

Elementi elektroenergetskih sistema

- Stubovi
 - Odredjivanje visine stuba
 - Električni proračun nadzemnih vodova
 - Induktivnost nadzemnog voda

2.3 Stubovi

Podela:

1. Prema materijalu:

- drveni (za NN do 35kV), mala trajnost, potiskuju ih armirano – betonski
- armirano – betonski (NN i SN, do 35kV, teški, pa se ne koriste za više napone (teški za transport)
- čelično rešetkasti – (za SN i VN), u mrežama 35, 110, 220 i 400 kV. U mrežama nižih napona za specijalne namene (prelaz pruge, puta, drugi vod, reka....).

2.3 Stubovi

2. Prema položaju duž trase:

- linijski – duž linije koja je prava
- ugaoni – gde trasa ima skretanje
- krajnji stub – gde se završava nadzemni vod

2.3 Stubovi

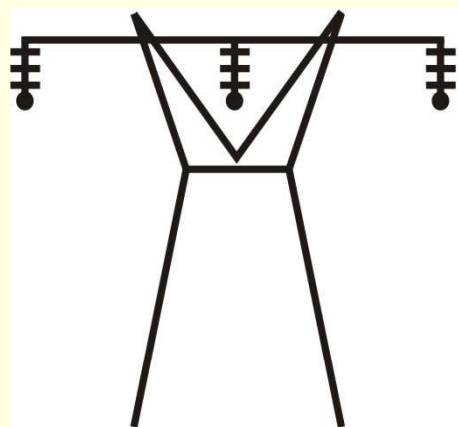
3. Po funkciji:

- noseći
- zatezni

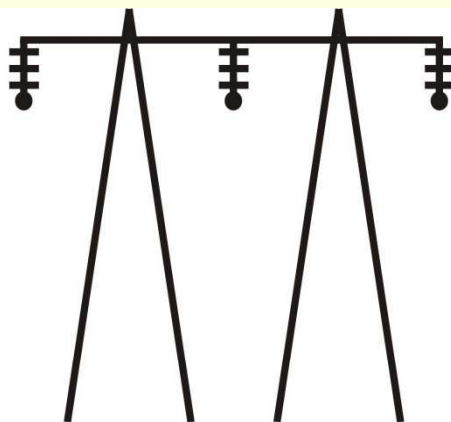
4. Po obliku:

- portalni
- Y stub
- jela
- bure
- Donau

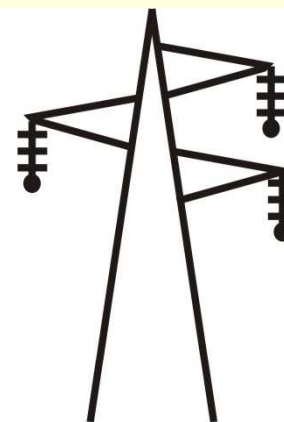
2.3 Stubovi



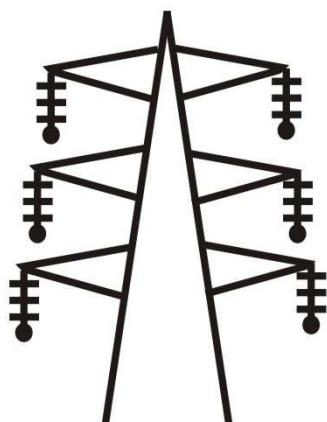
Y-stub



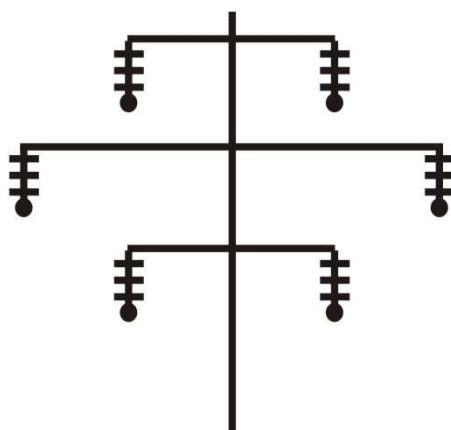
Portalni



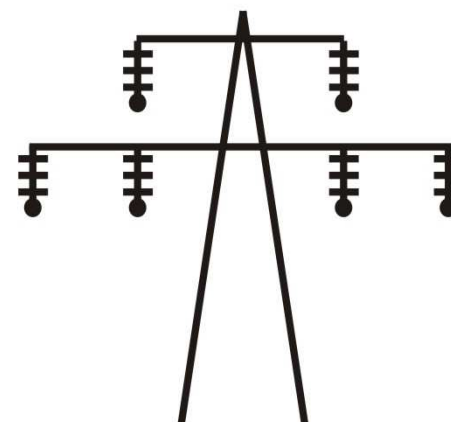
Jela



Jela
dvosistemski



Bure



Donau

2.3.1 Odredjivanje visine stuba

- Visine stubova nadzemnog voda moraju obezbediti da pri max. ugibima, minimalno vertikalno rastojanje provodnika od tla ili objekta preko koga vod prelazi, bude jednako ili veće od sigurnosne visine.
- Sigurnosna visina (H_{sig}) – najmanja dozvoljena vertikalna udaljenost provodnika, odnosno delova pod naponom od zemlje ili nekog objekta, pri temperaturi $+40^{\circ}\text{C}$, odnosno -5°C sa normalnim dodatnim opterećenjem (gleda se kritičniji slučaj).

2.3.1 Odredjivanje visine stuba

- Znači visina voda mora da bude veća od sigurnosne visine odnosno:

$$H_{\min} \geq H_{\text{sig}}$$

- Sigurnosna visina u propisima je definisana za različite vrste terene ili objekata preko koga prelazi vod.

2.3.1 Odredjivanje visine stuba

Sigurnosne visine za vodove nazivnog napona do 110 kV:

Vrste terena ili objekata preko koga prelazi vod	Hsig [m]	Dsig [m]
Nepistupačna mesta (močvare....)	4	3
Mesta pristupačna za vozila	6	5
Nepristupačni delovi zgrada (krov, dimnjak i slično)	3	3
Pristupačni delovi zgrada (terasa, balkon)	5	4
Putevi	7	-

2.3.1 Odredjivanje visine stuba

- Sigurnosne visine za nazivne napone 220 i 400 kV:
- Povećavaju se za 0.75, odnosno 2m, u odnosu na sigurnosne visine za napone do 110 kV.

$$H_{sig\ 220} = H_{sig} + 0.75 \text{ [m]}$$

$$H_{sig\ 400} = H_{sig} + 2 \text{ [m]}$$

$$H_{st} \geq H_{sig} + f_{\max} + l_I$$

2.3.1 Odredjivanje visine stuba

- Sigurnosna udaljenost (D_{sig}): je najmanja dozvoljena udaljenost provodnika, odnosno delova pod naponom, od zemlje ili nekog drugog objekta, u bilo kom pravcu, pri temperaturi $+40^{\circ}\text{C}$ i opterećenju vetrom od nule do punog iznosa.
- Sigurnosna udaljenost je merodavna za odredjivanje udaljenosti izmedju okolnih objekata i voda: $D_{min} \geq D_{sig}$

2.3.1 Odredjivanje visine stuba

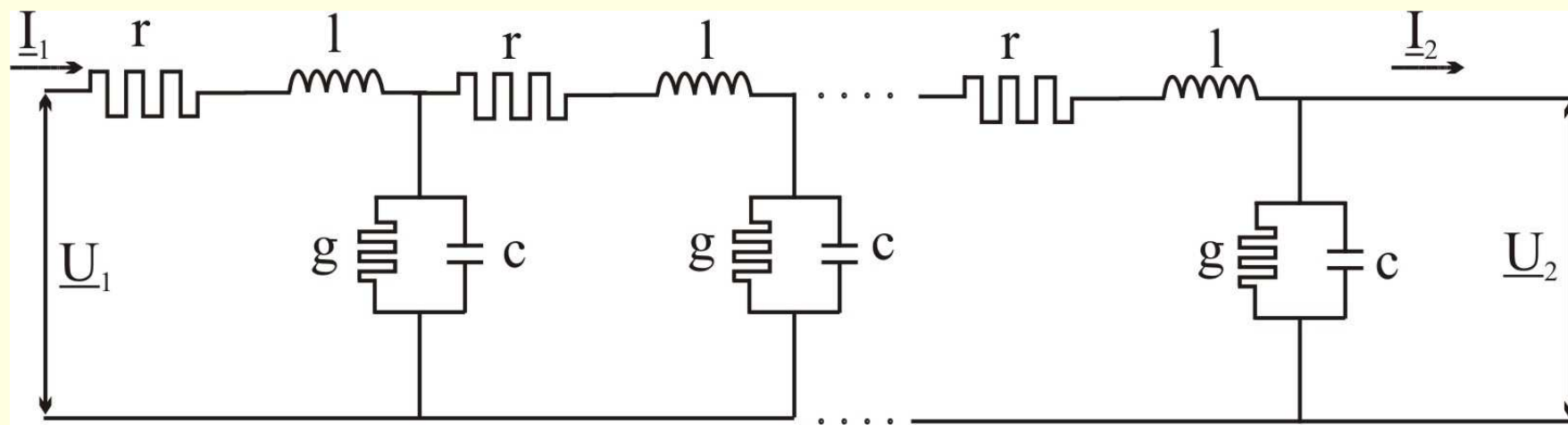
- Sigurnosna udaljenost se povećava za nazivne napone 220 i 400 kV za 0.75m, odnosno 2m (isto kao i sigurnosna visina).

$$D_{sig\,220} = D_{sig} + 0.75$$

$$D_{sig\,400} = D_{sig} + 2$$

2.4 Električni proračun nadzemnih vodova

- Najtačnija šema dalekovoda je kada se dalekovod zameni podužnim parametrima:



r – podužna aktivna otpornost (rezistansa)

l – podužna induktivnost

c – podužna kapacitivnost

g – podužna aktivna odvodnost (konduktansa)

2.4 Električni proračun nadzemnih vodova

- Potrebno je izračunati ove podužne parametre:

$$\underline{z} = r + j\omega l = r + jx$$

$\underline{z}$ – podužna impedansa (kompleksna veličina)

x – podužna reaktivna otpornost (reaktansa)

$$\underline{y} = g + j\omega c = g + jb$$

$\underline{y}$ – podužna admitansa

b – podužna kapacitivna provodnost (susceptansa)

2.4 Električni proračun nadzemnih vodova

- cilj: Treba trofazni sistem uprostiti tako da se posmatra kao jednofazni i sve proračune raditi za jednofazni. Zatim, rezultate primeniti na druge dve faze (ako je potrebno), faznim pomerajem za 120° , odnosno 240° .
- Ovo je moguće primeniti samo za ustaljene, simetrične režime, dok je za poremećene (nesimetrične) režime neophodno analizirati sve tri faze pojedinačno.

2.4 Električni proračun nadzemnih vodova

- Najtačnija šema voda je sa ravnomerno rasporedjenim parametrima. Ako se koriste ravnomerno rasporedjeni parametri, vod se matematički opisuje jednačinama telegrafičara:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot ch(\underline{k} \cdot L_V) + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_2 \cdot sh(\underline{k} \cdot L_V)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \cdot sh(\underline{k} \cdot L_V) + \underline{I}_2 \cdot ch(\underline{k} \cdot L_V)$$

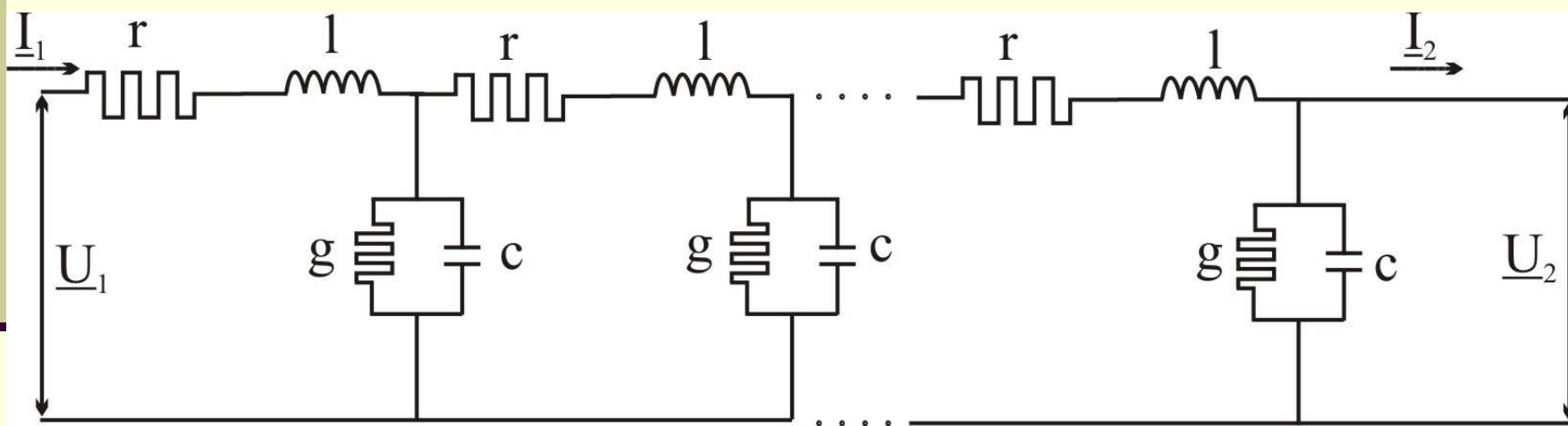
gde su: $\underline{k}$ – konstanta prostiranja $\left(\underline{k} = \alpha + j\beta; \lambda = \frac{2\pi}{\beta} \right)$

$\underline{Z}_C$ – karakteristična impedansa

L_V – dužina voda

2.4 Električni proračun nadzemnih vodova

- Primena jednačina telegrafičara:
 - za najbrže procese
 - za jako duge vodove



2.4.1 Pogonski parametri voda

- Cilj uvođenja pogonskih parametara je da se trofazni sistem ekvivalentira, tako da se može posmatrati kao monofazni.
- Primena je moguća samo za simetrične režime, dok je za nesimetrične poremećene režime (nesimetrični kratki spojevi) obavezno analizirati svaku fazu pojedinačno.
- Problemi kod proračuna pogonskih parametara su veličine kod kojih postoji uticaj jedne faze na drugu (medjusobne induktivnosti i kapacitivnosti).

2.4.11 Podužna aktivna otpornost

- Aktivna otpornost pri proticanju jednosmerne struje je:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{s}$$

ρ – specifična otpornost materijala

l – dužina provodnika

s – presek provodnika

2.4.11 Podužna aktivna otpornost

- Pri proticanju naizmenične struje otpornost je **veća** od one koja se javlja pri proticanju jednosmerne struje usled skin efekta.
- Sskin efekat – struja se neravnomerno raspodeljuje po poprečnom preseku – najmanja gustina struje u sredini, a najveća po površini provodnika; izraženiji je što je provodnik deblji i učestanost struje veća.

2.4.11 Podužna aktivna otpornost

- Povećanje otpornosti zbog ovog efekta:

$$R = R_{=} \cdot \left(1 + \frac{\omega^2 \cdot \mu^2}{192 \cdot \rho} \cdot r \right)^4$$

gde su:

R – otpornost pri proticanju naizmenične struje

r – poluprečnik provodnika

ω – kružna učestanost naizmenične struje ($\omega = 2\pi f$ [1/s])

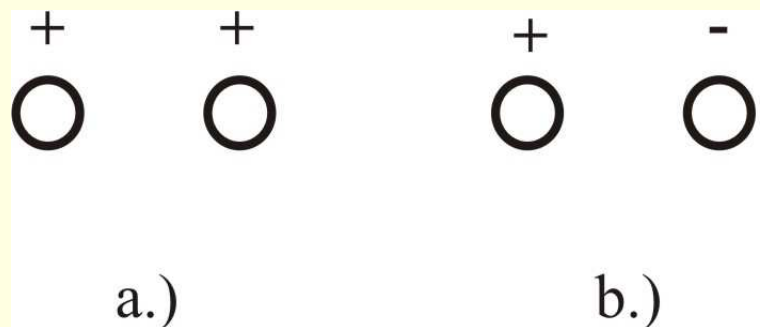
f – učestanost naizmenične struje

μ – magnetska permabilnost provodnika [H/m]

2.4.11 Podužna aktivna otpornost

$$R = R_{\perp} \cdot \left[1 + 7.5 \cdot f^2_{[Hz]} \cdot d^4_{[cm]} \cdot \mu_r \cdot 10^{-7} \right]$$

Uticaj efekta blizine – uticaj bliskog paralelnog vodjenja, struja se neravnomerno raspodeljuje po poprečnom preseku.



Pomeranje težišta struje u
dva bliska provodnika sa strujama
a.) Istog smera
b.) Suprotnog smera

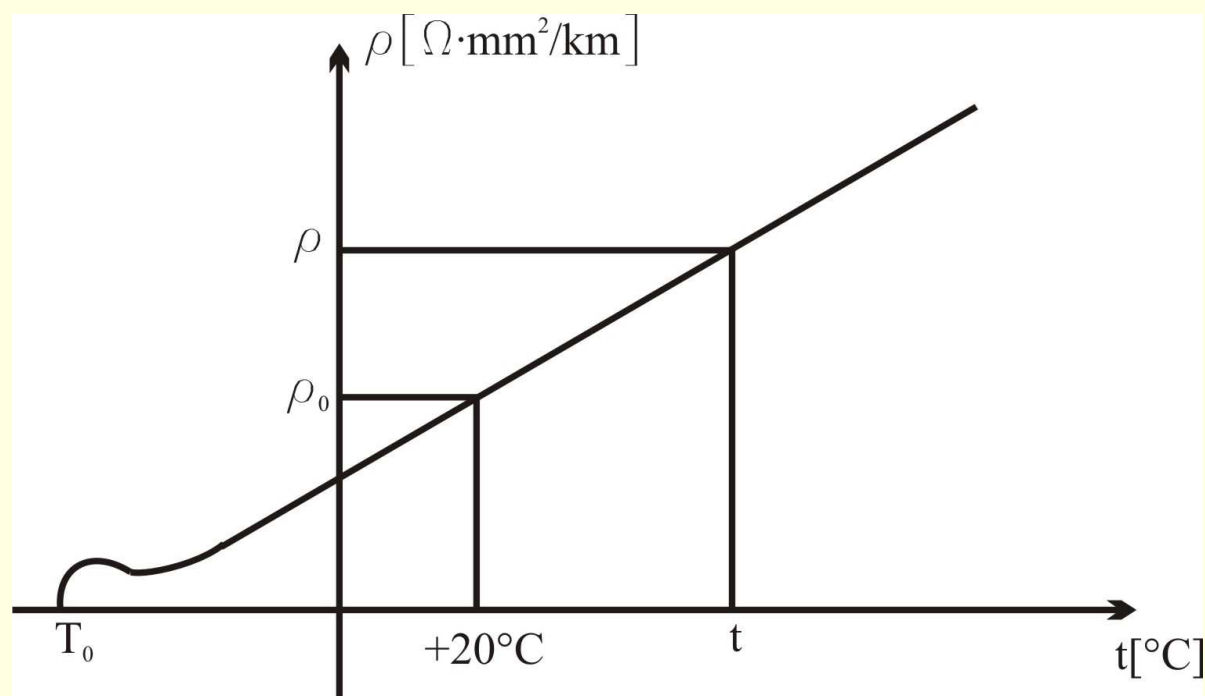
2.4.11 Podužna aktivna otpornost

- Zanemarljivo kod vodova, dok kod kablova ima uticaja.
- Zbog prethodno navedenih razloga, otpornost provodnika se ne izračunava već najčešće proizvođač daje otpornosti: $R_{\underline{\quad}}$ i $R_{\sim}$, na 20°C.

2.4.11 Podužna aktivna otpornost

- Specifična otpornost a time i ukupna otpornost se menja sa promenom temperature.

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_0)]$$



2.4.11 Podužna aktivna otpornost

- Otpornost provodnika na nekoj temperaturi:

$$R_t = R_{20} \cdot \frac{t - T_0}{20 - T_0}$$

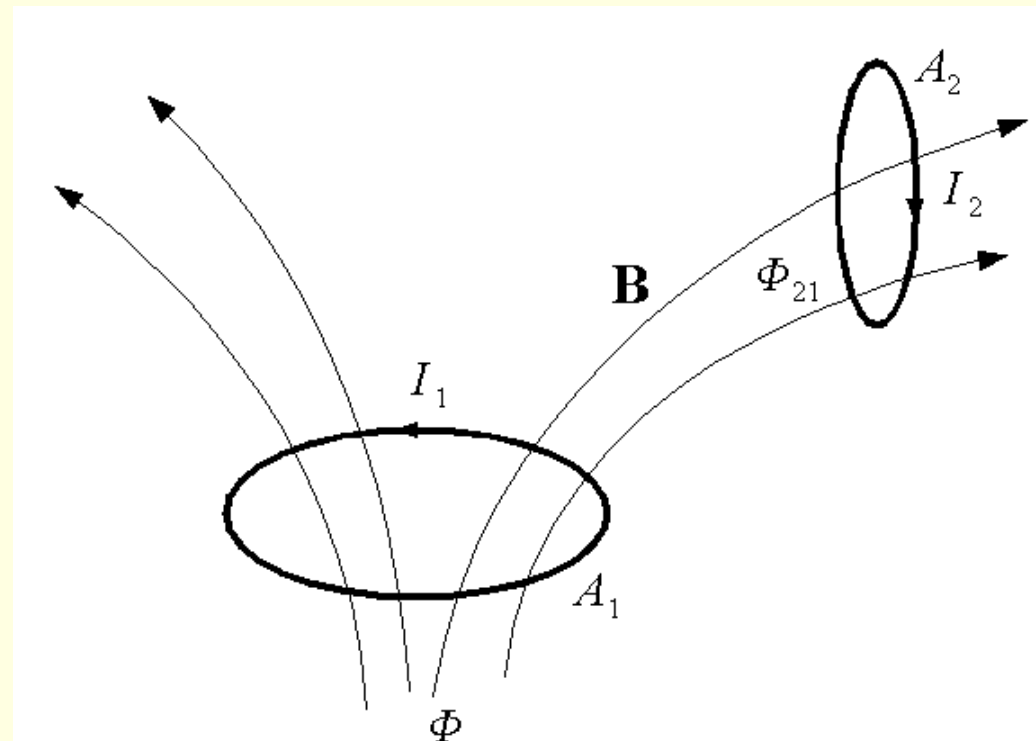
R_{20} - otpornost pri $t=20^{\circ}\text{C}$

T_0 - temperatura superprovodnosti

Materijal	Meki bakar	Tvrđi bakar	Tvrđi aluminijum
T_0	-234.5	-241	-228

2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda

- Šta je induktivnost?
- Preko induktivnosti obuhvata se pojam magnetnog polja usled proticanja struje.



2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda

- Ako u sredini sa konstantnom magnetnom permabilnošću, kroz provodnik protiče struja I usled koje se u konturi k javlja fluks Φ , induktivnost konture k je:

$$L = \frac{\Phi}{I} \Rightarrow \Phi = L \cdot I$$

Φ – jedinica (Veber [Wb])

L – jednica (Henri [H])

I – jedinica (Amper [A])

2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda

- Ako imamo više kontura, fluks u prvoj konturi je:

$$\Phi_1 = L_{11} \cdot I_1 + L_{12} \cdot I_2 + \dots + L_{1k} \cdot I_k + L_{1n} \cdot I_n$$

- A u i-toj konturi:

$$\Phi_i = \sum_{k=1}^n L_{ik} \cdot I_k$$

gde su:

L_{11} - sopstvene induktivnosti

L_{12} - medjusobne induktivnosti

2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda

$$L_{ik} = \frac{\Phi_{ik}}{I_k} \quad L_{ik} = L_{ki} \text{ - medjusobna induktivnost}$$

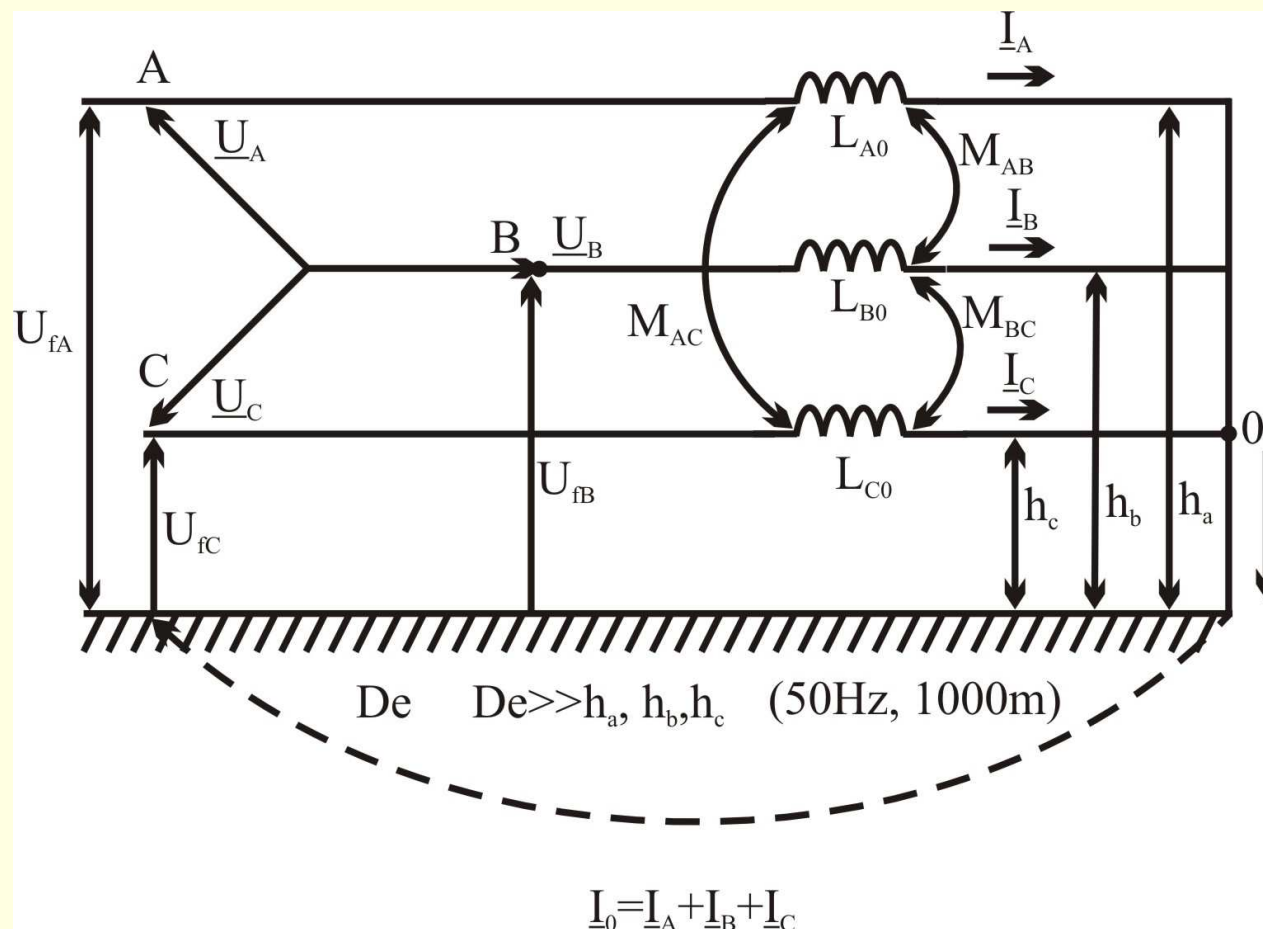
Φ_{ik} - fluks u i-toj konturi koji potiče od struje u k-toj konturi

$$L_{kk} = \frac{\Phi_{kk}}{I_k} \text{ - sopstvena induktivnost}$$

2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda

- Ako posmatramo trofazni vod koji je na jednom kraju uzemljen, a na drugom su naponi: U_{fA} , U_{fB} i U_{fC} (postoji magnetna sprega izmedju pojedinih faza)
- Uticaj zemlje možemo zameniti provodnikom istog preseka na dubini D_e , pr. D_e je ekvivalentna dubina proticanja struje kroz zemlju (ekvivalentna dubina povratne struje ; D_e ; zavisi od specifične otpornosti zemlje i učestanosti struje ; $f = 50\text{Hz}$, D_e je reda 1000 m).

2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda



Zamenska šema sa aspekta induktivnosti (r, c - zanemareno)

2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda

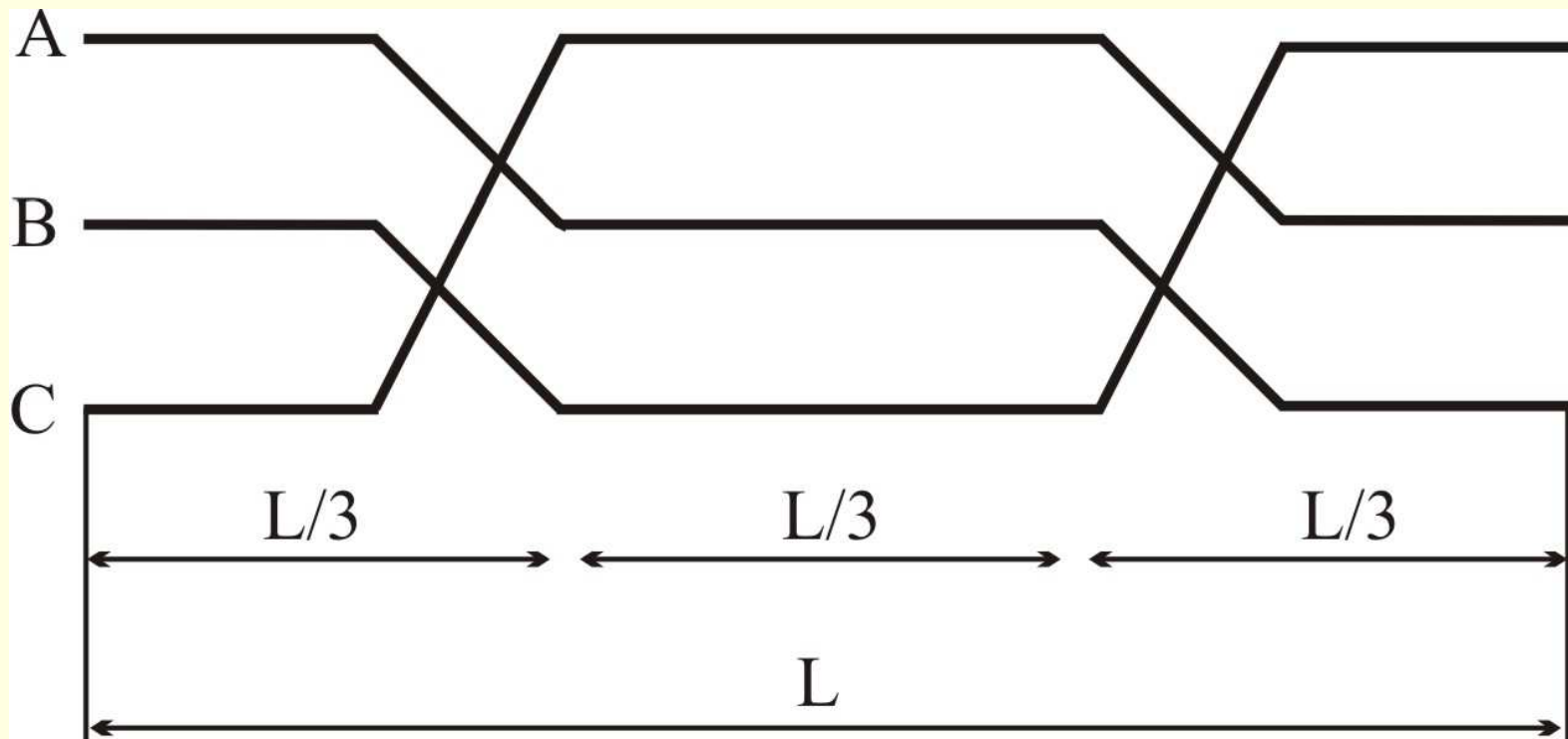
$L_{A0} = L_{B0} = L_{C0} = L_S$, jer $D_e \gg h_a, h_b, h_c$; induktivnost zavisi od oblika konture, a konture su za sve tri faze jako slične

- Medjusobne induktivnosti M u opštem slučaju nisu jednake, odnosno jednake su ako je:
 - vod simetričan (provodnici u temenima jednakostraničnog trougla)
 - izvršena transpozicija provodnika

2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda

- Transpozicija:
 - preplitanje faznih provodnika
 - podeli se na tri deonice i izvrši prevezivanje faznih provodnika
 - Na taj način vrši se simetrisanje nesimetričnog voda

2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda



2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda

- U slučajevima transpozicije i simetričnog voda:

$$M_{AB} = M_{AC} = M_{BC} = M$$

- Uz zanemarivanje otpornosti i kapacitivnosti:

$$\underline{U}_{fA} = j\omega L_S \cdot \underline{I}_A + j\omega M \cdot \underline{I}_B + j\omega M \cdot \underline{I}_C \quad (1)$$

$$\underline{U}_{fB} = j\omega L_S \cdot \underline{I}_A + j\omega M \cdot \underline{I}_B + j\omega M \cdot \underline{I}_C \quad (2)$$

$$\underline{U}_{fC} = j\omega M \cdot \underline{I}_A + j\omega M \cdot \underline{I}_B + j\omega L_S \cdot \underline{I}_C \quad (3)$$

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \underline{I}_0 \quad (4)$$

2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda

- Iz (1) i (4) sledi:

$$\underline{U}_{fA} = j \cdot \omega \cdot L_S \cdot \underline{I}_A + j \cdot \omega \cdot M \cdot (\underline{I}_0 - \underline{I}_A) = j \cdot \omega \cdot (L_S - M) \cdot \underline{I}_A + j \cdot \omega \cdot M \cdot \underline{I}_0$$

analogno tome, dobija se:

$$\underline{U}_{fB} = j \cdot \omega \cdot (L_S - M) \cdot \underline{I}_B + j \cdot \omega \cdot M \cdot \underline{I}_0$$

$$\underline{U}_{fC} = j \cdot \omega \cdot (L_S - M) \cdot \underline{I}_C + j \cdot \omega \cdot M \cdot \underline{I}_0$$

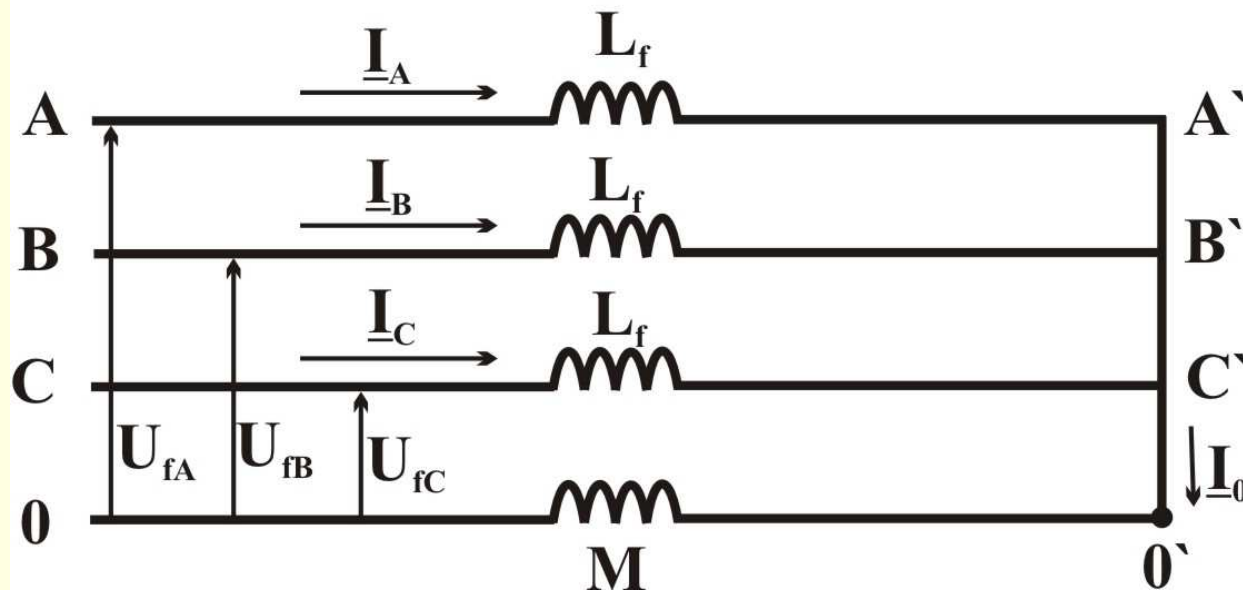
$\underline{I}_0$ - struja kroz zemlju

2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda

- Uvodi se pogonska induktivnost, L_f :

$$L_f = L_S - M$$

Zamenska šema



2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda

$$\underline{U}_{fA} = j \cdot \omega \cdot L_f \cdot \underline{I}_A + j \cdot \omega \cdot M \underline{I}_0$$

$$\underline{U}_{fB} = j \cdot \omega \cdot L_f \cdot \underline{I}_B + j \cdot \omega \cdot M \underline{I}_0$$

$$\underline{U}_{fC} = j \cdot \omega \cdot L_f \cdot \underline{I}_C + j \cdot \omega \cdot M \underline{I}_0$$

2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda

- Specifičan slučaj kada su $\underline{U}_{fA}$, $\underline{U}_{fB}$ i $\underline{U}_{fC}$, trofazni i simetrični, tada sledi:

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0 \Rightarrow \underline{I}_0 = 0$$

- Prethodne relacije postaju:

$$\underline{U}_{fA} = j \cdot \omega \cdot (L_S - M) \cdot \underline{I}_A$$

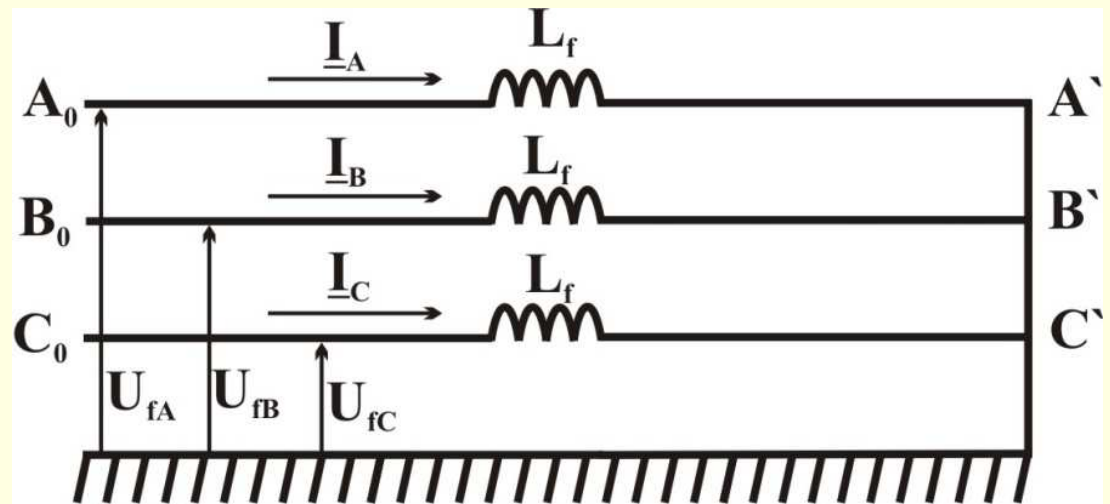
$$\underline{U}_{fB} = j \cdot \omega \cdot (L_S - M) \cdot \underline{I}_B$$

$$\underline{U}_{fC} = j \cdot \omega \cdot (L_S - M) \cdot \underline{I}_C$$

2.4.1.2 Pogonska induktivnost nadzemnog voda

■ Odavde sledi:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{fA} \\ \underline{U}_{fB} \\ \underline{U}_{fC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & L_f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix}$$



■ Gde je: $L_f = l_f \cdot L_V$

l_f - podužna induktivnost voda koja uvažava magnetnu spregu između faza

L_V - dužina voda