

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za elektrotehniko



MODELIRANJE  
ELEMENTOV  
ELEKTROENERGETSKEGA  
OMREŽJA

Založba  
FE

BOŠTJAN BLAŽIČ  
IGOR PAPIČ

# **Modeliranje elementov elektroenergetskega omrežja**

Izr. prof. dr. Boštjan Blažič

Prof. dr. Igor Papič

Ljubljana, 2019

---

Katalogni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

COBISS.SI-ID=298501888

ISBN 978-961-243-375-8 (pdf)

---

URL: [http://leon.fe.uni-lj.si/media/gradiva/EEO\\_Ucb.pdf](http://leon.fe.uni-lj.si/media/gradiva/EEO_Ucb.pdf)

Založnik: Založba FE, Ljubljana

Izdajatelj: Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana

Urednik: prof. dr. Sašo Tomažič

1. elektronska izdaja

## Predgovor

V preteklih desetletjih je bilo veliko pozornosti namenjene delovanju prenosnih omrežij, nekoliko manj pa se je strokovna in študijska literatura posvečala distribucijskim omrežjem. V zadnjem desetletju pa strmo narašča delež obnovljivih virov, ki so priključeni na distribucijski nivo, električna vozila se počasi že nakazujejo na obzoru in v ospredje vse bolj stopa potreba po zagotavljanju fleksibilnosti v omrežju, ki jo s prilagajanjem odjema lahko zagotovi tudi porabnik. Zaradi naštetega postajajo distribucijska omrežja ključen del elektroenergetskega sistema in si zaslužijo nekoliko natančnejšo obravnavo.

Pričujoče delo je zastavljeno kot učni pripomoček za predmeta Elektroenergetska omrežja in naprave ter Elementi elektroenergetskega omrežja. Precejšen del snovi je sicer splošen in veljaven tako za prenosna kot tudi za distribucijska omrežja, na več mestih pa so opisane specifične distribucijskih omrežij. Ker moramo pri obravnavi distribucijskih omrežij navadno upoštevati nesimetrične obratovalne razmere, veliko pozornosti posvečamo trifaznemu modeliranju sistema s pomočjo simetričnih komponent. Opisane so pasivne in aktivne kompenzacijske naprave, ki jih srečujemo v distribuciji in pri industrijskih porabnikih, podane so osnove obratovanja distribucijskih omrežij, ki vključuje tudi vpliv virov, priključenih v ta omrežja.

Na začetku učbenika je predstavljena osnovna zgradba elektroenergetskega omrežja, sledi opis matematičnih osnov, ki olajšajo razumevanje nadaljnjih poglavij. Ena od osrednjih tem dela je določanje električnih parametrov vodov, kjer se posebej posvečamo trifaznemu modelu voda. Sledi krajši opis modeliranja transformatorja in bremen. V nadaljevanju se osredotočimo na opis pasivnih in aktivnih kompenzacijskih naprav ter razpršenih virov, ki jih najpogosteje srečamo v distribucijskih omrežjih. Proti koncu učbenika je opisana metoda izračuna pretokov v moči v radialnih omrežjih, nato pa so podane še temeljne značilnosti obratovanja sodobnih distribucijskih omrežij. Na koncu obravnavamo mehanske parametre vodov.

Avtorja se za pomoč pri pripravi vsebine zahvaljujeva sodelavcem v Laboratoriju za električna omrežja in naprave in v Laboratoriju za preskrbo z električno energijo, za recenzijo in napotke gre velik hvala recenzentoma prof. dr. Rafaelu Mihaliču in izr. prof. dr. Marku Čepinu, posebna zahvala pa gre Špeli Barlič za jezikovni pregled vsebine.

Ljubljana, januar 2019

Avtorja



# Kazalo

<b>KAZALO</b> .....	<b>7</b>
<b>1 STRUKTURA ELEKTROENERGETSKIH OMREŽIJ</b> .....	<b>11</b>
1.1 DELITEV ELEKTROENERGETSKIH OMREŽIJ .....	11
1.1.1 <i>Nazivne napetosti</i> .....	11
1.1.2 <i>Funkcije omrežja</i> .....	11
1.1.3 <i>Struktura omrežja</i> .....	13
1.1.3.1 Stikalne postaje .....	14
1.1.3.2 Struktura prenosnega in distribucijskega omrežja.....	15
1.1.3.3 Lastnosti radialnih in zazankanih omrežij .....	16
1.2 OZEMLJEVANJE V ELEKTROENERGETSKIH OMREŽIJH .....	17
1.2.1 <i>Ozemljevanje prenosnega in distribucijskih omrežij</i> .....	18
1.2.1.1 Obratovanje z izolirano nevtralnno točko .....	18
1.2.1.2 Obratovanje z nizkoohmsko ozemljitvijo .....	19
1.2.1.3 Obratovanje z resonančno ozemljeno nevtralnno točko .....	20
1.2.1.4 Obratovanje z direktno ozemljitvijo .....	21
1.2.2 <i>Ozemljitveni sistemi v porabniških omrežjih</i> .....	21
1.2.2.1 TN sistem .....	22
1.2.2.2 TT sistem.....	23
1.2.2.3 IT sistem.....	23
<b>2 MATEMATIČNE OSNOVE</b> .....	<b>25</b>
2.1 TRANSFORMACIJA HARMONIČNE FUNKCIJE V KOMPLEKSNO RAVNINO.....	25
2.1.1 <i>Kompleksna števila</i> .....	25
2.1.1.1 Eulerjev obrazec .....	25
2.1.2 <i>Transformacija harmonične funkcije</i> .....	26
2.1.3 <i>Kompleksni račun</i> .....	28
2.1.3.1 Upor.....	28
2.1.3.2 Kondenzator .....	29
2.1.3.3 Tuljava .....	30
2.1.4 <i>Zapis moči v kompleksnem prostoru</i> .....	31
2.1.5 <i>Moč v trifaznem sistemu</i> .....	34
2.2 SISTEMI KOMPONENT .....	35
2.2.1 <i>Simetrične komponente</i> .....	36
<b>3 ELEKTRIČNI PARAMETRI VODOV</b> .....	<b>39</b>
3.1 MODEL VODA S PORAZDELJENIMI PARAMETRI .....	39
3.1.1 <i>Rešitev v splošni točki</i> .....	40
3.2 ČETVEROPOLNA PREDSTAVITEV VODA .....	41
3.3 MODEL TRIFAZNEGA VODA ZA NESIMETRIČNE RAZMERE .....	42
3.3.1 <i>Splošen trifazni zapis enačb voda</i> .....	42
3.4 ZAPIS MODELA VODA S SIMETRIČNIMI KOMPONENTAMI .....	44
3.4.1 <i>Simetrične komponente impedančne in admitančne matrike</i> .....	45
3.4.2 <i>Enačbe voda v primeru simetrične impedančne in admitančne matrike</i> .....	46
3.5 OHMSKA UPORNOST NADZEMNIH VODOV .....	48
3.6 INDUKTIVNOST NADZEMNIH VODOV .....	49
3.6.1 <i>Izračun magnetnega sklepa voda</i> .....	49
3.6.2 <i>Induktivnost dveh vodnikov</i> .....	51
3.6.2.1 Medsebojna induktivnost .....	52
3.6.2.2 Lastna induktivnost.....	53
3.6.3 <i>Induktivnost trifaznega sistema</i> .....	54
3.6.3.1 Simetriranje trifaznega sistema .....	55
3.6.3.2 Carsonova razdalja.....	56
3.6.4 <i>Impedanca trifaznega sistema z upoštevanjem zemlje</i> .....	56
3.6.5 <i>Impedanca trifaznega sistema z zaščitno vrvjo</i> .....	57

3.7	KAPACITIVNOST NADZEMNIH VODOV.....	60
3.7.1	<i>Splošne enačbe električnega polja.....</i>	60
3.7.1.1	Vektor električne poljske jakosti v okolici preme elektrine.....	61
3.7.2	<i>Kapacitivnost dveh vodnikov.....</i>	61
3.7.3	<i>Kapacitivnost sistema vodnik-zemlja.....</i>	62
3.7.4	<i>Kapacitivnosti trifaznega sistema.....</i>	63
3.7.5	<i>Kapacitivnosti trifaznega sistema z zaščitno vrvjo.....</i>	67
<b>4</b>	<b>TRANSFORMATORJI.....</b>	<b>71</b>
4.1	SPLOŠEN MATRIČNI ZAPIS ENAČB TRANSFORMATORJA.....	71
4.2	VEZAVA TRIKOT–ZVEZDA Z OZEMLJENIM ZVEZDIŠČEM (DYN).....	72
4.2.1	<i>Izračun napetosti.....</i>	72
4.2.2	<i>Izračun tokov.....</i>	74
<b>5</b>	<b>BREMENA.....</b>	<b>77</b>
5.1	NAPETOSTNA ODVISNOST BREMEN.....	77
5.2	POLINOMSKI IN EKSPONENTNI MODEL BREMENA.....	78
<b>6</b>	<b>KOMPENZACIJSKE NAPRAVE.....</b>	<b>81</b>
6.1	PASIVNE KOMPENZACIJSKE NAPRAVE.....	81
6.1.1	<i>Osnovni izračun elementov kompenzatorja.....</i>	81
6.1.2	<i>Pojav resonance v elektroenergetskih omrežjih.....</i>	83
6.2	AKTIVNE KOMPENZACIJSKE NAPRAVE.....	87
6.2.1	<i>Polprevodniški stikalni elementi.....</i>	87
6.2.1.1	Polprevodniška stikala.....	87
6.2.2	<i>Trifazni napetostni pretvornik.....</i>	88
6.2.3	<i>Delovanje trifaznega napetostnega pretvornika.....</i>	89
6.2.3.1	Obratovanje 6-pulznega trifaznega pretvornika.....	89
6.2.3.2	Pulzno-širinska modulacija.....	91
6.2.3.3	Histerezo proženje.....	92
6.2.4	<i>Matematični model trifaznega napetostnega pretvornika.....</i>	93
6.2.5	<i>Aktivni filtri.....</i>	95
6.2.5.1	Paralelni aktivni filter.....	97
6.2.5.2	Serijski aktivni filter.....	98
6.2.5.3	Hibridni aktivni filter.....	99
6.2.5.4	Univerzalni aktivni filter.....	100
<b>7</b>	<b>RAZPRŠENI VIRI.....</b>	<b>103</b>
7.1	TEHNOLOGIJE PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	103
7.1.1	<i>Male hidroelektrarne.....</i>	103
7.1.2	<i>Vetrne elektrarne.....</i>	103
7.1.3	<i>Sončne fotonapetostne elektrarne.....</i>	104
7.1.4	<i>Soproizvodnja toplote in električne energije.....</i>	104
7.1.5	<i>Gorivne celice.....</i>	105
7.1.6	<i>Hranilniki električne energije.....</i>	105
<b>8</b>	<b>IZRAČUN PRETOKOV MOČI.....</b>	<b>107</b>
<b>9</b>	<b>OBRATOVANJE DISTRIBUCIJSKEGA OMREŽJA.....</b>	<b>109</b>
9.1	KAKOVOST OSKRBE Z ELEKTRIČNO ENERGIJO.....	110
9.1.1	<i>Komercialna kakovost.....</i>	110
9.1.2	<i>Zanesljivost oskrbe.....</i>	111
9.1.3	<i>Kakovost napetosti.....</i>	111
9.1.3.1	Odkloni napajalne napetosti.....	112
9.1.3.2	Napetostni upadi.....	112
9.1.3.3	Harmoniki.....	113
9.1.3.4	Fliker.....	114
9.2	REGULACIJA NAPETOSTI V DISTRIBUCIJSKIH OMREŽJIH.....	114
9.2.1	<i>Regulacija napetosti.....</i>	114
9.3	VPLIV RAZPRŠENIH VIROV NA OBRATOVANJE OMREŽJA.....	116

9.3.1	<i>Vpliv razpršenih virov na napetostni profil distribucijskega omrežja</i> .....	116
9.3.2	<i>Ravnovesje med proizvodnjo in porabo</i> .....	117
9.3.3	<i>Delovanje zaščite</i> .....	118
9.3.3.1	<i>Povečanje kratkostičnih tokov in težave s selektivnostjo</i> .....	118
9.3.3.2	<i>Avtomatski ponovni vklop</i> .....	118
9.3.3.3	<i>Neželeno otočno obratovanje</i> .....	118
9.4	<b>SODOBNI KONCEPTI VODENJA OMREŽIJ</b> .....	119
9.4.1	<i>Napredna regulacija napetosti</i> .....	119
9.4.1.1	<i>Centralna regulacija napetosti</i> .....	119
9.4.1.2	<i>Koordiniran nadzor napetosti</i> .....	120
9.4.2	<i>Upravljanje s porabo</i> .....	120
9.4.3	<i>Koncept virtualne elektrarne</i> .....	121
9.5	<b>POMEN IKT TEHNOLOGIJ V PAMETNIH OMREŽIJH</b> .....	122
9.5.1	<i>Komunikacijska infrastruktura v distribucijskih omrežjih</i> .....	122
9.5.2	<i>Informacijsko-komunikacijski sistem za pametna omrežja</i> .....	122
<b>10</b>	<b>MEHANSKI PARAMETRI VODOV</b> .....	<b>125</b>
10.1	<b>MEHANSKE LASTNOSTI SNOVI</b> .....	125
10.1.1	<i>Raztezanje daljnovidne vrvi</i> .....	125
10.1.2	<i>Parametri daljnovidne vrvi</i> .....	126
10.1.3	<i>Dodatno zimsko breme</i> .....	129
10.2	<b>POVESNA VERIŽNICA</b> .....	129
10.2.1	<i>Poenostavljena enačba verižnice</i> .....	132
10.3	<b>KLASIČNA POLOŽAJNA ENAČBA</b> .....	133
10.4	<b>KRITIČNA RAZPETINA IN KRITIČNA TEMPERATURA</b> .....	135
10.4.1	<i>Kritična razpetina</i> .....	135
10.4.2	<i>Kritična temperatura</i> .....	136
10.5	<b>VARNOSTNE VIŠINE, VARNOSTNE RAZDALJE IN VARNOSTNI RAZMIKI</b> .....	137
	<b>LITERATURA</b> .....	<b>139</b>





## 1 Struktura elektroenergetskih omrežij

Električna energija je ena izmed najbolj fleksibilnih oblik energije in brez nje si težko predstavljamo sodoben način življenja. Elektroenergetsko omrežje se je razvilo v učinkovit in zanesljiv sistem za izmenjavo električne energije, ki med seboj povezuje različne proizvodne vire in različne porabnike električne energije.

Glavna dejavnika razvoja omrežij sta že od njihovega začetka predvsem naraščanje porabe električne energije in zahteve po vse bolj kakovostni oskrbi z električno energijo. V sodobnem času na razvoj omrežij pomembno vpliva zlasti večanje deleža obnovljivih virov, v bližnji prihodnosti pa lahko pričakujemo tudi znaten vpliv električne mobilnosti.

Elektroenergetsko omrežje je posrednik pri prenosu električne energije od mest proizvodnje do mest uporabe. V nadaljevanju bo na splošno opisana zasnova elektroenergetskih omrežij [1].

### 1.1 Delitev elektroenergetskih omrežij

Električna omrežja na splošno delimo po:

- nazivnih napetostih,
- funkcijah, ki jih v elektroenergetskem sistemu opravljajo, in
- strukturah ali konfiguracijah pri normalnem obratovanju ter ob okvarah.

#### 1.1.1 Nazivne napetosti

Za vsako omrežje sta značilni nazivna napetost, po kateri se omrežje imenuje, in najvišja obratovalna napetost, ki v normalnih obratovalnih pogojih ne sme biti prekoračena. Omrežja nizke napetosti (NN) obsegajo napetosti do 1 kV, omrežja srednje napetosti (SN) napetostne nivoje med 1 kV in 35 kV, omrežja visoke napetosti (VN) pa napetosti nad 35 kV (v Sloveniji do 400 kV). V tabeli 1.1 vidimo obstoječe nivoje nazivnih in najvišjih obratovalnih napetosti. Vse napetosti so podane z efektivno vrednostjo medfazne napetosti.

Tabela 1.1: Nazivne in najvišje obratovalne napetosti

Nazivna napetost (kV)	3	6	10	20	35	60	110	220	400
Najvišja obratovalna napetost (kV)	3,6	7,2	12	24	38	72,5	123	245	420

V NN omrežjih se najpogosteje uporablja nazivna napetost 0,4 kV. Na SN nivoju so napetosti 3 kV in 6 kV namenjene posebnim obratovalnim postrojem v industriji, rudarstvu in določenim proizvodnim virom, napetostni nivo 60 kV je v Sloveniji v celoti opuščena, opuščena pa se tudi napetostni nivo 35 kV. Mestna kabelska omrežja obratujejo na 10 kV ali 20 kV, nadzemna distribucijska omrežja (nadzemni vodi) pa navadno na 20 kV. Napetostni nivo 10 kV se počasi nadgrajuje na 20 kV. Na VN nivoju so v uporabi napetosti 110 kV, 220 kV in 400 kV, pri čemer prevladuje tendenca po nadgradnji napetostnega nivoja 220 kV na 400 kV.

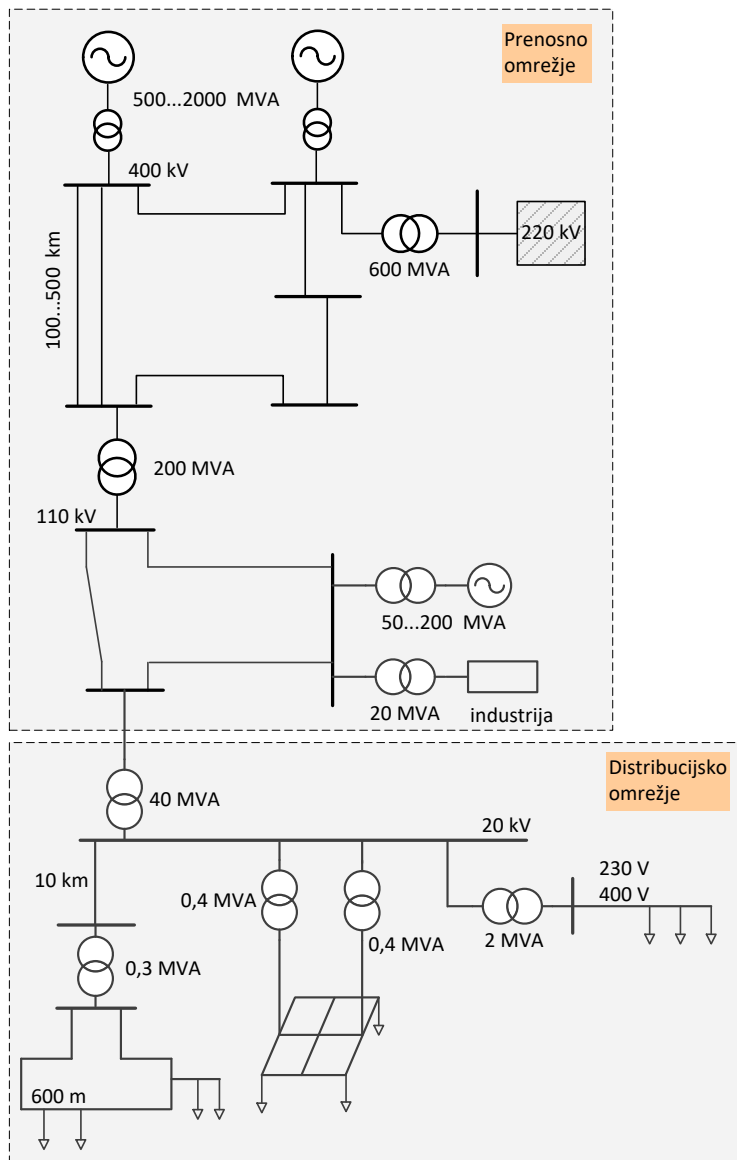
#### 1.1.2 Funkcije omrežja

Omrežja po funkciji ločimo na prenosna, distribucijska in porabniška. Osnovna struktura prenosnega in distribucijskega omrežja je prikazana na sliki 1.1, kjer so označene tudi okvirne moči proizvodnih virov, tipične velikosti transformatorjev in dolžine vodov na posameznih napetostnih nivojih.

Prenosno omrežje (v Sloveniji obsega nazivne napetosti 110 kV, 220 kV in 400 kV) služi prenosu električne energije na večje razdalje in povezuje centre proizvodnje energije s centri porabe. Njegova glavna naloga je zagotavljanje neprekinjene dobave električne energije z ustreznim nivojem kakovosti. Omrežje je zazankano in centralno vodeno. V veliki meri je avtomatizirano, omogoča daljinsko vodenje elementov omrežja in je

dobro pokrito z merilno infrastrukturo. Vsi obratovalni podatki se zbirajo v enem ali več centrih vodenja, od koder se nadzira in krmili delovanje celotnega sistema. Sistemske storitve, ki se izvajajo v okviru prenosnega omrežja so:

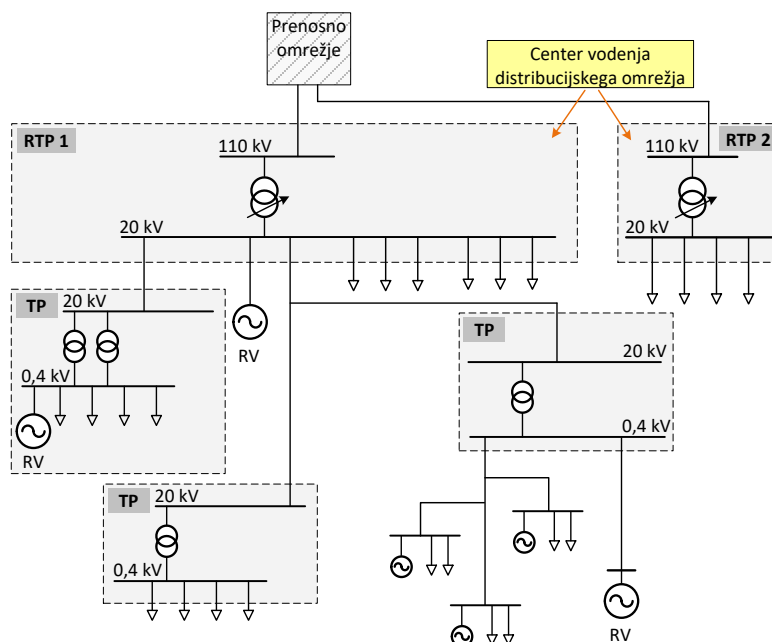
- regulacija napetosti,
- regulacija frekvence,
- zagotavljanje rezerv (pokrivanje odstopanj),
- pokrivanje izgub v omrežju,
- vodenje obratovanja in
- zagon omrežja po razpadu.



Slika 1.1: Osnovna struktura elektroenergetskega omrežja

Klasična distribucijska omrežja se napajajo iz prenosnega omrežja in energijo razdeljujejo porabnikom, kar pomeni, da je pretok energije v teh omrežjih enosmeren – od centrov proizvodnje do porabnikov. V distribucijskih omrežjih se izvajajo sistemske storitve vodenja, regulacije napetosti, pokrivanja izgub in zagona omrežja po razpadu. Posamična distribucijska omrežja so tudi centralno vodena, kar obsega zajemanje podatkov o stanju omrežja, preklope v omrežju ob izrednih stanjih ali zaradi optimizacije obratovanja in regulacijo napetosti.

Za sodobna elektroenergetska omrežja je značilen predvsem velik delež razpršenih virov električne energije, to je majhnih virov, ki so priključeni v distribucijska omrežja in lahko močno vplivajo na njihovo delovanje. Poenostavljeno shemo distribucijskega omrežja, kot ga imamo danes, prikazuje slika 1.2.



Slika 1.2: Poenostavljena shema sodobnega distribucijskega omrežja

Distribucijsko omrežje je s prenosnim povezano prek razdelilnih transformatorskih postaj (RTP-ji), kjer se opravlja transformacija napetosti z VN nivoja na SN nivo, preko izvodov pa se napajajo porabniki, ki so navadno razporejeni po širokem geografskem področju. Iz RTP-ja se napajajo transformatorske postaje (TP-ji), kjer se vrši transformacija napetosti na NN nivo. Iz TP-ja so napajani NN odjemalci. V distribucijskih omrežjih so na SN in NN nivoju priključeni tudi razpršeni viri (RV) električne energije. Na področju distribucije so RTP-ji navadno relativno dobro avtomatizirani in omogočajo daljinsko vodenje elementov omrežja. V RTP-jih se izvajajo tudi meritve električnih parametrov. Izven RTP-jev je na voljo manj meritev in podatkov o stanju omrežja. Izjema so sodobni števeci električne energije, ki omogočajo avtomatsko odčitavanje porabe posamičnega odjemalca.

Porabniška omrežja so omrežja pri samem uporabniku (ta je na primer gospodinjstvo ali industrijski odjemalec) in jih tudi upravlja ter vzdržuje uporabnik sam.

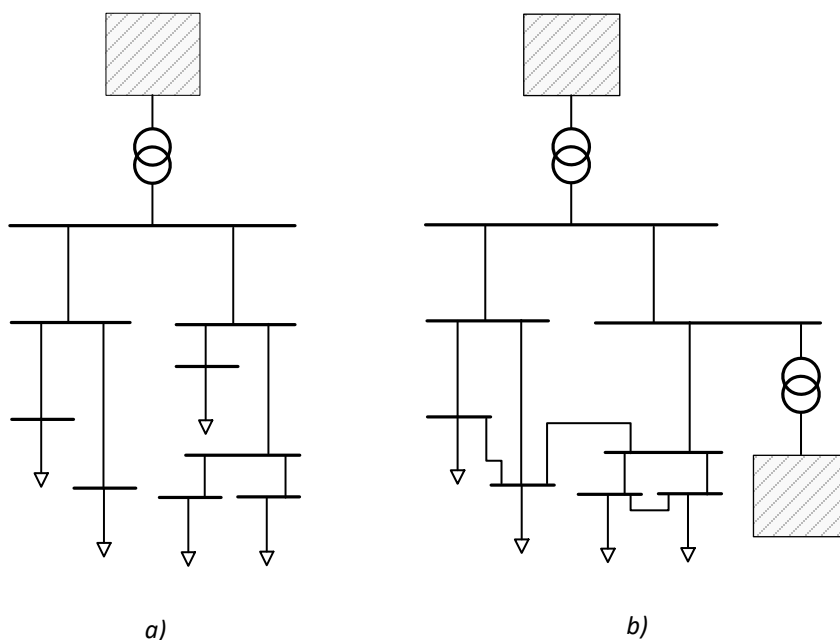
### 1.1.3 Struktura omrežja

Po strukturi na splošno delimo elektroenergetska omrežja na omrežja zaprtega tipa (zazankana omrežja) in omrežja odprtega tipa (radialna omrežja). V zazankanih omrežjih je prenos energije mogoč po dveh ali več prenosnih poteh (vodih), pri radialnih omrežjih pa samo po eni poti. Prenosna omrežja so praviloma zazankana, distribucijska omrežja na SN nivoju pa so pogosto izvedena v obliki odprte zanke, torej zanke, ki je v normalnih obratovalnih pogojih razklenjena in se sklene v primeru potrebe po spremembi topologije omrežja. Porabniška omrežja so lahko radialna ali zazankana; slednja najdemo zlasti v industrijskih porabniških omrežjih.

Primeri radialnega omrežja (z enim virom) in zazankanega omrežja (z več viri) sta prikazana na sliki 1.3. Pri radialnih omrežjih (slika 1.3 a) se porabniki vedno napajajo le z ene strani. Slabost teh omrežij je, da v primeru okvare na vodu in posledičnem izklopu voda vsi porabniki na tem vodu ostanejo brez napajanja. Pretoki moči so v teh tipih omrežij odvisni le od bremen in jih ni težko določiti.

Za razliko od radialnih omrežij so pri zazankanih omrežjih (slika 1.3 b) posamezni elementi postrojev med seboj večkratno povezani, zaradi česar nastanejo v omrežju zanke. Porabniki, ki so priključeni v tako omrežje,

imajo možnost napajanja z več strani in so ob morebitnih izpadih določenih povezav še vedno oskrbovani z električno energijo. Pretoki moči v tovrstnih omrežjih niso odvisni le od bremen, temveč tudi od topologije omrežja in električnih parametrov vodov, ki so prisotni v zanki.



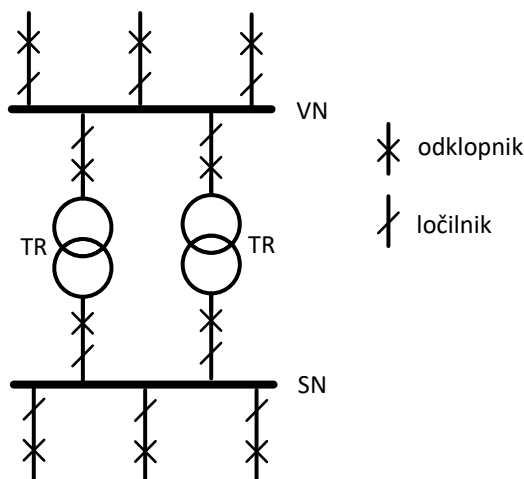
Slika 1.3: Struktura omrežja: a) radialno in b) zazankano omrežje

### 1.1.3.1 Stikalne postaje

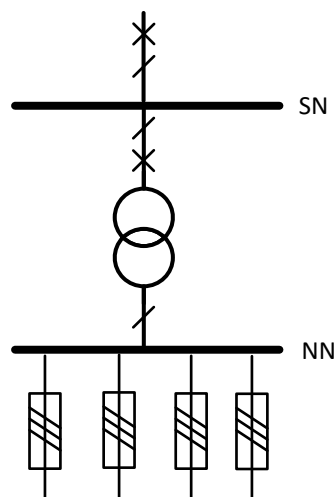
Stikalne postaje so mesta v elektroenergetskem omrežju, kjer se vršijo stikalni manevri za stikanje in ločevanje tokokrogov, transformacija med napetostnimi nivoji in tudi regulacija napetosti. Na teh mestih sta prisotni tudi merilna in zaščitna oprema za selektivno izločanje okvar. Tipi stikalnih postaj, ki jih srečujemo, so zlasti:

- razdelilna transformatorska postaja (RTP),
- razdelilna postaja (RP) in
- transformatorska postaja (TP).

Razdelilna transformatorska postaja (RTP) je prikazana na sliki 1.4. RTP je povezan z več vodi prenosnega in distribucijskega omrežja. Prisotno je stikališče na vsaj dveh napetostnih nivojih, ki sta povezana preko transformatorjev, vode in transformatorje pa se lahko priklaplja in odklapija s pomočjo stikalnih elementov (odklopniki in ločilke).



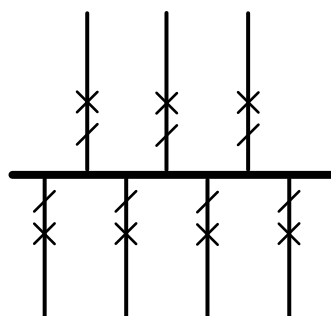
Slika 1.4: Razdelilna transformatorska postaja (RTP)



Slika 1.5: Transformatorska postaja (TP)

Transformatorska postaja je prikazana na sliki 1.5. Uporablja se za napajanje v NN omrežjih, napaja pa jo SN vod. V postaji se s transformatorjem vrši transformacija na nižje napetostne nivoje, kjer je, navadno preko varovalk, priključenih več porabniških izvodov.

Razdelilna postaja (RP) je prikazana na sliki 1.6. RP povezuje več vodov na istem napetostnem nivoju. V RP imamo stikališče, kjer lahko vežemo vode v različne kombinacije.



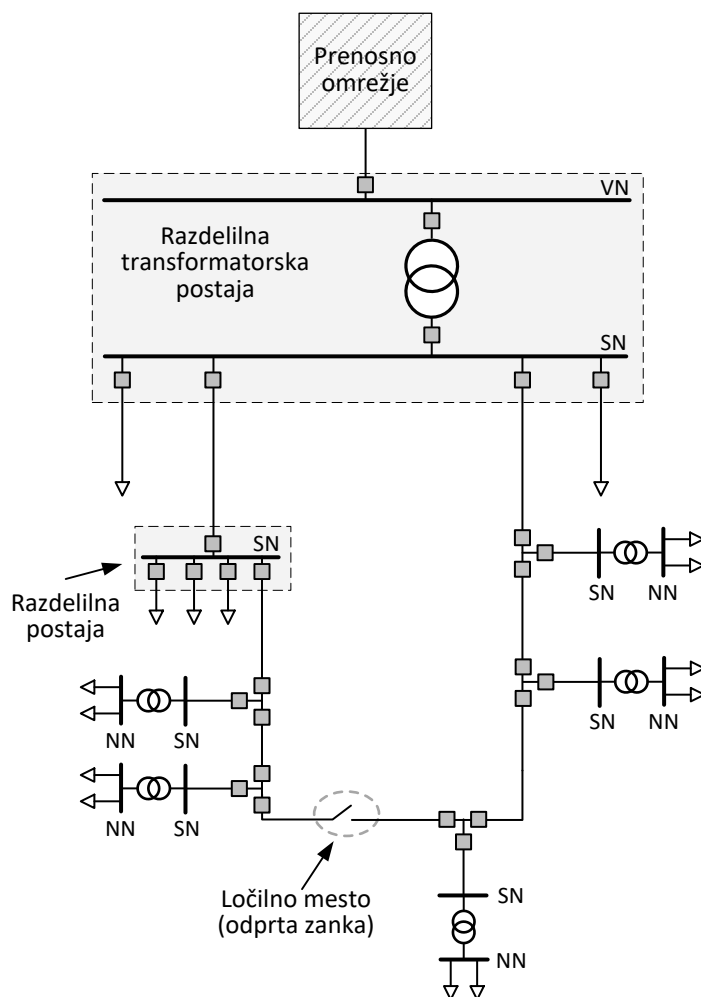
Slika 1.6: Razdelilna postaja – RP

### 1.1.3.2 Struktura prenosnega in distribucijskega omrežja

Prenosna omrežja so običajno zazankana, kar zagotavlja visoko varnost obratovanja in nemoteno oskrbo porabnikov tudi v primeru izpada določenih elementov omrežja (vodov, transformatorjev).

Distribucijska omrežja so pogosto izvedena v obliki odprte zanke, kot je prikazano na sliki 1.7. Tako omrežje vedno obratuje radialno. V normalnem obratovalnem stanju je stikalo ločilnega mesta razklenjeno in vsaka veja zanke obratuje radialno. V primeru okvare v omrežju zaščita odklopi okvarjeni del radialnega voda, stikalo ločilnega mesta pa se sklene in s tem omogoči napajanje porabnikom na neokvarjenem delu voda. Za tak način obratovanja morajo biti vodi seveda ustrezno dimenzionirani, in sicer tako, da je njihova prenosna zmogljivost zadostna tudi v primeru napajanja dodatnih porabnikov. V sodobnih distribucijskih omrežjih je prisotna tudi težnja po zazankanem obratovanju, ki omogoča višjo zanesljivost oskrbe.

Omrežja lahko delimo tudi na nadzemna in kabelska. Kabelska omrežja so običajno bolj zanesljiva od nadzemnih, saj niso izpostavljena atmosferskim in okoljskim vplivom, so pa zaradi cen kabelskih vodnikov in cene vgradnje dražja. Na tem mestu velja izpostaviti tudi, da je odprava okvar na nadzemnih omrežjih lažja in hitrejša, predvsem zaradi hitrejšega odkrivanja mesta okvare in lažje dostopnosti voda. Kabelska omrežja se glede na tehnološke zahteve in cene pogosto uporabljajo na SN in NN nivoju, redkeje pa na VN nivoju.



Slika 1.7: Distribucijsko omrežje na SN nivoju

### 1.1.3.3 Lastnosti radialnih in zazankanih omrežij

Zazankana omrežja so obratovalno zanesljivejša od odprtih predvsem zato, ker lahko porabniki po izpadu enega voda dobijo električno energijo po drugih poteh. Zaradi napajanja po dveh ali več smereh so tudi napetostne razmere običajno boljše kot v odprtih omrežjih. Poleg tega se takšna omrežja lažje prilagajajo rastočim obremenitvam kot radialna omrežja. Potrebno pa je opozoriti, da se lahko izkažejo celo kot manj zanesljiva od omrežij odprtega tipa, kar velja v primeru nepravilne koordinacije zaščite. Prednosti zazankanih omrežij so zlasti:

- večja obratovalna zanesljivost in
- nižje izgube.

Pomanjkljivosti pa so:

- bistveno težja koordinacija zaščite in
- težje odkrivanje mesta okvare.

Glavne prednosti radialnega tipa omrežij so tako predvsem:

- preglednost in enostavnost omrežja,
- enostavno odkrivanje mesta napake,
- nizke kratkostične moči zaradi enostranskega napajanja in
- enostavna zaščita vodov.

Pomanjkljivosti pa so:

- nižja obratovalna zanesljivost,
- večje izgube kot pri dvostranskem napajanju.

## 1.2 Ozemljevanje v elektroenergetskih omrežjih

Ozemljitve so pomembne za ustrezno delovanje elektroenergetskega sistema [1], [2]. Glavne naloge ozemljitev so zagotoviti varnost ljudi, ki pridejo v stik z napravami, zaščita elementov elektroenergetskega omrežja in zagotavljanje kakovosti obratovanja. V elektroenergetskih omrežjih ozemljujemo ničlišča transformatorjev in prevodna ohišja naprav.

Glede na način vključitve ozemljitve v elektroenergetski sistem ločimo:

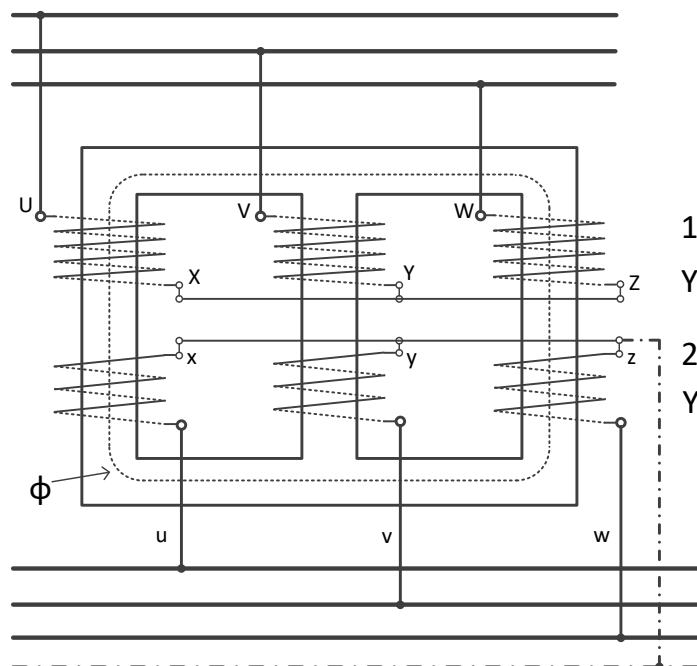
- zaščitne ozemljitve,
- obratovalne ozemljitve in
- strelovodne ozemljitve.

Zaščitne ozemljitve niso vezane na obratovalni električni tokokrog, ampak na izolirane dele naprav, kjer se lahko zaradi poškodbe izolacije pojavi nevarna napetost. Zaščitna ozemljitev spaja z zemljo tiste prevodne dele naprav, ki ne pripadajo tokokrogu in pridejo z njim v galvansko zvezo samo ob okvari.

Obratovalna ozemljitev je ozemljitev kovinskih delov, ki pripadajo tokokrogu električnega postroja. Izvede se direktno, preko ohmske upornosti ali preko resonančne dušilke.

Strelovodna ozemljitev je ozemljitev za odvajanje električnega toka, ki ga povzroči atmosferska razelektritev. S tem poskrbimo za zaščito pred strelo.

Načini ozemljevanja nevtralne točke transformatorjev (primer prikazuje slika 1.8) v omrežjih visoke oziroma srednje napetosti močno vplivajo na nične impedance omrežja, s tem pa tudi na velikost tokov in napetosti, ki se v omrežju pojavijo ob različnih okvarah. Zgodovinski razvoj omrežij kaže, da se je običajno prehajalo z neozemljenega zvezdišča na ozemljene sisteme, bodisi direktne ali takšne s posredno ozemljitvijo.



Slika 1.8: Ozemljitev ničlišča transformatorja



V praksi so uveljavljeni sledeči načini ozemljevanja nevtralne točke:

- direktna ozemljitev,
- ozemljitev preko nizkoohmskega upora,
- izolirano zvezdišče in
- ozemljitev preko resonančne dušilke (Petersenova dušilka).

Način ozemljevanja nevtralne točke transformatorja vpliva v prvi vrsti na velikost kratkostičnih tokov v omrežju in na velikost stacionarnih ter prehodnih prenapetosti. Posredno ima vpliv tudi na delovanje zaščite, segrevanje vodnikov in ozemljil ter napetost dotika, pa seveda tudi na kakovost oskrbe z električno energijo.

Z vidika načrtovanja in nastavljanja zaščitnih sistemov so pomembni predvsem nesimetrični kratki stiki zaradi njihove največje pogostosti. Največje vrednosti kratkostičnih tokov sicer dobimo v primeru simetričnega kratkega stika, vendar taka vrsta okvare nastopi relativno redko. Najpogostejši so enofazni kratki stiki; statistike dogodkov na primeru SN omrežij kažejo, da je od vseh okvar na omrežju takšnih okoli 60 % zemeljskih stikov. Ozemljitev nevtralne točke ne vpliva na razmere ob trifaznem kratkem stiku in ob dvofaznem kratkem stiku brez dotika z zemljo. Zaradi tega se pri analizi osredotočamo na primere dvofaznega kratkega stika z dotikom z zemljo in na enofazni zemeljski stik.

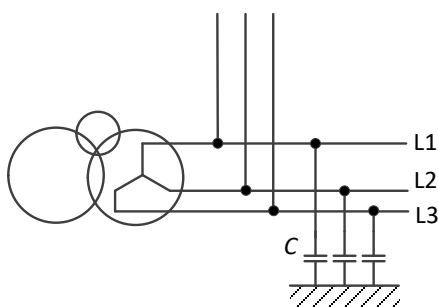
Najbolj razširjeno in splošno uporabljeno orodje za analizo nesimetričnih stanj sistema predstavljajo simetrične komponente. Z digitalnimi simulacijami je možno z veliko natančnostjo predvideti porazdelitev napetosti in določiti pretoke tokov ob prehodnih pojavih ter na podlagi teh podatkov izbrati najprimernejše vrednosti za parametrisiranje zaščite.

### 1.2.1 Ozemljevanje prenosnega in distribucijskih omrežij

V nadaljevanju je za lažjo primerjavo med posameznimi rešitvami podan kratek pregled značilnosti posameznih vrst ozemljevanja nevtralne točke. Pri tem smo poudarili predvsem lastnosti v povezavi z enofaznim zemeljskim stikom. Glede na vrsto ozemljitve prihaja v omrežju do različnih prenapetosti in različnih prehodnih pojavov. Od vrste ozemljitve nevtralne točke transformatorja je odvisna tudi uspešnost odkrivanja mesta nastanka zemeljskega stika. Na podlagi faznih tokov, faznih napetosti, ničnih napetosti in tokov je potrebno parametrirati zaščitne naprave, ki morajo zagotavljati zanesljivo in selektivno odpravljanje okvar.

#### 1.2.1.1 Obratovanje z izolirano nevtralno točko

Prednost omrežij z izolirano nevtralno točko (slika 1.9) so majhni zemeljskostični toki, zaradi katerih v veliko primerih pride do samougasnitve električnega obloka na mestu okvare (v primeru nadzemnih vodov). Izključitev dela omrežja ob zemeljskem stiku torej ni potreben. Sistem lahko obratuje tudi z zemeljskim stikom ene faze. Obratovanja z okvaro v praksi ne priporočamo, saj se zaradi prenapetosti (približno  $1,8 U_f$ ) poveča nevarnost preboja izolacije v zdravih fazah, pri čemer bi prišlo do dvojnega zemeljskega stika in velikih termičnih obremenitev vgrajenih elementov. Zaradi nastanka razmeroma visokih stacionarnih prenapetosti je potrebno ustrezno izbrati nivo izolacije in njeno kakovost tudi redno preverjati, kar je še posebej pomembno pri kabljskih omrežjih.



Slika 1.9: Izolirano zvezdišče transformatorja (prikazane so še dozemne kapacitivnosti voda)

Ob zemeljskih stikih pri izoliranem zvezdišču v omrežju na mestu okvare teče samo kapacitivni tok, ki je v majhnih ali pretežno nadzemnih omrežjih razmeroma majhen. Z večanjem omrežij, predvsem pa s prehodom dela omrežja na kabela omrežja, se kapacitivni zemeljskostični tok poveča in preseže vrednosti, pri katerih je še zagotovljeno samougašanje obločnih zemeljskih stikov. Prihajati začne do intermitirajočih (ponavljajočih se) kratkih stikov, ki lahko povzročijo visoke tranzientne prenapetosti. Te prenapetosti lahko dosežejo zelo visoke vrednosti, najbolj pogoste vrednosti pa so med 300 % in 350 % nazivne vrednosti. Posledično se lahko pojavijo dvojni zemeljski stiki. Stacionarne prenapetosti dosežejo 190 % nazivne vrednosti (približno 10 % več od medfazne napetosti). Možne so tudi prenapetosti zaradi feroresonance in nesimetrije omrežja oziroma izklopa velikih induktivnosti ali kapacitivnosti, vendar so redke. Poškodbe omrežja na mestu okvare so zaradi majhnih zemeljskostičnih tokov majhne. Iz istega razloga je razmeroma enostavno ustrezno urediti zaščito pred previsoko napetostjo dotika in koraka.

Kapacitivni tok lahko v sistemu z izolirano nevtralno točko transformatorja steče samo preko dozemnih kapacitivnosti zdravih faz. Zaradi zelo majhnih zemeljskostičnih tokov je težko izvesti detekcijo okvare. Selekcioniranje okvare se lahko zagotovi samo s časovnimi zakasnitvami karakteristik. V slovenskih srednjenapetostnih sistemih z izolirano nevtralno točko se uporablja smerna zemeljskostična zaščita izvodov, pri kateri se ugotavlja kot med nično komponento napetosti  $3U_0$  in nično komponento toka  $3I_0$ .

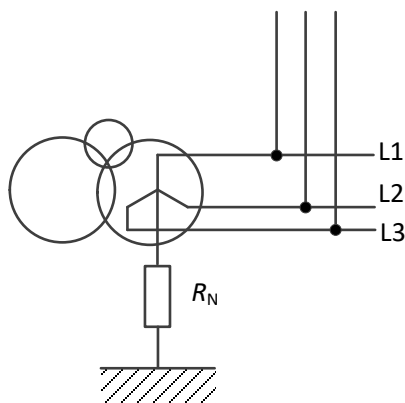
Obratovanje omrežja je enostavno, nekaj težav torej predstavlja le ustrezna detekcija zemeljskih stikov, ki pa jo je možno rešiti z ustrezno zaščito oziroma signalizacijo.

Investicijski stroški za izvedbo ozemljitve so majhni oziroma jih ni.

#### 1.2.1.2 Obratovanje z nizkoohmsko ozemljitvijo

Pri ozemljitvi omrežja preko nizkoohmskega upora (slika 1.10) ne srečamo nobenih tehničnih omejitev, kot jih na primer pri izolirani nevtralni točki predstavlja majhen okvarni tok. Poleg kapacitivnega je prisoten tudi ohmski tok, ki se prišteje kapacitivnemu, s katerim skupaj tvorita tok kratkega stika.

Zaradi povezave nevtralne točke z zemljo preko upora so tudi vsi prehodni pojavi bolj dušeni. Tako lahko pričakujemo nižje prenapetosti kot pri omrežjih z izolirano nevtralno točko in resonančno ozemljenih omrežjih. Pričakovane prehodne prenapetosti lahko dosežejo vrednosti do 250 % nazivne vrednosti, stacionarne prenapetosti pa do 180 % nazivne vrednosti.



Slika 1.10: Obratovanje z nizkoohmsko ozemljitvijo

Zemeljskostični tok je v primeru ozemljitve z nizkoohmskim uporom razmeroma velik. Posledično se lahko pojavijo večje poškodbe na mestu okvare. Veliki tokovi ob pojavu enofaznega zemeljskega stika, ki so posledica velikih kapacitivnih tokov, tudi otežijo parametrisiranje zaščitnih naprav v okviru varnostnih standardov. Pri velikih tokovih in slabih ozemljitvah lahko nastane tudi nevarna napetost dotika ali koraka. Po drugi strani pa večji okvarni tok olajša njegovo odkrivanje in s tem zaščito pred njim. Mora pa zaščita v vseh primerih (tako pri trajnih kot pri prehodnih zemeljskih stikih) izklopiti vod, v katerem se okvara pojavi, zaradi česar je dobava električne energije porabnikom motena večkrat kot pri omrežjih z izolirano nevtralno točko in resonančno ozemljenih omrežjih.

Obratovanje omrežja je razmeroma enostavno, saj ozemljitvenega upora ni potrebno prilagajati velikosti omrežja, torej tudi regulacija ni potrebna. Nekaj težav lahko predstavlja samo uporaba zaščitnih relejev za nični tok, vendar pa so te rešitve še vedno bolj enostavne od zaščite omrežij z resonančno ozemljitvijo.

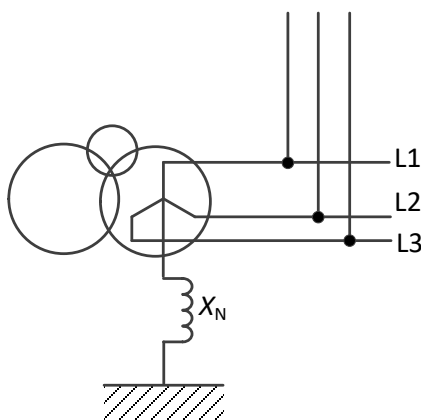
Prednost preko maloohmskega upora ozemljene nevtralne točke transformatorja je stabilen električni oblok, s čimer je onemogočen pojav večkratnega zemeljskega stika. Višji tok okvare zagotavlja selektivnost izklopa okvarjenega voda. Slabost pa predstavljajo ostreje zahteve pri načrtovanju ozemljitev in izključitev odvoda ob vsakem enofaznem kratkem stiku. Slednje je še posebej neugodno, ker določeno število ali določena vrsta okvar povzročita nepotrebne izpade dobave električne energije.

Investicijski stroški so večji kot pri omrežjih z izolirano nevtralno točko, vendar pa precej manjši kot pri uporabi kompenzacijske dušilke. Nekaj večja investicija je potrebna samo v primeru, ko se izbere večja vrednost okvarnega toka in so pogoji ozemljevanja razmeroma slabi (velike vrednosti upornosti tal).

Omenimo naj, da je v slovenskem distribucijskem omrežju najbolj razširjen sistem ozemljevanja ravno sistem z nizkoohmskim uporom.

### 1.2.1.3 Obratovanje z resonančno ozemljeno nevtralno točko

Ozemljitev nevtralne točke preko resonančne dušilke (slika 1.11) omogoča zmanjševanje kapacitivnega dela toka enofaznega zemeljskega stika. Omrežje z resonančno ozemljenim zvezdiščem se v precej primerih obnaša enako kot omrežje z izoliranim zvezdiščem. Podobne so tudi poškodbe na mestu okvare, povzročene z zemeljskostičnim tokom. Enako velja tudi za prenapetosti, ki se lahko pojavijo tako zaradi nastanka zemeljskega stika kot tudi zaradi njegovega izklopa. Dejanski tok enofaznega zemeljskega stika je odvisen samo od točnosti nastavitve resonančne dušilke in njene krmilne elektronike. Pri idealno uglašeni dušilki imamo opravka le s preostalim tokom zemeljskega stika, ki znaša od 5 % do 10 % kapacitivnega toka omrežja. Termična obremenitev sistema pri enofaznih stikih je zaradi majhnih tokov majhna. Izolacija mora biti dimenzionirana na medfazno vrednost napetosti ali višje.



Slika 1.11: Obratovanje z resonančno ozemljeno nevtralno točko

Prednost resonančno ozemljenega omrežja pred tistim z izolirano nevtralno točko je v razmeroma majhnih zemeljskostičnih tokovih tudi pri velikih omrežjih, kar dosežemo z ustrezno kompenzacijo kapacitivnosti omrežja. Posledično je lažje doseči samougasljivost električnega obloka na mestu okvare, s čimer se zmanjša število okvar v omrežjih, kjer je potreben izklop dela omrežja (pri nadzemnih vodih). Prednost je tudi, da nastanek intermitirajočih zemeljskih stikov zaradi povezave nevtralne točke z zemljo preko kompenzacijske dušilke ni možen. Ob nastanku zemeljskega stika so možne prenapetosti od 150 % do 250 % nazivnih vrednosti, ob ugasnitvi električnega obloka na mestu okvare pa lahko računamo na povratne prenapetosti velikosti do 170 % nazivne vrednosti.

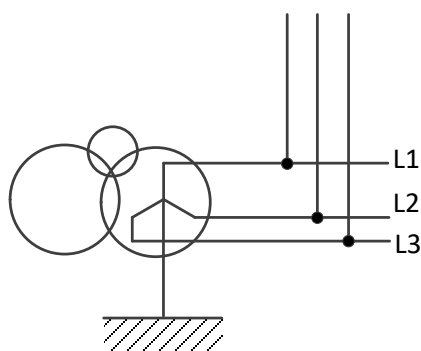
Težave pri prehodu na resonančno ozemljitev bi se najprej pojavile pri načinu delovanja zaščitnih naprav. Okvarni tokovi so zelo majhni, zato je težko selekcionirati mesto okvare. Kot kriterij odpade smer toka zemeljskega stika, saj je odvisen od stopnje kompenziranja kapacitivnega toka. Za zaščito omrežja je zato potrebno uporabiti ustrezne (bolj kompleksne) zaščitne principe oz. naprave.

### 1.2.1.4 Obratovanje z direktno ozemljitvijo

Tehnične meje uporabe direktne ozemljitve nevtralne točke (slika 1.12) so podane z velikostjo nevarnih napetosti dotika ali koraka, ki se lahko zaradi velikih zemeljskostičnih tokov pojavijo v bližini ozemljil.

Pri tej vrsti ozemljitve so vsi prehodni pojavi najbolj dušeni, tako da so tudi prenapetosti, ki se v teh omrežjih pojavljajo, najmanjše. Pričakujemo lahko prehodne prenapetosti do 200 % nazivne vrednosti in stacionarne prenapetosti do 140 % nazivne vrednosti napetosti. Ker se v primeru direktne ozemljitve pojavljajo veliki zemeljskostični toki, so lahko poškodbe na mestu okvare velike.

Obratovanje in vzdrževanje omrežja je enostavno. Zaščita omrežja je podobna kot v primeru ozemljitve preko nizkoohmskega upora, vendar pa je število prehodnih okvar manjše (zaradi velikega okvarnega toka veliko prehodnih okvar preide v trajne). Investicijski stroški niso veliki, saj zajemajo le stroške ustreznega ozemljila.



Slika 1.12: Obratovanje z direktno ozemljitvijo

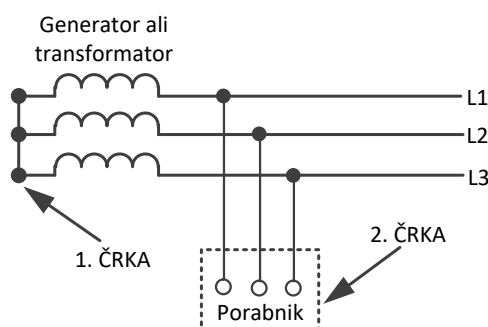
### 1.2.2 Ozemljitveni sistemi v porabniških omrežjih

V porabniških omrežjih se poleg oznak za faze vodnikov (L1, L2, L3) uporabljajo tudi naslednje oznake: N (nevtralni vodnik), PE (zaščitni vodnik) in PEN (kombinirani zaščitno nevtralni vodnik).

Sistem označevanja nizkonapetostnih omrežij prikazuje slika 1.13. Ozemljitvene sisteme porabniških omrežij označujemo s črkami, ki opisujejo povezavo nevtralne točke napajalnega transformatorja (1. črka) z električno prevodnim delom uporabniških naprav (2. črka).

Glede na način ozemljitve razlikujemo naslednje sisteme napajalnih omrežij:

- TN sistem (TN-S, TN-C-S in TN-C izvedba),
- TT sistem in
- IT sistem.



Slika 1.13: Sistem označevanja nizkonapetostnih omrežij

Prva črka oznake ozemljitvenega sistema pomeni:

- T – neposredna povezava nevtralne točke transformatorja,
- I – izolirana nevtralna točka transformatorja.

Druga črka oznake ozemljitvenega sistema pomeni:

- T – neposredno ozemljeni prevodni deli električnih naprav,
- N – neposredna električna povezava izpostavljenih prevodnih delov z ozemljeno točko napajane sistema.

Za združevanje oziroma ločevanje funkcije nevtralnega in zaščitnega vodnika poznamo še dodatni oznaki:

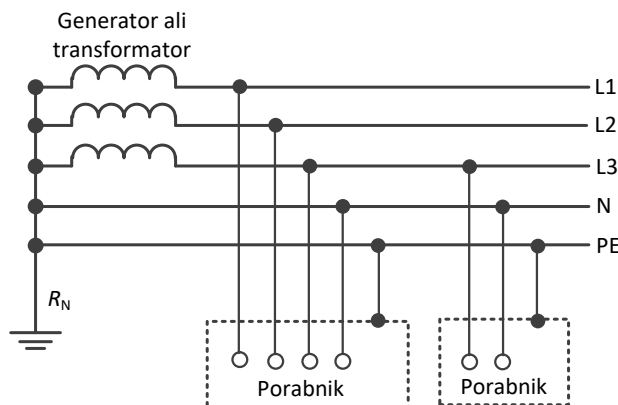
- S – nevtralna in zaščitna funkcija je izvedena z ločenima vodnikoma PE in N,
- C – nevtralna in zaščitna funkcija je združena v enem vodniku (PEN vodniku).

### 1.2.2.1 TN sistem

Pri TN ozemljitvenem sistemu je ničlišče transformatorja neposredno ozemljeno. Izpostavljeni prevodni deli električnih naprav so s to točko povezani preko zaščitnega (PEN) vodnika (slike 1.14, 1.15, 1.16).

#### TN-S sistem

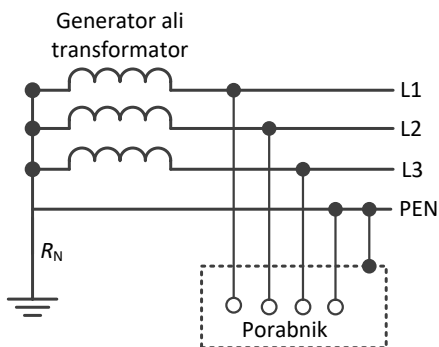
Pri tem ozemljitvenem sistemu sta funkciji nevtralnega in zaščitnega vodnika v celotnem sistemu ločeni na nevtralni (N) in zaščitni (PE) vodnik. Poleg teh dveh vodnikov nastopajo v sistemu še fazni (L) vodniki. V enofaznih tokokrogih imamo trižilni, v trifaznih pa petžilni sistem.



Slika 1.14: Ozemljitveni TN-S sistem

#### TN-C sistem

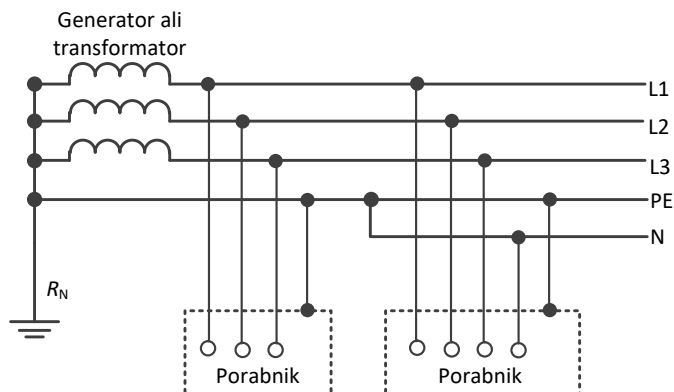
Funkciji nevtralnega in zaščitnega vodnika sta v celotnem sistemu združeni v en PEN vodnik. Opraviti imamo torej s štirižilnim sistemom.



Slika 1.15: Ozemljitveni TN-C sistem

*TN-C-S sistem*

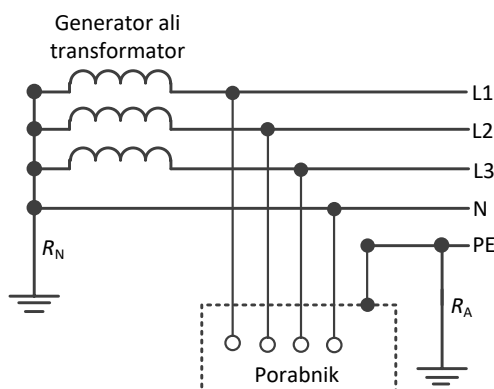
Pri tem ozemljitvenem sistemu imamo kombinacijo TN-C in TN-S sistemov. Nevtralni in zaščitni vodnik sta v delu omrežja združena, v drugem pa ločena. Pri tem velja, da iz TN-C sistema lahko preidemo v TN-C-S sistem, medtem ko obratna pot ni dovoljena. Povedano drugače: po ločitvi PEN vodnika na PE in N vodnik teh ni več dovoljeno združiti v PEN vodnik, ker bi bilo s tem moteno pravilno delovanje diferencialnih (FID) stikal.



Slika 1.16: Ozemljitveni TN-C-S sistem

*1.2.2.2 TT sistem*

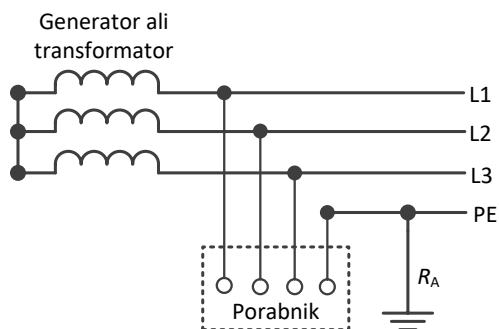
Pri TT sistemu je ena nevtralna točka transformatorja neposredno ozemljena, izpostavljeni prevodni deli električnih naprav pa so vezani na ozemljilo, ki je ločeno od obratovalnega ozemljila (slika 1.17).



Slika 1.17: Ozemljitveni TT sistem

*1.2.2.3 IT sistem*

Pri IT sistemu med faznimi vodniki omrežja in zemljo ni neposredne povezave (slika 1.18). Izpostavljeni prevodni deli električnih naprav so ozemljeni. Ta sistem se uporablja v rudnikih, kemični industriji, elektrarnah ipd.



Slika 1.18: Ozemljitveni IT sistem



## 2 Matematične osnove

V tem poglavju bodo podane osnovne matematične zakonitosti, potrebne za razumevanje tematik, ki jih bomo obravnavali v nadaljevanju. Poudarek bo zlasti na zapisu harmonskih veličin v kompleksnem prostoru in na transformacijah trifaznega sistema v simetrične komponente [1], [3].

### 2.1 Transformacija harmonične funkcije v kompleksno ravnino

#### 2.1.1 Kompleksna števila

Zaradi lažjega razumevanja izpeljav, ki sledijo, bodo v nadaljevanju navedene nekatere osnovne operacije s kompleksnimi števili.

Vsota in razlika dveh kompleksnih števil je podana z naslednjima izrazoma:

$$\begin{aligned}(a + jb) + (c + jd) &= (a + c) + j(b + d), \\ (a + jb) - (c + jd) &= (a - c) + j(b - d).\end{aligned}\tag{2.1}$$

Dve kompleksni števili zmnožimo tako, da pomnožimo vsak člen prvega oklepaja z vsakim členom drugega oklepaja in upoštevamo pravilo  $j^2 = -1$ . To lahko zapišemo z enačbo (2.2):

$$(a + jb)(c + jd) = (ac - bd) + j(ad + bc).\tag{2.2}$$

Pri deljenju kompleksnih števil števec in imenovalac pomnožimo s konjugirano vrednostjo imenovalca (2.3). Konjugirano vrednost kompleksnega števila dobimo tako, da spremenimo predznak pri imaginarnem delu.

$$\frac{a + jb}{c + jd} = \frac{(a + jb)(c - jd)}{(c + jd)(c - jd)} = \frac{(a + jb)(c - jd)}{c^2 + d^2}\tag{2.3}$$

Pri konjugiranju veljajo naslednje zakonitosti:

$$\begin{aligned}(\underline{z} + \underline{w})^* &= \underline{z}^* + \underline{w}^* \\ (\underline{z} \cdot \underline{w})^* &= \underline{z}^* \cdot \underline{w}^* \\ \left(\frac{\underline{z}}{\underline{w}}\right)^* &= \frac{\underline{z}^*}{\underline{w}^*}\end{aligned}\tag{2.4}$$

Absolutno vrednost kompleksnega števila  $\underline{z} = a + jb$  lahko izračunamo na dva načina:

$$\begin{aligned}|\underline{z}| &= \sqrt{a^2 + b^2} \\ |\underline{z}| &= \sqrt{\underline{z} \cdot \underline{\bar{z}}}\end{aligned}\tag{2.5}$$

Za absolutno vrednost kompleksnega števila veljata naslednji dve lastnosti:

$$\begin{aligned}|z \cdot w| &= |z| \cdot |w| \\ \frac{|z|}{|w|} &= \frac{|z|}{|w|}\end{aligned}\tag{2.6}$$

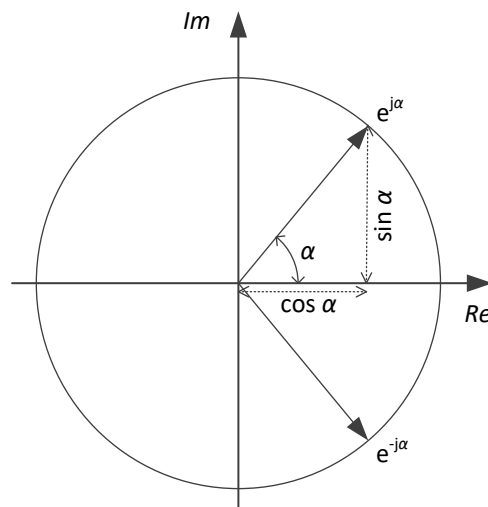
##### 2.1.1.1 Eulerjev obrazec

Povezavo med trigonometričnimi funkcijami in kompleksno eksponencialno funkcijo podaja Eulerjev obrazec, ki ga zapišemo z naslednjo enačbo:

$$e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha,\tag{2.7}$$



pri čemer je  $j$  imaginarna enota,  $e$  pa Eulerjevo število ( $\approx 2,71828$ ). Vsakemu kompleksnemu številu  $e^{j\alpha}$  pripada v kompleksni ravnini točka na krožnici polmera 1 (slika 2.1).



Slika 2.1: Prikaz kompleksnega števila v kompleksni ravnini

Eulerjev obrazec lahko zapišemo tudi za konjugirano kompleksno število kot  $e^{-j\alpha} = \cos \alpha - j \sin \alpha$ . Realni del kompleksnega števila je:

$$\operatorname{Re}[e^{\pm j\alpha}] = \cos \alpha = \frac{1}{2}(e^{j\alpha} + e^{-j\alpha}). \quad (2.8)$$

V elektrotehniki se za imaginarno enoto vedno uporablja črka  $j$  in ne  $i$ , s čimer preprečimo zamenjavo z oznako za tok.

### 2.1.2 Transformacija harmonične funkcije

Na sliki 2.2 je predstavljena harmonična funkcija napetosti  $u(t)$ . Zapišemo jo lahko na naslednji način:

$$u(t) = \hat{u} \cos(\omega t + \varphi_u), \quad (2.9)$$

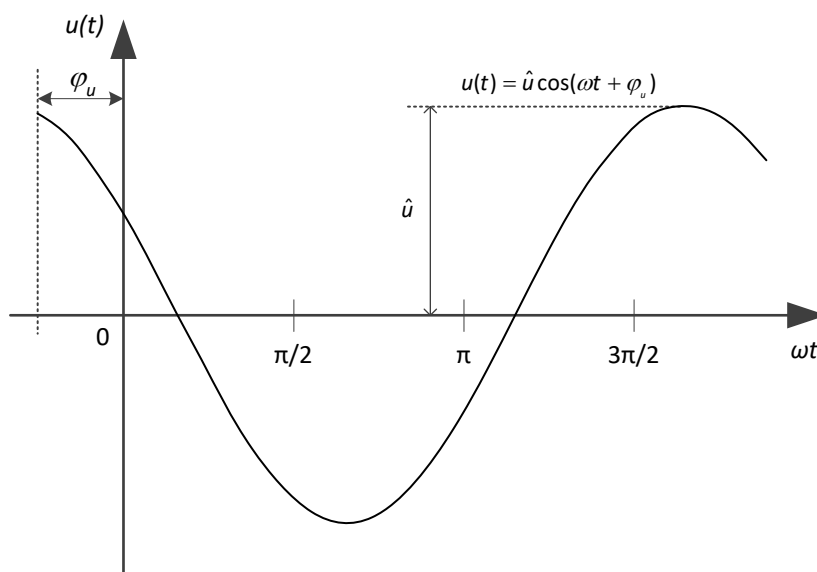
pri čemer je:

- $u(t)$  trenutna vrednost napetosti,
- $\hat{u}$  amplituda (temenska vrednost) harmonične napetosti,
- $\omega = 2\pi f = 2\pi / T$  krožna frekvenca, kjer je  $f$  frekvenca in  $T$  perioda harmonične funkcije in
- $\varphi_u$  fazni zamik glede na čas  $t = 0$ .

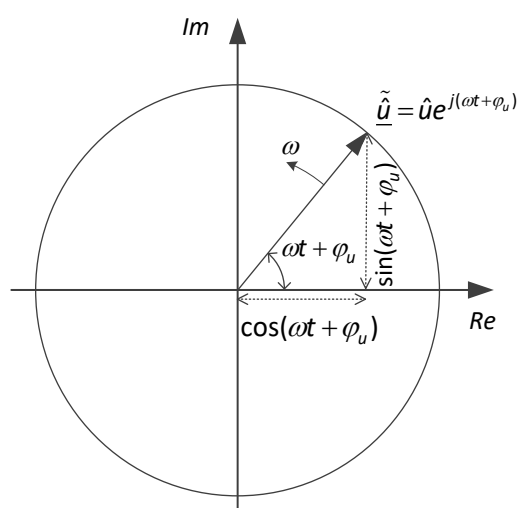
Napetost, izraženo z enačbo (2.9), v kompleksni ravnini zapišemo kot kompleksni vrteči se kazalec  $\tilde{\underline{u}}$ , ki se vrti s kotno hitrostjo  $\omega$ :

$$\begin{aligned} \tilde{\underline{u}} &= \hat{u} e^{j(\omega t + \varphi_u)} = \hat{u} (\cos(\omega t + \varphi_u) + j \sin(\omega t + \varphi_u)) \\ \underline{\tilde{u}} &= \hat{u} e^{j\omega t} e^{j\varphi_u} = \hat{u} e^{j\omega t} (\cos \varphi_u + j \sin \varphi_u) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Vrteči se kazalec prikazuje slika 2.3.



Slika 2.2: Časovni potek harmonske funkcije napetosti



Slika 2.3: Vrteči se kazalec v kompleksni ravnini

Napetost  $u(t)$  v časovnem prostoru (enačba (2.9)) lahko zapišemo kot:

$$u(t) = \operatorname{Re}[\tilde{\underline{u}}] = \operatorname{Re}[\hat{u} e^{j(\omega t + \varphi_u)}]. \quad (2.11)$$

Če opazujemo vrteči kazalec v času  $t=0$ , dobimo mirujoči kazalec (fazor), ki ga označimo z  $\underline{\hat{u}}$ , njegovo amplitudo pa z  $\hat{u}$ :

$$\underline{\hat{u}} = \hat{u} e^{j\varphi_u} = \hat{u} (\cos \varphi_u + j \sin \varphi_u). \quad (2.12)$$

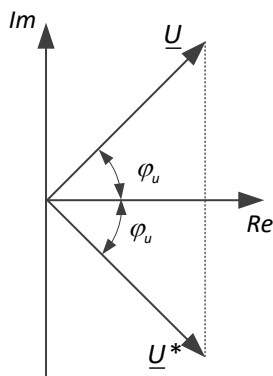
Ob upoštevanju, da je  $\hat{u}$  temenska vrednost napetosti, lahko kazalec zapišemo tudi z efektivno vrednostjo napetosti in dobimo klasičen zapis kazalca, ki se uporablja v energetiki:

$$\underline{U} = \frac{\underline{\hat{u}}}{\sqrt{2}} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_u} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} (\cos \varphi_u + j \sin \varphi_u) = U (\cos \varphi_u + j \sin \varphi_u). \quad (2.13)$$

Kazalec  $\underline{U}$  lahko zapišemo tudi kot efektivno vrednost in fazni kot z zapisom  $U \angle \varphi_u$ . Pri tem je  $U$  absolutna vrednost kazalca  $U = |\underline{U}| = \sqrt{\underline{U}\underline{U}^*}$ . Kot  $\varphi_u$  ustreza začetnemu faznemu kotu harmonične funkcije. Kazalca  $\underline{U}$  in  $\underline{U}^*$  sta prikazana na sliki 2.4.

Trenutno vrednost  $u(t)$  dobimo tako, da kazalec  $\underline{U}$  množimo z  $e^{j\omega t}$  in produkt projiciramo na realno os:

$$u(t) = \operatorname{Re}[\tilde{\underline{u}}] = \operatorname{Re}[\sqrt{2}\underline{U}e^{j\omega t}]. \quad (2.14)$$



Slika 2.4: Kazalec napetosti  $\underline{U}$  in konjugiran kazalec  $\underline{U}^*$  v kompleksni ravnini

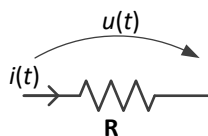
V nadaljevanju je prikazana obravnava osnovnih elementov s kompleksnim računom, ki nam omogoča dokaj enostavno obravnavo harmonično vzbujanih vezij. Prikazana je tudi povezava med tokom in napetostjo pri posameznih elementih.

### 2.1.3 Kompleksni račun

#### 2.1.3.1 Upor

Za upor na sliki 2.5 velja naslednji izraz v časovnem prostoru:

$$u(t) = Ri(t). \quad (2.15)$$



Slika 2.5: Napetost in tok upora

Tok, ki je harmoničen, lahko zapišemo z naslednjim izrazom:

$$i = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \varphi_i). \quad (2.16)$$

Če to vstavimo v izraz za napetost, dobimo:

$$u = \sqrt{2}RI \cos(\omega t + \varphi_i). \quad (2.17)$$

Splošen izraz za napetost  $u$  pa je:

$$u = \sqrt{2}U \cos(\omega t + \varphi_u). \quad (2.18)$$

Če primerjamo izraza (2.17) in (2.18), vidimo, da je razmerje med efektivnima vrednostima (amplitudama) napetosti in toka enako upornosti  $R$ , fazi pa sta enaki:

$$\boxed{U = RI \quad \varphi_u = \varphi_i}. \quad (2.19)$$

Tako napetosti kot tudi toku lahko priredimo kazalec:

$$i = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \varphi_i) \rightarrow \underline{I} = I e^{j\varphi_i}, \quad (2.20)$$

$$u = \sqrt{2}U \cos(\omega t + \varphi_u) \rightarrow \underline{U} = U e^{j\varphi_u}. \quad (2.21)$$

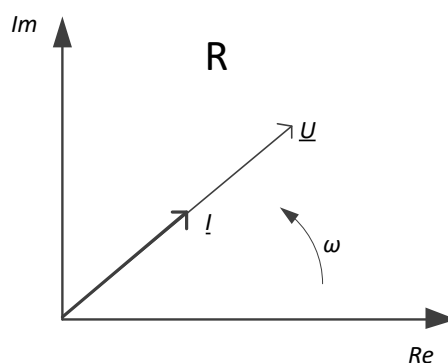
Upoštevajoč enačbi (2.19) in (2.21) zapišemo:

$$\underline{U} = U e^{j\varphi_u} = R I e^{j\varphi_i} = R \underline{I}, \quad (2.22)$$

velja torej:

$$\boxed{\underline{U} = R \underline{I}}. \quad (2.23)$$

Odvisnost med tokom in napetostjo na uporu je prikazana na sliki 2.6

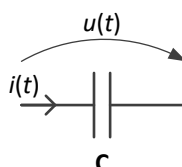


Slika 2.6: Odvisnost med tokom in napetostjo na uporu

### 2.1.3.2 Kondenzator

Za kondenzator na sliki 2.7 velja naslednji izraz:

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}. \quad (2.24)$$



Slika 2.7: Napetost in tok kondenzatorja

Za napetost in tok lahko zapišemo naslednje:

$$u = \sqrt{2}U \cos(\omega t + \varphi_u), \quad (2.25)$$

$$i = -\sqrt{2}\omega C U \sin(\omega t + \varphi_u) = \sqrt{2}\omega C U \cos\left(\omega t + \varphi_u + \frac{\pi}{2}\right), \quad (2.26)$$

$$i = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \varphi_i)$$

Iz primerjave dobimo izraza za razmerje med efektivnima vrednostima napetosti in toka ter za razliko med faznima kotoma:

$$\boxed{I = \omega C U \quad \varphi_i = \varphi_u + \frac{\pi}{2}}. \quad (2.27)$$

Razmerje amplitud toka in napetosti je  $\omega C$ , fazni kot toka pa je za  $\pi/2$  večji od faznega kota napetosti.

Podobno kot pri uporabi tudi tukaj toku in napetosti določimo kazalca:

$$u = \sqrt{2}U \cos(\omega t + \varphi_u) \rightarrow \underline{U} = Ue^{j\varphi_u}, \quad (2.28)$$

$$i = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \varphi_i) \rightarrow \underline{I} = Ie^{j\varphi_i}. \quad (2.29)$$

Za tok kondenzatorja  $\underline{I}$  torej velja:

$$\underline{I} = Ie^{j\varphi_i} = \omega C U e^{j(\varphi_u + \frac{\pi}{2})} = j\omega C U e^{j\varphi_u} = j\omega C \underline{U}, \quad (2.30)$$

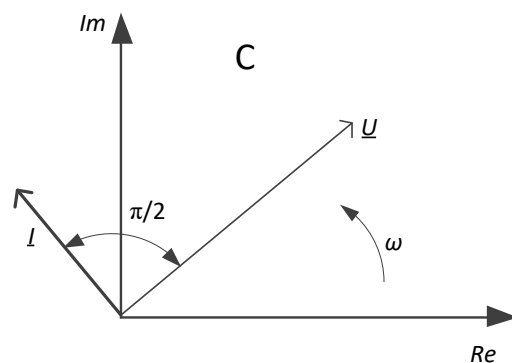
pri čemer smo upoštevali naslednjo povezavo:

$$e^{j(\varphi_u + \frac{\pi}{2})} = e^{j\varphi_u} e^{j\frac{\pi}{2}} = j e^{j\varphi_u}. \quad (2.31)$$

Enačbo (2.30) lahko zapišemo kot:

$$\boxed{\underline{I} = j\omega C \underline{U}}. \quad (2.32)$$

Odvisnost med tokom in napetostjo na kondenzatorju je prikazana na sliki 2.8.

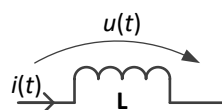


Slika 2.8: Odvisnost med tokom in napetostjo na kondenzatorju

### 2.1.3.3 Tuljava

Za tuljavo na sliki 2.9 lahko zapišemo naslednji izraz:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}. \quad (2.33)$$



Slika 2.9: Napetost in tok tuljave

Harmoničen tok lahko zapišemo z naslednjim izrazom:

$$i = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \varphi_i). \quad (2.34)$$

Če vstavimo izraz za tok (2.34) v izraz za napetost (2.33), lahko zapišemo:

$$u = -\sqrt{2}\omega L I \sin(\omega t + \varphi_i) = \sqrt{2}\omega L I \cos\left(\omega t + \varphi_i + \frac{\pi}{2}\right), \quad (2.35)$$

$$u = \sqrt{2}U \cos(\omega t + \varphi_u)$$

Iz primerjave dobimo izraza:

$$\boxed{U = \omega L I \quad \varphi_u = \varphi_i + \frac{\pi}{2}}. \quad (2.36)$$

Amplitudi napetosti in toka sta v razmerju  $\omega L$ , faza napetosti pa je za  $\pi/2$  večja od faze toka.

Napetosti in toku lahko določimo kazalca:

$$u = \sqrt{2}U \cos(\omega t + \varphi_u) \rightarrow \underline{U} = Ue^{j\varphi_u}, \quad (2.37)$$

$$i = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \varphi_i) \rightarrow \underline{I} = Ie^{j\varphi_i}. \quad (2.38)$$

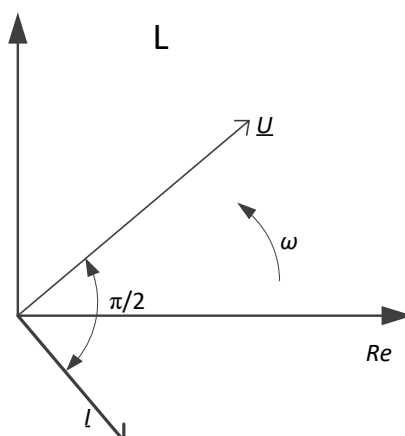
Kazalec  $\underline{U}$  lahko zapišemo tudi kot

$$\underline{U} = Ue^{j\varphi_u} = \omega L I e^{j\varphi_u} = \omega L I e^{j(\varphi_i + \frac{\pi}{2})} = j\omega L I e^{j\varphi_i} = j\omega L \underline{I} \quad (2.39)$$

oziroma kot

$$\boxed{\underline{U} = j\omega L \underline{I}}. \quad (2.40)$$

Odvisnost med tokom in napetostjo na tuljavi je prikazana na sliki 2.10.



Slika 2.10: Odvisnost med tokom in napetostjo na tuljavi

#### 2.1.4 Zapis moči v kompleksnem prostoru

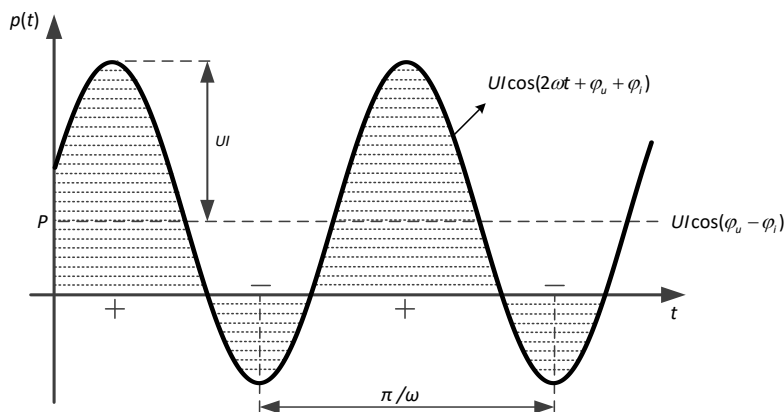
Trenutna moč je definirana kot produkt trenutne napetosti in toka:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega t + \varphi_u) \cdot \hat{i} \cdot \cos(\omega t + \varphi_i). \quad (2.41)$$

Če upoštevamo relacijo  $\cos \alpha \cos \beta = (1/2)(\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta))$ , lahko zapišemo trenutno moč kot:

$$p(t) = \frac{1}{2} \cdot \hat{u} \cdot \hat{i} \cdot \left[ \cos(\varphi_u - \varphi_i) + \cos(\underbrace{2\omega t}_{100\text{Hz}} + \varphi_u + \varphi_i) \right] = U \cdot I \cdot \left[ \cos(\varphi_u - \varphi_i) + \cos(\underbrace{2\omega t}_{100\text{Hz}} + \varphi_u + \varphi_i) \right] \quad (2.42)$$

ki ga v časovnem diagramu prikazuje slika 2.11.



Slika 2.11: Časovni potek trenutne moči

Kot lahko razberemo iz slike 2.11, je trenutna moč pulzirajoča. Povprečno vrednost izračunamo kot:

$$\bar{p}(t) = \frac{1}{2} \hat{u} \hat{i} \cos(\varphi_u - \varphi_i) = \frac{1}{2} \hat{u} \hat{i} \cos \varphi = UI \cos \varphi, \quad (2.43)$$

pri čemer je  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ . Amplituda, s katero moč niha okoli povprečne vrednosti znaša  $(1/2)\hat{u}\hat{i}$ , perioda pa je  $\pi/\omega$ . Del periode je moč pozitivna, del pa negativna. Povprečno moč imenujemo delovna moč. Označimo jo s  $P$  in izrazimo z naslednjim izrazom:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \hat{u} \cdot \hat{i} \cdot \cos \varphi \quad (2.44)$$

oz. izraženo z efektivnimi vrednostmi:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot U \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2.45)$$

$$\boxed{P = U \cdot I \cdot \cos \varphi}$$

Faktor  $\cos \varphi$  imenujemo faktor delavnosti.

Za pasivno vezje je moč  $P$  v vsakem trenutku nenegativna ( $P \geq 0$ ), kar pomeni, da je faza  $\varphi$  izključno znotraj intervala  $[-\pi/2, \pi/2]$ . Trenutna moč na posameznih elementih je sledeča:

- Na upor je  $\varphi = 0$  in  $p(t) = \frac{1}{2} UI (1 + \cos 2(\omega t + \varphi_i)) \geq 0$ .
- Na tuljavi je  $\varphi = \pi/2$  in  $p(t) = (1/2) UI \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i)$ . Povprečje moči je enako 0. V eni četrtini periode (naraščanje toka) se energija akumulira v elementu, v naslednji četrtini pa se ta energija vrača k viru. Za izmenjujočo moč je v elektrotehniki uveljavljen termin jalova moč.
- Za kondenzator velja, da je  $\varphi = -\pi/2$  in  $p(t) = \frac{1}{2} UI \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i)$ . Tudi tukaj imamo izmenično moč s povprečjem nič, torej jalovo moč.

Glede na povedano je smiselno, da moč razdelimo na dva dela:

- na tisti del moči, ki je stalno pozitiven (označimo ga s  $p_1(t)$ ) in
- na tisti del moči, ki ima povprečje nič (označimo ga s  $p_2(t)$ ).

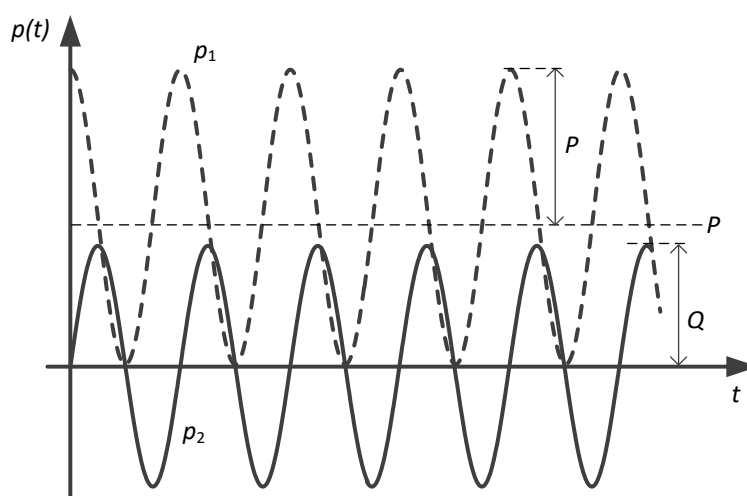
Če upoštevamo relacijo  $\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta$ , lahko spreminjajoči del moči  $p(t)$  zapišemo kot:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \hat{u} \cdot \hat{i} \cdot \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i) &= \frac{1}{2} \cdot \hat{u} \cdot \hat{i} \cdot \cos(2\omega t + 2\varphi_u - \varphi_u + \varphi_i) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \hat{u} \cdot \hat{i} \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_i) \cos 2(\omega t + \varphi_u) + \frac{1}{2} \cdot \hat{u} \cdot \hat{i} \cdot \sin(\varphi_u - \varphi_i) \sin 2(\omega t + \varphi_u) \end{aligned} \quad (2.46)$$

Za  $p(t)$  lahko zapišemo:

$$p(t) = \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \hat{u} \cdot \hat{i} \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_i) (1 + \cos 2(\omega t + \varphi_u))}_{p_1(t)} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \hat{u} \cdot \hat{i} \cdot \sin(\varphi_u - \varphi_i) \sin 2(\omega t + \varphi_u)}_{p_2(t)}. \quad (2.47)$$

Moči  $p_1(t)$  in  $p_2(t)$  sta prikazani na sliki 2.12.



Slika 2.12: Moči  $p_1(t)$  in  $p_2(t)$

Moč  $p_1(t)$  je stalno nenegativna (povprečje  $\overline{p_1(t)} = P$ ), moč  $p_2(t)$  pa je izmenjalna (povprečje  $\overline{p_2(t)} = 0$ ). Temensko vrednost te moči imenujemo jalova moč  $Q$  in je definirana kot:

$$Q = \frac{1}{2} \hat{u} \cdot \hat{i} \cdot \sin \varphi. \quad (2.48)$$

Z efektivnimi vrednostmi lahko enačbo (2.48) zapišemo kot:

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (2.49)$$

Jalova moč je pozitivna, če je  $\varphi > 0$  (induktivni karakter), in negativna, če je  $\varphi < 0$  (kapacitivni karakter).

Enota za delovno moč ja Watt (W), za jalovo pa reaktivni volt-amper (var).

Navidezno moč oziroma kompleksor navidezne moči  $\underline{S}$  definiramo kot:

$$\underline{S} = P + jQ. \quad (2.50)$$

Navidezno moč lahko izrazimo s kompleksorjema toka in napetosti:

$$\underline{S} = P + jQ = UI (\cos \varphi + j \sin \varphi) = UI e^{j\varphi} = UI e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = UI e^{j\varphi_u} e^{-j\varphi_i} = \underline{U} \underline{I}^*, \quad (2.51)$$

kjer je  $\underline{I}^*$  konjugirano kompleksen kazalec h kompleksorju  $\underline{I}$ . Navidezno moč lahko izrazimo tudi kot:

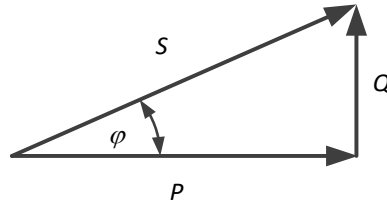
$$\underline{S} = \underline{Z} I^2 = \underline{Y}^* U^2. \quad (2.52)$$



Navidezno moč izražamo v prirejenih enotah, in sicer v volt-ampereh (VA). Absolutno vrednost kompleksorja  $\underline{S}$  (označimo z  $S$ ) izračunamo kot pitagorsko vsoto  $P$ -ja in  $Q$ -ja in ustreza amplitudi prenehaja trenutne moči  $p(t)$  okrog povprečne vrednosti  $P$ .

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \frac{1}{2} \hat{u} \cdot \hat{i} = UI \quad (2.53)$$

Povezava med vektorjem  $S$  ter vektorjema  $P$  in  $Q$  je prikazana na spodnji sliki 2.13.



Slika 2.13: Povezave med vektorji  $P$ ,  $Q$  in  $S$

### 2.1.5 Moč v trifaznem sistemu

Trenutno moč v trifaznem sistemu zapišemo kot vsoto faznih moči:

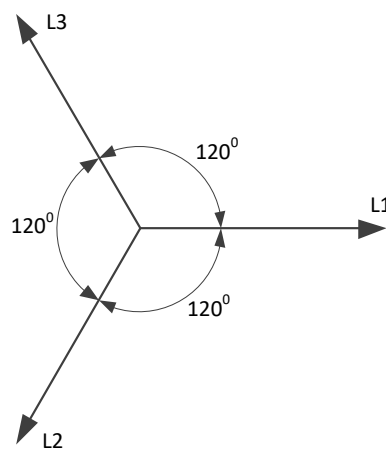
$$p_{3f}(t) = u_{l1}(t)i_{l1}(t) + u_{l2}(t)i_{l2}(t) + u_{l3}(t)i_{l3}(t). \quad (2.54)$$

V nadaljevanju bomo obravnavali simetričen trifazni sistem, to je sistem, kjer so amplitude faznih napetosti med seboj enake in zamaknjene za  $120^\circ$ , enako pa velja tudi za tokove:

$$\begin{aligned} U_{l1} &= U_{l2} = U_{l3} = U, \\ I_{l1} &= I_{l2} = I_{l3} = I, \end{aligned} \quad (2.55)$$

$$\begin{aligned} u_{l1}(t) &= \sqrt{2}U \cos(\omega t + \varphi_u), & i_{l1}(t) &= \sqrt{2}I \cos(\omega t + \varphi_i), \\ u_{l2}(t) &= \sqrt{2}U \cos(\omega t + \varphi_u - 120^\circ), & i_{l2}(t) &= \sqrt{2}I \cos(\omega t + \varphi_i - 120^\circ), \\ u_{l3}(t) &= \sqrt{2}U \cos(\omega t + \varphi_u + 120^\circ), & i_{l3}(t) &= \sqrt{2}I \cos(\omega t + \varphi_i + 120^\circ). \end{aligned} \quad (2.56)$$

Simetričen sistem je prikazan na sliki 2.14.



Slika 2.14: Simetričen sistem

Trenutno moč v simetričnem trifaznem sistemu zapišemo kot:

$$\begin{aligned}
 p_{3f}(t) &= U \cdot I \cdot [\cos(\varphi_u - \varphi_i) + \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i)] + \\
 &+ U \cdot I \cdot [\cos(\varphi_u - \varphi_i) + \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i + 120^\circ)] + \\
 &+ U \cdot I \cdot [\cos(\varphi_u - \varphi_i) + \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i - 120^\circ)] \\
 p_{3f}(t) &= 3 \cdot U \cdot I \cdot [\cos(\varphi_u - \varphi_i)].
 \end{aligned} \tag{2.57}$$

Kompleksor navidezne moči v trifaznem sistemu zapišemo z efektivnimi vrednostmi kot vsoto treh faznih moči:

$$\underline{S}_{3f} = \underline{U}_{L1} I_{L1}^* + \underline{U}_{L2} I_{L2}^* + \underline{U}_{L3} I_{L3}^*. \tag{2.58}$$

Za simetričen trifazni sistem velja:

$$\begin{aligned}
 \underline{S}_{3f} &= P_{3f} + jQ_{3f} = 3\underline{U} \underline{I}^* = \sqrt{3} \underline{U}_{mf} \underline{I}^*, \\
 \underline{S}_{3f} &= \sqrt{3} U_{mf} I \cos \varphi + j\sqrt{3} U_{mf} I \sin \varphi.
 \end{aligned} \tag{2.59}$$

kjer  $U_{mf}$  označuje medfazne vrednosti napetosti.

## 2.2 Sistemi komponent

Trifazni sistem napetosti lahko v splošnem zapišemo z naslednjimi enačbami:

$$\begin{aligned}
 u_{L1}(t) &= \sqrt{2} U_{L1} \cos(\omega t + \varphi_{L1}), \\
 u_{L2}(t) &= \sqrt{2} U_{L2} \cos(\omega t + \varphi_{L2} - 120^\circ), \\
 u_{L3}(t) &= \sqrt{2} U_{L3} \cos(\omega t + \varphi_{L3} + 120^\circ).
 \end{aligned} \tag{2.60}$$

Za simetričen sistem velja, da je:

$$\begin{aligned}
 U_{L1} &= U_{L2} = U_{L3} = U, \\
 \varphi_{L1} &= \varphi_{L2} = \varphi_{L3} = \varphi.
 \end{aligned} \tag{2.61}$$

V kompleksnem prostoru lahko simetričen sistem zapišemo s kazalci:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{L1} &= U e^{j\varphi}, \\
 \underline{U}_{L2} &= U e^{j(\varphi - 120^\circ)}, \\
 \underline{U}_{L3} &= U e^{j(\varphi + 120^\circ)}.
 \end{aligned} \tag{2.62}$$

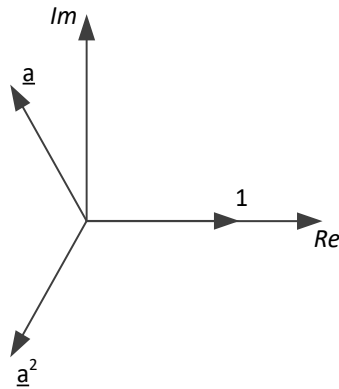
Za poenostavitev zapisa uvedemo konstanto  $\underline{a}$ :

$$\underline{a} = e^{j120^\circ} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos(120^\circ) + j \sin(120^\circ) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}. \tag{2.63}$$

Kvadrat te konstante pa je:

$$\underline{a}^2 = e^{j240^\circ} = e^{j\frac{4\pi}{3}} = e^{j(-120^\circ)} = \cos(-120^\circ) + j \sin(-120^\circ) = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}. \tag{2.64}$$

Grafično je  $\underline{a}$  prikazan na sliki 2.15.



Slika 2.15: Grafični prikaz konstante  $a$

Z uporabo zgornje definicije spremenljivke  $a$  lahko simetričen sistem zapišemo na naslednji način:

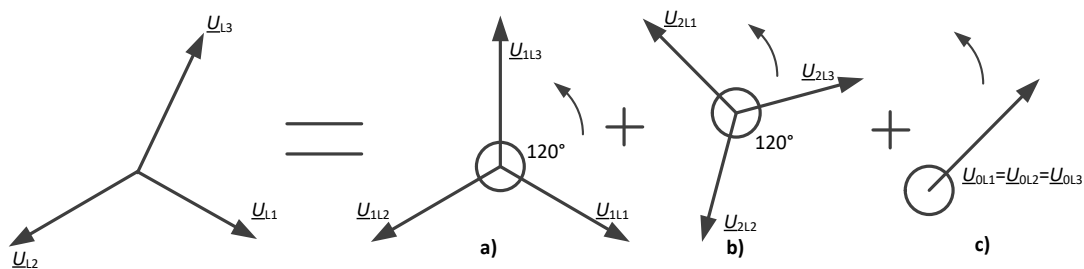
$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{l1} &= \underline{U}_{l1} \\
 \underline{U}_{l2} &= \underline{a}^2 \underline{U}_{l1} = e^{j(-120^\circ)} \underline{U}_{l1} \\
 \underline{U}_{l3} &= \underline{a} \underline{U}_{l1} = e^{j120^\circ} \underline{U}_{l1}
 \end{aligned}
 \tag{2.65}$$

Poljuben nesimetričen trifazni sistem lahko zapišemo tudi s pomočjo matematičnih transformacij. V nadaljevanju bo opisana transformacija v simetrične komponente.

### 2.2.1 Simetrične komponente

Uporabo simetričnih komponent je predstavil Charles Legeyt Fortescue leta 1918. Pokazal je, da je možno vsak nesimetričen sistem z  $n$  kazalci izraziti kot vsoto  $N$  simetričnih sistemov kazalcev [4].

Poljuben nesimetričen trifazni sistem torej lahko zapišemo kot vsoto treh simetričnih sistemov: pozitivnega (ali direktnega), negativnega (ali inverznega) in ničnega, kar je prikazano na sliki 2.16.



Slika 2.16: Grafični prikaz pretvorbe nesimetričnega sistema v simetrične komponente a) pozitivni, b) negativni in c) nični sistem

Nesimetričen sistem lahko zapišemo z naslednjimi enačbami:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{l1} &= \underline{U}_{1l1} + \underline{U}_{2l1} + \underline{U}_{0l1}, \\
 \underline{U}_{l2} &= \underline{U}_{1l2} + \underline{U}_{2l2} + \underline{U}_{0l2}, \\
 \underline{U}_{l3} &= \underline{U}_{1l3} + \underline{U}_{2l3} + \underline{U}_{0l3},
 \end{aligned}
 \tag{2.66}$$

pri čemer so vrednosti pozitivnega (indeks 1), negativnega (indeks 2) in ničnega sistema (indeks 0) za fazor  $\underline{U}_1$  določene z naslednjo matrično enačbo:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{0L1} \\ \underline{U}_{1L1} \\ \underline{U}_{2L1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{0L1} \\ \underline{U}_{1L1} \\ \underline{U}_{2L1} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{bmatrix}, \quad (2.67)$$

kar lahko krajše zapišemo tudi na naslednji način:

$$[\underline{U}_s] = [\underline{S}][\underline{U}_f], \quad (2.68)$$

pri čemer je transformacijska matrika  $[\underline{S}]$ :

$$[\underline{S}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

in  $[\underline{U}_s]$  matrika napetosti simetričnega sistema ter  $[\underline{U}_f]$  matrika faznih napetosti.

V kolikor zapišemo pozitivno, negativno in nično komponento napetosti za fazo L1, dobimo naslednje:

$$\underline{U}_{0L1} = \frac{1}{3}(\underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L3}), \quad (2.70)$$

$$\underline{U}_{1L1} = \frac{1}{3}(\underline{U}_{L1} + \underline{a}\underline{U}_{L2} + \underline{a}^2\underline{U}_{L3}), \quad (2.71)$$

$$\underline{U}_{2L1} = \frac{1}{3}(\underline{U}_{L1} + \underline{a}^2\underline{U}_{L2} + \underline{a}\underline{U}_{L3}). \quad (2.72)$$

Za fazor  $\underline{U}_{L2}$  lahko zapišemo:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{0L2} &= \underline{U}_{0L1}, \\ \underline{U}_{1L2} &= \underline{a}^2\underline{U}_{1L1}, \\ \underline{U}_{2L2} &= \underline{a}\underline{U}_{2L1}. \end{aligned} \quad (2.73)$$

Podobno izpeljemo tudi za fazor  $\underline{U}_{L3}$ :

$$\begin{aligned} \underline{U}_{0L3} &= \underline{U}_{0L2} = \underline{U}_{0L1}, \\ \underline{U}_{1L3} &= \underline{a}\underline{U}_{1L1}, \\ \underline{U}_{2L3} &= \underline{a}^2\underline{U}_{2L1}. \end{aligned} \quad (2.74)$$

Simetrične komponente lahko določimo tudi grafično.

Pretvorba iz simetričnih komponent v trifazni sistem je določena z naslednjo matrično enačbo:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{0L1} \\ \underline{U}_{1L1} \\ \underline{U}_{2L1} \end{bmatrix}. \quad (2.75)$$

V kolikor to zapišemo po komponentah, dobimo:

$$\underline{U}_{L1} = \underline{U}_{0L1} + \underline{U}_{1L1} + \underline{U}_{2L1}, \quad (2.76)$$

$$\underline{U}_{L2} = \underline{U}_{0L1} + \underline{a}^2\underline{U}_{1L1} + \underline{a}\underline{U}_{2L1}, \quad (2.77)$$

$$\underline{U}_{L3} = \underline{U}_{0L1} + \underline{a}\underline{U}_{1L1} + \underline{a}^2\underline{U}_{2L1}, \quad (2.78)$$

kar lahko krajše zapišemo kot:

$$[\underline{U}_f] = [\underline{T}][\underline{U}_s], \quad (2.79)$$

---

kjer je  $[T]$  transformacijska matrika,  $[U_f]$  matrika faznih napetosti in  $[U_s]$  matrika simetričnih komponent napetosti.

Povezavo med transformacijskima matrikama  $[S]$  in  $[T]$  dobimo tako, da z leve množimo enačbo (2.68) z matriko  $[S]^{-1}$ :

$$[S]^{-1}[U_s] = [S]^{-1}[S][U_f]. \quad (2.80)$$

Glede na to, da velja  $[S]^{-1}[S] = [E]$ , lahko enačbo (2.80) zapišemo:

$$[S]^{-1}[U_s] = [U_f]. \quad (2.81)$$

Velja torej:

$$\begin{aligned} [S]^{-1} &= [T], \\ [T]^{-1} &= [S]. \end{aligned} \quad (2.82)$$

### 3 Električni parametri vodov

Za obravnavanje delovanja voda in izračun električnih veličin na njem moramo vode ponazoriti z ustreznim nadomestnim (matematičnim) modelom in določiti njegove parametre. V tem poglavju se bomo najprej osredotočili na izpeljavo nadomestnega vezja voda in nadaljevali z določitvijo parametrov tega vezja.

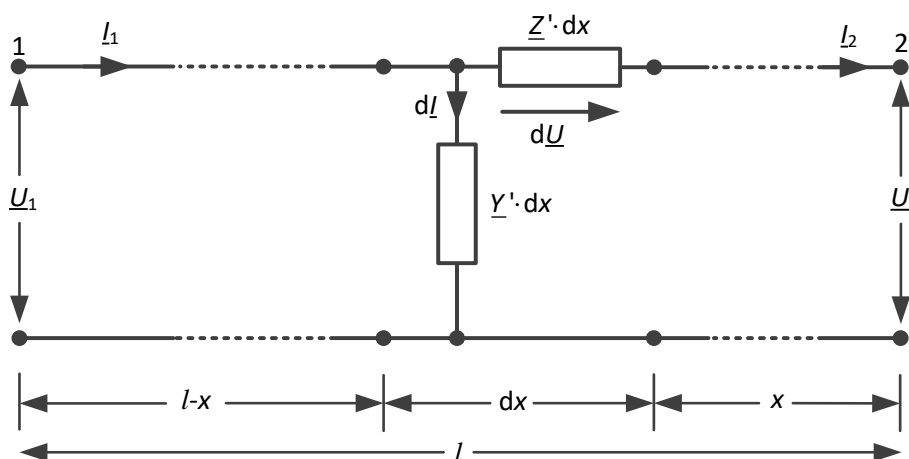
S pomočjo nadomestnega modela voda bomo lahko ponazorili tako nadzemne kot tudi kabelske vode različnih izvedb.

#### 3.1 Model voda s porazdeljenimi parametri

Model voda s porazdeljenimi parametri, ki ga prikazuje slika 3.1, omogoča natančen opis električnih lastnosti voda in tvori osnovo za izpeljavo nadomestnih vezij voda [1], [5]. Pri modelu s porazdeljenimi parametri vsak odsek enofaznega voda z dolžino  $dx$  predstavimo s serijsko impedanco  $\underline{Z}'$  (impedanca na enoto dolžine) in paralelno admitanco  $\underline{Y}'$  (admitanca na enoto dolžine).

$$\begin{aligned}\underline{Z}' &= R' + jX_L' = R' + j\omega L' \\ \underline{Y}' &= G' + jX_C' = G' + j\omega C'\end{aligned}\quad (3.1)$$

Za začetek si bomo pogledali, kako ob znani impedanci in admitanci določimo napetosti in tokove voda. Tokovne in napetostne enačbe bomo zapisali in tudi rešili s fazorji, torej v frekvenčnem prostoru.



Slika 3.1: Nadomestno vezje voda za izpeljavo modela s porazdeljenimi parametri

Najprej zapišemo diferencialni enačbi za napetost in tok v splošni točki na oddaljenosti  $x + \Delta x$ .

$$\begin{aligned}\underline{U}(x + \Delta x) &= \underline{Z}' \cdot \Delta x \cdot \underline{I}(x) + \underline{U}(x) \\ \underline{U}(x + \Delta x) - \underline{U}(x) &= \underline{Z}' \cdot \Delta x \cdot \underline{I}(x) \\ \frac{\underline{U}(x + \Delta x) - \underline{U}(x)}{\Delta x} &= \underline{Z}' \cdot \underline{I}(x)\end{aligned}\quad (3.2)$$

$$\begin{aligned}\underline{I}(x + \Delta x) &= \underline{I}(x) + \underline{Y}' \cdot \Delta x \cdot \underline{U}(x + \Delta x) \\ \underline{I}(x + \Delta x) - \underline{I}(x) &= \underline{Y}' \cdot \Delta x \cdot \underline{U}(x + \Delta x) \\ \frac{\underline{I}(x + \Delta x) - \underline{I}(x)}{\Delta x} &= \underline{Y}' \cdot \underline{U}(x + \Delta x)\end{aligned}\quad (3.3)$$

Z izračunom limite, ko gre  $\Delta x$  proti nič, dobimo diferencialni enačbi za napetost in tok.

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[ \frac{\underline{U}(x + \Delta x) - \underline{U}(x)}{\Delta x} = \underline{Z}' \cdot \underline{I}(x) \right] \Rightarrow \frac{d\underline{U}}{dx} = \underline{Z}' \cdot \underline{I}(x) \quad (3.4)$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[ \frac{\underline{I}(x + \Delta x) - \underline{I}(x)}{\Delta x} = \underline{Y}' \cdot \underline{U}(x + \Delta x) \right] \Rightarrow \frac{d\underline{I}}{dx} = \underline{Y}' \cdot \underline{U}(x) \quad (3.5)$$

Izraza (3.4) in (3.5) še enkrat odvajamo po  $x$ :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \underline{U}}{dx^2} &= \underline{Z}' \cdot \frac{d\underline{I}(x)}{dx}, \\ \frac{d^2 \underline{I}}{dx^2} &= \underline{Y}' \cdot \frac{d\underline{U}(x)}{dx}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Z upoštevanjem izrazov (3.4) in (3.5) dobimo končno obliko enačbe za tok in za napetost. Enačbo imenujemo tudi telegrafska enačba:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \underline{U}}{dx^2} &= \underline{Z}' \cdot \underline{Y}' \cdot \underline{U}, \\ \frac{d^2 \underline{I}}{dx^2} &= \underline{Z}' \cdot \underline{Y}' \cdot \underline{I}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

### 3.1.1 Rešitev v splošni točki

Rešitev enačb (3.7) nam podaja napetost in tok v splošni točki daljnovoda:

$$\begin{aligned} \underline{U}(x) &= \operatorname{ch}(\underline{\gamma}x) \cdot \underline{U}_2 + \underline{Z}_v \cdot \operatorname{sh}(\underline{\gamma}x) \cdot \underline{I}_2, \\ \underline{I}(x) &= \underline{Y}_v \cdot \operatorname{sh}(\underline{\gamma}x) \cdot \underline{U}_2 + \operatorname{ch}(\underline{\gamma}x) \cdot \underline{I}_2, \end{aligned} \quad (3.8)$$

pri tem je  $\underline{\gamma}$  konstanta širjenja:

$$\begin{aligned} \underline{\gamma} &= \sqrt{\underline{Z}' \cdot \underline{Y}'} = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}, \\ \underline{\gamma} &\doteq j\omega \sqrt{L' C'}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

$\underline{Z}_v$  in  $\underline{Y}_v$  pa sta valovna (karakteristična) impedanca in admitanca:

$$\underline{Z}_v = \sqrt{\frac{\underline{Z}'}{\underline{Y}'}} \quad \underline{Y}_v = \sqrt{\frac{\underline{Y}'}{\underline{Z}'}} \quad (3.10)$$

$$\underline{Z}_v = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \doteq \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (3.11)$$

Rešitev lahko zapišemo tudi z eksponencialnima funkcijama:

$$\operatorname{sh}x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}, \quad \operatorname{ch}x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad (3.12)$$

in dobimo

$$\begin{aligned} \underline{U}(x) &= \frac{1}{2}(\underline{U}_2 + \underline{Z}_v \cdot \underline{I}_2) \cdot e^{\underline{\gamma}x} + \frac{1}{2}(\underline{U}_2 - \underline{Z}_v \cdot \underline{I}_2) \cdot e^{-\underline{\gamma}x}, \\ \underline{I}(x) &= \frac{1}{2}(\underline{I}_2 + \underline{Y}_v \cdot \underline{U}_2) \cdot e^{\underline{\gamma}x} + \frac{1}{2}(\underline{I}_2 - \underline{Y}_v \cdot \underline{U}_2) \cdot e^{-\underline{\gamma}x}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

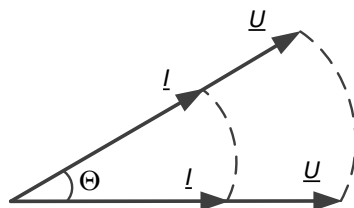
Prvi člen predstavlja direktni sinusni (dušeni) val, drugi člen pa odbiti sinusni (dušeni) val. Napetost v poljubni točki je vsota obeh valov.

Pri idealnem vodu, ki je zaključen z  $\underline{Z}_v$  (naravna obremenitev voda), ni odbitega vala. Velja:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_v}, \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}(x) &= \underline{U}_2 \cdot e^{\gamma x} \doteq \underline{U}_2 \cdot e^{i\beta x}, \\ \underline{I}(x) &= \underline{I}_2 \cdot e^{\gamma x} \doteq \underline{I}_2 \cdot e^{i\beta x}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Pri naravno obremenjenem vodu imata  $\underline{U}$  in  $\underline{I}$  konstantno amplitudo vzdolž voda in sta v fazi (slika 3.2).



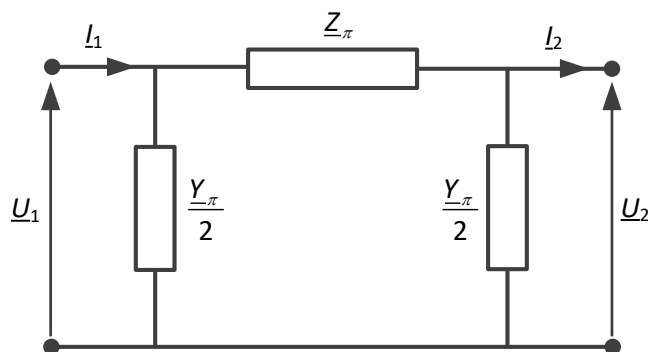
Slika 3.2: Napetost in tok voda, ki je zaključen z  $\underline{Z}_v$

### 3.2 Četveropolna predstavitev voda

Velikokrat nas zanimajo samo razmere na začetku in na koncu voda. Rešitev (3.8) zapišemo tako, da upoštevamo  $x=l$ :

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}(\gamma l) & \underline{Z}_v \cdot \text{sh}(\gamma l) \\ \underline{Y}_v \cdot \text{sh}(\gamma l) & \text{ch}(\gamma l) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

Dobimo četveropolno predstavitev voda. Nadomestno vezje splošnega četveropola podaja slika 3.3.



Slika 3.3: Nadomestno vezje splošnega četveropola

Enačbe za napetosti in tokove splošnega četveropola podajajo spodnje enačbe.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{a} & \underline{b} \\ \underline{c} & \underline{d} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Z upoštevanje vezja na sliki 3.3 dobimo naslednja izraza za napetost in tok:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 + \left( \underline{U}_2 \frac{\underline{Y}_{\pi}}{2} + \underline{I}_2 \right) \underline{Z}_{\pi}, \\ \underline{I}_1 &= \underline{U}_1 \frac{\underline{Y}_{\pi}}{2} + \underline{U}_2 \frac{\underline{Y}_{\pi}}{2} + \underline{I}_2, \end{aligned} \quad (3.18)$$



kar v matrični obliki zapišemo kot:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\underline{Z}_\pi \underline{Y}_\pi}{2} & \underline{Z}_\pi \\ \underline{Y}_\pi \left(1 + \frac{\underline{Z}_\pi \underline{Y}_\pi}{4}\right) & 1 + \frac{\underline{Z}_\pi \underline{Y}_\pi}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

S primerjavo izrazov (3.16) in (3.19) določimo elemente  $\pi$  nadomestnega vezja dolgega voda in dobimo t. i. ekvivalentni model voda:

$$\underline{Z}_\pi = \underline{Z}_v \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}l), \quad (3.20)$$

$$\frac{\underline{Y}_\pi}{2} = \frac{1}{\underline{Z}_v} \cdot \text{th}\left(\frac{\underline{\gamma}l}{2}\right). \quad (3.21)$$

Pri kratkih vodih (majhna dolžina  $l$ ) lahko upoštevamo naslednjo poenostavitev:

$$\begin{aligned} \text{sh}(\underline{\gamma}l) &\doteq \underline{\gamma}l, \\ \text{th}\left(\frac{\underline{\gamma}l}{2}\right) &\doteq \frac{\underline{\gamma}l}{2} \end{aligned} \quad (3.22)$$

in dobimo elemente  $\pi$  nadomestnega vezja kratkega voda, to je t. i. nazivni model voda:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_\pi &\doteq \underline{Z}_v \cdot \underline{\gamma}l = \underline{Z}' \cdot l, \\ \frac{\underline{Y}_\pi}{2} &\doteq \frac{1}{\underline{Z}_v} \cdot \frac{\underline{\gamma}l}{2} = \frac{\underline{Y}' \cdot l}{2}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Kot kratke lahko privzamemo nadzemne in kableske vode, za katere velja:

- $l < \frac{10.000}{f} = 200 \text{ km} \rightarrow$  kratek nadzemni vod,
- $l < \frac{3.000}{f} = 60 \text{ km} \rightarrow$  kratek kabelski vod,

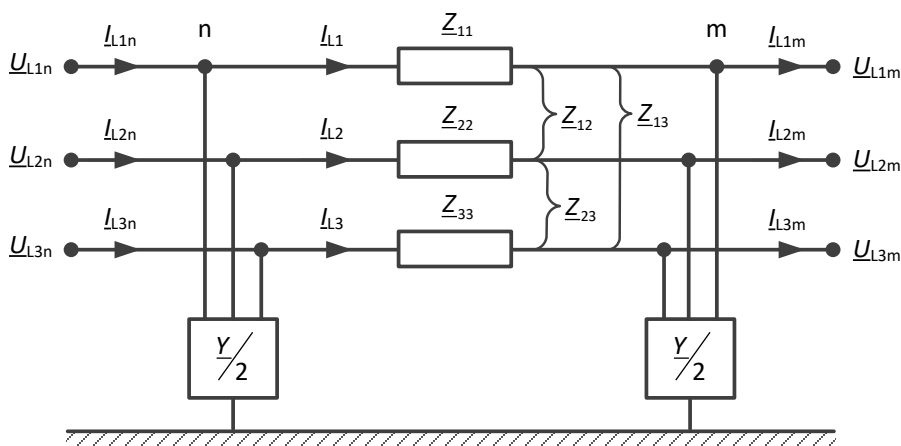
pri čemer je  $f$  frekvenca, pri kateri rešujemo enačbe vezja.

### 3.3 Model trifaznega voda za nesimetrične razmere

Splošni nadomestni model trifaznega voda omogoča obravnavo tako simetričnih kot tudi nesimetričnih razmer na vodu. V primeru simetričnih napetosti in tokov v omrežju lahko vod predstavimo in računamo enopolno; izvedemo torej izračun samo v eni fazi.

#### 3.3.1 Splošen trifazni zapis enačb voda

Slika 3.4 prikazuje splošno  $\pi$  nadomestno vezje trifaznega voda. Osnoven trifazni vod tvorijo trije fazni vodniki in zemlja. Podobno kot v primeru enofaznega voda, ki je bil obravnavan v prejšnjem poglavju, trifazni vod ponazorimo s serijskimi impedancami in paralelnimi admitancami. Pri tem moramo upoštevati, da na razmere v določeni fazi vplivata tudi sosednji fazi, kar ponazorimo z medsebojnimi impedancami in admitancami. V nadaljevanju bodo izpeljane enačbe za napetosti in tokove voda, podobno kot je bilo to narejeno pri enofaznem vodu [6].



Slika 3.4: Splošno nadomestno vezje trifaznega voda

### 1. Izpeljava enačbe za izračun napetosti v vozlišču n

Tokovne enačbe za tok lastne impedance voda podaja spodnja enačba:

$$\begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{L1m} \\ I_{L2m} \\ I_{L3m} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{L1m} \\ U_{L2m} \\ U_{L3m} \end{bmatrix}, \quad (3.24)$$

pri čemer so  $U_{L1m}$ ,  $U_{L2m}$  in  $U_{L3m}$  napetosti do zemlje v vozlišču  $m$ . V matričnem zapisu enačbo zapišemo kot:

$$\mathbf{I}_L = \mathbf{I}_{Lm} + \frac{1}{2} \mathbf{Y} \cdot \mathbf{U}_{Lm}, \quad (3.25)$$

pri čemer je  $\mathbf{Y}$  admitančna matrika. Diagonalni členi matrike so admittance faznega vodnika do zemlje, izven-diagonalni pa admittance med faznimi vodniki.

Napetostne enačbe za vozlišče  $n$  podajata izraza:

$$\begin{bmatrix} U_{L1n} \\ U_{L2n} \\ U_{L3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{L1m} \\ U_{L2m} \\ U_{L3m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \end{bmatrix}, \quad (3.26)$$

$$\mathbf{U}_{Ln} = \mathbf{U}_{Lm} + \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I}_L, \quad (3.27)$$

kjer je  $\mathbf{Z}$  impedančna matrika. Diagonalni členi matrike so lastne impedance faznega vodnika, izven-diagonalni pa medsebojne impedance med faznimi vodniki.

Združimo enačbi (3.25) in (3.27) in dobimo enačbo za izračun napetosti v vozlišču  $n$ :

$$\mathbf{U}_{Ln} = \mathbf{U}_{Lm} + \mathbf{Z} \left( \mathbf{I}_{Lm} + \frac{1}{2} \mathbf{Y} \cdot \mathbf{U}_{Lm} \right), \quad (3.28)$$

$$\mathbf{U}_{Ln} = \left( \mathbf{E} + \frac{1}{2} \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y} \right) \mathbf{U}_{Lm} + \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I}_{Lm}, \quad (3.29)$$

pri tem je

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.30)$$

Napetosti v vozlišču  $n$ , izražene z napetostjo in tokom v vozlišču  $m$ , podaja spodnja enačba.

$$\underline{\mathbf{U}}_{Ln} = \underline{\mathbf{a}} \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Lm} + \underline{\mathbf{b}} \cdot \underline{\mathbf{I}}_{Lm} \quad (3.31)$$

## 2. Izpeljava enačbe za izračun tokov priključka $n$

Tokovne enačbe za vozlišče  $n$  so podane z:

$$\underline{\mathbf{I}}_{Ln} = \underline{\mathbf{I}}_L + \frac{1}{2} \underline{\mathbf{Y}} \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Ln}. \quad (3.32)$$

Vstavimo  $\underline{\mathbf{I}}_L$  iz (3.25) in dobimo:

$$\underline{\mathbf{I}}_{Ln} = \underline{\mathbf{I}}_{Lm} + \frac{1}{2} \underline{\mathbf{Y}} \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Lm} + \frac{1}{2} \underline{\mathbf{Y}} \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Ln}, \quad (3.33)$$

nato vstavimo (3.29), kjer je  $\underline{\mathbf{U}}_{Ln}$  izražen z  $\underline{\mathbf{U}}_{Lm}$  in  $\underline{\mathbf{I}}_{Lm}$ :

$$\underline{\mathbf{I}}_{Ln} = \left( \underline{\mathbf{Y}} + \frac{1}{4} \underline{\mathbf{Y}} \cdot \underline{\mathbf{Z}} \cdot \underline{\mathbf{Y}} \right) \underline{\mathbf{U}}_{Lm} + \left( \underline{\mathbf{E}} + \frac{1}{2} \underline{\mathbf{Z}} \cdot \underline{\mathbf{Y}} \right) \underline{\mathbf{I}}_{Lm}. \quad (3.34)$$

Tokove v vozlišču  $n$ , izražene z napetostjo in tokom v vozlišču  $m$ , podaja spodnja enačba.

$$\underline{\mathbf{I}}_{Ln} = \underline{\mathbf{c}} \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Lm} + \underline{\mathbf{d}} \cdot \underline{\mathbf{I}}_{Lm} \quad (3.35)$$

Splošno enačbo trifaznega modela voda lahko zapišemo v matrični obliki, pri čemer so napetosti in tokovi vektorji velikost  $3 \times 1$ , koeficienti  $\underline{\mathbf{a}}$ ,  $\underline{\mathbf{b}}$ ,  $\underline{\mathbf{c}}$  in  $\underline{\mathbf{d}}$  pa matrike velikosti  $3 \times 3$ :

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{Ln} \\ \underline{\mathbf{I}}_{Ln} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{a}} & \underline{\mathbf{b}} \\ \underline{\mathbf{c}} & \underline{\mathbf{d}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{Lm} \\ \underline{\mathbf{I}}_{Lm} \end{bmatrix}. \quad (3.36)$$

Izpeljani model v celoti opisuje razmere trifaznega voda. S pretvorbo modela v simetrične komponente se model poenostavi, kar bo prikazano v naslednjem poglavju.

## 3.4 Zapis modela voda s simetričnimi komponentami

Enačbo modela voda (3.36) lahko zapišemo tudi s simetričnimi komponentami. Za prikaz pretvorbe v simetrične komponente vzemimo enačbe za izračun napetosti v vozlišču  $n$ :

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{U}}_{Ln} &= \underline{\mathbf{U}}_{Lm} + \underline{\mathbf{Z}} \cdot \underline{\mathbf{I}}_L, \\ \underline{\mathbf{I}}_L &= \underline{\mathbf{I}}_{Lm} + \frac{1}{2} \underline{\mathbf{Y}} \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Lm}. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Pretvorbo enačbe za tok  $\underline{\mathbf{I}}_L$  v simetrične komponente izvedemo z množenjem enačbe s transformacijsko matriko  $\underline{\mathbf{S}}$  in upoštevamo  $\underline{\mathbf{U}}_{Lm} = \underline{\mathbf{S}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Sm}$ :

$$\underline{\mathbf{S}} \cdot \underline{\mathbf{I}}_L = \underline{\mathbf{S}} \cdot \underline{\mathbf{I}}_{Lm} + \frac{1}{2} \underline{\mathbf{S}} \cdot \underline{\mathbf{Y}} \cdot \underline{\mathbf{S}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Sm}, \quad (3.38)$$

kar krajše zapišemo kot:

$$\underline{\mathbf{I}}_S = \underline{\mathbf{I}}_{Sm} + \frac{1}{2} \underline{\mathbf{Y}}_S \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Sm}. \quad (3.39)$$

Elementi posameznih vektorjev so:

$$\underline{\mathbf{S}} \cdot \underline{\mathbf{I}}_L = \underline{\mathbf{I}}_S = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{S}} \cdot \underline{\mathbf{I}}_{Lm} = \underline{\mathbf{I}}_{Sm} = \begin{bmatrix} I_{0m} \\ I_{1m} \\ I_{2m} \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{S}} \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Lm} = \underline{\mathbf{U}}_{Sm} = \begin{bmatrix} U_{0m} \\ U_{1m} \\ U_{2m} \end{bmatrix}. \quad (3.40)$$

Simetrične komponente admitančne matrice podaja izraz:

$$\underline{\mathbf{S}}\underline{\mathbf{Y}}\underline{\mathbf{S}}^{-1} = \underline{\mathbf{S}}\underline{\mathbf{Y}}\underline{\mathbf{T}} = \underline{\mathbf{Y}}_S. \quad (3.41)$$

Pretvorbo enačbe za napetost  $\underline{\mathbf{U}}_{Ln}$  v simetrične komponente ravno tako izvedemo z množenjem s transformacijsko matriko  $\underline{\mathbf{S}}$ .

$$\underline{\mathbf{S}} \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Ln} = \underline{\mathbf{S}} \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Sm} + \underline{\mathbf{S}} \cdot \underline{\mathbf{Z}} \cdot \underline{\mathbf{S}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{I}}_S \quad (3.42)$$

To krajše zapišemo kot:

$$\underline{\mathbf{U}}_{Sn} = \underline{\mathbf{U}}_{Sm} + \underline{\mathbf{Z}}_S \cdot \underline{\mathbf{I}}_S, \quad (3.43)$$

kjer je

$$\underline{\mathbf{S}} \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Ln} = \underline{\mathbf{U}}_{Sn} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{0n} \\ \underline{U}_{1n} \\ \underline{U}_{2n} \end{bmatrix}. \quad (3.44)$$

Simetrične komponente impedančne matrice podaja izraz:

$$\underline{\mathbf{S}}\underline{\mathbf{Z}}\underline{\mathbf{S}}^{-1} = \underline{\mathbf{S}}\underline{\mathbf{Z}}\underline{\mathbf{T}} = \underline{\mathbf{Z}}_S. \quad (3.45)$$

Združimo enačbi (3.39) in (3.43):

$$\underline{\mathbf{U}}_{Sn} = \underline{\mathbf{U}}_{Sm} + \underline{\mathbf{Z}}_S \left( \underline{\mathbf{I}}_{Sm} + \frac{1}{2} \underline{\mathbf{Y}}_S \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Sm} \right) \quad (3.46)$$

in preuredimo v:

$$\underline{\mathbf{U}}_{Sn} = \left( \underline{\mathbf{E}} + \frac{1}{2} \underline{\mathbf{Z}}_S \cdot \underline{\mathbf{Y}}_S \right) \underline{\mathbf{U}}_{Sm} + \underline{\mathbf{Z}}_S \cdot \underline{\mathbf{I}}_{Sm}, \quad (3.47)$$

ki podaja enačbo za napetost v vozlišču  $n$ , izraženo s pomočjo simetričnih komponent:

$$\underline{\mathbf{U}}_{Sn} = \underline{\mathbf{a}}_S \cdot \underline{\mathbf{U}}_{Sm} + \underline{\mathbf{b}}_S \cdot \underline{\mathbf{I}}_{Sm}. \quad (3.48)$$

Na podoben način lahko naredimo tudi transformacijo enačbe za izračun tokov v vozlišču  $n$  v simetrične komponente.

Splošno enačbo trifaznega modela voda s simetričnimi komponentami tako zapišemo kot:

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{Sn} \\ \underline{\mathbf{I}}_{Sn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{a}}_S & \underline{\mathbf{b}}_S \\ \underline{\mathbf{c}}_S & \underline{\mathbf{d}}_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{Sm} \\ \underline{\mathbf{I}}_{Sm} \end{bmatrix}. \quad (3.49)$$

Pri tem je model voda, izražen s pomočjo simetričnih komponent, ekvivalenten zapisu v trifaznem sistemu. Tudi velikosti vektorjev in matrik sta v obeh zapisih enaki. Poenostavitev prinese šele upoštevanje lastnosti simetričnih komponent impedančne in admitančne matrice, kar bo prikazano v nadaljevanju.

### 3.4.1 Simetrične komponente impedančne in admitančne matrice

V tem poglavju si bom ogledali še lastnosti transformacije impedančne matrice v simetrične komponente. Impedančna matrika je podana kot:

$$\underline{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{L11} & \underline{Z}_{L12} & \underline{Z}_{L13} \\ \underline{Z}_{L21} & \underline{Z}_{L22} & \underline{Z}_{L23} \\ \underline{Z}_{L31} & \underline{Z}_{L32} & \underline{Z}_{L33} \end{bmatrix}, \quad (3.50)$$

kjer je  $\underline{Z}$  kvadratna matrika, ki ima v diagonali elemente lastnih impedanc, izven diagonale pa elemente medsebojnih impedanc.

Določitev matrike  $\underline{Z}_s$ , ki predstavlja simetrične komponente impedančne matrike, smo opisali že zgoraj:

$$\underline{Z}_s = \underline{SZT} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{00} & \underline{Z}_{01} & \underline{Z}_{02} \\ \underline{Z}_{10} & \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{20} & \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix}. \quad (3.51)$$

Pri tem so elementi v matriki naslednji:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{00} &= \frac{1}{3}[(\underline{Z}_{L11} + \underline{Z}_{L22} + \underline{Z}_{L33}) + 2(\underline{Z}_{L12} + \underline{Z}_{L23} + \underline{Z}_{L13})] \\ \underline{Z}_{11} &= \frac{1}{3}[(\underline{Z}_{L11} + \underline{Z}_{L22} + \underline{Z}_{L33}) - (\underline{Z}_{L12} + \underline{Z}_{L23} + \underline{Z}_{L13})] \\ \underline{Z}_{22} &= \underline{Z}_{11} \\ \underline{Z}_{01} &= \frac{1}{3}[(\underline{Z}_{L11} + \underline{a}^2 \underline{Z}_{L22} + \underline{a} \underline{Z}_{L33}) - (\underline{Z}_{L23} + \underline{a}^2 \underline{Z}_{L12} + \underline{a} \underline{Z}_{L13})] \\ \underline{Z}_{02} &= \frac{1}{3}[(\underline{Z}_{L11} + \underline{a} \underline{Z}_{L22} + \underline{a}^2 \underline{Z}_{L33}) - (\underline{Z}_{L23} + \underline{a} \underline{Z}_{L12} + \underline{a}^2 \underline{Z}_{L13})] \\ \underline{Z}_{12} &= \frac{1}{3}[(\underline{Z}_{L11} + \underline{a}^2 \underline{Z}_{L22} + \underline{a} \underline{Z}_{L33}) + 2(\underline{Z}_{L23} + \underline{a} \underline{Z}_{L12} + \underline{a}^2 \underline{Z}_{L13})] \\ \underline{Z}_{10} &= \underline{Z}_{02} \\ \underline{Z}_{20} &= \underline{Z}_{01} \\ \underline{Z}_{21} &= \frac{1}{3}[(\underline{Z}_{L11} + \underline{a} \underline{Z}_{L22} + \underline{a}^2 \underline{Z}_{L33}) + 2(\underline{Z}_{L23} + \underline{a}^2 \underline{Z}_{L12} + \underline{a} \underline{Z}_{L13})] \end{aligned} \quad (3.52)$$

Pri vodih lahko največkrat predpostavimo, da so lastne impedance med seboj enake in da so tudi medsebojne impedance med seboj enake, kar je ključna predpostavka za poenostavitev izračuna s simetričnimi komponentami:

$$\underline{Z}_{L11} = \underline{Z}_{L22} = \underline{Z}_{L33} = \underline{Z}_l, \quad (3.53)$$

$$\underline{Z}_{L12} = \underline{Z}_{L23} = \underline{Z}_{L13} = \underline{Z}_m. \quad (3.54)$$

Če ta predpostavka drži, ima matrika  $\underline{Z}_s$  samo diagonalne člene:

$$\underline{Z}_s = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{00} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_l + 2\underline{Z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_l - \underline{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_l - \underline{Z}_m \end{bmatrix}. \quad (3.55)$$

Podoben izraz dobimo za simetrične komponente admitančne matrike:

$$\underline{Y}_s = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{00} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_l + 2\underline{Y}_m & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_l - \underline{Y}_m & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_l - \underline{Y}_m \end{bmatrix}. \quad (3.56)$$

### 3.4.2 Enačbe voda v primeru simetrične impedančne in admitančne matrike

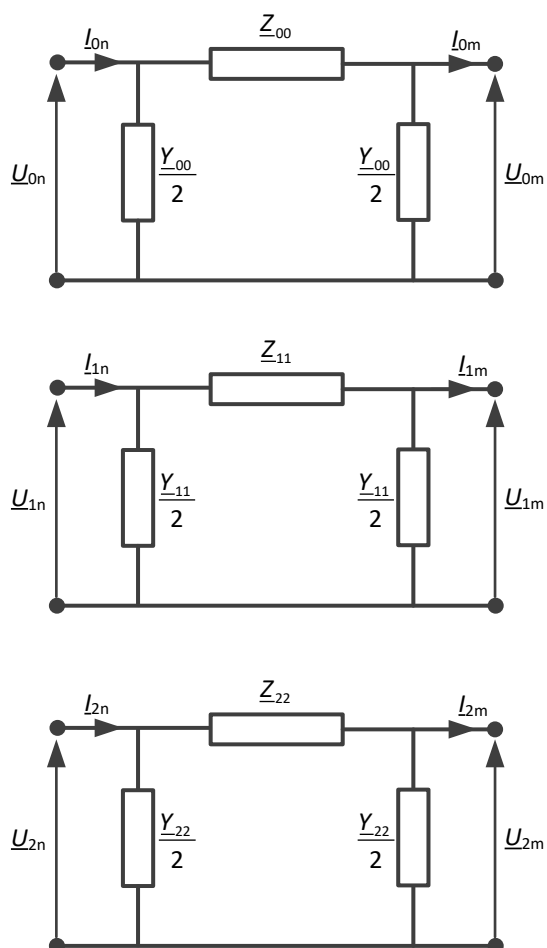
Če sta matriki  $\underline{Z}_s$  in  $\underline{Y}_s$  diagonalni, so tudi matrike  $\underline{a}_s$ ,  $\underline{b}_s$ ,  $\underline{c}_s$  in  $\underline{d}_s$  diagonalne, kar pomeni, da so pozitivni, negativni in nični sistem komponent med sabo neodvisni. Enačba modela voda, izražena s pomočjo simetričnih komponent, ima naslednjo obliko:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{0n} \\ \underline{U}_{1n} \\ \underline{U}_{2n} \\ \underline{I}_{0n} \\ \underline{I}_{1n} \\ \underline{I}_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{a}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{a}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{a}_2 \\ \underline{c}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{c}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{c}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{b}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{b}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{b}_2 \\ \underline{d}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{d}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{d}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{0m} \\ \underline{U}_{1m} \\ \underline{U}_{2m} \\ \underline{I}_{0m} \\ \underline{I}_{1m} \\ \underline{I}_{2m} \end{bmatrix}. \quad (3.57)$$

Členi  $\underline{a}_0$ ,  $\underline{b}_0$ ,  $\underline{c}_0$  in  $\underline{d}_0$  so na primer določeni kot:

$$\begin{aligned} \underline{a}_0 &= 1 + \frac{\underline{Z}_{00} \underline{Y}_{00}}{2}, \\ \underline{b}_0 &= \underline{Z}_{00}, \\ \underline{c}_0 &= \underline{Y}_{00} \left( 1 + \frac{\underline{Z}_{00} \underline{Y}_{00}}{4} \right), \\ \underline{d}_0 &= 1 + \frac{\underline{Z}_{00} \underline{Y}_{00}}{2}. \end{aligned} \quad (3.58)$$

Vod tako lahko predstavimo s tremi nadomestnimi vezji, torej z enim  $\pi$  vezjem v vsakem sistemu simetričnih komponent. Elementi vezij so členi simetričnih komponent impedančne in admitančne matrike (slika 3.5).



Slika 3.5: Nadomestna vezja voda s pomočjo simetričnih komponent (vezja za nični, pozitivni in negativen sistem)

---

### 3.5 Ohmska upornost nadzemnih vodov

Obratovalna ohmska upornost trifaznih vodov je ohmska upornost faznih vodnikov na km dolžine ob normalni frekvenci 50 Hz. Ohmska upornost neposredno vpliva na izgube na vodniku. Izračunamo jo s pomočjo enačbe:

$$R' = \frac{\rho_{Al}}{A_{Al}} \quad (\Omega/m), \quad (3.59)$$

kjer sta  $A_{Al}$  aktivni električni prerez vodnika ( $m^2$ ) in  $\rho_{Al}$  specifična ohmska upornost ( $\Omega m$ ), ki je odvisna od vrste materiala.

V primeru snopastega vodnika, kjer tok ene faze prevaja več vodnikov, upoštevamo pri določitvi upornosti tudi število vodnikov v snopu  $n$ :

$$R'_s = \frac{R'}{n} \quad (\Omega/m). \quad (3.60)$$

Običajno se ohmska upornost podaja pri temperaturi 20 °C. Spreminjanje upornosti v odvisnosti od temperature nam podaja naslednja enačba:

$$R'_g = R'_{20} (1 + \alpha_{20} (g - 20^\circ)), \quad (3.61)$$

kjer je  $\alpha$  temperaturni koeficient za ohmsko upornost.

Dodatne izgube, ki nastopajo v vodniku, so še:

- vrtinčni tokovi v jedru,
- kožni efekt (polni oz. homogeni vodniki) in
- bližinski pojav.

V prenosnem omrežju nevtralni vodnik ni izveden, zato nične tokove prevaja zemlja. Upornost zemlje je pri nizkih frekvencah konstantna in odvisna samo od obratovalne frekvence ter znaša:

$$R'_z \approx f \cdot 10^{-3} = 0,05 \quad (\Omega/km). \quad (3.62)$$

### 3.6 Induktivnost nadzemnih vodov

Induktivnost je snovno-geometrijska lastnost prostora in jo v splošnem izračunamo kot kvocient magnetnega sklepa in toka,  $L = \psi / i$ . Za izračun moramo torej določiti magnetni sklep [3].

#### 3.6.1 Izračun magnetnega sklepa voda

Magnetno poljsko jakost lahko določimo s pomočjo Amperovega zakona toka:

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_A \vec{J} \cdot d\vec{a} = i, \quad (3.63)$$

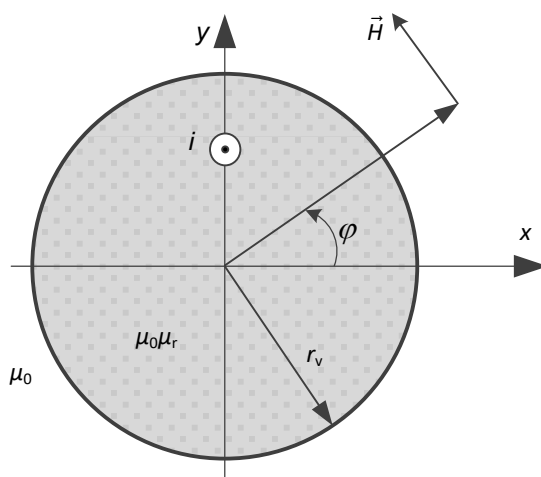
pri čemer je vektor magnetne poljske jakosti  $\vec{H}$  definiran kot

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r}, \quad (3.64)$$

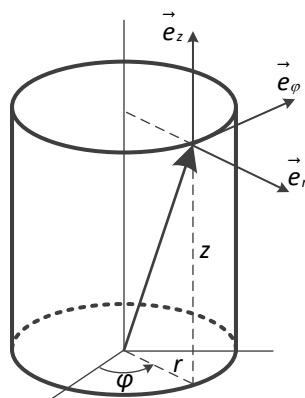
kjer je  $\vec{B}$  vektor gostote magnetnega pretoka,  $\vec{M}$  vektor magnetizacije,  $\mu_0$  permeabilnost praznega prostora in  $\mu_r$  relativna permeabilnost snovi:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4} \text{ (H / km)}. \quad (3.65)$$

Za izpeljavo induktivnosti vzemimo vodnik, prikazan na sliki 3.6.



Slika 3.6: Magnetno polje ob dolgem ravnem vodniku



Slika 3.7: Valjčni koordinatni sistem



Polje ravnega vodnika predstavimo v valjčnem koordinatnem sistemu z baznimi vektorji  $\vec{e}_r$ ,  $\vec{e}_\varphi$  in  $\vec{e}_z$ , slika 3.7. Vektor  $\vec{H}$  ima krožno smer glede na vodnik.

$$\vec{H} = (0, H_\varphi, 0) \quad (3.66)$$

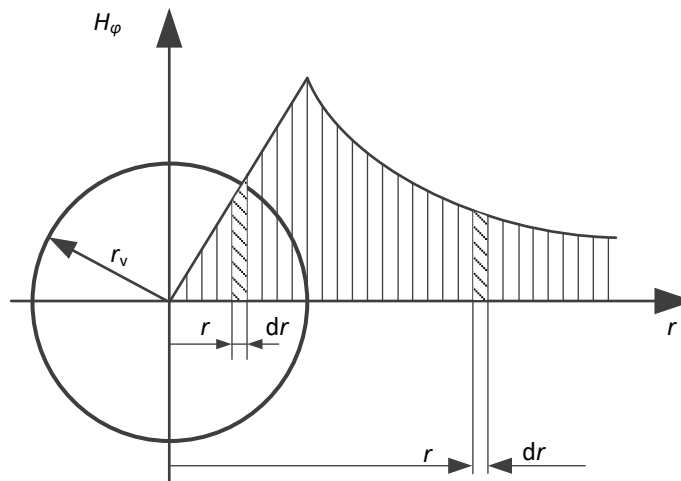
Za vodnik na sliki 3.6 lahko zapišemo integral po krožni poti kot:

$$\oint_{2\pi r} \vec{H} \cdot d\vec{l} = 2\pi r \cdot H_\varphi = \begin{cases} i \left(\frac{r}{r_v}\right)^2 & r \leq r_v \\ i & r > r_v \end{cases} \quad (3.67)$$

Magnetna poljska jakost je torej:

$$H_\varphi(r) = \begin{cases} \frac{r}{2\pi r_v^2} i & r \leq r_v \\ \frac{1}{2\pi r} i & r > r_v \end{cases} \quad (3.68)$$

Potek magnetne poljske jakosti znotraj in zunaj vodnika je prikazan na sliki 3.8.



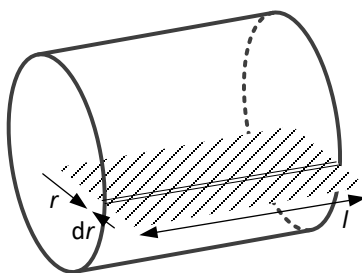
Slika 3.8: Magnetna poljska jakost znotraj in zunaj vodnika

Vektor  $B_\varphi$  lahko izrazimo z vektorjem  $H_\varphi$ , kjer velja  $B = \mu_0 \mu_r H = \mu H$ . Za zrak je  $\mu_r = 1$ . Če upoštevamo to relacijo, lahko enačbo (3.68) zapišemo kot:

$$B_\varphi(r) = \begin{cases} \frac{\mu_0 \mu_r r}{2\pi r_v^2} i & r \leq r_v \\ \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi r} i & r > r_v \end{cases} \quad (3.69)$$

Magnetni sklep je definiran z enačbo:

$$\psi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{a} \quad (3.70)$$



Slika 3.9: Geometrija za izračun magnetnega sklepa

V kolikor zapišemo magnetni sklep za vodnik na sliki 3.9, dobimo:

$$\psi(r) = \int_0^r B_\varphi(r) \cdot l \cdot dr, \quad (3.71)$$

kar lahko, ob upoštevanju izraza za  $B_\varphi(r)$ , izrazimo kot:

$$\psi(r) = \begin{cases} \int_0^r \frac{\mu_0 r}{2\pi r_v^2} i \cdot l \cdot dr, & r \leq r_v \\ \int_{r_v}^r \frac{\mu_0}{2\pi r} i \cdot l \cdot dr, & r > r_v \end{cases} \quad (3.72)$$

in

$$\psi(r) = \begin{cases} \frac{\mu_0 i l}{4\pi} \left(\frac{r}{r_v}\right)^2, & r \leq r_v \\ \frac{\mu_0 i l}{2\pi} \ln \frac{r}{r_v}, & r > r_v \end{cases} \quad (3.73)$$

Izraz za magnetni sklep za ploskev, ki poteka od središča vodnika do poljubnega  $r$  zunaj vodnika, je:

$$\psi(r) = \int_0^{r_v} \frac{\mu_0 r}{2\pi r_v^2} i \cdot l \cdot dr + \int_{r_v}^r \frac{\mu_0}{2\pi r} i \cdot l \cdot dr = \frac{\mu_0 i l}{2\pi} \left( \frac{1}{2} + \ln \frac{r}{r_v} \right). \quad (3.74)$$

### 3.6.2 Induktivnost dveh vodnikov

Induktivnost je definirana kot kvocient magnetnega sklepa in toka:

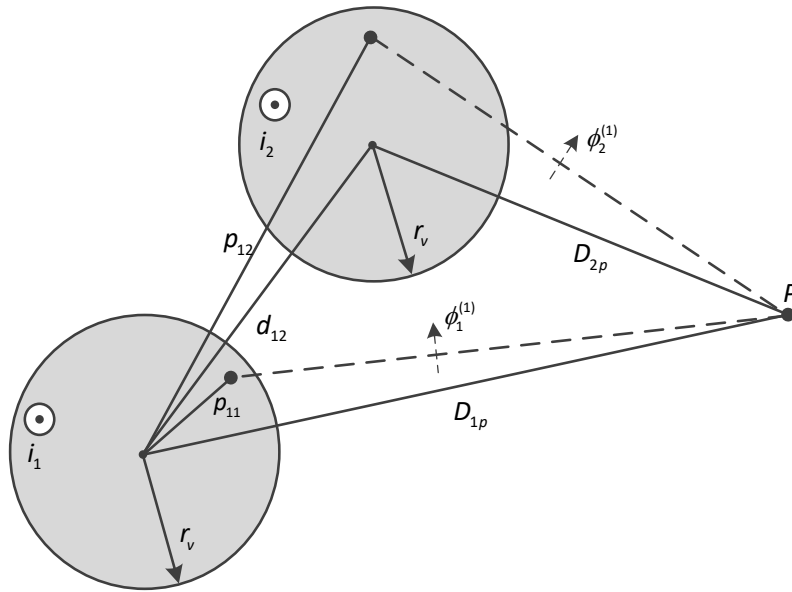
$$L_z = \frac{\psi_{povp}}{i}, \quad (3.75)$$

pri čemer je  $\psi_{povp}$  povprečen magnetni sklep, ki ga izračunamo kot povprečje magnetnih pretokov skozi vse konture. Dokaz, ki ga bomo tukaj izpustili, je mogoče izpeljati preko energije magnetnega polja.

Povprečen magnetni sklep izračunamo z enačbo (3.76), kjer je  $\psi(r)$  sklep posamičnih tokovnih elementov.

$$\psi_{povp} = \frac{1}{A} \int_A \psi(r) \cdot da \quad (3.76)$$

Koeficiente lastne in medsebojne induktivnosti bomo izračunali za sistem dveh vodnikov, ki sta prikazana na sliki 3.10. Računali bomo induktivnosti zanke do splošne točke  $P$ .



Slika 3.10: Geometrija sistema dveh vodnikov

### 3.6.2.1 Medsebojna induktivnost

Najprej bomo določili medsebojno induktivnost  $L_{12}$ , ki je določena kot kvocient povprečnega magnetnega pretoka (oz. sklepa) vodnika 2 zaradi toka  $i_1$ :

$$L_{12} = \frac{\phi_2^{(1) \text{ povp}}}{i_1}. \quad (3.77)$$

Magnetni pretok  $\phi_2^{(1)}$  skozi zanko (ploskev), ki jo določata razdalji  $p_{12}$  in  $D_{1p}$ , je:

$$\phi_2^{(1)} = \frac{\mu_0 i_1 l}{2\pi} \ln \frac{D_{1p}}{p_{12}} = \frac{\mu_0 i_1 l}{2\pi} (\ln D_{1p} - \ln p_{12}). \quad (3.78)$$

Povprečni pretok izračunamo z integriranjem pretoka  $\phi_2^{(1)}$ , kjer  $p_{12}$  potuje po celotni ploskvi vodnika 2.

$$\phi_2^{(1) \text{ povp}} = \frac{1}{\pi r_v^2} \int_A \phi_2^{(1)} \cdot da \quad (3.79)$$

Ločeno izračunajmo integrala obeh logaritemskih členov:

$$\frac{1}{\pi r_v^2} \int_A \ln D_{1p} \cdot da = \frac{1}{\pi r_v^2} \ln D_{1p} \cdot \pi r_v^2 = \ln D_{1p}. \quad (3.80)$$

Z upoštevanjem  $da = r \cdot dr \cdot d\alpha$  (slika 3.11) zapišimo še drugi integral in rezultat:

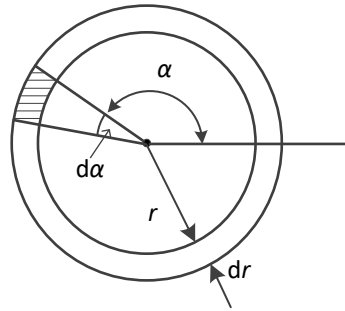
$$\frac{1}{\pi r_v^2} \int_A \ln p_{12} \cdot da = \frac{1}{\pi r_v^2} \int_0^{r_v} \left( \int_0^{2\pi} \ln p_{12} \cdot d\alpha \right) r \cdot dr = \ln d_{12}. \quad (3.81)$$

Povprečni magnetni sklep je torej:

$$\phi_2^{(1) \text{ povp}} = \frac{\mu_0 i_1 l}{2\pi} \ln \frac{D_{1p}}{d_{12}}, \quad (3.82)$$

medsebojna induktivnost pa

$$L_{12} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D_{1p}}{d_{12}}. \quad (3.83)$$



Slika 3.11: Geometrija vodnika

### 3.6.2.2 Lastna induktivnost

Lastna induktivnost  $L_{11}$  je določena kot kvocient povprečnega magnetnega pretoka (oz. sklepa) vodnika 1 zaradi toka  $i_1$  in toka  $i_1$ :

$$L_{11} = \frac{\phi_{1 \text{ povp}}^{(1)}}{i_1}. \quad (3.84)$$

Magnetni pretok  $\phi_1^{(1)}$  skozi zanko (ploskev), ki jo določata razdalji  $p_{11}$  in  $D_{1p}$ , je:

$$\phi_1^{(1)} = \frac{\mu_0 i_1 l}{2\pi} \left( \frac{1}{2} + \ln \frac{D_{1p}}{r_v} \right) - \frac{\mu_0 i_1 l}{4\pi} \frac{p_{11}^2}{r_v^2}. \quad (3.85)$$

Povprečni pretok izračunamo z integriranjem pretoka  $\phi_1^{(1)}$ , kjer  $p_{11}$  potuje po celotni ploskvi vodnika 1.

$$\phi_{1 \text{ povp}}^{(1)} = \frac{1}{\pi r_v^2} \int_A \phi_1^{(1)} \cdot d\alpha \quad (3.86)$$

Ločeno izračunajmo integrala obeh členov. Razdalja  $D_{1p}$  je pri tem konstantna:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\pi r_v^2} \int_A \frac{\mu_0 i_1 l}{2\pi} \left( \frac{1}{2} + \ln \frac{D_{1p}}{r_v} \right) \cdot d\alpha = \\ & = \frac{1}{\pi r_v^2} \cdot \frac{\mu_0 i_1 l}{2\pi} \left( \frac{1}{2} + \ln \frac{D_{1p}}{r_v} \right) \pi r_v^2 = \\ & = \frac{\mu_0 i_1 l}{2\pi} \left( \frac{1}{2} + \ln \frac{D_{1p}}{r_v} \right). \end{aligned} \quad (3.87)$$

Razdalja  $p_{11}$  potuje po vodniku 1. Upoštevamo, da je  $d\alpha = 2\pi \cdot p \cdot dp$ :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\pi r_v^2} \int_0^{r_v} \frac{\mu_0 i_1 l}{4\pi} \cdot \frac{p^2}{r_v^2} 2\pi \cdot p \cdot dp = \\ & = \frac{1}{\pi r_v^2} \frac{\mu_0 i_1 l}{4\pi} \cdot 2\pi \cdot \frac{1}{r_v^2} \cdot \frac{r_v^4}{4} = \\ & = \frac{\mu_0 i_1 l}{8\pi}. \end{aligned} \quad (3.88)$$

Povprečni magnetni sklep je torej:

$$\phi_{1 \text{ povp}}^{(1)} = \frac{\mu_0 i_1 l}{2\pi} \left( \frac{1}{2} + \ln \frac{D_{1p}}{r_v} - \frac{1}{4} \right) = \frac{\mu_0 i_1 l}{2\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D_{1p}}{r_v} \right), \quad (3.89)$$

lastna induktivnost pa

$$L_{11} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D_{1p}}{r_v} \right). \quad (3.90)$$

Če upoštevamo še  $\frac{1}{4} = \ln e^{0,25}$ , dobimo:

$$\begin{aligned} L_{11} &= \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \ln \frac{D_{1p}}{r_v e^{-0,25}} = \\ &= \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \ln \frac{D_{1p}}{0,779 \cdot r_v} \end{aligned} \quad (3.91)$$

$$L_{11} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \ln \frac{D_{1p}}{r_e}, \quad (3.92)$$

kjer je  $r_e$  ekvivalentni polmer vodnika.

Dosedanja izpeljava je temeljila na vodniku polnega prereza. Vode v elektroenergetskem omrežju običajno tvorijo vrvi, torej vodniki, sestavljeni iz večjega števila žic. V splošnem določimo ekvivalentni polmer vodnika kot produkt dejanskega polmera in koeficienta  $f_e$ , ki je odvisen od vrste vodnika:

$$r_e = f_e \cdot r_v. \quad (3.93)$$

Pri vrveh si za določitev radija pomagamo z aproksimativnim izrazom, kjer upoštevamo tudi polnilni faktor voda:

$$r_v = \frac{1,3 \sqrt{(A_{Al} + A_{Fe})}}{2}. \quad (3.94)$$

Ekvivalentni polmer snopa določimo kot:

$$r_{es} = \sqrt[n]{n \cdot r_v \cdot r_d^{n-1}}. \quad (3.95)$$

### 3.6.3 Induktivnost trifaznega sistema

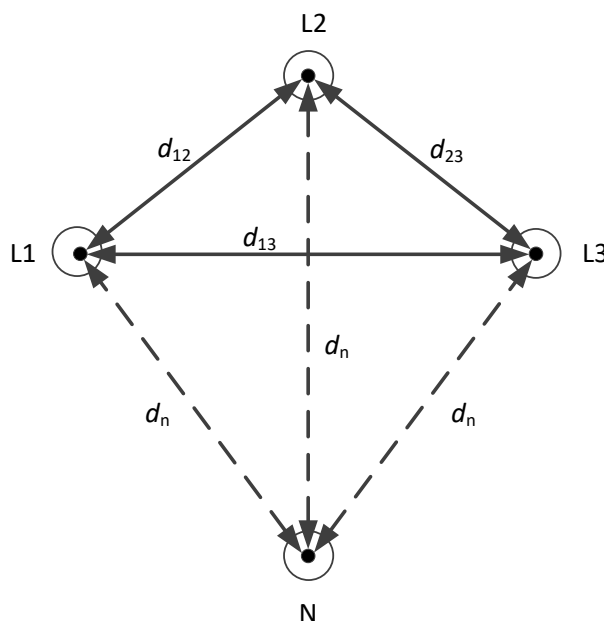
V nadaljevanju bo prikazana izpeljava induktivnosti trifaznega sistema, izvedena za konfiguracijo, ki je prikazana na sliki 3.12. Pri izpeljavi je privzeto, da je nevtralni vodnik na veliki oddaljenosti od faznih vodnikov. Privzamemo lahko, da so razdalje od nevtralnega do faznih vodnikov enake, in sicer  $d_{L1N} = d_{L2N} = d_{L3N} = d_N$ . Za tokove trifaznega sistema lahko zapišemo še:

$$I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} + I_N = 0. \quad (3.96)$$

Magnetni pretoki vodnikov do poljubne točke  $P$  na razdalji  $D_p$  so:

$$\begin{aligned} \Phi_{L1} &= I_{L1} L_{L11} + I_{L2} L_{L12} + I_{L3} L_{L13} + I_N L_{L1N}, \\ \Phi_{L2} &= I_{L1} L_{L21} + I_{L2} L_{L22} + I_{L3} L_{L23} + I_N L_{L2N}, \\ \Phi_{L3} &= I_{L1} L_{L31} + I_{L2} L_{L32} + I_{L3} L_{L33} + I_N L_{L3N}. \end{aligned} \quad (3.97)$$

Pri tem so  $L_{L11}$ ,  $L_{L22}$  in  $L_{L33}$  koeficienti lastne induktivnosti,  $L_{L12} = L_{L21}$ ,  $L_{L23} = L_{L32}$  in  $L_{L13} = L_{L31}$  koeficienti medsebojne induktivnosti med posameznimi fazami,  $L_{L1N}$ ,  $L_{L2N}$ ,  $L_{L3N}$  pa koeficienti medsebojne induktivnosti do ničnega vodnika.



Slika 3.12: Trifazni sistem – izpeljava induktivnosti

Za fazo L1 lahko zapišemo:

$$\underline{\Phi}_{L1} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[ I_{L1} \ln \frac{D_p}{r_e} + I_{L2} \ln \frac{D_p}{d_{12}} + I_{L3} \ln \frac{D_p}{d_{13}} + I_N \ln \frac{D_p}{d_n} \right] \quad (3.98)$$

in z upoštevanjem  $I_N = -(I_{L1} + I_{L2} + I_{L3})$  dobimo:

$$\underline{\Phi}_{L1} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left( I_{L1} \ln \frac{d_n}{r_e} + I_{L2} \ln \frac{d_n}{d_{12}} + I_{L3} \ln \frac{d_n}{d_{13}} \right). \quad (3.99)$$

Lastna induktivnost faze L1 je torej:

$$L_l = L_{L11} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{d_n}{r_e}, \quad (3.100)$$

koeficienta medsebojne induktivnosti pa sta:

$$L_{L12} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{d_n}{d_{12}}, \quad (3.101)$$

$$L_{L13} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{d_n}{d_{13}}.$$

Enačbo za magnetne pretoke zapišemo v matrični obliki:

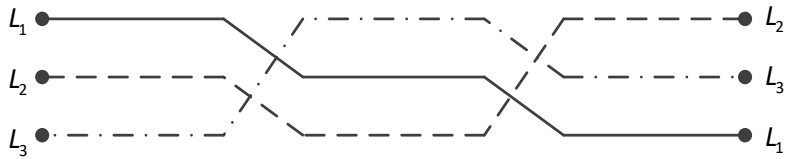
$$\begin{bmatrix} \underline{\Phi}_{L1} \\ \underline{\Phi}_{L2} \\ \underline{\Phi}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{L11} & L_{L12} & L_{L13} \\ L_{L12} & L_{L22} & L_{L23} \\ L_{L13} & L_{L23} & L_{L33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \end{bmatrix}. \quad (3.102)$$

### 3.6.3.1 Simetriranje trifaznega sistema

Zaradi konstrukcijskih razlogov vodniki na stebrih večinoma niso nameščeni simetrično. Posledice so:

- neenakomerna tokovna porazdelitev med fazami,
- povečan vpliv induktivnosti in kapacitivnosti na sosednje telefonske napeljave ter
- neenakomerna napetost posameznih faz do zemlje.

Enakost vseh faznih impedanc zagotovimo s simetriranjem oziroma prepletanjem, ki ga izvedemo na tretjinah dolžine trase (slika 3.13).



Slika 3.13: Prepletanje daljnovoda

S simetriranjem dosežemo, da so medsebojne induktivnosti med sabo enake in jih izračunamo kot:

$$L_m = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{d_n}{d_{sr}}, \quad (3.103)$$

kjer je  $d_{sr}$  srednja geometrijska razdalja med vodniki:

$$d_{sr} = \sqrt[3]{d_{12} d_{23} d_{13}}. \quad (3.104)$$

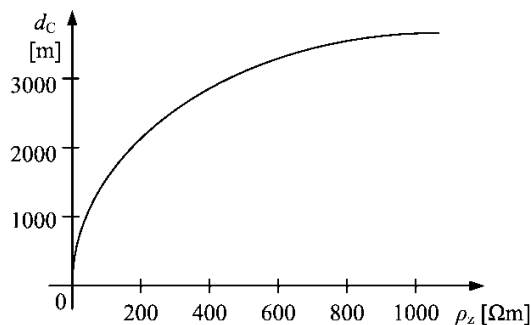
### 3.6.3.2 Carsonova razdalja

Carsonova razdalja je definirana z enačbo (3.105), izračunane vrednosti za različne specifične upornosti zemlje pa so prikazane na sliki 3.14.

$$d_n = d_c = 93,1 \sqrt{\rho_z} \quad [m] \quad (3.105)$$

Pri tem je  $\rho_z$  specifična upornost zemlje.

Carsonova razdalja podaja globino magnetnih silnic v zemlji v odvisnosti od specifične upornosti tal.



Slika 3.14: Carsonova razdalja v odvisnosti od specifične upornosti tal

### 3.6.4 Impedanca trifaznega sistema z upoštevanjem zemlje

Na osnovi izrazov, ki smo jih izpeljali v prejšnjem poglavju, lahko zapišemo izraza za lastno in medsebojno induktivnost z upoštevanjem zemlje kot:

$$L_{l-z} = L_{l11} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{d_c}{r_e}, \quad (3.106)$$

$$L_{m-z} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{d_c}{d_{sr}}. \quad (3.107)$$

Lastne impedance so zaradi enakih faznih vodnikov med seboj enake:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{L11} &= \underline{Z}_{L22} = \underline{Z}_{L33} = \underline{Z}_{l-z}, \\ \underline{Z}_{l-z} &= R + R_z + j\omega \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{d_c}{r_e}. \end{aligned} \quad (3.108)$$

V kolikor izvedemo simetriranje so tudi medsebojne impedance enake:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{L12} &= \underline{Z}_{L13} = \underline{Z}_{L23} = \underline{Z}_{m-z}, \\ \underline{Z}_{m-z} &= R_z + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{d_c}{d_{sr}}. \end{aligned} \quad (3.109)$$

Impedančno matriko voda zapišemo kot:

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{l-z} & \underline{Z}_{m-z} & \underline{Z}_{m-z} \\ \underline{Z}_{m-z} & \underline{Z}_{l-z} & \underline{Z}_{m-z} \\ \underline{Z}_{m-z} & \underline{Z}_{m-z} & \underline{Z}_{l-z} \end{bmatrix}, \quad (3.110)$$

simetrične komponente impedančne matrike pa so:

$$\underline{Z}_s = \underline{SZT} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{l-z} + 2 \cdot \underline{Z}_{m-z} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{l-z} - \underline{Z}_{m-z} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{l-z} - \underline{Z}_{m-z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{00} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix}. \quad (3.111)$$

Elementi matrike po deljenju z dolžino  $l$  so:

$$\underline{Z}'_{00} = R' + 3 \cdot R'_z + j\omega \cdot 3 \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d_c}{\sqrt[3]{r_e d_{sr}^2}}, \quad (3.112)$$

$$\underline{Z}'_{11} = R' + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d_{sr}}{r_e}, \quad (3.113)$$

$$\underline{Z}'_{11} = \underline{Z}'_{22}. \quad (3.114)$$

Izraze lahko zapišemo še s pomočjo desetiškega logaritma:

$$\underline{Z}'_{00} = R' + 3 \cdot 0,05 + j \cdot 3 \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{d_c}{\sqrt[3]{r_e d_{sr}^2}}, \quad (3.115)$$

$$\underline{Z}'_{11} = \underline{Z}'_{22} = R' + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{d_{sr}}{r_e}. \quad (3.116)$$

### 3.6.5 Impedanca trifaznega sistema z zaščitno vrvjo

Zaščitna vrv ščiti daljnovod pred udarom strele. Ker je zaščitna vrv ozemljena, se nični tokovi ne pojavljajo samo v zemlji, ampak tudi v zaščitni vrv. Z upoštevanjem simetriranja lahko padec napetosti na vodu opišemo z enačbami v matrični obliki:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_{L1} \\ \Delta \underline{U}_{L2} \\ \Delta \underline{U}_{L3} \\ \Delta \underline{U}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}'_{l-z} & \underline{Z}'_{m-z} & \underline{Z}'_{m-z} & \underline{Z}'_{x-z} \\ \underline{Z}'_{m-z} & \underline{Z}'_{l-z} & \underline{Z}'_{m-z} & \underline{Z}'_{x-z} \\ \underline{Z}'_{m-z} & \underline{Z}'_{m-z} & \underline{Z}'_{l-z} & \underline{Z}'_{x-z} \\ \underline{Z}'_{x-z} & \underline{Z}'_{x-z} & \underline{Z}'_{x-z} & \underline{Z}'_{xx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \\ I_x \end{bmatrix} \quad (3.117)$$

ali pa, z ločitvijo matrike na dva dela, kot:



$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_{L1} \\ \Delta \underline{U}_{L2} \\ \Delta \underline{U}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}'_{l-z} & \underline{Z}'_{m-z} & \underline{Z}'_{m-z} \\ \underline{Z}'_{m-z} & \underline{Z}'_{l-z} & \underline{Z}'_{m-z} \\ \underline{Z}'_{m-z} & \underline{Z}'_{m-z} & \underline{Z}'_{l-z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Z}'_{x-z} \\ \underline{Z}'_{x-z} \\ \underline{Z}'_{x-z} \end{bmatrix} I_x, \quad (3.118)$$

$$[\Delta \underline{U}_x] = \begin{bmatrix} \underline{Z}'_{x-z} & \underline{Z}'_{x-z} & \underline{Z}'_{x-z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \end{bmatrix} + \underline{Z}'_{xx} I_x = 0.$$

Iz zgornje enačbe izpeljemo odvisnost med tokom zaščitnega vodnika in faznimi tokovi:

$$\begin{aligned} \underline{Z}'_{x-z} (I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}) + \underline{Z}'_{xx} I_x &= 0, \\ I_x &= -\frac{\underline{Z}'_{x-z}}{\underline{Z}'_{xx}} (I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}) \end{aligned} \quad (3.119)$$

in relacijo upoštevamo pri zapisu napetosti na vodu:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_{L1} \\ \Delta \underline{U}_{L2} \\ \Delta \underline{U}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}'_{l-z} & \underline{Z}'_{m-z} & \underline{Z}'_{m-z} \\ \underline{Z}'_{m-z} & \underline{Z}'_{l-z} & \underline{Z}'_{m-z} \\ \underline{Z}'_{m-z} & \underline{Z}'_{m-z} & \underline{Z}'_{l-z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{Z}'_{x-z} \\ \underline{Z}'_{x-z} \\ \underline{Z}'_{x-z} \end{bmatrix} \cdot \frac{\underline{Z}'_{x-z}}{\underline{Z}'_{xx}} (I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}). \quad (3.120)$$

Napetost na vodu z zaščitno vrvmjo lahko torej zapišemo s pomočjo impedančne matrike velikosti 3 x 3:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_{L1} \\ \Delta \underline{U}_{L2} \\ \Delta \underline{U}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}'_{l-zx} & \underline{Z}'_{m-zx} & \underline{Z}'_{m-zx} \\ \underline{Z}'_{m-zx} & \underline{Z}'_{l-zx} & \underline{Z}'_{m-zx} \\ \underline{Z}'_{m-zx} & \underline{Z}'_{m-zx} & \underline{Z}'_{l-zx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \end{bmatrix}, \quad (3.121)$$

kjer posamezni koeficienti vsebujejo tudi vpliv zaščitne vrvi:

$$\begin{aligned} \underline{Z}'_{l-zx} &= \underline{Z}'_{l-z} - \frac{(\underline{Z}'_{x-z})^2}{\underline{Z}'_{xx}}, \\ \underline{Z}'_{m-zx} &= \underline{Z}'_{m-z} - \frac{(\underline{Z}'_{x-z})^2}{\underline{Z}'_{xx}}. \end{aligned} \quad (3.122)$$

S pomočjo znanih relacij za transformacijo impedance v simetrične komponente dobimo pri simetriranem vodu simetrične komponente impedance z upoštevanje zaščitne vrvi. Nična komponenta je enaka:

$$\underline{Z}'_{00x} = \underline{Z}'_{l-zx} + 2\underline{Z}'_{m-zx}, \quad (3.123)$$

$$\underline{Z}'_{00x} = \underline{Z}'_{l-z} + 2\underline{Z}'_{m-z} - 3\frac{(\underline{Z}'_{x-z})^2}{\underline{Z}'_{xx}} = \underline{Z}'_{00} - 3\frac{(\underline{Z}'_{x-z})^2}{\underline{Z}'_{xx}}, \quad (3.124)$$

komponenti pozitivnega in negativnega sistema pa sta:

$$\begin{aligned} \underline{Z}'_{11x} &= \underline{Z}'_{22x} = \underline{Z}'_{l-zx} - \underline{Z}'_{m-zx} = \\ &= \underline{Z}'_{l-z} - \underline{Z}'_{m-z} = \underline{Z}'_{11} = \underline{Z}'_{22}. \end{aligned} \quad (3.125)$$

Kot je razvidno, ima zaščitna vrv vpliv le na nično impedanco. Impedanci pozitivnega in negativnega sistema ostaneta nespremenjeni.

Pri izračunu korekcijskega člena za nično impedanco potrebujemo izraz za medsebojno impedanco med snopom faznih vodnikov, skupaj z zaščitnim vodnikom proti zemlji, ki ga podaja naslednji izraz:

$$\underline{Z}'_{x-z} = 0,05 + j0,1445 \log \frac{d_c}{\sqrt[3]{d_{L1x} d_{L2x} d_{L3x}}} . \quad (3.126)$$

Razdalje  $d_{L1x}$ ,  $d_{L2x}$  in  $d_{L3x}$  predstavljajo oddaljenost faznih vodnikov od zaščitnega vodnika. Drugi izraz, ki ga potrebujemo, je induktivnost med zaščitnim vodnikom in zemljo:

$$\underline{Z}'_{xx} = R'_{zv} + 0,05 + j0,1445 \log \frac{d_c}{r_{ez}} , \quad (3.127)$$

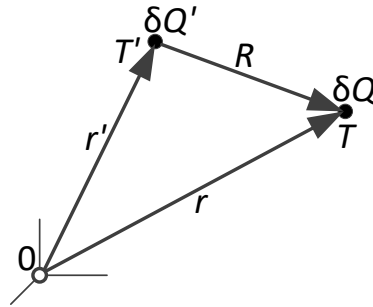
pri čemer je  $R'_{zv}$  upornost na enoto dolžine zaščitnega vodnika in  $r_{ez}$  ekvivalentni polmer zaščitnega vodnika.

### 3.7 Kapacitivnost nadzemnih vodov

Kapacitivnost je snovno-geometrijska lastnost prostora [3]. Prostor predstavlja kondenzator, kapacitivnost pa je merilo za nabrano elektrino na prevodnih površinah pri določeni napetosti med prevodnima površinama. Povsod tam, kjer lahko določimo napetost med dvema prevodnima površinama in kjer obstaja električna povezava, imamo kondenzator. Določene električne povezave zato predstavljajo kondenzatorsko vezje.

#### 3.7.1 Splošne enačbe električnega polja

Na sliki 3.15 sta prikazani dve elektrini v prostoru.



Slika 3.15: Prikaz dveh elektrin v prostoru

Silo na elektrino  $dQ$  lahko zapišemo kot:

$$d\vec{F}_e = \vec{R} \frac{dQ \cdot dQ'}{4\pi\epsilon_0 R^3}, \quad (3.128)$$

pri čemer je  $\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}'$ . Sila na drugo elektrino je enake velikosti in nasprotne smeri.

Vektor električne poljske jakosti je definiran z enačbo:

$$d\vec{E}(T) = \frac{d\vec{F}_e}{dQ}. \quad (3.129)$$

Če vstavimo  $d\vec{F}_e$  v enačbo (3.129) in izraz integriramo, dobimo:

$$\vec{E}(T) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_Q \frac{\vec{R}}{R^3} dQ(T'). \quad (3.130)$$

Točka  $T$  predstavlja mesto, kjer se nahaja splošen diferencial točkaste elektrine  $dQ(T')$ , distančni vektor  $\vec{R}$  pa je usmerjena daljica med točko vira ( $T'$ ) in točko opazovanja ( $T$ ). Vektor  $\vec{R}$  je torej  $\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}'$ .

Vektor gostote električnega pretoka je povezan z nabojem in vektorjem električne poljske jakosti:

$$\oint_A \vec{D} d\vec{a} = Q, \quad (3.131)$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\epsilon_0 \epsilon_r},$$

dielektrična konstanta pa je

$$\epsilon_0 = \frac{1}{c_0^2 \cdot \mu_0} = 8,85 \cdot 10^{-12} = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \left[ \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \right]. \quad (3.132)$$

Električni potencial (električno napetost) izračunamo tako, da integriramo vektor električne poljske jakosti med splošno točko  $T$  in točko v neskončnosti, kjer predpostavimo, da je potencial enak nič:

$$V(T) = \int_T^{\infty} \vec{E} d\vec{l}, \quad (3.133)$$

napetost pa določimo kot razliko potencialov

$$U_{12} = V(T_1) - V(T_2) = \int_{T_1}^{T_2} \vec{E} d\vec{l}. \quad (3.134)$$

### 3.7.1.1 Vektor električne poljske jakosti v okolici preme elektrine

Predpostavimo daljico dolžine  $l$ , ki je naelektrena z elektrino  $Q$ . Privzeli bomo, da je vzdolžna gostota konstantna, kar lahko zapišemo kot  $Q' = Q/l$ . V točki  $T$ , ki je za razdaljo  $r$  oddaljena od daljice, lahko določimo vektorja gostote električnega pretoka in električne poljske jakosti. Podana sta v simetralni ravnini, ki daljico razpolavlja, in imata radialno smer:

$$\begin{aligned} D_r &= \frac{Q}{2\pi r l} = \frac{Q'}{2\pi r}, \\ E_r &= \frac{Q'}{2\pi\epsilon_0 r}. \end{aligned} \quad (3.135)$$

To velja ob predpostavki, da je  $r \ll l$ , ko smo še razmeroma oddaljeni od obeh koncev daljice. Za premo elektrino zapišemo potencial kot integral vektorja električne poljske jakosti:

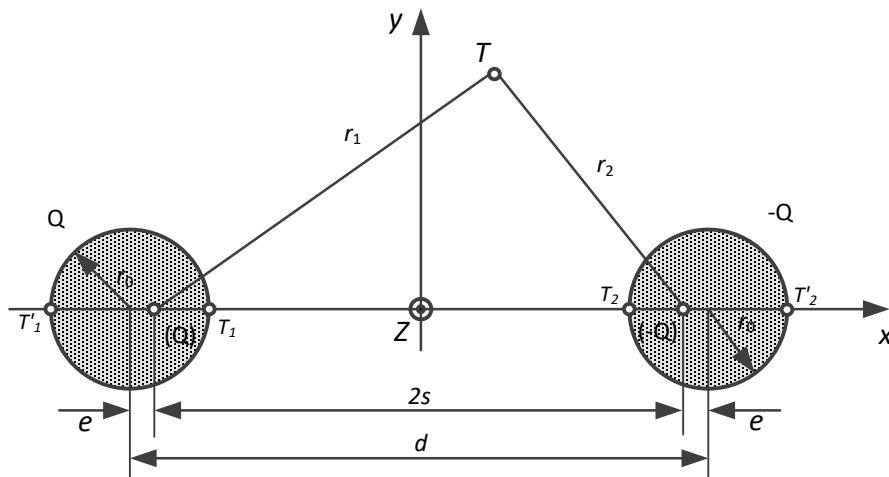
$$V(r) = -\frac{Q'}{2\pi\epsilon_0} \ln r = \frac{Q'}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{1}{r}. \quad (3.136)$$

Potencial v okolici preme elektrine je logaritemsko odvisen od oddaljenosti. Zapišimo še napetost med radijema  $r_1$  in  $r_2$  kot:

$$U_{12} = V(r_1) - V(r_2) = \frac{Q'}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (3.137)$$

### 3.7.2 Kapacitivnost dveh vodnikov

Izpeljali bomo izraz za polje v okolici dveh vzporednih dolgih vodnikov na sliki 3.16, ki imata polmer  $r_0$ , sta na razdalji  $d$  in naelektrena z nasprotnima elektrinama  $\pm Q$ . Elektrini  $Q$  in  $-Q$  sta dejanski elektrini na površju vodnikov, elektrini ( $Q$ ) in ( $-Q$ ) pa sta njuna matematična ekvivalenta za polje zunaj vodnikov. Ti nadomestni elektrini ležita ekscentrično glede na geometrijski osi vodnikov. Osema pomožnih elektrin pravimo tudi električni osi dvovoda. Razmik med električno in geometrijsko osjo imenujemo ekscentričnost.



Slika 3.16: Simetričen dvovod

Z geometrijo dvovoda lahko določimo ekscentričnost, ki jo označimo s črko  $e$ . Iz parametrov ekvipotencialk je  $s = \sqrt{(d/2)^2 - r_0^2}$ . Če upoštevamo sliko, dobimo za ekscentričnost:

$$e = \frac{d}{2} - \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - r_0^2}. \quad (3.138)$$

Potencial v okolici dvovoda določata pomožni elektrini:

$$V(T) = \frac{Q'}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (3.139)$$

Napetost med vodoma je razlika potencialov. Izberimo si točki  $T_1$  in  $T_2$  in zapišimo:

$$U_{12} = V(T_1) - \underbrace{V(T_2)}_{-V(T_1)} = 2V(T_1) = \frac{Q'}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{s + d/2 - r_0}{s - d/2 + r_0} = \frac{Q'}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{d + \sqrt{d^2 - 4r_0^2}}{2r_0}. \quad (3.140)$$

V kolikor je  $r_0 \ll d$ , lahko enačbo (3.140) poenostavimo v:

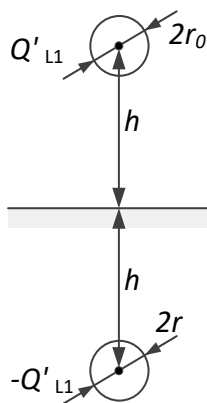
$$U_{12} = \frac{Q'}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{d}{r_0},$$

$$C' = \frac{Q'}{U} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d}{r_0}} \quad \left[ \frac{\text{As}}{\text{Vm}} = \frac{\text{F}}{\text{m}} \right]. \quad (3.141)$$

Pojem kapacitivnosti podaja odvisnost med absolutno količino elektrine in napetostjo med telesoma.

### 3.7.3 Kapacitivnost sistema vodnik-zemlja

Pri izračunu kapacitivnosti vodnika nad zemljo upoštevamo, da vodnik z zemljo tvori enako polje kot vodnik s svojo zrcalno sliko, če zemljo odstranimo (slika 3.17).



Slika 3.17: Sistem vodnik-zemlja

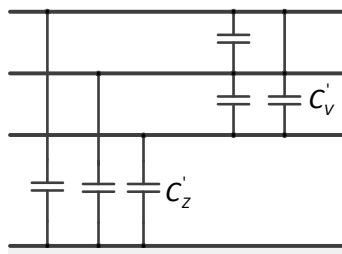
V enačbi (3.141) upoštevamo, da je razdalja  $D$  enaka  $2h$ , in dobimo:

$$C' = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r_0}},$$

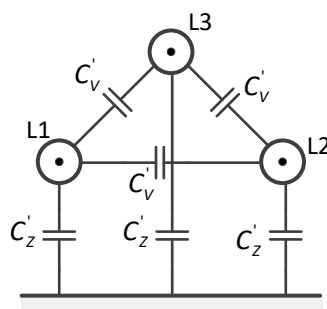
$$C'_1 = 2C' = 2 \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r_0}}. \quad (3.142)$$

### 3.7.4 Kapacitivnosti trifaznega sistema

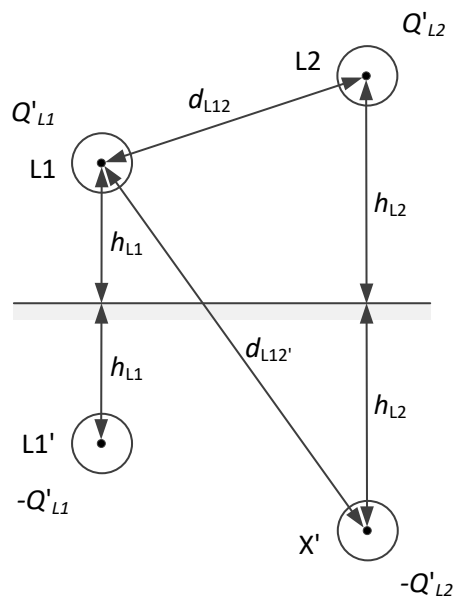
Električno povezavo med tremi vodniki brez zaščitne vrvi in zemljo (slika 3.18) podamo s šestimi delnimi kapacitivnostmi – tri medsebojne in tri dozemne kapacitivnosti tvorijo kondenzatorsko vezje na sliki 3.19. Če predpostavimo, da je vod simetriran, so tri dozemne kapacitivnosti med seboj enake. Enako velja za tri medsebojne kapacitivnosti. Razdalje med vodniki so označene na sliki 3.20.



Slika 3.18: Kapacitivnosti enosistemskega voda brez zaščitne vrvi



Slika 3.19: Delne kapacitivnosti pri enosistemskem vodu brez zaščitne vrvi



Slika 3.20: Razdalje med dvema vodnikoma in zrcalnima slikama

V splošnem lahko potencial preme elektrine zapišemo kot:

$$V = -\frac{Q'}{2\pi\epsilon_0} \ln r = \frac{Q'}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{1}{r}. \quad (3.143)$$

Potencial za vodnik v fazi L1 je:

$$\begin{aligned} V_{L1} &= -\frac{Q'_{L1}}{2\pi\epsilon_0} \ln r_{L1} + \frac{Q'_{L1}}{2\pi\epsilon_0} \ln 2h_{L1} - \frac{Q'_{L2}}{2\pi\epsilon_0} \ln d_{L12} + \\ &+ \frac{Q'_{L2}}{2\pi\epsilon_0} \ln d_{L12'} - \frac{Q'_{L3}}{2\pi\epsilon_0} \ln d_{L13} + \frac{Q'_{L3}}{2\pi\epsilon_0} \ln d_{L13'}, \\ V_{L1} &= \frac{Q'_{L1}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_{L1}}{r_{L1}} + \frac{Q'_{L2}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{L12'}}{d_{L12}} + \frac{Q'_{L3}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{L13'}}{d_{L13}}. \end{aligned} \quad (3.144)$$

To lahko krajše zapišemo kot:

$$V_{L1} = P_{L11} Q'_{L1} + P_{L12} Q'_{L2} + P_{L13} Q'_{L3}. \quad (3.145)$$

Potenciala za vse tri vodnike podaja matrična enačba:

$$\begin{bmatrix} V_{L1} \\ V_{L2} \\ V_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{L11} & P_{L12} & P_{L13} \\ P_{L21} & P_{L22} & P_{L23} \\ P_{L31} & P_{L32} & P_{L33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q'_{L1} \\ Q'_{L2} \\ Q'_{L3} \end{bmatrix}, \quad (3.146)$$

kar lahko krajše zapišemo kot:

$$\mathbf{V} = \mathbf{PQ}, \quad (3.147)$$

kjer je

- $\mathbf{V}$  vektor potencialov,
- $\mathbf{Q}$  vektor elektrin in
- $\mathbf{P}$  matrika potencialnih koeficientov.

Če upoštevamo, da je vod prepleten, so lastni in medsebojni potencialni koeficienti med seboj enaki in lahko matriko potencialnih koeficientov zapišemo kot:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_l & P_m & P_m \\ P_m & P_l & P_m \\ P_m & P_m & P_l \end{bmatrix}. \quad (3.148)$$

Lastni in medsebojni potencialni koeficienti v matriki so definirani z naslednjima izrazoma:

$$P_l = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r}, \quad (3.149)$$

$$P_m = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d'_{sr}}{d_{sr}}, \quad (3.150)$$

kjer za povprečno višino in srednjo razdaljo velja:

$$\begin{aligned} h &= \sqrt[3]{h_{l1} h_{l2} h_{l3}}, \\ d_{sr} &= \sqrt[3]{d_{l12} d_{l23} d_{l13}}, \\ d'_{sr} &= \sqrt[3]{d_{l12'} d_{l23'} d_{l31'}}, \end{aligned} \quad (3.151)$$

razdalje pa so definirane na naslednji način:

$$\begin{aligned} d_{l12'} &= \sqrt{(h_{l1} + h_{l2})^2 + x^2}, \\ x^2 &= d_{l12}^2 - (h_{l2} - h_{l1})^2, \\ d_{l12} &= \sqrt{(h_{l1} + h_{l2})^2 + d_{l12}^2 - (h_{l2} - h_{l1})^2}, \\ d_{l12'} &= \sqrt{4h_{l1} h_{l2} + d_{l12}^2}. \end{aligned} \quad (3.152)$$

Povezavo med nabojem in potencialom zapišemo kot:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{V}, \quad (3.153)$$

matrika  $\mathbf{P}^{-1}$  pa je:

$$\mathbf{P}^{-1} = \mathbf{K} = \begin{bmatrix} P_l & P_m & P_m \\ P_m & P_l & P_m \\ P_m & P_m & P_l \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} K_l & K_m & K_m \\ K_m & K_l & K_m \\ K_m & K_m & K_l \end{bmatrix}. \quad (3.154)$$

Izračun elementov matrike K podaja naslednji izraz:

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= \begin{bmatrix} \frac{P_l + P_m}{P_l^2 + P_l P_m - 2P_m^2} & -\frac{P_m}{P_l^2 + P_l P_m - 2P_m^2} & -\frac{P_m}{P_l^2 + P_l P_m - 2P_m^2} \\ -\frac{P_m}{P_l^2 + P_l P_m - 2P_m^2} & \frac{P_l + P_m}{P_l^2 + P_l P_m - 2P_m^2} & -\frac{P_m}{P_l^2 + P_l P_m - 2P_m^2} \\ -\frac{P_m}{P_l^2 + P_l P_m - 2P_m^2} & -\frac{P_m}{P_l^2 + P_l P_m - 2P_m^2} & \frac{P_l + P_m}{P_l^2 + P_l P_m - 2P_m^2} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \frac{P_l + P_m}{(P_l + 2P_m)(P_l - P_m)} & -\frac{P_m}{(P_l + 2P_m)(P_l - P_m)} & -\frac{P_m}{(P_l + 2P_m)(P_l - P_m)} \\ -\frac{P_m}{(P_l + 2P_m)(P_l - P_m)} & \frac{P_l + P_m}{(P_l + 2P_m)(P_l - P_m)} & -\frac{P_m}{(P_l + 2P_m)(P_l - P_m)} \\ -\frac{P_m}{(P_l + 2P_m)(P_l - P_m)} & -\frac{P_m}{(P_l + 2P_m)(P_l - P_m)} & \frac{P_l + P_m}{(P_l + 2P_m)(P_l - P_m)} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.155)$$



V nadaljevanju moramo še določiti, kakšen je pomen elementov matrike  $\mathbf{K}$ , oziroma kakšna je povezava med kapacitivnostmi sistema in elementi matrike. Kapacitivnost lahko v splošnem izrazimo z naslednjo enačbo:

$$C'_{ij} = \frac{Q'_{ij}}{V_i - V_j}. \quad (3.156)$$

Za  $Q_{L1}$  lahko zapišemo:

$$\begin{aligned} Q'_{L1} &= C'_{12}(V_{L1} - V_{L2}) + C'_{13}(V_{L1} - V_{L3}) + C'_{10}(V_{L1} - V_{L0}), \\ Q'_{L1} &= (C'_{12} + C'_{13} + C'_{10})V_{L1} - C'_{12}V_{L2} - C'_{13}V_{L3}, \end{aligned} \quad (3.157)$$

kjer je  $V_{L0}=0$ ,  $V_{L1}$ ,  $V_{L2}$  in  $V_{L3}$ , pa so napetosti do zemlje.

Za vse tri elektrine lahko po zgornjem zgledu zapišemo:

$$\begin{bmatrix} Q'_{L1} \\ Q'_{L2} \\ Q'_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C'_{12} + C'_{13} + C'_{10} & -C'_{12} & -C'_{13} \\ -C'_{12} & C'_{12} + C'_{23} + C'_{20} & -C'_{23} \\ -C'_{13} & -C'_{23} & C'_{13} + C'_{23} + C'_{30} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{L1} \\ V_{L2} \\ V_{L3} \end{bmatrix}. \quad (3.158)$$

Če upoštevamo še simetriranje daljnovoda in je  $C'_{10} = C'_{20} = C'_{30} = C'_z$  ter so medsebojne kapacitivnosti enake  $C'_v$ , dobimo:

$$\begin{bmatrix} Q'_{L1} \\ Q'_{L2} \\ Q'_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C'_v + C'_v + C'_z & -C'_v & -C'_v \\ -C'_v & C'_v + C'_v + C'_z & -C'_v \\ -C'_v & -C'_v & C'_v + C'_v + C'_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{L1} \\ V_{L2} \\ V_{L3} \end{bmatrix}. \quad (3.159)$$

S primerjavo izrazov dobimo povezave med elementi matrike  $\mathbf{K}$  in kapacitivnostmi trifaznega sistema. Za medsebojne kapacitivnosti zapišemo:

$$\begin{aligned} K_m &= -C'_v, \\ C'_v &= \frac{P_m}{(P_l + 2P_m)(P_l - P_m)}, \end{aligned} \quad (3.160)$$

za lastne pa:

$$K_l = C'_v + C'_v + C'_z. \quad (3.161)$$

Za  $C'_z$  dobimo:

$$\begin{aligned} C'_z &= K_l - C'_v - C'_v = K_l + 2K_m, \\ C'_z &= \frac{P_l + P_m}{(P_l + 2P_m)(P_l - P_m)} - \frac{2P_m}{(P_l + 2P_m)(P_l - P_m)} = \frac{P_l - P_m}{(P_l + 2P_m)(P_l - P_m)}, \\ C'_z &= \frac{1}{P_l + 2P_m}. \end{aligned} \quad (3.162)$$

Za  $C_v$  pa dobimo:

$$C'_v = C'_z \frac{P_m}{P_l - P_m}. \quad (3.163)$$

Admitančna matrika je definirana kot:

$$\mathbf{Y}'_c = j\omega \cdot \mathbf{K}, \quad (3.164)$$

simetrične komponente admitančne matrike pa izračunamo z izrazom:

$$\mathbf{Y}'_s = \mathbf{S} \cdot \mathbf{Y}' \cdot \mathbf{T} \quad (3.165)$$

in admitančno matriko zapišemo kot:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Y}'_s &= j\omega \cdot \begin{bmatrix} K_l + 2K_m & 0 & 0 \\ 0 & K_l - K_m & 0 \\ 0 & 0 & K_l - K_m \end{bmatrix} = \\
 &= j\omega \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{P_l + 2P_m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{P_l - P_m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{P_l - P_m} \end{bmatrix} = \\
 &= j\omega \cdot \begin{bmatrix} C'_{00} & 0 & 0 \\ 0 & C'_{11} & 0 \\ 0 & 0 & C'_{22} \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{3.166}$$

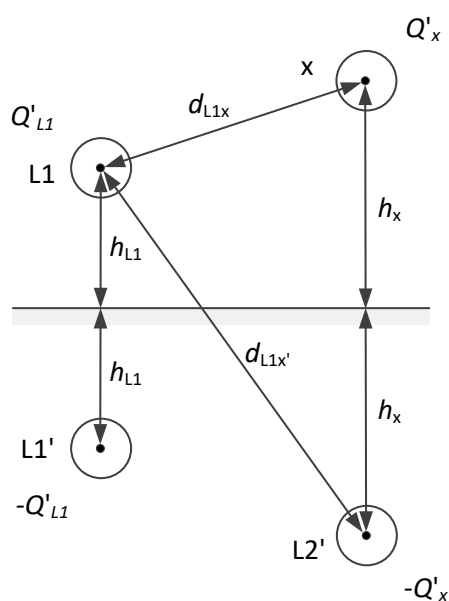
Elementi impedančne matrike so kapacitivnosti ničnega, pozitivnega in negativnega sistema:

$$C'_{00} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left[ \frac{2h}{r} \left( \frac{d'_{sr}}{d_{sr}} \right)^2 \right]}, \tag{3.167}$$

$$C'_{11} = C'_{22} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left[ \frac{2h}{r} \frac{d_{sr}}{d'_{sr}} \right]}. \tag{3.168}$$

### 3.7.5 Kapacitivnosti trifaznega sistema z zaščitno vrvjo

Geometrijo sistema z zaščitno vrvjo podaja spodnja slika.



Slika 3.21: Geometrija sistema z zaščitno vrvjo

Z upoštevanjem simetriranja lahko potencialne faznih vodnikov in zaščitnega vodnika opišemo z enačbami v matrični obliki:

$$\begin{bmatrix} V_{L1} \\ V_{L2} \\ V_{L3} \\ V_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_l & P_m & P_m & P_x \\ P_m & P_l & P_m & P_x \\ P_m & P_m & P_l & P_x \\ P_x & P_x & P_x & P_{xx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q'_{L1} \\ Q'_{L2} \\ Q'_{L3} \\ Q'_x \end{bmatrix}. \quad (3.169)$$

Potencialne koeficiente zaščitne vrvi podajata spodnja izraza:

$$P_{xx} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_x}{r_x}, \quad (3.170)$$

$$P_{L1x} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d'_{L1x}}{d_{L1x}}. \quad (3.171)$$

Z upoštevanjem prepletanja daljnovoda pa lahko medsebojni potencialni koeficient zapišemo s povprečno vrednostjo faznih koeficientov:

$$P_x = \frac{1}{3}(P_{L1x} + P_{L2x} + P_{L3x}) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d'_{srx}}{d_{srx}}. \quad (3.172)$$

Pri tem so srednje razdalje določene kot:

$$d_{srx} = \sqrt[3]{d_{L1x} d_{L2x} d_{L3x}}, \quad (3.173)$$

$$d'_{srx} = \sqrt[3]{d'_{L1x} d'_{L2x} d'_{L3x}}.$$

Za določitev vpliva zaščitne vrvi postopamo enako kot pri določanju vpliva zaščitne vrvi na impedanco sistema. Matriko potencialnih koeficientov (3.169) razdelimo na štiri podmatrike, da matrika  $\mathbf{P}_{ij}$  vsebuje potencialne koeficiente faznih vrvi.

$$\begin{bmatrix} V_{L1} \\ V_{L2} \\ V_{L3} \\ V_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_l & P_m & P_m \\ P_m & P_l & P_m \\ P_m & P_m & P_l \\ P_x & P_x & P_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q'_x \\ Q'_x \\ Q'_x \\ Q'_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_x \\ P_x \\ P_x \\ P_{xx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q'_{L1} \\ Q'_{L2} \\ Q'_{L3} \\ Q'_x \end{bmatrix} \quad (3.174)$$

oziroma

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_L \\ \mathbf{V}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{ij} & \mathbf{P}_{in} \\ \mathbf{P}_{nj} & \mathbf{P}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_L \\ \mathbf{Q}_x \end{bmatrix}. \quad (3.175)$$

Upošteevamo, da je zaščitna vrv ozemljena in je njen potencial enak nič:

$$\mathbf{V}_L = \mathbf{P}_{ij} \mathbf{Q}_L + \mathbf{P}_{in} \mathbf{Q}_x, \quad (3.176)$$

$$\mathbf{V}_x = \mathbf{P}_{nj} \mathbf{Q}_L + \mathbf{P}_{nn} \mathbf{Q}_x = 0. \quad (3.177)$$

Iz enačbe izrazimo naboj zaščitne vrvi in ga vstavimo v izraz za potencial faznih vodnikov (3.176):

$$\mathbf{Q}_x = -\mathbf{P}_{nn}^{-1} \mathbf{P}_{nj} \mathbf{Q}_L, \quad (3.178)$$

$$\mathbf{V}_L = (\mathbf{P}_{ij} - \mathbf{P}_{in} \mathbf{P}_{nn}^{-1} \mathbf{P}_{nj}) \mathbf{Q}_L. \quad (3.179)$$

Dobimo izraz za potencial faznih vodnikov, kjer je v potencialnih koeficientih zajet tudi vpliv zaščitne vrvi:

$$\begin{bmatrix} V_{L1} \\ V_{L2} \\ V_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{lx} & P_{mx} & P_{mx} \\ P_{mx} & P_{lx} & P_{mx} \\ P_{mx} & P_{mx} & P_{lx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q'_{L1} \\ Q'_{L2} \\ Q'_{L3} \end{bmatrix}. \quad (3.180)$$

Posamični potencialni koeficienti so:

$$P_{lx} = P_l - \frac{P_x^2}{P_{xx}}, \quad (3.181)$$

$$P_{mx} = P_m - \frac{P_x^2}{P_{xx}}.$$

Iz potencialnih koeficientov lahko določimo tudi kapacitivnosti (komponente pozitivnega, negativnega in ničnega sistema) z upoštevanjem zaščitne vrvi. Ponovno lahko sklenemo, da ima zaščitna vrv vpliv samo na nični sistem.

$$C'_{11x} = C'_{22x} = \frac{1}{P_{l-x} - P_{m-x}} = C'_{11} = C'_{12} \quad (3.182)$$

$$C'_{00x} = \frac{1}{P_{l-x} + 2P_{m-x}} = \frac{1}{P_l + 2P_m - 3\frac{P_x^2}{P_{xx}}} \quad (3.183)$$

$$C'_{00x} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left[\frac{2h}{r}\left(\frac{d'_{sr}}{d_{sr}}\right)^2\right] - 3\frac{\ln^2\left[\frac{d'_{srx}}{d_{srx}}\right]}{\ln\left[\frac{2h_x}{r_x}\right]}} \quad (3.184)$$



## 4 Transformatorji

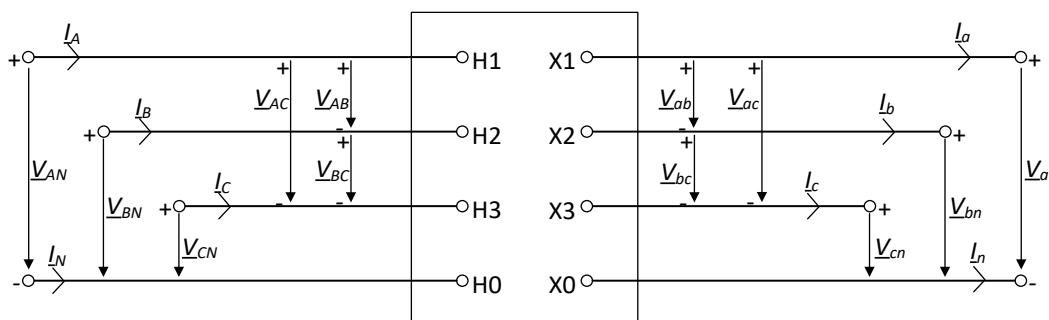
Transformatorji pretvarjajo napetosti z enega napetostnega nivoja na drugega in omogočajo prenos moči med napetostnima nivojema. Glede na možnost spreminjanja prestave ločimo dva tipa transformatorjev.

- Transformatorji z ročno nastavitvijo prestavnega razmerja, ki ga je mogoče spremeniti v odklopljenem stanju transformatorja. Običajno se uporabljajo pri blok transformatorjih generatorjev in pri transformatorjih s srednje na nizko napetost (SN/NN). Obseg regulacije prestavnega razmerja je običajno  $\pm 5\%$  s stopnjo regulacije 2,5 %.
- Regulacijski transformatorji, ki omogočajo spreminjanje prestavnega razmerja transformatorja pod obremenitvijo. To so običajno transformatorji z visoke napetosti na srednjo (VN/SN), ki imajo na primer 25 regulacijskih stopenj s stopnjo regulacije 1,33 %. Tudi VN/VN transformatorji v prenosnem omrežju so regulacijski transformatorji. V manjši meri so prisotni tudi SN/NN regulacijski transformatorji.

Na sliki 4.1 je prikazana splošna shema transformatorja z oznakami napetosti in tokov na primarni (omrežni) in sekundarni (bremenski) strani:

- $\underline{V}_{AB}, \underline{V}_{BC}, \underline{V}_{AC}$  medfazne napetosti na primarni strani,
- $\underline{V}_{AN}, \underline{V}_{BN}, \underline{V}_{CN}$  fazne napetosti na primarni strani,
- $\underline{V}_{ab}, \underline{V}_{bc}, \underline{V}_{ac}$  medfazne napetosti na sekundarni strani,
- $\underline{V}_{an}, \underline{V}_{bn}, \underline{V}_{cn}$  fazne napetosti na sekundarni strani,
- $I_A, I_B, I_C$  tokovi na primarni strani,
- $I_a, I_b, I_c$  tokovi na sekundarni strani.

V nadaljevanju bo prikazan postopek določitve modela transformatorja, ki omogoča izračun napetosti in tokov na sekundarni strani, če poznamo razmere na primarni strani (ali obratno) [6].



Slika 4.1: Napetosti in tokovi splošnega modela transformatorja

### 4.1 Splošen matrični zapis enačb transformatorja

Matematični model trifaznega transformatorja se uporablja za izračun pretokov moči v stacionarni delovni točki. Isti matematični model se lahko uporabi tudi za izračun napetosti in tokov ob kratkih stikih.

Splošni matriki (4.1) in (4.2) prikazujeta izračun napetosti in tokov na primarni strani v odvisnosti od napetosti in tokov na sekundarni strani.

$$[\underline{V}LN_{ABC}] = [a_t] \cdot [\underline{V}LN_{abc}] + [b_t] \cdot [I_{-abc}] \quad (4.1)$$

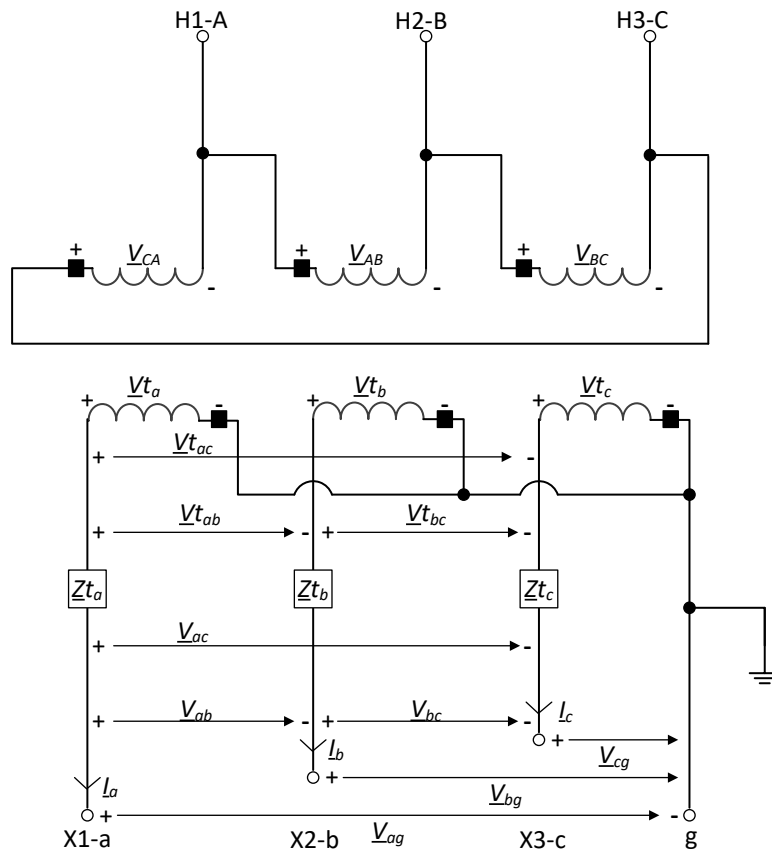
$$[I_{-ABC}] = [c_t] \cdot [\underline{V}LN_{abc}] + [d_t] \cdot [I_{-abc}] \quad (4.2)$$

Napetosti  $[\underline{V}LN_{ABC}]$  in  $[\underline{V}LN_{abc}]$  predstavljajo fazne napetosti na primarni oz. sekundarni strani. Pri vezavi navitij transformatorja v zvezdo so to napetosti med faznim in nevtralnim vodnikom oz. zemljo, pri vezavi v trikot pa so to ekvivalentne fazne napetosti.

Definiranje matematičnega modela trifaznega transformatorja zahteva določitev matrik  $[a_t]$ ,  $[b_t]$ ,  $[c_t]$  in  $[d_t]$ , ki se razlikujejo glede na način vezave transformatorja. V nadaljevanju bo predstavljen izračun za vezavo trikot-zvezda z ozemljenim zvezdiščem, ki jo najpogosteje srečujemo na SN/NN nivoju.

## 4.2 Vezava trikot-zvezda z ozemljenim zvezdiščem (Dyn)

Vezava se največkrat uporablja v SN/NN transformatorskih postajah. Ozemljeno zvezdišče na sekundarni strani omogoča priklop enofaznih porabnikov. Spodnja slika prikazuje vezavo transformatorja. Pri izpeljavi enačb je pomembno, da pazimo, kakšne polaritete imajo navitja transformatorja. V našem primeru ima polariteta napetosti sekundarnih navitij transformatorja obraten predznak od polaritete napetosti primarnih navitij.



Slika 4.2: Transformator vezave Dyn

### 4.2.1 Izračun napetosti

Izračun medfaznih napetosti na sekundarni strani določa naslednja enačba:

$$\underline{V}_{ab} = \underline{V}t_a - \underline{V}t_b \quad (4.3)$$

Razmerje števila ovojev ( $n_t$ ) med primarnim in sekundarnim navitjem se lahko določi iz razmerja nazivnih napetosti transformatorja. V našem primeru ga bomo definirali kot razmerje med medfazno napetostjo na primarni strani in fazno napetostjo na sekundarni strani:

$$n_t = \frac{VLL_{nazivna\_primar}}{VLN_{nazivna\_sekundar}}. \quad (4.4)$$

Glede na sliko 4.2 lahko izračunamo medfazne napetosti na primarni strani iz faznih napetosti na sekundarni strani:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{AB} \\ \underline{V}_{BC} \\ \underline{V}_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -n_t & 0 \\ 0 & 0 & -n_t \\ -n_t & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}t_a \\ \underline{V}t_b \\ \underline{V}t_c \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

kar krajše zapišemo kot:

$$[\underline{V}LL_{ABC}] = [AV] \cdot [\underline{V}t_{abc}], \quad (4.6)$$

kjer sta  $[\underline{V}LL_{ABC}]$  in  $[\underline{V}t_{abc}]$  vektorja medfaznih in faznih napetosti.

Ker za izračun potrebujemo fazne napetosti tudi na primarni strani, moramo izpeljati odvisnost med faznimi in medfaznimi napetostmi, ob upoštevanju, da je napetost lahko nesimetrična. To odvisnost bomo izpeljali s pomočjo simetričnih komponent. Simetrične komponente medfaznih napetosti izračunamo tako:

$$[\underline{V}LL_{012}] = [\underline{S}] \cdot [\underline{V}LL_{ABC}], \quad (4.7)$$

kjer je  $[\underline{S}]$  transformacijska matrika za izračun simetričnih komponent:

$$[\underline{S}] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}_s & \underline{a}_s^2 \\ 1 & \underline{a}_s^2 & \underline{a}_s \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Odvisnost simetričnih komponent faznih napetosti na primarni strani  $[\underline{V}LN_{012}]$  od simetričnih komponent medfaznih napetosti  $[\underline{V}LL_{012}]$  je prikazana s spodnjo enačbo:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}LN_0 \\ \underline{V}LN_1 \\ \underline{V}LN_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{t}_s^* & 0 \\ 0 & 0 & \underline{t}_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}LL_0 \\ \underline{V}LL_1 \\ \underline{V}LL_2 \end{bmatrix}, \quad (4.9)$$

kar lahko krajše zapišemo kot:

$$[\underline{V}LN_{012}] = [\underline{T}_s] \cdot [\underline{V}LL_{012}]. \quad (4.10)$$

Pri tem sta:

$$\begin{aligned} \underline{t}_s &= \frac{1}{\sqrt{3}} e^{j\frac{\pi}{6}}, \\ \underline{t}_s^* &= \frac{1}{\sqrt{3}} e^{-j\frac{\pi}{6}} \end{aligned} \quad (4.11)$$

in predstavljata zamik za  $30^\circ$  ter spremembo amplitude za  $1/\sqrt{3}$ . Ker je nična komponenta  $\underline{V}LL_0$  enaka nič, jo lahko množimo s kakršno koli vrednostjo; v našem primeru je ta vrednost enaka ena.

Fazne napetosti na primarni strani izračunamo iz simetričnih komponent faznih napetosti primarja:

$$[\underline{V}LN_{ABC}] = [\underline{S}]^{-1} \cdot [\underline{V}LN_{012}]. \quad (4.12)$$

Enačbo (4.10) vstavimo v (4.12):



$$[\underline{V}LN_{ABC}] = [\underline{S}]^{-1} [\underline{T}_s] [\underline{V}LL_{012}]. \quad (4.13)$$

Enačbo (4.7) vstavimo v enačbo (4.13) in dobimo:

$$[\underline{V}LN_{ABC}] = [\underline{S}]^{-1} [\underline{T}_s] [\underline{S}] \cdot [\underline{V}LL_{ABC}], \quad (4.14)$$

kjer je:

$$[\underline{S}]^{-1} [\underline{T}_s] [\underline{S}] = [\underline{W}] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}. \quad (4.15)$$

Enačba (4.14) prikazuje izračun primarnih faznih napetosti iz medfaznih napetosti s pomočjo simetričnih komponent. Enačbo (4.6) vstavimo v enačbo (4.14):

$$[\underline{V}LN_{ABC}] = [\underline{W}] \cdot [\underline{A}V] \cdot [\underline{V}t_{abc}] = [\underline{a}_t] \cdot [\underline{V}t_{abc}], \quad (4.16)$$

kjer je:

$$[\underline{a}_t] = [\underline{W}] \cdot [\underline{A}V] = \frac{-n_t}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

Sekundarna napetost na sponkah transformatorja je odvisna od inducirane napetosti na navitju in padca napetosti na impedanci navitja:

$$[\underline{V}t_{abc}] = [\underline{V}LG_{abc}] + [\underline{Z}t_{abc}] \cdot [\underline{I}_{abc}], \quad (4.18)$$

kjer je  $[\underline{Z}t_{abc}]$  matrika impedanc transformatorja:

$$[\underline{Z}t_{abc}] = \begin{bmatrix} \underline{Z}t_a & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}t_b & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}t_c \end{bmatrix}. \quad (4.19)$$

Če enačbo (4.18) vstavimo v (4.16) dobimo odvisnost faznih napetosti na primarju  $[\underline{V}LN_{ABC}]$  od faznih napetosti na sekundarju transformatorja:

$$\begin{aligned} [\underline{V}LN_{ABC}] &= [\underline{a}_t] \cdot ([\underline{V}LG_{abc}] + [\underline{Z}t_{abc}] \cdot [\underline{I}_{abc}]), \\ [\underline{V}LN_{ABC}] &= [\underline{a}_t] \cdot [\underline{V}LG_{abc}] + [\underline{b}_t] \cdot [\underline{I}_{abc}]. \end{aligned} \quad (4.20)$$

Pri tem je:

$$[\underline{b}_t] = [\underline{a}_t] \cdot [\underline{Z}t_{abc}] = \frac{-n_t}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 2 \cdot \underline{Z}t_b & \underline{Z}t_c \\ \underline{Z}t_a & 0 & 2 \cdot \underline{Z}t_c \\ 2 \cdot \underline{Z}t_a & \underline{Z}t_b & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.21)$$

#### 4.2.2 Izračun tokov

Na sliki 4.3 so prikazani tokovi Dyn transformatorja. Fazne tokove v vezavi trikot lahko izračunamo iz tokov, ki tečejo na priključnem mestu navitja:

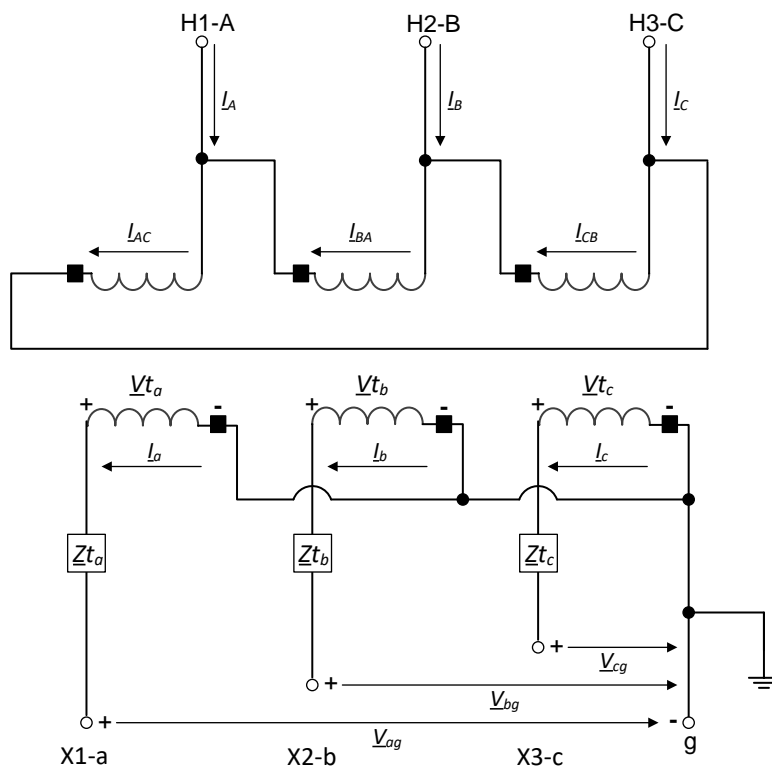
$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{AC} \\ I_{BA} \\ I_{CB} \end{bmatrix}, \quad (4.22)$$

$$[I_{ABC}] = [D] \cdot [ID_{ABC}]. \quad (4.23)$$

Izračun tokov v trikotu v odvisnosti od faznih tokov v navitju zvezde podaja:

$$\begin{bmatrix} I_{AC} \\ I_{BA} \\ I_{CB} \end{bmatrix} = \frac{1}{n_t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}, \quad (4.24)$$

$$[ID_{ABC}] = [AI] \cdot [I_{abc}]. \quad (4.25)$$



Slika 4.3: Transformator vezave Dyn – tokovi

Enačbo (4.25) vstavimo v (4.23):

$$[I_{ABC}] = [D] \cdot [AI] \cdot [I_{abc}] = [c_t] \cdot [VLG_{abc}] + [d_t] \cdot [I_{abc}], \quad (4.26)$$

kjer je

$$[d_t] = [D] \cdot [AI] = \frac{1}{n_t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.27)$$

$$[c_t] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.28)$$

Enačba (4.26) nam omogoča direktni izračun faznih tokov na visokonapetostni strani v odvisnosti od faznih tokov na nizkonapetostni strani.



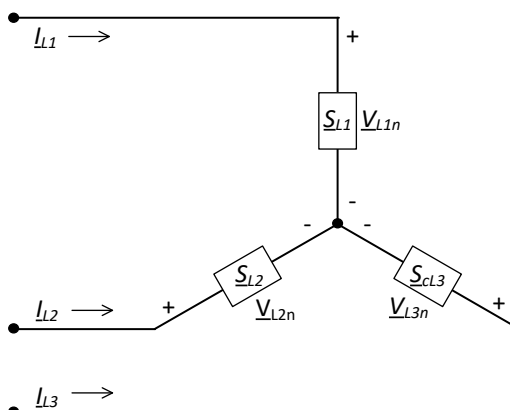
## 5 Bremena

V tem poglavju bo na kratko predstavljeno modeliranje bremen. Osredotočili se bomo na statični model, to je na model, ki opisuje delovanje bremena v eni obratovalni točki.

V splošnem so bremena lahko trifazna, enofazna ali, redkeje, dvofazna. Pri izračunih pretokov moči je breme določeno s tokom, ki ga odjema, ta pa je odvisen od napetosti na priključnem mestu. Glede na napetostno odvisnost modeliramo bremena kot:

- konstantni odjem delovne in jalove moči,
- konstantni odjem toka,
- konstantno impedanco ali
- kombinacijo zgornji treh.

V nadaljevanju bodo zapisane enačbe za breme v vezavi zvezda, ki je prikazana na sliki 5.1.



Slika 5.1: Breme v vezavi zvezda

### 5.1 Napetostna odvisnost bremen

V okviru tega poglavja bodo zapisani modeli bremen, ki bodo podajali tok bremena v odvisnosti od napetosti.

Breme, ki iz omrežja odjema konstantni delovno in jalovo moč, lahko opišemo s spodnjimi enačbami:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_{L1} &= \left( \frac{\underline{S}_{L1}}{\underline{U}_{L1}} \right)^* = \left( \frac{\underline{P}_{L1} + j\underline{Q}_{L1}}{\underline{U}_{L1}} \right)^*, \\
 \underline{I}_{L2} &= \left( \frac{\underline{S}_{L2}}{\underline{U}_{L2}} \right)^* = \left( \frac{\underline{P}_{L2} + j\underline{Q}_{L2}}{\underline{U}_{L2}} \right)^*, \\
 \underline{I}_{L3} &= \left( \frac{\underline{S}_{L3}}{\underline{U}_{L3}} \right)^* = \left( \frac{\underline{P}_{L3} + j\underline{Q}_{L3}}{\underline{U}_{L3}} \right)^*.
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Primer bremena s konstantno močjo so na primer navijalni motorski pogoni, ki na bobnu vzdržujejo konstanten navor in konstantno (linearno) hitrost navijanja. Primer takega bremena so tudi napajalniki elektronskih naprav (npr. računalnikov).

Breme s konstantno impedanco definirajo naslednje enačbe:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{L1} &= \frac{|U_{L1}|^2}{\underline{S}_{L1}^*} \text{ in } I_{L1} = \frac{U_{L1}}{\underline{Z}_{L1}}, \\ \underline{Z}_{L2} &= \frac{|U_{L2}|^2}{\underline{S}_{L2}^*} \text{ in } I_{L2} = \frac{U_{L2}}{\underline{Z}_{L2}}, \\ \underline{Z}_{L3} &= \frac{|U_{L3}|^2}{\underline{S}_{L3}^*} \text{ in } I_{L3} = \frac{U_{L3}}{\underline{Z}_{L3}}. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Primer bremena s konstantno impedanco so grelna telesa.

Pri bremenih, ki iz omrežja odjemajo konstanten tok, je efektivna vrednost toka neodvisna od napetosti, fazni kot pa se spreminja skladno s spreminjanjem faznega kota napetosti (ohranja se faktor delavnosti bremena). Primer takega bremena je recimo motorski pogon, ki vzdržuje konstanten navor (denimo pogon tekočega traku v industriji).

## 5.2 Polinomski in eksponentni model bremena

Odjem nekega odjemalca je v splošnem sestavljen iz kombinacije različnih tipov bremen. Tako kombinacijo lahko ponazorimo s polinomskim ali eksponentnim modelom bremena.

Polinomski model bremena podaja odvisnost delovne in jalove moči bremena od napetosti na priključnem mestu.

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left[ p_1 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + p_2 \left( \frac{U}{U_0} \right) + p_3 \right] \\ Q &= Q_0 \left[ q_1 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + q_2 \left( \frac{U}{U_0} \right) + q_3 \right] \end{aligned} \quad (5.3)$$

Pri tem so:

$P_0$ ,  $Q_0$ ,  $U_0$  nazivne delovna moč, jalova moč in napetost bremena,

$U$  omrežna napetost,

$p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  koeficienti delovne moči, ki podajajo deleže bremen s konstantno impedanco, konstantnim tokom in konstantno močjo,

$q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  koeficienti jalove moči, ki podajajo deleže bremen s konstantno impedanco, konstantnim tokom in konstantno močjo.

Velja še:

$$\begin{aligned} p_1 + p_2 + p_3 &= 1, \\ q_1 + q_2 + q_3 &= 1. \end{aligned} \quad (5.4)$$

Breme, ki ga opisuje enačba (5.3), odjema pri nazivni napetosti  $U_0$  nazivno delovno in jalovo moč ( $P_0$ ,  $Q_0$ ). Ob spremembi napetosti, se delovna moč bremena  $P$  in jalova moč  $Q$  spremenita skladno z enačbo (5.3). Koeficient  $p_1$  podaja delež bremen, ki se obnašajo kot konstantna impedanca:

$$\frac{U^2}{P} = \frac{U_0^2}{P_0} = konst. = R. \quad (5.5)$$

Podobno koeficient  $p_2$  podaja delež bremen, ki se obnašajo kot breme s konstantnim tokom:

---

$$\frac{P}{U} = \frac{P_0}{U_0} = \text{konst.} = I. \quad (5.6)$$

Koeficient  $p_3$  seveda podaja delež bremen, ki se obnašajo kot breme s konstantno močjo.

Na podoben način tudi eksponentni model bremena podaja odvisnost delovne in jalove moči bremena od napetosti na priključnem mestu:

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{K_p}, \\ Q &= Q_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{K_q}, \end{aligned} \quad (5.7)$$

pri čemer sta  $K_p$  in  $K_q$  eksponenta, ki podajata napetostno odvisnost. Opazimo lahko, da v kolikor za  $K_p$  in  $K_q$  vzamemo vrednost 0, 1 ali 2, breme predstavimo kot breme s konstantno močjo, s konstantnim tokom oziroma s konstantno impedanco.



## 6 Kompenzacijske naprave

Kompenzacijske naprave v omrežjih lahko delimo v dve skupini. V eni so pasivne kompenzacijske naprave, ki jih sestavljajo pasivni elementi, to so kondenzatorji in dušilke. Najpogostejša naprava v tej skupini je kompenzator jalove moči, ki lahko služi tudi kot kompenzator harmonikov. V drugi skupini so aktivne kompenzacijske naprave, ki so osnovane na napetostnem pretvorniku in omogočajo dinamično prilagajanje razmeram v omrežju. Najpogosteje nastopajo kot kompenzatorji jalove moči, harmonikov ali napetostnih upadov.

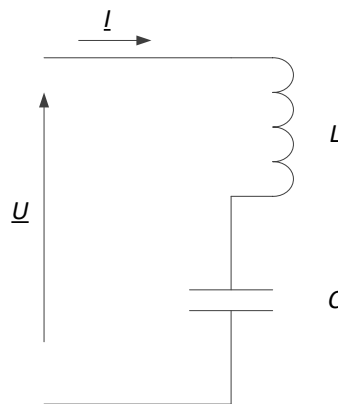
### 6.1 Pasivne kompenzacijske naprave

V tem poglavju bodo predstavljeni pasivni kompenzatorji jalove moči, ki jih sestavlja kondenzator in pogosto še zaporedno vezana dušilka. Predstavljen bo splošni izračun elementov kompenzatorja, opisana pa bo tudi problematika nastanka paralelne in serijske resonance v elektroenergetskih omrežjih [7].

#### 6.1.1 Osnovni izračun elementov kompenzatorja

Pasivni kompenzator jalove moči tvorijo kondenzator kapacitivnosti  $C$  in dušilka z induktivnostjo  $L$ . Dušilka služi omejevanju vklopnih tokov kondenzatorja, v primeru uglastitve  $L$ - $C$  člena na določeno harmonsko frekvenco pa lahko kompenzator, poleg funkcije zagotavljanja kapacitivne jalove moči, služi filtriranju tokovnih harmonskih komponent ali pa popravljanju frekvenčne karakteristike impedance omrežja.

Na sliki 6.1 je prikazana osnovna shema pasivnega kompenzatorja, pri čemer smo zaenkrat zanemarili ohmske izgube vezja. Pri izračunih bomo operirali s faznimi vrednostmi veličin.



Slika 6.1: Osnovna shema pasivnega kompenzatorja

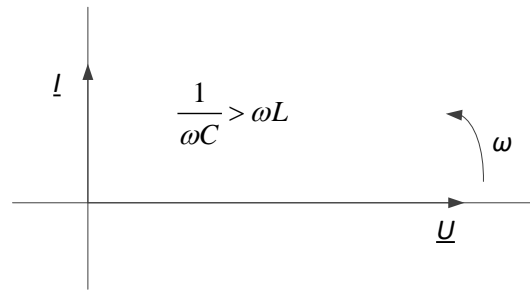
Celotno impedanco in tok kompenzatorja na sliki 6.1 lahko zapišemo z naslednjim izrazom:

$$\underline{Z} = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (6.1)$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{-j\underline{U}}{\omega L - \frac{1}{\omega C}}$$

Kazalčni diagram toka in napetosti kompenzatorja prikazuje slika 6.2. Pri tem smo predpostavili, da je reaktanca kondenzatorja večja od reaktance dušilke. Sinhronska kotna hitrost  $\omega$  označuje smer vrtenja kazalcev.



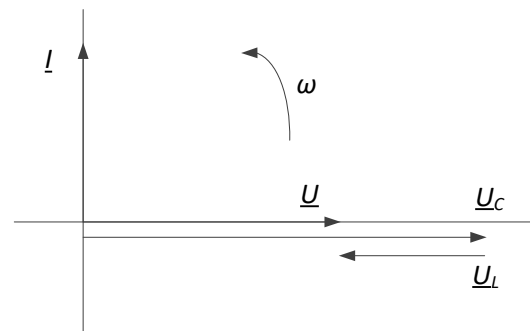


Slika 6.2: Kazalčni diagram pasivnega kompenzatorja

Napetost na kompenzatorju  $\underline{U}$  lahko zapišemo kot vsoto napetosti na kondenzatorju in napetosti na dušilki – enačba (6.2).

$$\begin{aligned}\underline{U} &= \underline{U}_L + \underline{U}_C \\ \underline{U}_L &= j\omega L \underline{I} \\ \underline{U}_C &= \frac{\underline{I}}{j\omega C} = \frac{-j\underline{I}}{\omega C}\end{aligned}\quad (6.2)$$

Napetosti na dušilki in na kondenzatorju imata torej nasproten predznak, njuna vsota pa je enaka napetosti na priključnih sponkah kompenzatorja  $\underline{U}$ . Razmere prikazuje kazalčni diagram na sliki 6.3. Napetost na kondenzatorju je zaradi dušilke večja od napetosti na priključnih sponkah kompenzatorja.



Slika 6.3: Kazalčni diagram napetosti kompenzatorja

Razmerje med napetostjo na kondenzatorju in napetostjo na priključnih sponkah ter razmerje med napetostjo na dušilki in napetostjo na priključnih sponkah podajata naslednja izraza:

$$\begin{aligned}\frac{\underline{U}_C}{\underline{U}} &= \frac{\underline{I}}{j\omega C} \frac{1}{\left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C}\right)\underline{I}} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC} \\ \frac{\underline{U}_L}{\underline{U}} &= j\omega L \frac{1}{\left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C}\right)\underline{I}} = \frac{-\omega^2 LC}{1 - \omega^2 LC}\end{aligned}\quad (6.3)$$

Navidezno moč kompenzatorja nam podaja izraz (6.4).

$$\underline{S}_k = \underline{U} \underline{I}^* = \underline{U} \frac{(-j\underline{U})^*}{\omega L - \frac{1}{\omega C}} = \frac{jU^2}{\omega L - \frac{1}{\omega C}} = j \frac{U^2 \omega C}{\omega^2 LC - 1} = jQ_k \quad (6.4)$$

Moč kondenzatorja v opisanem vezju pa je podana z izrazom (6.5).

$$\underline{S}_C = \underline{U}_C \underline{I}^* = \frac{1}{1 - \omega^2 LC} \underline{U} \underline{I}^* \quad (6.5)$$

Iz izraza (6.5) sledi, da je moč kondenzatorja v serijski vezavi z dušilko večja od moči celotnega kompenzatorja. Povečanje moči oz. povišano napetost na kondenzatorju lahko izrazimo s faktorjem  $p$ , ki ga podajajo naslednje relacije (pri tem je  $\omega$  sinhrona kotna hitrost,  $f_R$  pa resonančna frekvenca  $L$ - $C$  člena):

$$\begin{aligned} p &= \omega^2 LC \Rightarrow \frac{\omega^2}{p} = \frac{1}{LC}, \\ \omega_r &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow \omega_r^2 = \frac{1}{LC}, \\ p &= \frac{\omega^2}{\omega_r^2} = \frac{\omega^2}{(2\pi f_r)^2}. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Pasivni kompenzator bomo pri računanju impedance modelirali kot  $R$ - $L$ - $C$  člen. Pri dimenzioniranju elementov filterških kompenzatorjev moramo torej upoštevati vpliv dušilke na celotno nazivno moč kompenzatorja. V ta namen smo vpeljali faktor  $p$ , ki predstavlja pu razliko med močjo kompenzatorja s filterško dušilko in močjo kompenzatorja brez nje. Faktor  $p$  je za dano resonančno frekvenco ( $f_R$ ) konstanten. Potrebno kapacitivnost kondenzatorja (kapacitivna jalova moč kompenzatorja  $Q_k$  pri nazivni napetosti  $U_n$ ) in induktivnost dušilke torej izračunamo:

$$\begin{aligned} C &= \frac{Q_k(p-1)}{U_n^2 \cdot \omega}, \\ L &= \frac{1}{(2\pi f_R)^2 C}. \end{aligned} \quad (6.7)$$

Ohmsko komponento kompenzacijske stopnje določimo na osnovi razmerja kapacitivnosti in induktivnosti elementov kompenzatorja ohmske upornosti:

$$R = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot 4000} + \frac{\omega \cdot L}{20}. \quad (6.8)$$

Za ohmski del impedance je privzeto naslednje razmerje:

- induktivni del:  $R_L / X_L = 1/20$ ,
- kapacitivni del:  $R_C / X_C = 1/4000$ .

Z uporabo istih formul izračunamo tudi elemente kompenzatorja brez filterške dušilke, torej samo z vklopno dušilko. Ker je faktor  $p$  v takem primeru majhen, lahko privzamemo  $p = 0$ .

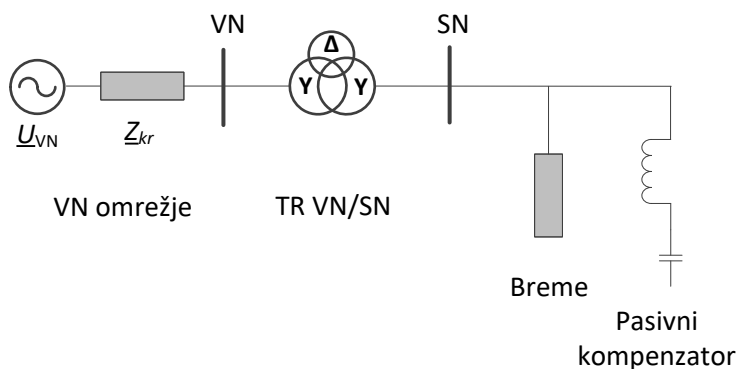
### 6.1.2 Pojav resonance v elektroenergetskih omrežjih

Vsa električna vezja, ki vsebujejo člene z induktivnim in kapacitivnim karakterjem, imajo eno ali več resonančnih frekvenc. Pri resonančni frekvenci lahko doseže impedanca sistema zelo visoke ali zelo nizke vrednosti, kar povzroči ojačenje tokovnih in napetostnih harmonskih komponent. Če ima npr. omrežje v bližini harmonske frekvence  $\omega_h$  visoko impedanco, lahko že majhna harmonska komponenta bremenskega toka pri tej frekvenci povzroči visoko harmonsko komponento napetosti. Podobno velja za napetost. V kolikor je impedanca pri  $\omega_h$  nizka, lahko že majhna harmonska komponenta omrežne napetosti povzroči velik harmonski tok. Možne problematične točke sistema lahko določimo z izračunom njegove impedančne frekvenčne karakteristike. Impedančna frekvenčna karakteristika podaja frekvenčno odvisnost impedance obravnavanega omrežja, ki jo lahko določimo z omrežne ali z bremenske strani. Pri vzporedni ali zaporedni vezavi kondenzatorja  $C$  in dušilke  $L$  je resonančna frekvenca vezja določena z naslednjim izrazom:

$$f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}. \quad (6.9)$$

Pojav resonance in izračun impedančne frekvenčne karakteristike bomo predstavili na hipotetičnem primeru omrežja, ki je prikazano na sliki 6.4. Gre za splošno distribucijsko omrežje, ki je preko transformatorja VN/SN

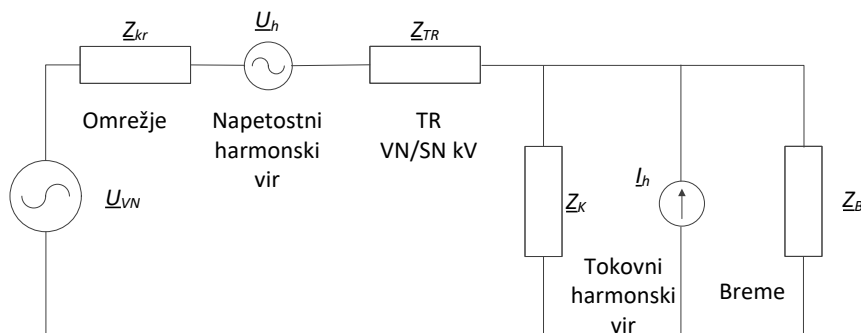
priključen na prenosno omrežje na VN nivoju. Na porabniški strani sta priključena breme in pasivni kompenzator za kompenzacijo jalove moči.



Slika 6.4: Primer omrežja – analiza resonančnih razmer

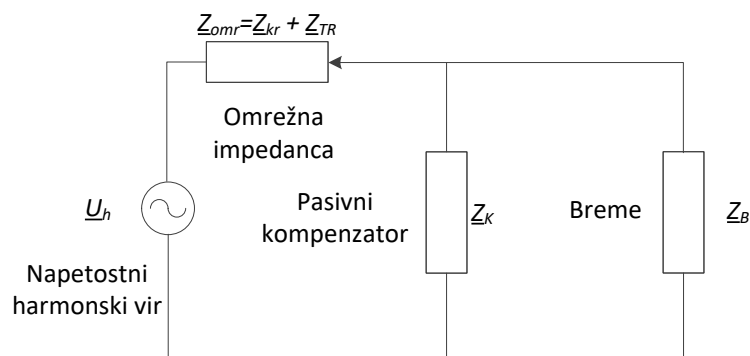
Prenosno omrežje lahko predstavimo kot togi napetostni vir ( $\underline{U}_{VN}$ ) z zaporedno vezano kratkostično impedanco  $\underline{Z}_{kr}$ . Tudi transformator bomo ponazorili s serijsko impedanco oblike  $\underline{Z} = R + jX$ . Kapacitivnosti omrežja (npr. dozemne kapacitivnosti vodov) smo pri tem zanemarili, saj ima omrežje pretežno induktivni značaj. Pri kratkostični impedanci in pri impedanci transformatorja bomo privzeli razmerje  $R/X = 0,2$ . Breme bomo modelirali kot  $L-R$  člen, pasivni kompenzator pa kot  $R-L-C$  člen.

Nadomestno vezje obravnavanega sistema je prikazano na sliki 6.5. V vezje smo dodali še dva vira: harmonski napetostni vir na omrežno stran in harmonski tokovni vir na bremensko stran. S harmonskima viroma ponazorimo harmonsko popačenje omrežne napetosti in bremenskega toka.

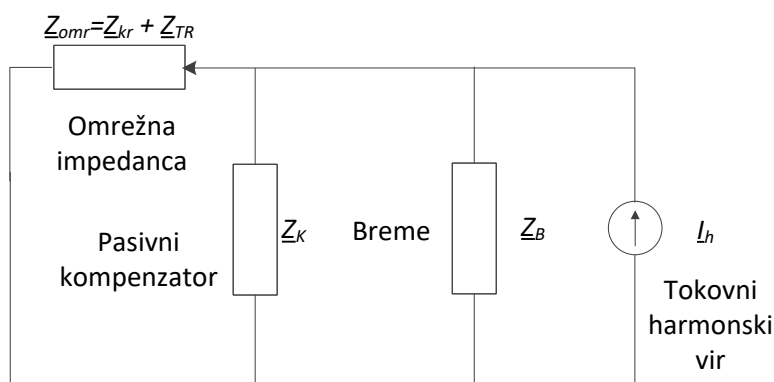


Slika 6.5: Nadomestna shema obravnavanega omrežja.

Frekvenčna impedančna karakteristika podaja odvisnost impedance sistema od frekvence. Impedanco sistema lahko določimo s strani napetostnega harmonskega vira na omrežni strani in s strani tokovnega harmonskega vira na bremenski strani. Gledano z omrežne strani nas namreč zanima, kakšne harmonske tokove lahko povzročijo harmoniki, prisotni v omrežni napetosti. Z bremenske strani je situacija dualna – zanima nas, kakšne harmonske napetosti lahko povzročijo harmonski tokovi, ki jih proizvaja breme. Nadomestno vezje za oba primera prikazujeta sliki 6.6 in 6.7, pri čemer smo impedanco omrežja in transformatorja ponazorili z nadomestno impedanco  $\underline{Z}_{omr}$ .



Slika 6.6: Nadomestna shema obravnavanega omrežja z omrežne strani



Slika 6.7: Nadomestna shema obravnavanega omrežja z bremenske strani

Za določitev impedančne frekvenčne karakteristike moramo seveda upoštevati frekvenčno odvisnost impedanc. Tako impedanca dušilke kot tudi impedanca kondenzatorja sta frekvenčno odvisni:

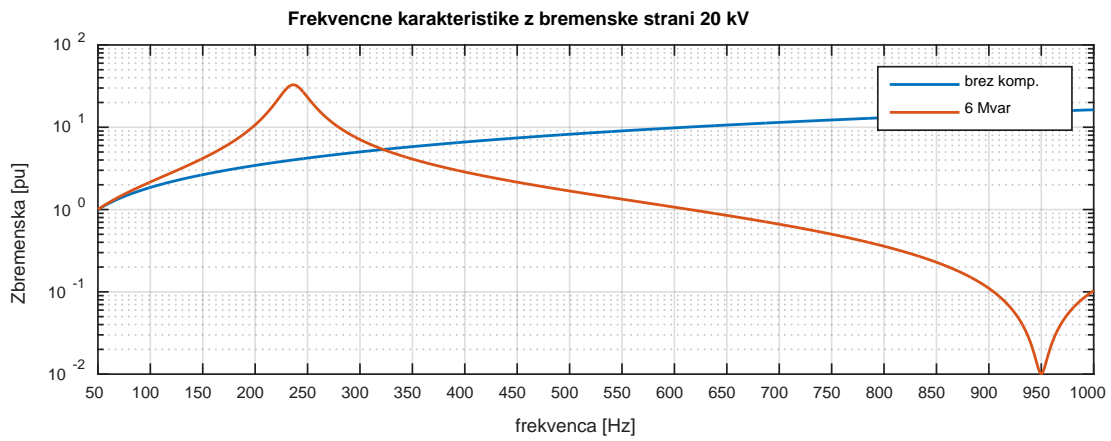
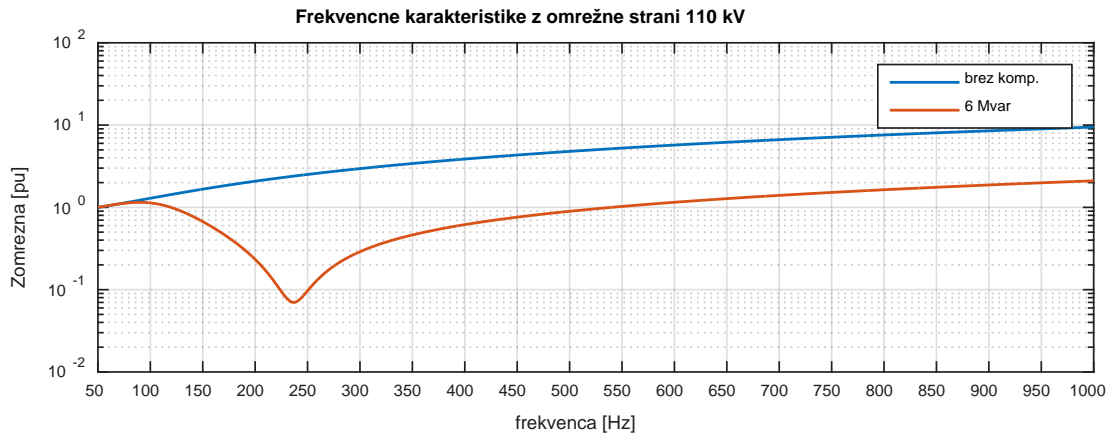
$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L,$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}. \quad (6.10)$$

Pri impedanci z omrežne strani nas zanimajo točke, kjer impedanca doseže nizke vrednosti (serijska resonanca) in lahko majhna harmonska napetost povzroči velik harmonski tok. Pri impedanci z bremenske strani pa nas zanimajo točke, kjer impedanca doseže visoke vrednosti (paralelna resonanca) in lahko majhen harmonski tok bremena povzroči veliko harmonsko napetost. Najbolj so seveda problematične resonančne točke, ki se nahajajo v bližini značilnih harmonikov, prisotnih v določenem omrežju.

Za ohmsko upornost lahko v večini sistemov predpostavimo, da se tam nekje do desetega harmonika ne spreminja bistveno. Pri daljnovodih in kablji se ohmska upornost spreminja s kvadratom frekvence, vendar šele potem, ko postane kožni efekt opaznejši, tj. pri višjih frekvencah. Razmere so nekoliko drugačne pri transformatorjih, kjer se zaradi vrtničnih izgub v navitjih upornost spreminja skoraj linearno s frekvenco. Kljub vsemu upoštevanje konstantne ohmske upornosti ne vpliva bistveno na točnost rezultatov.

Slika 6.8 prikazuje primer frekvenčne karakteristike impedance z omrežne in z bremenske strani. Razberemo lahko, da v obravnavanem vezju prihaja do resonance v bližini petega harmonika, kar bo povzročilo ojačenje pete harmonske komponente napetosti in toka.



*Slika 6.8: Frekvenčna karakteristika impedance obravnavanega vezja*

## 6.2 Aktivne kompenzacijske naprave

Aktivne kompenzacijske naprave so osnovane na napetostnem pretvorniku, ki omogoča pretvorbo med enosmerno in izmenično napetostjo [8]. Sestavljajo ga polprevodniška stikala.

### 6.2.1 Polprevodniški stikalni elementi

Jedro aktivnih kompenzatorjev tvorijo močnostni pretvorniki, ki pokrivajo širok razpon moči: od nekaj deset kVA do nekaj sto MVA. Po zgradbi bi lahko močnostni pretvornik opisali kot mrežo med seboj povezanih polprevodniških stikalnih elementov. Vsak stikalni element je sestavljen iz močnostnih polprevodniških stikal, dušilnega vezja in vezja za generiranje krmilnega signala za vklop in izklop stikala. Nazivne vrednosti večjih elementov znašajo nekje od 1 do 5 kA in od 5 do 10 kV, pri čemer je uporabno območje elementa nekje med 25 % in 50 % nazivne vrednosti toka in približno 50 % nazivne vrednosti napetosti. Zaradi tega moramo za doseganje želenih moči naprav uporabiti serijske in paralelne vezave posameznih stikal. Z večanjem nazivnih vrednosti polprevodniških elementov se manjša njihovo število, potrebno za doseganje želenih moči, s tem pa seveda pada tudi skupna cena naprave. Poleg napetostnih in tokovnih mej igrajo pomembno vlogo še naslednje karakteristike:

- Izgube v prevodnem stanju, ki pomenijo segrevanje elementa in s tem potrebo po hlajenju.
- Hitrost preklopa, ki pomeni čas, ki mine od zapornega stanja do popolnega prevajanja in obratno, od prevodnega do popolnega zapornega stanja, in diktira dimenzioniranje dušilnega vezja za dušenje napetostnih in tokovnih konic.
- Preklopne izgube – med vklopom tok narašča, še preden napetost pade na nič, med izklopom pa napetost začne naraščati, še preden tok pade na nič. Istočasna prisotnost napetosti in toka predstavlja izgube, ki določajo najvišje preklopne frekvence, s katerimi lahko preklapljammo stikalo.
- Krmilni tok, potreben za vzpostavitev oz. prekinitev toka, vpliva na dimenzioniranje vezja za generiranje krmilnih pulzov, ki lahko preseže ceno samega polprevodniškega stikala.

V splošnem lahko močnostna polprevodniška stikala obravnavamo kot hitra stikala, zgrajena na osnovi plošč iz silicija. V prevodni smeri imajo lahko možnost vklopa in tudi prekinitve prevajanega toka glede na prožilni pulz, prisoten na krmilni elektrodi. Večina polprevodniških stikal z možnostjo prekinitve toka, ki se uporabljajo v napetostnih pretvornikih, ni grajenih za blokiranje napetosti v zaporni smeri. Take elemente navadno imenujemo asimetrični elementi. So tanjši in imajo manjše prevodne ter preklopne izgube. Običajno se uporabljajo v povezavi z antiparalelno vezano diodo.

V grobem lahko močnostna polprevodniška stikala razdelimo v tri skupine, in sicer diode, tranzistorje in tiristorje. Značilnosti posameznih družin elementov bodo opisane v nadaljevanju.

#### 6.2.1.1 Polprevodniška stikala

##### *Dioda*

Dioda je dvoslojni element (p-n spoj), ki lahko prevaja tok le v prevodni smeri, tj. od anode proti katodi, in sicer takrat, ko ima anoda dovolj visok pozitivni potencial glede na katodo. Dioda blokira prevajanje v zaporni smeri takrat, ko je katoda na pozitivnem potencialu glede na anodo.

V močnostnih kompenzacijskih napravah se uporabljajo hitro obnovljive diode, in sicer skupaj z asimetričnimi GTO-ji in IGBT-ji. Njihove tokovne in napetostne nazivne vrednosti se morajo ujemati z nazivnimi vrednostmi komponent, s katerimi se uporabljajo.

##### *Tranzistor*

Tranzistorji so družina troslojnih elementov. Tranzistor prevaja, ko je ena izmed njegovih elektrod, tj. kolektor, pozitivno polarizirana proti drugi (emitorju) in ko je na bazni elektrodi prisoten krmilni signal. V polprevodniških napravah velikih moči se uporablja predvsem tranzistor IGBT.

---

### *IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)*

IGBT deluje kot tranzistor z visokimi napetostnimi in tokovnimi nazivnimi vrednostmi. Vklonno-izklonno stopnja je izvedena preko MOSFET tranzistorja. Prednosti IGBT-ja so predvsem hiter vklop in izklop ter nizke preklopne izgube, kar omogoča njegovo proženje tudi pri višjih frekvencah proženja in s tem uporabo pulzno-širinske modulacije. Slabost IGBT-ja je predvsem višji napetostni padec v prevodnem stanju kot pri tiristorju. Zaradi kompleksne strukture so IGBT-ji grajeni v velikosti približno 1 cm<sup>2</sup>, stikala večjih moči pa dobimo s povezovanjem več osnovnih IGBT enot v skupno strukturo. IGBT se vse pogosteje uporablja tudi pri aplikacijah na najvišjih napetostnih nivojih in za naprave najvišjih moči.

### *Tiristor*

Tiristor je štirislojni polprevodniški element. V primerjavi s tranzistorjem ima slabšo preklopno karakteristiko v smislu daljšega preklopnega časa in višjih preklopnih izgub. Na drugi strani pa ima tiristor manjše izgube v prevodnem stanju, poleg tega pa je grajen za večje moči. Z imenom konvencionalni tiristor navadno imenujemo element brez sposobnosti prekinjanja toka. Tak tiristor začne prevajati takoj, ko je polariziran v prevodni smeri in je na krmilni elektrodi prisoten krmilni pulz. Tok lahko ugasne šele ob prehodu skozi nič.

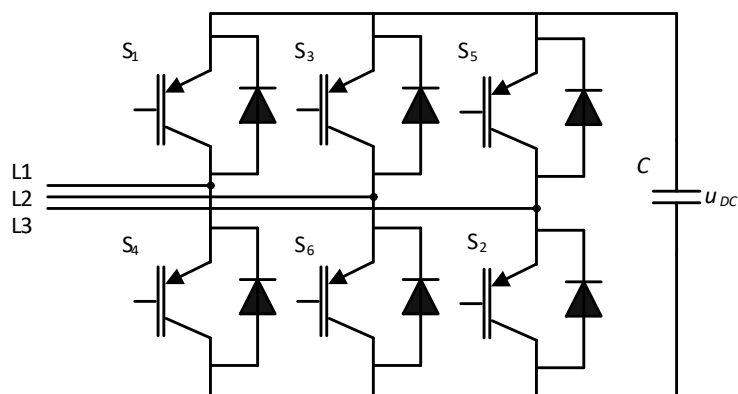
### *GTO (Gate turn-off thyristor)*

GTO je po zgradbi in lastnostih podoben navadnemu tiristorju, le da ima še sposobnost prekinitve toka, in sicer takrat, ko je na krmilni elektrodi prisoten izklopni pulz, ki ima nasprotno polariteto kot vklopni. Vendar velja omeniti, da je krmilni tok, potreben za izklop GTO-ja, precej velik v primerjavi s tokom, potrebnim za vklop. Za element z nazivnim tokom 1000 A bi vklopni tok npr. znašal približno 3-5 % nazivnega toka v trajanju le 10 μs, izklopni tok pa 30-50 % nazivnega s trajanjem 20-50 μs. Velik in dolg izklopni pulz je glavna pomanjkljivost GTO-ja v primerjavi z IGBT-jem. Zaradi tega lahko obratuje le z relativno nizkimi preklopnimi frekvencami (reda nekaj sto Hz). Na drugi strani pa dosegajo GTO-ji precej višje napetostne in tokovne nazivne vrednosti v primerjavi z IGBT-ji. Večina proizvedenih GTO-jev je namenjena uporabi v napetostnih pretvornikih, kjer je GTO-ju antiparalelno priključena še hitro obnovljiva dioda, zaradi česar ni potrebno, da ima GTO sposobnost blokiranja negativne napetosti med anodo in katodo. Take GTO-je imenujemo asimetrični GTO-ji.

## **6.2.2 Trifazni napetostni pretvornik**

Močnostni pretvornik, ki bo v tem poglavju nekoliko poglobljeje predstavljen, tvori jedro cele družine sodobnih kompenzacijskih naprav. Naprave osnovane na napetostnem močnostnem pretvorniku lahko opišemo kot krmiljene napetostne (tokovne) vire. Lahko jih delimo tudi glede na področje uporabe, in sicer na tiste, ki se uporabljajo v prenosnih omrežjih, in na tiste, ki se uporabljajo v distribucijskih omrežjih. Obe kategoriji naprav sta si po osnovnem principu delovanja podobni, razlikujeta pa se predvsem v načinu vodenja in zgradbi. Kompenzatorji v prenosnem omrežju (v angleščini imenovani FACTS naprave – Flexible Ac Transmission Systems) služijo na primer povečanju maksimalnih pretokov moči po vodih, regulaciji napetosti in kontroli pretokov moči. Izpolnjevanje teh ciljev omogoča tudi povečanje stabilnosti elektroenergetskega omrežja. Kompenzatorji v distribucijskih omrežjih (v angleščini imenovani tudi Custom Power Devices) pa v splošnem zagotavljajo višjo kakovost napetosti in večjo zanesljivost oskrbe.

Slika 6.9 prikazuje strukturo osnovnega trifaznega napetostnega pretvornika. Zgrajen je iz šestih polprevodniških stikal z antiparalelno povezanimi diodami. Na enosmerni strani je priključen kondenzator. S preklapljanjem polprevodniških stikal pretvornik na izhodnih sponkah generira niz treh faznih napetosti spremenljive frekvence, amplitude in faznega kota. Pretvornik mora biti priključen na omrežje preko sklopne dušilke, ki omejuje strmino toka med pretvornikom in omrežjem.



Slika 6.9: Osnovna struktura trifaznega napetostnega pretvornika

Tok pri napetostnem pretvorniku teče v obe smeri, zaradi česar morajo imeti stikalni elementi (vezava polprevodniškega stikala in diode) možnost obojesmernega prevajanja toka. Na drugi strani pa se polariteta napetosti na enosmernem kondenzatorju ne spreminja, zato stikalni elementi ne potrebujejo sposobnosti blokiranja napetosti v zaporni smeri. Zaradi tega je napetostni pretvornik zgrajen iz asimetričnih polprevodniških stikal z možnostjo prekinitve toka (kot sta recimo GTO in IGBT) z antiparalelno priključeno diodo. Nekatera polprevodniška stikala imajo tako diodo že integrirano v enotno strukturo, ki je primerna za uporabo pri napetostnih pretvornikih.

Kapacitivnost kondenzatorja na enosmerni strani mora biti dovolj visoka, da brez večjih nihanj v enosmerni napetosti prenese tokovne sunke, ki so posledica preklpov stikal in dinamičnih obratovalnih stanj. Ob sicer zgolj teoretični predpostavki, da pretvornik generira le osnovno komponento napetosti in da z omrežjem izmenjuje le jalov tok (kar pomeni tudi, da nima izgub), velikost kondenzatorja ne igra bistvene vloge, saj je enosmerni tok enak nič.

### 6.2.3 Delovanje trifaznega napetostnega pretvornika

V tem poglavju bodo predstavljene osnove delovanja trifaznega napetostnega pretvornika kot najpogosteje uporabljenega pretvornika v kompenzacijskih napravah. Za opis temeljnih značilnosti obratovanja bomo najprej obravnavali trifazni 6-pulzni pretvornik, pri katerem je vsako polprevodniško stikalo vključeno enkrat v periodi. Privzeli bomo tudi, da je napetost na kondenzatorju konstantna.

V nadaljevanju bosta predstavljeni še pulzno-širinska modulacija in histerezno proženje, kot alternativni 6-pulznemu obratovanju pretvornika.

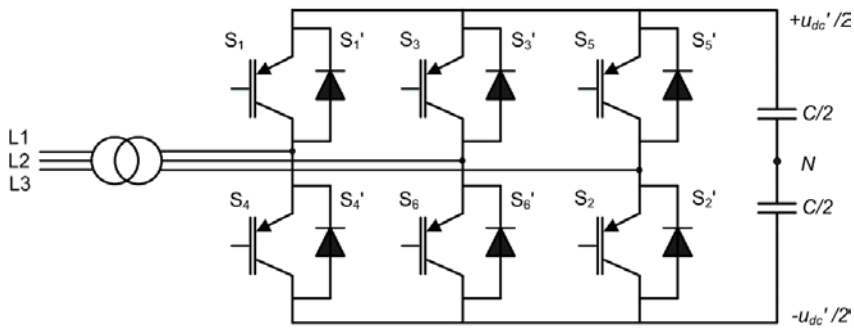
#### 6.2.3.1 Obratovanje 6-pulznega trifaznega pretvornika

Na sliki 6.10 je prikazana shema trifaznega pretvornika, sestavljenega iz šestih polprevodniških stikal, oštevilčenih od 1-1' do 6-6'. Vrstni red od 1 do 6 ponazarja tudi sekvenco prevajanja stikalnih elementov, kjer pri 6-pulznem obratovanju vsak element prevaja polovico periode. Pri opisu obratovanja pretvornika bo uporabljen relativni (per unit) sistem veličin, kjer sta  $i_B$  in  $u_B$  bazni vrednosti toka in napetosti:

$$u'_{px} = \frac{u_{px}}{u_B} \quad i'_{px} = \frac{i_{px}}{i_B} \quad u'_{dc} = \frac{u_{dc}}{u_B} \quad z_B = \frac{u_B}{i_B} \quad Z'_{dc} = \frac{Z_{dc}}{z_B} \quad (6.11)$$

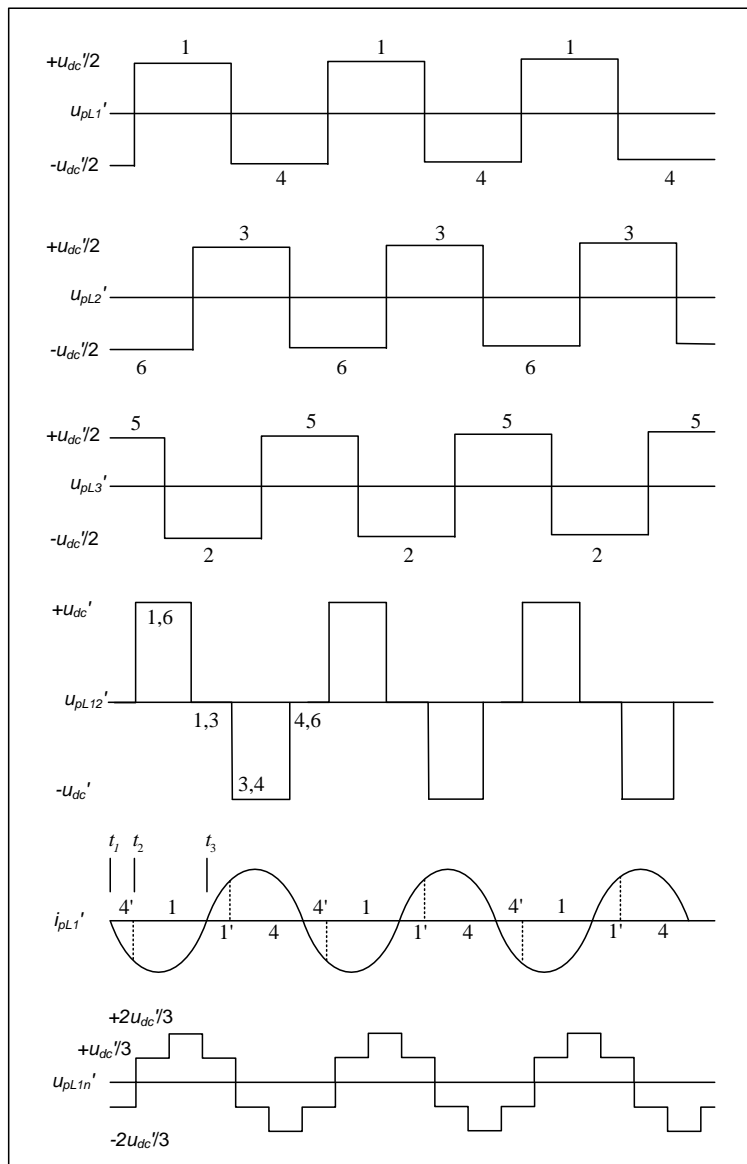
$$x = L1, L2, L3$$





Slika 6.10: Osnovna shema trifaznega 6-pulznega napetostnega pretvornika

Vsaka fazna veja generira napetost kvadratne oblike s temensko vrednostjo  $+u_{dc}'/2$  in  $-u_{dc}'/2$  glede na hipotetično referenčno točko  $N$  na enosmerni strani. Posamezne fazne napetosti so med sabo zamaknjene za  $120^\circ$ . Fazne napetosti  $u_{pL1}'$ ,  $u_{pL2}'$  in  $u_{pL3}'$  so prikazane na sliki 6.11. Na grafu napetosti je tudi označeno, kateri stikalni element je vklopljen v posamezni polperiodi. Na isti sliki je prikazana tudi medfazna napetost  $u_{pL12}' = u_{pL1}' - u_{pL2}'$ . Medfazne napetosti so med sabo ravno tako zamaknjene za  $120^\circ$ , njihova temenska vrednost pa je enaka  $u_{dc}'$ . Odseki, kjer je napetost enaka nič, predstavljajo stanje, ko prevajata dva stikalna elementa na istem polu kondenzatorja.



Slika 6.11: Napetosti in tokovi 6-pulznega napetostnega pretvornika

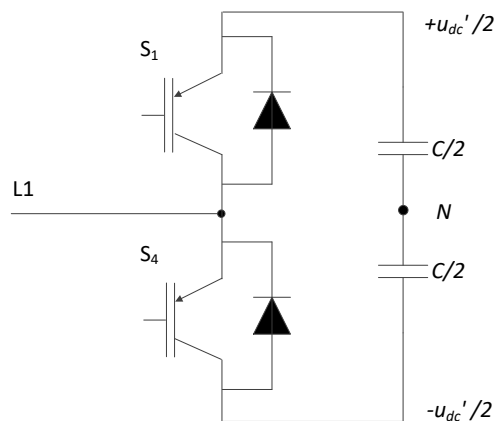
Tok pretvornika je odvisen od razlike generirane napetosti pretvornika in omrežne napetosti na priključnem mestu pretvornika. Slika 6.11 prikazuje hipotetični tok  $i_{pL1}'$  v fazi L1, kjer pozitivni predznak toka označuje tok iz izmenične strani proti enosmerni strani. Zaradi enostavnosti je prikazana zgolj osnovna harmonska komponenta izmeničnega toka. V času od  $t_1$  do  $t_2$ , na primer, je fazni tok  $i_{pL1}'$  negativen in lahko teče skozi stikalni element 1-1' ali 4-4'. Iz primerjave med napetostjo v fazi L1 in tokom v isti fazi vidimo, da ob negativnem toku, vklopljenem polprevodniškem stikalu 4 in izklopljenem stikalu 1 tok teče skozi diodo 4'. Kasneje, med časom  $t_2$  in  $t_3$ , ko je stikalo 4 izklopljeno, stikalo 1 pa vklopljeno, se prevajanje negativnega toka prenese iz diode 4' na stikalo 1. V trifaznem pretvorniku v vsakem trenutku prevajajo trije stikalni elementi.

Tok na enosmerni strani pretvornika je vsota prispevkov posameznih faznih tokov. Izkaže se, da enosmerni tok sestavlja zgolj delovna komponenta izmeničnega toka in harmonske komponente, ki so prisotne v izmeničnem toku. Napetost  $u_{pL1n}'$  je fazna napetost, merjena proti ničlišču zvezda navitja transformatorja na izmenični strani.

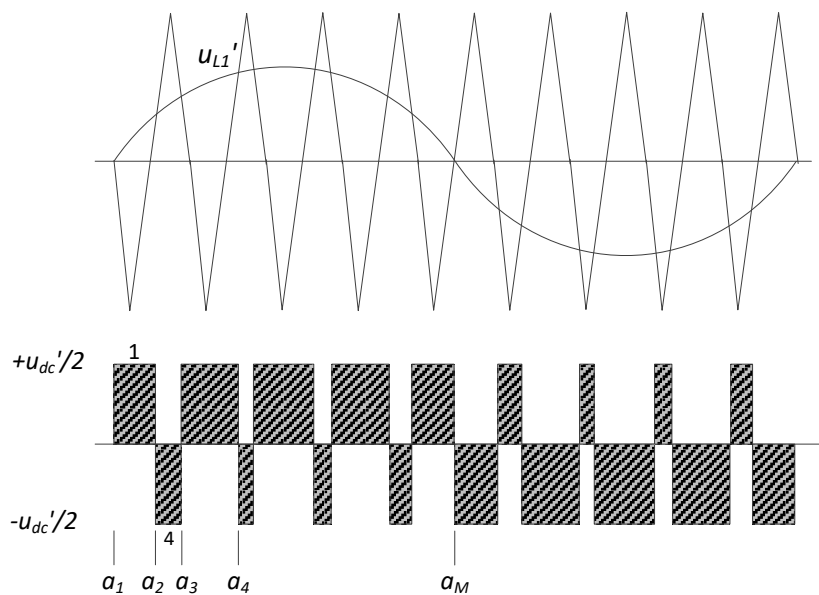
### 6.2.3.2 Pulzno-širinska modulacija

Pri 6-pulznem pretvorniku je frekvenca proženja stikalnih elementov navadno enaki sinhronski omrežni frekvenci, torej se posamezni stikalni element vklopi in izklopi le enkrat v periodi. Pri takih pretvornikih navadno spreminjamo napetost na izhodnih izmeničnih sponkah s spreminjanjem napetosti na kondenzatorju na enosmerni strani pretvornika. Drugačen pristop ponuja pulzno-širinska modulacija (Pulse-width Modulation - PWM), pri kateri elemente prožimo večkrat na periodo in s spreminjanjem širine preklopnih pulzov spreminjamo izmenično napetost na izhodu pretvornika. Pri tem moramo biti pozorni na preklopne izgube, ki se večajo z višanjem frekvence proženja in jih moramo pri načrtovanju pretvornika tudi upoštevati. Najvišjo frekvenco proženja tako pogojujejo predvsem uporabljena polprevodniška stikala. V grobem lahko ocenimo, da lahko frekvence proženja pri pretvornikih ranga 1 MVA dosežejo vrednosti več kHz, pri pretvornikih ranga nekaj 10 MVA pa so najvišje frekvence reda nekaj sto Hz oz. do nekje 2 kHz.

Opis tehnike PWM si bomo ogledali na primeru ene faze trifaznega napetostnega pretvornika, ki je shematsko prikazana na sliki 6.12. Slika 6.13 pa prikazuje princip tvorjenja prožilnih pulzov na osnovi primerjave dveh signalov: sinusnega s sinhronsko frekvenco in žagastega s frekvenco enako devetkratniku sinhronske frekvence. Prožilne pulze tvorimo na osnovi primerjanja teh dveh signalov. Ko je vrednost žagastega signala manjša od vrednosti sinusnega signala, se generira prožilni pulz za stikalni element S1. Kadar pa je vrednost žagastega signala večja od vrednosti sinusnega signala, se generira prožilni pulz za stikalni element S4. Na sliki 6.13 je hkrati predstavljena tudi oblika napetosti na izmenični strani pretvornika glede na navidezno ničlišče  $N$  na enosmerni strani pretvornika.



Slika 6.12: Ena fazna veja trifaznega pretvornika



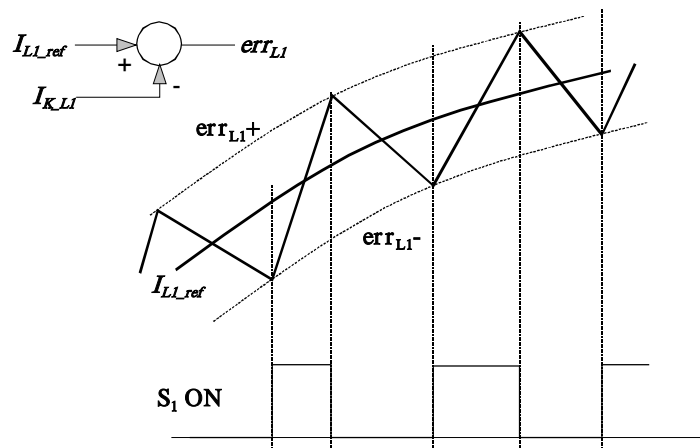
Slika 6.13: Tvorjenje vzorca proženja s PWM

Napetostni signal je sestavljen iz devetih pravokotnih pulzov na periodo, kjer je širina vsakega pulza variabilna. Iz oblike napetostnega signala lahko razberemo naslednje ugotovitve:

- Izhodna napetost vsebuje osnovno harmonsko komponento napetosti in višje harmonike.
- Ker je žagasti signal lihi večkratnik sinhronske frekvence, je napetostni signal simetričen glede na mesto, kjer sinusna krivulja prečka vrednost nič. Zaradi tega generirana napetost ne vsebuje sodih harmonikov. Če bi bil žagasti signal sodi večkratnik sinhronske frekvence, bi napetostni signal vseboval tudi te harmonike. V primeru večkratnika, ki ni celo število, pa bi se pojavile še medharmonske komponente napetosti. Pri nižjih frekvencah proženja je pomembna tudi sinhronizacija proženja na omrežno napetost.
- Amplitudo izhodne izmenične napetosti reguliramo s spreminjanjem amplitude sinusnega signala pri konstantni amplitudi žagastega signala. Z večanjem amplitude podaljšamo čas prevajanja stikalnega elementa S1 v pozitivni polperiodi in zmanjšamo njegov čas prevajanja v negativni polperiodi. Obratno velja za čas prevajanja stikalnega elementa S4. Tako z večanjem amplitude sinusnega signala večamo tudi amplitudo izmenične napetosti in obratno, z manjšanjem amplitude sinusnega signala manjšamo amplitudo izmenične napetosti.
- Izmenična napetost doseže največjo vrednost, ko sta amplitudi žagastega in sinusnega signala enaki.

### 6.2.3.3 Histerezo proženje

Pri histereznem proženju se polprevodniška stikala prožijo na osnovi primerjave med referenčnim (tj. želenim) tokom in dejanskim tokom pretvornika. Referenčne vrednosti tokov kompenzatorja so lahko določene npr. v d–q koordinatnem sistemu in jih zato najprej pretvorimo v sistem trifaznih veličin, ki predstavljajo referenčne vrednosti tokov kompenzatorja. Histerezna metoda proženja je ponazorjena na sliki 6.14.



Slika 6.14: Histerezno proženje

Referenčni tok kompenzatorja je direktno primerjan z dejanskim. Če razlika med obema preseže vrednosti, določene s histerezo, ustrezni preklopi močnostnih stikal omogočijo, da tok kompenzatorja ostane znotraj določenih mej. Kot primer vzemimo tok faze L1, to je  $i_{L1}$  (slika 6.14). Pozitivno polperiodo toka prevaja stikalo S1, negativno pa S4. S1 začne prevajati takoj, ko postane  $i_{L1}$  manjši od spodnje meje, določene s histerezo. Nasprotno pa se S1 zapre, ko  $i_{L1}$  preseže zgornjo mejo. Tako tokovi  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  in  $i_{L3}$  ostanejo znotraj histereznih mej. Slabost te metode je naključna frekvenca proženja, katere maksimalno vrednost lahko sicer omejimo.

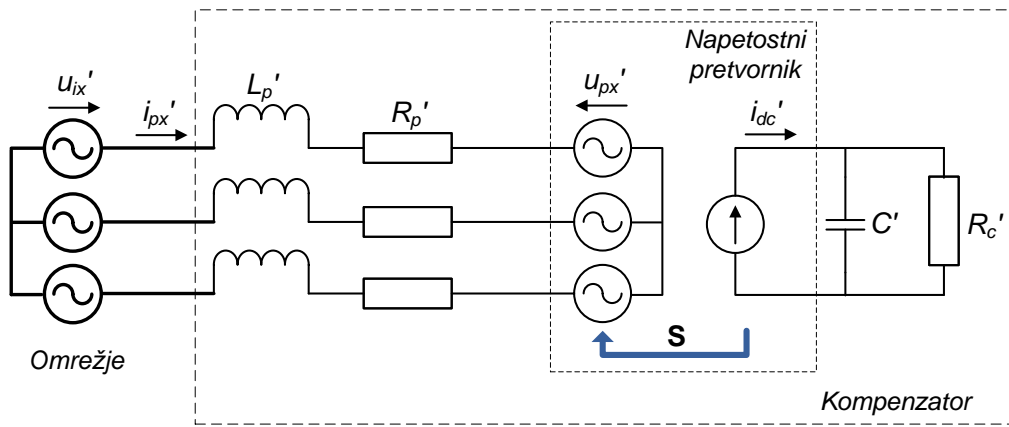
#### 6.2.4 Matematični model trifaznega napetostnega pretvornika

Matematični model trifaznega napetostnega pretvornika bo osnovan na nadomestni shemi naprave [9]. Pri izpeljavi matematičnega modela je uporabljen relativni (per unit) sistem veličin, kjer sta  $i_B$  in  $u_B$  bazni vrednosti toka in napetosti,  $\omega_B$  pa je sinhronska kotna hitrost osnovne komponente omrežne napetosti:

$$\begin{aligned}
 i'_{px} &= \frac{i_{px}}{i_B} & u'_{ix} &= \frac{u_{ix}}{u_B} & u'_{px} &= \frac{u_{px}}{u_B} \\
 z_B &= \frac{u_B}{i_B} & L'_p &= \frac{\omega_B L_p}{z_B} & R'_p &= \frac{R_p}{z_B} \\
 u'_{dc} &= \frac{u_{dc}}{u_B} & i'_{dc} &= \frac{i_{dc}}{i_B} & C' &= \frac{1}{\omega_B C z_B} & R'_c &= \frac{R_c}{z_B}
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

$$x = L1, L2, L3$$

Pretvornik lahko opišemo kot krmiljen napetostni vir, ki mu lahko spreminjamo frekvenco, amplitudo in fazni kot generirane napetosti  $u_{px}'$  (slika 6.15). Na omrežje (napetost  $u_{ix}'$ ) je priključen preko sklopne induktivnosti  $L_p'$ , ki omejuje strmino toka med napetostnim pretvornikom in omrežjem. Zaporedno z induktivnostjo je priključena upornost  $R_p'$ , ki predstavlja ohmski del sklopne impedance. Generirana izmenična napetost je funkcija napetosti na kondenzatorju  $C'$  v enosmernem tokokrogu in stikalne funkcije **S**. Stikalna funkcija **S** ponazarja delovanje stikalnih elementov napetostnega pretvornika in povezuje enosmerni ter izmenični tokokrog. Enosmerni tokokrog sestoji iz tokovnega vira  $i_{dc}'$ , ki je priključen na kondenzator  $C'$ , in upornosti  $R_c'$ , ki predstavlja izgube enosmernega tokokroga in preklopne izgube.



Slika 6.15: Nadomestna shema kompenzacijske naprave.

Glede na samo nadomestno shemo statičnega kompenzatorja bo tudi matematični model sestavljen iz treh delov:

- iz matematičnega opisa izmeničnega vezja,
- iz matematičnega opisa enosmernega vezja,
- iz stikalne funkcije, ki opisuje povezavo med enosmernim in izmeničnim delom.

Za začetek predpostavimo, da je napetost na enosmernem kondenzatorju konstantna. Na osnovi nadomestne sheme kompenzatorja, prikazane na sliki 6.15, zapišemo diferencialno enačbo za tok v fazi L1 ( $i'_{pL1}$ ), brez upoštevanja enosmernega tokokroga:

$$\frac{L'_p}{\omega_B} \frac{di'_{pL1}}{dt} + R'_p i'_{pL1} = u'_{iL1} - u'_{pL1}. \quad (6.13)$$

Enačbo za vse tri fazne tokove zapišemo v matrični obliki:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i'_{pL1} \\ i'_{pL2} \\ i'_{pL3} \end{bmatrix} = \frac{-R'_p \omega_B}{L'_p} \begin{bmatrix} i'_{pL1} \\ i'_{pL2} \\ i'_{pL3} \end{bmatrix} + \frac{\omega_B}{L'_p} \begin{bmatrix} (u'_{iL1} - u'_{pL1}) \\ (u'_{iL2} - u'_{pL2}) \\ (u'_{iL3} - u'_{pL3}) \end{bmatrix}. \quad (6.14)$$

Predpostavka o konstantni enosmerni napetosti bi veljala zgolj v primeru, če bi imeli na enosmerni strani priključen vir energije. Takemu pogoju lahko npr. zadostijo baterijski hranilniki, ki zagotavljajo konstantno enosmerno napetost dovolj dolgo, da vključitev enosmernega tokokroga v model ni potrebna. Pri kompenzatorju pa je na enosmerni strani navadno priključen relativno majhen kondenzator, zato je upoštevanje enosmernega tokokroga nujno. Za napetost na kondenzatorju v enosmernem tokokrogu, ki je prikazan na sliki 6.15, lahko zapišemo naslednjo enačbo:

$$i'_{dc} = \frac{1}{\omega_B C'} \frac{du'_{dc}}{dt} + \frac{u'_{dc}}{R'_c}. \quad (6.15)$$

Za popoln opis kompenzatorja moramo opisati še povezavo med izmeničnim in enosmernim delom pretvornika. Relacijo med obema deloma podaja stikalna funkcija, ki ponazarja preklope stikalnih elementov pretvornika:

$$\begin{bmatrix} u'_{pL1} \\ u'_{pL2} \\ u'_{pL3} \end{bmatrix} = k_p \begin{bmatrix} S_{L1} \\ S_{L2} \\ S_{L3} \end{bmatrix} u'_{dc}. \quad (6.16)$$

V zgornji enačbi je  $k_p$  faktor, ki povezuje enosmerni in izmenični del pretvornika glede na vrsto pretvornika in glede na prestavno razmerje sklopnega transformatorja (če je transformator uporabljen kot sklopno vezje).

Enačba (6.16) nam tudi pove, da so generirane izmenične napetosti proporcionalne napetosti na enosmerni strani pretvornika. To pomeni, da se vsako nihanje napetosti na enosmerni strani odrazi kot popačitev izmenične napetosti.

Enosmerni in izmenični del pretvornika povezuje še bilančna enačba za moč. V vsakem trenutku mora namreč veljati, da je moč na enosmerni strani pretvornika enaka moči na izmenični strani pretvornika. Povedano zapišemo z enačbo:

$$u'_{dc}i'_{dc} = u'_{pL1}i'_{pL1} + u'_{pL2}i'_{pL2} + u'_{pL3}i'_{pL3}. \quad (6.17)$$

Če v enačbo (6.17) vnesemo povezave, podane v (6.16), dobimo:

$$u'_{dc}i'_{dc} = k_p S_{L1} i'_{pL1} u'_{dc} + k_p S_{L2} i'_{pL2} u'_{dc} + k_p S_{L3} i'_{pL3} u'_{dc}. \quad (6.18)$$

Naposled iz (6.18) sledi rezultat, ki podaja zvezo med izmeničnimi tokovi in tokom na enosmerni strani pretvornika:

$$i'_{dc} = k_p S_{L1} i'_{pL1} + k_p S_{L2} i'_{pL2} + k_p S_{L3} i'_{pL3}. \quad (6.19)$$

Na osnovi enačbe (6.14), ki opisuje izmenični del statičnega kompenzatorja, enačbe (6.15), ki opisuje enosmerni tokokrog, in enačb (6.16) ter (6.19), ki tvorita povezavo med obema, lahko zapišemo celotno enačbo matematičnega modela statičnega kompenzatorja z upoštevanjem enosmerne tokokroga:

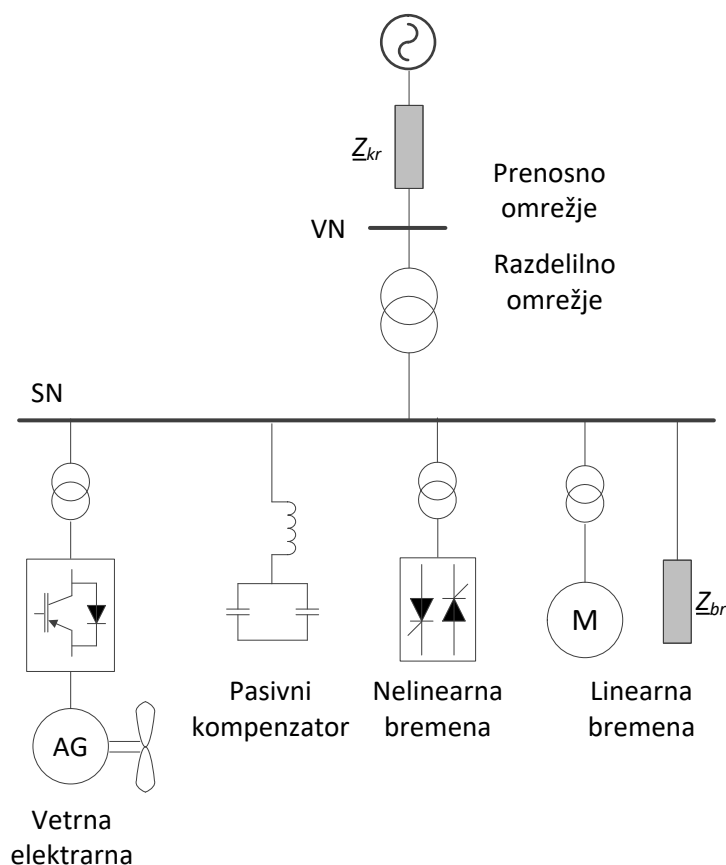
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i'_{pL1} \\ i'_{pL2} \\ i'_{pL3} \\ u'_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R'_p \omega}{L'_p} & 0 & 0 & \frac{-k_p \omega}{L'_p} S_{L1} \\ 0 & \frac{-R'_p \omega}{L'_p} & 0 & \frac{-k_p \omega_B}{L'_p} S_{L2} \\ 0 & 0 & \frac{-R'_p \omega}{L'_p} & \frac{-k_p \omega_B}{L'_p} S_{L3} \\ k_p \omega_B C' S_{L1} & k_p \omega_B C' S_{L2} & k_p \omega_B C' S_{L3} & -\frac{\omega_B C'}{R'_C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{pL1} \\ i'_{pL2} \\ i'_{pL3} \\ u'_{dc} \end{bmatrix} + \frac{\omega_B}{L'_p} \begin{bmatrix} u'_{iL1} \\ u'_{iL2} \\ u'_{iL3} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6.20)$$

### 6.2.5 Aktivni filtri

Slika 6.16 prikazuje poenostavljeno shemo splošnega industrijskega energetskega sistema, kjer so na SN zbiralke priključena različna bremena in tudi vir obnovljive energije, v tem primeru vetrna elektrarna. Zbiralke so preko transformatorja priključene na prenosno omrežje na visoko-napetostnem nivoju (VN). Na osnovi sheme bomo skušali predstaviti nekatere težave, ki lahko nastopijo v distribucijskih omrežjih.

Bremena bi lahko v splošnem razdelili na linearna in nelinearna. Nelinearna so tista, ki kljub sinusni napetosti osnovne frekvence iz omrežja odjemajo harmonsko popačen tok. Ta harmonsko popači tudi napetost v omrežju in s tem vpliva na vse priključene porabnike. Med večja nelinearna bremena sodijo recimo krmiljeni enosmerni motorji, asinhronski motorji, krmiljeni z napetostnim pretvornikom, obločne peči in ciklokonverterji. Med manjša bremena lahko prištejemo praktično vse napajalnike, ki napajajo sodobne elektronske naprave (računalnike, televizorje ...) in razsvetljava s fluorescentnimi ali LED sijalkami. Posamična t. i. manjša bremena imajo sicer majhno nazivno moč, vendar predstavljajo npr. v poslovnih stavbah velik delež moči, ki jo odjemajo iz omrežja in znatno prispevajo k harmonskemu popačenju v omrežju.

Na sliki 6.16 je prikazan tudi pasivni kompenzator (tvori ga  $L$ - $C$  vezje), ki primarno služi kompenzaciji jalove moči in v primeru filtrske izvedbe tudi kompenzaciji harmonskih tokov. Vsako vezje, ki je sestavljeno iz induktivnih in kapacitivnih elementov, pa ima eno ali več resonančnih točk, ko impedanca sistema doseže zelo visoke oz. zelo nizke vrednosti. Resonančna frekvenca je odvisna od elementov omrežja in se lahko nahaja v bližini značilnih harmonskih komponent, ki pogosto nastopajo v omrežju (npr. peti in sedmi harmonik). V takem primeru lahko pride do znatne ojačitve tokovnih oz. napetostnih harmonskih komponent.



Slika 6.16: Poenostavljena shema splošnega industrijskega energetskega sistema

Težave v omrežju povzročajo tudi nesimetrična bremena, saj je nesimetrična napajalna napetost lahko vzrok izpadom občutljivih bremen, poleg tega pa povzroča dodatne izgube npr. v motorjih in transformatorjih.

Pogost problem v elektroenergetskih omrežjih je tudi fliker, ki je definiran kot vidno zaznavanje spreminjanja svetlosti svetilk. Nastopi zaradi nihanja amplitude napetosti v določenem frekvenčnem območju (nekje med 0,5 in 25 Hz). Med večjimi povzročitelji flikerja so zagotovo obločne peči, povzročajo pa ga lahko vsa bremena, ki s svojo periodično spreminjajočo se obremenitvijo vplivajo na nivo napetosti.

Aktualna tematika so že dlje časa tudi obnovljivi viri energije in razpršena proizvodnja, tj. proizvodnja električne energije z manjšimi enotami, ki so navadno priključene na distribucijsko omrežje. Ob večji prisotnosti virov v delu razdelilnega omrežja se tako med drugim porajajo tudi vprašanja glede regulacije napetosti, jalove moči in delovanja v primeru okvar (npr. delovanje zaščite).

Za reševanje zgoraj opisanih težav obstajajo seveda »klasični« ukrepi, to so rešitve, kjer niso uporabljene naprave močnostne elektronike. Ena izmed takih rešitev je zagotovo ojačitev omrežja, ki omili praktično vse težave, povezane s kakovostjo napetosti in neprekinjenostjo napajanja. Vendar je taka rešitev pogosto draga in zaradi vplivov na okolje (npr. izgradnje novih elektrarn in daljnovodov) tudi težko izvedljiva. Druga rešitev so pasivni kompenzatorji, ki poleg kompenzacije jalove moči omogočajo še kompenzacijo izbranih tokovnih harmonikov. Poleg že omenjene nevarnosti ojačenja harmonskih komponent zaradi resonance v omrežju sta slabosti teh t. i. pasivnih filtrov tudi fiksna kompenzacijska karakteristika (kompenzacija zgolj enega harmonika) in fizična velikost. Vse to močno omejuje njihovo uporabnost in učinkovitost. Poleg tega pasivni filtri ne omogočajo dinamične kompenzacije, to je kompenzacije, ki sledi trenutnim razmeram v omrežju, saj je njihov vklop oz. izklop mogoč le s klasičnimi mehanskimi stikali.

Aktivni filtri omogočajo odpravo ali vsaj omilitev vseh zgoraj opisanih težav, poleg tega pa tudi nimajo slabosti, ki jih imajo klasični pasivni kompenzatorji [8]. Osnovni principi delovanja so bili zastavljeni že okrog leta 1970. Z aktivnimi filtri označujemo široko družino naprav, temelječih na napetostnem pretvorniku, ki je bil že opisan. Napetostni pretvornik lahko v splošnem na izhodnih sponkah generira izmenično napetost

spremenljive frekvence, amplitude in faznega kota, seveda v okviru nazivnih vrednosti naprave in uporabljenih elementov (polprevodniških stikal). Aktivni filter je visoko dinamična naprava, ki omogoča relativno hitro spreminjanje izhodne napetosti (in s tem toka) ter zato hitro prilagajanje spremenljivim razmeram v omrežju.

Aktivni filtri v splošnem zagotavljajo večjo kakovost napetosti in večjo kontinuiteto napajanja priključenih porabnikov. Omogočajo lahko kompenzacijo negativnih vplivov določenega porabnika na omrežje in tudi kompenzacijo vplivov slabe kakovosti napetosti na porabnika. Omogočajo na primer:

- dinamično kompenzacijo jalove moči,
- dinamično kompenzacijo harmonikov,
- dinamično kompenzacijo nesimetričnega bremena,
- kompenzacijo flikerja,
- napetostno regulacijo na priključnem mestu ...

V nadaljevanju bodo predstavljene glavne konfiguracije aktivnih filtrov glede na njihovo priključitev v omrežje: paralelni, serijski in univerzalni aktivni filter ter hibridni aktivni filter, ki je sestavljen iz aktivnega in pasivnega filtra.

#### 6.2.5.1 Paralelni aktivni filter

Temeljna shema priključitve paralelnega filtra je prikazana na sliki 6.17. Največkrat gre za napetostni pretvornik s kondenzatorjem ali energijskim virom (npr. akumulatorskimi baterijami) na enosmerni strani, ki je preko sklopne dušilke ali transformatorja paralelno priključen na omrežja. Glavna funkcija paralelnega aktivnega filtra je kompenzacija bremenskega toka  $i_b$  (kompenzacija harmonikov in jalove moči), kot vir jalove energije pa lahko služi tudi regulaciji napetosti na priključnem mestu, na primer ob zagonu večjih motorjev. Z ustrezno regulacijo napetosti je mogoča tudi regulacija flikerja. Če je pretvornik grajen v štirižični izvedbi, lahko generira tudi nično komponento toka (tok ničnega vodnika) in kompenzira tudi nično komponento toka. Paralelni aktivni filter je pogosto imenovan tudi distribucijski statični kompenzator (D-Statcom).

Tok vira  $i_v$  lahko zapišemo kot vsoto toka bremena  $i_b$  in toka pretvornika  $i_p$ :

$$i_v = i_b + i_p. \quad (6.21)$$

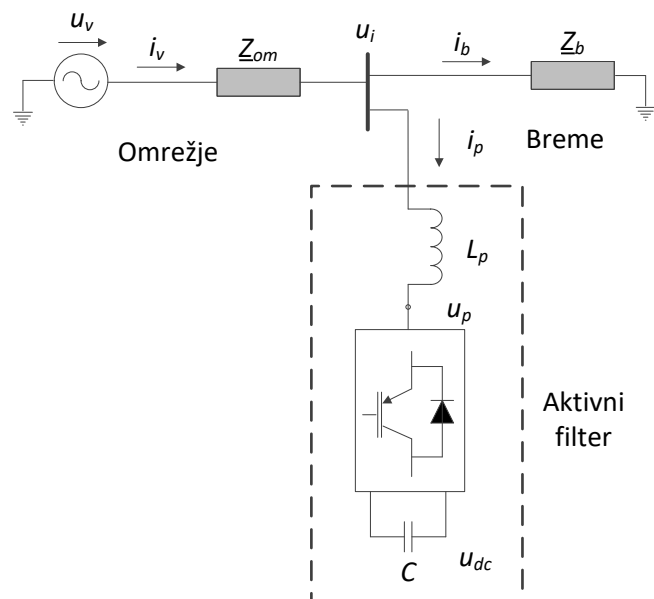
Tok bremena bo popolnoma kompenziran, ko bo pretvornik generiral tak tok, da bo vsota ( $i_b + i_p$ ) tvorila sinusen, simetričen tok osnovne omrežne frekvence, ki bo v fazi z omrežno napetostjo. Želeni tok pretvornika je torej:

$$i_p = i_{ref} - i_b, \quad (6.22)$$

kjer je  $i_{ref}$  referenčni tok, to je že omenjeni sinusni in simetrični tok osnovne omrežne frekvence v fazi z omrežno napetostjo. Paralelno k aktivnemu filteru je velikokrat priključen manjši pasivni filterski kompenzator. Ta služi kompenzaciji preklonih harmonikov, ki jih generira pretvornik.

Aktivni filter lahko z omrežjem izmenjuje tudi delovno moč, če ima na enosmerni strani priključen energetski vir. Energetski vir lahko predstavlja ustrezno dimenzioniran kondenzator ali pa npr. akumulatorske baterije, skupaj z regulacijo enosmerne napetosti.





Slika 6.17: Osnovna shema priključitve paralelnega aktivnega filtra

### 6.2.5.2 Serijski aktivni filter

Slika 6.18 prikazuje osnovno shemo priključitev serijskega aktivnega filtra (v ang. pogosto imenovanega tudi Dynamic Voltage Restorer – DVR). Napetostni pretvornik je priključen zaporedno z vodom preko serijskega transformatorja. Največkrat se uporablja za ščitenje občutljivih bremen pred napetostnimi upadi in porasti ter za filtriranje harmonsko popačene omrežne napetosti – gre torej za zagotavljanje kar se da sinusne in po amplitudi konstantne napajalne napetosti. Prvi serijski aktivni filter je bil vgrajen leta 1996 v ZDA. Vgradnja naprave je zagotovo smiselna tam, kjer so stroški zaradi izpada proizvodnje veliki v primerjavi s ceno naprave. Serijski filter omogoča tudi regulacijo pretoka moči v vodu.

Napetost na priključnem mestu bremena  $u_b$  lahko zapišemo kot vsoto napetosti na zbiralkah  $U_i$  in generirane napetosti pretvornika  $u_i$ :

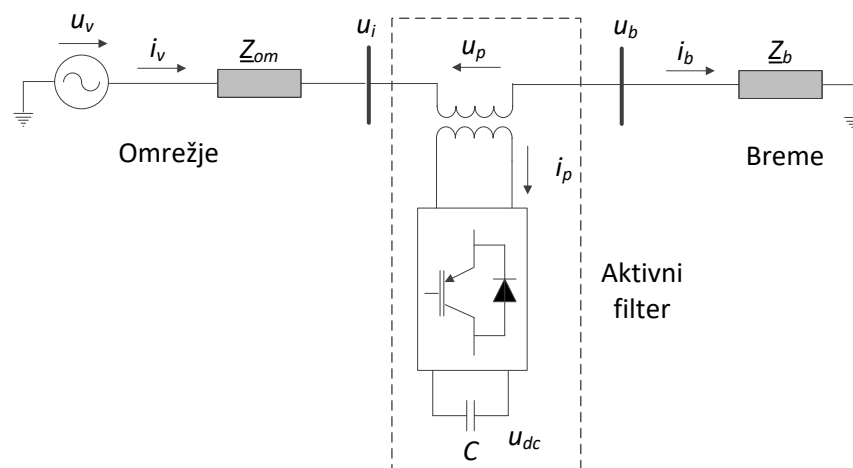
$$u_b = u_i + u_p \quad (6.23)$$

Napetost na zbiralkah bremena bo popolnoma kompenzirana, ko bo pretvornik generiral tako napetost, da bo vsota ( $u_i + u_p$ ) tvorila sinusno, simetrično napetost osnovne omrežne frekvence. Želena napetost pretvornika je:

$$u_p = u_{ref} - u_i \quad (6.24)$$

kjer je  $u_{ref}$  referenčna napetost, to je sinusna in simetrična napetost osnovne omrežne frekvence.

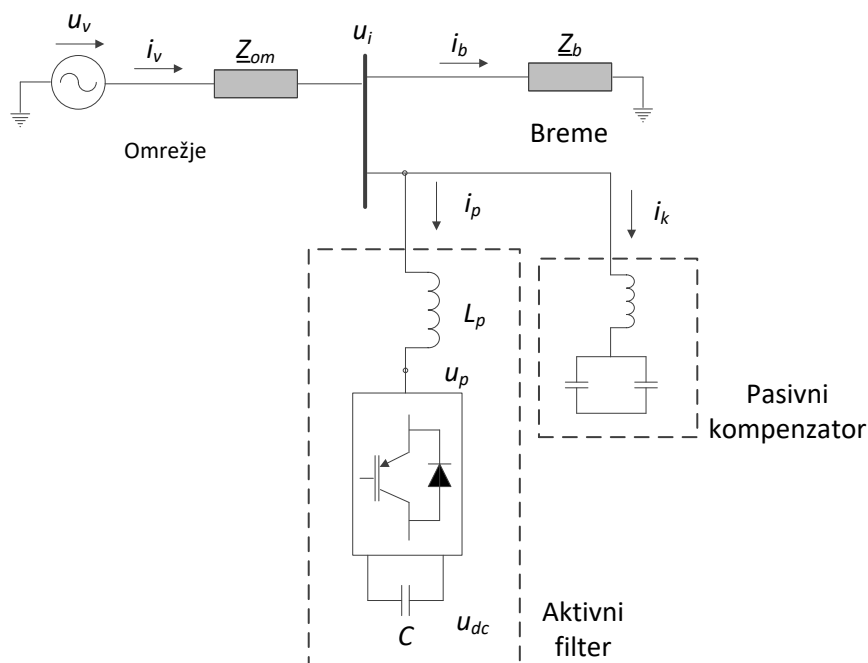
Podobno kot pri paralelnem aktivnem filtru, je tudi pri serijskem pomembno dimenzioniranje kondenzatorja na enosmerni strani. Za obratovanje naprave je namreč ključna relativno konstantna enosmerna napetost. Čim manjšo izmenjavo delovne energije med pretvornikom in omrežjem zagotavlja regulacijski algoritem tako, da je generirana napetost vedno pravokotna na linijski tok  $i_b$ . V takem primeru pretvornik izmenjuje z omrežjem pretežno jalovo moč, kar zmanjša velikost kondenzatorja. Vsekakor mora tudi serijski aktivni filter obratovati z regulacijo napetosti na enosmerni strani, ki z ustrezno izmenjavo delovne moči ohranja njeno konstantno vrednost. Serijski filtri pogosto obratujejo z energijskim virom, npr. z akumulatorskimi baterijami ali s kondenzatorjem, ki ga z omrežne strani napaja krmiljen usmernik.



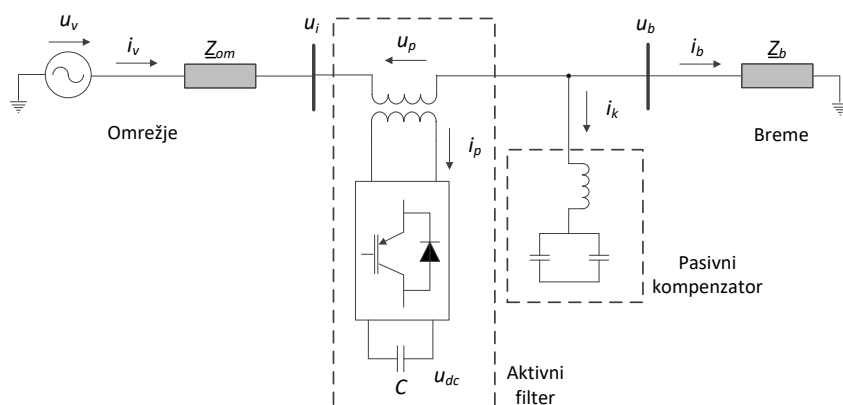
Slika 6.18: Osnovna shema priklučitve serijskega aktivnega filtra

### 6.2.5.3 Hibridni aktivni filter

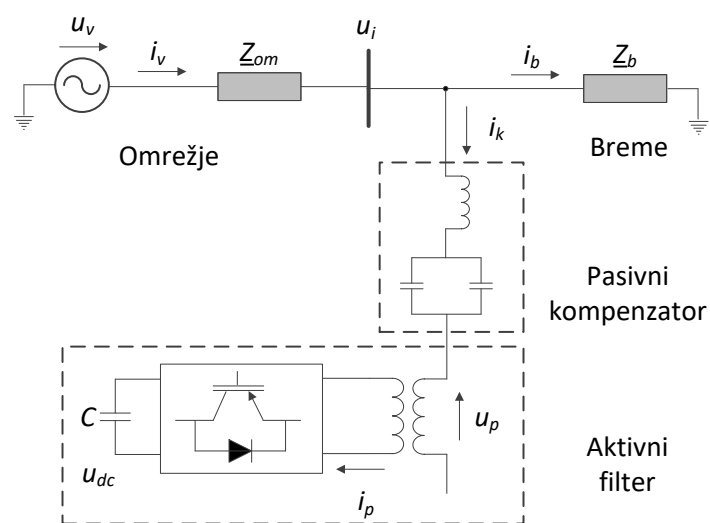
Hibridni filter tvori kombinacija aktivnega in pasivnega filtra. Pasivni filter je sestavljen iz kondenzatorjev in dušilke. Pri kompenzaciji jalove energije ima dušilka manjšo induktivnost in služi omejevanju vklopnih tokov. Pri filtrskem pasivnem filtru, ki je uglasen na določen harmonik, so dušilke večje in odvisne od izbrane resonančne frekvence  $L$ - $C$  člena. Pasivni filter je navadno izveden kot vzporedna vezava več različno uglasenih filtrskih kompenzatorjev. Hibridna izvedba filtra združuje pozitivne lastnosti aktivnega in pasivnega filtra. Večji del moči, potrebne za kompenzacijo bremena, prevzamejo cenejši pasivni filtri. Aktivni filter je manjše moči in služi le popravljanju karakteristike pasivnega filtra ter preprečevanju nastopa resonančnih razmer v omrežju. Možne so različne vezave hibridnih filtrov. Nekaj možnih izvedb je prikazanih na slikah 6.19, 6.20 in 6.21.



Slika 6.19: Shema priklučitve hibridnega aktivnega filtra (1)



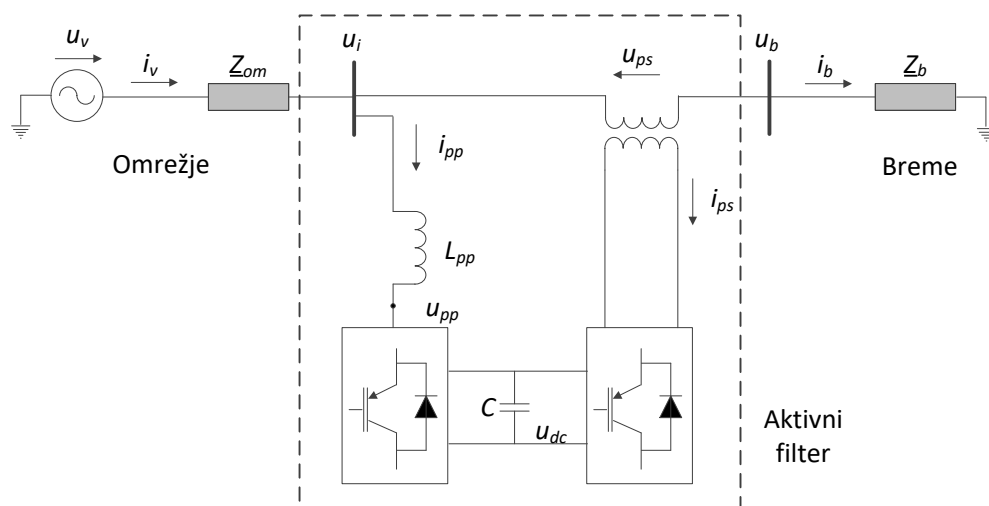
Slika 6.20: Shema priključitve hibridnega aktivnega filtra (2)



Slika 6.21: Shema priključitve hibridnega aktivnega filtra (3)

#### 6.2.5.4 Univerzalni aktivni filter

Univerzalni aktivni filter sestavlja kombinacija serijskega in paralelnega filtra (slika 6.22), pri čemer imata serijski in paralelni napetostni pretvornik skupno enosmerno vezje. Univerzalni filter v splošnem omogoča izvajanje vseh funkcij, ki jih imata serijski in paralelni napravi, npr. kompenzacijo napetostnih upadov in harmonskih napetosti ter hkratno kompenzacijo harmonikov in jalove komponente bremenskega toka. Naprava sicer lahko obratuje tako, da tako serijski kot tudi paralelni del z ustrezno regulacijo zagotavljata čim manjšo izmenjavo delovne moči z omrežjem, regulacija enosmerne napetosti pa poteka tako, kot je bilo opisano v prejšnjih poglavjih. Pogosteje pa v literaturi zasledimo način obratovanja, ko en pretvornik, npr. paralelni, zagotavlja vso potrebno delovno moč za delovanje drugega pretvornika in za regulacijo enosmerne napetosti.



Slika 6.22: Shema priključitve univerzalnega aktivnega filtra



## 7 Razpršeni viri

Enotne definicije za razpršene vire ni, se pa ta termin uporablja za označevanje virov električne energije (tudi hranilnikov energije) relativno majhnih moči (v Sloveniji do 10 MW), ki so priključeni na distribucijsko omrežje. Specifičen je primer vetrnih elektrarn. Slednje so sestavljene iz več turbin in so pogosto priklopljene na prenosno omrežje. Različne tehnologije razpršenih virov bodo opisane v nadaljevanju [10].

V nadaljevanju bodo na kratko opisane značilnosti najpogosteje uporabljenih in najbolj aktualnih virov električne energije na področju razpršene generacije.

### 7.1 Tehnologije proizvodnje električne energije

Pri tehnologijah proizvodnje električne energije se bomo omejili na najbolj aktualne razpršene vire električne energije. Nekateri so že dobro uveljavljeni (male hidroelektrarne, vetrne elektrarne, fotonapetostni sistemi), drugi pa se v komercialni obliki šele začenejo pojavljati (na primer gorivne celice, večji hranilniki električne energije ...).

#### 7.1.1 Male hidroelektrarne

K malim hidroelektrarnam (mHE) navadno štejemo elektrarne moči od nekaj kW pa vse do 10 MW. Akumulacija vode je pri mHE navadno majhna ali pa je sploh ni. Velikokrat so izvedene izven vodne struge (zlasti manjše), voda pa se iz višje ležečega zajetja dovaja po ceveh. Kot pogonski agregat so uporabljene različne turbine, kjer je izbira odvisna od pretoka vode in padca. Moč elektrarne (v kW) lahko izračunamo iz pretoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), neto padca vode  $H$  (m), gravitacijskega pospeška  $g$  in izkoristka  $\eta$ :

$$P = QHg\eta \quad (\text{kW}) \quad (7.1)$$

Izkoristek turbin se giblje, vsaj v območju od 60 % do 100 % nazivne moči, nekje med 80 % in 90 %. Poleg izkoristka turbine moramo seveda upoštevati še izgube v prenosnem mehanizmu turbina-generator (2–5 %), generatorju (1–5 %) in transformatorju (1–2 %). Za generiranje električne energije se uporabljajo sinhronski ali asinhronski generatorji.

Male hidroelektrarne obratujejo relativno zanesljivo in so tudi precej fleksibilne (hiter zagon in zaustavitev, hitro prilagajanje spremembam obremenitve). Glede na zelo majhno akumulacijo vode je proizvodnja električne energije povsem odvisna od vodostaja in trenutnih hidroloških razmer, kar povzroča velika nihanja v proizvodnji električne energije. Z ekološkega stališča so mHE čist in obnovljiv vir energije, problematičen je edino poseg v okolje in vodotok.

#### 7.1.2 Vetrne elektrarne

Vetrne turbine za proizvodnjo električne energije izkoriščajo kinetično energijo vetra, ki prehaja skozi rotor. Moč, ki jo proizvaja turbina, podaja naslednji izraz:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho v^3 A \quad (\text{W}), \quad (7.2)$$

kjer je  $C_p$  koeficient, ki podaja delež energije vetra, ki jo vetrna turbina izkorišča (najvišje vrednosti okrog 0,4),  $\rho$  je gostota zraka,  $v$  je hitrost vetra,  $A$  pa površina, ki jo pokriva vetrnica. Turbine so načrtovane za določen razpon hitrosti vetra (npr. od 4 m/s do 25 m/s). Proizvodnja električne energije vetrne elektrarne je zelo spremenljiva (spreminjanje moči s tretjo potenco hitrosti vetra) in tudi napovedovanje hitrosti vetra za majhno področje ima lahko veliko napako. Vetrne turbine so na voljo v razponu moči od nekaj kW pa do več MW. Več turbin na določenem območju je lahko povezanih skupaj v vetrno elektrarno. Pri majhnih elektrarnah reda nekaj kW se za proizvodnjo električne energije pogosto uporablja generator s trajnimi magneti, ki je na omrežje priključen preko polprevodniškega pretvornika.

---

Večje vetrne turbine (moči okrog 1 MW ali več) so lahko izdelane za obratovanje pri konstantni hitrosti ali pri spremenljivi hitrosti vrtenja. Regulacija konstantne hitrosti je zapletena in tudi nenatančna. Pri konstantni hitrosti vrtenja lahko dosežemo optimalen izkoristek le v eni obratovalni točki. Zato večina zgrajenih vetrnih elektrarn tega reda velikosti obratuje pri spremenljivi hitrosti vrtenja. Optimalno obratovalno točko glede na hitrost vetra pri turbinah s spremenljivo hitrostjo vrtenja dosežemo z uporabo močnostne elektronike, in sicer na dva načina:

- med sinhronski generator, ki ga poganja vetrna turbina, in omrežje vključimo polprevodniški AC/AC pretvornik enake moči, kot je nazivna moč turbine,
- rotor asinhronskega generatorja napajamo preko polprevodniškega AC/DC/AC pretvornika in s tem reguliramo frekvenco na rotorju, ki tako ni več odvisna samo od hitrosti vetra.

Vetrne elektrarne imajo spremenljivo proizvodnjo električne energije, povzročajo pa lahko tudi nihanje amplitude napetosti v omrežju (fliker). So sicer obnovljiv in čist vir električne energije, problematična je edino umestitev v prostor.

### 7.1.3 Sončne fotonapetostne elektrarne

Fotonapetostna proizvodnja električne energije poteka s pomočjo direktne pretvorbe sončne energije v električno, in sicer s pomočjo polprevodniških sončnih celic. Celice, obsevane s soncem, generirajo enosmerno električno napetost. Sončno obsevanje ob jasnem vremenu znaša približno  $1 \text{ kW/m}^2$ , tipični izkoristki sončnih celic pa znašajo med 10 in 20 %. Najvišji izkoristki sončnih celic v laboratorijskih raziskavah sicer presegajo 30 %. Ob oblačnem vremenu jakost obsevanja močno upade.

Fotonapetostni sistem za proizvodnjo električne energije sestoji iz sončnih celic, DC/DC pretvornika, DC/AC pretvornika in sklopne dušilke, preko katere je sistem priključen na omrežje. Sončne celice so lahko predstavljene kot napetostni oz. tokovni vir z  $U-I$  karakteristiko, ki je odvisna od temperature in sončnega obsevanja. Zahtevajo tudi ustrezno regulacijo delovne točke, v kateri sončna celica proizvaja maksimalno moč pri danih atmosferskih pogojih. Izhodna napetost, pri kateri dajejo sončne celice v omrežje največjo moč, se računa s t. i. MPPT algoritmom (Maximum Power Point Tracking Algorithm). Na osnovi napetosti, določene z MPPT algoritmom, DC/DC pretvornik regulira napetost na izhodnih sponkah sončnih celic. Za pretvorbo enosmerne napetosti v izmenično se uporabljajo DC/AC pretvorniki.

Fotonapetostne elektrarne predstavljajo čist vir električne energije, primeren tudi za vgradnjo na objekte (strehe, fasade). Odlikujeta jih enostavna montaža in preprosto vzdrževanje. Slabost je zlasti spremenljiva proizvodnja električne energije zaradi spreminjajočega obsevanja sonca.

### 7.1.4 Soproizvodnja toplote in električne energije

Soproizvodnja električne energije in toplote, imenovana tudi kogeneracija, predstavlja sočasno proizvodnjo električne energije in uporabne toplote. Toplota se lahko uporablja za ogrevanje bivalnih prostorov ali v industrijskih procesih. Izkoristek celotnega procesa lahko znaša preko 70 %, medtem ko bi proces proizvodnje električne energije brez izrabe toplote dosegel izkoristek nekje do 45 %. Soproizvodnja je lahko izvedena pri majhnih enotah, ki se uporabljajo v gospodinjstvih (moč električnega generatorja reda kW), pa vse do večjih enot, ki se uporabljajo v industriji (nekaj MW) in na nivoju mest (nekaj 10 ali nekaj 100 MW).

Za soproizvodnjo se uporabljajo številne različne tehnologije. Plinske turbine pretvarjajo energijo zgorelega plina v mehansko energijo, vroči dimni plini pa se uporabljajo za pokrivanje potreb po toploti. Pri parni turbini se z zgorevanjem goriva proizvaja para, ki se pretvarja v mehansko energijo. Preostala toplota pare se uporablja za ogrevanje. Prednost teh turbin je, da lahko uporabljajo katerokoli gorivo, na primer tudi odpadke. Plinski motorji so motorji z notranjim zgorevanjem, ki poganjajo električni generator, toploto izpušnih plinov pa lahko koristno porabimo. Pri mikro soproizvodnji pa gre navadno za enote, vgrajene v stanovanjih, ki v glavnem temeljijo na Stirlingovih motorjih ali motorjih z notranjim zgorevanjem. Pri soproizvodnji se v odvisnosti od tehnologije lahko uporablja več vrst goriv. Najpogosteje se uporablja zemeljski plin, ki povzroča majhne emisije prašnih delcev in toplogrednih plinov. Uporabljajo se še tekoča goriva, deponijski plin (nastaja pri razgrajevanju komunalnih odpadkov), bioplin (nastaja pri razkrajanju

organskih odpadkov), biomasa (predvsem lesna biomasa) in tudi fosilna goriva (premog). Večje enote za sproizvodnjo uporabljajo za proizvodnjo električne energije sinhronske generatorje, pri manjših pa se uporabljajo asinhronski generatorji in generatorji s trajnimi magneti v kombinaciji s polprevodniškim pretvornikom. Za uporabo v stanovanjskih poslopih so aktualne mikroturbine (mikro sproizvodnja), ki v glavnem delujejo na zemeljski plin. Sestavljene so iz kompresorja za stiskanje vhodnega zraka, gorilnika (kjer izgoreva gorivo in proizvaja pline visoke temperature ter visoke hitrosti) in turbine, ki odjema energijo plina in generatorja električne energije. Na omrežje so priklopljene preko polprevodniškega pretvornika. Kompresor, turbina in generator so navadno nameščeni na skupni osi. Za proizvodnjo toplote se izrabljajo vroči izpušni plini. Komercialne mikroturbine so na voljo za moči električnega generatorja nekje med 20 kW in 500 kW. Mikroturbine so lahko fleksibilen in učinkovit vir električne energije, vendar je velik izkoristek vezan na uporabo sicer odpadne toplote.

### 7.1.5 Gorivne celice

Pri gorivnih celicah se kemična energija pretvarja v električno in toplotno brez zgorevanja in premikajočih se delov. Večina celic uporablja kot primarna reaktanta kisik in vodik, nekatere pa tudi metan in metanol. Celico sestavljata dve elektrodi (anoda in katoda) in elektrolit. Gorivo se dovaja k anodi, oksidant pa h katodi. Ioni, ki nastanejo kot posledica kemične reakcije, tečejo po elektrolitu med elektrodama, kar ima za posledico generiranje napetosti. Tipična celica proizvaja moč reda nekaj 10 ali nekaj 100 W, zato se za doseganje večjih moči med sabo poveže večje število celic. Gorivne celice dosegajo izkoristke od 25 % do 65 % in so na voljo v širokem razponu moči od 10 kW pa vse do nekaj 10 MW. Gorivne celice so zanesljiv in okoljsko prijazen vir energije. Upoštevati moramo seveda tudi način pridobivanja goriva – v kolikor vodik pridobivamo s pomočjo obnovljivih virov energije, potem gorivne celice res nimajo škodljivega vpliva na okolje.

### 7.1.6 Hranilniki električne energije

Hranjenje električne energije je še posebej aktualno ob uporabi razpršenih in obnovljivih virov električne energije, ki so ponavadi majhni, z malo možnostjo regulacije moči in zelo odvisni od zunanjih dejavnikov (sončno obsevanje, vodostaj, veter ...). Hranilniki energije omogočajo predvsem bolj enostavno in fleksibilno izravnavanje proizvodnje in porabe električne energije.

Hranilniki električne energije so npr. akumulatorske baterije (svinčene, Ni-Cd, Li-ion, pretočne ...), vztrajniki (rotirajoča masa, ki energijo hrani v obliki kinetične energije), hranilniki v obliki stisnjenega zraka (stiskanje zraka s pomočjo kompresorjev), superkondenzatorji (kondenzatorji z visoko energijsko gostoto), superprevodni elektromagnetni hranilniki (energija se hrani v obliki enosmernega magnetnega polja). Možnost shranjevanja električne energije ponuja tudi elektroliza, kjer se s pomočjo električne energije pridobiva vodik, ki se kasneje porablja v gorivnih celicah. Uveljavljena oblika hranilnika energije so tudi črpalne elektrarne, ki ob presežkih električne energije črpajo vodo v višje ležeče zajetje, ob primanjkljaju pa se voda spušča in porablja za proizvodnjo električne energije. Gre seveda za elektrarne velikih moči, priključene na prenosno omrežje. Posamične tehnologije so na voljo za različne moči, imajo različne čase praznjenja in različne odzivne čase.





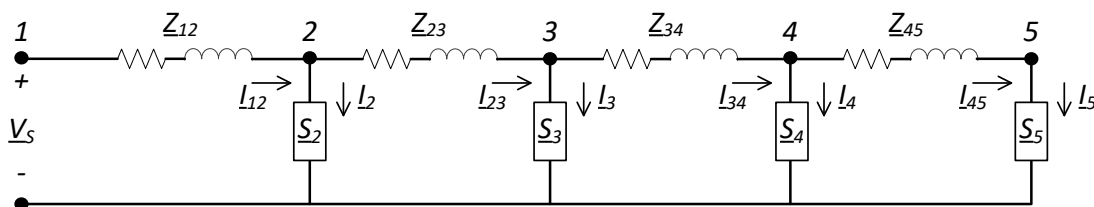
## 8 Izračun pretokov moči

Analiza elektroenergetskih omrežij velikokrat temelji na analizi delovanja v stacionarnih razmerah (izračun pretokov moči) ali na analizi kratkostičnih razmer ob kratkih stikih v omrežju [10]. Modeli voda, transformatorja in bremena, ki so bili predstavljeni v prejšnjih poglavjih, omogočajo izvajanje obeh tipov izračunov. V nadaljevanju se bomo osredotočili na analizo pretokov moči v radialnih distribucijskih omrežjih.

Analiza pretokov moči v osnovi pomeni izračun napetosti v vseh vozliščih omrežja in tokov v vseh vejah ob znanem odjemu priključenih bremen in proizvodnji virov. Ti rezultati seveda omogočajo tudi izračun vseh pretokov moči po omrežju in izgub.

Za izračun pretokov moči v radialnih distribucijskih omrežjih se pogosto uporablja iterativna tehnika, ki prinaša boljše konvergentnost rešitev v primerjavi s klasičnimi algoritmi, kot je na primer Newton-Raphsonov algoritem, ki se uporabljajo v zazankanih prenosnih omrežjih [6]. Pri iterativni tehniki navadno predpostavimo, da je znana napetost na omrežni strani. Tok bremen, priključenih v omrežju, je odvisen od napetosti na priključnem mestu, ki pa ni znana vnaprej.

Iterativni postopek izračuna bo predstavljen na osnovi preprostega omrežja, ki je prikazano na sliki 8.1. Pri tem predpostavimo, da poznamo impedance vseh elementov omrežja in odjem bremen.



Slika 8.1: Primer radialnega distribucijskega voda

V prvem koraku privzamemo, da je napetost na priključnem mestu zadnjega bremena ( $S_5$ ) enaka napetosti vira  $\underline{U}_5$ . Tok bremena lahko izračunamo z:

$$I_5 = \left( \frac{S_5}{U_5} \right)^* = \left( \frac{P_5 + jQ_5}{U_5} \right)^* \quad (8.1)$$

Tok  $I_{45}$  je enak toku  $I_5$ . Napetost  $\underline{U}_4$  je potem določena z:

$$\underline{U}_4 = \underline{U}_5 + \underline{Z}_{45} I_{45} \quad (8.2)$$

Ob znani napetosti  $\underline{U}_4$  lahko določimo tok  $I_4$  in nato tok  $I_{34}$ :

$$I_{34} = I_{45} + I_4 \quad (8.3)$$

V naslednjem koraku lahko izračunamo napetost v vozlišču 3. Postopek ponavljamo, dokler ne določimo napetosti v vozlišču 1, to je  $\underline{U}_1$ . Izračunano napetost primerjamo z napetostjo vira  $\underline{U}_5$ . V prvi iteraciji sta napetosti najverjetneje različni, zato nadaljujemo s povratnim izračunom od vira proti bremenu. Za vozlišče 1 upoštevamo napetost  $\underline{U}_5$ , napetost v vozlišču 2 pa izračunamo iz prej določenega toka  $I_{12}$ :

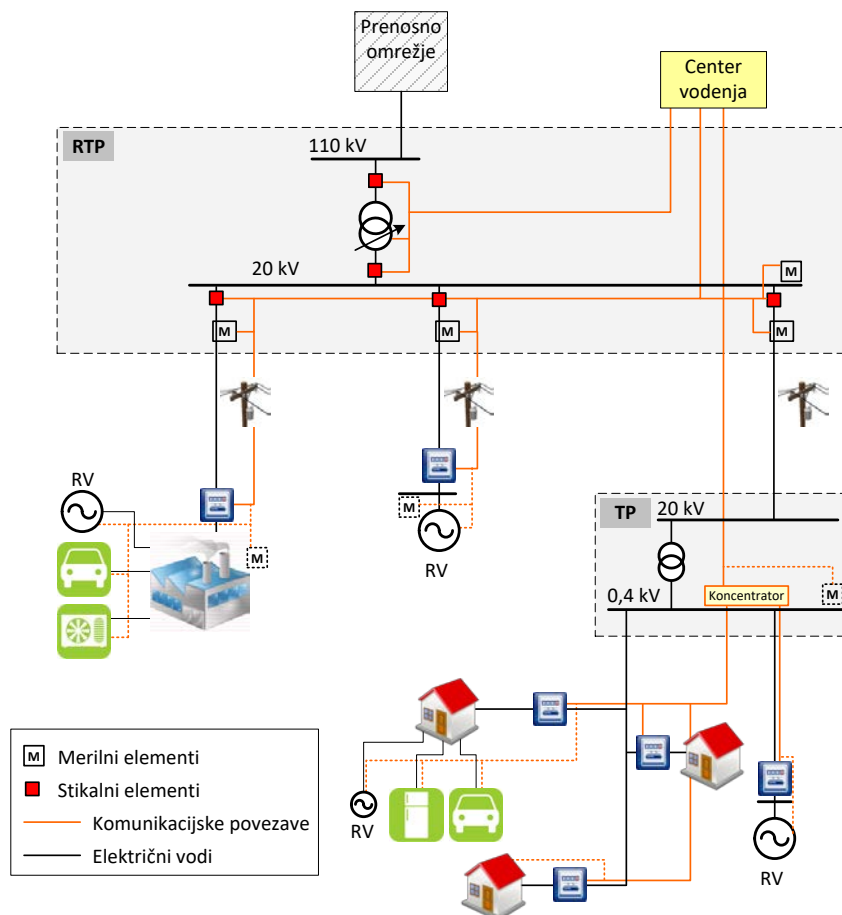
$$\underline{U}_2 = \underline{U}_5 - \underline{Z}_{12} I_{12} \quad (8.4)$$

Ta postopek ponavljamo, dokler ponovno ne določimo napetosti v vozlišču 5. Z na novo določeno napetostjo  $\underline{U}_5$  ponovno izračunamo bremenski tok  $I_5$  in ponovimo postopek od bremena 5 proti viru. Iterativni postopek ponavljamo, dokler razlika med izračunano in dejansko napetostjo na strani vira ni manjša od želene vrednosti.



## 9 Obratovanje distribucijskega omrežja

Sodobna distribucijska omrežja se soočajo z več novimi dejavniki, ki narekujejo njihov razvoj. Ti dejavniki so zlasti večanje deleža razpršenih virov električne energije, porast števila toplotnih črpalk, pristnost in naraščanje števila električnih vozil, koncepti nudenja storitev uporabnikov omrežja deležnikom elektroenergetskega sistema (npr. odjemalci, ki lahko prilagajajo svojo obremenitev glede na razmere v omrežju ali na trgu), večja pokritost omrežja z meritvami in komunikacijska infrastruktura ...



Slika 9.1: Distribucijsko omrežje in komunikacijske povezave

Shematski prikaz sodobnega distribucijskega omrežja je prikazan na sliki 9.1. Komunikacijske poti in merilne naprave so označene s črtkano črto. Napredna distribucijska omrežja so pogosto označena s terminom pametna omrežja. Pod tem terminom navadno razumemo skupek tehnologij in principov vodenja omrežja ter naprav, ki omogočajo vključevanje velikega števila razpršenih virov in električnih vozil s čim manjšimi vlaganji v primarno energetske opremo omrežja, to je vlaganji v nove vode, transformatorje in stikalno opremo. Obenem mora omrežje seveda še vedno zagotavljati visok nivo kakovosti oskrbe z električno energijo. Sicer pa termin pametna omrežja označuje predvsem smer razvoja s ciljem čim večje vodljivosti (in prilagodljivosti) omrežij. To dosežemo z ustreznim vodenjem velikega števila aktivnih elementov, kar zahteva primerno podporo informacijskih in komunikacijskih tehnologij. Novi dejavniki in spremenjeni koncepti pri pametnih omrežjih so:

- kompleksne sheme regulacije napetosti,
- spremenjene zaščitne sheme (zaradi prisotnosti virov),
- izgradnja komunikacijske infrastrukture v SN in NN omrežju,
- upravljanje s porabo in krmiljenje bremen odjemalcev,
- uporaba sodobnih kompenzacijskih naprav,

- 
- vključitev hranilnikov električne energije,
  - vzdrževanje ravnovesja med proizvodnjo in porabo ter regulacija frekvence (do sedaj domena zgolj prenosnega omrežja),
  - virtualne elektrarne (kot dodatna storitev agregiranja proizvodnje in porabe) ...

## 9.1 Kakovost oskrbe z električno energijo

Oskrba z električno energijo je ena izmed najbolj pomembnih storitev v današnjem času. Z odprtjem energetskega trga je električna energija postala tržno blago. Zahteve oziroma želje porabnikov električne energije so predvsem zanesljivo napajanje v smislu neprekinjene dobave, ustrezna kakovost napetosti in primerna cena. Uporabnik omrežja pričakuje, da bo distribucijsko omrežje omogočalo uporabo električne energije takrat, ko jo potrebuje, ob definirani kakovosti na transparenten in učinkovit način, tako da vse naprave uporabnika delujejo varno in zadovoljivo. Neustrezna kakovost oskrbe z električno energijo lahko vodi do prekinitve industrijskih procesov, izpada storitvenih dejavnosti ali celo okvar opreme in naprav. Vse to ima lahko precejšnje finančne posledice. Kakovost oskrbe z električno energijo delimo na:

- komercialno kakovost, ki označuje razmerje med operaterjem in uporabnikom omrežja,
- zanesljivost (neprekinjenost) oskrbe, ki se nanaša na število in trajanje prekinitev, ki jih zazna odjemalec, in
- kakovost napetosti, ki se nanaša na frekvenco, velikost, obliko vala in simetrijo trifaznega sistema električne napetosti na prevzemno-predajnem mestu odjemalca.

V nadaljevanju so na kratko predstavljeni parametri kakovosti oskrbe z električno energijo.

### 9.1.1 Komerzialna kakovost

Komerzialna kakovost opisuje kakovost storitev, ki izhajajo iz odnosa med sistemskim operaterjem in uporabnikom. V splošno komercialno kakovost so vključene storitve, opisane s povprečjem časov, potrebnih za njihovo izvedbo. Med te storitve spadajo npr.: čas ponovne vzpostavitve oskrbe pri nenapovedanih prekinitvah, čas izvedbe manjših del v omrežju, čas, potreben za priključitev ... Komerzialna kakovost se deli še na splošno in individualno komercialno kakovost. Splošna komercialna kakovost se nanaša na pogoje izvedbe storitev, ki jih sistemski operater lahko ponudi, vendar jih zaradi tehničnih značilnosti omrežja ne more zagotoviti vsakemu uporabniku omrežja. Splošno komercialno kakovost sestavljajo naslednji parametri:

- čas, potreben za ponovno vzpostavitev oskrbe z električno energijo pri nenapovedanih prekinitvah,
- čas, potreben za izvedbo manjših del (menjave števca, izdelave novega nizkonapetostnega priključka ...),
- čas, potreben za priključitev uporabnika na omrežje, in
- čas, potreben za odgovor na vprašanje uporabnika omrežja.

Individualna komercialna kakovost se nanaša na minimalne odzivne čase, ki jih sistemski operater zagotavlja vsakemu uporabniku omrežja. Sestavljajo jo naslednji parametri:

- čas, potreben za ponovno priključitev,
- čas, potreben za odziv na pregorelo varovalko,
- časovni pas najavljenega obiska,
- čas, potreben za posredovanje informacij o priključevanju,
- čas, potreben za rešitev reklamacije v zvezi s števcem,
- čas, potreben za rešitev reklamacije v zvezi s stroški ali plačilom, in
- čas, potreben za aktiviranje priključka.

### 9.1.2 Zanesljivost oskrbe

Zanesljivost (neprekinjenost) oskrbe je široko področje, kjer lahko govorimo o več vrstah prekinitev. Za posamezne prekinitve so bile razvite različne definicije in metode njihovega merjenja ter vrednotenja. Prekinitve na posameznem prevzemno-predajnem mestu delimo na:

- Napovedane ali nenapovedane prekinitve.
- Kratkotrajne prekinitve (prekinitve, krajše od treh minut) in dolgotrajne prekinitve (prekinitve, daljše od treh minut).
- Prekinitve glede na napetostni nivo, ki različno vplivajo na končnega odjemalca. Zaradi načina načrtovanja omrežja npr. odjemalci na srednjenapetostnem in nizkonapetostnem omrežju ne zaznajo vseh okvar na visokonapetostnem omrežju.

Zanesljivost oskrbe se predpisuje za skupno število in trajanje nenapovedanih kratkotrajnih in dolgotrajnih prekinitev v enem letu na enem prevzemno-predajnem mestu. Predpisano je tudi število napovedanih prekinitev. Uredba predvideva tudi dogovor med sistemskim operaterjem omrežja in odjemalcem, ki se lahko dogovorita o drugačnem številu prekinitev. V standardu SIST EN 50160 so za te količine podane samo okvirne vrednosti, s čimer je omogočen dogovor oziroma pogodbeno razmerje z drugačnimi vrednostmi.

Za zanesljivost oskrbe v celotnem omrežju se uporabljata naslednja parametra:

- SAIDI (System Average Interruption Duration Index – indeks povprečnega trajanja prekinitev napajanja v sistemu) je razmerje med vsoto trajanja prekinitev napajanja končnih odjemalcev in celotnim številom končnih odjemalcev v sistemu (minut/odjemalca). Prikazuje povprečni čas v enem letu, ko je končni odjemalec brez oskrbe z električno energijo.
- Število in trajanje prekinitev odjemalca v enem letu CI (Customer Interruptions – prekinitve odjemalca) ali SAIFI (System Average Interruption Frequency Index – indeks povprečne frekvence prekinitev v sistemu). Indeks povprečne frekvence prekinitev napajanja v sistemu je razmerje med celotnim številom prekinitev napajanja končnih odjemalcev in celotnim številom končnih odjemalcev v sistemu (izpadov/odjemalca). Prikazuje, kolikokrat je bila končnemu odjemalcu povprečno letno prekinjena oskrba z električno energijo.

### 9.1.3 Kakovost napetosti

Kakovost napetosti zajema več parametrov električne napetosti. Stanje tehnike na področju kakovosti napetosti določa standard EN 50160, ki je bil že leta 1998 sprejet kot slovenski standard SIST EN 50160 »Značilnosti napetosti v javnih razdelilnih omrežjih«. SIST EN 50160 je zbirka povzetkov ravni elektromagnetnih združljivosti trinajstih značilnosti napetosti, ki so skoraj vse zajete v standardih, tehničnih poročilih in specifikacijah elektromagnetne združljivosti standardov IEC oziroma EN 61000-X-X (EN 61000-X-X – splošna oznaka za vse standarde EMC v poglavjih in podpoglavjih skupine 61000). Standard SIST EN 50160 postavlja meje za parametre kakovosti napetosti (minimum kakovosti). Opredeljuje največje dovoljene nivoje elektromagnetnih motenj v nizkonapetostnem (NN), srednjenapetostnem (SN) in visokonapetostnem (VN, do 150 kV) omrežju na odjemnem mestu, kjer se srečujeta odjemalec in javno razdelilno omrežje. Kakovost napetosti je standardizirana z namenom, da bi vsaka naprava, kupljena na skupnem evropskem tržišču in narejena v skladu s stanjem tehnike, delovala kjerkoli v Evropi. S tem je zagotovljen prost pretok blaga prek državnih meja, kar je osnova za enoten evropski trg. Po standardu SIST EN 50160 kakovost napetosti določajo naslednji parametri:

- odkloni napajalne napetosti,
- kratkotrajne in dolgotrajne prekinitve,
- odstopanje omrežne frekvence,
- hitre spremembe napetosti – fliker,
- harmonske in medharmonske napetosti,
- neravnotežje napajalne napetosti,
- signalne napetosti,
- prenapetosti in upadi napetosti.

V tabeli 9.1 so podane meje oziroma vrednosti, znotraj katerih lahko odjemalec pričakuje značilnosti napetosti v normalnem obratovalnem stanju.

Tabela 9.1: Značilnosti napetosti v normalnem obratovalnem stanju

Značilnost napetosti	Integracijska perioda	Časovno merilno obdobje	Verjetnost nahajanja znotraj tolerance	Ovrednotenje parametra tolerance
Odkloni napajalne napetosti	10 minut	1 teden	95 %	$\pm 10 \%$
	10 minut	1 teden	100 %	+ 10 % / - 15 %
Omrežna frekvenca	10 s	1 teden/leto	99,50 %	$\pm 1 \%$
	10 s	1 teden/leto	100 %	+ 4 % / - 6 %
Fliker	2 uri	1 teden	95 %	$\leq 1$
Harmoniki	10 minut	1 teden	95 %	SIST EN 50160
Neravnotežje napajalne napetosti	10 minut	1 teden	95 %	$\leq 2 \%$
Signalne napetosti	3 sekunde	1 teden	99 %	SIST EN 50160

Kakovost napetosti se ocenjuje s pomočjo meritev in analiz stanja na način:

- Stalnega monitoringa, s katerim se izvajajo letne analize motenj distribucijskega omrežja, določajo trendi motenj in izdela primerjava zatečenega nivoja motenj z nivoji načrtovanja za posamezne dele omrežja.
- Občasnega monitoringa, ki se izvaja v primeru pritožb uporabnikov omrežja, v primeru zahteve uporabnika omrežja po izjavi o kakovosti napetosti ter po naprej opredeljenem programu meritev in analiz stanja kakovosti.

#### 9.1.3.1 Odkloni napajalne napetosti

Standard SIST EN 50160 določa, da mora biti ob normalnih obratovalnih pogojih 95 % vseh 10-minutnih period srednjih efektivnih vrednosti napajalne napetosti enega tedna v mejah  $U_n \pm 10 \%$ , pri čemer je  $U_n$  nazivna napetost. Vse 10-minutne periode srednjih efektivnih vrednosti napajalne napetosti pa morajo biti v mejah  $U_n + 10 \%$  / 15 %. Napetosti izven predpisanih mej lahko povzročijo škodo pri porabniku, zato je zagotavljanje ustreznega nivoja napetosti nujno.

#### 9.1.3.2 Napetostni upadi

Kot napetostni upad pojmuje kratkotrajno zmanjšanje efektivne vrednosti napetosti, do katerega pride zaradi kratkih stikov v omrežju, preobremenitev ali zagonov velikih motorjev. V elektroenergetskih sistemih so najpogostejši povzročitelj upadov napetosti kratki stiki, ki so velikokrat posledica napak na opremi ali različnih naravnih pojavov, kot sta npr. udar strele in veter.

Posledice upadov napetosti se kažejo kot težave pri obratovanju določenih občutljivih naprav (naprav v industrijskih procesih, računalnikov, reguliranih pogonov ...), ki lahko ob upadu napetosti izpadejo iz obratovanja, kar pomeni prekinitev določenega procesa in s tem povezane ekonomske izgube. Čeprav pojav upada napetosti za odjemalce ni tako problematičen kot prekinitev napajanja, je pogostost upadov navadno precej večja od pogostosti prekinitev in lahko zaradi tega povzroči tudi večjo škodo. Medtem ko se prekinitve napajanja pojavljajo predvsem v omrežjih na lokalni ravni, se lahko upad napetosti kot posledica kratkega stika v omrežju razširi po obsežnem delu elektroenergetskega sistema in zato predstavlja širši problem.

Glavna podatka, ki označujeta napetostni upad, sta predvsem velikost upada napetosti in njegovo trajanje. Poleg teh dveh podatkov je pri zelo občutljivi opremi pomemben tudi fazni premik, ki nastopi kot posledica

napetostnega upada, pomemben pa je tudi fazni kot napetosti, pri katerem nastopi napetostni upad oziroma kot, pri katerem se napetost povrne v prvotno stanje. Poleg tega napetost v času upada vsebuje relativno veliko harmonskih komponent.

### 9.1.3.3 Harmoniki

Harmonsko popačenje povzročajo nelinearni porabniki v omrežju, pri katerih tok ni proporcionalen priključeni napetosti. Najpogostejši vir harmonskega popačenja v sodobnih elektroenergetskih sistemih so pretvorniki, ki služijo napajanju različnih naprav, in naprave z oblokom (npr. obločne peči).

Standardi, namenjeni nadzoru nad harmonskim onesnaževanjem omrežja, so navadno razdeljeni na dva dela:

- nadzor nivoja harmonskih tokov, ki jih posamezna bremena oddajajo v omrežje in je v domeni uporabnika in
- nadzor nad harmonskim popačenjem napetosti, ki je v domeni operaterja omrežja.

Zaradi različnih tokovnih in napetostnih nivojev, ki nastopajo v omrežju, je harmonske veličine prikladneje zapisati v relativni obliki glede na osnovno komponento. Enačbi za izračun relativne vrednosti harmonske komponente toka oz. napetosti, kjer je  $h$  mnogokratnik osnovne frekvence, sta:

$$i_{hr} = \frac{i_h}{i_1} \cdot 100 (\%),$$

$$u_{hr} = \frac{u_h}{u_1} \cdot 100 (\%).$$
(9.1)

Za ovrednotenje harmonskega popačenja se pogosto uporablja faktor skupnega harmonskega popačenja (*THD* – Total Harmonic Distortion), ki ga lahko izračunamo tako za tok kot tudi za napetost:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} M_h^2}}{M_1},$$
(9.2)

kjer je  $M$  efektivna vrednost harmonske komponente  $h$  toka oz. napetosti. *THD* je tako merilo za efektivno vrednost harmonskih komponent popačenega signala.

Elektronske naprave in sodobni krmiljeni pogoni, ki predstavljajo glavni vir harmonskega popačenja, so velikokrat tudi zelo občutljivi na kakovost električne napetosti. Harmonsko popačena napetost lahko povzroči neustrezno delovanje ali celo izpad take naprave. Harmonsko popačenje napetosti ima lahko precejšen vpliv na delovanje elektromotorskih pogonov in transformatorjev. Povzroča dodatne izgube v napravah in njihovo hitrejše staranje. Najbolj so kritični harmoniki nižjega reda, saj so njihove amplitude najvišje, navidezne impedance naprav pa nižje.

Harmonske napetosti inducirajo harmonske flukse v jedru motorja, ki ne prispevajo bistveno k navoru motorja. Ti fluksi rotirajo s frekvenco, različno od sinhronske frekvence motorja, in s tem inducirajo harmonske tokove v rotorju. Ti tokovi povzročajo le dodatno segrevanje motorja in s tem njegovo hitrejše staranje. Podobno kot na motorje imajo harmoniki vpliv tudi na delovanje transformatorjev. Transformatorji so načrtovani za zagotavljanje zahtevane moči priključenim bremenom z minimalnimi izgubami pri osnovni frekvenci. Harmonsko popačenje toka (in tudi napetosti) pripomore k dodatnemu segrevanju transformatorja. Do dodatnega segrevanja pride zaradi:

- preobremenitve zaradi visokih harmonskih tokov,
- izgube zaradi vrtilnih tokov v navitjih, jedru in ostalih prevodnih materialih, ki naraščajo s kvadratom frekvence, in
- izgub v jedru, ki so odvisne od harmonskega popačenja napetosti in so posledica krožnih tokov v jedru.



---

#### 9.1.3.4 Fliker

Kolebanje napetosti je definirano kot zaporedje napetostnih sprememb ali zvezno spreminjanje efektivne vrednosti napetosti. To kolebanje povzroča spremembe svetilnosti svetilk, kar označujemo kot fliker. Fliker je definiran kot vtis nestalnosti vidnega zaznavanja zaradi svetlobnega dražljaja, katerega spektralna porazdelitev časovno niha. Nad določenim pragom postane fliker moteč. Učinek motenja raste zelo hitro z amplitudo kolebanja. Pri določeni frekvenci ponavljanja lahko ljudi motijo že zelo majhne amplitude kolebanja. Večina ljudi je najbolj občutljiva za frekvenco nihanja 8,8 Hz. Odziv na fliker je sicer subjektiven in se lahko spreminja odvisno od vzroka flikerja in časa trajanja.

Intenzivnost učinkov flikerja je definirana po IEC v ustreznih standardih (EN 60868-0, EN 61000-4-15). Ti standardi opredeljujejo:

- kratkotrajno jakost flikerja  $P_{st}$ , ki jo merimo v obdobju desetih minut, in
- dolgotrajno jakost flikerja  $P_{lt}$ , ki jo izračunamo iz dvanajstih zaporednih vrednosti v dveurnem intervalu po enačbi (9.3).

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st,i}^3}{12}} \quad (9.3)$$

Eden glavnih večjih povzročiteljev flikerja v elektroenergetskih omrežjih so elektroobločne peči. Predstavljajo izrazito nelinearno breme, ki iz omrežja odjema nihajočo moč (tako delovno kot tudi jalovo). Posledica nihanja moči je tudi spreminjanje amplitude napetosti v omrežju (oziroma spreminjanje njene efektivne vrednosti), kjer so posebej pereča nihanja s frekvenco nekje med 0,5 in 25 Hz. Nihanja v tem frekvenčnem območju povzročajo že omenjeno nihanje svetilnosti svetilk, ki je za človeka moteče.

Razmere v omrežju so stohastične narave. Izmerjena raven flikerja lahko zelo močno variira v času trajanja meritev. Zaradi tega je treba meritve flikerja opraviti v dovolj dolgem intervalu in za kakovostno oceno uporabiti pravilne statistične metode za vrednotenje rezultatov meritev. Poleg maksimalne izmerjene jakosti flikerja je treba poiskati tudi velikosti flikerja za različne čase trajanja znotraj časa meritev.

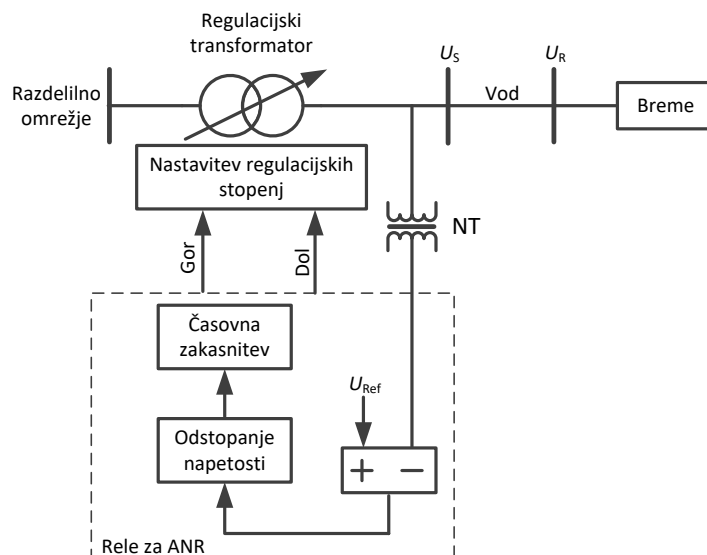
## 9.2 Regulacija napetosti v distribucijskih omrežjih

Eden izmed temeljnih kriterijev, ki se uporabljajo pri načrtovanju omrežij, so najvišji dovoljeni padci napetosti na vodih. Z ustreznim določanjem najvišjih dopustnih padcev napetosti omejimo izgube v omrežju in ohranjamo napetost pri bremenih znotraj predpisanih mej.

### 9.2.1 Regulacija napetosti

Klasična regulacija napetosti se izvaja s pomočjo regulacijskega transformatorja, pri katerem se z nastavitvijo ustreznih regulacijskih stopenj spreminja prestavno razmerje transformatorja. Pri prehodu z visoke na srednjo napetost (VN/SN) je večinoma prisotna avtomatska regulacija, medtem ko je pri prehodu s srednje na nizko napetost (SN/NN) najpogostejše ročno nastavljanje (ob izklopljenem transformatorju). Regulacijske stopnje takega transformatorja se nastavijo v času priklopa in se kasneje, razen izjemoma, ne spreminjajo.

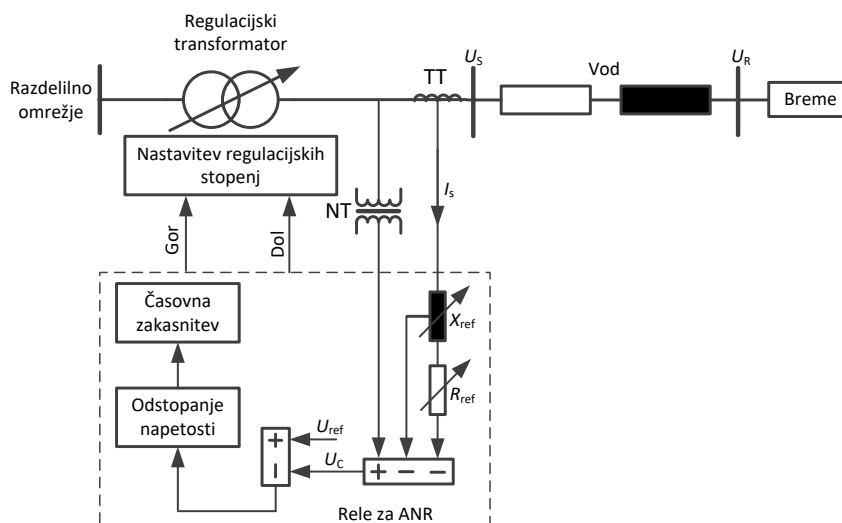
Na sliki 9.2 vidimo shemo klasičnega postopka regulacije napetosti v RTP. Avtomatska regulacija napetosti najpogosteje zagotavlja konstantno napetost na sekundarni strani transformatorja. Nastavljivi parametri releja za avtomatsko napetostno regulacijo (ANR) so želena napetost, dovoljeno odstopanje napetosti in časovne zakasnitve, vhodni parameter pa je trenutna (merjena) vrednost napetosti. Ko je odstopanje napetosti večje od dovoljenega, v daljšem časovnem intervalu od nastavljenega, se izvede sprememba regulacijske stopnje.



Slika 9.2: Klasičen način primarne regulacije napetosti v RTP

Na ta način se regulira le napetost v RTP-ju, medtem ko je napetost vzdolž voda posledica trenutne obremenitve. Kot bomo videli v naslednjih poglavjih, je s pojavom razpršenih virov tovrstna regulacija lahko precej otežena.

Klasično regulacijo napetosti lahko nekoliko dodelamo s tem, da v regulacijskem algoritmu upoštevamo tudi bremenski tok. S tem kompenziramo padec napetosti na izvodih in posledično se napetost regulira v oddaljeni točki omrežja. Tovrstno regulacijo imenujemo regulacija s kompvandiranjem. Princip regulacije je prikazan na sliki 9.3.



Slika 9.3: Napetostna regulacija s kompvandiranjem

Napetost v oddaljeni točki, kjer transformator regulira napetost, označimo z  $U_R$ . Ta točka je določena z nadomestno impedanco: reaktanco  $X_{ref}$  in ohmsko upornostjo  $R_{ref}$ . Na podlagi bremenskega toka  $I_S$ , izmerjenega s tokovnim transformatorjem (TT), in nastavljenе nadomestne impedance je izračunan predvideni padec napetosti med RTP-jem in izbrano regulirano točko v omrežju. Znotraj releja ANR se želena vrednost napetosti  $U_{ref}$  primerja z izračunano napetostjo ( $U_C$ ) v regulirani točki omrežja. Glede na odstopanje napetosti od želene vrednosti in časovne zakasnitve se izvede ukaz za spremembo regulacijske stopnje. Napaka ( $\Delta U$ ) med izračunano napetostjo  $U_C$  in dejansko napetostjo v regulirani točki omrežja  $U_R$  je podana z naslednjo enačbo:

$$\Delta U = U_R - U_C = I_S \left[ (R_{ref} - R) \cos \varphi + (X_{ref} - X) \sin \varphi \right]. \quad (9.4)$$

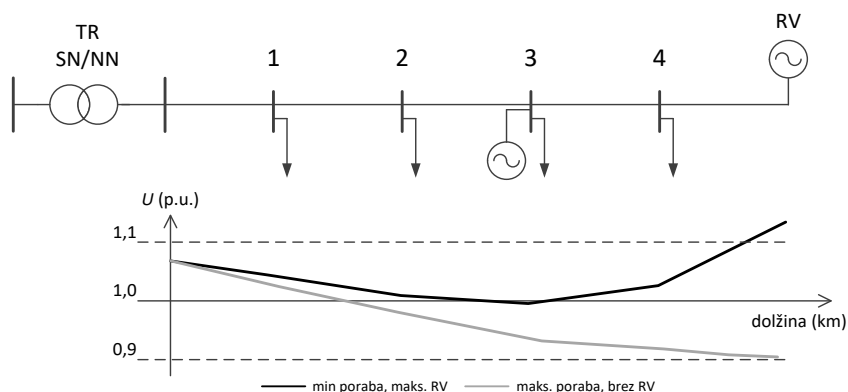
Slabost regulacije s kompavndiranjem je, da so v praksi porabniki (bremena) razpršeni po celotni dolžini voda oziroma imamo opravka z večjim številom različno obremenjenih vodov, kar otežuje nastavitvev kompenzacije padca napetosti, ki bi ustrezal vsem porabnikom v omrežju. Poleg tega je delovanje avtomatske regulacije napetosti občutljivo na slabo nastavljene parametre  $X_{ref}$  in  $R_{ref}$ , kar lahko pri spreminjanju faktorja moči ( $\cos\phi$ ) privede do velikih razlik med izračunano napetostjo  $U_c$  in dejansko napetostjo v regulacijski točki  $U_R$ . Kljub temu je lahko napetostna regulacija učinkovita, če imamo v razdelilnem omrežju priključene samo porabnike, medtem ko se s priključitvijo razpršenih virov njeno delovanje lahko poslabša. Slabo delovanje regulacije s kompavndiranjem lahko privede do nepotrebnih preklpov regulacijskih stopenj in s tem skrajševanja življenjske dobe preklopnega mehanizma. Do slabega delovanja lahko pride predvsem v primeru, ko je razpršeni vir priključen na lastni izvod iz RTP-ja, zato bi bilo potrebno v tem primeru ta izvod izključiti iz regulacije s kompavndiranjem.

### 9.3 Vpliv razpršenih virov na obratovanje omrežja

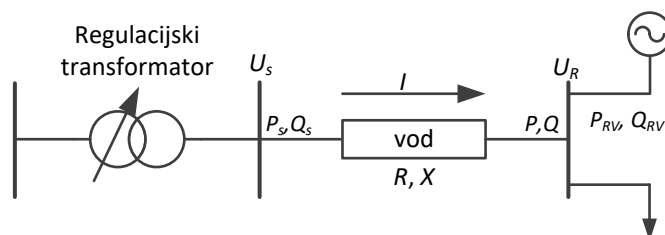
S težnjami po zmanjševanju izpustov toplogrednih plinov in energetske neodvisnosti ter zaradi težav pri umeščanju tradicionalnih elektrarn v omrežje vse bolj stopajo v ospredje t. i. razpršeni viri (RV). Njihovo integracijo v omrežje z različnimi podpornimi shemami spodbujajo tudi države. Ker lahko moč RV-ja predstavlja občuten delež glede na moč bremen, ti viri vplivajo na delovanje distribucijskega omrežja. Ena izmed prvih težav, ki se navadno pojavijo z večanjem deleža RV-jev, so previsoke napetosti v omrežju, ob visokem deležu RV-jev pa je lahko znaten tudi vpliv na frekvenco omrežja in delovanje zaščite.

#### 9.3.1 Vpliv razpršenih virov na napetostni profil distribucijskega omrežja

Slika 9.4 prikazuje napetostni profil splošnega radialnega izvoda. Kot lahko razberemo, v omrežju brez RV-jev napetost diktira prestavno razmerje transformatorja ter bremena. RV-ji v omrežju pa s proizvodnjo dvigujejo napetost v omrežju, kar lahko ob majhnem odjemu povzroči previsoke napetosti. Zaradi pogostosti tega problema si ga bomo ogledali nekoliko podrobneje. Za analitično določitev vpliva RV-ja na napetost izberimo enostavno omrežje, prikazano na sliki 9.5.



Slika 9.4: Napetostni profil v dveh skrajnih primerih – nizka poraba in visoka proizvodnja RV-jev ter visoka poraba brez RV-jev



Slika 9.5: Preprosto distribucijsko omrežje

Na priključnem mestu vira velja:

$$\underline{U}_R \cdot \underline{I}^* = P + jQ, \quad (9.5)$$

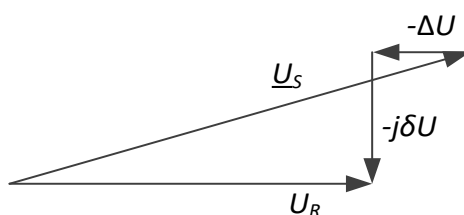
kjer je  $\underline{U}_R$  kazalec napetosti na priključnem mestu vira,  $\underline{I}$  kazalec toka,  $P$  in  $Q$  pa sta pretok delovne in jalove moči po vodu. Z uporabo Kirchoffovega zakona je kazalec napetosti v transformatorski postaji  $\underline{U}_S$  enak:

$$\underline{U}_S = \underline{U}_R + (R + jX) \cdot \underline{I}. \quad (9.6)$$

Z upoštevanjem  $\underline{U}_R$  kot referenčne napetosti  $\underline{U}_R = U_R \angle 0^\circ$  lahko zapišemo  $\underline{U}_R$  kot:

$$\underline{U}_R = \underline{U}_S - \frac{RP + XQ}{U_R} - j \frac{XP - RQ}{U_R} = \underline{U}_S - \Delta U - j\delta U. \quad (9.7)$$

Na sliki 9.6 je prikazan kazalčni diagram napetosti, kot ga opisuje zgornja enačba.



Slika 9.6: Kazalčni diagram napetosti

Kot lahko razberemo, je razlika amplitud napetosti  $U_S$  in  $U_R$  predvsem posledica člena  $\Delta U$  v enačbi (9.7). Razlika v faznem kotu med  $U_S$  in  $U_R$  je v glavnem posledica imaginarnega dela  $\delta U$ . Amplituda napetosti na priključnem mestu vira je približno enaka:

$$\underline{U}_R \approx \underline{U}_S - \frac{RP + XQ}{U_R}, \quad (9.8)$$

kjer je  $P = P_B - P_{RV}$  in  $Q = \pm Q_{RV} + Q_B$ . Ob predpostavki skrajnega primera  $P_B = 0$  in  $Q_B = 0$  in obratovanju RV-ja s faktorjem moči ena ( $Q_{RV} = 0$ ), je napetost v točki priključitve vira enaka:

$$\underline{U}_R \approx \underline{U}_S + \frac{R \cdot P_{RV}}{U_R}. \quad (9.9)$$

Napetost na priključnem mestu vira je glede na enačbo (9.9) lahko višja od napetosti v transformatorski postaji in je v neposredni povezavi s proizvedeno močjo razpršenega vira. V primeru velikega deleža RV-jev lahko pride do težav pri ohranjanju napetosti znotraj predpisanih meja. Pri veliki porabi in izklopljenih RV-jih so napetosti nizke, v primeru nizke porabe in visoke proizvodnje energije z RV-ji pa vrednosti napetosti lahko prekoračijo najvišje dovoljene meje. Kljub temu je mogoče spremembo napetosti zaradi proizvodnje delovne moči ublažiti, če proizvodni vir istočasno absorbira določen del jalove moči. To pride posebej do izraza v omrežjih z relativno nizkim  $R/X$  razmerjem, npr. v primeru nadzemnih vodov, ki izkazujejo višjo induktivnost od kabelskih vodov. Splošni ukrepi za odpravljanje težav z napetostnim profilom so:

- ojačitev omrežja,
- omejevanje največje skupne moči razpršenih virov na določenem vodu,
- vgradnja SN/NN transformatorja z možnostjo spreminjanja odceпов pod obremenitvijo,
- napredna regulacija odceпов transformatorja na podlagi meritev napetosti na več mestih omrežja,
- sodelovanje RV-jev pri regulaciji napetosti ...

### 9.3.2 Ravnesje med proizvodnjo in porabo

Razpršeni viri so predvsem proizvodne enote, ki temeljijo na obnovljivih virih energije, za katere je značilna visoka spremenljivost proizvodnje. V omrežjih z velikim deležem takih virov zato nastopajo obratovne težave zaradi velikih nihanj v proizvodnji. Nestalnost proizvodnje zahteva tudi dodatne rezerve, ki omogočajo

ohranjanje ravnovesja med proizvodnjo in porabo tudi v primeru večjih sprememb moči RV. Pri učinkovitem vodenju sistema zato igra pomembno vlogo napovedovanje prihodnjega stanja omrežja, ki obsega napoved proizvodnje in porabe ter izračun pretokov moči v omrežju.

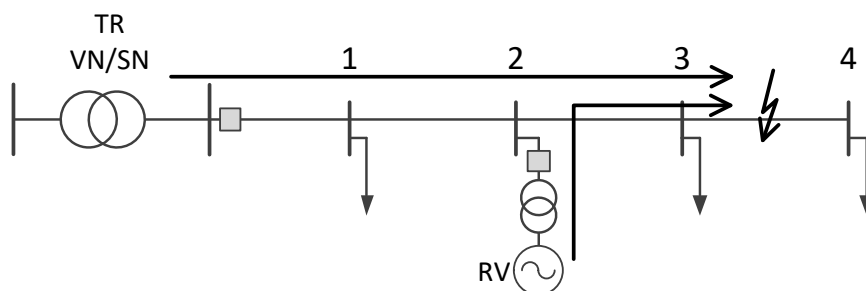
### 9.3.3 Delovanje zaščite

Pojav dodatnih virov na SN in NN nivoju ima vrsto vplivov na zaščitne sisteme in lahko povzroča težave pri delovanju zaščitnih naprav ter zagotavljanju selektivnosti.

#### 9.3.3.1 Povečanje kratkostičnih tokov in težave s selektivnostjo

K povečanju kratkostičnih tokov prispevajo sinhronski in asinhronski generatorji. RV-ji, priključeni preko napetostnih pretvornikov, ne vplivajo bistveno na kratkostični tok, saj pretvorniki ob kratkem stiku v omrežju učinkovito omejujejo izhodni tok.

Razpršeni viri lahko v odvisnosti od konfiguracije omrežja in mesta okvare povzročijo nedelovanje ali pa nepotrebno delovanje zaščite. Nepotrebno delovanje zaščite nastopi v primeru relejev brez smerne zaščite, ki zaznajo kratkostični tok zaradi okvare izven njegovega območja ščitenja. Nedelovanje zaščite RV-ji povzročijo v primeru, ko k celotnemu kratkostičnemu toku okvare prispevajo tolikšen delež, da preprečijo delovanje relejev na odcepih. Primer je prikazan na sliki 9.7. Kratkostični tok iz razpršenega vira zmanjša kratkostični tok s strani VN/SN transformatorja, zaradi česar zaščitni rele ne reagira. To bi se zgodilo predvsem pri velikih močeh RV-ja in visokih impedancah povezav do mesta kratkega stika. Pri vključevanju RV-jev je potrebno določiti nivo njihove skupne moči v določenem območju, ki povzroči tolikšne spremembe v kratkostičnih tokovih, da je potrebno prilagoditi nastavitve zaščite.



Slika 9.7: Primer zatajitve zaščitnega releja zaradi napajanja mesta okvare s strani razpršenega vira in posledičnega zmanjšanja kratkostičnega toka energetskega transformatorja

#### 9.3.3.2 Avtomatski ponovni vklop

Pri avtomatskem ponovnem vklopu lahko pride do visokih vklopnih tokov v primeru, da se razpršeni vir ob okvari v omrežju ni odklopil. V tem primeru lahko pride do velike fazne razlike med napetostima na obeh straneh odklopnika – napetostjo na strani omrežja in napetostjo na strani RV-ja. Potrebno je zagotoviti izklop vira v zadostnem času (preden se sproži avtomatski ponovni vklop), da ne pride do priklopa na del napajane omrežja. Pogosto se sicer uporabi bolj pragmatična rešitev, da se avtomatski ponovni vklop na izvodih z RV-ji ne izvaja.

#### 9.3.3.3 Neželjeno otočno obratovanje

Kratki stiki na visokonapetostnem omrežju lahko povzročijo odklop distribucijskega omrežja, ki pa zaradi napajanja s strani RV-ja nadaljuje obratovanje v otočnem režimu. Zaradi varnostnih in stabilnostnih težav tako obratovanje ni zaželeno. Vzdrževalci sistema na primer ne pričakujejo elementov pod napetostjo. Problematično je tudi vzdrževanje ravnovesja med proizvodnjo in porabo.

Zaradi tega je potrebno zagotoviti zaščito pred otočnim obratovanjem. Metode za zaznavo otočnega obratovanja temeljijo na različnih principih, od meritve sprememb električnih veličin do uporabe komunikacije med zaščitnimi releji in stikalnimi napravami.

## 9.4 Sodobni koncepti vodenja omrežij

Velik delež RV-jev in visoki stroški nadgradnje primarne energetske infrastrukture omrežja (ojačenje omrežja) botrujejo razvoju sodobnih konceptov vodenja omrežja, ki preko povečanja fleksibilnosti delovanja omrežja omogočajo čim boljše izrabo obstoječe infrastrukture. Taki koncepti vodenja omrežja so na primer:

- napredni koncepti regulacije napetosti,
- upravljanje s porabo in
- koncept virtualne elektrarne.

Navedene možnosti bodo nekoliko podrobneje opisane v nadaljevanju.

### 9.4.1 Napredna regulacija napetosti

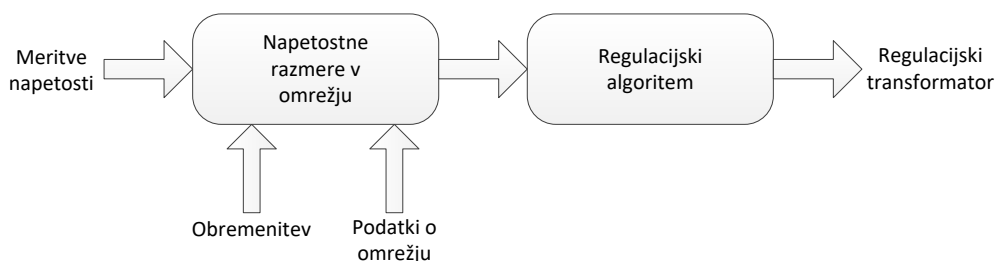
V nasprotju s klasično regulacijo napetosti v distribucijskih omrežjih se lahko poleg regulacijskega transformatorja v RTP-ju za regulacijo uporabljala še druge naprave, predvsem razpršene vire, hranilnike energije, bremena in dodatne regulacijske transformatorje. Sodelovanje velikega števila naprav pri regulaciji zahteva kompleksno koordinacijo in nadzor nad temi napravami.

Najvišjo prioriteto pri regulaciji napetosti imajo navadno klasične naprave – regulacijski transformatorji v RTP-ju. Če te naprave ne zagotovijo nivojev napetosti znotraj dovoljenih mej, se vključi sodelovanje naprav, ki so najbližje kritičnemu vozlišču, najprej z regulacijo jalove moči, nato pa s spreminjanjem proizvodnje delovne moči razpršenih virov. Naslednji hierarhični sklop predstavljajo bremena, ki tudi omogočajo določeno mero prilagajanja z minimalnim vplivom na proizvodni proces (industrija) ali udobje uporabnika (gospodinjstva). Napredna regulacija napetosti mora omogočati večanje deleža RV-jev brez večjih vlaganj v primarno energetske infrastrukturo, obenem pa lahko zagotavlja tudi optimizacijo izgub v omrežju in koordinacijo regulacije napetosti med distribucijskim in prenosnim omrežjem.

V nadaljevanju bosta opisana koncepta centralne in koordinirane regulacije napetosti.

#### 9.4.1.1 Centralna regulacija napetosti

Učinkovitost klasične regulacije napetosti z regulacijskim transformatorjem je v distribucijskih omrežjih z razpršeno proizvodnjo omejena. Ker ima razpršena proizvodnja največji vpliv na omrežno napetost predvsem v bližini vira, je nujno potrebna informacija o napetosti v kritičnih točkah v omrežju, kjer RV-ji povzročajo največ napetostnih težav. Napreden centralni nadzor napetosti vključuje regulacijo napetosti z regulacijskim transformatorjem v RTP-ju na podlagi meritev napetosti v več točkah omrežja. Regulacijski transformator v tem primeru regulira napetost v celotnem omrežju in pri tem upošteva tako najvišje kot najnižje vrednosti napetosti v omrežju. Koncept centraliziranega nadzora napetosti je podan na spodnji sliki 9.8.



Slika 9.8: Centralni nadzor napetosti v razdelilnem omrežju z razpršeno proizvodnjo

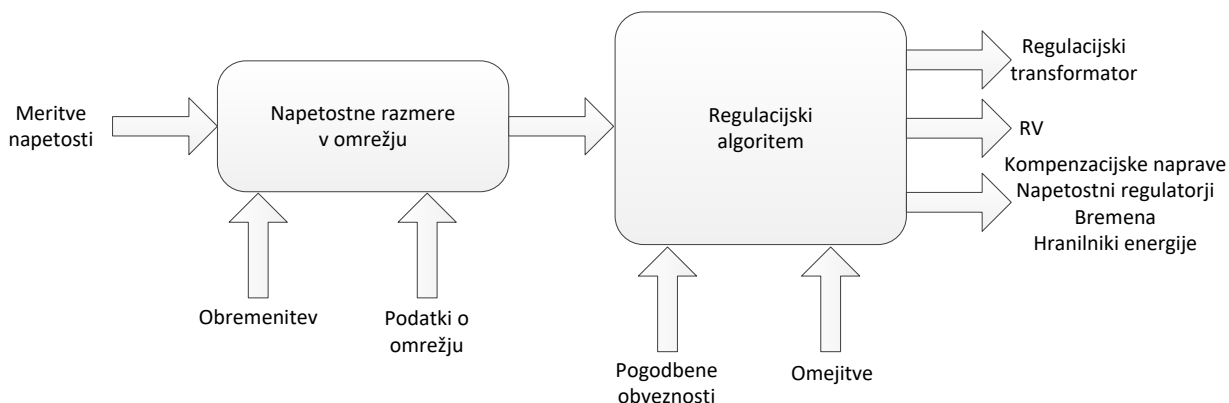
Vhod v regulacijski algoritem so napetosti v omrežju. Algoritem upošteva maksimalne in minimalne vrednosti vhodnih napetosti in jih primerja z vnaprej določenimi napetostnimi mejami, ki jih določi operater omrežja kot mejne vrednosti. V kolikor je ena ali druga mejna vrednost presežena za določen čas (s tem dosežemo, da se regulator ne odziva na kratkotrajne napetostne spremembe), algoritem preveri, ali je možno izvesti preklon odcepa regulacijskega transformatorja, ne da bi napetost v omrežju prekoračila mejne vrednosti. Če

je to mogoče, se izvede preklop. V nasprotnem primeru preklop ni mogoč, kar pomeni, da je razpon napetosti v omrežju (razlika med najvišjimi in najnižjimi vrednostmi) prevelik in regulacija z regulacijskim transformatorjem v eni točki omrežja ni možna.

V centralnem sistemu nadzora napetosti so zelo pomembne meritve v več točkah omrežja. Posledično je zelo pomembna tudi komunikacija med merilnimi mesti oziroma kritičnimi točkami v omrežju in centralnim sistemom nadzora. Seveda je potrebno v primeru motenj na komunikacijskih linijah ali izpadu nadzornega sistema zagotoviti varno obratovanje omrežja in nemoteno delovanje regulacijskega transformatorja. Pomemben gradnik v distribucijskih omrežjih zato postaja algoritem za oceno stanja, ki omogoča izračun napetosti v vseh voziščih omrežja na osnovi omejenih in tudi netočnih ali celo napačnih merilnih podatkov.

#### 9.4.1.2 Koordiniran nadzor napetosti

Koordiniran nadzor napetosti je nadgradnja centralnega nadzora in pomeni usklajeno delovanje različnih komponent omrežja in uporabnikov na podlagi meritev napetosti v več točkah distribucijskega omrežja. Vključuje lahko vse elemente aktivnega upravljanja napetosti v omrežju: regulacijo napetosti z delovno in jalovo močjo različnih naprav (RV-jev, kompenzacijskih naprav, bremen ...), regulacijo napetosti z regulacijskimi transformatorji in tudi napetostne regulatorje. Koordiniran nadzor napetosti je voden prek centralnega nadzornega sistema, ki na podlagi podatkov o razmerah v omrežju in algoritma vodenja sprejema odločitve in pošilja ukaze različnim komponentam. Koncept koordiniranega nadzora napetosti je shematsko prikazan na sliki 9.9.



Slika 9.9: Koncept koordiniranega nadzora napetosti

#### 9.4.2 Upravljanje s porabo

Upravljanje s porabo je koncept, ki uporabniku omogoča aktivno vključevanje v vodenje omrežja. Omogoča nudenje storitev, kot so zmanjševanje konic v omrežju, prilagajanje porabe trenutnim cenam električne energije, zmanjševanje porabe, nudenje sistemske storitve operaterju omrežja ... Področje upravljanja s porabo je zelo kompleksno, z izzivi na tehnološkem, regulatornem ekonomskem in sociološkem področju.

Upravljanje s porabo lahko obsega celotno upravljanje z energijo na določenem območju in optimizacijo rabe energije (ang. Demand Side Management – DSM). Ožji pojem od upravljanja z energijo je odziv odjema (bremen) na signale zunanjih deležnikov (ang. Demand Response – DR).

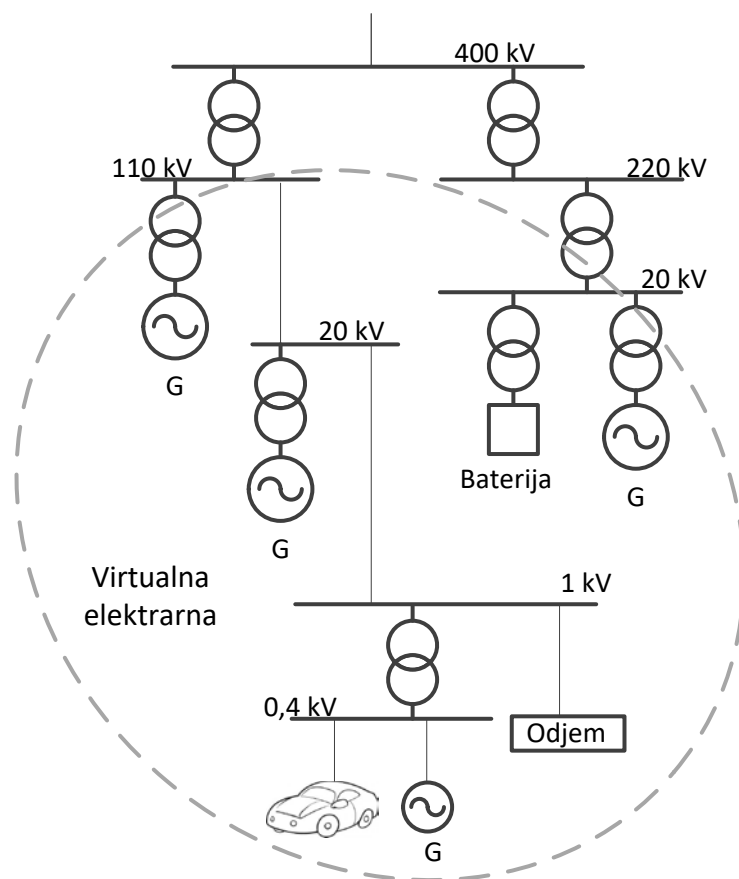
Odziv odjema (DR) vključuje predvsem kratkoročno upravljanje s porabo pri odjemalcih. Usmerjen je v spodbujanje odjemalcev k zmanjšanju porabe v času kritičnega stanja elektroenergetskega omrežja (konice, odstopanja frekvence ...) ali v času visokih cen električne energije. DR je torej mehanizem, ki spodbuja odjemalce električne energije, da časovno spremenijo svoj diagram odjema. Tak mehanizem lahko odločilno pripomore k zanesljivosti oskrbe z električno energijo in do določene mere predstavlja protiutež časovno nestalni proizvodnji energije iz obnovljivih virov.

Upravljanje s porabo je pomembno za vse akterje elektroenergetskega trga:

- Odjemalci imajo koristi zaradi plačila za nudenje storitve ali zaradi nižje cene ob rabi energije v času ugodnejših tarif.
- Dobaviteljem in odgovornim v bilančni skupini je ta storitev lahko v pomoč pri upravljanju s tveganji in zmanjšanju stroškov zaradi odstopanj.
- Operaterji distribucijskih omrežij dobijo orodje, ki pomaga zmanjšati ozka grla ob koničnih obremenitvah in omogoča lažje upravljanje z razpršeno proizvodnjo.
- Operater prenosnega omrežja lahko upravljanje s porabo vključi v sistemske storitve, kot sta na primer sekundarna in terciarna regulacija frekvence.

### 9.4.3 Koncept virtualne elektrarne

Virtualna elektrarna je sistem, ki združuje večje število razpršenih virov električne energije in tudi porabnikov, ki s svojo ponudbo deluje enotno, kot en udeleženec trga z električno energijo. Virtualno elektrarno sestavlja napreden računalniški sistem, ki dobavitelju električne energije omogoča učinkovito upravljanje z velikim številom razpršenih virov, s hranilniki energije in s prilagodljivim odjemom na različnih geografskih področjih in z različnimi napetostnimi nivoji (slika 9.10). Lahko vključuje tudi odjemalce z možnostjo upravljanja porabe, ki imajo možnost razbremenjevanja sistema in izravnavanja konic. Vsi člani virtualne elektrarne so vodeni iz skupnega nadzornega centra.



Slika 9.10: Koncept virtualne elektrarne

Pogoj za obstoj virtualne elektrarne je komunikacijska infrastruktura, ki omogoča merjenje, zajem podatkov in vodenje vsake enote razpršenega vira ali prilagodljivega odjemalca. Na ta način lahko vse enote nastopajo kot vodena celota v elektroenergetskem sistemu, tako kot običajne elektrarne. Dejansko je virtualna elektrarna informacijsko-tehnološka platforma, ki združuje razpršene vire, jih oblikuje v enoten profil in ga ponudi trgu z električno energijo in trgu s sistemskimi storitvami. Virtualno elektrarno lahko uporabljamo za zelo različne namene: od nujenja sistemskih storitev do izravnave odstopanj v bilančni skupini.



---

V splošnem poznamo tehnično in komercialno vrsto virtualne elektrarne. Tehnična virtualna elektrarna se osredotoča na sistemske storitve in lahko združuje razpršene vire z manjšega ali večjega geografskega področja. Komercialna virtualna elektrarna pa upravlja s svojim portfeljem razpršenih virov s ciljem čim večjega dobička na trgu z električno energijo.

## 9.5 Pomen IKT tehnologij v pametnih omrežjih

Temelj pametnih omrežij je razvito komunikacijsko omrežje, ki doseže vsak posamezen element: razpršene vire, odjemalce z upravljanjem porabe, hranilnike energije, odjemna mesta in priključne točke s prenosnim omrežjem. Povezava omogoča avtomatizacijo, vodenje in upravljanje celotnega omrežja.

### 9.5.1 Komunikacijska infrastruktura v distribucijskih omrežjih

V distribucijskih omrežjih so komunikacijsko dobro opremljene navadno razdelilne transformatorske postaje (RTP-ji), kjer so informacijsko med seboj povezani merilniki (napetosti, tokovi), zaščitni releji, stikalna oprema in transformatorji. V RTP-jih se izvajajo obratovalne meritve, ki obsegajo na primer:

- meritve napetosti na VN in SN zbiralkah v RTP-jih,
- meritve tokov na SN izvodih v RTP-jih,
- meritve, ki jih omogočajo zaščitni releji, in
- podatke o stikalnih stanjih stikalnih elementov.

Proti transformatorskim postajam (TP-jem) in v NN omrežju je IKT infrastruktura slabša. Tudi meritve električnih veličin se v NN omrežjih redkeje izvajajo. Izjema so števeci porabe električne energije, ki v vedno večjem deležu omogočajo avtomatsko odčitavanje porabe.

Podjetja za distribucijo električne energije že dalj časa izvajajo obsežen nadzor nad kakovostjo oskrbe z električno energijo v njihovih omrežjih. Sistem meritev je v distribucijskih podjetjih v Sloveniji, vsaj v dobršni meri, poenoten. Meritve električnih veličin v omrežju se izvajajo na različne načine:

- Permanentni monitoring, kje je z merilnimi inštrumenti pokrita večina RTP-jev na VN in SN nivoju. Zajemajo se vsi parametri kakovosti električne energije, kot jih predpisuje standard SIST EN 50160. Manjše število meritev se izvaja tudi v TP-jih na nizki napetosti (indikativni nivo).
- Občasni monitoring kakovosti napetosti, ki se izvaja po vnaprej pripravljenem programu.
- Izredni monitoring kakovosti napetosti na zahtevo uporabnikov (pritožbe).

### 9.5.2 Informacijsko-komunikacijski sistem za pametna omrežja

Obstoječi informacijsko-komunikacijski sistemi v današnjih elektroenergetskih sistemih povezujejo elemente na visokonapetostnem in sredjenapetostnem nivoju. Nizkonapetostno omrežje pa je z IKT infrastrukturo navadno slabše pokrito. Izjema so t. i. pametni števeci, ki v veliki večini primerov omogočajo samo daljinsko odčitavanje porabe odjemalcev z omejeno časovno resolucijo.

V konceptu pametnih omrežij so zahteve glede IKT infrastrukture naslednje:

- dvosmerna komunikacija med elementi omrežja in nadzornim centrom,
- zadostna hitrost in kakovost komunikacije za izmenjavo podatkov,
- zanesljivost komunikacijskih povezav,
- varnost sistema in varovanje zasebnosti.

Pametno omrežje je skupek različnih sistemov in kombinacija več različnih tehnologiji in nivojev, zato morajo biti vmesniki med posameznimi segmenti primerno definirani in usklajeni z obstoječimi standardi. Za vsak omenjen odsek aktivnega omrežja obstaja veliko število standardiziranih kot tudi lastniških omrežnih tehnologij. Končni cilj je zgraditi »informacijsko avtocesto«, kjer bodo vsa omrežja in segmenti lahko medsebojno komunicirali, ne glede na tehnologije, uporabljene na nižjih plasteh.

Različne aplikacije aktivnih omrežji imajo različne zahteve glede kakovosti storitev (angl. Quality of Service – QoS) komunikacijskega omrežja. Čeprav ne obstaja komunikacijska tehnologija, ki bi bila najustreznejša za vse aplikacije aktivnih omrežij, je na ravni omrežne plasti ključna uporaba IP protokola. TCP/IP tehnologije ponujajo želeno raven zanesljivosti, redundance in razpoložljivosti. TCP/IP predstavlja tudi robustno tehnologijo z velikim številom zrelih varnostnih in upravljaljskih aplikacij.



## 10 Mehanski parametri vodov

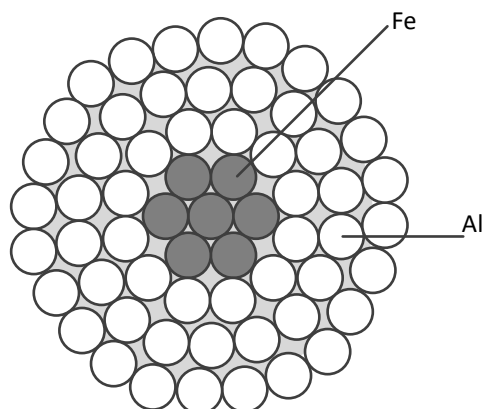
V tem poglavju si bomo ogledali osnovne mehanske lastnosti nadzemnih vodov, potrebne predvsem za ustrezno načrtovanje višine stebrov in nameščanje daljnovodnih vrvi [1], [12]. Glavna kriterija, ki ju moramo pri tem upoštevati, sta zadostna varnostna višina vrvi in natezna napetost, ki ne presega dopustne vrednosti.

### 10.1 Mehanske lastnosti snovi

Daljnovod sestavljajo vodniki in podporni stebri. Pri projektiranju daljnovodov moramo poznati osnovne mehanske in električne parametre vodnikov. Osnovni podatki vodnika so:

- specifična teža vodnika  $\gamma$  ( $\text{N}/\text{mm}^3$ ), ( $\text{N}/\text{m}\cdot\text{mm}^2$ ),
- specifična masa vodnika  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),
- temperaturni raztezni koeficient  $\alpha$  ( $1/\text{K}$ ),
- modul elastičnosti  $E$  ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) in
- natezna napetost  $\sigma$  ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ).

Vodniki so zgrajeni iz železovih in aluminijevih zlitin. Prerez vodnika je prikazan na sliki 10.1.



Slika 10.1: Prerez vrvi Al/Fe 490/65  $\text{mm}^2$ , 7 Fe žic in 54 Al žic premera 3,4 mm

Specifična teža, modul elastičnosti in temperaturni koeficient za različna razmerja presekov aluminija in železa so podani v tabeli 10.1.

Tabela 10.1: Podatki za različna razmerja presekov

Razmerje preseka Al/Je	Specifična teža $\gamma$ ( $\text{N}/\text{m}\cdot\text{mm}^2$ )	Modul elastičnosti $E$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	Temp. koeficient $\alpha$ ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )
4,4	0,0364	80000	18,7
6,0	0,0350	77000	18,8
7,7	0,0336	70000	19,4

#### 10.1.1 Raztezanje daljnovodne vrvi

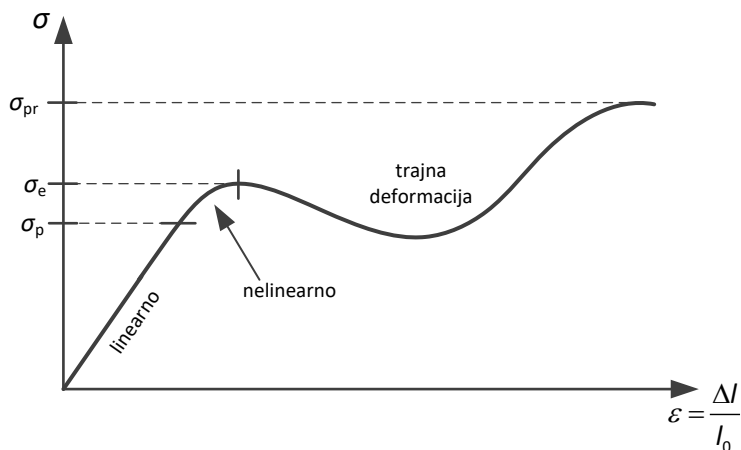
Hookov zakon podaja relativni raztezek ali skrček prožnega telesa pri deformaciji (raztezanju, stiskanju) z dano silo, kar lahko zapišemo kot:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \frac{F}{A_0}, \quad (10.1)$$

pri čemer je  $l$  dolžina neobremenjenega telesa,  $\Delta l$  raztezek ali skrčec v smeri delovanja zunanje sile  $F$ ,  $A_0$  (začetni) presek telesa in  $E$  modul elastičnosti. Relativni raztezek lahko torej zapišemo kot razmerje natezne napetosti in modula elastičnosti:

$$\varepsilon_\sigma = \left. \frac{\Delta l}{l_0} \right|_\sigma = \frac{\sigma}{E}. \quad (10.2)$$

Povezavo med natezno napetostjo  $\sigma$  in relativnim raztezkom  $\varepsilon$  nam podaja naslednja slika:



Slika 10.2: Odvisnost relativnega razteзка od natezne napetosti

Oznake na sliki 10.2 pomenijo:

- $\sigma_p$  je meja proporcionalnosti (ko je povezava med  $\sigma$  in  $\varepsilon$  proporcionalna in določena z modulom elastičnosti  $E$ ). To območje poimenujemo območje elastičnosti.
- Od  $\sigma_p$  do  $\sigma_e$  je snov še v območju elastičnosti, vendar raztezki niso več proporcionalni  $\varepsilon$ . Po tej vrednosti nastopijo trajne deformacije materiala.
- $\sigma_{pr}$  je maksimalna natezna napetost. Če jo prekoračimo, pride do pretrganja materiala. Maksimalna natezna napetost se s časom zmanjšuje, in sicer v odvisnosti od temperature vodnika in trajanja temperaturne obremenitve.

Vrv se razteza tudi zaradi spremembe temperature. Relativni raztezek zaradi temperature lahko zapišemo kot:

$$\varepsilon_g = \left. \frac{\Delta l}{l} \right|_g = \alpha \cdot \Delta \vartheta, \quad (10.3)$$

kjer je  $\alpha$  temperaturni koeficient.

### 10.1.2 Parametri daljnovidne vrvi

Ker so vodniki navadno iz dveh kovin, je potrebno parametre voda določiti iz parametrov obeh materialov, pri čemer predpostavimo, da je sila lepenja med materialoma dovolj velika, da ne prihaja do medsebojnih premikov plasti.

Kombinirano vrv obravnavamo kot homogeno vrv s skupnim prerezom  $A$  in skupno specifično težo  $\gamma$ , kar lahko zapišemo kot:

$$\gamma(A_{Al} + A_{Fe}) = \gamma_{Al}A_{Al} + \gamma_{Fe}A_{Fe}, \quad (10.4)$$

pri čemer oznaka Al označuje aluminij in oznaka Fe jeklo.

Prerezno razmerje lahko podamo z:

$$\eta = \frac{A_{Al}}{A_{Fe}}. \quad (10.5)$$

Iz enačbe (10.4) in ob upoštevanju prereznega razmerja lahko specifično težo kombinirane vrvi zapišemo kot:

$$\gamma = \frac{\gamma_{Fe} + \gamma_{Al}\eta}{1 + \eta} \left( \frac{N}{m \times mm^2} \right). \quad (10.6)$$

Za natezne sile v vrvi zapišemo enačbo:

$$\sigma_{Al}A_{Al} + \sigma_{Fe}A_{Fe} = \sigma(A_{Al} + A_{Fe}), \quad (10.7)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_{Al}A_{Al} + \sigma_{Fe}A_{Fe}}{A_{Al} + A_{Fe}} = \frac{\eta\sigma_{Al} + \sigma_{Fe}}{1 + \eta}. \quad (10.8)$$

Ob predpostavki, da ni medsebojnih premikov, lahko zapišemo relativne raztezke:

$$\frac{\sigma_{Al}}{E_{Al}} = \frac{\sigma_{Fe}}{E_{Fe}} = \frac{\sigma}{E}, \quad (10.9)$$

kjer sta  $\sigma$  in  $E$  natezna napetost in modul elastičnosti celotne vrvi.

Ob upoštevanju izrazov (10.8) in (10.9) dobimo še enačbo za modul elastičnosti:

$$E = \frac{E_{Fe} + E_{Al} \cdot \eta}{1 + \eta} \left( \frac{N}{mm^2} \right). \quad (10.10)$$

Določimo še temperaturni koeficient  $\alpha$  za celotno vrv. Upoštevamo, da se celotna vrv razteza. Ker imata Al in Fe različna temperaturna koeficienta, med obema plastema nastopi sila. Če med obema materialoma ni premikov, sta sili enaki:

$$F_{Al} + F_{Fe} = 0. \quad (10.11)$$

Kot posledica različnih temperaturnih koeficientov in temperature ( $\vartheta$ ), se v Fe in Al plašču pojavi natezna napetost:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{Al}}{E_{Al}} &= (\alpha_{Al} - \alpha)(\vartheta - \vartheta_{15}), \\ \frac{\sigma_{Fe}}{E_{Fe}} &= (\alpha_{Fe} - \alpha)(\vartheta - \vartheta_{15}). \end{aligned} \quad (10.12)$$

Upoštevajoč, da je:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{F}{A \cdot E}, \quad (10.13)$$

določimo temperaturni koeficient  $\alpha$  za celotno vrv:

$$\begin{aligned} (\alpha_{Al} - \alpha)(\vartheta - \vartheta_{15})E_{Al}A_{Al} + (\alpha_{Fe} - \alpha)(\vartheta - \vartheta_{15})E_{Fe}A_{Fe} &= 0 \\ \alpha = \frac{\alpha_{Fe}E_{Fe} + \alpha_{Al}E_{Al}\eta}{E(1 + \eta)} \quad \left( \frac{1}{K} \right) \end{aligned} \quad (10.14)$$

Pri izračunu natezne napetosti  $\sigma$  kombinirane vrvi (10.8) smo predpostavili, da je temperatura ( $\vartheta$ ) enaka nevtralni temperaturi 15 °C, ko med jedrom in plaščem ne nastopajo natezne napetosti. Pri drugih temperaturah je potrebno upoštevati še temperaturni raztezek. Ker smo predpostavili, da med aluminijem in jeklom ni premikov, velja enakost elastičnih in temperaturnih raztezkov celotne vrvi in aluminijskega plašča, kar opisuje naslednja enačba:

$$\alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_{15}) + \frac{\sigma}{E} = \alpha_{Al} \cdot (\vartheta - \vartheta_{15}) + \frac{\sigma_{Al}}{E_{Al}}, \quad (10.15)$$

pri čemer je  $\vartheta_{15}$  nevtralna temperatura 15 °C.

Enačbo (10.15) lahko nekoliko preoblikujemo in dobimo odvisnost natezne napetosti celotne vrvi od natezne napetosti aluminija in temperature aluminijskega plašča, kar podaja naslednja enačba:

$$\sigma = (\alpha_{Al} - \alpha)(\vartheta - \vartheta_{15})E + \frac{E}{E_{Al}}\sigma_{Al}, \quad (10.16)$$

$$\sigma_{dop} = (\alpha_{Al} - \alpha)(\vartheta - \vartheta_{15})E + \frac{E}{E_{Al}}\sigma_{Al\_dop}, \quad (10.17)$$

$$\sigma_{Al\_dop} = 60 \text{ N/mm}^2.$$

Natezna napetost ima smer tangente na vodnik (pravokotno smer na prerez) in se vzdolž vodnika spreminja. Odvisna je od teže vrvi, sile napenjanja in dodatnih vplivov (temperature, vetra, vibracij in dodatnega zimskega bremena).

Po naših predpisih je lahko tangencialna natezna napetost  $\sigma$  v obesišču pri temperaturi  $-5^\circ \text{C}$  z izjemnim dodatnim bremenom enaka trem četrtinam pretržne napetosti  $\sigma_{pr}$ . Horizontalna komponenta natezne napetosti pri  $-20^\circ \text{C}$  brez dodatnega bremena in pri  $-5^\circ \text{C}$  z dodatnim bremenom je lahko za vrvi do  $0,45 \sigma_{pr}$ .

Dopustne natezne napetosti za posamezno kovino so podane v tabeli 10.2.

Tabela 10.2: Dopustne natezne napetosti

Dopustne natezne napetosti	$\sigma_{dop} (\text{N/mm}^2)$
Al	60
Cu	180
Jeklo II	280
Jeklo III	450
AlMg1	90

Ker  $\sigma_{dop}$  ne sme biti prekoračen, so pri določenih objektih uporabljeni še varnostni faktorji, ki zmanjšajo  $\sigma_{dop}$ . Nekateri varnostni faktorji so podani v tabeli 10.3.

Tabela 10.3: Varnostni faktorji

Varnostni faktor	$\sigma_{dop} = f_v \cdot \sigma_{dop}^1$
križanje cest 1. - 4. reda	1
avtoceste	0,75
plovne reke, kanali	0,75
železnice	0,85
gosto naseljeni kraji	0,75
ostali	1

V tabeli 10.4 so zbrani še splošni podatki za aluminij in železo.

Tabela 10.4: Splošni podatki za aluminij ter železo

Splošni podatki	Al	Fe
Temperaturni koeficient $\alpha$ ( $10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )	23	11
Modul elastičnosti $E$ ( $\text{N} / \text{mm}^2$ )	56000	180000
Dopustna natezna napetost $\sigma_{dop}$ ( $\text{N} / \text{mm}^2$ )	60	280–450
Specifična teža $\gamma$ ( $\text{N} / \text{m} \cdot \text{mm}^2$ )	0,027	0,078

### 10.1.3 Dodatno zimsko breme

Kot dodatno zimsko breme smatramo sneg ali led, ki se nabira na daljnovodni vrvi. Upoštevamo dodatno obremenitev na meter vodnika, in sicer največjo obtežbo, ki se na določenem mestu pojavlja vsakih 5 let, vendar ne manj kot:

$$\Delta g_{\min} = 0,18 \cdot \sqrt{d} \left( \frac{\text{daN}}{\text{m}} \right), \quad (10.18)$$

$$\Delta g_{\min} = 1,8 \cdot \sqrt{d} \left( \frac{\text{N}}{\text{m}} \right),$$

pri čemer je  $d$  premer vrvi.

Če upoštevamo polnilni faktor, je  $d$  enak:

$$d \doteq 1,3 \cdot \sqrt{A} = 1,3 \cdot \sqrt{A_{\text{Al}} + A_{\text{Fe}}} \quad (\text{mm}). \quad (10.19)$$

Povečanje specifične teže vrvi je:

$$\Delta \gamma_{\min} \doteq \frac{0,18 \cdot \sqrt{d}}{A} = \frac{0,2}{A^{3/4}} \left( \frac{\text{daN}}{\text{m} \cdot \text{mm}^2} \right). \quad (10.20)$$

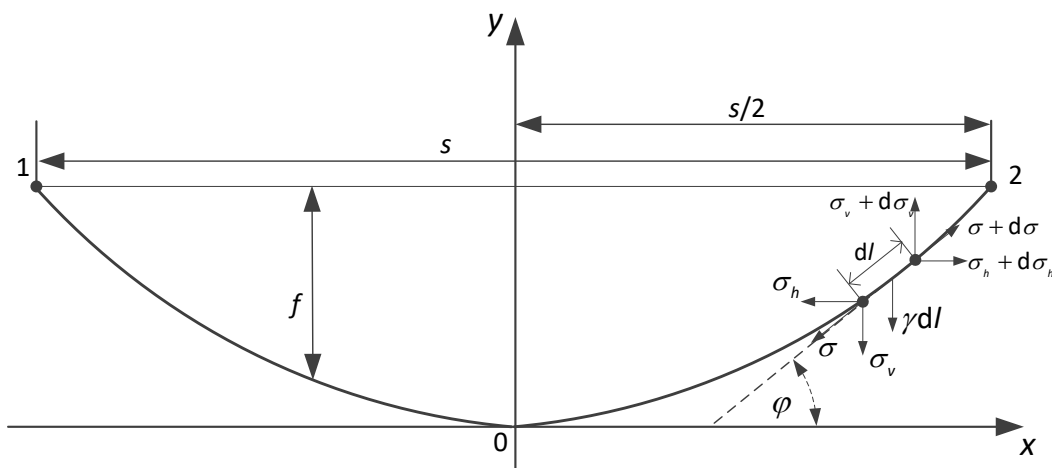
Tanjše vrvi so bolj občutljive od debelih.

## 10.2 Povesna verižnica

Vodniki se zaradi lastne teže in vplivov iz okolja povešajo. Pri obravnavi vodnikov predpostavljamo, da se vodniki idealno upogibajo kot verige. Razpetina je pri tem definirana kot horizontalna razdalja med dvema obesiščema, poves pa kot navpična razdalja med vodnikom in daljico, ki povezuje obe obesišči.

Obliko vodnika opišemo z enačbo verižnice, kar prikazuje slika 10.3. Vodnik je vpet med obesiščema 1 in 2. Za obravnavo pogledimo delček na vodniku, ki ima dolžino  $dl$  in težo  $\gamma dl$ . Vertikalna sila  $\gamma dl$  in tangencialni sili na obeh koncih izrezanega delčka  $\sigma$  in  $\sigma + d\sigma$  morajo biti v ravnotežju.





Slika 10.3: Verižnica in ravnovesje sil na delu vrvi z dolžino  $dl$

Če zapišemo ravnotežna pogoja za horizontalno in vertikalno komponento, dobimo:

$$\begin{aligned} \sigma_h - (\sigma_h + d\sigma_h) &= 0 & d\sigma_h &= 0, \\ \sigma_v + \gamma dl - (\sigma_v + d\sigma_v) &= 0 & d\sigma_v &= \gamma dl. \end{aligned} \quad (10.21)$$

Iz enačb lahko razberemo, da je horizontalna komponenta natezne napetosti vzdolž daljnovođa konstantna.

Za delček verižnice lahko zapišemo:

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}. \quad (10.22)$$

Ob upoštevanju enačb (10.21) in (10.22) lahko zapišemo:

$$\frac{d\sigma_v}{dx} = \gamma \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}. \quad (10.23)$$

Glede na sliko 10.3 velja naslednje:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sigma_v}{\sigma_h} = \frac{dy}{dx} \quad (10.24)$$

in dalje

$$\sigma_v = \sigma_h \frac{dy}{dx}. \quad (10.25)$$

Če ta izraz odvajamo po  $x$  in upoštevamo enačbo (10.23), dobimo diferencialno enačbo drugega reda:

$$\sigma_h \frac{d^2y}{dx^2} = \gamma \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}. \quad (10.26)$$

Rešitev diferencialne enačbe je:

$$y = a \cdot \operatorname{ch} \frac{x}{a} - a, \quad (10.27)$$

pri čemer je parameter  $a$

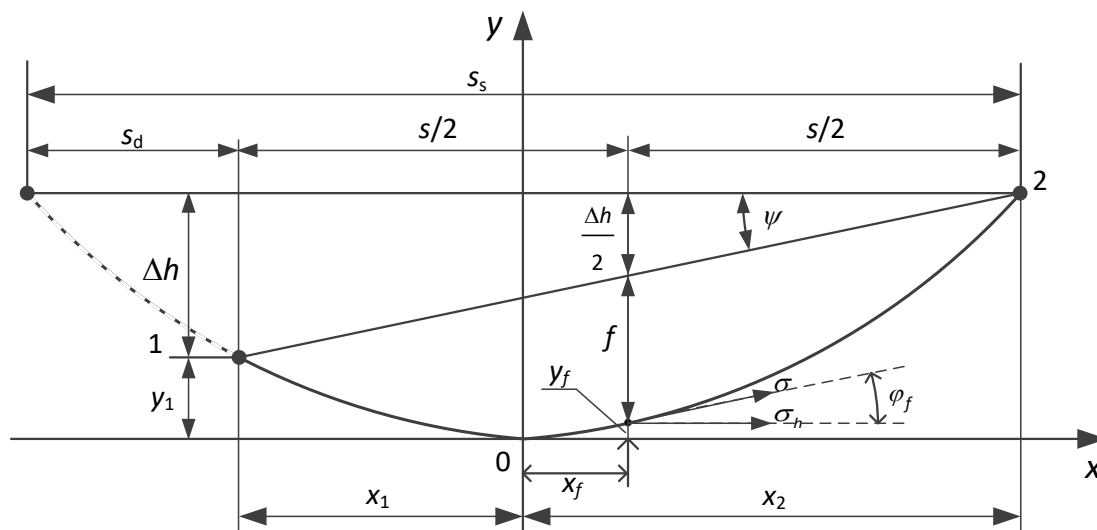
$$a = \frac{\sigma_h}{\gamma}. \quad (10.28)$$

Enačba verižnice podaja povos vodnika, definiran kot navpična razdalja v razpetini, in sicer med vodnikom in daljico, ki povezuje obesišči. Povos je odvisen samo od horizontalne komponente natezne napetosti in od specifične teže vrvi. Največji povos nastopi na polovici razpetine, kar lahko zapišemo kot:

$$f = y\left(\frac{s}{2}\right) = a \cdot \operatorname{ch} \frac{s}{2a} - a = a \cdot \left( \operatorname{ch} \frac{s}{2a} - 1 \right). \quad (10.29)$$

Če imamo različne višine obesišč (slika 10.4), lahko zapišemo povos z naslednjo enačbo:

$$f = \frac{a}{\cos \psi} \left( \operatorname{ch} \frac{s}{2a} - 1 \right). \quad (10.30)$$



Slika 10.4: Različni višini obesišč

Pri različnih višinah obesišč imamo med obesiščema višinsko razliko  $\Delta h$ , ki jo lahko zapišemo kot:

$$\Delta h = y_2 - y_1 = a \cdot \operatorname{ch} \frac{x_2}{a} - a \cdot \operatorname{ch} \frac{x_1}{a} = 2a \cdot \operatorname{sh} \frac{x_1 + x_2}{2a} \cdot \operatorname{sh} \frac{x_2 - x_1}{2a} = 2a \cdot \operatorname{sh} \frac{s}{2a} \operatorname{sh} \frac{s_d}{2a}, \quad (10.31)$$

pri čemer smo upoštevali, da velja

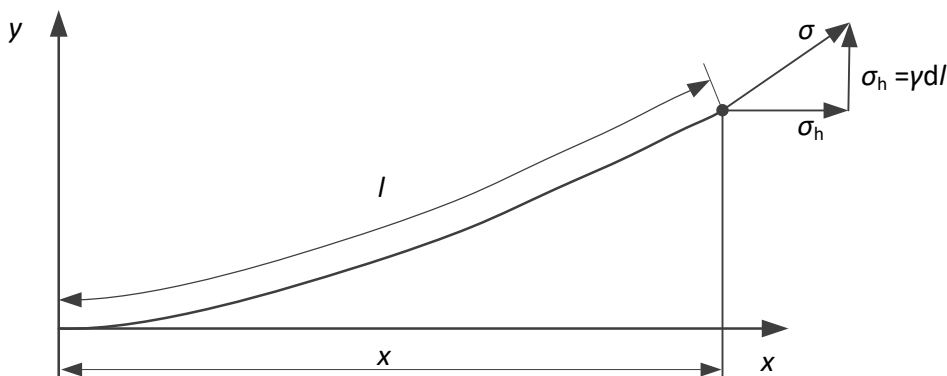
$$\begin{aligned} s &= x_1 + x_2, \\ x_2 - x_1 &= s_d \end{aligned} \quad (10.32)$$

in da je  $s_d$  fiktivni dodatek razpetine.

Skupno razpetino izrazimo kot:

$$s_s = s + s_d. \quad (10.33)$$

Pomembna je tudi dolžina verižnice (slika 10.5). To lahko določimo tako, da integriramo delček verižnice  $dl$ .



Slika 10.5: Določitev dolžine verižnice

Integral zapišemo na naslednji način:

$$l = \int_0^x dl = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx. \quad (10.34)$$

Upoštevamo odvod izraza (10.27) in relacijo med kvadratoma hiperboličnih funkcij:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \operatorname{sh} \frac{x}{a}, \\ 1 + \operatorname{sh}^2 \frac{x}{a} &= \operatorname{ch}^2 \frac{x}{a} \end{aligned} \quad (10.35)$$

in dobimo

$$l = a \cdot \operatorname{sh} \frac{x}{a}. \quad (10.36)$$

Integralske meje so od  $x=0$  (temena) do  $x$ .

Celotna razpetina je torej:

$$L_v = 2l = 2a \cdot \operatorname{sh} \frac{x}{a}. \quad (10.37)$$

### 10.2.1 Poenostavljena enačba verižnice

Hiperbolični sinus in hiperbolični kosinus lahko zapišemo v obliki vrste:

$$\begin{aligned} \operatorname{ch} x &= 1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \dots, \\ \operatorname{sh} x &= x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \dots \end{aligned} \quad (10.38)$$

Pri zapisu verižnice upoštevamo le prva dva člena vrste. Torej lahko zapišemo:

$$y = a \cdot \operatorname{ch} \frac{x}{a} - a \doteq a \left( 1 + \frac{x^2}{2a^2} \right) - a = \frac{x^2}{2a}. \quad (10.39)$$

Poves na sredini razpetine ob enakih višinah obesišč je:

$$f = \frac{\gamma s^2}{8\sigma_h}. \quad (10.40)$$

V kolikor sta obesišči neenaki, velja:

$$f = \frac{1}{\cos \psi} \frac{\gamma s^2}{8\sigma_h}. \quad (10.41)$$

Če je razpetina daljša od 400 m, moramo uporabiti tri člene vrste. Dopolnjena enačba je:

$$f = \frac{\gamma s^2}{8\sigma_h} + \frac{\gamma^3 s^4}{384\sigma_h^3}. \quad (10.42)$$

Če upoštevamo le prvi člen vrste za  $shx$ , lahko zapišemo razliko višin obesišč kot:

$$\Delta h = \frac{s_d s}{2a}. \quad (10.43)$$

Iz zadnje enačbe lahko izrazimo fiktivni dodatek razpetine:

$$s_d = 2a \frac{\Delta h}{s} = 2 \frac{\sigma_h}{\gamma} \frac{\Delta h}{s}. \quad (10.44)$$

Skupna razpetina je torej:

$$s_s = s + s_d = s + 2 \frac{\sigma_h}{\gamma} \frac{\Delta h}{s}. \quad (10.45)$$

Dolžino verižnice lahko zapišemo s pomočjo dveh členov vrste za  $shx$ :

$$L_v = 2l = 2a \cdot sh \frac{s}{2a} \doteq 2a \left( \frac{s}{2a} + \frac{s^3}{48a^3} \right) = s + \frac{s^3}{24a^2} = s + \frac{\gamma^2 s^3}{24\sigma_h^2}. \quad (10.46)$$

Če upoštevamo, da je:

$$f = \frac{\gamma s^2}{8\sigma_h}, \quad (10.47)$$

potem dobimo:

$$L_v = s + \frac{8}{3} \frac{f^2}{s}. \quad (10.48)$$

### 10.3 Klasična položajna enačba

Položajna enačba podaja vrednosti za  $\sigma$  (ali povprečje  $f$ ) v odvisnosti od temperature.

Geometrijsko dolžino verižnice izrazimo z naslednjo enačbo:

$$L_v = L_{vg} = s \left( 1 + \frac{\gamma^2 s^2}{24\sigma_h^2} \right). \quad (10.49)$$

Fizikalna dolžina verižnice pa je definirana z:

$$L_{vf} = s(1 + \xi)(1 + \alpha \vartheta) \left( 1 + \frac{\sigma_h}{E} \right). \quad (10.50)$$

Izhajamo iz začetnega položaja pri temperaturi 0 °C in natezni napetosti, ki je enaka 0. Vrv mora biti daljša za  $(1+\xi)$ -krat od razpetine  $s$ , pri čemer je  $\xi$  konstrukcijski raztezek. Če se temperatura poveča iz 0 na  $\vartheta$ , se dolžina vrvi poveča za  $(1 + \alpha \vartheta)$ -krat. Če se natezna napetost poveča iz 0 na  $\sigma_h$ , se dolžina vrvi poveča za  $(1 + \sigma_h/E)$ -krat, kar predstavlja elastični raztezek.

Veljati mora, da je geometrijska dolžina verižnice enaka fizikalni:

$$L_{vg} = L_{vf},$$

$$s \left( 1 + \frac{\gamma^2 s^2}{24\sigma_h^2} \right) = s(1 + \xi)(1 + \alpha \vartheta) \left( 1 + \frac{\sigma_h}{E} \right). \quad (10.51)$$

Zaradi majhnih vrednosti zmnožkov med členi  $\xi$ ,  $\alpha \vartheta$  in  $\sigma_h/E$  na desni strani enačbe (10.51) te zanemarimo in zapišemo položajno enačbo:

$$\frac{\gamma^2 s^2}{24\sigma_h^2} = \xi + \alpha \vartheta + \frac{\sigma_h}{E}. \quad (10.52)$$

Za odpravo konstrukcijskega raztezka iz enačbe definiramo osnovni položaj, ki je določen s temperaturo, natezno napetostjo in specifično težo ( $\vartheta_0, \sigma_{0h}, \gamma_0$ ):

$$\frac{\gamma_0^2 s^2}{24\sigma_{0h}^2} = \xi + \alpha \vartheta_0 + \frac{\sigma_{0h}}{E}. \quad (10.53)$$

Osnovni položaj je vezan na točko, kjer so najslabši pogoji glede natezne napetosti ( $\sigma$ ), torej na točko, kjer nastopi najvišja še dopustna natezna napetost. Osnovni položaj je v splošnem lahko vezan na:

- temperaturo  $-5\text{ °C}$  pri dodatnem zimskem bremenu (maksimalna natezna napetost),
- temperaturo  $-20\text{ °C}$  brez dodatnega zimskega bremena (maksimalna natezna napetost),
- srednjo letno temperaturo (vrednost natezne napetosti določimo kot odstotek pretržne natezne napetosti).

Izrazimo konstrukcijski raztezek  $\xi$  in ga vstavimo v enačbo (10.52). Klasična položajna enačba, kjer je odpravljen konstrukcijski raztezek ( $\xi$ ), je:

$$\frac{\gamma^2 s^2}{24\sigma_h^2} - \frac{\gamma_0^2 s^2}{24\sigma_{0h}^2} = \alpha(\vartheta - \vartheta_0) + \frac{\sigma_h - \sigma_{0h}}{E}. \quad (10.54)$$

Klasično položajno enačbo lahko preoblikujemo v splošno obliko:

$$\sigma_h^3 + m\sigma_h^2 = n^2, \quad (10.55)$$

pri čemer sta spremenljivki  $m$  in  $n$ :

$$m = \frac{\gamma_0^2 s^2}{24\sigma_{0h}^2} E + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)E - \sigma_{0h},$$

$$n = \gamma s \sqrt{\frac{E}{24}}. \quad (10.56)$$

Če imamo različne višine obesišč, je klasična položajna enačba sledeča:

$$\frac{\gamma^2 s^2}{24\sigma_h^2} - \frac{\gamma_0^2 s^2}{24\sigma_{0h}^2} = \alpha(\vartheta - \vartheta_0) + \frac{\sigma_h - \sigma_{0h}}{E \cos \psi}. \quad (10.57)$$

Iz teh enačb lahko določimo natezno napetost za različne temperature okolice. Iz znane  $\sigma$  lahko izračunamo še povese pri teh temperaturah ob upoštevanju enakih obesišč z naslednjim izrazom:

$$f_g = \frac{s^2 \gamma}{8\sigma_h}. \quad (10.58)$$

Vrednosti za  $\sigma$  in  $f$  se računajo za temperature med  $-20\text{ °C}$  in  $+40\text{ °C}$  in se podajajo v montažni tabeli.

## 10.4 Kritična razpetina in kritična temperatura

V nadaljevanju bosta predstavljena še dva pojma, s katerima določamo temperaturno stanje, pri katerem nastopi največja natezna napetost oziroma največji povos. Ta pojma sta kritična razpetina  $s_k$  in kritična temperatura  $\vartheta_k$ .

### 10.4.1 Kritična razpetina

Natezna napetost je odvisna od temperature. Temperaturno odvisnost lahko določimo s pomočjo položajne enačbe in je prikazana na sliki 10.6. Kot vidimo, natezna napetost z naraščanjem temperature pada. Za temperaturo  $-5\text{ °C}$  sta merodajni dve vrednosti: brez zimskega dodatnega bremena  $\sigma_5$  (na krivulji) in z dodatnim bremenom  $\sigma_{5+db}$  (nad krivuljo). Natezna napetost pri  $-20\text{ °C}$  brez dodatnega bremena največkrat leži med tema dvema vrednostima. Zanima nas, pri kateri temperaturi se pojavi največja natezna napetost. Največjo natezno napetost določamo bodisi pri  $-20\text{ °C}$  ali pri  $-5\text{ °C}$  z dodatnim bremenom.

Kritična razpetina ( $s_k$ ) je tista razpetina, pri kateri je natezna napetost pri  $-5\text{ °C}$  z dodatnim bremenom ( $\sigma_{5+db}$ ) enaka natezni napetosti pri  $-20\text{ °C}$  brez dodatnega bremena ( $\sigma_{-20}$ ) (slika 10.6.), kar lahko zapišemo kot:

$$\sigma_{-20} = \sigma_{-5db} = \sigma_{hdop}, \quad (10.59)$$

kjer je  $\sigma_{hdop}$  dopustna horizontalna natezna napetost.

Kritično razpetino izračunamo s pomočjo položajne enačbe, in sicer tako, da za osnovni položaj privzamemo stanje pri  $-5\text{ °C}$  z dodatnim bremenom in upoštevamo enakost (10.59). Velja:

$$\begin{aligned} \vartheta_0 &= -5\text{ °C} & \vartheta &= -20\text{ °C} \\ \sigma_{0h} &= \sigma_{hdop} & \sigma_h &= \sigma_{hdop} \\ \gamma_0 &= \gamma_v + \Delta\gamma & \gamma &= \gamma_v \end{aligned} \quad (10.60)$$

$$\frac{\gamma_v^2 s_k^2}{24\sigma_{hdop}^2} - \frac{(\gamma_v + \Delta\gamma)^2 s_k^2}{24\sigma_{hdop}^2} = \alpha(-20 - (-5)). \quad (10.61)$$

Kjer je  $\gamma_v$  specifična teža vrvi,  $\Delta\gamma$  pa dodatno zimsko breme.

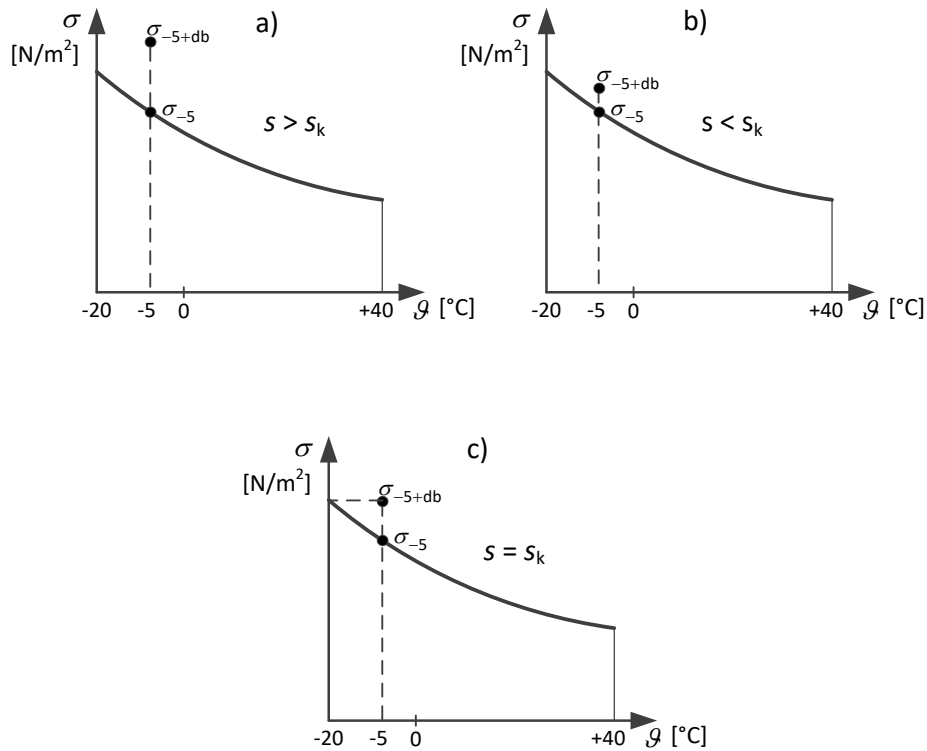
Kritično razpetino lahko zapišemo z naslednjo enačbo:

$$s_k = \sigma_{hdop} \sqrt{\frac{360 \cdot \alpha}{(\gamma_v + \Delta\gamma)^2 - \gamma_v^2}}. \quad (10.62)$$

Velja naslednje:

- Če je dejanska razpetina manjša od kritične razpetine ( $s < s_k$ ), nastopi največja natezna napetost pri  $-20\text{ °C}$ .
- Če je  $s > s_k$ , nastopi največja natezna napetost pri  $-5\text{ °C}$  z dodatnim zimskim bremenom.

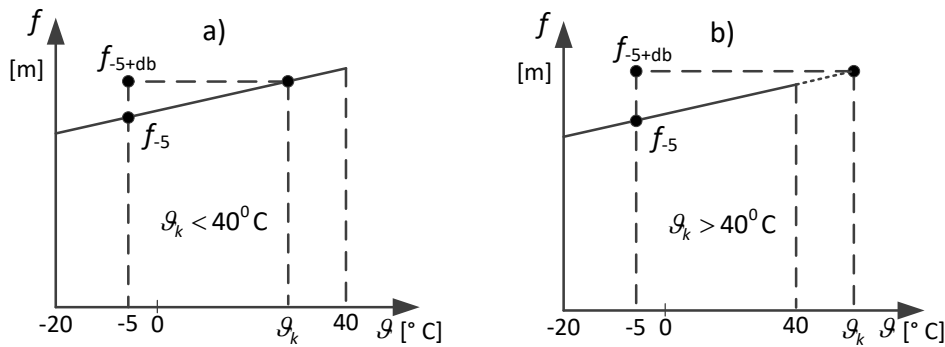
Upoštevamo torej, da vrv v točki, kjer nastopi največja natezna napetost, doseže dopustno natezno napetost  $\sigma_{hdop}$ .



Slika 10.6: Odvisnost natezne napetosti od temperature

#### 10.4.2 Kritična temperatura

Iz znanih natezih napetosti  $\sigma$  pri različnih temperaturah lahko izračunamo ustrezne povese  $f$ . Odvisnost povesa od temperature je prikazana na sliki 10.7, kjer vidimo, da poves s temperaturo narašča. Pri temperaturi  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  spet dobimo dve vrednosti: poves brez zimskega dodatnega bremena  $f_{-5}$  (na krivulji) in z dodatnim bremenom  $f_{-5+db}$  (nad krivuljo).



Slika 10.7: Povesi vrvi v odvisnosti od temperature

Kritična temperatura je tista temperatura, pri kateri je poves enak povesu pri  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  z dodatnim zimskim bremenom.

Za izračun kritične temperature levo stran položajne enačbe (10.54) zapišemo s pomočjo izraza za poves (10.58):

$$\begin{aligned}
 \vartheta_0 &= -5\text{ }^{\circ}\text{C} & \vartheta &= \vartheta_k \\
 \sigma_{0h} &= \sigma_{-5+db} & \sigma_h &= \sigma_{\vartheta_k} \\
 \gamma_0 &= \gamma_v + \Delta\gamma & \gamma &= \gamma_v \\
 f_0 &= f_{-5+db} & f &= f_{\vartheta_k}
 \end{aligned}
 \tag{10.63}$$

$$\frac{8}{3} \left( \frac{f_{g_k}}{s} \right)^2 - \frac{8}{3} \left( \frac{f_{-5+db}}{s} \right)^2 = \alpha (g_k - (-5)) + \frac{\sigma_{g_k} - \sigma_{-5+db}}{E}. \quad (10.64)$$

Leva stran položajne enačbe (10.64) je enaka nič, torej je kritična temperatura enaka:

$$g_k = \frac{\sigma_{-5+db} - \sigma_{g_k}}{\alpha E} - 5^\circ\text{C}. \quad (10.65)$$

Upoštevamo še enakost povosov pri kritični temperaturi:

$$\begin{aligned} f_{g_k} &= f_{-5+db}, \\ \frac{\gamma_v s^2}{8\sigma_{g_k}} &= \frac{(\gamma_v + \Delta\gamma) s^2}{8\sigma_{-5+db}} \end{aligned} \quad (10.66)$$

in določimo natezno napetost pri kritični temperaturi:

$$\sigma_{g_k} = \frac{\gamma_v}{\gamma_v + \Delta\gamma} \sigma_{-5+db}. \quad (10.67)$$

Kritično temperaturo izračunamo kot:

$$g_k = \frac{\sigma_{-5+db} \Delta\gamma}{\alpha E (\gamma_v + \Delta\gamma)} - 5^\circ\text{C}. \quad (10.68)$$

Velja naslednje:

- Če je  $g_k < 40^\circ\text{C}$  oziroma manjši od najvišje predpostavljene temperature, računamo maksimalni povos pri najvišji predpostavljene temperaturi, to je navadno pri  $40^\circ\text{C}$ .
- Če je  $g_k > 40^\circ\text{C}$  oziroma večji od najvišje predpostavljene temperature, računamo maksimalni povos pri  $-5^\circ\text{C}$  z dodatnim zimskim bremenom.

## 10.5 Varnostne višine, varnostne razdalje in varnostni razmiki

Varnostna višina je definirana kot najmanjša dopustna vertikalna razdalja vodnika do zemlje oziroma objekta na zemlji. Pri tem upoštevamo največji povos, ki je definiran s kritično temperaturo ali najvišjo pričakovano temperaturo. Temperatura daljnovidne vrvi je odvisna tudi od tokovne obremenitve. V predpisih so podane višine za napetosti do 110 kV. Nekatere varnostne višine so podane v tabeli 10.5.

Tabela 10.5: Varnostne višine

Varnostne višine	$h_v$ (m)
nedostopna mesta	4
vozilom nedostopna mesta	5
vozilom dostopna mesta	6
stavbe	5
stavbe z vnetljivo streho	12
naseljeni kraji	7
regionalne, lokalne ceste	7
magistralne ceste, avtoceste	7
reka za splavljanje	7
plovne reke, prekopi	15
plinovodi, naftovodi	8



---

Za višje napetosti se višine povečajo najmanj za faktor:

$$\Delta h = \frac{U_n - 110}{150} \quad (\text{m}). \quad (10.69)$$

Varnostna razdalja je najmanjša dopustna razdalja vodnika v katerikoli smeri do zemlje ali objekta na zemlji pri največjem povesu. Upoštevati je potrebno tudi vpliv vetra. Varnostni razmiki so najmanjše dovoljene razdalje med deli voda pod napetostjo in ozemljenimi deli voda.

---

## Literatura

- [1] Papič, Igor; Žunko, Peter: »Elektroenergetska tehnika I«, 3. izd., Ljubljana, Založba FE in FRI, 2009
- [2] Khan, Shoab: »Industrial power systems«, Boca Raton, London, New York, CRC Press, 2008
- [3] Sinigoj, Anton R.: »Osnove elektromagnetike«, 4. izd., Ljubljana, Fakulteta za elektrotehniko, 2002
- [4] Das, J. C.: »Power system analysis: short-circuit load flow and harmonics«, Boca Raton, London, New York, CRC Press, 2012
- [5] Kundur, Prabha: »Power system stability and control«, New York, McGraw-Hill, 1994
- [6] Kersting, William H.: »Distribution system modeling and analysis«, 3rd ed., Boca Raton, CRC Press, 2012
- [7] Natarajan, Ramasamy: »Power system capacitors«, Boca Raton, Taylor & Francis, 2005
- [8] Ghosh, Arindam; Ledwich, Gerard: »Power quality enhancement using custom power devices«, Boston, Dordrecht, London, Kluwer Academic Publishers, 2002
- [9] Eremia, Mircea; et al.: »Advanced solutions in power systems: HVDC, FACTS, and artificial intelligence«, Hoboken, Wiley, 2016
- [10] M. Čepin: »Assessment of power system reliability«, Springer, 2011.
- [11] Bollen, Math H. J.; Hassan, Fainan: »Integration of distributed generation in the power system«, Piscataway, IEEE Press, Hoboken, Wiley, 2011
- [12] Kiessling, Friedrich: »Overhead power lines: planning, design, construction«, Berlin, Springer, 2003

V preteklih desetletjih je bilo veliko pozornosti namenjene delovanju prenosnih omrežij, nekoliko manj pa se je strokovna in študijska literatura posvečala distribucijskim omrežjem. V zadnjem desetletju pa strmo narašča delež obnovljivih virov, ki so priključeni na distribucijski nivo, električna vozila se počasi že nakazujejo na obzorju in v ospredje vse bolj stopa potreba po zagotavljanju fleksibilnosti v omrežju, ki jo s prilagajanjem odjema lahko zagotovi tudi porabnik. Zaradi naštetega postajajo distribucijska omrežja ključen del elektroenergetskega sistema in si zaslužijo nekoliko natančnejšo obravnavo.

Pričujoče delo je zastavljeno kot učni pripomoček za predmeta Elektroenergetska omrežja in naprave ter Elementi elektroenergetskega omrežja. Precejšen del snovi je sicer splošen in veljaven tako za prenosna kot tudi za distribucijska omrežja, na več mestih pa so opisane specifikke distribucijskih omrežij. Ker moramo pri obravnavi distribucijskih omrežij navadno upoštevati nesimetrične obratovalne razmere, veliko pozornosti posvečamo trifaznemu modeliranju sistema s pomočjo simetričnih komponent. Opisane so pasivne in aktivne kompenzacijske naprave, ki jih srečujemo v distribuciji in pri industrijskih porabnikih, podane so osnove obratovanja distribucijskih omrežij, ki vključuje tudi vpliv virov, priključenih v ta omrežja.

Elektroenergetsko omrežje, simetrične komponente, električni parametri vodov, kompenzacija jalove moči, pametna omrežja

*MODELIRANJE  
ELEMENTOV  
ELEKTRO-  
ENERGETSKEGA  
OMREŽJA*

*KLJUČNA GESLA*

ISBN 978-961-243-375-8



*ZALOŽBA  
FAKULTETE ZA  
ELEKTROTEHNIKO*