nabijen na napon suprotnog polariteta.



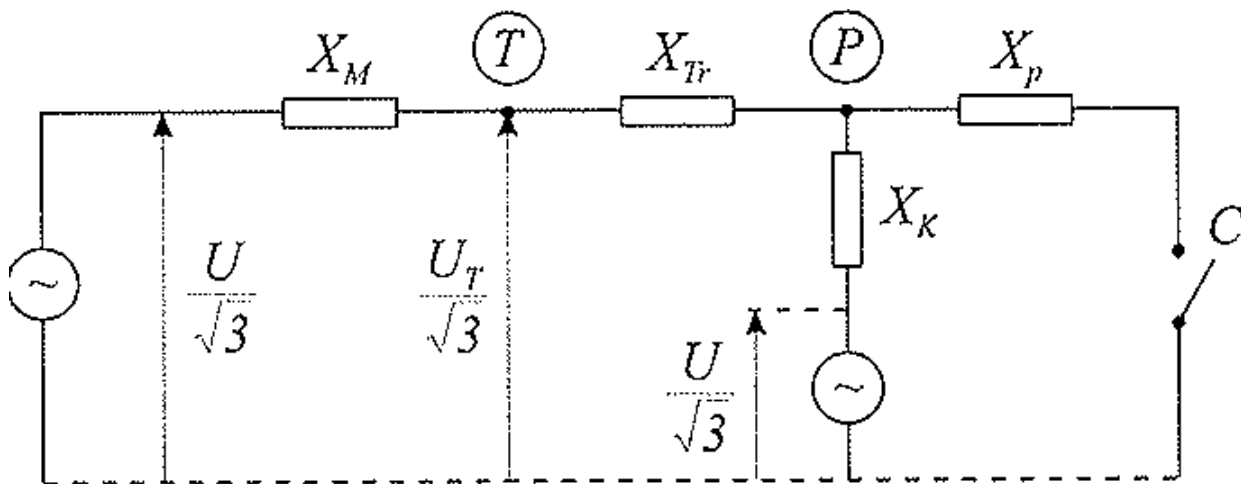
Slika 3.15. Napon i struja kondenzatorske baterije pri uključivanju i isključivanju tiristorskog prekidača [1]

Ovaj sklop ima više kondenzatorskih baterija, to se može izbjeći pomoću prigušnica s tiristorskim uključanjem. U takvom sklopu uključivanje i isključivanje se vrši na način da zbroj jalove snage peći i prigušnice u svakom trenu budu približno jednaki. Prigušnica se uključuje i isključuje onda kada napon ima najvišu vrijednost, odnosno kada je struja jednaka nuli, i na taj način se izbjegavaju opasnosti od unutarnjih prenapona.

Još jedna mogućnost za suzbijanje kolebanja napona je sinkroni kompenzator koji se spaja na sabirnice pećnog transformatora, i na taj način se povećava snaga kratkog spoja.



Slika 3.16. Mreža s priključenim sinkronim kompenzatorom u čvoru P [1]



Slika 3.17. Nadomjesna shema spoja prikazanog na slici 3.16. [1]

Sinkroni kompenzator se može prikazati kao idealni generator napona U koji je spojen u seriji sa početnom reaktancijom kompenzatora X_K (slika 3.17.), onda se može izraz 3.3. prilagoditi novom stanju i dobije se kolebanje napona u čvoru T prema izrazu:

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_T = \frac{X_M}{(X_M + X_{Tr}) \cdot \left(1 + \frac{X_p}{X_K}\right) + X_p} \quad (3.5.)$$

Izraz 3.5. vrijedi samo kod konstantne uzbude. Najveće mane sinkronog kompenzatora su te što ne može regulirati svaku fazu odvojeno, sporo reagiranje na regulacijske zahtjeve(od 5 do čak 100 perioda), visoka cijena i složeni pogon(buka, hlađenje, podmazivanje, itd.).

3.4. Posljedice kolebanja napona u mreži

Može se zaključiti da brze promjene napona (periodičnost od 0,5 do 25Hz) kod određene kategorije trošila izaziva smetnje ali ne pretjerano velike. Najozbiljnije smetnje mogu se primijetiti kod kolebanja napona kod regulacijskih uređaja, ponajviše kod elektroničkih, i kod elektromotora.

Brza kolebanja napona u mreži najlakše se mogu uočiti u vidu treptaja rasvjete ili tzv. flikera. Takve pojave su uočljive ljudskim okom koje je najosjetljivije na flikere frekvencije 10Hz, dok je manje osjetljivo na brža ili sporija kolebanja iste amplitude. Okom se mogu zamijetiti flikeri koji imaju kolebanja napona od 0,25% do 0,3%.

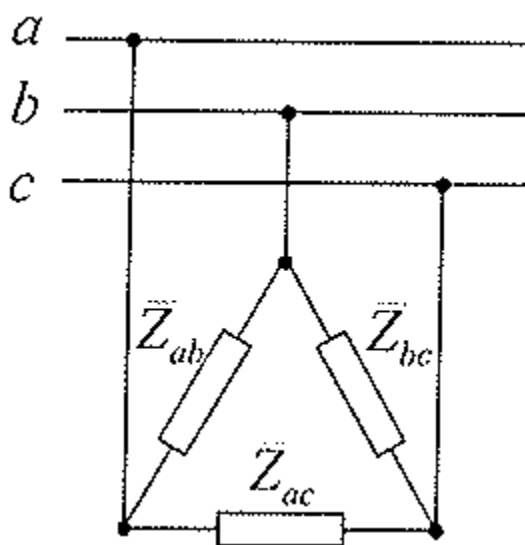
4. NESIMETRIJE STRUJE I NAPONA

U ovom poglavlju biti će obrađene nesimetrije koje se pojavljuju u normalnom pogonu. Nesimetrični elementi mreže su kabeli, transformatori i nadzemni vodovi.

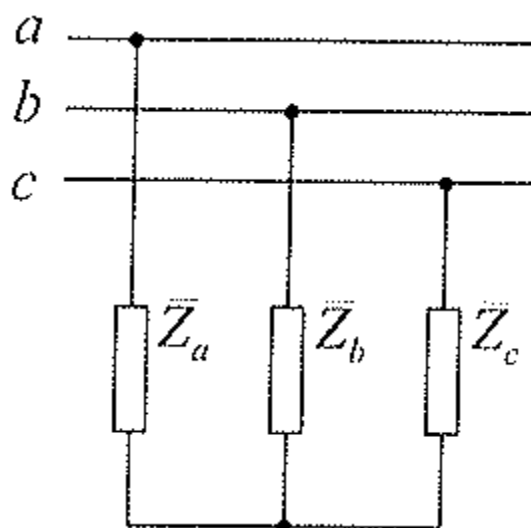
Nadzemni vodovi spadaju u nesimetrične elemente zbog nejednakih razmaka među vodičima i nesimetričnog položaja zaštitne užadi i zemlje prema faznim vodičima. Kako bi se to izbjeglo vodiči u vodovima se prepliću. Jednožilni kabeli kojima su tri faze položene u jednoj ravnini imaju nesimetrične uzdužne reaktancije. Međutim, ukoliko se faze polože u trokut ili se faze prepletu onda se uspijeva izbjeći nesimetrija.

4.1. Proračunavanje nesimetrije uslijed nesimetričnih trošila

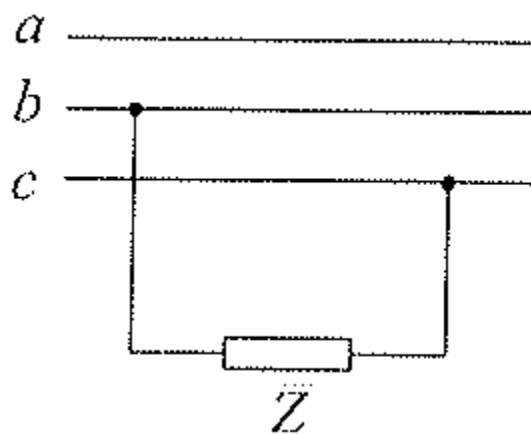
Počinje se od pretpostavke da je mreža simetrična. Na takvu mrežu priključuju se nesimetrična trošila.



Slika 4.1. Nesimetrično trošilo spojeno u trokut [1]



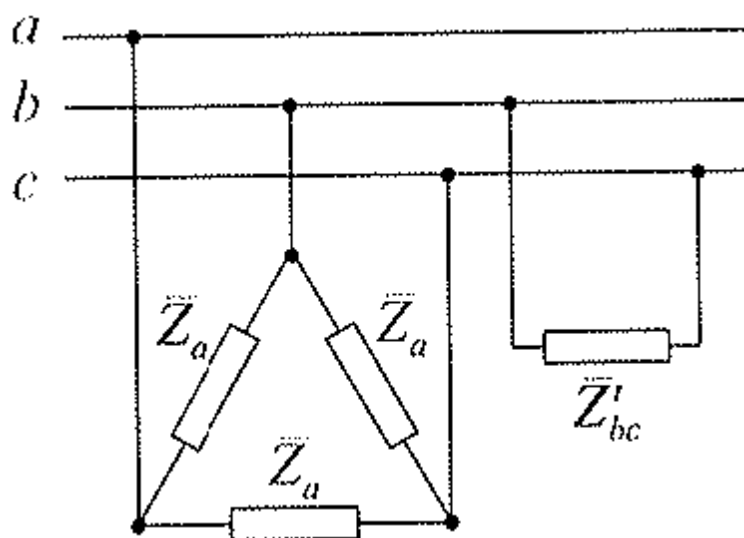
Slika 4.2. Nesimetrično trošilo spojeno u zvijezdu [1]



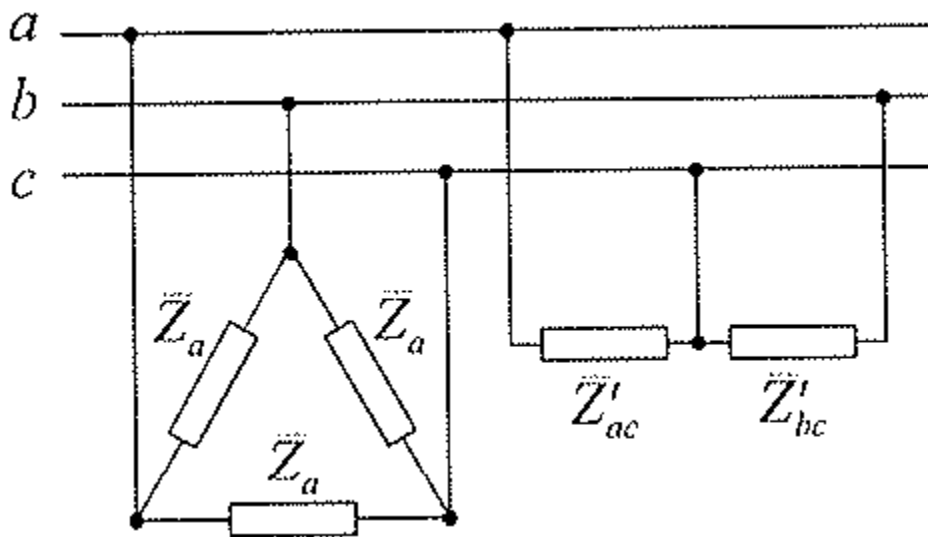
Slika 4.3. Jednofazno nesimetrično trošilo priključeno međufazno [1]

Kod nesimetričnih trošila koja su priključena na srednji ili visoki napon ne koriste se povratni nulvod i samim time ne izaziva pojavu nulte komponente struje.

Nesimetrična trošila prikazana na slikama 4.1. i 4.2. mogu se prikazati pomoću simetričnih i nesimetričnih trošila.



Slika 4.4. Opće nesimetrično trošilo prikazano pomoću jednog simetričnog trofaznog i jednog nesimetričnog trošila [1]



Slika 4.5. Opće nesimetrično trošilo prikazano pomoću jednog simetričnog i dva nesimetrična trošila [1]

Kod analiziranja ovakvih mreža izuzimaju se simetrična trošila i analizira se samo nesimetrični dio trošila i to pomoću snaga:

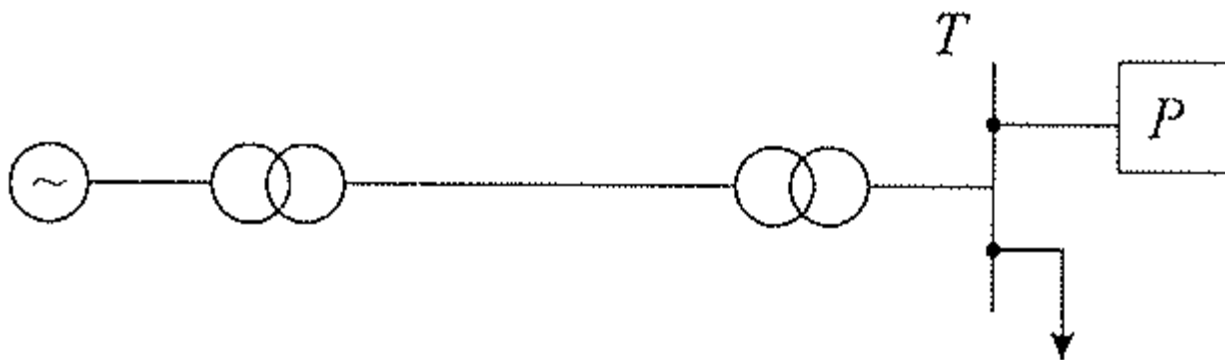
$$\bar{S}_a = \bar{S}_{ab}$$

$$\bar{S}'_{ac} = \bar{S}_{ac} - \bar{S}_{ab} \quad (4.1.)$$

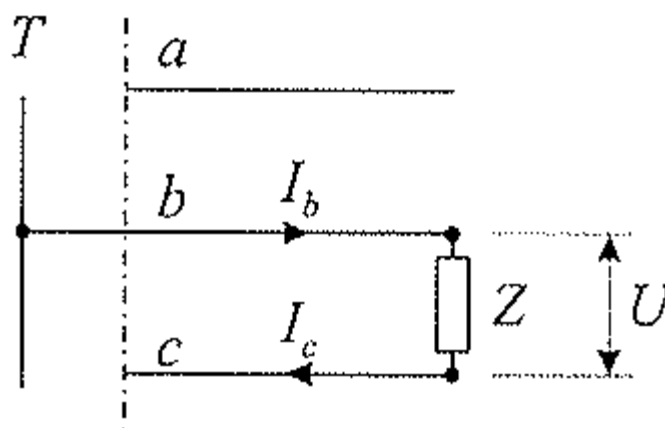
$$\bar{S}'_{ab} = \bar{S}_{bc} - \bar{S}_{ab}$$

U izrazima 4.1. sa lijeve strane su snage ekvivalenata prikazanih na slici 4.5., a sa desne strane snage originala prikazanih na slici 4.1. Ovi izrazi vrijede samo ukoliko je snaga \bar{S}_{ab} najmanje od tri međufazne snage.

Na slici 4.6. prikazan je jednostavni prijenosni sustav na koji je osim simetričnih potrošača spojeno i međufazno nesimetrično trošilo P snage \bar{S} .



Slika 4.6. Električna mreža svedena na jednostavni prijenosni sustav [1]



Slika 4.7. Detaljni prikaz nesimetričnog međufaznog trošila P prikazanog na slici 4.6. [1]

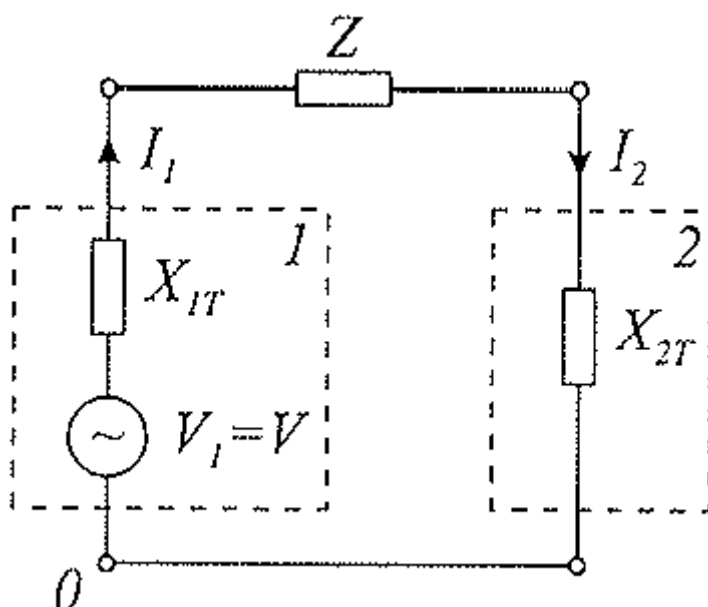
Kod proračuna za trošilo P ograniči se na proračun apsolutnih vrijednosti, pa se dolazi do prvog izraza:

$$S = \frac{U^2}{Z} \quad (4.2.)$$

Struje kroz faze b i c su jednake i mogu se računati prema izrazu:

$$I_b = I_c = \frac{U}{Z} = \frac{S}{U} \quad (4.3.)$$

Ukoliko se zanemare ostali potrošači i ostale poprečne grane, te djelatni otpor elemenata mreže, ovakva mreža se može svesti na direktni (slika 4.8. okvir 1) i inverzni (slika 4.8. okvir 2) sustav.



Slika 4.8. Direktni(okvir 1) i inverzni(okvir 2) sustav potrošača P [1]

Nadomjesnu direktnu i inverznu reaktanciju mreže promatranu iz čvora T može se izjednačiti i izračunati pomoću poznate snage trolpnog kratkog spoja u čvoru T prema izrazu:

$$X_{1T} = X_{2T} = \frac{U^2}{S_{kT}} \quad (4.4.)$$

Reaktancija trošila Z je gotovo uvijek znatno veća od reaktancija X_{1T} i X_{2T} pa ih se može zanemariti i onda izračunati direktnu i inverznu komponentu struje trošila Z:

$$I_1 = I_2 = \frac{V}{Z} \doteq \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (4.5.)$$

Ukoliko se ne može zanemariti reaktancije X_{1T} i X_{2T} onda se u izraz 4.5. umjesto Z uvrsti apsolutna vrijednost ukupne impedancije strujnog kruga, koja se može izračunati pomoću izraza:

$$Z = |jX_{1T} + jX_{2T} + \bar{Z}| \quad (4.6.)$$

Nesimetričnost struje može se izraziti omjerom inverzne i direktne(ili ukupne) komponente struje koja teče uslijed svih potrošača u mreži, izrazom:

$$v_I = \frac{I_2}{I_1} \doteq \frac{I_2}{I} \quad (4.7.)$$

Struja I_2 izaziva pad napona ΔU_{2T} na inverznoj reaktanciji mreže X_{2T} koji je jednak inverznom naponu U_2 u čvoru T.

$$\Delta U_{2T} = U_2 = \sqrt{3} \cdot I_2 \cdot X_{2T} = \frac{S \cdot U}{S_{kT}} \quad (4.8.)$$

Nesimetričnost napona izražava se pomoću omjera inverzne i direktne (ili ukupne) komponente napona:

$$v_U = \frac{U_2}{U_1} \doteq \frac{U_2}{U} = \frac{S}{S_{KZT}} \quad (4.9.)$$

Proračun nesimetrije struje i napona se može napraviti prema primjeru prikazanom na slici 4.6. uz pretpostavke da je na čvoru T 110kV mreže priključeno nesimetrično trošilo međufaznih snaga:

$$S_{ab} = 8MVA \quad \cos \varphi = 0,92$$

$$S_{bc} = 12MVA \quad \cos \varphi = 0,92$$

$$S_{ac} = 11,5MVA \quad \cos \varphi = 0,92$$

Početna snaga trolejnog kratkog spoja u čvoru T u noćnom režimu rada iznosi:

$$S_{kT}''' = 1150MVA$$

Trajna snaga kratkog spoja iznosi:

$$S_{kT} = 1050MVA$$

Angažirana instalirana snaga svih elektrana u pogonu iznosi 220MVA.

Prvo će se pomoću izraza 4.1. razložiti trošilo:

$$S_a = S_{ab} = 8MVA$$

$$S'_{ac} = S_{ac} - S_{ab} = 11,5 - 8 = 3,5MVA$$

$$S'_{bc} = S_{bc} - S_{ab} = 12 - 8 = 4MVA$$

S'_{ac} će se zanemariti i računati će se sa S'_{bc} .

$$\bar{S}'_{bc} + \bar{S}'_{ac} = S'_{bc} + S'_{ac} \angle 120^\circ = 3,775MVA$$

Zanemarivanjem S'_{ac} nastaje greška od 5%, što je i dalje u granicama točnosti.

Z se računa prema izrazu:

$$Z = \frac{U^2}{S'_{bc}} = \frac{110^2}{4} = 3025\Omega$$

Zanemarivanjem reaktancija X_{1T} i X_{2T} može se koristiti izraz 4.5.:

$$I_2 = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{4}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,021kA$$

Pomoću angažirane instalirane snage elektrana uključenih u sustav može se dobiti nazivna struja:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{2200}{\sqrt{3} \cdot 110} = 11,547 \text{ kA}$$

Sada se može izračunati nesimetrija struje:

$$v_I = \frac{I_2}{I} = \frac{0,021}{11,547} = 0,001819$$

što je 0,1819%

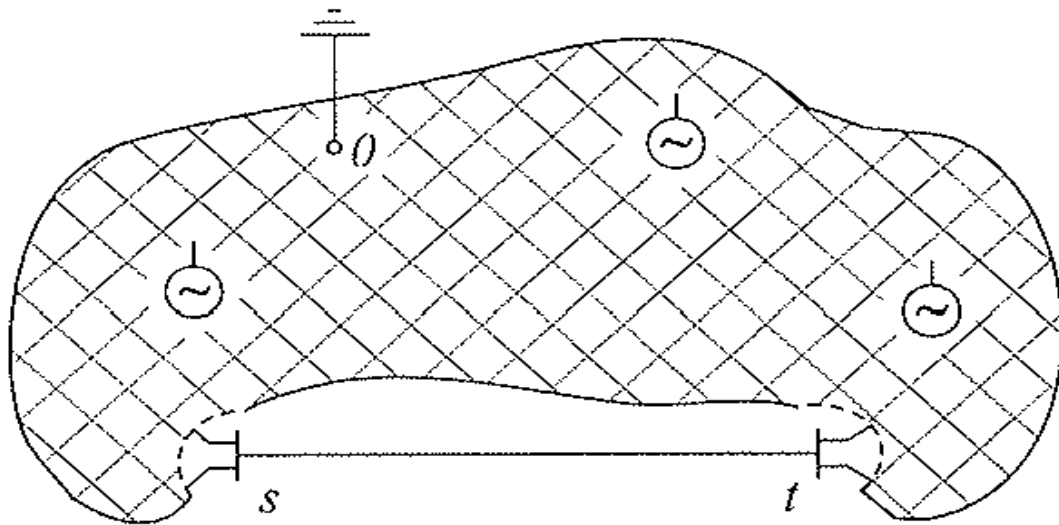
Nesimetrija napona iznosi:

$$v_U = \frac{S}{S_{kT}} = \frac{4}{1050} = 0,0038$$

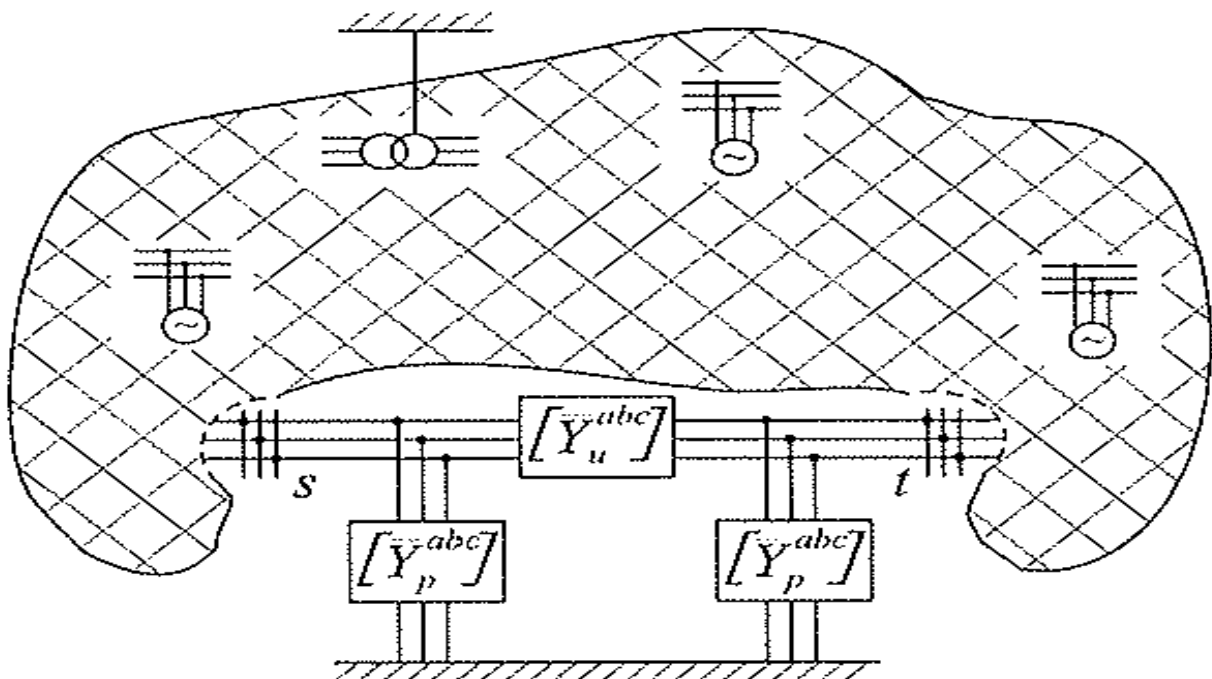
što je 0,38%.

4.2. Nesimetrija izazvana neprepletenim nadzemnim vodovima

U ovom poglavlju biti će prikazano kako se radi proračun za napon i struju u neprepletenom vodu.



Slika 4.9. Položaj nesimetričnog voda s-t u mreži [1]



Slika 4.10. Trofazno uključivanje nesimetričnog voda u mrežu [1]

Za uzdužnu matricu $[\bar{Y}_u^{abc}]$ prikazanu na slici 4.10. dalekovoda može se napisati izraz za čvor s:

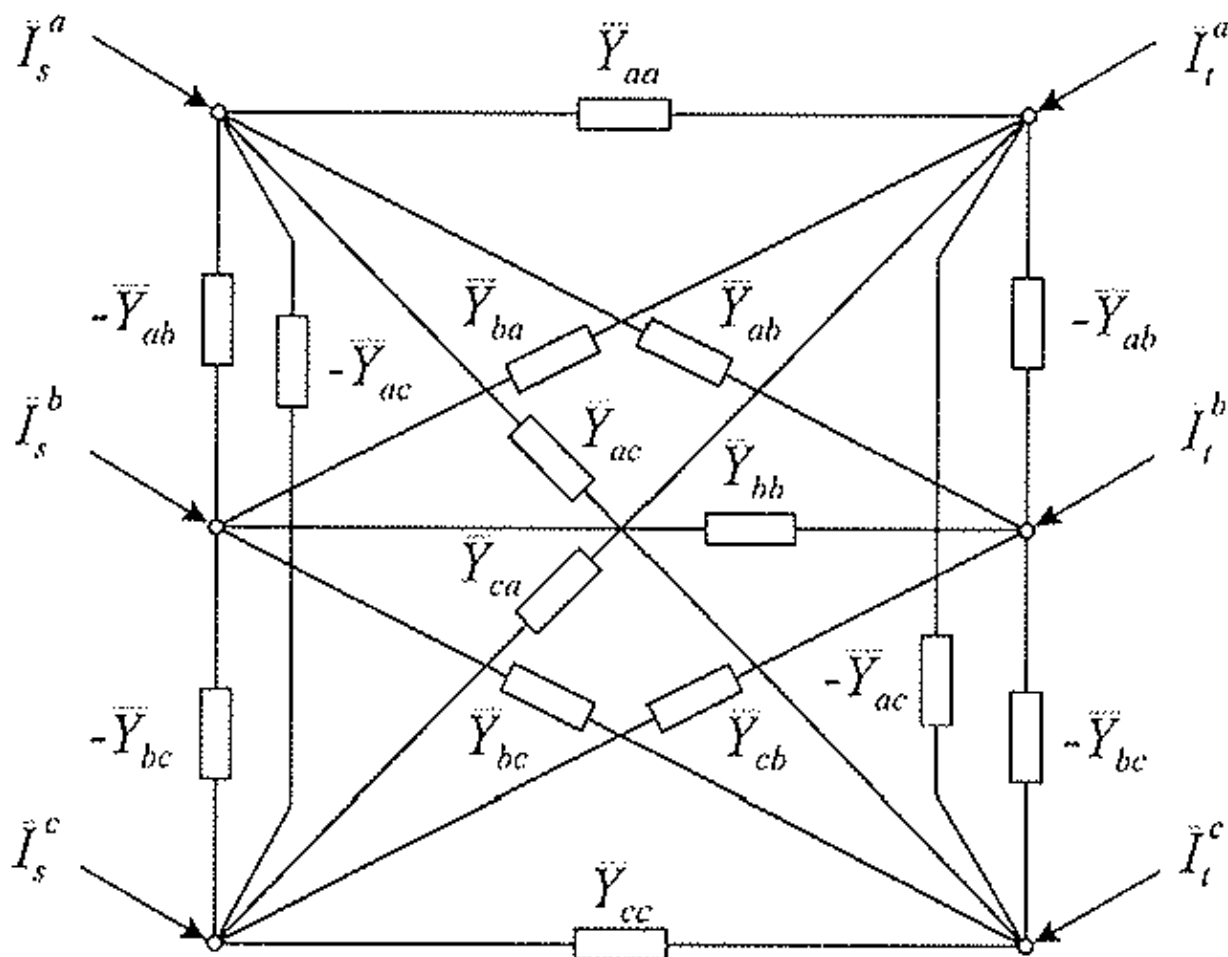
$$[\bar{I}_s^{abc}] = [\bar{Y}_u^{abc}] [\Delta\bar{V}^{abc}] = [\bar{Y}_u^{abc}] ([\bar{V}_s^{abc}] - [\bar{V}_t^{abc}]) \quad (4.10.)$$

i za čvor t:

$$[\bar{I}_t^{abc}] = -[\bar{Y}_u^{abc}] [\Delta\bar{V}^{abc}] = -[\bar{Y}_u^{abc}] ([\bar{V}_t^{abc}] - [\bar{V}_s^{abc}]) \quad (4.11.)$$

Sada se preko blok matrice mogu napisati jednačbe koje povezuju struje i napone(4.12.) i sliku sheme koja odgovara jednačbi(slika 4.11.).

$$\begin{bmatrix} [\bar{I}_s^{abc}] \\ [\bar{I}_t^{abc}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\bar{Y}_u^{abc}] & -[\bar{Y}_u^{abc}] \\ -[\bar{Y}_u^{abc}] & [\bar{Y}_u^{abc}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [\bar{V}_s^{abc}] \\ [\bar{V}_t^{abc}] \end{bmatrix} \quad (4.12.)$$



Slika 4.11. Prikaz fizikalne interpretacije uzdužne matrice voda $[\bar{Y}_u^{abc}]$ [1]

Admitancije grana u shemi prikazanoj na slici 4.11. određuje se na način da se prvo napiše jednažba struje iz matricne jednažbe 4.12.:

$$\bar{I}_s^a = \bar{Y}^{aa}\bar{V}_s^a + \bar{Y}^{ab}\bar{V}_s^b + \bar{Y}^{ac}\bar{V}_s^c - \bar{Y}^{aa}\bar{V}_t^a - \bar{Y}^{ab}\bar{V}_t^b - \bar{Y}^{ac}\bar{V}_t^c$$

te u tu jednažbu se uvrsti:

$$\bar{Y}_{aa} = \bar{Y}^{aa} + \bar{Y}^{ab} - \bar{Y}^{ab} + \bar{Y}^{ac} - \bar{Y}^{ac}$$

i nakon sređivanja se dobiju jednažbe za sve struje:

$$\bar{I}_s^a = \bar{Y}^{aa}(\bar{V}_s^a - \bar{V}_t^a) + \bar{Y}^{ab}(\bar{V}_s^a - \bar{V}_t^b) + \bar{Y}^{ac}(\bar{V}_s^a - \bar{V}_t^c) - \bar{Y}^{ab}(\bar{V}_s^a - \bar{V}_s^b) - \bar{Y}^{ac}(\bar{V}_s^a - \bar{V}_s^c) \quad (4.13.)$$

$$\bar{I}_s^b = \bar{Y}^{bb}(\bar{V}_s^b - \bar{V}_t^b) + \bar{Y}^{bc}(\bar{V}_s^b - \bar{V}_t^c) + \bar{Y}^{ba}(\bar{V}_s^b - \bar{V}_t^a) - \bar{Y}^{bc}(\bar{V}_s^b - \bar{V}_s^c) - \bar{Y}^{ba}(\bar{V}_s^b - \bar{V}_s^a) \quad (4.14.)$$

$$\bar{I}_s^c = \bar{Y}^{cc}(\bar{V}_s^c - \bar{V}_t^c) + \bar{Y}^{ca}(\bar{V}_s^c - \bar{V}_t^a) + \bar{Y}^{cb}(\bar{V}_s^c - \bar{V}_t^b) - \bar{Y}^{ca}(\bar{V}_s^c - \bar{V}_s^a) - \bar{Y}^{cb}(\bar{V}_s^c - \bar{V}_s^b) \quad (4.15.)$$

$$\bar{I}_t^a = \bar{Y}^{aa}(\bar{V}_t^a - \bar{V}_s^a) + \bar{Y}^{ab}(\bar{V}_t^a - \bar{V}_s^b) + \bar{Y}^{ac}(\bar{V}_t^a - \bar{V}_s^c) - \bar{Y}^{ab}(\bar{V}_t^a - \bar{V}_t^b) - \bar{Y}^{ac}(\bar{V}_t^a - \bar{V}_t^c) \quad (4.16.)$$

$$\bar{I}_t^b = \bar{Y}^{bb}(\bar{V}_t^b - \bar{V}_s^b) + \bar{Y}^{bc}(\bar{V}_t^b - \bar{V}_s^c) + \bar{Y}^{ba}(\bar{V}_t^b - \bar{V}_s^a) - \bar{Y}^{bc}(\bar{V}_t^b - \bar{V}_t^c) - \bar{Y}^{ba}(\bar{V}_t^b - \bar{V}_t^a) \quad (4.17.)$$

$$\bar{I}_t^c = \bar{Y}^{cc}(\bar{V}_t^c - \bar{V}_s^c) + \bar{Y}^{ca}(\bar{V}_t^c - \bar{V}_s^a) + \bar{Y}^{cb}(\bar{V}_t^c - \bar{V}_s^b) - \bar{Y}^{ca}(\bar{V}_t^c - \bar{V}_t^a) - \bar{Y}^{cb}(\bar{V}_t^c - \bar{V}_t^b) \quad (4.18.)$$

Kod trofaznog proračuna mreže pretpostavlja se da je mreža simetrična i da je mjesto nesimetrije vod s-t. Direktni sustav kod proračuna tokova snage i napona odgovara direktnom sustavu, dok kod inverznog sustava se pojavljuje problem određivanja sheme nesimetričnog trošila. U direktnom sustavu potrošači su zadani snagama, a naponi se moraju izračunati. Pod pretpostavkom da je inverzna impedancija ovog nesimetričnog trošila jednaka direktnoj može se izračunati inverzna impedancija trošila po prvoj aproksimaciji prema izrazu:

$$Z_{p1} = Z_{p2} = \frac{U_p^{(0)2}}{\bar{S}_p^*} \quad (4.19.)$$

gdje je $U^{(0)} = U_n$. Zatim se može primjeniti simetrična transformacija na matrice $[\bar{Y}_p^{abc}]$ i $[\bar{Y}_u^{abc}]$.

Za čvor s se može napisati izraz:

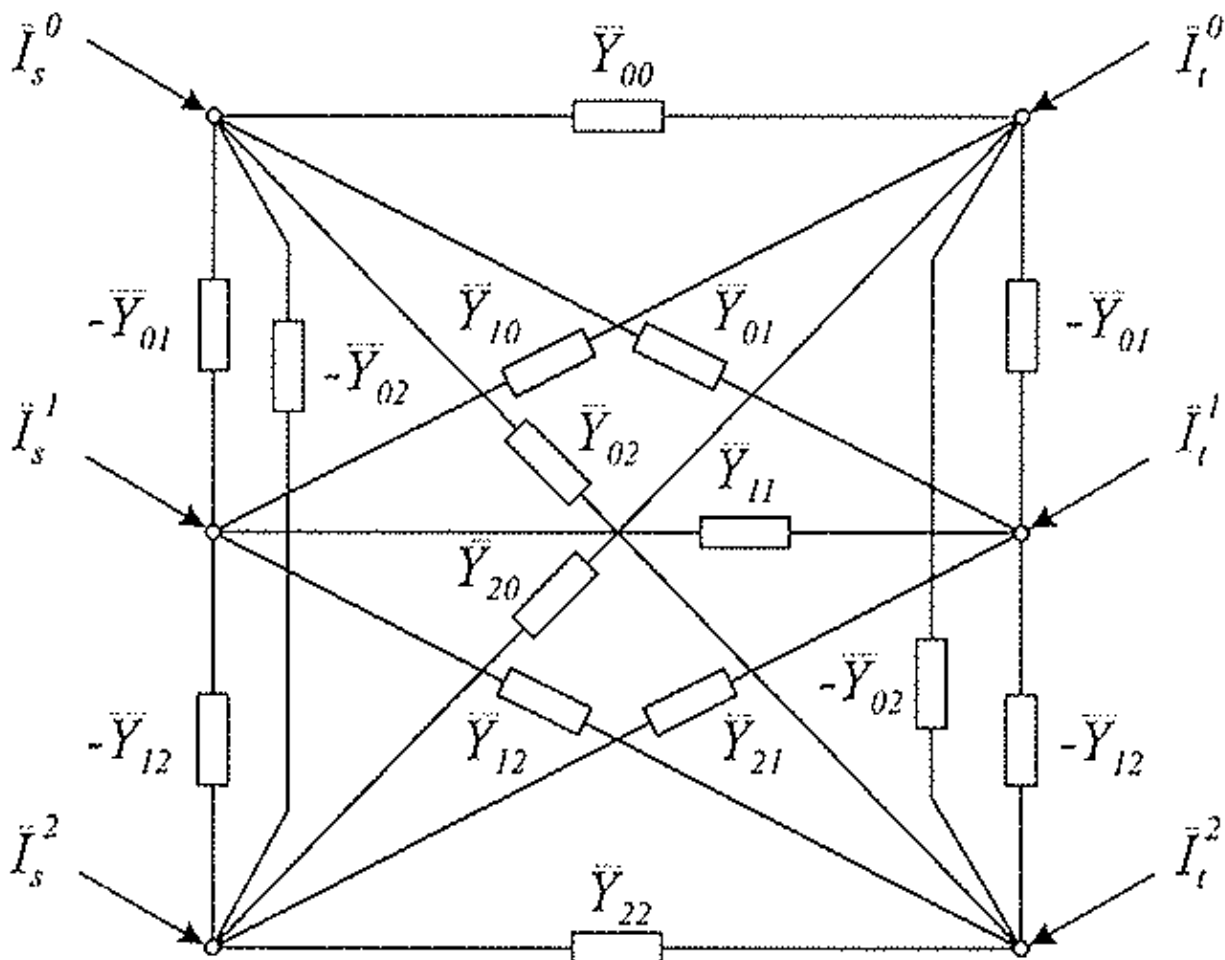
$$[\bar{I}_s^{012}] = [\bar{Y}_u^{012}] [\Delta\bar{V}^{012}] = [\bar{Y}_u^{012}] ([\bar{V}_s^{012}] - [\bar{V}_t^{012}]) \quad (4.20.)$$

a za čvor t:

$$[\bar{I}_t^{012}] = [\bar{Y}_u^{012}] [\Delta\bar{V}^{012}] = [\bar{Y}_u^{012}] ([\bar{V}_t^{012}] - [\bar{V}_s^{012}]) \quad (4.21.)$$

Pa tako se mogu napisati i jednačbe koje preko blok matrice povezuju struje i napone:

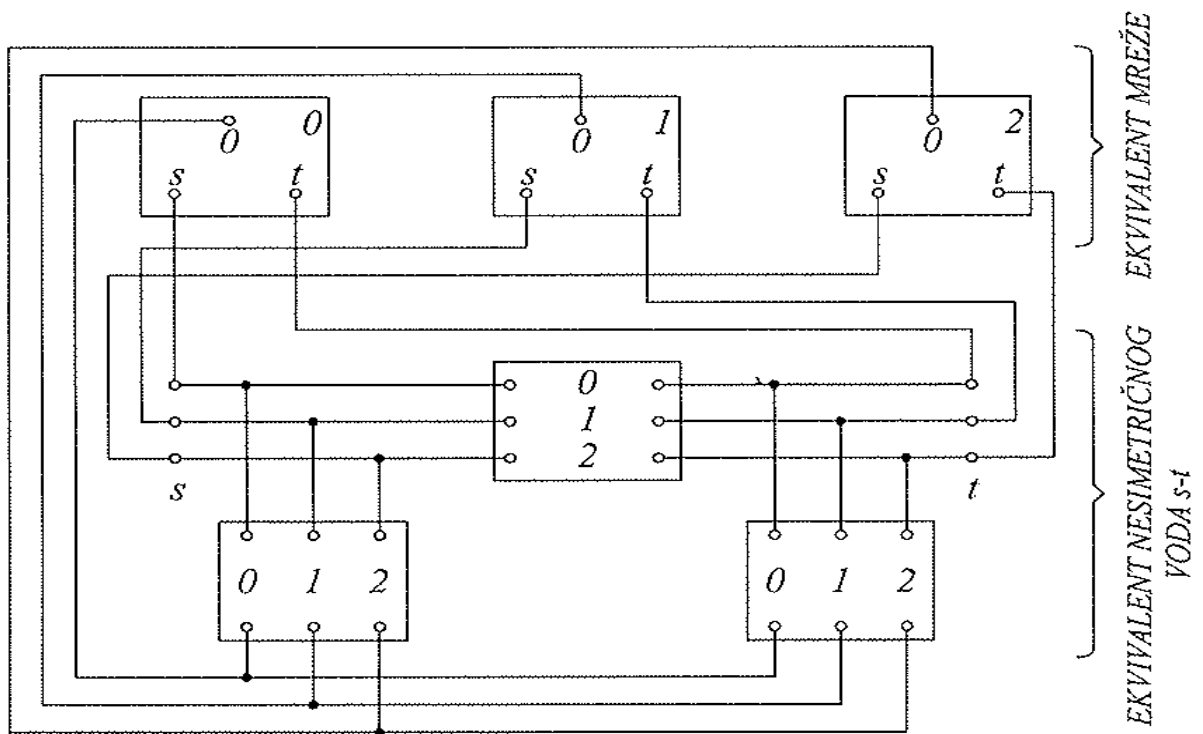
$$\begin{bmatrix} \bar{I}_s^{012} \\ \bar{I}_t^{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_u^{012} & -[\bar{Y}_u^{012}] \\ -[\bar{Y}_u^{012}] & [\bar{Y}_u^{012}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{V}_s^{012} \\ \bar{V}_t^{012} \end{bmatrix} \quad (4.22.)$$



Slika 4.12. Fizikalni prikaz uzdužne matrice voda $[\bar{Y}_u^{012}]$ u sustavu komponenata [1]

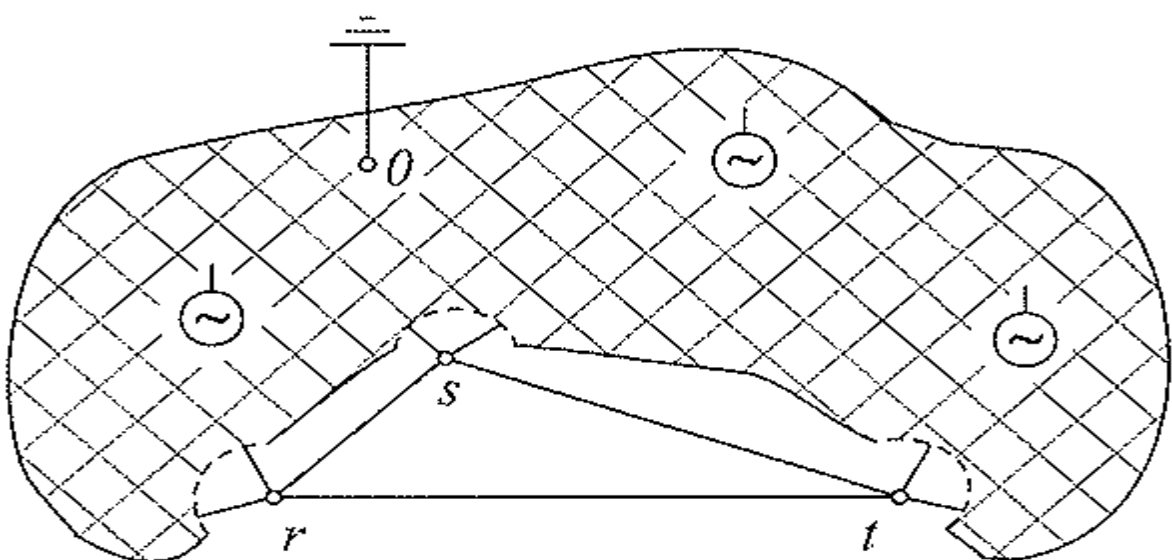
Admitancije grana u shemi prikazanoj na slici 4.12. računaju se isto kao i na shemi prikazanoj na slici 4.11.

Na slici 4.13. prikazano je koliko je kompliciran problem kada se poveže sustav komponenata mreža sa sustavom komponenata voda, i to kada u mreži postoji samo jedan neprepleteni vod.

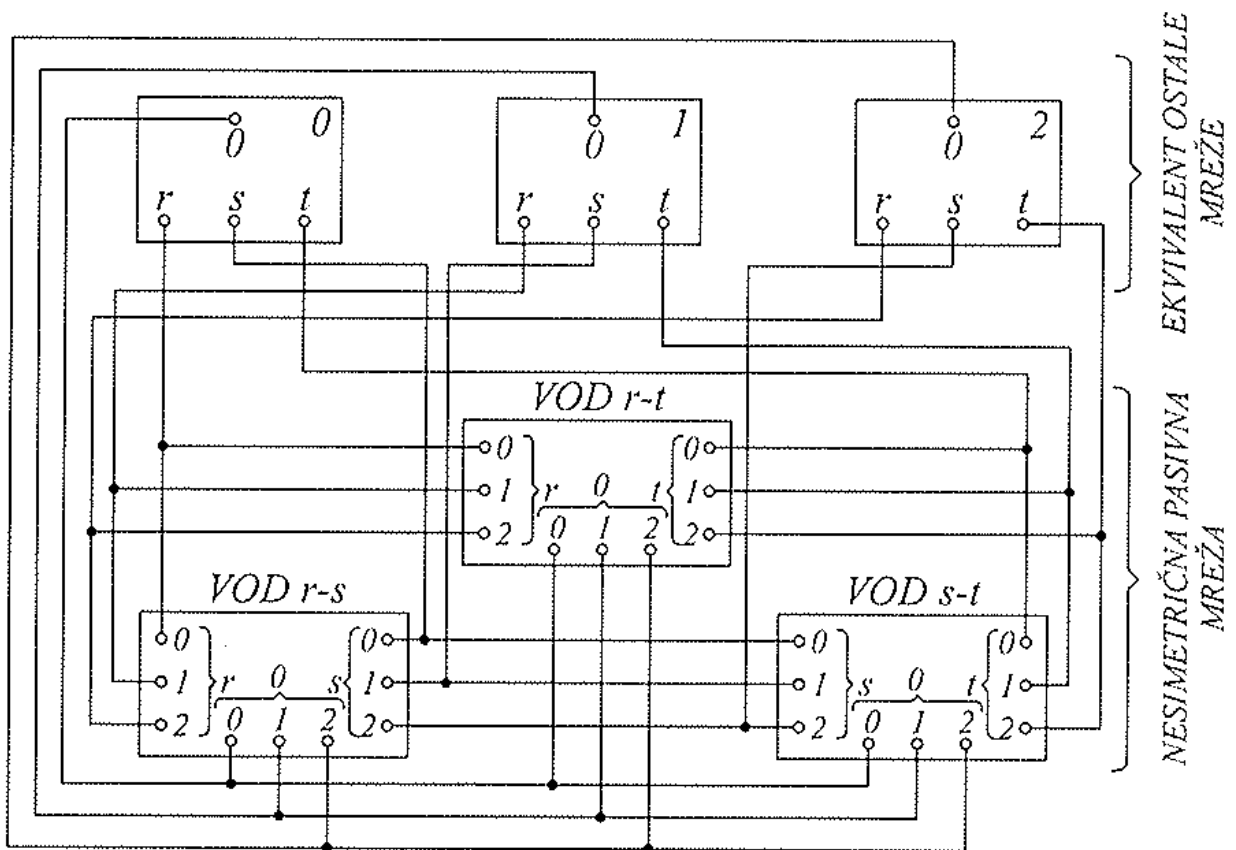


Slika 4.13. Povezivanje sustava simetričnih komponenti simetrične mreže s nesimetričnim vodom [1]

Gotovo nikad se ne razmatra utjecaj samo jednog neprepletenog voda u simetričnu mrežu. Na slici 4.14. prikazana su tri neprepletena voda koja su povezana u simetričnoj mreži.



Slika 4.14. Tri nesimetrična neprepletena voda u simetričnoj mreži [1]



Slika 4.15. Nadomjesna shema mreže prikazane na slici 4.14. u sustavu simetričnih komponenti [1]

Ukoliko se u proračun ide sa nesimetričnim elementima dolazimo do puno težeg i kompliciranijeg proračun od onog ukoliko se u proračun ide sa simetričnim elementima. Problem se javlja i u tome što su nesimetrije struje i napona malene i približavaju se redu veličine računске pogreške. Pokuša li se doći do točnih rezultata putem mjerenja u mreži, također se nailazi na probleme, jer su pogonski naponi i struje veliki u odnosu na očekivana fazna odstupanja uslijed nesimetrije.

4.3. Teorem kompenzacije u analizi utjecaja nesimetriranog voda

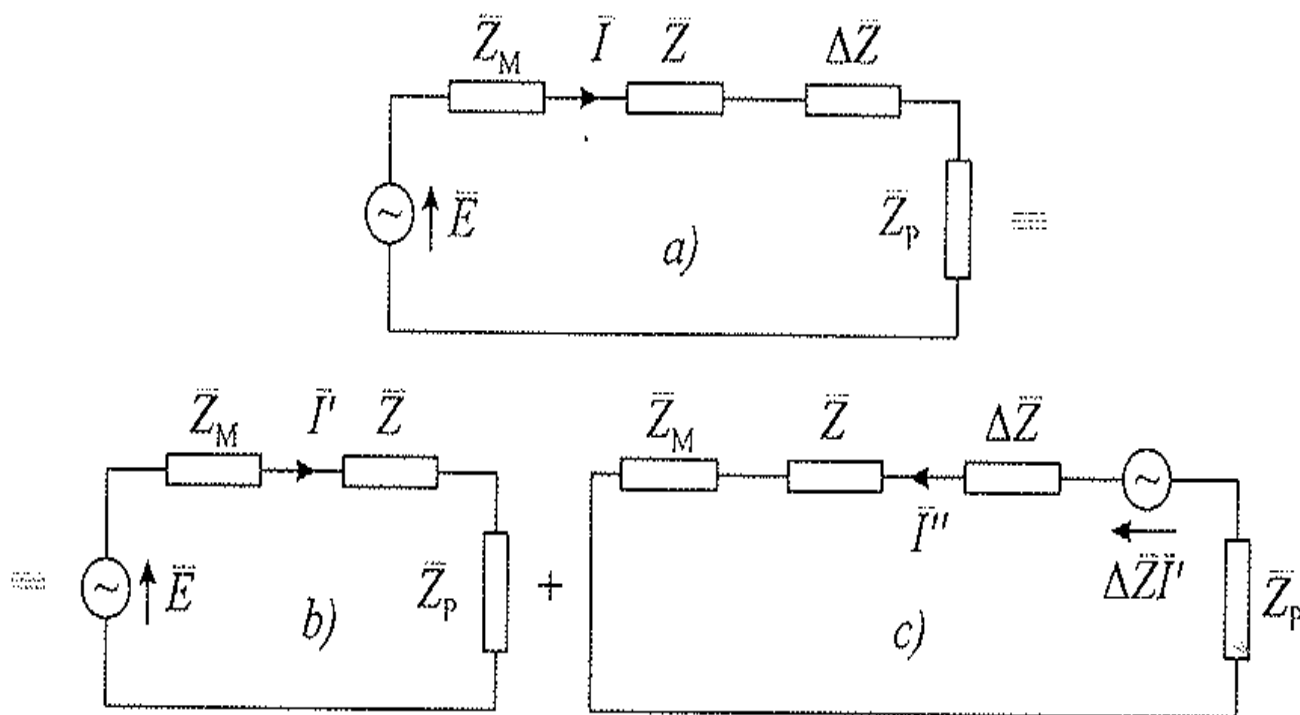
Kod primjene teorema kompenzacije potrebno je računati sa tri stanja:

- za aktivnu mrežu prije promjene
- za pasivnu mrežu tijekom promjene u kojoj su aktivni strujni i naponski izvori promjene
- za superpoziciju struja i napona ovih dviju mreža

Teorem kompenzacije za promjenu uzdužne impedancije grane glasi:

”Ako se u jednoj grani linearne mreže poveća impedancija za $\Delta\bar{Z}$, promjena struja u svim granama bit će jednaka struji, koju bi proizvela EMS veličine $-\Delta\bar{Z}\bar{I}$ spojena u seriju s promjenjivom granom. \bar{I} je struja, koja je u toj grani tekla prije promjene”.

Primjena iznad napisanog teorema prikazana je na slici 4.16. Mrežu nakon promjene koja je prikazana na slici 4.16.a računa se prema superpoziciji mreže prije promjene prikazane na slici 4.16.b i mreže fiktivnog sustava prikazanog na slici 4.16.c.

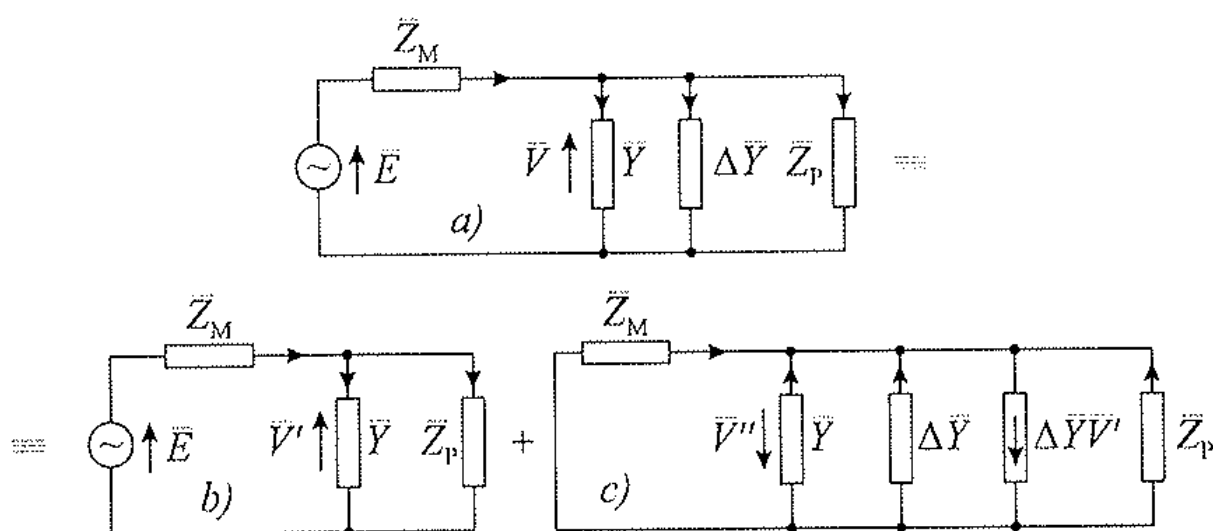


Slika 4.16. Teorem kompenzacije za promjenu uzdužne impedancije grane [1]

Teorem kompenzacije za promjenu poprečne admitancije grane glasi:

“Ako se u jednoj grani linearne mreže poveća impedancija za $\Delta\bar{Y}$, promjena pada napona u svim granama bit će jednaka padu napona kojeg bi proizveo strujni izvor veličine $-\Delta\bar{Y}\bar{V}'$ spojen paralelno s promjenjivom granom. \bar{V}' je napon koji je na toj grani vladao prije promjene”.

Primjena teorema kompenzacije za promjenu poprečne admitancije grane prikazan je na slici 4.17. Mrežu nakon promjene koja je prikazana na slici 4.17.a računa se prema superpoziciji mreže prije promjene prikazane na slici 4.17.b i mreže fiktivnog sustava prikazanog na slici 4.17.c.

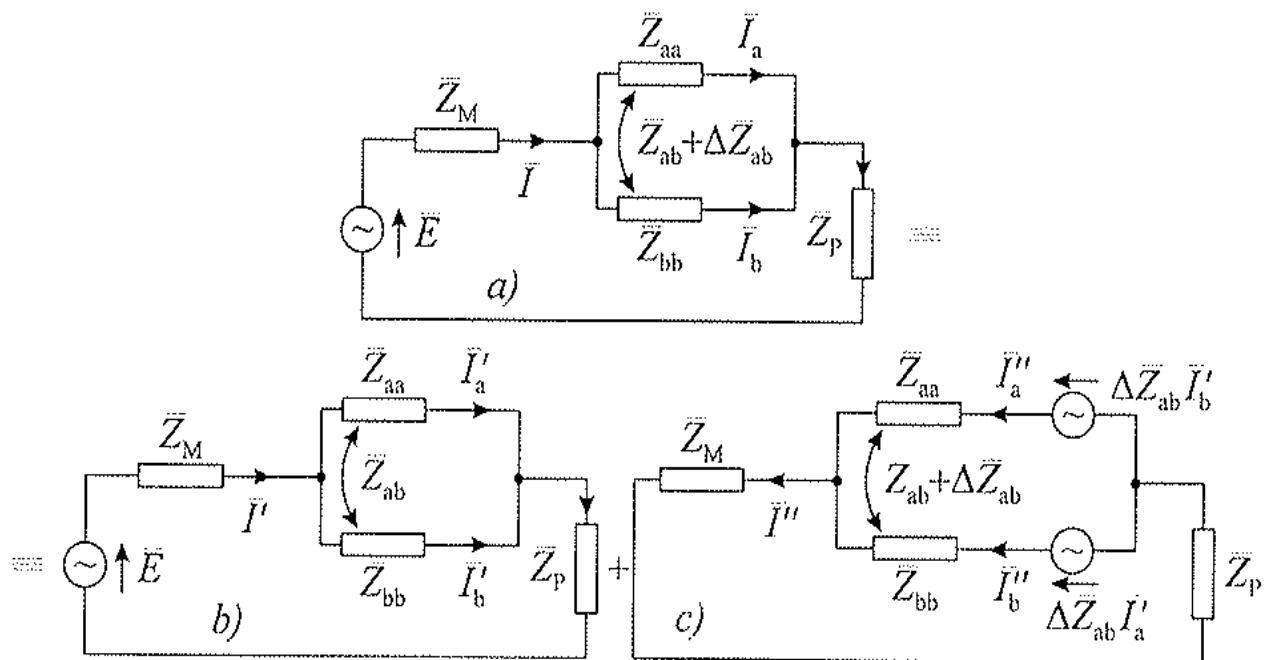


Slika 4.17. Teorem kompenzacije za promjenu poprečne admitancije grane [1]

Teorem kompenzacije za promjenu međusobne impedancije grane glasi:

“Ako se između dviju grana linearne mreže poveća međusobna impedancija za $\Delta\bar{Z}_{ab}$, promjena stanja u svim granama bit će jednaka strujama koje bi proizvela EMS veličine $-\Delta\bar{Z}_{ab}\bar{I}_b$ spojena u seriju s impedancijom \bar{Z}_{aa} grane a i strujama koje bi proizvela EMS veličine $-\Delta\bar{Z}_{ab}\bar{I}_a$ spojena u seriju s impedancijom \bar{Z}_{bb} grane b. \bar{I}_a je struja koja je prije promjene tekla u grani b. \bar{I}_b je struja koja je prije promjene tekla u grani a”.

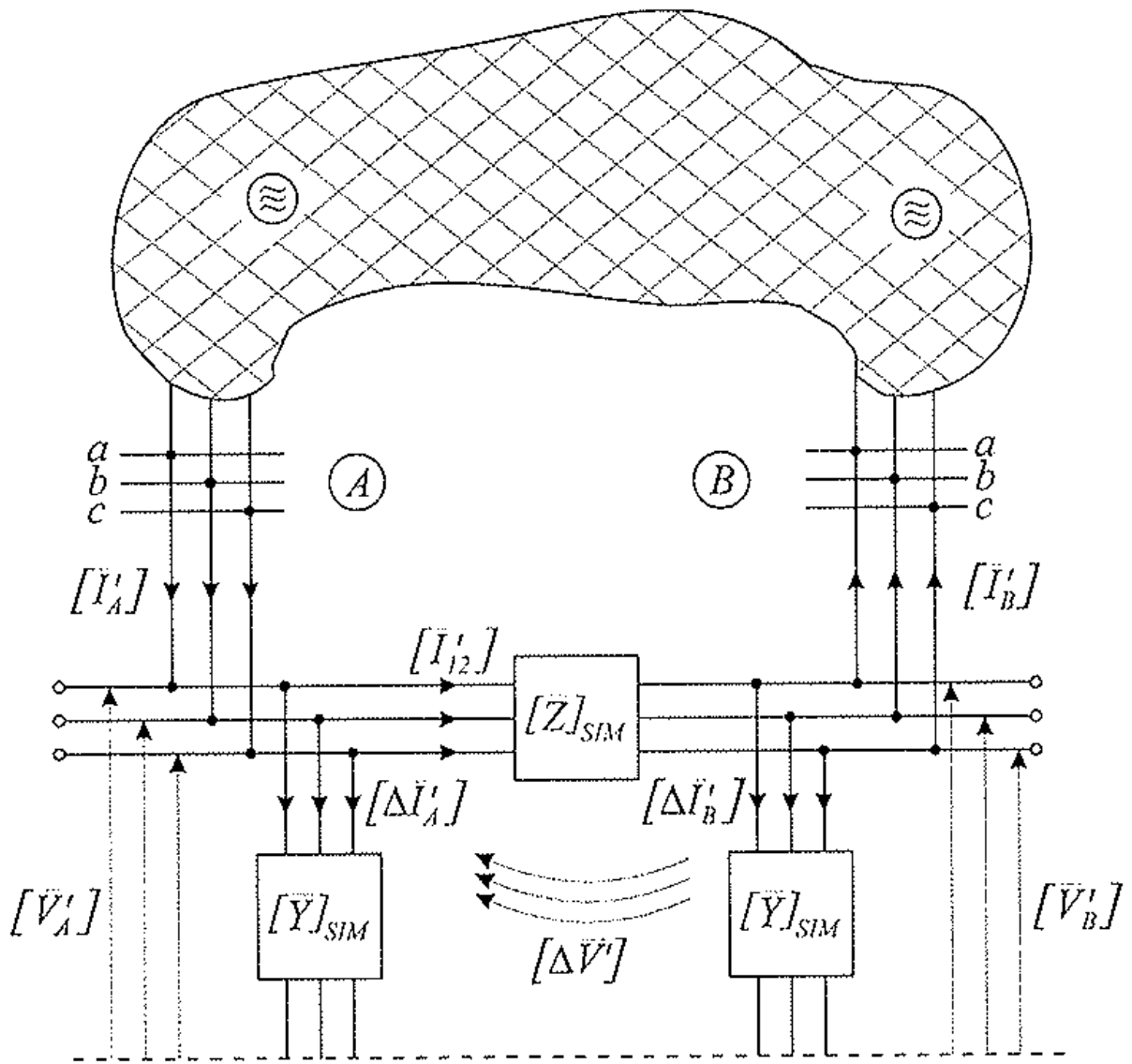
Primjena teorema kompenzacije za promjenu međusobne impedancije grane prikazan je na slici 4.18. Mrežu nakon promjene koja je prikazana na slici 4.18.a računa se prema superpoziciji mreže prije promjene prikazane na slici 4.18.b i mreže fiktivnog sustava prikazanog na slici 4.18.c.



Slika 4.18. Teorem kompenzacije za promjenu međusobne impedancije grane [1]

Kod proračuna utjecaja nesimetričnog voda na mrežu pomoću teorema kompenzacije, vod se može smatrati kao prepleteni vod i da je takvo stanje bilo prije promjene. Pa promjena stanja znači rasplitanje voda, te je onda potrebno proučiti tri stanja kod proračuna:

- mreža je aktivna i priključen je prepleteni vod
- mreža je pasivna i priključen je neprepleteni vod. Rasplitanje voda predstavlja promjenu koja u uzdužnoj grani donosi trofazni naponski izvor, a u poprečnim granama donosi trofazni strujni izvor. Ovo je fiktivni sustav.
- mreža je aktivna i priključen je neprepleteni vod, te ćemo struje i napone dobiti superpozicijom struja i napona u mrežama u prva dva stanja



Slika 4.19. Aktivna simetrična mreža kojoj je u čvoru A i B priključen prepleteni vod [1]

U prvom stanju pretpostavlja se da je vod prepleten i računaju se članove matrice za ovaj vod pomoću sljedećih izraza:

$$\bar{Z}_s = \frac{1}{3}(\bar{Z}_{aa} + \bar{Z}_{bb} + \bar{Z}_{cc}) \quad (4.23.)$$

$$\bar{Z}_m = \frac{1}{3}(\bar{Z}_{ab} + \bar{Z}_{bc} + \bar{Z}_{ca}) \quad (4.24.)$$

$$\bar{Y}_s = \frac{1}{3}(\bar{Y}_{aa} + \bar{Y}_{bb} + \bar{Y}_{cc}) \quad (4.25.)$$

$$\bar{Y}_m = \frac{1}{3}(\bar{Y}_{ab} + \bar{Y}_{bc} + \bar{Y}_{ca}) \quad (4.26.)$$

Primjenom simetrične transformacije na matrice $[\bar{Z}_{uS}^{abc}]$ i $[\bar{Y}_{pS}^{abc}]$ dobivaju se matrice koje imaju samo dijagonalne članove, tj. u ovom slučaju to su \bar{Z}_{00} , \bar{Z}_{11} i \bar{Z}_{22} , odnosno \bar{Y}_{00} , \bar{Y}_{11} i \bar{Y}_{22} . Ti dijagonalni članovi mogu se izračunati prema izrazima:

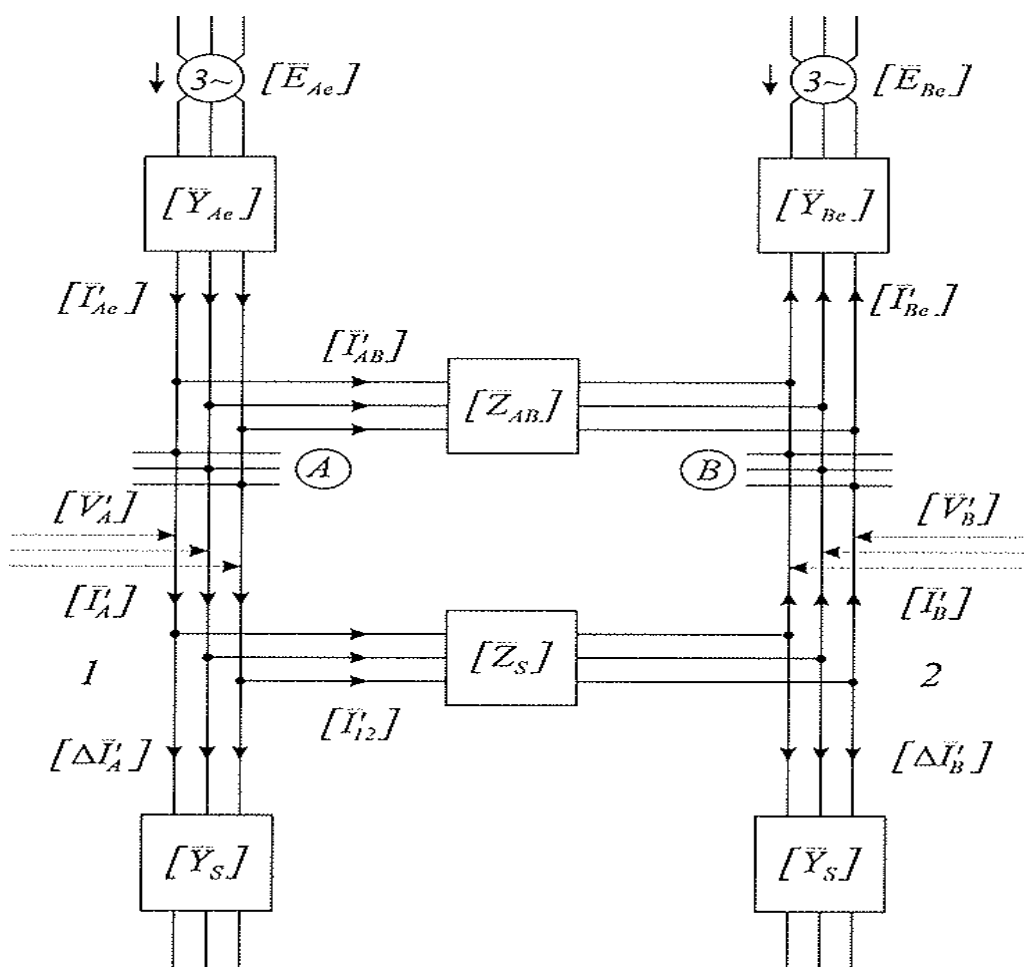
$$\bar{Z}_{00} = \bar{Z}_s + 2\bar{Z}_m \quad (4.27.)$$

$$\bar{Z}_{11} = \bar{Z}_s - \bar{Z}_m = \bar{Z}_{22} \quad (4.28.)$$

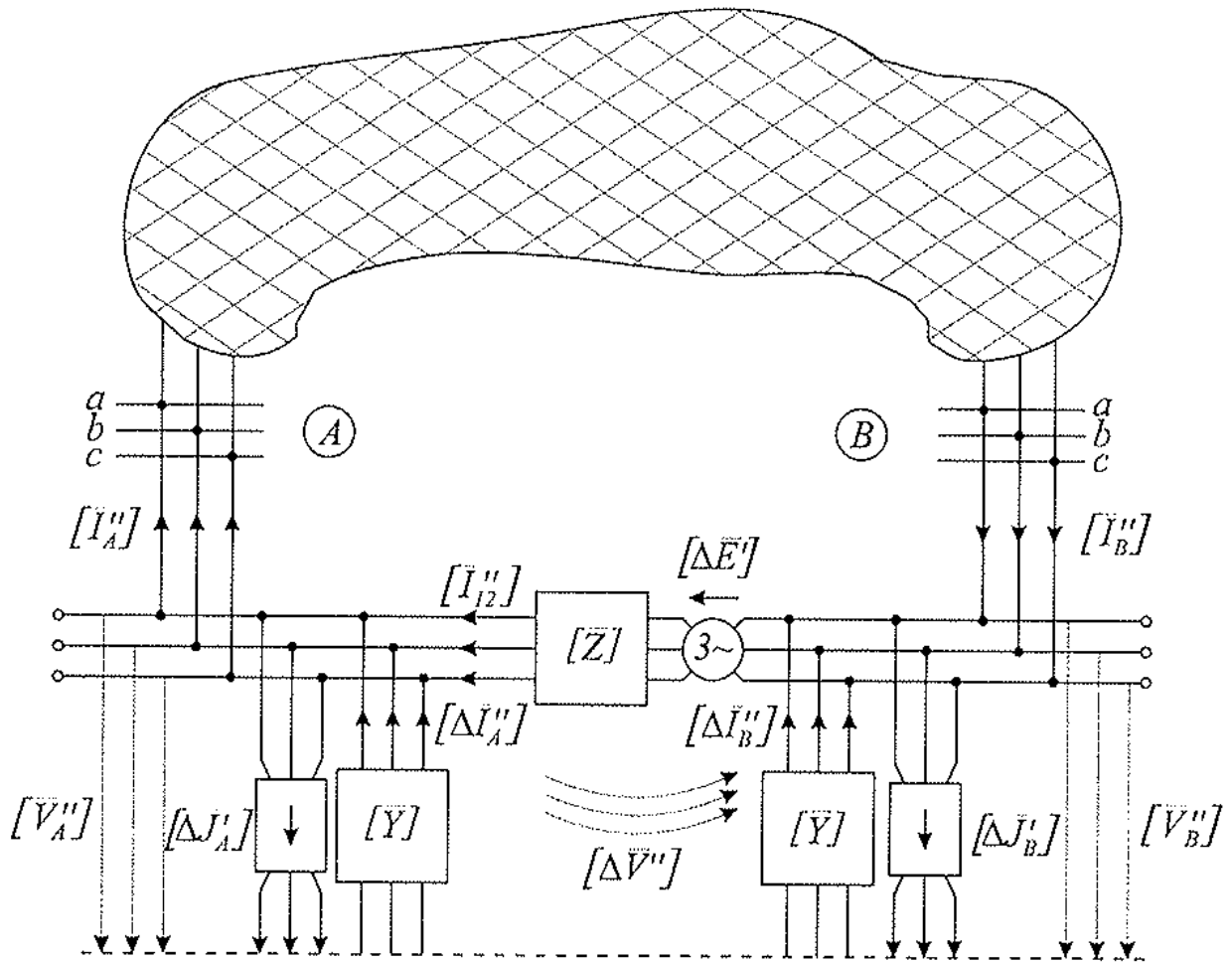
$$\bar{Y}_{00} = \bar{Y}_s + 2\bar{Y}_m \quad (4.29.)$$

$$\bar{Y}_{11} = \bar{Y}_s - \bar{Y}_m = \bar{Y}_{22} \quad (4.30.)$$

Sada je potrebno izračunati tokove snaga i napona u direktnom sustavu komponenta za mrežu sa uključenim prepletenim vodom. Kod tog proračuna važne su veličine struje u uzdužnoj grani π -sheme voda $[\bar{I}'_{12}]$ i naponi na poprečnim granama $[\bar{V}'_A]$ i $[\bar{V}'_B]$. Zatim se računa drugo stanje, tj. fiktivna pasivna mreža u kojoj je priključen neprepleteni vod.



Slika 4.20. Trofazna π shema prepletenog voda koji je priključen na simetričnu mrežu [1]



Slika 4.21. Pasivna simetrična mreža kojoj je u čvorovima A i B priključen neprepleteni vod [1]

Promjene koje nastaju raspletanjem prepletenog voda računaju se u uzdužnoj i poprečnoj matrici.

Promjene uzdužne matrice $[\bar{Z}_u^{abc}]$ računaju se pomoću sljedećih izraza:

$$\Delta \bar{Z}_{aa} = \bar{Z}_{aa} - \bar{Z}_s \quad (4.31.)$$

$$\Delta \bar{Z}_{bb} = \bar{Z}_{bb} - \bar{Z}_s \quad (4.32.)$$

$$\Delta \bar{Z}_{cc} = \bar{Z}_{cc} - \bar{Z}_s \quad (4.33.)$$

$$\Delta \bar{Z}_{ab} = \bar{Z}_{ab} - \bar{Z}_m \quad (4.34.)$$

$$\Delta \bar{Z}_{ac} = \bar{Z}_{ac} - \bar{Z}_m \quad (4.35.)$$

$$\Delta \bar{Z}_{bc} = \bar{Z}_{bc} - \bar{Z}_m \quad (4.36.)$$

Tako se dobije matrica promjene $[\Delta\bar{Z}_u^{abc}]$ koja je simetrična. Fiktivne elektromotorne sile faza $[\Delta\bar{E}'^{abc}]$ u pozitivnom smjeru struja simetričnog sustava $\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$ su:

$$[\Delta\bar{E}'^{abc}] = [\bar{Z}_u^{abc}][\bar{I}^{abc}] \quad (4.37.)$$

Promjene poprečne matrice $[\bar{Y}_p^{abc}]$ računaju se pomoću sljedećih izraza:

$$\Delta\bar{Y}_{aa} = \bar{Y}_{aa} - \bar{Y}_s \quad (4.38.)$$

$$\Delta\bar{Y}_{bb} = \bar{Y}_{bb} - \bar{Y}_s \quad (4.39.)$$

$$\Delta\bar{Y}_{cc} = \bar{Y}_{cc} - \bar{Y}_s \quad (4.40.)$$

$$\Delta\bar{Y}_{ab} = \bar{Y}_{ab} - \bar{Y}_m \quad (4.41.)$$

$$\Delta\bar{Y}_{ac} = \bar{Y}_{ac} - \bar{Y}_m \quad (4.42.)$$

$$\Delta\bar{Y}_{bc} = \bar{Y}_{bc} - \bar{Y}_m \quad (4.43.)$$

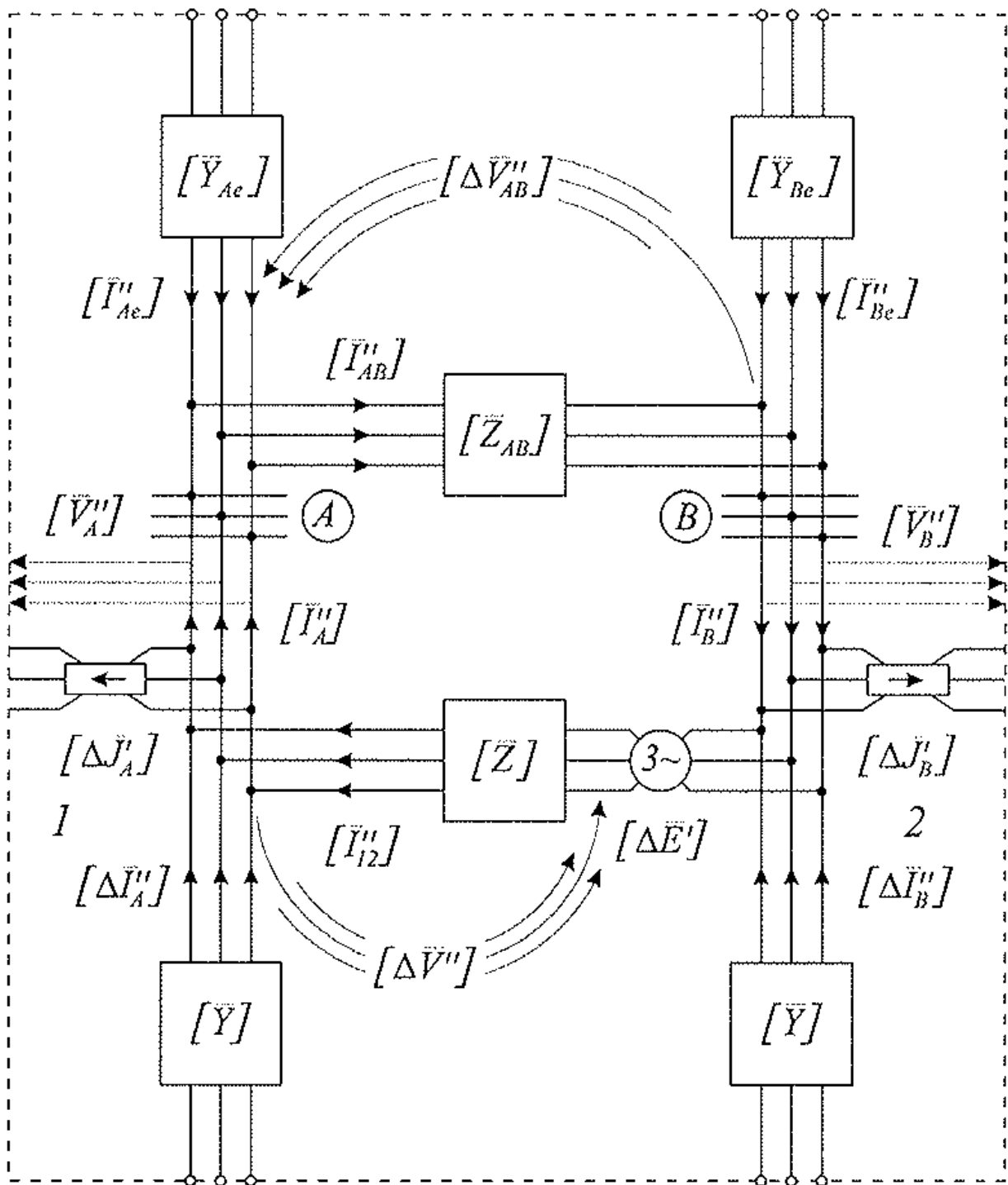
Tako se dobije matrica promjene $[\Delta\bar{Y}_{pA}^{abc}]$ na strani A i $[\Delta\bar{Y}_{pB}^{abc}]$ na strani B koje su simetrične i gotovo uvijek jednake.

Fiktivni strujni izvori faza u smjeru protivnom naponima $\bar{V}_A'^a, \bar{V}_A'^b$ i $\bar{V}_A'^c$ na A strani i $\bar{V}_B'^a, \bar{V}_B'^b$ i $\bar{V}_B'^c$ na B strani su:

$$[\Delta\bar{J}_A^{abc}] = [\Delta\bar{Y}_p^{abc}][\Delta\bar{V}_A'^{abc}] \quad (4.44.)$$

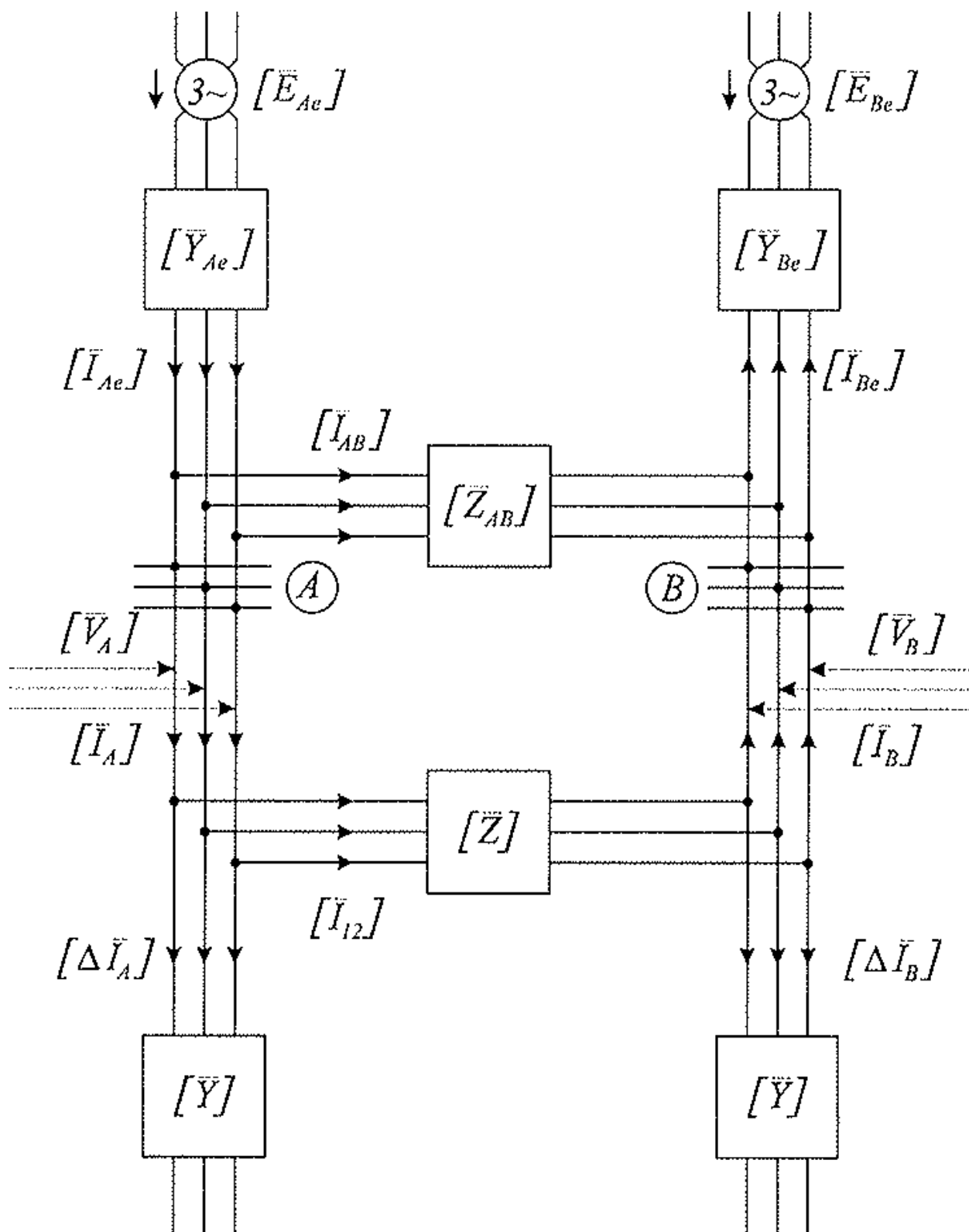
$$[\Delta\bar{J}_B^{abc}] = [\Delta\bar{Y}_p^{abc}][\Delta\bar{V}_B'^{abc}] \quad (4.45.)$$

Na slici 4.20. prikazana je mreža stanja prije promjene, te toj mreži treba izračunati napone i struje na način da se to napravi u direktnom sustavu komponenata, a zatim iz 012 sustava pomoću poznatih transformacija se prijeđe u abc sustav.



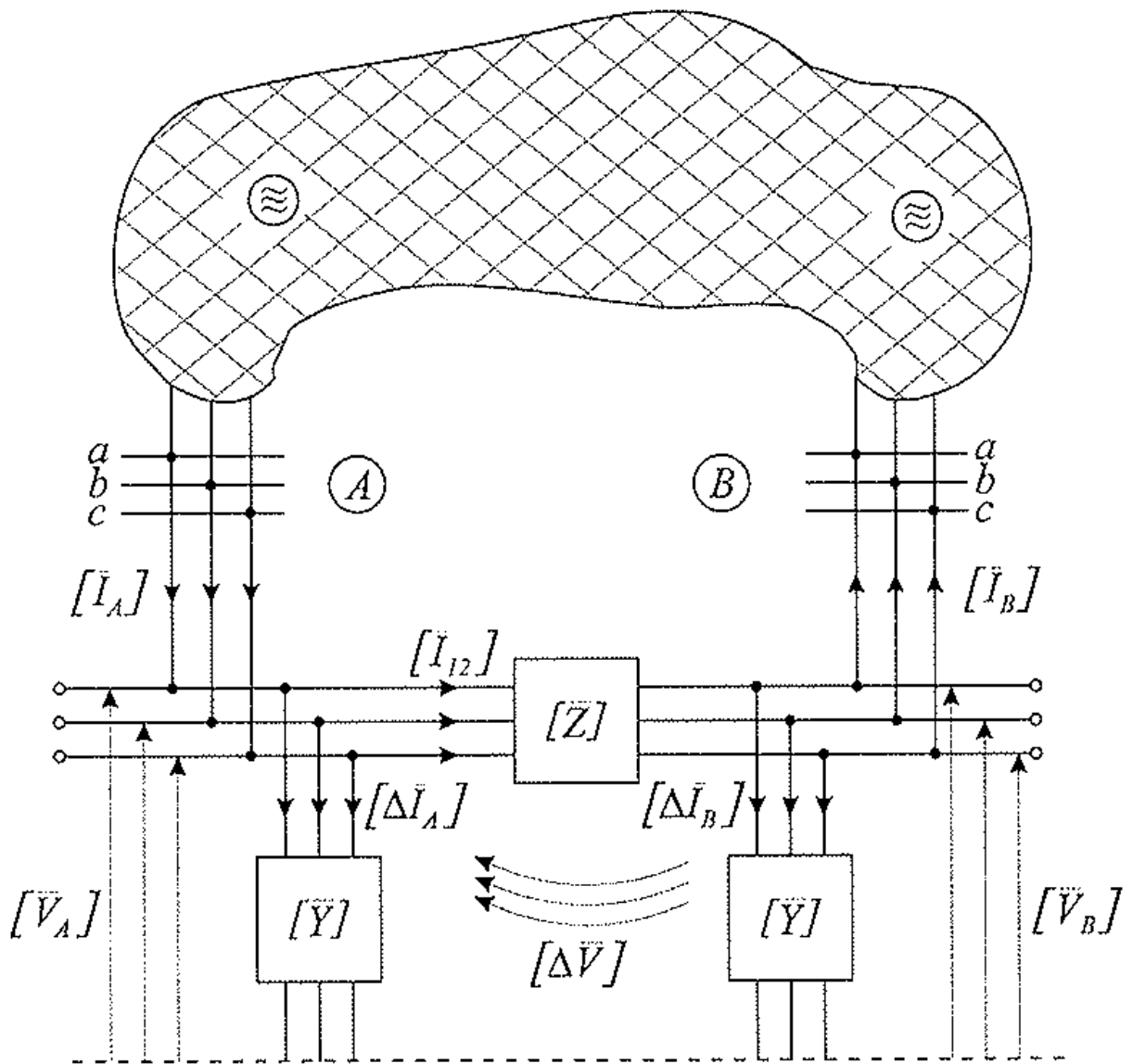
Slika 4.22. Fiktivni trofazni sustav mreže sastavljen od ekvivalenata pasivne mreže u kojoj je priključen neprepleteni vod [1]

Rasplitanje nepreletenog voda prikazanog na slici 4.22. u uzdužnoj grani donosi fiktivni naponski izvor $[\Delta \bar{E}'^{abc}]$, a u poprečnim granama fiktivne strujne izvore $[\Delta \bar{J}'^{abc}_A]$ i $[\Delta \bar{J}'^{abc}_B]$. Zatim se računaju struje i naponi fiktivnog sustava koje izazivaju strujni i naponski izvori.



Slika 4.23. Simetrična aktivna mreža koja ima priključen neprepleteni vod [1]

Struje i napone mreže prikazane na slici 4.23. može se dobiti superpozicijom struja i napona simetričnog sustava prikazanog na slici 4.20. i fiktivnog sustava prikazanog na slici 4.22.



Slika 4.24. Aktivna simetrična mreža na koju je priključen neprepleteni vod [1]

4.4. Posljedice nesimetrije u mreži

U mrežama koje imaju kruto ili slično uzemljenje zvjezdišta cirkuliraju inverzna i nulta komponenta struje koje izazivaju nesimetriju napona u mreži. Kada je generator u pitanju onda nema nultih komponenta struje iz razloga što je nulti sustav generatora odvojen od nultog sustava ostatka mreže. Inverzna komponenta struje kod generatora izaziva dodatno zagrijavanje željeza, pogotovo u rotoru u kojem magnetsko polje zbog inverzne komponente struje rotira dvostrukom sinkronom brzinom. Kao mjerodavnu struju za zagrijavanje namota statora uzima se ukupna struja koja je najveća onda kada direktna i inverzna komponenta struje imaju isti smjer. Jako je bitno da ukupna struja ne bude veća od nazivne kako ne bi došlo do nedopuštenog zagrijavanja. U praksi inverzna struja koja smije teći kroz generator ograničena je na iznos od 6% do 12% nazivne struje.

Inverzna komponenta struje na sličan način djeluje i na transformator, tj. izaziva dodatna zagrijavanja jedne faze i povećava gubitke. Nultu komponentu struje transformatori podnose zahvaljujući tercijarnom namotu.

Kod nadzemnih telefonskih i brzojavnih linija nulta komponenta struje izaziva smetnje u žicama. Smetnje u ovom slučaju ne javljaju se samo u blizini neprepletenih vodova, već i u bilo kojem dijelu mreže u kojem je prisutna nulta komponenta struje. Ovaj problem se može riješiti na nekoliko načina:

- preplitanjem faznih vodiča
- postavljanjem nadzemnih telefonskih linija izvan zone utjecaja
- opremiti dalekovod zaštitnim užetom dobre vodljivosti
- promjenom broja i lokacije uzemljenih zvjezdišta sustava

Po propisima iz 1990.godine utvrđeni su iznosi u postotcima koje ne smije prelaziti vrijednost nesimetrije napona u mreži kao što je prikazano u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Iznosi nesimetrija u mreži koje se ne smiju prekoračiti

	Niski i srednji napon (0,4-35kV)	Visoki napon $\geq 110\text{kV}$
v_u %	2%	1%

5. ZAKLJUČAK

Za sve tri vrste smetnji koje se pojavljuju u stacionarnom pogonu mreže, a kroz ovaj rad su navedene i obrađene može se zaključiti da postoji jednostavan tehnički pristup kojim se može doći do rješenja. Isto tako, takav jednostavni pristup zahtjeva niz zanemarivanja i pojednostavljenja zbog kojih može doći do krive procjene stanja.

Najbolji uvid u stanje mreže može se dobiti mjerenjem u "živoj" mreži, ali tu se javlja nekoliko značajnih problema. Prvi od tih problema je taj što se takvo mjerenje može izvršiti tek nakon što je izgrađen izvor smetnje, kompenzacijskih i ostalih uređaja. Dodatni problem je taj što se takva mjerenja moraju izvršavati u točno onom trenutku kada se pojavljuje pojava koja se treba registrirati.

Dodatni problem je to što se sve navedene smetnje promatraju odvojeno, a npr. kod čeličane s jednofaznom elektrolučnom peći postoje čvorovi u kojima se istovremeno pojavljuju sve tri vrste smetnji. Trošila poput trofazne elektrolučne peći generiraju sve tri vrste smetnji; zbog nelinearnosti električnog luka dolazi do pojave svih mogućih viših harmonika; zbog nemirnog gorenja luka dolazi do brzog kolebanja napona; zbog gorenja luka nejednako po fazama dolazi do povremenih nesimetrija.

6. LITERATURA

1. [1] Ožegović Marija, Ožegović Karlo, "Električne energetske mreže", FESB Split OPAL COMPUTING d.o.o. SPLIT 2002.
2. Radošević Tomislav, "Elektrolučna peć kao potrošač elektroenergetskog sustava", https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/KDI_Tomislav_Radosevic.pdf, 28.07.2016.
3. Vlajčević Robert, Milardić Viktor, "Problematika treperenja napona u prijenosnoj mreži HOPS-a", https://bib.irb.hr/datoteka/654666.C4-09_R20130112.pdf, 24.07.2016.

Sažetak

U stacionarnom pogonu elektroenergetskog pogona pojavljuju se tri vrste smetnji: izobličenje krivulje struje i napona, brza kolebanja napona i nesimetrija struje i napona.

Kod izobličenja krivulje struje i napona bitni su rangovi harmonika koji se pojavljuju u mreži i izbjegavanje rezonantnih pojava. Za suzbijanje viših harmonika u mreži koriste se apsorpcijski filteri. Trošila iz mreže uzimaju brzo promjenjivu struju zbog promjene prividne snage kojom ta trošila opterećuju mrežu. Nesimetrije u mreži izazivaju nesimetrični elementi. Klasični primjer su nadzemni vodovi kod kojih do nesimetrije dolazi zbog nejednakih razmaka među vodičima.

Sve tri smetnje se mogu riješiti jednostavnim tehničkim pristupom koji zahtjeva niz zanemarivanja i pojednostavljenja. Najbolji način za uvid u pravo stanje mreže postiže se mjerenjem u "živoj" mreži.

Ključne riječi: krivulja napona i struje, harmonik, rezonantna pojava, brza kolebanja napona, prividna snaga, nesimetrija struje i napona, nesimetrični elementi.

Summary

In the stationary state of the electrical power drive three types of disturbances appear: distortion curves of current and voltage, fast voltage fluctuations, and asymmetry of current and voltage.

Importance of the distortion curves of current and voltage are the ranks of harmonics that occur in the network and avoidance of the occurring resonance. Absorption filters are being used for the suppression of the higher harmonics. Consumer are taking the fast changing current from the network because of the apparent power with which the consumer strain the network. The asymmetry in the network is caused by asymmetric elements. Classic examples are overhead lines in which asymmetry occurs due to uneven spacing between conductors.

All three types of disturbances can be solved by simple technical approach which requires a series of neglecting and simplification. The best way for an insight into true state of the network is achieved by measuring an 'alive' network.

Keywords: curves of voltage and current, harmonic, resonance occurrence, rapid fluctuations in voltage, apparent power, current and voltage asymmetry, asymmetric elements.