

*Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za visoki napon i energetiku*

Prijenos i razdjela električne energije

Rješenja 1. domaće zadaće

Student: SlavoniaBand

JMBAG: xxxxxxxxxxxx

Rok predaje: 29.05.2012.

Svibanj, 2012.

Sadržaj:

1. Zadani podaci	3.
2. Koordinate ovjesišta izolatorskih lanaca	3.
3. Koordinate ovjesišta zaštitnih užeta	3.
4. Podaci iz tablica za vodič	3.
5. Podaci iz tablica za zaštitno uže	4.
6. Otpor vodiča	4.
7. Raspored vodiča	5.
8. Induktivitet	11.
9. Kapacitet.....	19.
10. Najveća struja u normalnom pogonu.....	22.
11. Nazivni napon voda	22.
12. Najveća snaga u normalnom pogonu.....	22.
13. Jakost električnog polja na površini vodiča.....	22.
14. Kritični napon	23.
14. Tablica rješenja.....	24.

1.) Zadani podaci:

Nazivni presjek vodiča	350/80 [mm ²]
Najveći provjes vodiča	24 [m]
Broj vodiča u snopu	3
Razmak	420 [mm]
Broj trojki	1
Izolatorski lanac broj članaka	21
Izolatorski lanac vrsta članaka	K170/280
Nazivni presjek zaštitnih užeta	120 [mm ²]
Najveći provjes zaštitnog vodiča	13 [m]
Vrsta tla	Močvara
Naziv stupa	Y stup
X koordinata ovjesišta izolatora vodiča faze A	0 [m]
Y koordinata ovjesišta izolatora vodiča faze A	33 [m]
X koordinata ovjesišta izolatora vodiča faze B	14 [m]
Y koordinata ovjesišta izolatora vodiča faze B	33 [m]
X koordinata ovjesišta izolatora vodiča faze C	-14 [m]
Y koordinata ovjesišta izolatora vodiča faze C	33 [m]
X koordinata ovjesišta zaštitnog vodiča	9 [m]
Y koordinata ovjesišta zaštitnog vodiča	42 [m]
X koordinata ovjesišta zaštitnog vodiča	-9 [m]
Y koordinata ovjesišta zaštitnog vodiča	42 [m]

Tablica 1. Zadani podaci

*** Napomena: Ako su koordinate drugog zaštitnog vodiča 0,0 on ne postoji ***

2.) Koordinate ovjesišta izolatorskih lanaca (x,y) u [m] :

- Faza A (0, 33) [m]
- Faza B (14, 33) [m]
- Faza C (-14, 33) [m]

3.) Koordinate ovjesišta zaštitnih užeta (x,y) u [m] :

- Faza P (9, 42) [m]
- Faza Q (-9, 42) [m]

Na osnovu broja trojki, odrediti ćemo broj vodiča, iz priloženog se vidi da je broj vodiča $n = 3$.

➔ Iz tablica sa podacima o izvedbi vodiča (Prilog I – tablica 1.) :

4.) Podaci iz tablica za vodič :

- Vanjski radijus : $r_1 = 13.45 \text{ mm}$ ➔ očitano direktno iz tablice
- Stvarni presjek vodiča (bez jezgre) iznosi : $A_{Al} = 349.247 \text{ mm}^2$ ➔ očitano direktno iz tablice
- Radijus čelične jezgre (računamo ga iz broja čeličnih žica i njihovog promjera, poznavajući pravilo da se u svakom slijedećem sloju homogenog užeta broj žica poveća za 6, a zatim u drugom sloju za 12) iznosi : $r_2 = 5.75 \text{ mm}$ ➔ izračunato pomoću formule

➔ Iz tablica sa podacima o izvedbi vodiča (Prilog I – tablica 2.) :

5.) Podaci iz tablica za zaštitno uže :

- a) Vanjski radijus vodiča : $r_g = 7.00 \text{ mm}$ ➔ očitano direktno iz tablice
- b) Broj žica : 19 ➔ očitano direktno iz tablice
- c) Stvarni presjek vodiča : $A_{Al} = 116.993 \text{ mm}^2$ ➔ očitano direktno iz tablice

➔ Iz tablica sa podacima o izvedbi vodiča (Prilog I – tablica 1. i tablica 2.) :

6.) Otpor :

- a) Otpor voda kod istosmjerne struje : $R_0 = 0.08270 \text{ } \Omega/\text{km}$ ➔ očitano direktno iz tablice 1.
- b) Otpor zaštitnog užeta : $R_g = 1.2137 \text{ } \Omega/\text{km}$ ➔ očitano direktno iz tablice 2.
- c) Djelatni otpor :

Povećanje otpora uslijed skin efekta kod izmjenične struje računa se prema formuli :

$$\frac{R_0}{R_1} = \text{Re} \left[\frac{nrJ_0(nr)}{2J_1(nr)} \right] \rightarrow \text{gdje je } \omega = 2 \cdot \pi \cdot f, \text{ a } \mu = \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{H}}{\text{km}} \right]$$

$$\rho = \frac{R_0}{r^2 \pi} \quad mr = \sqrt{\frac{\omega \mu r^2}{\rho}} = \sqrt{2\pi f \frac{r^2 \mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{2f \mu}{R_0}}$$

I konačno, djelatni otpor kod izmjenične struje:

$$\frac{R_1}{R_0} = 1 + \frac{m^4 r^4}{192} - \frac{m^8 r^8}{46080}$$

$$\frac{R_1}{R_0} = 1 + \frac{4f^2 \mu^2}{R_0^2 \cdot 192} - \frac{8f^4 \mu^4}{R_0^4 \cdot 46080} \quad / \cdot R_0$$

$$R_1 = R_0 + \frac{4 \cdot f^2 \cdot \mu^2}{R_0 \cdot 192} - \frac{8 \cdot f^4 \cdot \mu^4}{R_0^3 \cdot 46080}$$

$$R_1 = 0.08270 + \frac{4 \cdot 24^2 \cdot (4 \cdot \pi \cdot 10^{-4})^2}{0.08270 \cdot 192} - \frac{8 \cdot 24^4 \cdot (4 \cdot \pi \cdot 10^{-4})^4}{0.08270^3 \cdot 46080} = 0.0829288 \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$$

Budući da je ovo djelatni otpor za jedan vodič, ako se faza trojke sastoji od više vodiča u snopu, onda računamo djelatni otpor po fazi za čitav vod dijeljenjem otpora sa brojem vodiča u snopu (pogledamo u tablicu):

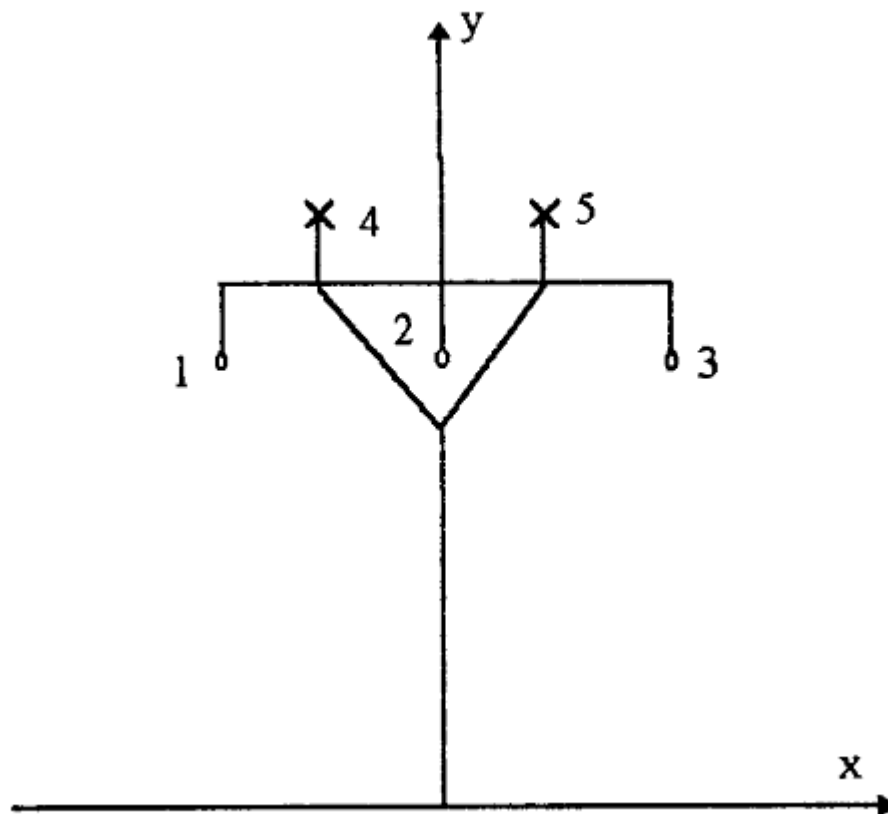
$$R_1 = 0.0829288 \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$$

$$R_{1f} = \frac{R_1}{\text{Broj vodiča u snopu}} = \frac{0.0829288}{3} = 0.027642 \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$$

7.) Raspored vodiča :

a) Tip stupa :

Pomoću dobivenih koordinata ovjesišta izolatorskih lanaca i koordinata zaštitnih užeta, možemo napraviti skicu rasporeda vodiča, odnosno „glave“ stupa. Primjećujemo simetričan raspored vodiča u odnosu na vertikalnu y os stupa. Na osnovu slika u Prilogu IV možemo odrediti tip zadanog stupa. U ovom slučaju Y stup sa dva zaštitna užeta.



Slika 1. Stup tipa: Y stup

b) Izračun prosječnih visina vodiča jedne trojke iznad tla:

U daljnjem proračunu moramo uzeti u obzir i zemljin utjecaj. Važna je visina vodiča iznad tla. Ne smijemo zanemariti visinu izolatora i nosače vodova.

Prosječne visine vodiča jedne trojke iznad tla računamo prema slijedećoj formuli:

$$h = H - 0.7 \cdot f_{max}$$

Ne smije zanemariti niti duljinu izolatora i nosača vodova. U zadatku je zadano broj članaka i tip izolatora :

21 K 170/280

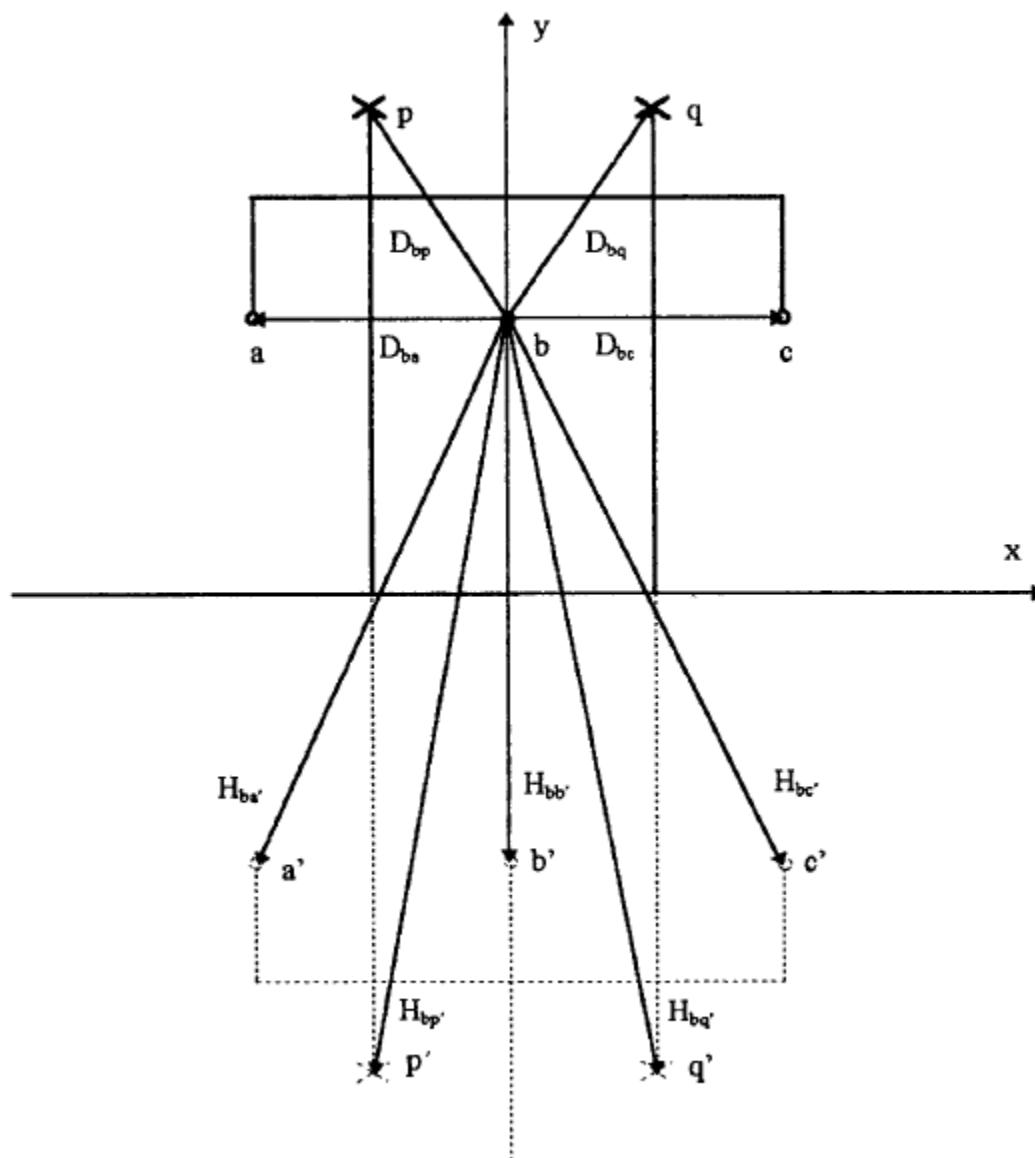
U ovom slučaju ćemo koristiti ovjesne kapaste izolatore. Duljinu izolatora ćemo izračunati znajući dimenzije jednog članka. Za ovjesni kapasti izolator tipa *K* 170/280 visina jednog članka iznosi 0.17 m .

Na taj način izračunavamo prosječne visine vodiča jedne trojke iznad tla :

$$h_a = y_a - (0.7 \cdot f_{max} + 21 \cdot 0.17 + 0.3) = 33 - 20.67 = 12.33 \text{ [m]}$$

$$h_b = y_c - (0.7 \cdot f_{max} + 21 \cdot 0.17 + 0.3) = 33 - 20.67 = 12.33 \text{ [m]}$$

$$h_c = y_c - (0.7 \cdot f_{max} + 21 \cdot 0.17 + 0.3) = 33 - 20.67 = 12.33 \text{ [m]}$$



Slika 1. Stup tipa: Međusobne udaljenosti vodiča i zaštitnih vodiča u proračunu induktiviteta i kapaciteta

c) Izračun prosječnih visina zaštitnog užeta :

Prosječne visine zaštitnih užeta računaju se prema indentičnoj formuli :

$$h_p = y_p - (0.7 \cdot f_{max} + 0.3) = 42 - 17.1 = 32.6 \text{ [m]}$$

$$h_q = y_q - (0.7 \cdot f_{max} + 0.3) = 42 - 17.1 = 32.6 \text{ [m]}$$

d) Određivanje koordinata zrcalnih slika vodiča jedne trojke :

Vodič	X – koordinata [m]	Y – koordinata [m]
Faza A	0	12.33
Faza B	14	12.33
Faza C	-14	12.33
Faza A'	0	-12.33
Faza B'	14	-12.33
Faza C'	-14	-12.33

e) Određivanje koordinata zrcalnih slika zaštitnog užeta :

Zaštitno uže	X – koordinata [m]	Y – koordinata [m]
Faza P	9	32.6
Faza Q	-9	32.6
Faza P'	9	-32.6
Faza Q'	-9	-32.6

f) Međusobne udaljenosti vodiča :

Služe za proračun induktiviteta, impedancije i kapaciteta, odnosno susceptancije, dobiva se prema Pitagorinom poučku :

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad H_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

$$\text{za } i, j = a, b, c, p$$

Međusobne udaljenosti označene sa D odnose se na međusobne udaljenosti vodiča i zaštitnih užeta u proračunu induktiviteta, a međusobne udaljenosti označene sa H odnose na sve međusobne udaljenosti vodiča i zaštitnih užeta prema njihovim zrcalnim slikama :

Faza A:

$$\begin{aligned}
 H_{aa'} &= \sqrt{(x_a - x_{a'})^2 + (y_a - y_{a'})^2} = \sqrt{(0 - 0)^2 + (12.33 - (-12.33))^2} = 24.66[m] \\
 H_{ab'} &= \sqrt{(x_a - x_{b'})^2 + (y_a - y_{b'})^2} = \sqrt{(0 - 14)^2 + (12.33 - (-12.33))^2} = 28.356[m] \\
 H_{ac'} &= \sqrt{(x_a - x_{c'})^2 + (y_a - y_{c'})^2} = \sqrt{(0 + 14)^2 + (12.33 - (-12.33))^2} = 28.356[m] \\
 H_{ap'} &= \sqrt{(x_a - x_{p'})^2 + (y_a - y_{p'})^2} = \sqrt{(0 - 9)^2 + (12.33 - (-32.6))^2} = 45.882[m] \\
 H_{aq'} &= \sqrt{(x_a - x_{q'})^2 + (y_a - y_{q'})^2} = \sqrt{(0 + 9)^2 + (12.33 - (-32.6))^2} = 45.822[m]
 \end{aligned}$$

Faza B:

$$\begin{aligned}
 H_{ba'} &= \sqrt{(x_b - x_{a'})^2 + (y_b - y_{a'})^2} = \sqrt{(14 - 0)^2 + (12.33 - (-12.33))^2} = 28.356[m] \\
 H_{bb'} &= \sqrt{(x_b - x_{b'})^2 + (y_b - y_{b'})^2} = \sqrt{(14 - 14)^2 + (12.33 - (-12.33))^2} = 24.66[m] \\
 H_{bc'} &= \sqrt{(x_b - x_{c'})^2 + (y_b - y_{c'})^2} = \sqrt{(14 + 14)^2 + (12.33 - (-12.33))^2} = 37.31[m] \\
 H_{bp'} &= \sqrt{(x_b - x_{p'})^2 + (y_b - y_{p'})^2} = \sqrt{(14 - 9)^2 + (12.33 - (-32.6))^2} = 45.207[m] \\
 H_{bq'} &= \sqrt{(x_b - x_{q'})^2 + (y_b - y_{q'})^2} = \sqrt{(14 + 9)^2 + (12.33 - (-32.6))^2} = 50.474[m]
 \end{aligned}$$

Faza C:

$$\begin{aligned}
 H_{ca'} &= \sqrt{(x_c - x_{a'})^2 + (y_c - y_{a'})^2} = \sqrt{(-14 - 0)^2 + (12.33 - (-12.33))^2} = 28.356[m] \\
 H_{cb'} &= \sqrt{(x_c - x_{b'})^2 + (y_c - y_{b'})^2} = \sqrt{(-14 - 14)^2 + (12.33 - (-12.33))^2} = 37.31[m] \\
 H_{cc'} &= \sqrt{(x_c - x_{c'})^2 + (y_c - y_{c'})^2} = \sqrt{(-14 + 14)^2 + (12.33 - (-12.33))^2} = 24.66[m] \\
 H_{cp'} &= \sqrt{(x_c - x_{p'})^2 + (y_c - y_{p'})^2} = \sqrt{(-14 - 9)^2 + (12.33 - (-32.6))^2} = 50.474[m] \\
 H_{cq'} &= \sqrt{(x_c - x_{q'})^2 + (y_c - y_{q'})^2} = \sqrt{(-14 + 9)^2 + (12.33 - (-32.6))^2} = 45.207[m]
 \end{aligned}$$

Faza P:

$$\begin{aligned}
 H_{pa'} &= \sqrt{(x_p - x_{a'})^2 + (y_p - y_{a'})^2} = \sqrt{(9 - 0)^2 + (32.6 - (-12.33))^2} = 45.882[m] \\
 H_{pb'} &= \sqrt{(x_p - x_{b'})^2 + (y_p - y_{b'})^2} = \sqrt{(9 - 14)^2 + (32.6 - (-12.33))^2} = 45.207[m] \\
 H_{pc'} &= \sqrt{(x_p - x_{c'})^2 + (y_p - y_{c'})^2} = \sqrt{(9 + 14)^2 + (32.6 - (-12.33))^2} = 50.474[m] \\
 H_{pp'} &= \sqrt{(x_p - x_{p'})^2 + (y_p - y_{p'})^2} = \sqrt{(9 - 9)^2 + (32.6 - (-32.6))^2} = 65.2[m] \\
 H_{pq'} &= \sqrt{(x_p - x_{q'})^2 + (y_p - y_{q'})^2} = \sqrt{(9 + 9)^2 + (32.6 - (-32.6))^2} = 67.639[m]
 \end{aligned}$$

Faza Q:

$$H_{qa'} = \sqrt{(x_q - x_{a'})^2 + (y_q - y_{a'})^2} = \sqrt{(-9 - 0)^2 + (32.6 - (-12.33))^2} = 45.882[m]$$

$$H_{qp} = \sqrt{(x_q - x_{b'})^2 + (y_q - y_{b'})^2} = \sqrt{(-9 - 14)^2 + (32.6 - (-12.33))^2} = 50.474[m]$$

$$H_{qc'} = \sqrt{(x_q - x_{c'})^2 + (y_q - y_{c'})^2} = \sqrt{(-9 + 14)^2 + (32.6 - (-12.33))^2} = 45.207[m]$$

$$H_{qp'} = \sqrt{(x_q - x_{p'})^2 + (y_q - y_{p'})^2} = \sqrt{(-9 - 9)^2 + (32.6 - (-32.6))^2} = 67.639[m]$$

$$H_{qq'} = \sqrt{(x_q - x_{q'})^2 + (y_q - y_{q'})^2} = \sqrt{(-9 + 9)^2 + (32.6 - (-32.6))^2} = 65.2[m]$$

Faza A:

$$D_{aa} = h_a = 12.33 [m]$$

$$D_{ab} = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} = \sqrt{(0 - 14)^2 + (12.33 - 12.33)^2} = 14.000[m]$$

$$D_{ac} = \sqrt{(x_a - x_c)^2 + (y_a - y_c)^2} = \sqrt{(0 + 14)^2 + (12.33 - 12.33)^2} = 14.000[m]$$

$$D_{ap} = \sqrt{(x_a - x_p)^2 + (y_a - y_p)^2} = \sqrt{(0 - 9)^2 + (12.33 - 32.6)^2} = 22.178[m]$$

$$D_{aq} = \sqrt{(x_a - x_q)^2 + (y_a - y_q)^2} = \sqrt{(0 + 9)^2 + (12.33 - 32.6)^2} = 22.178[m]$$

Faza B:

$$D_{ba} = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2} = \sqrt{(14 - 0)^2 + (12.33 - 12.33)^2} = 14.000 [m]$$

$$D_{bb} = h_b = 12.33 [m]$$

$$D_{bc} = \sqrt{(x_b - x_c)^2 + (y_b - y_c)^2} = \sqrt{(14 + 14)^2 + (12.33 - 12.33)^2} = 28.000 [m]$$

$$D_{bp} = \sqrt{(x_b - x_p)^2 + (y_b - y_p)^2} = \sqrt{(14 - 9)^2 + (12.33 - 32.6)^2} = 20.877 [m]$$

$$D_{bq} = \sqrt{(x_b - x_q)^2 + (y_b - y_q)^2} = \sqrt{(14 + 9)^2 + (12.33 - 32.6)^2} = 30.657 [m]$$

Faza C:

$$D_{ca} = \sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2} = \sqrt{(-14 + 0)^2 + (12.33 - 12.33)^2} = 14.000 [m]$$

$$D_{cb} = \sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2} = \sqrt{(-14 - 14)^2 + (12.33 - 12.33)^2} = 28.000 [m]$$

$$D_{cc} = h_c = 12.33 [m]$$

$$D_{cp} = \sqrt{(x_c - x_p)^2 + (y_c - y_p)^2} = \sqrt{(-14 - 9)^2 + (12.33 - 32.6)^2} = 30.657 [m]$$

$$D_{cq} = \sqrt{(x_c - x_q)^2 + (y_c - y_q)^2} = \sqrt{(-14 + 9)^2 + (12.33 - 32.6)^2} = 20.877[m]$$

Faza P:

$$D_{pa} = \sqrt{(x_p - x_a)^2 + (y_p - y_a)^2} = \sqrt{(9 - 0)^2 + (32.6 - 12.33)^2} = 22.178 [m]$$

$$D_{pb} = \sqrt{(x_p - x_b)^2 + (y_p - y_b)^2} = \sqrt{(9 - 14)^2 + (32.6 - 12.33)^2} = 20.877 [m]$$

$$D_{pc} = \sqrt{(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2} = \sqrt{(9 + 14)^2 + (32.6 - 12.33)^2} = 30.657 [m]$$

$$D_{pp} = h_p = 24.9 [m]$$

$$D_{pq} = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2} = \sqrt{(9 + 9)^2 + (32.6 - 32.6)^2} = 18.000 [m]$$

Faza Q:

$$D_{qa} = \sqrt{(x_q - x_a)^2 + (y_q - y_a)^2} = \sqrt{(-9 - 0)^2 + (32.6 - 12.33)^2} = 22.178 [m]$$

$$D_{qb} = \sqrt{(x_q - x_b)^2 + (y_q - y_b)^2} = \sqrt{(-9 - 14)^2 + (32.6 - 12.33)^2} = 30.657 [m]$$

$$D_{qc} = \sqrt{(x_q - x_c)^2 + (y_q - y_c)^2} = \sqrt{(-9 + 14)^2 + (32.6 - 12.33)^2} = 20.877 [m]$$

$$D_{qp} = \sqrt{(x_q - x_p)^2 + (y_q - y_p)^2} = \sqrt{(-9 - 9)^2 + (32.6 - 32.6)^2} = 18.000 [m]$$

$$D_{qq} = h_q = 24.9 [m]$$

8.) Induktivitet :

a) Matrica uzdužnih impedancija :

$$Z_{ii-z} = R_1 + R_z + j \cdot X_{ii-z}$$

Otpor R_{ii-z} predstavlja otpor vodiča uvećan za otpor zemlje: $R_z = \frac{\pi \cdot f \cdot \mu}{4}$

Reaktancija X_{ii-z} predstavlja unutrašnju reaktanciju vodiča uvećan za vanjsku reaktanciju

petlje vodič-zemlja: $X_{i-z} = f \cdot \mu \cdot \ln \left(\frac{0.738}{r \cdot \sqrt{K \cdot f \cdot \mu}} \right)$

$$X_{ii-z} = f \cdot \mu \cdot \ln \left(\frac{0.738}{r \cdot \sqrt{K \cdot f \cdot \mu}} \right) + X_i$$

$$D_m^2 = \frac{0.738}{\sqrt{K \cdot f \cdot \mu}} \rightarrow \text{kvadrat ekvivalentne visine po Carsonu}$$

$$X_{i-z} = f \cdot \mu \cdot \ln \left(\frac{D_m^2}{r} \right)$$

$$X_i = f \cdot \mu \cdot \ln \left(\frac{r}{D_s} \right)$$

$$X_{ii-z} = f \cdot \mu \cdot \ln \left(\frac{D_m^2}{r} \right) + f \cdot \mu \cdot \ln \left(\frac{r}{D_s} \right) = f \cdot \mu \cdot \ln \left(\frac{D_m^2}{D_s} \right)$$

$D_s = r_v' = k \cdot r_v \rightarrow$ vlastita SGU vodiča pri čemu je k konstantno ovisna o broju žica vodiča

$R_1 [\Omega/km] \rightarrow$ djelatni otpor vodiča pri 20°C

$$Z_{ii-z} = R_1 + \frac{\pi \cdot f \cdot \mu}{4} + f \cdot \mu \cdot \ln \left(\frac{D_m^2}{D_s} \right) \rightarrow i = a, b, c, p, q$$

Za magnetske materijale iz kojih se izvode vodiči i zaštitna užad: $\mu = \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-4} \left[\frac{H}{km} \right]$ - magnetska permeabilnost vakuma.

Ako to uzmemo u obzir, kao i vrijednost za frekvenciju $f = 50 \text{ Hz}$, za D_m^2 se dobiva:

$$D_m^2 = \frac{0.738}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \sqrt{50 \cdot K}} = 93.1036 \cdot \sqrt{\rho}$$

$$K = \frac{1}{\rho} \rightarrow \rho \text{ je specifični otpor vodiča}$$

S time i izraz za vlastitu impedanciju vodiča s utjecajem zemlje prelazi u oblik:

$$Z_{ii-z} = R_1 + 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_s}$$

S time i izraz za vlastitu impedanciju jednog zaštitnog užeta s utjecajem zemlje prelazi u oblik:

$$Z_{ii-z} = R_g + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_g}$$

$D_g [m] \rightarrow$ vlastita SGU zaštitnog užeta

$R_g \left[\frac{\Omega}{km} \right] \rightarrow$ djelatni otpor zaštitnog užeta pri 20°C

Međusobna impedancija dviju petlji vodič-zemlja:

$$Z_{ij-z} = 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_{ij}}$$

$D_{ij} [m] \rightarrow$ udaljenost između vodiča odnosno zaštitnog užeta „i“ i vodiča odnosno zaštitnog užeta „j“ (vodič i zaštitno uže su ravnopravno tretirani)

Veza između napona i struja u trofaznim sustavima je definirana Ohmovim zakonom u matricnom obliku.

U razvijenom obliku matricna jednačba glasi :

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_n \\ \vdots \\ \bar{V}_{n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \bar{Z}_{12} & \cdots & \bar{Z}_{1n} & \cdots & \bar{Z}_{1(n+m)} \\ \bar{Z}_{21} & \bar{Z}_{22} & \cdots & \bar{Z}_{2n} & \cdots & \bar{Z}_{2(n+m)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{Z}_{n1} & \bar{Z}_{n2} & \cdots & \bar{Z}_{nn} & \cdots & \bar{Z}_{n(n+m)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{Z}_{(n+m)1} & \bar{Z}_{(n+m)2} & \cdots & \bar{Z}_{(n+m)n} & \cdots & \bar{Z}_{(n+m)(n+m)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \vdots \\ \bar{I}_n \\ \vdots \\ \bar{I}_{n+m} \end{bmatrix}$$

$$Z_{ii-z} = R_1 + 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_s} \rightarrow \text{za vodiče}$$

$$Z_{ij-z} = 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_{ij}} \rightarrow \text{za vodiče i zaštitna užad}$$

$$Z_{ii-z} = R_g + 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_g} \rightarrow \text{za zaštitna užad}$$

b) Metoda SGU:

U proračunu induktiviteta okruglog homogenog vodiča vlastita SGU vodiča je funkcija radijusa vodiča i pereabiliteta vodiča. Za relativni permeabilitet vodiča $\mu_r = 1$ izlazi da je vlastita SGU vodiča :

$$r' = r \cdot e^{-\frac{\mu_r}{4}} = 0.7788 \cdot r$$

Veličinu r' nazivamo reducirani radijus. Uz istu Struju I formirat će se u slučaju punog homogenog vodiča radijusa r isti obuhvatni tok, kao u slučaju šupljeg vodiča beskonačno tanke stijenke, ali radijusa $r' < r$.

Izračunamo vlastitu SGU samo jednog vodiča prema izrazu :

$$d_s = k \cdot r$$

gdje je r vanjski radijus vodiča, a faktor k ćemo izvaditi iz (Prilog II – tablica 1). Za homogene vodiča dan je taj faktor u ovisnosti o broju žica u vodiču, pa imamo u ovom slučaju za zaštitno uže:

Broj žica : 19

$$d_s = k \cdot r = 0.758 \cdot r$$

Faktor $k = 0.758$

i na kraju za vlastitu SGU jednog vodiča zaštitnog užeta (reducirani radijus) dobivamo :

$$D_g = k \cdot r = 0.758 \cdot r = 0.758 \cdot 7.00 = 5.306 \text{ mm}$$

Za vodiče od alučela (aldreyčela) se računa dovoljno točno ako se koristimo grafom za određivanje vlastite SGU za šuplje vodiče u obliku cijevi, a prikazan je u obliku (Prilog 2 – tablica 2). Graf predstavlja funkciju $d_s/r_1 = f(r_2/r_1)$, dakle vrijedi posve općenito (r_1 i r_2 su vanjski i unutarnji radijus šuplje cijevi). Alučel se može prikazivati kao šuplja cijev uz pretpostavku da sva struje teče aluminijskim plaštom. Unutarnji radijus cijevi odgovara radijusu čelične jezgre :

Vanjski radijus : $r_1 = 13.45 \text{ mm}$

Unutarnji radijus : $r_2 = 5.75 \text{ mm}$

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{5.75}{13.45} = 0.4275$$

➔ Iz Priloga II, tablica 2 očitavamo faktor k

$$k = \frac{d_s}{r_1} = 0.8366$$

$$d_s = k \cdot r_1 = 0.8366 \cdot 13.45 = 11.2522 \text{ mm}$$

c) **Redukcija vodiča u snopu :**

Određivanje matrice impedancije kod vodova s vodičima u snopu je dug račun, pa u ovoj projektnoj zadaći ćemo koristiti metodu SGU. Kako se radi o vodičima na maloj međusobnoj udaljenosti, obično se snop zamjeni jednim vodičem odgovarajućeg srednjeg geometrijskog radijusa. Pogreška je zanemariva. Potrebo je izračunati vlastitu SGU vodiča. Vodiče snopa razmještene na međusobnoj udaljenosti D_{snop} možemo zamjeniti jednim vodičem. Reducirana vlastita SGU za tipične snopove dana je u (Prilog III).

U ovom slučaju imamo tri vodiča u snopu pa se vlastiti SGU vodiča (reducirani radijus snopa vodiča) računa po izrazu :

$$D_s = \sqrt[3]{d_s \cdot D_{snop}^2} = \sqrt[3]{11.252 \cdot 420^2} = 125.673 \text{ mm}$$

Podaci koji će nam trebati prilikom računanja (ρ je prosječni specifični otpor tla, u ovoj zadaći konkretno **močvara**, te iz Priloga III. očitamo vrijednost):

$$\rho = 30 \left[\frac{\Omega}{m} \right] \rightarrow \text{očitano iz tablice}$$

$$D_g = 5.306 \text{ [mm]}$$

$$D_s = 68.745 \text{ [mm]}$$

$$R_0 = 0.08270 \left[\frac{\Omega}{km} \right] \rightarrow \text{ranije izračunato}$$

$$R_{1f} = 0.027642 \left[\frac{\Omega}{km} \right] \rightarrow \text{ranije izračunato}$$

$$Z_{AA} = Z_{BB} = Z_{CC} = R_{1f} + 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_s} = 0.027642 + 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot$$

$$\ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{30}}{57.848 \cdot 10^{-3}} = 0.077642 + j \cdot 0.570488$$

$$Z_{PP} = Z_{QQ} = R_{1f} + 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_s}$$

$$= 1.2137 + 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{30}}{68.745 \cdot 10^{-3}} = 1.2637 + j \cdot 0.7205$$

$$\begin{aligned} Z_{AB} = Z_{BA} &= 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_{ij}} = 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{30}}{14.000} \\ &= 0.05 + j \cdot 0.2257 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{AC} = Z_{CA} &= 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_{ij}} = 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{30}}{14.000} \\ &= 0.05 + j \cdot 0.2257 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{AP} = Z_{PA} &= 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_{ij}} = 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{30}}{22.178} \\ &= 0.05 + j \cdot 0.1968 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{AQ} = Z_{QA} &= 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_{ij}} = 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{30}}{22.178} \\ &= 0.05 + j \cdot 0.1968 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{BC} = Z_{CB} &= 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_{ij}} = 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{30}}{28.000} \\ &= 0.05 + j \cdot 0.182 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{BP} = Z_{PB} &= 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_{ij}} = 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{30}}{20.877} \\ &= 0.05 + j \cdot 0.206 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{BQ} = Z_{QB} &= 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_{ij}} = 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{30}}{30.657} \\ &= 0.05 + j \cdot 0.1765 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{CP} = Z_{PC} &= 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_{ij}} = 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{30}}{30.657} \\ &= 0.05 + j \cdot 0.1765 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{CQ} = Z_{QC} &= 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_{ij}} = 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{30}}{20.877} \\ &= 0.05 + j \cdot 0.206 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{QP} = Z_{PQ} &= 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{\rho}}{D_{ij}} = 0.05 + j \cdot 0.0628 \cdot \ln \frac{93.1 \cdot \sqrt{30}}{18.000} \\ &= 0.05 + j \cdot 0.2099 \end{aligned}$$

$$[Z^{VOD}] = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} & Z_{AP} & Z_{AQ} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} & Z_{BP} & Z_{BQ} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & Z_{CP} & Z_{CQ} \\ Z_{PA} & Z_{PB} & Z_{PC} & Z_{PP} & Z_{PQ} \\ Z_{QA} & Z_{QB} & Z_{QC} & Z_{QP} & Z_{QQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_I & Z_{II} \\ Z_{III} & Z_{IV} \end{bmatrix}$$

$$[Z^{VOD}] =$$

$$\begin{bmatrix} 0.077642 + j \cdot 0.570488 & 0.05 + j \cdot 0.2257 & 0.05 + j \cdot 0.2257 & 0.05 + j \cdot 0.1968 & 0.05 + j \cdot 0.1968 \\ 0.05 + j \cdot 0.2257 & 0.077642 + j \cdot 0.570488 & 0.05 + j \cdot 0.182 & 0.05 + j \cdot 0.2006 & 0.05 + j \cdot 0.1765 \\ 0.05 + j \cdot 0.2257 & 0.05 + j \cdot 0.182 & 0.077642 + j \cdot 0.570488 & 0.05 + j \cdot 0.1765 & 0.05 + j \cdot 0.2006 \\ 0.05 + j \cdot 0.1968 & 0.05 + j \cdot 0.2006 & 0.05 + j \cdot 0.1765 & 1.2637 + j \cdot 0.7205 & 0.05 + j \cdot 0.2099 \\ 0.05 + j \cdot 0.1968 & 0.05 + j \cdot 0.1765 & 0.05 + j \cdot 0.2006 & 0.05 + j \cdot 0.2099 & 1.2637 + j \cdot 0.7205 \end{bmatrix}$$

$$[Z_I] = \begin{bmatrix} 0.077642 + j \cdot 0.570488 & 0.05 + j \cdot 0.2257 & 0.05 + j \cdot 0.2257 \\ 0.05 + j \cdot 0.2257 & 0.077642 + j \cdot 0.570488 & 0.05 + j \cdot 0.182 \\ 0.05 + j \cdot 0.2257 & 0.05 + j \cdot 0.182 & 0.077642 + j \cdot 0.570488 \end{bmatrix}$$

$$[Z_{II}] = \begin{bmatrix} 0.05 + j \cdot 0.1968 & 0.05 + j \cdot 0.1968 \\ 0.05 + j \cdot 0.2006 & 0.05 + j \cdot 0.1765 \\ 0.05 + j \cdot 0.1765 & 0.05 + j \cdot 0.2006 \end{bmatrix}$$

$$[Z_{III}] = \begin{bmatrix} 0.05 + j \cdot 0.1968 & 0.05 + j \cdot 0.2006 & 0.05 + j \cdot 0.1765 \\ 0.05 + j \cdot 0.1968 & 0.05 + j \cdot 0.1765 & 0.05 + j \cdot 0.2006 \end{bmatrix}$$

$$[Z_{IV}] = \begin{bmatrix} 1.2637 + j \cdot 0.7205 & 0.05 + j \cdot 0.2099 \\ 0.05 + j \cdot 0.2099 & 1.2637 + j \cdot 0.7205 \end{bmatrix}$$

$$[Z^e] = [Z_I] - [Z_{II}] \cdot [Z_{IV}]^{-1} \cdot [Z_{III}]$$

$$[Z^e] = \begin{bmatrix} 0.077642 + j \cdot 0.570488 & 0.05 + j \cdot 0.2257 & 0.05 + j \cdot 0.2257 \\ 0.05 + j \cdot 0.2257 & 0.077642 + j \cdot 0.570488 & 0.05 + j \cdot 0.182 \\ 0.05 + j \cdot 0.2257 & 0.05 + j \cdot 0.182 & 0.077642 + j \cdot 0.570488 \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} 0.05 + j \cdot 0.1968 & 0.05 + j \cdot 0.1968 \\ 0.05 + j \cdot 0.206 & 0.05 + j \cdot 0.1765 \\ 0.05 + j \cdot 0.1765 & 0.05 + j \cdot 0.206 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1.2637 + j \cdot 0.7205 & 0.05 + j \cdot 0.2099 \\ 0.05 + j \cdot 0.2099 & 1.2637 + j \cdot 0.7205 \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\cdot \begin{bmatrix} 0.05 + j \cdot 0.1968 & 0.05 + j \cdot 0.206 & 0.05 + j \cdot 0.1765 \\ 0.05 + j \cdot 0.1968 & 0.05 + j \cdot 0.1765 & 0.05 + j \cdot 0.206 \end{bmatrix} =$$

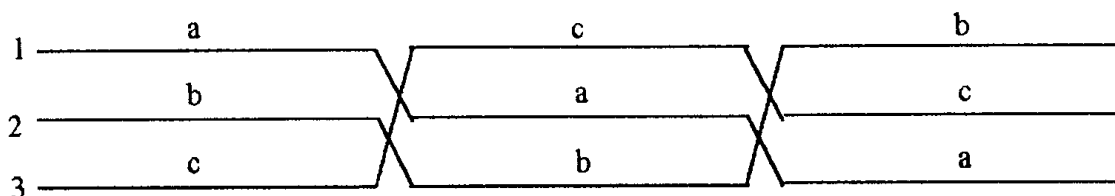
$$[Z^e] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}$$

d) **Preplet voda :**

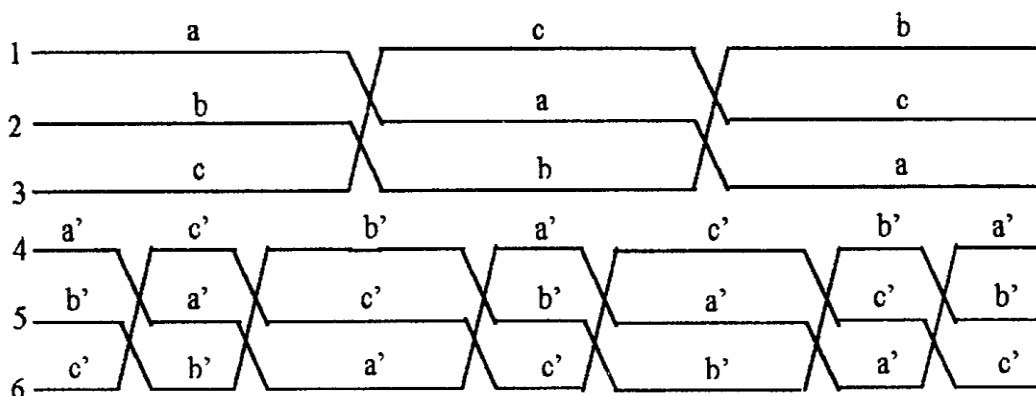
Ako su osi triju vodiča trofaznog voda smještene u vrhovima istostraničnog trokuta, kažemo da je vod simetričan i sva 3 vodiča (a, b, c) ako im je presjek isti imati će isti induktivitet. Međutim, konstrukcijom vodova se ta simetrija rijetko postiže (u stvarnosti to nije tako). Pojedini vodiči istog voda tada imaju nejednake induktivitete što je i za očekivati budući da nisu međusobno jednako udaljeni, pa zbog toga i imaju nejednake reaktancije. Različiti padovi napona u pojedinim fazama dovode u pogonu do izobličenja zvijezde napona i do pogonskih poteškoća. Zbog toga se konstruktivno osigurava električna simetrija vodova, koji su geometrijski nesimetrični, cikličkom zamjenom položaja vodiča na stupu odnosno takozvanim preplitanjem.

Vod se po dužini podijeli na 3 dijela. Potrebna su 2 preplitanja da bi svaki vodič zauzeo sve moguće položaje. Kod ovog voda pretpostavljamo potpuni preplet.

Djelomični preplet je kada faze na nekoj 'jediničnoj' duljini samo zamijene mjesta tako da A dođe na mjesto B, B na C i C na A, dok je potpuni preplet kada se faze unutar te 'jedinične' duljine prepletu 3 puta, tako da faza A na kraju te duljine opet bude na fazi A, odnosno na onom mjestu gdje je bila na početku, B i C isto tako.



Slika 3. Potpuni preplet jednostrukog voda



Slika 4. Potpuni preplet dvostrukog voda

e) **Primjena simetričnih komponenata :**

Matrica simetričnih komponenata izlazi iz matrice ekvivalentnih faznih vodiča primjenom linearnih transformacija. Matrica ekvivalentnih faznih vodiča je simetrična. Kod prepletenog voda treba matricu ekvivalentnih faznih vodiča simetrizirati. Matrica se simetrizira na taj način da se uzme sretnja vrijednost vandijagonalnih elemenata (podijeljene u skupine, sve zavisi koliko ima zaštitnih užadi), umjesto da se računa posebna matrica za svaku dionicu preplitanja, isto tako se računa aritmetička sredina dijagonalnih elemenata.

Budući da možemo uzeti matricu impedancija ekvivalentnih faznih vodiča, koja je simetrična, dobivamo da je:

$$Z_{ab} = Z_{ba} \quad Z_{ac} = Z_{ca} \quad Z_{bc} = Z_{cb}$$

Dobivanje aritmetičke sredine za vlastite i međusobne impedancije:

$$Z_s = \frac{1}{3} (Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc}) = 0.09888 + j \cdot 0.477$$

$$Z_m = \frac{1}{3} (Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{bc}) = 0.07075 + j \cdot 0.167355$$

Matrica ekvivalentnih faznih vodiča za prepletni vod glasi:

$$[Z_1^{abc}]_{prepletni} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix}$$

$$[Z_1^{abc}]_{prepletni} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.09888 + j \cdot 0.477 & 0.07075 + j \cdot 0.167355 & 0.07075 + j \cdot 0.167355 \\ 0.07075 + j \cdot 0.167355 & 0.09888 + j \cdot 0.477 & 0.07075 + j \cdot 0.167355 \\ 0.07075 + j \cdot 0.167355 & 0.07075 + j \cdot 0.167355 & 0.09888 + j \cdot 0.477 \end{bmatrix}$$

Matrice transformacije za jednostruke vodove:

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

$$\text{Pri čemu je } a = -0.5 + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = -0.5 - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Matricu $[Z_1^{abc}]$ transformiramo u simetrične komponente:

$$[Z_1^{012}] = [S]^{-1} \cdot [Z_1^{abc}] \cdot [S] = \begin{bmatrix} Z_s + 2 \cdot Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix}$$

$$\text{Pri čemu je } Z_0 = Z_s + 2 \cdot Z_m \rightarrow \text{nulta impedancija}$$

$$Z_1 = Z_d = Z_s - Z_m \rightarrow \text{pogonska (direktna) impedancija}$$

$$[Z_1^{012}] = \begin{bmatrix} 0.2404 + j \cdot 0.81244 & 0 & 0 \\ 0 & 0.02812 + j \cdot 0.31037 & 0 \\ 0 & 0 & 0.02812 + j \cdot 0.31037 \end{bmatrix}$$

Za nultu impedanciju Z_0 jedne faze dobivamo slijedeći izraz:

$$Z_0 = R_0 + j \cdot \omega \cdot L_0 \quad R_0 = 0.2404 \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad \omega \cdot L_0 = 0.81244$$

$$L_0 = \frac{0.81244}{\omega} = \frac{0.81244}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0.81244}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.002586 [H]$$

Direktna i inverzna impedancija:

$$Z_1 = R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1 \quad R_1 = 0.02812 \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad \omega \cdot L_1 = 0.31037$$

$$L_1 = \frac{0.31037}{\omega} = \frac{0.31037}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0.31037}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.000986 [H]$$

9.) Kapacitet :

a) Primjena simetričnih komponenata :

Matrica napona i naboja vodiča može se izraziti jednadžom koja definira matricu potencijalnih koeficijenata :

$$\begin{aligned}[V] &= [P] \cdot [Q] \\ [V] &\rightarrow \text{vektor napona na vodičima} \\ [P] &\rightarrow \text{matrica potencijalnih koeficijenata} \\ [Q] &\rightarrow \text{vektor naboja na vodičima}\end{aligned}$$

Potencijali vodiča prema zemlji su funkcija naboja na vodičima.

U stacionarnom stanju vrijedi izraz :

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_n \\ \vdots \\ \bar{V}_{n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} & \dots & P_{1(n+m)} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} & \dots & P_{2(n+m)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} & \dots & P_{n(n+m)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ P_{(n+m)1} & P_{(n+m)2} & \dots & P_{(n+m)n} & \dots & P_{(n+m)(n+m)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{Q}_1 \\ \bar{Q}_2 \\ \vdots \\ \bar{Q}_n \\ \vdots \\ \bar{Q}_{n+m} \end{bmatrix}$$

Dijagonalni članovi matrice potencijalnih koeficijenata za vodiče određuju se iz izraza :

$$P_{ii} = 18 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \left(\frac{H_{ii}}{D_{sc}} \right) \text{ [km/F]}$$

Dok za zaštitno uže vrijedi formula:

$$P_{ii} = 18 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \left(\frac{H_{ii}}{D_{gc}} \right) \text{ [km/F]}$$

Izvandijagonalni članovi matrice potencijalnih koeficijenata određujemo prema formuli:

$$P_{ij} = 18 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \left(\frac{H_{ij}}{D_{ij}} \right) \text{ [km/F]}$$

H_{ii} [m] – udaljenost vodiča ili zaštitnog užeta od svoje slike koja se zrcali

H_{ij} [m] – udaljenost vodiča ili zaštitnog užeta od svoje slike koja se zrcaliodnosno užeta "j"
(vodiči i zaštitna užad su jednako tretirani)

Tvorba mtrice potencijalnih koeficijenata podliježe svim pravilima kao i matrice impendancija. Kod određivanja vlastite SGU vodiča za proračun kapaciteta (reducirani radijus snopa) računamo na isti način kao kod induktiviteta, samo što umjesto vlastite SGU vodiča „ d_s “ uzmemo u proračun vanjski radijus vodiča r_1 . Na taj način izračunamo vlastitu SGU vodiča:

$$\begin{aligned}D_{sc} &= \sqrt[3]{r_1 \cdot D_{snop}^2} = \sqrt[3]{13.45 \cdot 420^2} = 133.375 \text{ mm} \\ D_{gc} &= r_g = 7.00 \text{ mm}\end{aligned}$$

Komponente matrice $[Z^{VOD}]$:

$$\begin{aligned}P_{AA} &= 18 \cdot 10^6 \cdot \ln \left(\frac{24.66}{133.375 \cdot 10^{-3}} \right) = 9.39559 \cdot 10^7 \text{ [km/F]} \\ P_{BB} &= 18 \cdot 10^6 \cdot \ln \left(\frac{24.66}{133.375 \cdot 10^{-3}} \right) = 9.39559 \cdot 10^7 \text{ [km/F]} \\ P_{CC} &= 18 \cdot 10^6 \cdot \ln \left(\frac{24.66}{133.375 \cdot 10^{-3}} \right) = 9.39559 \cdot 10^7 \text{ [km/F]} \\ P_{PP} &= 18 \cdot 10^6 \cdot \ln \left(\frac{49.8}{7 \cdot 10^{-3}} \right) = 15.9657 \cdot 10^7 \text{ [km/F]} \\ P_{QQ} &= 18 \cdot 10^6 \cdot \ln \left(\frac{49.8}{7 \cdot 10^{-3}} \right) = 15.9657 \cdot 10^7 \text{ [km/F]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{AB} &= P_{BA} = 18 \cdot 10^6 \cdot \ln\left(\frac{28.356}{14.000}\right) = 1.2704 \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right] \\
 P_{AC} &= P_{CA} = 18 \cdot 10^6 \cdot \ln\left(\frac{28.356}{14.000}\right) = 1.2704 \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right] \\
 P_{AP} &= P_{PA} = 18 \cdot 10^6 \cdot \ln\left(\frac{45.882}{22.178}\right) = 1.308 \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right] \\
 P_{AQ} &= P_{QA} = 18 \cdot 10^6 \cdot \ln\left(\frac{45.882}{22.178}\right) = 1.308 \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right] \\
 P_{BC} &= P_{CB} = 18 \cdot 10^6 \cdot \ln\left(\frac{37.31}{28.000}\right) = 0.5167 \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right] \\
 P_{BP} &= P_{PB} = 18 \cdot 10^6 \cdot \ln\left(\frac{45.207}{20.877}\right) = 1.390 \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right] \\
 P_{BQ} &= P_{QB} = 18 \cdot 10^6 \cdot \ln\left(\frac{50.474}{30.657}\right) = 0.897 \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right] \\
 P_{CP} &= P_{PC} = 18 \cdot 10^6 \cdot \ln\left(\frac{50.474}{30.657}\right) = 0.897 \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right] \\
 P_{CQ} &= P_{QC} = 18 \cdot 10^6 \cdot \ln\left(\frac{45.207}{20.877}\right) = 1.390 \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right] \\
 P_{PQ} &= P_{QP} = 18 \cdot 10^6 \cdot \ln\left(\frac{67.639}{18.000}\right) = 2.382 \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right]
 \end{aligned}$$

$$[P^{VOD}] = \begin{bmatrix} P_{AA} & P_{AB} & P_{AC} & P_{AP} & P_{AQ} \\ P_{BA} & P_{BB} & P_{BC} & P_{BP} & P_{BQ} \\ P_{CA} & P_{CB} & P_{CC} & P_{CP} & P_{CQ} \\ P_{PA} & P_{PB} & P_{PC} & P_{PP} & P_{PQ} \\ P_{QA} & P_{QB} & P_{QC} & P_{QP} & P_{QQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_I & P_{II} \\ P_{III} & P_{IV} \end{bmatrix} \left[\frac{km}{F}\right]$$

$$[P^{VOD}] = \begin{bmatrix} 9.39198 & 1.2704 & 1.2704 & 1.308 & 1.308 \\ 1.2704 & 9.39198 & 0.5167 & 1.390 & 0.897 \\ 1.2704 & 0.5167 & 9.39198 & 0.897 & 1.390 \\ 1.308 & 1.390 & 0.897 & 16.4507 & 2.382 \\ 1.308 & 0.897 & 1.390 & 2.382 & 16.4507 \end{bmatrix} \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right]$$

$$[P_I] = \begin{bmatrix} 9.39198 & 1.2704 & 1.2704 \\ 1.2704 & 9.39198 & 0.5167 \\ 1.2704 & 0.5167 & 9.39198 \end{bmatrix} \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right]$$

$$[P_{II}] = \begin{bmatrix} 1.308 & 1.308 \\ 1.390 & 0.897 \\ 0.897 & 1.390 \end{bmatrix} \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right]$$

$$[P_{III}] = \begin{bmatrix} 1.308 & 1.390 & 0.897 \\ 1.308 & 0.897 & 1.390 \end{bmatrix} \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right]$$

$$[P_{IV}] = \begin{bmatrix} 16.4507 & 2.382 \\ 2.382 & 16.4507 \end{bmatrix} \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right]$$

$$[P^e] = [P_I] - [P_{II}] \cdot [P_{IV}]^{-1} \cdot [P_{III}]$$

$$\begin{aligned}
 [P^e] &= \begin{bmatrix} 9.39198 & 1.2704 & 1.2704 \\ 1.2704 & 9.39198 & 0.5167 \\ 1.2704 & 0.5167 & 9.39198 \end{bmatrix} \cdot 10^7 - \begin{bmatrix} 1.308 & 1.308 \\ 1.390 & 0.897 \\ 0.897 & 1.390 \end{bmatrix} \\
 &\cdot 10^7 \cdot \begin{bmatrix} 16.4507 & 2.382 \\ 2.382 & 16.4507 \end{bmatrix}^{-1} \cdot 10^7 \cdot \begin{bmatrix} 1.308 & 1.390 & 0.897 \\ 1.308 & 0.897 & 1.390 \end{bmatrix} \cdot 10^7 \left[\frac{km}{F}\right]
 \end{aligned}$$

Matrica kapacitivnih susceptancija :

$$[B^{abc}] = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot [P^e]^{-1}$$

$$[B^{abc}] = \begin{bmatrix} 3.5085 & -0.4050 & -0.4050 \\ -0.4050 & 3.4511 & -0.09554 \\ -0.4050 & -0.09554 & 3.4511 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6}$$

Matricu simetričnih komponenata za sustac ekvivalentnih faznih sesceptancija vodiča dobivamo na isti način kao i matricu simetričnih komponenata za sustav ekvivalentnih faznih impedancija :

$$[B_1^{012}] = [S]^{-1} \cdot [B_1^{abc}] \cdot [S] = \begin{bmatrix} B_0 & 0 & 0 \\ 0 & B_d & 0 \\ 0 & 0 & B_i \end{bmatrix}$$

Matrica ekvivalentnih faznih susceptancija prepletenog voda :

$$[B_1^{abc}]_{prepletni} = \begin{bmatrix} B_s & B_m & B_m \\ B_m & B_s & B_m \\ B_m & B_m & B_s \end{bmatrix}$$

$$B_s = \frac{1}{3} (B_{aa} + B_{bb} + B_{cc}) = 3.4702 \cdot 10^{-6}$$

$$B_m = \frac{1}{3} (B_{ab} + B_{ac} + B_{bc}) = -3.018 \cdot 10^{-7}$$

$$B_0 = B_s + 2 \cdot B_m = 2.866 \cdot 10^{-6}$$

$$B_d = B_i = B_s - B_m = 3.77211 \cdot 10^{-6}$$

$$[B_1^{012}] = \begin{bmatrix} 2.866 & 0 & 0 \\ 0 & 3.77211 & 0 \\ 0 & 0 & 3.77211 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6}$$

Za nulti kapacitet po vodiču dobivamo :

$$C_0 = \frac{B_0}{3 \cdot \omega} = \frac{2.866 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot \omega} = \frac{2.866 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{2.866 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 9.1244 \cdot 10^{-9} [F]$$

Direktni i inverzni kapacitet po fazi dobivamo :

$$C_0 = \frac{B_1}{\omega} = \frac{3.77211 \cdot 10^{-6}}{\omega} = \frac{3.77211 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{3.77211 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1.2007 \cdot 10^{-8} [F]$$

10.) Najveća struja jedne faze u normalnom pogonu :

Najveća struja zbog jednog vodiča ograničena je sa granično temperaturom zagrijavanja u normalnom pogonu :

$$I_{max1} = \sqrt{\frac{\chi_{Al80}}{\chi_{Cu80}} \cdot 2 \cdot r_1 \cdot 85 \cdot A_{Al}} = 702.78514 \text{ A}$$

$$\chi_{Cu80} = 45.4 \text{ Sm/mm}^2 \rightarrow \text{vodljivost bakra na } 80^\circ\text{C}$$

$$\chi_{Al80} = 28.08 \text{ Sm/mm}^2 \rightarrow \text{vodljivost aluminija na } 80^\circ\text{C}$$

$$A_{Al} = 349.247 \text{ mm}^2$$

$$r_1 = 13.45 \text{ mm}$$

Najveća struja jedne faze :

$$I_{max} = I_{max1} \cdot s = 2108.355421 \text{ A}$$

11.) Nazivni napon voda :

Nazivni napon voda se očitava iz broja članaka izolatorskog lanca :

$$U_{nazivno} = 400 \text{ kV} \rightarrow \text{zadano u zadatku}$$

12.) Najveća snaga u normalnom pogonu :

$$S = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{max} = 1460.71184 \text{ MVA}$$

13.) Jakost električnog polja na površini vodiča :

Korona nastaje kad je jakost električnog polja na površini vodiča prekorači električnu čvrstoću zraka. Jakost električnog polja kontroliramo na površini vodiča jer je tamo jakost polja najveća. Za trofazni vod sa više vodiča u snopu, izraz za maksimalnu vrijednost polja je :

$$E_{max} = \frac{U_{max}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(1 + (s - 1) \cdot \frac{r_1}{r_{snop}})}{s \cdot r_1 \cdot \ln(\frac{D_m}{D_s})} = 14.146246 \text{ [kV/cm]}$$

U_{max} je najviša vrijednost napona koja se u normalnim pogonskim uvjetima može pojaviti u bilo kojem trenutku i u bilo kojoj točki mreže :

$$U_{max} = 1.1 \cdot U_n = 1.1 \cdot 400 = 440 \text{ kV}$$

$$s = 3 \rightarrow \text{broj vodiča u snopu}$$

$$r_1 = 13.45 \text{ cm} \rightarrow \text{vanjski radijus vodiča}$$

$$r_{snop} = \frac{\sqrt{3} \cdot D_{snop}}{3} = \frac{420}{2} = 242.487 \text{ mm}$$

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} = \sqrt[3]{14 \cdot 28 \cdot 14} = 17.6388 \text{ m}$$

$$D_s = 125.673 \text{ mm}$$

14.) Kritični napon :

Kritični napon je onaj pogonski napon kod kojega jakost električnog polja na površini vodiča taman dosegne vrijednost električne čvrstoće. Pogonski napon je manji od kritičnog neće doći do pojave korone. Ako je pogonski napon veći od kritičnog dolazi do pojave korone.

Izraz za kritični napon je izveden uz pretpostavku da je jakost električnog polja na površini vodiča jednaka električnoj čvrstoći koja u normalnim prilikama iznosi 30 kV/cm . Dobivamo linijski napon U_{kr} iz jednadžbe:

$$U_{kritično} = \frac{21.1 \cdot \sqrt{3} \cdot s \cdot r_1 \cdot \ln\left(\frac{D_m}{D_s}\right)}{1 + (s - 1) \cdot \left(\frac{r_1}{r_{snop}}\right)} = 656.2844398 [\text{kV}]$$

$$U_{max} = 1.1 \cdot U_n = 1.1 \cdot 400 = 440 \text{ kV}$$

$$s = 3 \rightarrow \text{broj vodiča u snopu}$$

$$r_1 = 1.345 \text{ cm} \rightarrow \text{vanjski radijus vodiča}$$

$$r_{snop} = \frac{\sqrt{3} \cdot D_{snop}}{3} = \frac{420}{2} = 210 \text{ mm}$$

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} = \sqrt[3]{14 \cdot 28 \cdot 14} = 17.6388 \text{ m}$$

$$D_s = 125.673 \text{ mm}$$

15.) Tablica rješenja :

Provjera rješenja:

JMBAG	003644855
I _{max} [A]	2108.355
U _n [kV]	400
S _{max} [MVA]	1460.711
E [kV/cm]	14.14624
U _{krit} [kV]	656.2844
R ₁ po fazi [Ohm/km]	0.02812
X ₁ po fazi [Ohm/km]	0.31037
B ₁ po fazi [microS/km]	3.7721
L ₁ po fazi [mH/km]	0.9879
C ₁ po fazi [microF/km]	0.012007
R ₀ po fazi [Ohm/km]	0.24040
X ₀ po fazi [Ohm/km]	0.81244
B ₀ po fazi [microS/km]	2.8665
L ₀ po fazi [mH/km]	2.5860
C ₀ po fazi [microF/km]	0.00912