

1. Nabrojite osnovne vrste stupova dalekovoda i objasnite njihovu funkciju?

Po položaju u trasi stupovi se dijele na **linijske**, koji se nalaze na ravnom dijelu vertikalne projekcije trase i **kutne**, koji se nalaze na mjestima loma vertikalne projekcije trase.

Po načinu zavješanja vodiča stupovi se dijele na **nosne** i **zatezne**.

Prema posebnim funkcijama u vodu mogu se još navesti slijedeći **posebni stupovi**:

Krajnji stup je zadnji stup na oba kraja voda prije njegovog spoja na rasklopno postrojenje, obično je rasteretni.

Preponski stup je stup koji nije jako nategnut s obje strane zbog promjene presjeka, ili promjene maksimalno dozvoljenog naprezanja vodiča (prijelazi željezničkih pruga, autoputova, plovnih rijeka, morskih tjesnaca itd.). Često je rasteretni.

Međustup je nosni stup umetnut u preponsko otponsko polje, da bi vodiči dobili potrebnu visinu, jer je to obično jeftinije nego graditi jako opterećeni visoki preponski stup.

Križišni stup je prilagođen križanju s nekim drugim vodom.

Prepletni stup je stup na kojem se vrši prepletanje vodiča radi postizanja električne simetrije voda.

2. Što je normalni, a što iznimni dodatni teret na dalekovodu?

U stanovitim klimatskim okolnostima na vodič se hvata led, inje ili snijeg, koji ga dodatno opterećuju (zaleđivanje vodiča). Osnovni dodatni teret se određuje po izrazu:

$$G_{l0} = 0,18\sqrt{d}$$

Gdje je d promjer vodiča [mm].

Stvarni dodatni teret usljed zaleđivanja se određuje po izrazu:

$$G_l = k G_{l0}$$

Koeficijent k određuje se na temelju hidrometeoroloških podataka i iskustva na vodovima istog područja, i to tako da se teret G_l javlja u prosjeku svakih pet godina.

Daljnji uzrok dodatnog opterećenja vodiča je vjetar, koji se uzima u proračun kao tlak p [daN/m²], na površinu koja mu je izložena.

Iznimni dodatni teret je teret koji se pojavljuje u prosjeku svakih 20 godina, a manifestira se kao led, inje i snijeg. Koeficijent k u tom slučaju je veći ili jednak od 4 (u Hrvatskoj iznosi 4).

3. Što je provjes i kako se određuje za slučaj lančanice, a kako za slučaj parabole?

Provjes je udaljenost vodiča od zamišljene ravne linije koja spaja dva ovjesišta.

Lančanica:

$$y(x) = \frac{\sigma}{\gamma} \operatorname{ch}\left(\frac{x\gamma}{\sigma}\right)$$

Razvojem jednadžbe lančanice u red hiperboličkih funkcija i nakon zanemarenja dobiva se jednadžba parabole. Znači jednadžba lančanice može se nadomjestiti parabolom i pri tom se neće napraviti velika greška.

Parabola:

$$y(x) = \frac{\sigma}{\gamma} \left[1 + \frac{1}{2!} \left(\frac{x\gamma}{\sigma} \right)^2 \right]$$

U oba slučaja se provjes računa kao: $f = y\left(\frac{a}{2}\right) - y(0)$

4. Kako se određuje duljina vodiča i koliko iznosi u slučaju lančanice, odnosno parabole?

Lančanica:

$$y(x) = \frac{\sigma}{\gamma} \operatorname{ch}\left(\frac{x\gamma}{\sigma}\right)$$

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} = \sqrt{1 + \frac{dy^2}{dx^2}} dx$$
$$\frac{dy}{dx} = \frac{d}{dx} \left[\frac{\sigma}{\gamma} \operatorname{ch}\left(\frac{x\gamma}{\sigma}\right) \right] = \operatorname{sh}\left(\frac{x\gamma}{\sigma}\right)$$
$$l = 2 \int_0^{\frac{a}{2}} \sqrt{1 + \operatorname{sh}^2\left(\frac{x\gamma}{\sigma}\right)} dx = 2 \frac{\sigma}{\gamma} \operatorname{sh}\left(\frac{a\gamma}{2\sigma}\right)$$

Razvojem jednadžbe duljine lančanice u hiperbolični red dobije se jednadžba parabole uz zanemarivanje te se ne pojavljuje znatna pogreška.

$$l = 2 \frac{\sigma}{\gamma} \operatorname{sh}\left(\frac{a\gamma}{2\sigma}\right) = 2 \frac{\sigma}{\gamma} \left[\frac{a\gamma}{2\sigma} + \frac{1}{3!} \left(\frac{a\gamma}{2\sigma}\right)^3 + \dots \right] \approx a + \frac{a^3 \gamma^2}{24\sigma^2}$$

5. Koje sile djeluju na vodič u rasponu i kako se izračunavaju?

Vertikalne sile:

- Vlastita težina vodiča po jedinici duljine $G_0 \left[\frac{daN}{m} \right]$
- Reducirana težina vodiča $\gamma_0 \left[\frac{daN}{m \cdot mm^2} \right]$
- Dodatni teret (led, snijeg ili inje) $G_l = k \cdot 0,18\sqrt{d} \left[\frac{daN}{m} \right]$

Horizontalna sila – vjetar:

$$F = A_{vj} \cdot p \cdot c_v \cdot \sin \alpha [N]$$
$$p = \frac{v^2}{16} \left[\frac{daN}{m^2} \right]$$

6. Što je definirano jednadžbom stanja vodiča i kako glasi?

Jednadžbom stanja zategnutog vodiča dana je funkcionala ovisnost temperature i naprezanja, odnosno temperature i provjesa. Sve promjenjive veličine vezane su jednadžbom stanja, koja se izvodi iz promatranja statičke ravnoteže vodiča, a glasi:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{E} + \beta(\vartheta_1 - \vartheta_2) = \frac{a^2}{24} \left(\frac{\gamma_1^2}{\sigma_1^2} - \frac{\gamma_2^2}{\sigma_2^2} \right)$$

7. Što je kritični raspon?

Najveće naprezanje σ_{max} , koje može uslijediti ili na -20°C ili na -5°C , ne smje biti veće od najvećeg dopuštenog naprezanja za taj vodič σ_d . O tome na kojoj od dviju temperatura nastupa kritično naprezanje određuje kriterij kritičnog raspona: kritični raspon a_{kr} je onaj raspon pri kojem je naprezanje na -20°C jednako naprezanju na -5°C s dodatnim zimskim teretom i prema propisima dostiže najveću vrijednost σ_d

$$a_{kr} = \sigma_{max} \sqrt{\frac{360\beta}{\gamma_z^2 - \gamma_0^2}}$$

ako je stvarni raspon voda manji od kritičnog, najveće naprezanje nastupa pri $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, pa je to mjerodavno stanje u svezi s naprezanjem. A ako je stvarni raspon veći od kritičnog najveće naprezanje nastaje pri -5 s dodatnim zimskim teretom te je to mjerodavno stanje.

8. Što je kritična temperatura?

Najveći provjes nastaje ili pri $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ zbog temperature ili na $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ zbog dodatnog zimskog tereta. Odlučujući je kriterij kritične temperature: kritična temperatura je ona pozitivna temperatura na kojoj je provjes golog vodiča na $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ isti kao na $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ uz dodatni zimski teret.

$$\vartheta_{kr} = \frac{\sigma_{max}}{\beta E} \left(1 - \frac{\gamma_0}{\gamma_z} \right) - 5$$

Ako je kritična temperatura manja od $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ najveći provjes nastaje pri $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, a ako je kritična temperatura veća od $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ najveći provjes nastaje na -5°C .

9. Što je kritični napon i kako se određuje?

Kritični napon je pogonski napon pri kojemu jakost električnog polja dosegne vrijednost električne čvrstoće zraka i dolazi do pojave korone. Čak i uvjetima ujednačenog polja između vodiča, više faktora utječe na probojnu čvrstoću zraka. Neki od tih faktora su tlak zraka, material vodiča, zadržaj vlage, pojava fotoionizacije i vrste napona. Na površini vodiča, neravnine, kao što su zaprljanja ili sama izvedba vodiča uzrokuju koncentraciju gradijenta napona što može postati izvor pražnjenja.

$$U_{kr} = 36,5r \cdot \rho \cdot m \cdot \ln \frac{D}{r}$$

ρ - relativna gustoća zraka

m - faktor hrapavosti vodiča

10. Kako se određuje jedinični otpor voda u izmjeničnom sustavu i o čemu ovisi?

Jedinični djelatni otpor voda definiram je padom napona ili gubitkom snage po jedinici duljine voda, ako vodičem teče struja od 1A.

$$R_0 = \frac{\Delta U}{I} = \frac{\Delta P}{I^2}$$

Pri prolasku izmjenične struje dolazi do izražaja dolazi utjecaj skin efekta. Budući da vodičem teče izmjenična struja, magnetska indukcija se mijenja u vremenu što će izazvati stvaranje elektromotorne sile. Polaritet elektromotorne sile je takav da se protivi uzrocima koji su je izazvali. Drugim riječima u vodiču se induciraju struje suprotnog smjera od one koja prolazi vodičem i koja je izazvala stvaranje magnetske indukcije. Postaje tako razumljivo da je zbog veće protuelektromotorne sile u centru vodiča i efektivna struja na tom mjestu slabija od one na površini vodiča. Gustoća struje onda nije više homogeno raspoređena po vodiču, kao što je slučaj kod istosmjerne struje, te je efektivna površina vodiča manja i ekvivalentno tome je otpor vodiča veći i to za:

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

30. Napiši treći oblik prijenosnih jednačbi za slučaj poznatih prilika na kraju voda, te objasni što je karakteristična impedancija, a što dubina prodiranja (valna konstanta)?

Karakterističnu impedanciju izrazujemo kao:

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} = \frac{Z_1}{\gamma} = \frac{\gamma}{Y_1} = \frac{Z}{\theta} = \frac{\theta}{Y}$$

Možemo odmah napisat treći oblik prijenosnih jednačbi

$$V_2 = V_1 \cosh \theta - I_1 Z \frac{\sinh \theta}{\theta}$$

$$I_2 = I_1 \cosh \theta - V_1 Y \frac{\sinh \theta}{\theta}$$

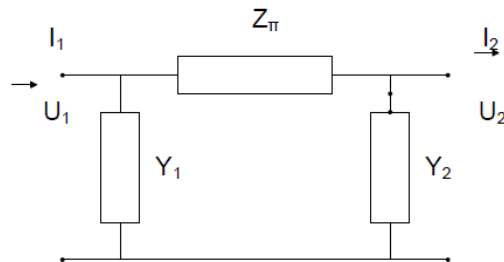
$$V_1 = V_2 \cosh \theta + I_2 Z \frac{\sinh \theta}{\theta}$$

$$I_1 = I_2 \cosh \theta + V_2 Y \frac{\sinh \theta}{\theta}$$

Dubina prodiranja je ona udaljenost od površine vodiča na kojoj električno polje padne na 1/e svoje početne vrijednosti.

$$\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1}$$

31. Kako se određuju korekcijski faktori za točnu π -shemu voda i koliko iznose?



Korekcijski faktori se određuju iz uspoređivanja struja i napona iz pi sheme i druge prijenosne jednačbe:

$$V_1 = V_2 \cosh(\gamma x) + Z_c I_2 \sinh(\gamma x)$$

$$I_1 = I_2 \cosh(\gamma l) + \frac{V_2}{Z_c} \sinh(\gamma l)$$

$$\begin{aligned} I_{12} &= I_2 + V_2 Y_2 \\ V_1 &= V_2 + \Delta V = V_2 + (I_2 + V_2 Y_2) Z_\pi \\ V_1 &= V_2 (1 + Z_\pi Y_2) + I_2 Z_\pi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 + V_2 Y_2 + V_1 Y_1 \\ I_1 &= I_2 + V_2 Y_2 + Y_1 [V_2 (1 + Z_\pi Y_2) + I_2 Z_\pi] \\ I_1 &= I_2 (1 + Z_\pi Y_2) + V_2 [Y_2 + Y_1 (1 + Z_\pi Y_2)] \end{aligned}$$

$$Z_\pi = Z_c \sinh(\gamma l) = Z \frac{\sinh \theta}{\theta}$$

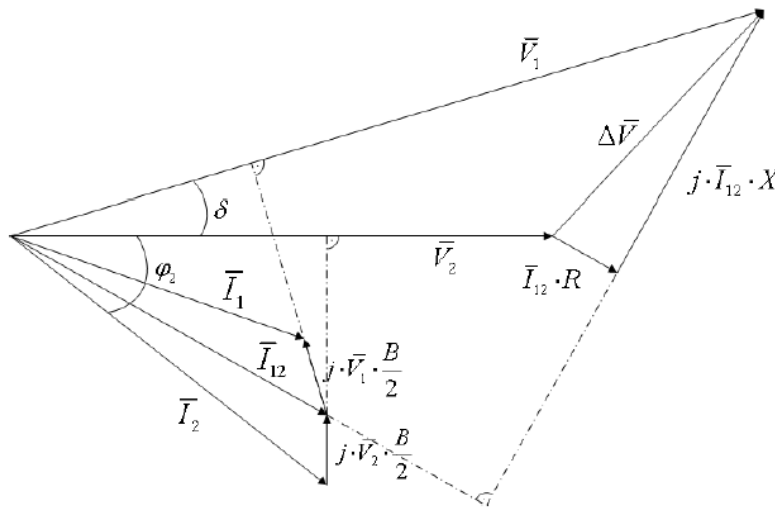
$$\begin{aligned} Y_1 &= Y_2 = Y_\pi \\ 1 + Y_1 Z_\pi &= 1 + Y_2 Z_\pi = \cosh(\gamma x) \end{aligned}$$

$$\frac{sh(\gamma x)}{Z_c} = Y_\pi [2 + Y_\pi Z_\pi]$$

$$\frac{sh(\gamma x)}{Z_c} = Y_\pi [1 + ch(\gamma x)]$$

$$Y_\pi = \frac{Y}{2} \frac{th\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\frac{\theta}{2}}$$

32. Nacrtaj vektorski dijagram za slučaj induktivnog opterećenja na kraju voda ako je vod modeliran π -shemom?



33. Odredi pad napona na vodu ako su mu poznati napon i snaga na kraju voda?

$$V_2 = \frac{U_2}{\sqrt{3}}; \quad I_2 = \frac{S_2^*}{U_2 \sqrt{3}} = I_{2R} - jI_{2I} = I_2 \angle -\varphi_2 \text{ ind.}$$

$$\Delta V_u = \frac{P_2}{U_2 \sqrt{3}} R + \frac{Q_2}{U_2 \sqrt{3}} X \quad \Delta V_p = \frac{P_2}{U_2 \sqrt{3}} X - \frac{Q_2}{U_2 \sqrt{3}} R$$

$$V_1 = \sqrt{(V_2 + \Delta V_u)^2 + \Delta V_p^2}$$

$$\Delta V = V_1 - V_2$$

34. Odredi gubitak snage na vodu ako su mu poznati napon i snaga na kraju voda?

$$S'' = P_2 + jQ_2 - j\Delta Q_v = P_2 + jQ_2'' = P_2 + j(Q_2 - \Delta Q_v)$$

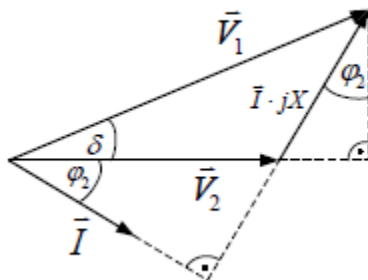
$$\Delta S = 3I^2 Z = 3I^2 (R + jX) = R(I_R^2 + I_X^2)(R + jX)$$

$$= 3(I_R^2 R + jI_R^2 X + I_X^2 R + jI_X^2 X) = 3[I_R^2 R + I_X^2 R + j(I_R^2 + I_X^2)X]$$

$$\Delta S = \Delta P + j\Delta Q = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U^2} R + j \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U^2} X$$

35. Što je granična snaga prijenosa i kako se određuje?

Granična snaga prijenosa je najveća snaga koja se može prenjeti bez gubitaka.



$$\sin \delta = \frac{IX \cos \varphi_2}{V_1}$$

$$I \cos \varphi_2 = \frac{V_1}{X} \sin \delta$$

$$P_2 = V_2 I \cos \varphi_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$

36. Kako se određuje prirodna snaga prijenosa trofaznog voda i kakve prilike vladaju na idealnom vodu u tom slučaju?

Vod na kraju opteretimo potrošačem kojemu je otpor jednak valnom otporu voda. Kako nema promjene valnog otpora, na mjestu priključka potrošača neće biti refleksije. Takav potrošač jednostavno guta prolazni val i fizikalno se postiže isto stanje kao da je vod beskonačno dug. U ovom pogonskom slučaju prenosi se snaga koju nazivamo **prirodnom snagom voda**.

Ako je vod opterećen upravo prirodnom snagom, imamo idealne pogonske prilike. Tada je:

- Napon konstantan uzduž voda
- Struja je konstantna uzduž voda
- Struja i napon voda u fazi. Nema prijenosa reaktivne snage.
- Nema refleksije na kraju voda

$$P_{nat} = 3 \left(\frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{1}{Z_v}$$

37. Kakve prilike vladaju na idealnom vodu u kratkom spoju?

U kratkom spoju idealni vod se ponaša kao idnuktivni ili kapacitivni potrošač, ovisno o njegovoj duljini u odnosu na duljinu vala. Kut između struje i napona uvijek iznosi 90° . Do dužine 1500 km od kraja struja zaostaje za naponom, od 1500 do 3000 km prednjači, od 3000 do 4500 km zaostaje, a od 4500 do 6000 km prednjači. Zbog naponskih i strujnih stojnih valova.

38. Objasni Ferantijev efekt na primjeru idealnog voda?

Kod idealnog voda vrijedi:

$$R_1 = 0 \quad G_1 = 0$$

I iz toga dalje slijedi:

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{Z_1 Y_1} = \sqrt{j\omega L_1 j\omega C_1} = j\omega \sqrt{L_1 C_1} = j\beta_0 \\ \beta_0 &= \omega \sqrt{L_1 C_1} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{6000} = \frac{2\pi}{\lambda} \\ Z_c &= Z_v \end{aligned}$$

Uvrštavanjem gornjih izraza u prijenosnu jednadžbu drugog reda i primjenom Eulerovih formula na kompleksne hiperbolne funkcije dobit će mo:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2 \cos \beta_0 x + j I_2 Z_v \sin \beta_0 x \\ I_1 &= I_2 \cos \beta_0 x + j \frac{V_2}{Z_v} \sin \beta_0 x \end{aligned}$$

Razmotrimo prilike na zadnjoj četvrtini valne dužine voda u praznom hodu ($I_2 = 0$)

$$\begin{aligned} \frac{V_1}{V_2} &= \cos \beta_0 x \\ \frac{V_2}{V_1} &= \frac{1}{\cos \beta_0 x}; \quad x \in [0, 1500 \text{ km}]; \quad \beta_0 x \in [0, \frac{\pi}{2}] \end{aligned}$$

Iz gornje jednažbe vidimo da porastom duljine voda i omjer napona na kraju i na početku voda teži u beskonačnost. Ovo povećanje napona na kraju idealnog voda u praznom hodu je poznat kao Ferantijev efekt. Upravo opisana pojava na dugom idealnom vodu visokog napona mogu predstavljati ograničenje dužine prijenosa ako se ne izmjeni karakter voda primjenom poprečnih prigušnica (smanjuje B) i seriskih kondezatora (smanjenje X).

39. Objasni što se događa s naponskim valom u točki promjene valnog otpora?

Pri uklapanju naponskog izvora na prijenosni vod, stvara se naponski i strujni val koji se kreću prema kraju voda približno brzinom svjetlosti. Na mjestu promjene valnog otpora dio ulaznog vala se reflektira, a dio prolazi. Iznos prolaznog i reflektiranog vala određeni su omjerima iznosa valnih otpora spojenih vodova.

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

Prolazni val ima iznos $U_p = U_1 \alpha$ gdje je **α faktor prolaza**.

Reflektiran val se računa kao $U_r = U_1 \beta$ gdje je **β faktor refleksije**.

Uvijek vrijedi $U_p = U_p - U_r$

40. Odredi faktore prigušenja i refleksije za slučaj praznog hoda i kratkog spoja na idealnom vodu?

Prazni hod $R_2 = \infty$

$$\alpha = \frac{2R}{R + Z_{v1}} \quad /: R$$
$$\alpha = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{2}{1 + \frac{Z_{v1}}{R}} = 2$$
$$\beta = \alpha - 1 = 1$$

Kratki spoj $R_2 = 0$

$$\alpha = \frac{2R}{R + Z_{v1}} = 0$$
$$\beta = \alpha - 1 = -1$$

41. Što je vod bez izobličenja i kako se kod njega određuju iznosi prolaznog i reflektiranog vala na mjestu promjene valnog otpora?

Kažemo da je vod bez izobličenja ako vrijedi:

$$\frac{R_1}{L_1} = \frac{G_1}{C_1} = a$$

Val se ne mjenja oblik ali se prigušuje.