



Univerzitet u Beogradu
Elektrotehnički fakultet

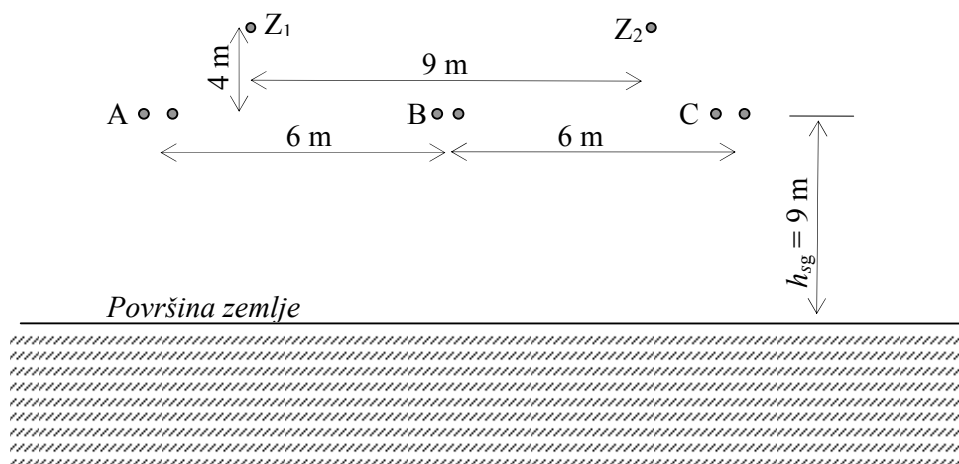
Elementi elektroenergetskih sistema
- računске вежбе -

- **ELEKTRIČNI PRORAČUN NADZEMNIH VODOVA**

Željko Đurišić
Kristina Vlajinac-Deletić

Beograd, 2006.

ZADATAK: 1 Poprečni presek nadzemnog voda prikazan je na slici. Fazni provodnici su izvedeni sa dva Al-Fe užeta prečnika $d=26\text{mm}$, kod kojih je $r_e=0,9r$. Rastojanje između provodnika jedne faze je $D_s=0,4\text{m}$. Zaštitni provodnici izvedeni su izvedeni sa Al-Fe užetom prečnika $d_z=16\text{mm}$, kod kojih je $r_{ez}=0,85r_z$. Odrediti pogonske i nulte podužne parametre voda.



Rešenje:

Da bi se mogli sprovesti proračuni i analize različitih radnih stanja i kvarova u EES-u, svi elementi EES-a se predstavljaju matematičkim modelima, odnosno zamenskim šemama koje mogu biti manje ili više složene u zavisnosti od toga kakve se analize sprovode. Da bi se sastavila zamenska šema nekog elementa EES-a neophodno je poznavati parametre koji karakterišu taj element.

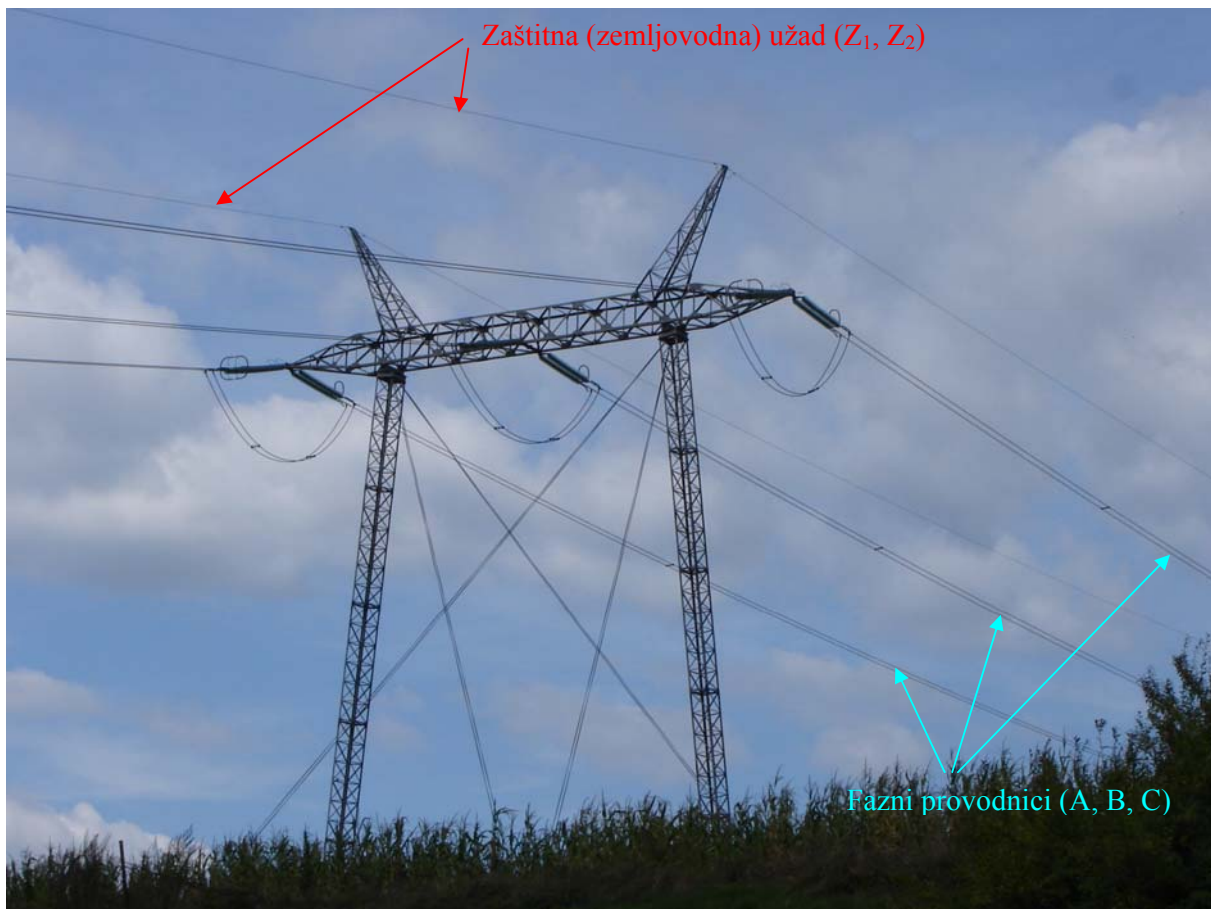
Nadzemni vod, s obzirom na njegove dimenzije, se obično opisuje podužnim parametrima, a to su njegova otpornost, induktivnost i kapacitivnost, koji se svode na jedinicu dužine voda (obično na 1 km ili 100 km).

Razlikuju se pogonski i nulti parametri voda:

Pogonski parametri voda odgovaraju pretpostavci da je vod priključen na simetričan trofazan prostoperiodičan sistem napona i da kroz fazne provodnike teku prostoperiodične simetrične trofazne struje. Treba primetiti da je pri ovakvim uslovima zbir faznih struja nula.

Nulti parametri voda odgovaraju eksitaciji voda nultim komponentinim sistemom napona i struja, odnosno, nulti parametri voda odgovaraju pretpostavci da je na sve fazne provodnike priključen isti prostoperiodični napon i da kroz sve fazne provodnike teku jednovremene prostoperiodične struje iste amplitude. Pri nultoj eksitaciji voda mora postojati povratni put faznih struja, jer je njihov zbir različit od nule (jednak je trostrukoj vrednosti fazne struje). Fizički taj povratni put je zemlja.

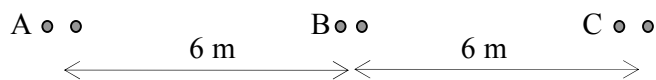
U konkretnom zadatku dat je tipičan 400kV koji se koristi u EES-u Srbije. Na slici 1.1 prikazan je detalj 400kV dalekovoda.



Slika 1.1 Detalj 400 kV dalekovoda kakav se analizira u zadatku

Proračun pogonske induktivnosti voda:

U elektromagnetskom pogledu vod predstavlja sistem magnetski spregnutih kontura koje se nalaze u nemagnetnoj sredini (pretpostavka je da i zemlja ima slične magnetske karakteristike kao i vazduh). Kao što je rečeno, pri proračunu pogonskih parametara pretpostavka je da kroz fazne provodnike protiču simetrične trofazne struje. S obzirom da je zbir struja u analiziranim pogonskim uslovima jednak nuli i da su zemljovodna užad po pravilu postavljena simetrično u odnosu na fazne provodnike, u petljama koje čine zemljovodna užad se ne indukuju struje, pa zaštitna užad ne utiču na proračun pogonske induktivnosti. Iz tog razloga pogonsku induktivnost definišu samo geometrijske karakteristike faznih provodnika i njihov međusobni položaj (pretpostavka je da je vod transponovan).



Slika 1.2 Uz proračun podužne pogonske induktivnosti voda

Proračun srednjeg geometrijskog rastojanje između faznih provodnika:

$$D_{sg} = 6 \cdot \sqrt[3]{2} = 7,56 \text{ m.}$$

Proračun ekvivalentnog poluprečnika faznog provodnika koji je izveden u vidu snopa sa n provodnika po fazi:

$$r_{es} = \sqrt[n]{r_e \cdot D_s^{n-1}} = \sqrt{0,9 \cdot 1,3 \cdot 40} = 6,84 \text{ cm.}$$

Proračun pogonske podužne induktivnosti voda:

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_{sg}}{r_{es}} = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{756}{6,84} = 0,941 \text{ mH/km.}$$

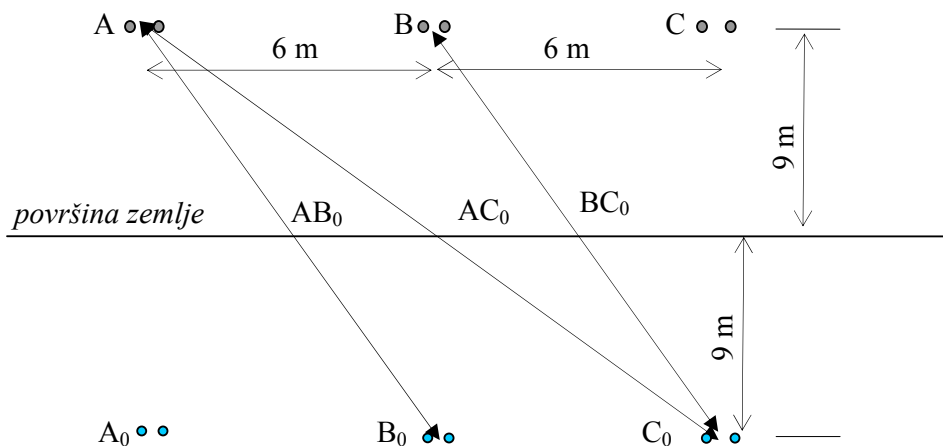
Proračun pogonske podužne reaktanse voda:

$$X = \omega L = 2\pi f L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,941 = 0,295 \text{ } \Omega/\text{km.}$$

Proračun pogonske kapacitivnosti voda:

U elektrostatičkom pogledu provodnici voda čine sistem elektroda koje se nalaze iznad beskonačne električno provodne ravni (zemlje). Pošto su zemljovodna užad postavljena simetrično u odnosu na vertikalnu osu stuba, uz pretpostavku da je vod transponovan, električno polje koje potiče od faznih provodnika se poništava (jednako je nuli) na mestu zaštitnih užadi. Iz tog razloga zaštitna užad ne utiču na proračun pogonske kapacitivnosti.

Uticaj zemlje se može matematički ekvivalentirati prema teoremi likova, tako da se za proračun pogonske kapacitivnosti analizira sistem od šest elektroda (tri fazna provodnika i njihovih odgovarajućih likova postavljenih simetrično u odnosu na površinu zemlje) koje se nalaze u vazduhu, kao što je prikazano na slici 1.3.



Slika 1.3 Uz proračun podužne pogonske kapacitivnosti voda

Pošto između elektroda kondenzatora (faznih provodnika), kao i između faznih provodnika i zemlje, postoji u pogonskim radnim uslovima napon, onda postoji i kapacitivna struja punjenja voda i u uslovima kada je vod u praznom hodu. Nivo struje punjenja voda zavisi od napona i pogonske kapacitivnosti voda.

Proračun ekvivalentnog poluprečnika faznog provodnika (snopa):

$$r_{esc} = \sqrt[n]{r \cdot D^{n-1}} = \sqrt{1,3 \cdot 40} = 7,21 \text{ cm.}$$

Proračun srednjeg geometrijskog rastojanja između faznih provodnika i odgovarajućih likova:

$$D_{ff0}^{sg} = \sqrt[3]{\overline{AB_0} \cdot \overline{AC_0} \cdot \overline{BC_0}} = \sqrt[3]{\sqrt{AA_0^2 + AB^2} \sqrt{AA_0^2 + AC^2} \sqrt{BB_0^2 + BC^2}}$$

$$D_{ff0}^{sg} = \sqrt[3]{(18^2 + 6^2)\sqrt{18^2 + 12^2}} = 19,82 \text{ m}$$

Proračun pogonske kapacitivnosti voda:

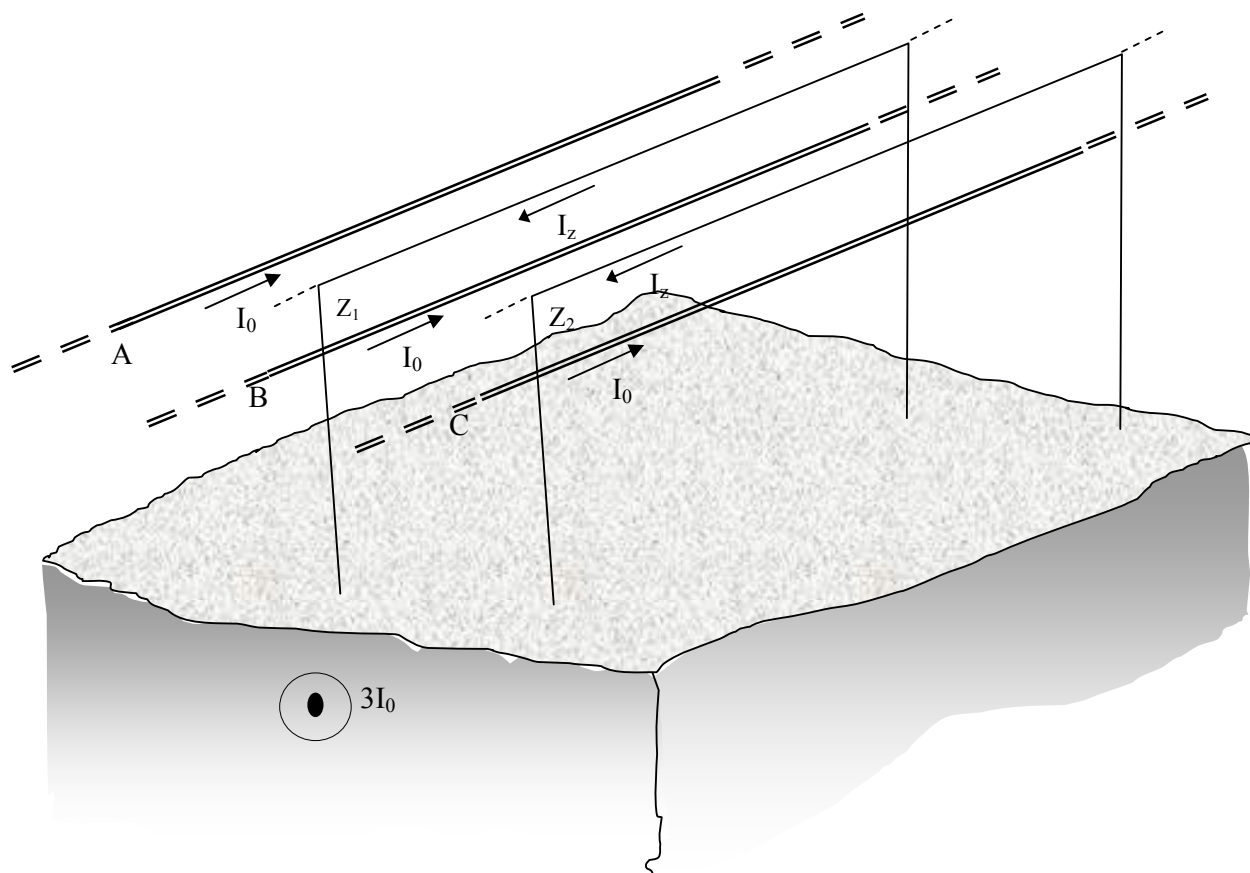
$$C = \frac{5,55555 \cdot 10^{-8}}{\ln \frac{D_{sg} \cdot 2h_{sg}}{r_{esc} \cdot D_{ff0}^{sg}}} = \frac{5,55555 \cdot 10^{-8}}{\ln \frac{7,56 \cdot 2 \cdot 9}{7,21 \cdot 10^{-2} \cdot 19,82}} = 12,193 \cdot 10^{-9} \text{ F/km}$$

Proračun karakteristične impedanse voda za pogonske uslove, uz pretpostavku da je vod idealizovan (zanemareni gubici aktivne snage):

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0,941 \cdot 10^{-3}}{12,193 \cdot 10^{-9}}} = 277,8 \Omega$$

Proračun nulte induktivnosti voda:

Za izračunavanje nulte induktivnosti potrebno je posmatrati jednu petlju koju čini fazni provodnik – zemlja i kratkospojene petlje zemljovodna užad – zemlja, slika 1.4.



Slika 1.4 Skica kontura voda u jednom rasponu sa naznačenim strujama koje odgovaraju nultom komponentnom sistemu

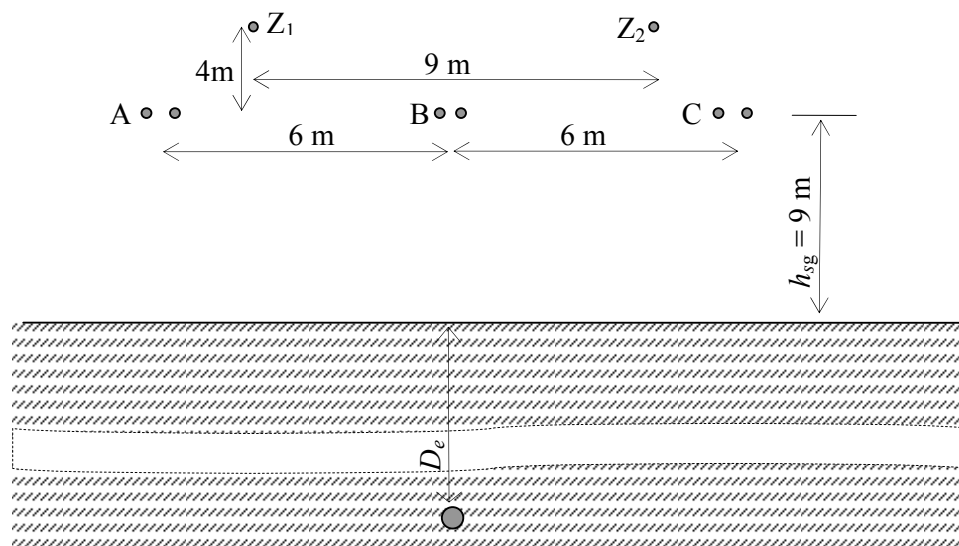
Nulta induktivnost predstavlja odnos fluksa koji obuhvata petlja fazni provodnik – zemlja i struje u faznom provodniku te petlje (I_0). Kada ne bi bilo drugih kontura u blizini analizirane konture induktivnost bi se definisala preko geometrije samo petlje koju čini fazni provodnik – zemlja. Međutim, zemljovodna užad su na svakom stubu uzemljena (metalno su pričvršćena za stub, vidi sliku 1.1, koji je uzemljen) tako da ona formiraju u svakom rasponu kratkospojenu petlju koja je magnetski spregnuta sa petljom fazni provodnik – zemlja te utiče na fluksni obuhvat ove petlje, a samim tim i na nultu induktivnost.

Pri proticanju jednovremenih (nultih) struja kroz fazne provodnike voda indukuje se struja i u petlji koju čine zaštitna užad – zemlja. Indukovana struja u zatvorenoj konturi *zemljovodna užad - zemlja* je, shodno Lencovom zakonu, takvog smjera da teži da poništi fluks koji ju je izazvao. Dakle pri istoj struji u faznim provodnicima u slučaju postojanja zemljovodne užadi fluks koji obuhvata petlja *fazni provodnik - zemlja* je manji. Pošto je po definiciji induktivnost L neke petlje: $L = \frac{\Psi}{i}$ iz

prethodne analize sledi da je induktivnost petlje fazni provodnik-zemlja, odnosno nulta induktivnost voda, manja ako postoje zemljovodna užad jer indukovana struja u njima svojim magnetskim dejstvom teži da smanji fluks u petlji fazni provodnik – zemlja.

Potrebno je prokomentarisati povratni put trostruke nulte struje kroz zemlju. Struja se kroz poprečni presek tla raspodeljuje tako da ukupna impedansa bude minimalana. Sa aspekta reaktivnog otpora struja bi težila da se koncentriše uz samu površinu tla, jer je tako reaktansa najmanja (najmanja je površina petlje fazni provodnik – zemlja). Pošto zemlja ima neku omsku otpornost postoji i omski otpor. Sa aspekta omskog otpora zemlje (rezistanse) struja bi težila da se rasprostire na što veću površinu zemlje jer je omski otpor obrnuto srazmeran površini provodnika (u ovom slučaju zemlje). U realnim uslovima struja se raspoređuje kroz zemlju tako da ukupna impedansa petlje bude minimalna. Iz ove kratke analize zaključuje se da povratni put struje zavisi od frekvencije f (veća frekvencija znači veći uticaj reaktanse odnosno veću koncentraciju struje pri površini tla) i specifične omske otpornosti ρ zemlje. Karson je pokazao da se zemlja kao geološki provodnik može zameniti ekvivalentnim provodnikom koji ima dimenzije iste kao i fazni

provodnika a »ukopan« je na ekvivalentnoj dubini: $D_e [m] = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$. Geometrija koju je potrebno posmatrati za proračun nulte induktivnosti analiziranog voda je prikazana na slici 1.5.



Slika 1.5 Uz proračun nulte induktivnosti voda

Nulta podužna induktivnost voda se računa prema sledećem izrazu:

$$L_0^z = 6 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{D_e}{\sqrt[3]{r_{es} D_{sg}^2}} - \frac{\ln^2 \frac{D_e}{D_{fz1}^{sg}}}{\ln \frac{D_e}{\sqrt{r_{ez} D_{zz}}}} \right),$$

gde su:

Dubina ekvivalentnog povratnog provodnika:

$$D_e = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 660 \sqrt{\frac{100}{50}} = 933,38 \text{ m.}$$

Srednje geometrijsko rastojanje između faznih provodnika i zemljovodne užadi:

$$D_{fz1}^{sg} = \sqrt[3]{AZ_1 BZ_1 CZ_1} = \sqrt[3]{\sqrt{1,5^2 + 4^2} \sqrt{4,5^2 + 4^2} \sqrt{10,5^2 + 4^2}} = 6,61 \text{ m}$$

Rastojanje između zaštitne užadi:

$$D_{zz} = 9 \text{ m.}$$

Ekvivalentni poluprečnik zaštitne užadi:

$$r_{ez} = 0,85r_z = 0,85 \cdot 0,8 = 0,68 \text{ cm}$$

Nulta podužna induktivnost analiziranog voda:

$$L_0^z = 6 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{933,38}{\sqrt[3]{6,84 \cdot 10^{-2} \cdot 7,56^2}} - \frac{\ln^2 \frac{933,38}{6,61}}{\ln \frac{933,38}{\sqrt{0,68 \cdot 10^{-2} \cdot 9}}} \right) = L_0 - \Delta L_0^z$$

$$L_0^z = L_0 - \Delta L_0 = 6 \cdot 10^{-4} (6,3843 - 2,9755) = 3,8306 - 1,7853 = 2,0453 \text{ mH / km}$$

L_0 – nulta podužna induktivnost voda kada ne bi imao zaštitnu užad

ΔL_0^z – iznos za koji zemljovodna užad smanjuju nultu podužnu induktivnost voda

Zaključuje se da zemljovodna užad značajno smanjuju nultu induktivnost voda (oko 50%).

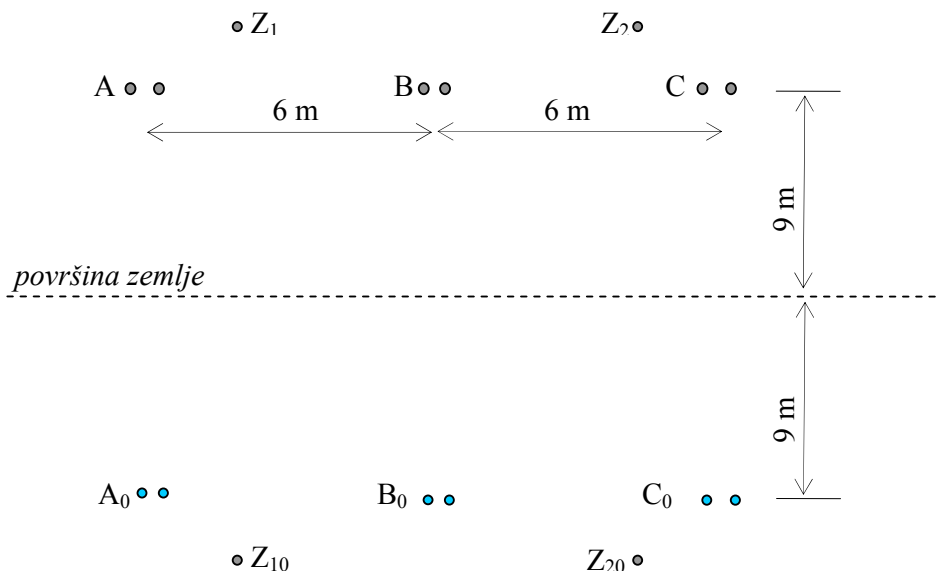
Nulta podužna reaktansa voda je:

$$X_0^z = \omega L_0^z = X_0 - \Delta X_0 = 1,203 - 0,561 = 0,642 \Omega / \text{km}.$$

Proračun podužne nulte kapacitivnosti voda:

Za razliku od uslova proračuna pogonske kapacitivnosti, kada je pretpostavka da je vod priključen na trofazni simetričan sistem napona, kod proračuna nulte kapacitivnosti voda

pretpostavka je da su svi fazni provodnici priključeni na isti napon (nulti komponentni sistem napona). Pod ovom pretpostavkom, u zemljovodnim užadima se usled kapacitivne sprege indukuje naelektrisanje jer je rezultatni vektor jačine električnog polja, koje potiče od faznih provodnika, na mestu zaštitnih užadi različit od nule, pa zaštitna užad utiču na nultu kapacitivnost voda. Na slici 1.6 prikazana je geometrija stvarnih i fiktivnih provodnika merodavnih za proračun nulte kapacitivnosti voda.



Slika 1.6 Uz proračun nulte podužne kapacitivnosti voda

Nulta kapacitivnost voda se računa prema sledećem izrazu:

$$C_0^z = \frac{5,55555 \cdot 10^{-8}}{\ln \frac{2h_{sg} D_{ff0}^{sg}}{r_{esc} D_{sg}^2} - 3k \ln^2 \frac{D_{fz10}^{sg}}{D_{fz1}^{sg}} \left/ \ln \frac{2h_z \overline{Z_1 Z_{20}}}{r_z \overline{Z_1 Z_2}} \right.} \left[\frac{F}{km} \right],$$

gde je $k=2$, za dva užeta, odnosno $k=1$, za jedno uže i tada je $\frac{\overline{Z_1 Z_{20}}}{\overline{Z_1 Z_2}} \rightarrow 1$.

Proračun srednjeg geometrijskog rastojanja između faznih provodnika i likova zemljovodnih užadi:

$$D_{fz10}^{sg} = \sqrt[3]{\overline{AZ_{10}} \cdot \overline{BZ_{10}} \cdot \overline{CZ_{10}}} = \sqrt[3]{\sqrt{1,5^2 + 22^2} \sqrt{4,5^2 + 22^2} \sqrt{10,5^2 + 22^2}} = 22,94m$$

Proračun rastojanja između zemljovodnog užeta i lika drugog zemljovodnog užeta:

$$\overline{Z_1 Z_{20}} = \sqrt{9^2 + 26^2} = 27,51m.$$

Zamenom prethodno definisanih veličina u izraz za proračun nulte kapacitivnosti voda dobija se:

$$C_0^z = \frac{5,55555 \cdot 10^{-8}}{7,447 - 1,01} = 8,628 \cdot 10^{-9} F/km$$

Ako vod ne bi imao zemljovodna užad nulta kapacitivnost bi bila:

$$C_0 = \frac{5,55555 \cdot 10^{-8}}{\ln \frac{2h_{sg} D_{ffo}^2}{r_{es} D_{sg}^2}} = 7,46 \cdot 10^{-9} \left[\frac{F}{km} \right]$$

Zaključuje se da zemljovodna užad relativno malo utiču na nultu kapacitivnost. U slučaju postojanja zemljovodnih užadi nulta kapacitivnost je oko 10% veća u odnosu kada zaštitna užad ne bi postojala.

Nulta karakteristična impedansa voda bez zemljovodne užadi je:

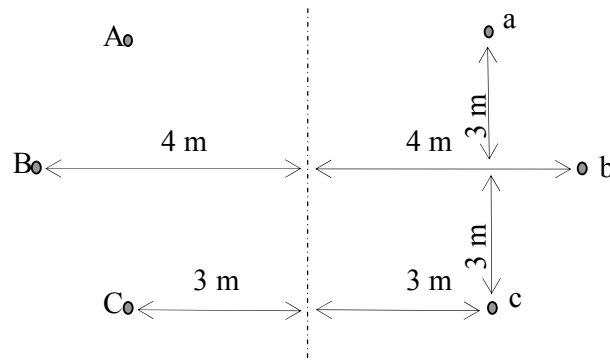
$$Z_{C_0} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{3,8306 \cdot 10^{-3}}{7,46 \cdot 10^{-9}}} = 716,5 \Omega$$

Nulta karakteristična impedansa voda sa zemljovodnom užadi:

$$Z_{C_0}^z = \sqrt{\frac{L_0^z}{C_0^z}} = \sqrt{\frac{2,0453 \cdot 10^{-3}}{8,628 \cdot 10^{-9}}} = 486,88 \Omega$$

ZADATAK: 2 Izračunati podužnu pogonsku reaktansu dvostrukih nadzemnih vodova na zajedničkim stubovima (za $f=50$ Hz). Ekvivalentni poluprečnik provodnika je 18mm. Poprečni presek voda je prikazan na slici.

Kolika će biti podužna induktivnost jednog voda ako je drugi vod u praznom hodu?



Površina zemlje

Rešenje:

Iz ekonomskih razloga se često u prigradskim i gradskim sredinama dva (a nekada i više) vodova postavljaju na zajedničke stubove, slika 2.1.



Slika 2.1 Dva paralelno vođena 110kV voda na istim stubovima sa rasporedom faznih provodnika sličnim kao u analiziranom zadatku

S obzirom na relativno malu udaljenost provodnika kroz koje protiču struje postoji magnetska sprema između faznih provodnika različitih vodova, prema definiciji induktivnosti, postoji međusovni uticaj vodova na njihovu pogonsku i nultu induktivnost. Da bi pogonska induktivnost bila konstantna potrebno je da budu ispunjeni određeni uslovi (vidi udžbenik str. 108). Pod definisanim pretpostavkama u slučaju istog strujnog opterećenja oba voda pogonska podužna induktivnost jednog voda je:

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_{sg} D_{sg}^{ij}}{r_e D_{sg}^{ii}},$$

gde su:

D_{sg} – srednje geometrijsko rastojanje između faza jednog voda,

D_{sg}^{ii} – srednje geometrijsko rastojanje između istoimenih faza dva voda,

D_{sg}^{ij} – srednje geometrijsko rastojanje između raznoimenih faza dva voda.

Proračun geometrijskih parametara voda:

$$D_{sg} = \sqrt[3]{\overline{AB} \cdot \overline{AC} \cdot \overline{BC}} = \sqrt[3]{ab \cdot ac \cdot bc} = \sqrt[3]{\sqrt{3^2 + 1^2} \cdot 6 \cdot \sqrt{3^2 + 1^2}} = \sqrt[3]{60} = 3,915m,$$

$$D_{sg}^{ii} = \sqrt[3]{\overline{Aa} \cdot \overline{Bb} \cdot \overline{Cc}} = \sqrt[3]{6 \cdot 8 \cdot 6} = 6,604m.$$

$$D_{sg}^{ij} = \sqrt[3]{\overline{Ab} \cdot \overline{Ac} \cdot \overline{Bc}} = \sqrt[3]{\sqrt{3^2 + 7^2} \cdot \sqrt{6^2 + 6^2} \cdot \sqrt{7^2 + 3^2}} = 7,895m,$$

Proračun podužne induktivnosti paralelno vođenih dalekovoda na istim stubovima:

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_{sg} D_{sg}^{ij}}{r_e D_{sg}^{ii}} = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{3,915 \cdot 7,895}{0,018 \cdot 6,604} = 1,1122 \text{ mH/km.}$$

Proračun odgovarajuće podužne pogonske reaktanse:

$$X = \omega \cdot L = 2\pi f \cdot L = 2\pi 50 \cdot 1,1122 = 0,3494 \Omega/\text{km}$$

Ako je jedan od vodova u praznom hodu (otvoren prekidač na kraju voda), onda kroz taj vod teče mala kapacitivna struja (struja punjenja voda) i ona ima slab elektromagnetski uticaj na drugi vod, pa se on u magnetskom pogledu može posmatrati kao da ne postoji drugi vod. U tom slučaju pogonska induktivnost voda je:

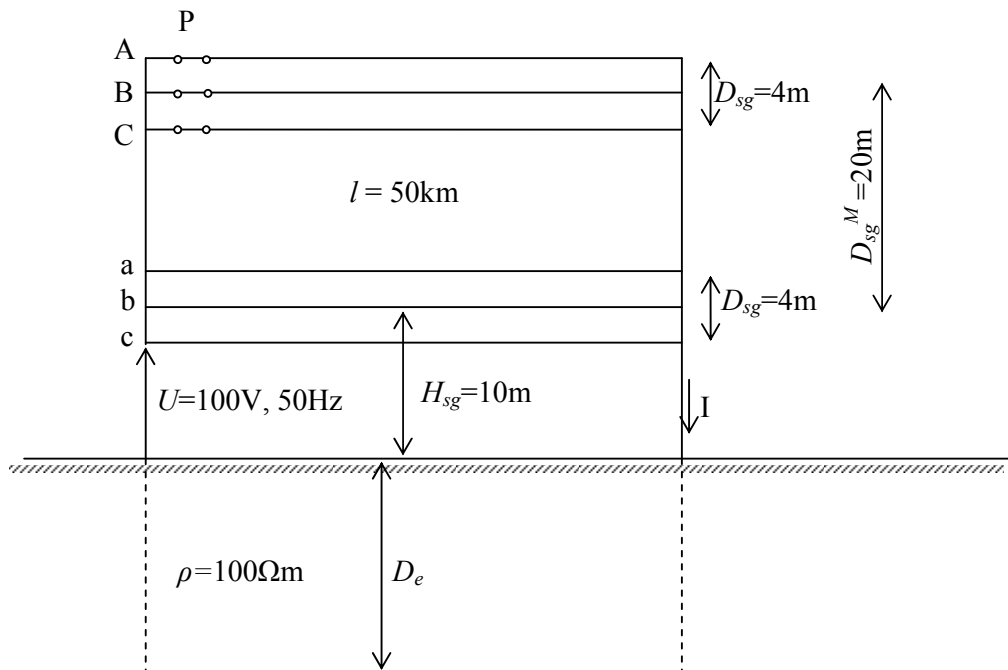
$$L' = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_{sg}}{r_e} = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{3,915}{0,018} = 1,0764 \text{ mH/km.}$$

Odgovarajuća podužna pogonske reaktanse je:

$$X' = \omega \cdot L' = 2\pi f \cdot L' = 2\pi 50 \cdot 1,0764 = 0,3382 \Omega/\text{km}$$

Kada su oba vod opterećena pogonska reaktansa vodova je veća od pogonske reaktanse kada je samo jedan vod u pogonu.

ZADATAK: 3 Fazni provodnici dva identična paralelno vođena dalekovoda spojeni su kao na slici. Uzimajući u obzir samo induktivnosti u datom kolu, izračunati promenu struje (I) pri otvaranju prekidača (P). Poznati su sledeći parametri vodova: $D_{sg}=4\text{m}$ – srednje geometrijsko rastojanje faznih provodnika svakog voda; $D_{sg}^M=20\text{m}$ – srednje geometrijsko rastojanje faznih provodnika različitih vodova; $r_e=15\text{mm}$ – ekvivalentni poluprečnik svih faznih provodnika.



Rešenje:

Pošto su vodovi identični i svi provodnici na istim visinama iznad zemlje (pretpostavka je da su vodovi transponovani) kroz fazne provodnike teći će iste struje koje su u fazi jer su svi provodnici priključeni na isti napon. Struju kroz jedan fazni provodnik ograničava odgovarajuća nulta reaktansa. Kada je prekidač P uključen imamo dva paralelno vođena dalekovoda pa je nulta reaktansa za paralelno vođene identične vodove:

$$L_0^p = 6 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e'}{\sqrt[3]{r_e D_{sg}^2} \frac{D_e'}{D_{sg}^M}},$$

gde su:

$$D_e = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 933,4\text{m},$$

kada se uzme u obzir visina vešanja provodnika:

$$D_e' = D_e + H_{sg} = 943,4\text{m}$$

Kada je prekidač (P) zatvoren, struju I ograničava 1/6 nulte reaktanse.

$$\frac{L_0^p}{6} = 10^{-4} \ln \frac{943,4^2}{\sqrt[3]{1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 4^2 \cdot 20}} = 1,1178954 \text{ mH / km}$$

$$\frac{X_0^p}{6} = \frac{\omega L_0^p}{6} = 0,3512 \Omega / \text{km}$$

$$I_p = \frac{U}{l \frac{X_0^p}{6}} = 5,695 \text{ A}$$

Kada je prekidač (P) otvoren, kroz taj vod ne postoji struja pa on u elektromagnetskom pogledu ne utiče na drugi vod. U osvom slučaju struju I ograničava 1/3 nulte reaktanse usamljenog voda:

$$L_0 = 6 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e}{\sqrt[3]{r_{es} D_{sg}^2}}$$

$$\frac{L_0}{3} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{D_e'}{\sqrt[3]{r_e D_{sg}^2}} = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{94340}{\sqrt[3]{1,5 \cdot 400^2}} = 1,465 \text{ mH / km}$$

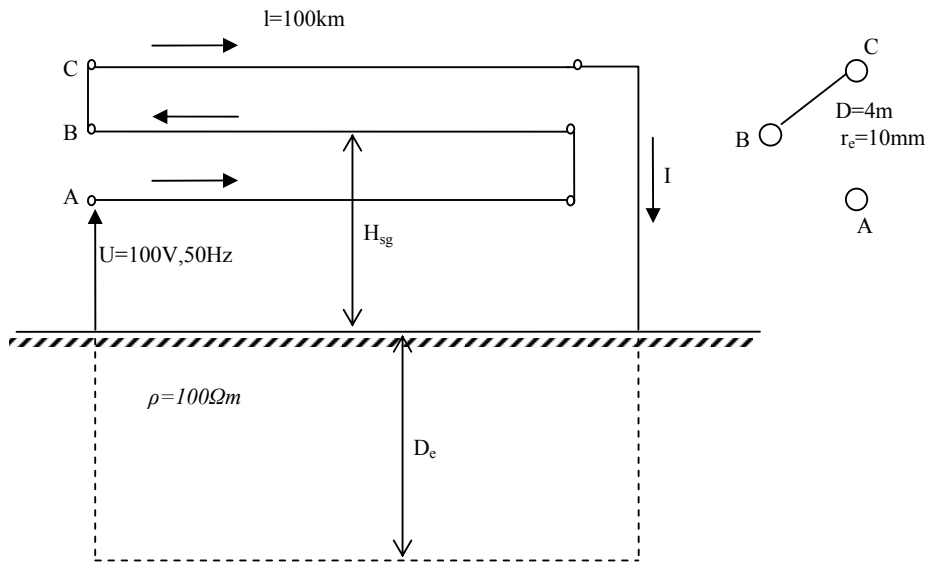
$$\frac{X_0}{3} = \frac{\omega L_0}{3} = 0,4602 \Omega / \text{km}$$

$$I = \frac{U}{l \frac{X_0}{3}} = 4,345 \text{ A}$$

Na osnovu prethodne analize može se zaključiti da je struja u slučaju kada je zatvoren prekidač P veća za:

$$\Delta I = I_p - I = 5,695 - 4,345 = 1,35 \text{ A} .$$

ZADATAK: 4 Fazni provodnici trofaznog dalekovoda spojeni su međusobno, sa zemljom i izvorom 50Hz napona od $U=100V$, prema slici. Izračunati struju (I) uzimajući u obzir samo induktivnosti. Fazni provodnici voda raspoređeni su u temenima ravnostranog trougla stranice $D=4m$ i transponovani su. Srednja geometrijska visina vešanja faznih provodnika je $H_{sg}=10m$.



Rešenje:

U analiziranom slučaju, ako se zanemari aktivna otpornost u kolu, struju ograničava samo odgovarajuća reaktansa složene petlje koja je dobijena prikazanim vezivanjem faznih provodnika. Pošto je kolo složeno i geometrija prostorna najzgodnije je proračunati induktivnost svakog od provodnika koji su vezani na red. U opštem slučaju za sistem od m provodnika kroz koje protiču struje, induktivnost jednog provodnika je:

$$L_A = 2 \cdot 10^{-4} \left[\ln \frac{1}{r_e} - \sum_{j=1}^m \frac{I_{Bj}}{I_A} \ln \overline{AB_j} \right]$$

U analiziranom slučaju, zbog geometrijske simetrije, odnosno zbog jednakih struja u provodnicima (A) i (C), važi $L_A=L_C$:

$$L_A = L_C = 2 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{1}{r_e} + \ln D_e' + \ln D - \ln D \right) = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e'}{r_e}$$

Gde je $D_e' = D_e + H_{sg}$

$$L_B = 2 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{1}{r_e} - \ln D_e' + \ln D + \ln D \right) = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D^2}{r_e D_e'}$$

Fazni provodnici su redno vezani, pa je ukupna podužna induktivnost petlje:

$$L = L_A + L_B + L_C = 4 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e'}{r_e} + 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D^2}{r_e D_e'} = 4 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e' D}{r_e \sqrt{r_e D_e'}}$$

$$D_e = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 660 \sqrt{\frac{100}{50}} = 933,4m$$

$$D_e' = 933,4 + 10 = 943,4m$$

$$L = 4 \cdot 10^{-4} \ln \frac{94340 \cdot 400}{1 \cdot \sqrt{1 \cdot 94340}} = 4,6875 \text{ mH} / \text{km}$$

Odgovarajuća podužna reaktansa je:

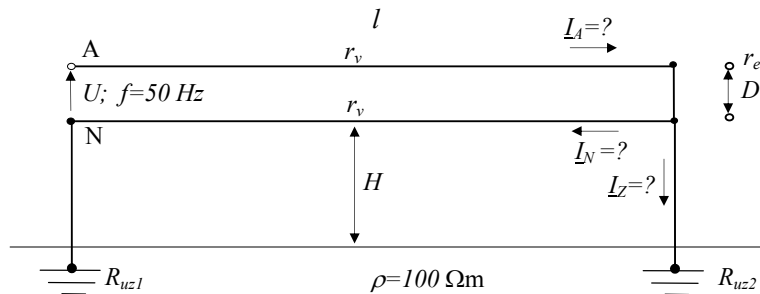
$$X = \omega L = 1,47263 \Omega / \text{km}$$

Proračun struje I :

$$I = \frac{U}{Xl} = \frac{100}{1,4726 \cdot 100} = 0,679A$$

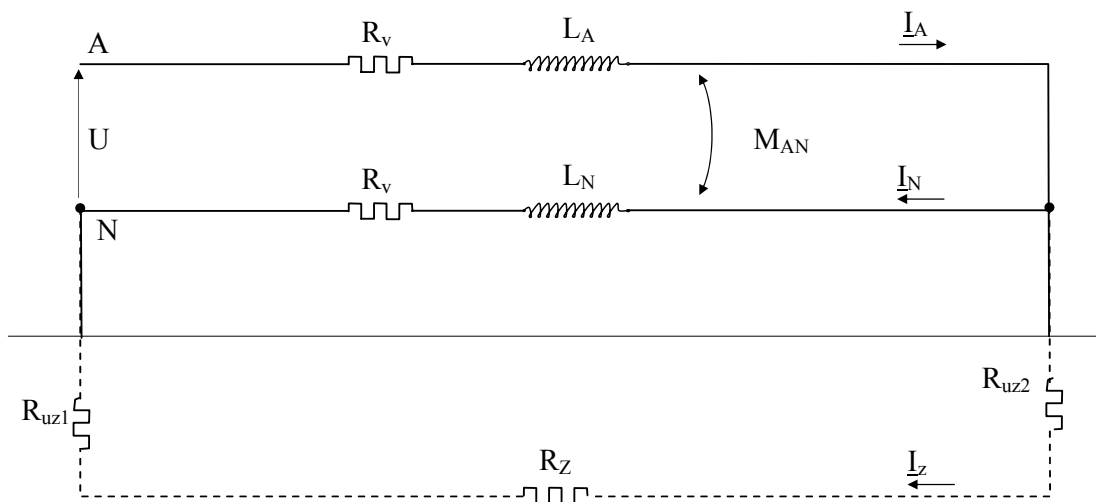
ZADATAK: 5 Na slici je prikazana principijelna šema nadzemnog niskonaponskog distributivnog voda, dužine l , za vreme jednopolnog kratkog spoja provodnika faze A na kraju voda (faze B i C su neopterećene). Napisati potreban broj jednačina (definisati sve parametre u njima) iz kojih se mogu odrediti ustaljene struje kvara u faznom provodniku A (\underline{I}_A), neutralnom provodniku N (\underline{I}_N) i uzemljivaču (\underline{I}_Z). Poznate veličine su: $U, f=50 \text{ Hz}, \rho=100 \Omega\text{m}, R_{uz1}, R_{uz2}, r_v, l, r_e, D$ i H

Neutralni i fazni provodnik imaju iste ekvivalentne poluprečnike ($r_{eA}=r_{eN}=r_e$) i iste podužne omske otpornosti ($r_A=r_N=r_v$). Neutralni provodnik je na kraju voda spojen sa uzemljivačem čiji je otpor R_{uz2} , a na početku voda sa uzemljivačem otpornosti R_{uz1} .



Rešenje:

Pošto je, prema uslovu zadatka, neutralni provodnik na kraju voda spojen sa zaštitnim uzemljenjem objekta (zaštitno nulovanje), pri jednopolnom kratkom spoju struja kvara I_A će se zatvarati i kroz neutralni provodnik i kroz zemlju. Proračun struja se može izvršiti prema zamenskoj šemi prikazanoj na slici 5.1.



Slika 5.1 Zamenska šema

Proračun parametara zamenske šeme:

Omska otpornost faznog i neutralnog provodnika:

$$R_A = R_N = R_v = r_v \cdot l.$$

Sopstvena induktivnost petlje fazni provodnik zemlja:

$$L_A = \left(2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D+h+D_e}{r_e} \right) \cdot l,$$

gde je dubina ekvivalentnog provodnika:

$$D_e = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ [m]} = 660 \sqrt{2} \text{ m} = 933,4 \text{ m}$$

Sopstvena induktivnost petlje neutralni provodnik zemlja:

$$L_N = \left(2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{h+D_e}{r_e} \right) \cdot l.$$

Pošto je $D_e \gg D$, važi da je $L_N \approx L_A$.

Međusobna induktivnost petlji fazni provodnik – zemlja i neutralni provodnik –zemlja:

$$M_{AN} = \left(2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e+h}{D} \right) \cdot l.$$

Aktivna otpornost zemlje između dva uzemljivača: $R_Z = (\pi^2 f \cdot 10^{-4}) \cdot l \approx 0,05 \cdot l [\Omega]$, $l[\text{km}]$.

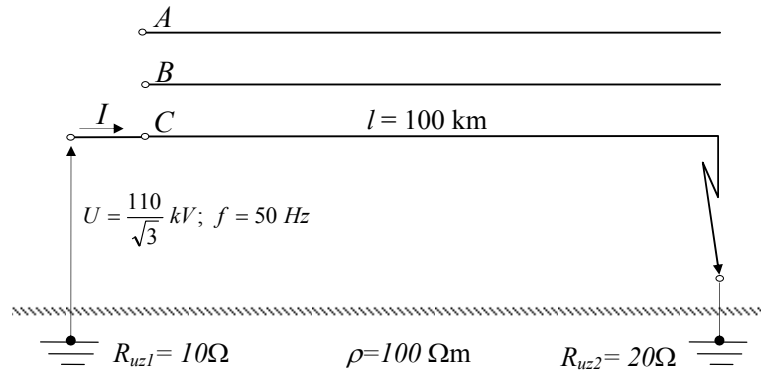
Na osnovu zamenske šeme može se napisati sledeći sistem jednačina iz kojeg se mogu prorčunati nepoznate struje:

$$\begin{aligned} U &= (R_V + j\omega L_A) \underline{I}_A - j\omega M_{AN} \underline{I}_N + (R_{uz1} + R_{uz2} + R_Z) \underline{I}_Z \\ 0 &= (R_V + j\omega L_N) \underline{I}_N - j\omega M_{AN} \underline{I}_A - (R_{uz1} + R_{uz2} + R_Z) \underline{I}_Z \\ \underline{I}_A &= \underline{I}_Z + \underline{I}_N \end{aligned}$$

gde je $\omega = 2\pi f$.

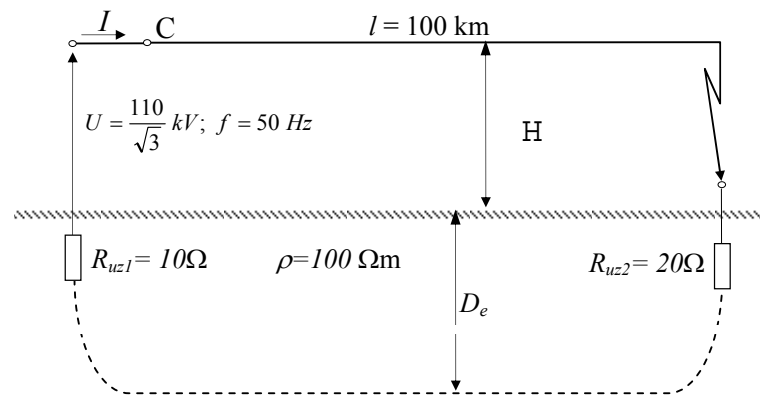
ZADATAK 6: Izračunati struju I pri jednopolnom kratkom spoju faze C na 110 kV vodu prikazanom na slici. Pri proračunu, pored odgovarajuće reaktanse, uzeti u obzir i omske otpornosti: provodnika, uzemljivača i zemlje. Parametri provodnika su: ekvivalentni poluprečnik - $r_e=12$ mm, podužna omska otpornost - $r_v=0,1 \Omega/\text{km}$.

Srednja visina vešanja provodnika je $H=8$ m. Vod se nalazi iznad približno homogenog tla, specifične otpornosti $\rho=100 \Omega\text{m}$. Vod nema zaštitno uže.



Rešenje:

Pri jednopolnom kratkom spoju na nadzemnom vodu struju kvara ograničava reaktansa petlje kvara i omske otpornosti u petlji kvara (otpornost provodnika pogođenog kvarom, uzemljivača i zemlje).



Slika 6.1 Petlja zatvaranja struje kvara

Pošto vod nema zaštitnih užadi i fazni provodnici zdravih faza su otvoreni reaktansu petlje kvara određuje sopstvena induktivnost petlje kvara:

$$X = 2\pi f \cdot L \cdot l$$

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \ln \left(\frac{D_e + H}{r_e} \right)$$

$$D_e = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 660 \sqrt{\frac{100}{50}} = 933 \text{ m}$$

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \ln \left(\frac{D_e + H}{r_e} \right) = 2 \cdot 10^{-4} \ln \left(\frac{933 + 8}{12 \cdot 10^{-3}} \right) = 2,254 \text{ mH / km}$$

$$X = 2\pi f \cdot L \cdot l = 314,16 \cdot 2,254 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 70,81 \Omega$$

Proračun omske otpornosti petlje kvara:

$$R_e = R_v + R_{uz1} + R_z + R_{uz2}$$

$$R_v = r_v \cdot l = 0,1 \cdot 100 = 10 \Omega$$

$$R_z = 10^{-4} \cdot \pi^2 f \cdot l = 10^{-4} \cdot \pi^2 \cdot 50 \cdot 100 \approx 5 \Omega$$

$$R_e = R_v + R_{uz2} + R_z + R_{uz1} = 10 + 20 + 5 + 10 = 45 \Omega$$

Proračun impedanse petlje kvara:

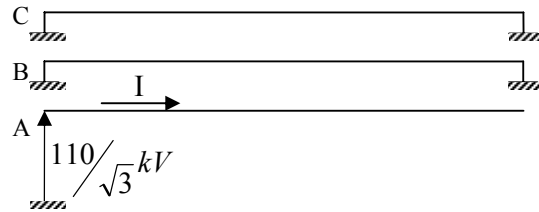
$$Z = \sqrt{R_e^2 + X^2} = \sqrt{45^2 + 70,81^2} = 83,9 \Omega$$

Proračun struje kvara:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{110 / \sqrt{3}}{83,9} = 757 \text{ A}$$

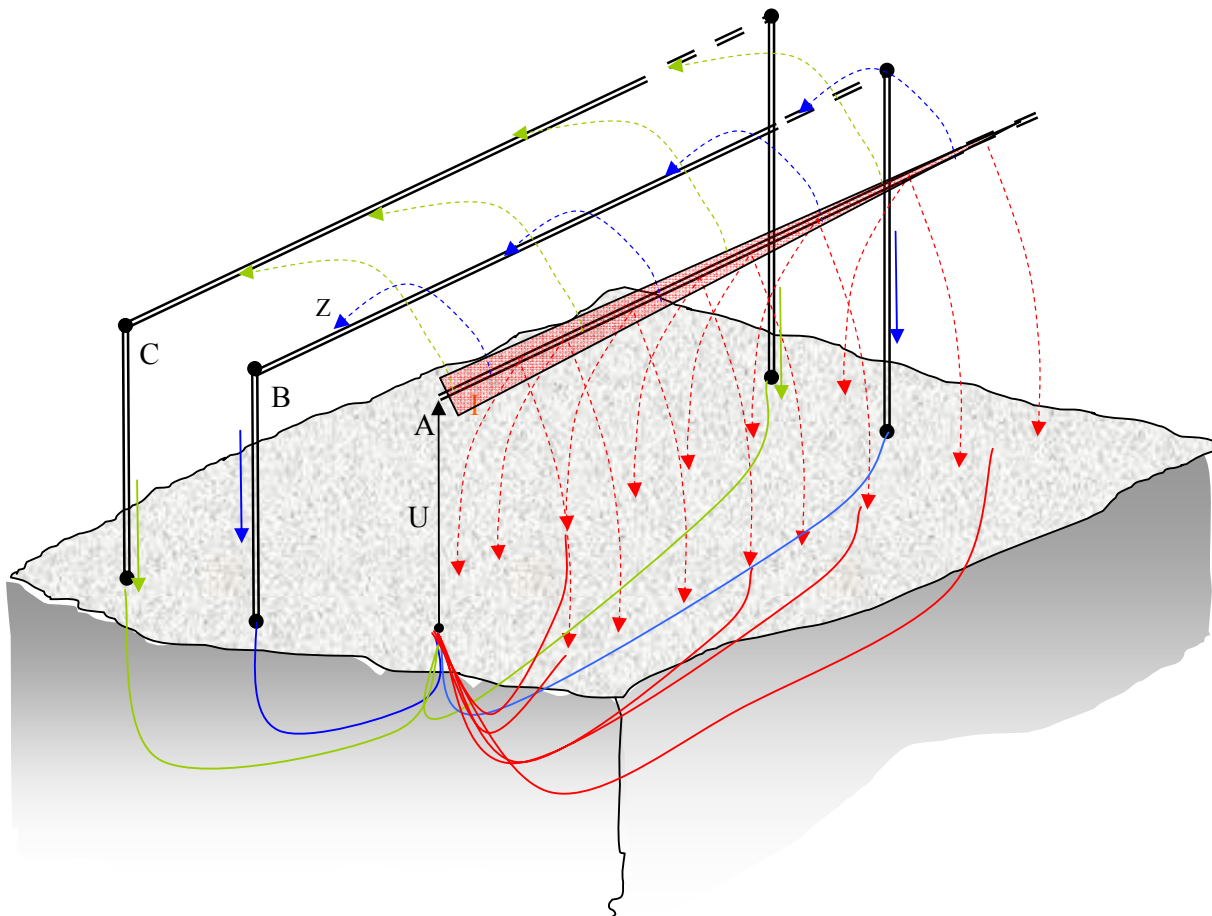
Ukoliko bi vod imao zaštitnu užad onda bi struja kvara bila veća jer bi zaštitna užad smanjila reaktansu petlje kvara.

ZADATAK 7: Fazni provodnici trofaznog nadzemnog transponovanog voda su izvedeni provodnicima poluprečnika 10 mm i vezani kao na slici. Ako je srednje geometrijsko rastojanje provodnika 3 m, srednja geometrijska visina vešanja provodnika 12 m, a dužina voda 100 km, odrediti struju I pri učestanosti 50 Hz.



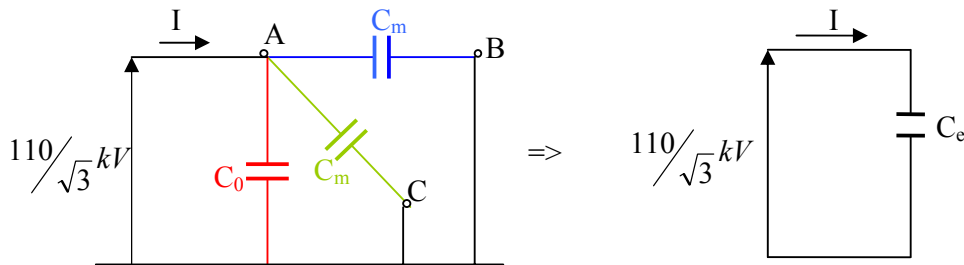
Rešenje:

Fazni provodnici su međusobno kapacitivno i induktivno spregnuti. S obzirom da je fazni provodnik A otvoren na kraju voda struja I je kapacitivna. Pošto je napon priključen između faznog provodnika i zemlje struja I se mora zatvoriti prema zemlji. Putevi zatvaranja struje I su prikazani na slici 7.1. Jedan deo struje I se zatvara između faznog provodnika A i zemlje (crvene strelice), zatim prema faznim provodnicima faza B (plave strelice) i C (zeleno strelice) koji su uzemljeni. Struja I je raspodeljena duž provodnika A, tako da idući prema kraju voda struja opada, što je naznačeno crvenom strelicom. Ako se pretpostavi da je efektivna vrednost napona duž provodnika A ista (u ova pretpostavka nije u potpunosti tačna kod dugačkih vodova zbog Farantijevog efekta) i da se ne menja geometrija voda duž trase, onda se sa svakog kilometra voda odvodi ista vrednost struje. Struje prema faznim provodnicima B i C su jednake ako je vod simetričan, odnosno transponovan.



Slika 7.1 Putevi zatvaranja kapacitivne struje punjenja voda

Svaki par provodnika (uključujući i zemlju) čini jedan kondenzator. Kapacitivnost nekog faznog provodnika prema zemlji predstavlja nultu kapacitivnost C_0 , dok kapacitivnost između dva fazna provodnika je definisana kao međusobna kapacitivnost C_m . Zamenska šema za analizirani slučaj je predstavljena na slici 7.2, bojama su naznačene kapacitivnosti u skladu sa slikom 7.1. Treba napomenuti da je u ovom primeru uzeta samo u obzir kapacitivna sprega između faznih provodnika jer su struje relativno male i raspodeljene tako da je uticaj međusobnih induktivnosti zanemarljiv.



Slika 7.2 Ekvivalentna šema

Ekvivalentna kapacitivnost je:

$$C_e = C_0 + 2C_m.$$

Međusobna kapacitivnost se može izraziti preko pogonske C i nulte kapacitivnosti:

$$C_m = \frac{C - C_0}{3}.$$

Kada se ne zna tačan raspored provodnika, za izračunavanje srednjeg geometrijskog rastojanja između faznih provodnika i njihovih likova može se koristiti sledeća formula:

$$D_{ff_0}^{sg} = \sqrt{4H_{sg}^2 + D_{sg}^2}.$$

U konkretnom slučaju je:

$$D_{ff_0}^{sg} = \sqrt{4 \cdot 12^2 + 3^2} = 24,19m.$$

Podužna pogonska kapacitivnost voda je:

$$C = \frac{5,55555 \cdot 10^{-8}}{\ln \frac{D_{sg} \cdot 2H_{sg}}{r_{esc} \cdot D_{ff_0}^{sg}}} = \frac{5,55555 \cdot 10^{-8}}{\ln \frac{3 \cdot 2 \cdot 12}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 24,19}} = 9,7536 \cdot 10^{-9} F / km.$$

Podužna nulta kapacitivnost voda je:

$$C_0 = \frac{5,55555 \cdot 10^{-8}}{\ln \left(\frac{2H_{sg}}{r} \left(\frac{D_{ff_0}^{sg}}{D_{sg}} \right)^2 \right)} = \frac{5,55555 \cdot 10^{-8}}{\ln \frac{2 \cdot 12}{10 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{24,19}{3} \right)^2} = 4,646 \cdot 10^{-9} F / km.$$

Ekvivalentna kapacitivnost za analizirani slučaj je:

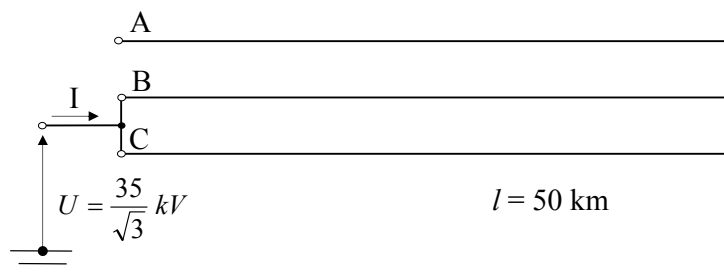
$$C_e = C_0 + 2C_m = C_0 + 2 \frac{C - C_0}{3} = \frac{2C + C_0}{3} = 8,051 \cdot 10^{-9} \text{ F / km}$$

Proračun struje punjenja voda:

$$I = \omega C_e U_A = 2\pi \cdot 50 \cdot 100 \cdot 8,051 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{110}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 = 16,06 \text{ A}$$

$$I = 16,06 \text{ A}$$

ZADATAK 8: Fazni provodnici trofaznog transponovanog nadzemnog voda, dužine $l = 50$ km, podužne pogonske kapacitivnosti $c = 10$ nF/km i podužne nulte kapacitivnosti $c_o = 5,2$ nF/km, vezani su kao na slici. Odrediti struju I i napon faznog provodnika "A" prema zemlji.



Rešenje:

Struja "punjenja" voda (I) u praznom hodu i napon slobodne faze prema zemlji (U_A) su posledice kapacitivne sprege među provodnicima voda u prisustvu zemlje (kao beskonačne provodne ravni). Veza između trenutnih vrednosti faznih napona ($u_{A,B,C}$) i odgovarajućih naelektrisanja faznih provodnika ($q_{A,B,C}$) je data preko matrice parcijalnih kapacitivnosti, prema sledećoj relaciji:

$$\begin{bmatrix} q_A \\ q_B \\ q_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_f & C_{ff} & C_{ff} \\ C_{ff} & C_f & C_{ff} \\ C_{ff} & C_{ff} & C_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}.$$

Diferenciranjem prethodne relacije po vremenu dobija se:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_A \\ q_B \\ q_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_f & C_{ff} & C_{ff} \\ C_{ff} & C_f & C_{ff} \\ C_{ff} & C_{ff} & C_f \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}.$$

Pošto se radi o prostoperiodičnim režimima voda, može se prethodna relacija napisati u kompleksnom domenu:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_f & C_{ff} & C_{ff} \\ C_{ff} & C_f & C_{ff} \\ C_{ff} & C_{ff} & C_f \end{bmatrix} \cdot j\omega \begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix}.$$

Za konkretan slučaj jednačine fizičke očiglednosti su: $\underline{I}_A = 0$; $\underline{U}_B = \underline{U}_C = U = \frac{35}{\sqrt{3}} kV$, pa su nepoznate u prethodnoj matricnoj jednačini \underline{I}_B , \underline{I}_C , \underline{U}_A . Sada se može napisati sledeći sistem jednačina:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= j\omega C_f \underline{U}_A + 2j\omega C_{ff} U \\ \underline{I}_B &= j\omega C_{ff} \underline{U}_A + j\omega C_f U + j\omega C_{ff} U \\ \underline{I}_C &= j\omega C_{ff} \underline{U}_A + j\omega C_f U + j\omega C_{ff} U \end{aligned} \right\} \Rightarrow \underline{U}_A = -\frac{2C_{ff}}{C_f} U; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_C = j\omega \left(C_f + C_{ff} - \frac{2C_{ff}^2}{C_f} \right) U.$$

Elementi matrice parcijalnih kapacitivnosti (C_{ff} i C_f) se mogu izračunati na osnovu pogonske i nulte kapacitivnosti datog voda prema sledećim relacijama:

$$\begin{aligned} C_{ff} &= -C_m = -\frac{C - C_o}{3} = -\frac{c - c_0}{3} l = -\frac{(10 - 5,2) \cdot 10^{-9}}{3} 50 = -0,08 \mu F; \\ C_f &= C_0 - 2C_{ff} = c_0 l - 2C_{ff} = 5,2 \cdot 10^{-9} 50 - 2 \cdot (-0,08 \cdot 10^{-6}) = 0,42 \mu F. \end{aligned}$$

Napon faze "A" prema zemlji je:

$$\underline{U}_A = -\frac{2C_{ff}}{C_f} U = -\frac{2 \cdot (-0,08)}{0,42} \frac{35}{\sqrt{3}} = 0,381 \frac{35}{\sqrt{3}} kV = 7,698 kV \angle 0^\circ$$

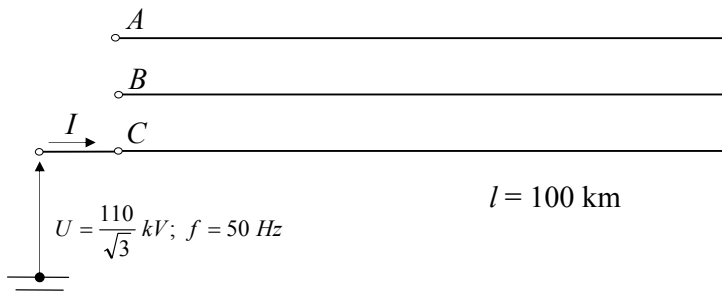
Proračun struje I :

$$\underline{I} = \underline{I}_B + \underline{I}_C = 2 \cdot j2\pi f \left(C_f + C_{ff} - \frac{2C_{ff}^2}{C_f} \right) U = j2 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot \left(0,42 - 0,08 - \frac{2 \cdot 0,08^2}{0,42} \right) 10^{-6} \cdot \frac{35}{\sqrt{3}} 10^3 = j3,93 A$$

Zadatak se može rešiti metodologijom koja je korišćena u zadatku 6, ali je prethodni pristup opštiji.

ZADATAK 9: Trofazni transponovani 110 kV dalekovod, dužine $l = 100$ km, se nalazi u praznom hodu. Ako pri isključenju dalekovoda pol prekidača u fazi C ostane zaglavljnjen (kao na slici) odrediti: struju I , napone slobodnih faznih provodnika A i B prema zemlji i međufazni napon U_{AB} .

Podužna pogonska kapacitivnost voda je $c = 11$ nF/km, a podužna nulta kapacitivnost je $c_o = 5$ nF/km.



Rešenje:

U ovom konkretnom slučaju dva fazna provodnika su isključena (odvojena od mreže) i na početku i na kraju, dok je fazni provodnik faze C priključen na fazni napon. Usled kapacitivne sprege između faznih provodnika voda u prisustvu zemlje, koja se tretira kao beskonačna provodna ravan, fazni provodnici faza B i C će imati neki napon prema zemlji, koji je potrebno odrediti.

Pošto se radi o prostoperiodičnom režimu može se proračun vršiti u kompleksnom domenu:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_f & C_{ff} & C_{ff} \\ C_{ff} & C_f & C_{ff} \\ C_{ff} & C_{ff} & C_f \end{bmatrix} \cdot j\omega \begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix}.$$

Za konkretan slučaj jednačine fizičke očiglednosti su: $\underline{I}_A = \underline{I}_B = 0$; $\underline{U}_C = U = \frac{110}{\sqrt{3}}$ kV, pa su nepoznate u prethodnoj matričnoj jednačini \underline{I}_C , \underline{U}_A , \underline{U}_B .

Može se napisati sledeći sistem jednačina:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= j\omega C_f \underline{U}_A + j\omega C_{ff} \underline{U}_B + j\omega C_{ff} U \\ 0 &= j\omega C_{ff} \underline{U}_A + j\omega C_f \underline{U}_B + j\omega C_{ff} U \\ \underline{I}_C &= j\omega C_{ff} \underline{U}_A + j\omega C_{ff} \underline{U}_B + j\omega C_f U \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\underline{U}_A = \underline{U}_B = -\frac{C_{ff}}{C_f + C_{ff}} U;$$

$$\underline{I}_C = j\omega \left(C_f - \frac{2C_{ff}^2}{C_f + C_{ff}} \right) U$$

Elementi matrice parcijalnih kapacitivnosti (C_{ff} i C_f) se mogu izračunati na osnovu pogonske i nulte kapacitivnosti datog voda:

$$C_{ff} = -C_m = -\frac{C - C_o}{3} = -\frac{c - c_0}{3} l = -\frac{(11-5) \cdot 10^{-9}}{3} 100 = -0,2 \mu F;$$

$$C_f = C_0 - 2C_{ff} = c_0 l - 2C_{ff} = 5 \cdot 10^{-9} 100 - 2 \cdot (-0,2 \cdot 10^{-6}) = 0,9 \mu F.$$

Naponi faza "A" i "B" prema zemlji su:

$$\underline{U}_A = \underline{U}_B = -\frac{C_{ff}}{C_f + C_{ff}} U = -\frac{-0,2}{0,9 - 0,2} \cdot U = 0,2857 \cdot U = 0,2857 \cdot \frac{110}{\sqrt{3}} kV = 18,14 kV.$$

Međufazni napon U_{AB} :

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B = 0 kV$$

Struja u faznom provodniku C je:

$$\underline{I}_C = j\omega \left(C_f - \frac{2C_{ff}^2}{C_f + C_{ff}} \right) U = j2\pi 50 \left(0,9 - \frac{2 \cdot (-0,2)^2}{0,9 - 0,2} \right) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = j15,68 A$$

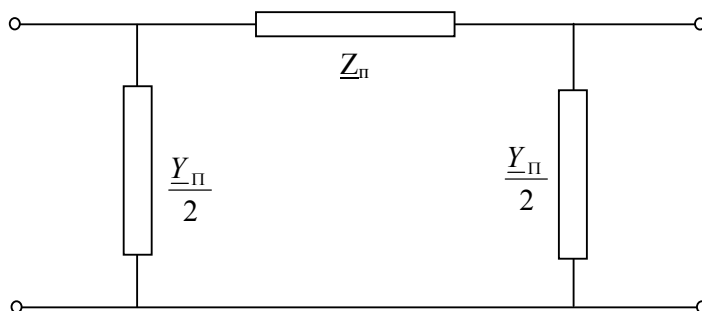
U ovom zadatku je utvrđeno da napon na slobodnim faznim provodnicima može usled kapacitivne sprege biti značajno veliki i opasan po život. Ovo je jedan od razloga da se pri izvođenju radova na vodu obavezno uzemlje svi provodnici (na oba kraja voda i na mestu radova).

ZADATAK 10: Odrediti parametre ekvivalentne π -šeme voda sa sledećim parametrima: $l = 400 \text{ km}$, $R_S = 12,7 \text{ M}\Omega\text{km}$, $r = 0,1 \Omega/\text{km}$, $L = 1,3 \text{ mH}/\text{km}$, $C = 8,7 \cdot 10^{-9} \text{ F}/\text{km}$. Izračunati parametre zamenske šeme ovog voda ako je on idealizovan. Učestanost je 50 Hz .

Rešenje:

Vod je element sa raspedeljenim parametrima i svako njegovo predstavljanje zamenskim šemama sa koncentrisanim parametrima predstavlja u izvesnoj meri aproksimaciju. Takođe, treba imati u vidu da podužni parametri duž voda nisu konstantni jer vod prelazi preko različitog terena, različiti su ugibi, specifična otpornost zemlje, uslovi za pojavu korone, temperaturni uslovi i slično. Ipak, za većinu praktičnih proračuna vod se može modelovati koncentrisanim parametrima čime se dobijaju ekvivalentne šeme.

Za modelovanje nadzemnih elektroenergetskih vodova koriste se različite zamenske šeme u zavisnosti kakav se proračun sprovodi. Za proračun tokova snaga koristi se ekvivalentna "Π" zamenska šema voda, koja je prikazana na slici 10.1. Pored ove šeme koriste se i ekvivalentne "T", "Γ" i obrnuta "Γ" šema.



Slika 10.1 Ekvivalentna "Π" zamenska šema voda

Proračun parametara ekvivalentne "Π" zamenska šema voda:

Rednu impedansa u zamenskoj šemi kod kraćih vodova (do 200km) definišu samo omska otpornost (rezistansa) faznih provodnika i pogonska induktivnost voda, dok otočnu admitansu definiše pogonska kapacitivnost i aktivna odvodnost (konduktansa). Kod dužih vodova, kakav se u ovom primeru analizira, potrebno je uvesti i Kenelijeve sačinioce popravke.

$$x = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3} = 0,408 \Omega / km$$

$$x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 8,7 \cdot 10^{-9}} = 365873,43 \Omega km$$

$$B = \frac{1}{x_c} = \frac{1}{365873,43} = 2,733 \cdot 10^{-6} S / km$$

$$G = \frac{1}{R_S} = 7,874 \cdot 10^{-8} S / km$$

R_S – specifična aktivna otpornost

G – podužna aktivna odvodnost

$$\underline{z} = r + jx = (0,1 + j0,408)\Omega / km$$

$$\underline{y} = G + jB = (7,874 + j273,3) \cdot 10^{-8} S / km$$

$$\underline{Z}_l = \underline{z} \cdot l = (0,1 + j0,408) \cdot 400 = (40 + j163,2)\Omega$$

$$\underline{Y}_l = \underline{y} \cdot l = (7,874 + j273,3) \cdot 10^{-8} \cdot 400 = (31,5 + j1093,24) \cdot 10^{-6} S$$

Pošto je vod dugačak dobijene redne i otočne parametre treba korigovati:

$$\underline{Z}_\pi = \underline{Z}_l \left(1 + \frac{\underline{Z}_l \underline{Y}_l}{6} \right)$$

$$\underline{Z}_\pi = (40 + j163,2) \cdot \left[1 + \frac{(40 + j163,2)(31,5 + j1093,24) \cdot 10^{-6}}{6} \right] = (37,49 + j158,7)\Omega$$

$$\frac{\underline{Y}_\pi}{2} = \underline{Y}_l \frac{12 + \underline{Z}_l \underline{Y}_l}{24 + 4\underline{Z}_l \underline{Y}_l}$$

$$\frac{\underline{Y}_\pi}{2} = (31,5 + j1093,24) \frac{12 + (40 + j163,2)(31,5 + j1093,24) \cdot 10^{-6}}{24 + 4(40 + j163,2)(31,5 + j1093,24) \cdot 10^{-6}} = (18,35 + j554,85) \cdot 10^{-6} S$$

Proračun parametar idealizovanog voda:

Idealizovani vod je vod bez gubitaka aktivne snage, a to znači da je kod idealizovanog voda: $r = 0$ i $G = 0$.

Kod idealizovanog nadzemnog voda u jednačinama telegrafičara (vidi udžbenik str.142 do 145) hiperboličke funkcije prelaze u trigonometrijske, pa su parametri zamenske šeme definisani sledećim relacijama:

$$\underline{Z}_\pi = jZ_C \sin \lambda \quad \frac{\underline{Y}_\pi}{2} = j \frac{1 - \cos \lambda}{Z_C \sin \lambda}$$

Gde je λ električna ugaona dužina voda:

$$\lambda = \beta_l l = 0,06 \cdot 400 = 24^\circ$$

Karakteristična impedansa analiziranog voda je:

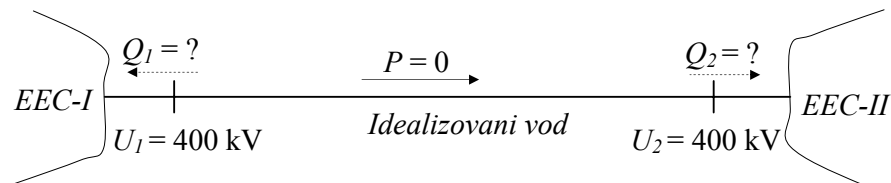
$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{1,3 \cdot 10^{-3}}{8,7 \cdot 10^{-9}}} = 386,55\Omega.$$

Parametri ekvivalentne π šeme idealizovanog voda su:

$$\underline{Z}_\pi = j386,55 \cdot \sin 24 = j157,22\Omega ;$$

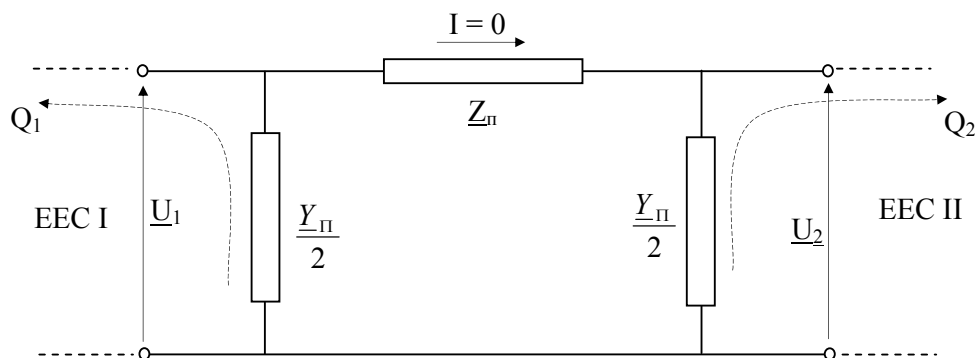
$$\frac{\underline{Y}_\pi}{2} = j \frac{1 - \cos 24}{386,55 \cdot \sin 24} = j549,87 \cdot 10^{-6} S.$$

ZADATAK 11: Dva elektroenergetska sistema, EEC-I i EEC-II, povezana su sa idealizovanim interkonektivnim vodom. Naponi na krajevima voda su jednaki ($U_1 = U_2 = 400$ kV). Ako se vodom ne prenosi aktivna snaga, izračunati koliku reaktivnu snagu injektira vod u EES-I, a koliku u EES-II. Parametri idealizovanog voda su: dužina voda - $L=250$ km, podužna pogonska induktivnost voda $l=1,024$ mH/km, podužna pogonska kapacitivnost voda - $c=0,01$ μ F/km.



Rešenje:

Za proračun tokova snaga u elektroenergetskom sistemu može se koristiti ekvivalentna "II" zamenska šema voda. Za proračun reaktivne snage koju idealizovani vod odaje u EES I i EES II može se koristiti ekvivalentna "II" zamenska šema voda:



Tokovi reaktivnih snaga u EES-u su vezani za efektivne vrednosti napona, a tokovi aktivnih snaga za fazni ugao između fazora napona. Ovaj zaključak je opšteg karaktera i odnosi se na sve elemente u EES-u (generatore, transformatore i vodove).

Ako dva elektroenergetska sistema (ili dva dela jedinstvenog EES-a) povezuje neki dalekovod (ili interkonektivni transformator) razmena reaktivnih snaga između dva EES-a će biti takva da reaktivna snaga "teče" od višeg ka nižem naponu a aktivna od napona čiji fazor prednjači ka naponu koji kasni. Ako bi u konkretnom slučaju napon U_1 bio veći od napona U_2 reaktivna snaga bi tekla od EESI ka EESII. Ako bi uz to npr. U_2 prednjačio u odnosu na U_1 aktivna snaga bi tekla iz EESII ka EESI tako da bi u tom slučaju tokovi aktivnih i reaktivnih snaga vodom bili suprotnih smerova. Dakle, tokove aktivnih i reaktivnih snaga treba posmatrati nezavisno.

U analiziranom slučaju efektivne vrednosti napona na krajevima voda su međusobno jednake ($U_1=U_2=400$ kV) pa ne postoji razmena reaktivnih snaga između EES-a I i EES-a II.

Pošto se vodom ne prenosi ni aktivna energija, naponi na krajevima voda su u fazi, odnosno:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 = U = 400 \text{ kV.}$$

Iz prethodne relacije sledi da kroz rednu impedansu (reaktansu) u zamenskoj šemi ne protiče struja.

Vod u analiziranom režimu se ponaša kao izvor reaktivne snage, pri čemu tu reaktivnu snagu podjednako injektira u EES I i EES II, pošto je $U_1 = U_2$, odnosno, važi:

$$Q_1 = Q_2 = Q.$$

Proračun parametara zamenske "Π" šeme idealizovanog voda:

$$\frac{Y_{\Pi}}{2} = j \frac{1 - \cos \lambda}{Z_c \sin \lambda}$$

gde je:

$$Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}} = \sqrt{\frac{1,024 \cdot 10^{-3}}{0,01 \cdot 10^{-6}}} = 320 \Omega$$

$$\lambda = \beta \cdot L = 0,06 \cdot 250 = 15^\circ$$

Reaktivna snaga koju injektira vod u EES-I, odnosno u EES-II je:

$$Q_1 = Q_2 = Q = U^2 \cdot \frac{Y_{\Pi}}{2} = \frac{1 - \cos \lambda}{\sin \lambda} \frac{U^2}{Z_c} = \frac{1 - \cos 15^\circ}{\sin 15^\circ} \frac{400^2}{320} = 65,826 \text{ M var.}$$

ZADATAK 12: Izračunati dužinu idealizovanog voda kod koga se maksimalno moguća reaktivna snaga prenosi bez pada napona. Kolika je ta snaga ako je napon na početku voda jednak nominalnom naponu i iznosi 220kV? Karakteristična impedansa voda je 380Ω .

Rešenje:

Maksimalna reaktivna sanaga koja se može preneti vodom je:

$$Q_{2\max} = \frac{P_{nat}}{2 \sin 2\lambda}, \quad P_{nat} = \frac{U_n^2}{Z_c} \quad \Rightarrow \quad Q_{2\max} = \frac{U_n^2}{2Z_c \sin 2\lambda}$$

Veza između napona na kraju i početku voda data je jednačinom telegrafičara, koja za analizirani slučaj prenosa reaktivne snage poprima sledeću formu:

$$U_1 = U_2 \cos \lambda + \frac{U_2 Z_c}{X} \sin \lambda,$$

gde je:

$$X = \frac{U_2^2}{Q_2}.$$

Zamenom prethodnog izraza u jednačinu telegrafičara dobija se:

$$U_1 = U_2 \cos \lambda + \frac{Z_c Q_2 \sin \lambda}{U_2}$$

Uslov zadatka je da nema pada napona, odnosno da je:

$$U_1 = U_2 = U_n.$$

Koristeći ovaj uslov dolazi se do sledeće jednačine iz koje se može izračunati električna ugaona dužina voda:

$$U_n = U_n \cos \lambda + \frac{Z_c}{U_n} \frac{U_n^2}{2Z_c \sin 2\lambda} \sin \lambda$$

$$1 = \cos \lambda + \frac{1}{2 \cdot (2 \sin \lambda \cos \lambda)} \sin \lambda$$

$$1 = \cos \lambda + \frac{1}{4 \cos \lambda} \Rightarrow \cos \lambda = \frac{1}{2} \Rightarrow \lambda = 60^\circ.$$

Pošto je fazna konstanta za nadzemne vodove $\beta_i = 0,06^0$ može se izračunati dužina voda pri kojem će se maksimalna reaktivna snaga prenositi bez pada napona:

$$l = \frac{\lambda}{\beta_i} = \frac{60}{0,06} = 1000 \text{ km}.$$

Odgovarajuća reaktivna snaga je:

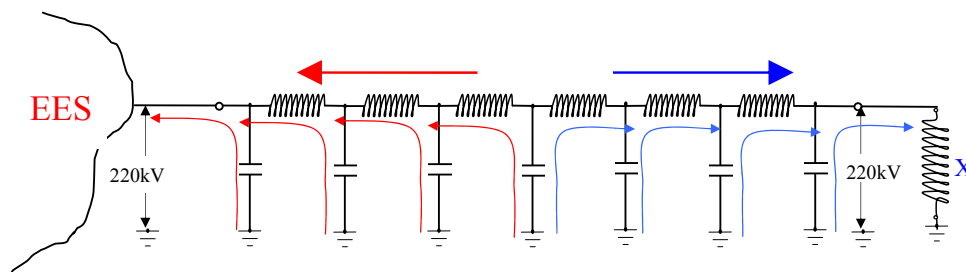
$$Q_{2\max} = \frac{(220 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot 380 \cdot \sin 120} = 73,54 \text{ MVar}$$

U tekstu koji sledi biće ukratko analizirana fizika radnog režima koji je opisan u ovom zadatku:

Kada je idealizovani vod u praznom hodu (otvoren na kraju a priključen na simetričan napon na početku voda) napon na kraju voda je po modulu veći od napona na početku voda i u fazi je sa njim (Ferantijev efekat). U režimu praznog hoda vod generiše reaktivnu snagu, pa je tok reaktivne snage od voda ka mreži, što je u skladu sa opštim zaključkom datom u prethodnom zadatku (napon na kraju voda je veći od napona na početku pa je tok reaktivne snage od voda ka mreži). Ovu činjenicu da se vod u praznom hodu ponaša kao izvor reaktivne snage često koriste dispečeri u EES-u kada imaju problema sa nedostatkom reaktivne snage u EES-u, pa onda vodove koji nisu u pogonu ostavljaju da rade u prazan hod i tako poboljšavaju naponske prilike u sistemu.

Ako se na kraju voda priključi neka reaktansa vod će dio reaktivne snage odavati reaktansi a dio EES-u na koji je priključen. U ovom režimu, u skladu sa zaključcima u uvodu u prethodni zadatak, napon na kraju voda će se smanjiti. Ako se reaktansa smanji povećaće se reaktivna snaga koju vod odaje reaktansi a napon na kraju voda će se dalje smanjivati. U graničnom slučaju, za neku reaktansu X , napon na kraju voda biće jednak naponu na početku voda, dalje smanjenje reaktanse bi stvorilo pad napona na vodu.

Pošto su po uslovu zadatka naponi na početku i kraju voda jednaki, vod odaje istu reaktivnu snagu i reaktansi i EES-u, kao u prethodnom zadatku. Odnosno, to znači da celokupnu reaktivnu snagu koju troši prigušnica X generiše sam vod. Struja na sredini voda je u ovom slučaju jednaka nuli (ako se pretpostavi da su podužni parametri voda konstantni duž voda).



Slika 12.1 Tokovi reaktivne snage na vodu

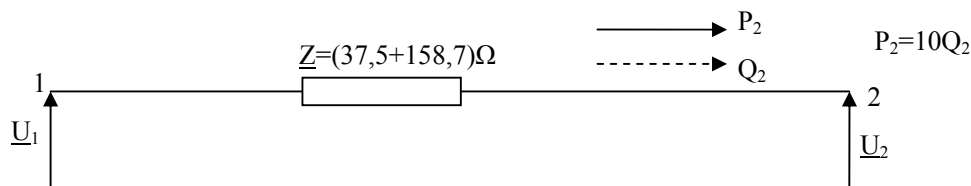
Prethodna analiza se može potvrditi koristeći rezultate iz prethodnog zadatka, odnosno:

$$Q_2 = U^2 \cdot \frac{Y_{\Pi}}{2} = \frac{1 - \cos \lambda}{\sin \lambda} \frac{U^2}{Z_c} = \frac{1 - \cos 60^\circ}{\sin 60^\circ} \frac{220^2}{380} = 73,54 \text{ M var} .$$

ZADATAK 13: Nadzemni vod je modelovan rednom impedansom $\underline{Z}=(37,5 + j158,7) \Omega$. Napon na početku voda je 220kV. Na kraju voda aktivna snaga je 10 puta veća od reaktivne snage. Kolika je maksimalna prividna snaga na kraju voda? Koliki je tada napon na kraju voda?

Rešenje:

Često se u inženjerskim proračunima tokova snaga u EES-u vod modeluje samo rednom impedansom, slika 13.1.



Slika 13.1 Modelovanje voda rednom impedansom

Napon na kraju voda se može definisati preko napona na početku voda i snage na kraju voda, prema sledećoj relaciji (vidi udžbenik str. 158 – 159).

$$\underline{U}_2 = \frac{U_1}{2} + \underbrace{\sqrt{\left(\frac{U_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{RQ_2 - XP_2}{U_1}\right)^2 - RP_2 - XQ_2}}_{a_2} + j \underbrace{\frac{RQ_2 - XP_2}{U_1}}_{b_2}$$

Uslov prenosa maksimalne prividne snage je:

$$\left(\frac{U_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{RQ_2 - X \cdot 10Q_2}{U_1}\right)^2 - R \cdot 10Q_2 - XQ_2 = 0$$

$$\left(\frac{U_1}{2}\right)^2 - Q_2^2 \left(\frac{R - 10X}{U_1}\right)^2 - Q_2(X + 10R) = 0$$

$$110^2 - 49,6064Q_2^2 - 533,7Q_2 = 0$$

$$Q_2^2 + 10,7586Q_2 - 243,92 = 0$$

$$Q_{1,2} = \frac{-10,7586 \pm \sqrt{10,7586^2 + 975,68}}{2} = \frac{-10,7586 \pm 33,0367}{2}$$

$$Q_2 = 11,14 \text{ Mvar} \quad \Rightarrow \quad P_2 = 111,4 \text{ MW}$$

$$\underline{S}_{2\max} = (111,4 + j11,14) \text{ MVA} \quad S_{2\max} = 114,94 \text{ MVA}$$

Proračun napona na kraju voda pri prenosu maksimalne prividne snage pod datim uslovima:

$$b_2 = \frac{RQ_2 - XP_2}{U_1} = \frac{37,5 \cdot 11,14 - 158,7 \cdot 111,4}{220} = -78,48 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_2 = a_2 + jb_2$$

$$\underline{U}_2 = (110 - j78,48) \text{ kV}$$

$$U_2 = 135,12 \text{ kV}$$