



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta *za elektrotehniko*

# ELEKTROENERGETSKA OMREŽJA IN NAPRAVE

Poročilo 1. laboratorijske vaje: Simetrične in  
diagonalne komponente

Avtor: Jaka Ambruš

Vpisna številka: 64180037

Profesor: dr. Boštjan Blažič

Asistentka: Janja Dolenc

Datum: 16.11.2020

## Kazalo vsebine

<b>1. Uvod .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Podatki uporabljenih elementov in shema vezja .....</b>	<b>2</b>
<b>3. Rešitve nalog .....</b>	<b>3</b>
1. Naloga: Časovni potek tokov in napetosti nesimetrično obremenjenega sistema .....	3
2. in 3. Naloga: Vrednosti amplitudnega in faznega spektra toka in napetosti .....	4
4. Naloga: Impedance bremen v kompleksnem in polarnem zapisu .....	4
5. in 6. Naloga: Izračun simetričnih/diagonalnih komponent napetosti in toka, ter grafično ponazorjene simetričnih komponent tokov .....	5
7. Naloga: Simetrične komponente impedančne matrike bremena.....	7
<b>4. Odgovori na vprašanja.....</b>	<b>7</b>
4.1 Kdaj je sistem simetričen? .....	7
4.2 Kako nesimetrija bremena vpliva na nesimetrijo napetosti vzdolž voda? .....	7
<b>5. Zaključek .....</b>	<b>7</b>

## Kazalo slik:

Slika 1: Podatki nekaterih uporabljenih elementov 2. laboratorijske vaje .....	2
Slika 2: Shema vezja 1. laboratorijske naloge .....	2
Slika 3: Časovni poteki tokov in napetosti 1. Naloge.....	3
Slika 4: Grafična predstavitev določanja simetričnih komponent tokov .....	6

## 1. Uvod

Pri 1. laboratorijski vaji smo opazovali poteke tokov in napetosti na modelu 3-faznega voda ob nesimetrični obdelavi. Kot pri prejšnji laboratorijski vaji smo na variaku nastavili napetost na 110V, ki je bila priključena na transformator z medfazno napetostjo 110V na primarni strani in 20V na sekundarni strani. Model je bil v razmerju  $M = 1:1000$ . Ker je osciloskop meril fazne napetosti so bili rezultati nekoliko drugačni. Model vezja je bil identičen modelu vezja 1. vaje na katerega smo priključili še nesimetrično breme. Računali smo impedance, ter simetrične in diagonalne. Naučili smo se tudi pretvorbo 3-faznega sistema v simetrične komponente.

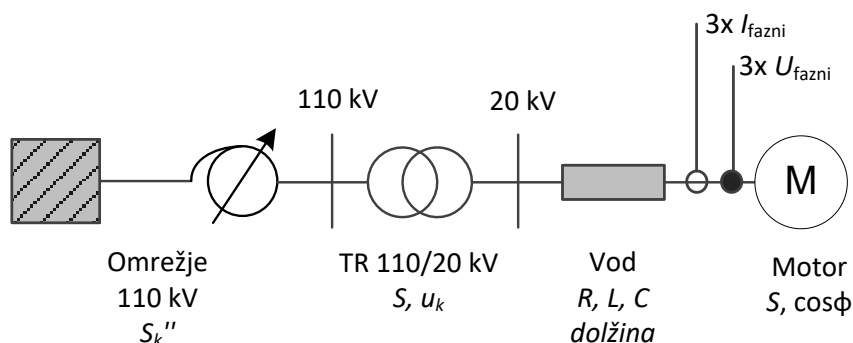
## 2. Podatki uporabljenih elementov in shema vezja

Uporabljeni elementi:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>transformator: <ul style="list-style-type: none"> <li>110/20 kV</li> <li><math>u_k=10\%</math></li> <li><math>S=35\text{ MVA}</math></li> </ul> </li> <li>nadzemni vod: <ul style="list-style-type: none"> <li><math>l=20\text{ km}</math></li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>R'=0,265\ \Omega/\text{km}</math></li> <li><math>X'=0,200\ \Omega/\text{km}</math></li> <li><math>C'=0,270\ \mu\text{F}/\text{km}</math></li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>breme 1: <ul style="list-style-type: none"> <li><math>U_N=20\text{ kV}</math></li> <li><math>S=1,82\text{ MVA}</math></li> <li><math>\cos\varphi=1,0</math></li> </ul> </li> <li>breme 2: <ul style="list-style-type: none"> <li><math>U_N=20\text{ kV}</math></li> <li><math>S=3,64\text{ MVA}</math></li> <li><math>\cos\varphi=1,0</math></li> </ul> </li> </ul>

Slika 1: Podatki nekaterih uporabljenih elementov 2. laboratorijske vaje

Pri izvedbi vaje smo uporabili tudi variak, avtotransformator(oz. varovalke), dva multimetra in osciloskop. Modela bremen sta čisto ohmska. S piskačem preverimo varovelke.

Shema vezja:



Slika 2: Shema vezja 1. laboratorijske naloge

### 3. Rešitve nalog

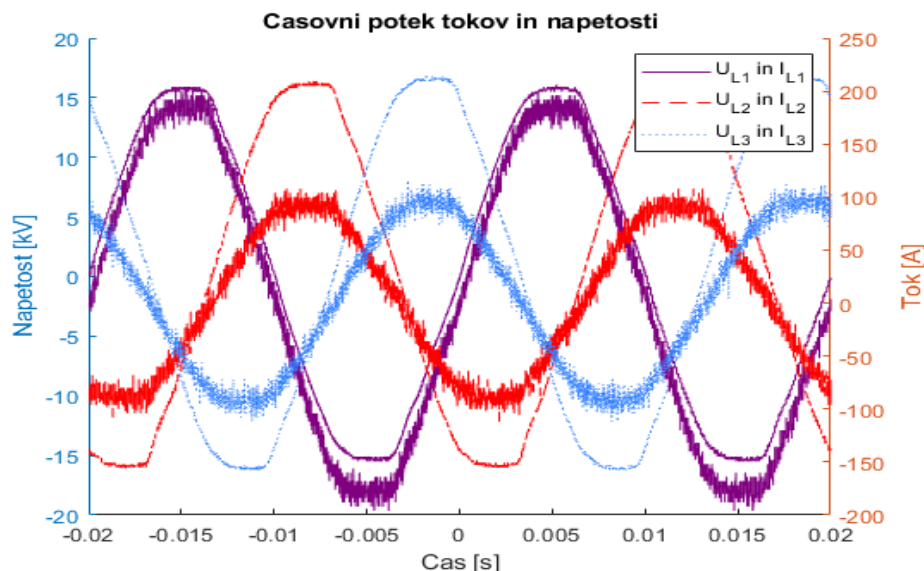
#### 1. Naloga: Časovni potek tokov in napetosti nesimetrično obremenjenega sistema

Koda:

```
clear all

close all
cd 'C:\Users\Jaka\Desktop\Eon-Vaje\vaja 3'
t = table2array(readtable('LV2_3xU_IL1.CSV','Range','A17:A5224'));
ul1 = table2array(readtable('LV2_3xU_IL1.csv','Range','B17:B5224'))*10^3;
ul2 = table2array(readtable('LV2_3xU_IL1.csv','Range','D17:D5224'))*10^3;
ul3 = table2array(readtable('LV2_3xU_IL1.csv','Range','F17:F5224'))*10^3;
il1 = table2array(readtable('LV2_3xU_IL1.csv','Range','H17:H5224'))*10^4;
il2 = table2array(readtable('LV2_3xU_IL2.csv','Range','H17:H5224'))*10^4;
il3 = table2array(readtable('LV2_3xU_IL3.csv','Range','H17:H5224'))*10^4;
figure(1)
title('Casovni potek tokov in napetosti')
yyaxis left
hold on
plot(t, ul1/1000,'Color',[0.5 0 0.5])
plot(t, ul2/1000,'Color',[1 0 0])
plot(t, ul3/1000,'Color',[0.2 0.5 1])
ylabel('Napetost [kV]')
yyaxis right
plot(t, il1,'Color',[0.5 0 0.5])
plot(t, il2,'Color',[1 0 0])
plot(t, il3,'Color',[0.2 0.5 1])
ylabel('Tok [A]')
xlabel('Cas [s]')
xlim([-0.02,0.02])
legend('U_L_1 in I_L_1','U_L_2 in I_L_2','U_L_3 in I_L_3')
```

S pomočjo programskega okolja Matlab sem izrisal sledeče poteke napetosti in tokov.



Slika 3: Časovni poteke tokov in napetosti 1. Naloga

Vidimo, da gre za ohmski značaj bremena, saj so tokovi in napetosti v fazi. Sistem ni simetrično obremenjen.

## 2. in 3. Naloga: Vrednosti amplitudnega in faznega spektra toka in napetosti

Iz izmerjenih podatkov osciloskopa, shranjenih v priloženih Excel datotekah s Fourierovo transformacijo izrišem amplitudne in fazne spektre za vse tri faze in odčitam temenske vrednosti in fazne kote pri omrežni frekvenci 50Hz. Za nadaljnjo risanje kazalčnih diagramov sem si izbral  $U_{L1}$ , ter njegov fazni kot odštel od preostalih faznih kotov veličin in s tem dobil fazni zamik drugih napetosti relativen na  $U_{L1}$ .

Rezultati napetosti:

Tabela 1: Tabela amplitude, faznega kota in faznega zamika relativno no  $U_{L1}$  napetosti

Napetost	Amplituda/kV	Fazni kot /°	Fazni zamik/°
$U_{L1}$	15,94	-89,72	0
$U_{L2}$	16,47	150,60	240,32
$U_{L3}$	16,72	32,07	121,79

Rezultati tokov:

Tabela 2: Tabela amplitude, faznega kota in faznega zamika relativno no  $U_{L1}$  tokov

Tok	Amplituda/kA	Fazni kot /°	Fazni zamik/°
$I_{L1}$	0,185	-90,47	-0,75
$I_{L2}$	0,093	150,1	239,82
$I_{L3}$	0,096	30,7	120,42

## 4. Naloga: Impedance bremen v kompleksnem in polarnem zapisu

S Fourierovo transformacijo izrišem vse tri faze, kot pri prejšnji vaji in po izrisu amplitudnih in faznih spektrov napetosti in toka pri vseh treh fazah odčitamo temenske vrednosti in fazne kote pri omrežni frekvenci 50Hz. Za nadaljnjo risanje kazalčnih diagramov sem si izbral  $U_{L1}$ , ter njegov fazni kot odštel od preostalih faznih kotov veličin in s tem dobil fazni zamik drugih napetosti relativen na  $U_{L1}$ .

Rezultati napetosti:

Tabela 3: Polarni in kompleksni zapis napetosti

Napetost	Polarni zapis/kV	Kompleksni zapis/kV
$\underline{U}_{L1}$	$15,94 e^{j0^\circ}$	$15,94 - j0$
$\underline{U}_{L2}$	$16,47 e^{j240,32^\circ}$	$-8,16 - j14,31$
$\underline{U}_{L3}$	$16,72 e^{j121,79^\circ}$	$-8,81 + j14,21$

Tabela 4: Polarni in kompleksni zapis tokov

Tok	Polarni zapis/kA	Kompleksni zapis/kA
$\underline{I}_{L1}$	$0,185 e^{-j0,75^\circ}$	$0,185-j0,0024$
$\underline{I}_{L2}$	$0,093 e^{j239,82^\circ}$	$-0,0047 - j0,008$
$\underline{I}_{L3}$	$0,096 e^{j120,42^\circ}$	$-0,0049+ j0,0083$

Iz podatkov teh tabel lahko izračunamo impedance bremen po formuli:

$$[Z_{fk}] = \frac{U_{Lk}}{I_{Lk}}, \text{ kjer je } k = 1, 2, 3 \text{ in predstavlja številko faze.}$$

Polarni zapis rezultatov impedance bremen:

$$[Z_{f1}] = \frac{U_{L1}}{I_{L1}} = 85,98 e^{j0,75^\circ} \text{ Ohm}$$

$$[Z_{f2}] = \frac{U_{L2}}{I_{L2}} = 177,48 e^{j0,50^\circ} \text{ Ohm}$$

$$[Z_{f3}] = \frac{U_{L3}}{I_{L3}} = 174,71 e^{j1,37^\circ} \text{ Ohm}$$

Kompleksni zapis:

$$[Z_{f1}] = \frac{U_{L1}}{I_{L1}} = 85,97 + j1,13 \text{ Ohm}$$

$$[Z_{f2}] = \frac{U_{L2}}{I_{L2}} = 177,47 + j1,55 \text{ Ohm}$$

$$[Z_{f3}] = \frac{U_{L2}}{I_{L2}} = 174,66 + j4,18 \text{ Ohm}$$

Opazimo, da je impedanca prve faze več kot dvakrat manjša od drugih in bo zaradi obratno sorazmernosti tekel skozi njo višji tok.

**5. in 6. Naloga: Izračun simetričnih/diagonalnih komponent napetosti in toka, ter grafično ponazorjene simetričnih komponent tokov**

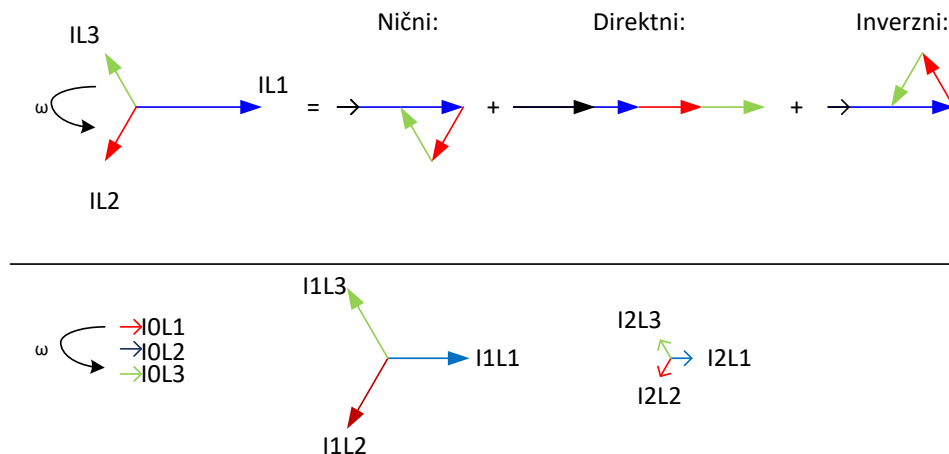
Nelinearen sistem lahko predstavimo z vsoto simetričnih sistemov: ničelni(0), negativni(2) in pozitivni(1).

Simetrične komponente napetosti in tokov izračunamo iz sledečih enačb:

$$[\underline{U}_s] = [\underline{S}][\underline{U}_f] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,341 - j0,032 \\ 16,281 + j0,032 \\ 0,377 - j16,467 \end{bmatrix} kV$$

$$[\underline{I}_s] = [\underline{S}][\underline{I}_f] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,030 - j0,0004 \\ 0,155 - j0,0024 \\ 0,001 - j0,094 \end{bmatrix} kA$$

Merilo: 1mm:9A



Slika 4: Grafična predstavitev določanja simetričnih komponent tokov

Če bi sešteli kazalce posamezne faze simetričnega sistema bi dobili ponovno nesimetričen sistem.

Diagonalne komponente napetosti in tokov izračunamo iz sledečih enačb:

$$[\underline{U}_d] = [\underline{K}][\underline{U}_f] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,341 - j0,032 \\ 16,281 + j0,032 \\ 0,377 - j16,467 \end{bmatrix} kV$$

$$[\underline{I}_d] = [\underline{K}][\underline{I}_f] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,030 - j0,0004 \\ 0,155 - j0,0024 \\ 0,001 - j0,094 \end{bmatrix} kA$$

Uporabljene transformacijske matrike:

$$[\underline{K}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad [\underline{S}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \quad [\underline{S}]^{-1} = [\underline{T}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix}$$

## 7. Naloga: Simetrične komponente impedančne matrike bremena

Sprememba impedančne oblike v simetrično:

$$\begin{aligned}
 [\underline{Z}_s] &= [S][\underline{Z}_f][T] = [S][S]^{-1}[\underline{Z}_f] = \\
 &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 85,97 + j1,13 & 0 & 0 \\ 0 & 177,47 + j1,55 & 0 \\ 0 & 0 & 174,66 + j4,18 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 146,03 + j2,28 & -30,79 - j1,39 & -29,27 + j0,23 \\ -29,27 + j0,23 & 146,03 + j2,28 & -30,79 - j1,39 \\ -30,79 - j1,39 & -29,27 + j0,23 & 146,03 + j2,28 \end{bmatrix} \text{ Ohm}
 \end{aligned}$$

## 4. Odgovori na vprašanja

### 4.1 Kdaj je sistem simetričen?

Sistem je nesimetričen, ko se napetosti in toki razlikujejo po velikosti faz in so fazni zamiki med njimi manjši ali večji od 120°.

### 4.2 Kako nesimetrija bremena vpliva na nesimetrijo napetosti vzdolž voda?

Dokler je dovolj močna mreža se ohranja simetričnost napetosti, ko pa je mreža bolj šibka pa se pojavijo nesimetrično obremenjene faze (fazni tokovi so med seboj različni), kar vpliva na napetostne faze.

## 5. Zaključek

Med delanjem vaje sem ponovil lastnosti kompleksnih števil, se bolje seznanil s programskima okoljema Matlab in Visio pri računanju in risanju diagramov, ter računanje z matrikami. Vaja je bila dobro zasnovana in poučna neglede na delo na daljavo.