



# Elektroenergetska omrežja in naprave

Zapiski iz učbenika »Elektroenergetska  
tehnika1« Igorja Papiča in Petra Žunka

**Eva**  
Študijsko leto 2012/13, zimski semester

# 1. Elektroenergetsko omrežje

---

## Razvoj elektroenergetskega omrežja

- Elektroenergetsko omrežje kot prenašalec električne energije od mesta proizvodnje do mesta porabe
- Problem shranjevanja el. energije → zato se sproti porablja → govorimo o izravnavi med proizvodnjo in porabo
- Več električnih omrežij, povezanih v neko celoto imenujemo elektroenergetski sistem.

→ Začetek: potrebe po oskrbi z električno energijo v obsegu industrije

→ Lastniki industrije so začeli nabavljati lastne električne agregate za razsvetljavo in pogone

- Prednosti izmeničnega toka → poraba el. energije začela hitro naraščati (vsi so jo začeli uporabljati, tako v mestu kot na podeželju) → ko so uvedli izmenični sistem, so zadostili potrebe vseh.
- Izmenični sistem je omogočil uporabo transformatorjev in prenos električne energije na daljše razdalje

### ZGODOVINA ELEKTRIFIKACIJE V SLOVENIJI

→ Prva hidroelektrarna v Sloveniji: (grajena 1912-1915) HE Završnica → začetek elektrifikacije na širšem območju elektrarne

→ Takrat največja HE Fala na Štajerskem → začetek splošne elektrifikacije s frekvenco 50Hz.

→ Največji odjemalec Fale je bila tovarna duška Ruše (10 kV)

→ Maribor takrat: 10kV in 35kV (za prenos in razdeljevanje)

→ Osrednja Slovenija: Kranjske deželne elektrarne → 10kV, 20kV in 60kV

→ Slovensko Primorje pod Italijo: najprej obratovanje s 42Hz. Ker na tukaj ni bilo pomembnejših proizvodjalnih virov, je bila potreba po daljnovodu višjih napetosti – 132kV

- Velikost elektroenergetskega sistema in njegova struktura sta bili v posameznih obdobjih razvoja odvisna od moči in količine električne energije, ki se je prenašala porabnikom, od geografske razporeditve virov in porabnikov ter od načina povezovanja elementov sistema.
- Zaradi zahtev po prenašanju večjih moči, zaradi večje obratovalne zanesljivosti in večje ekonomičnosti obratovanja so se posamezni izolirani sistemi pričeli med seboj povezovati. Do druge svetovne vojne ni bilo 110kV na Slovenskem. (prenosna moč največ 50MW)
  - Torej, potrebe po čim večjih prenosnih močeh so narekovale razvoj višjih napetosti daljnovodov (220kV za 250MW)
  - Jugoslavija: CIGRE- prenosno omrežje Nikole Tesla (osnovno omrežje 380kV)
  - 1970: 380kV: Džerdap-Beograd

Obstoječe daljnovodne povezave z sosednjimi državami, ki se bodo v prihodnosti še okrepile:

→ Z Italijo: 220kV in 400kV

→ Z Avstrijo: 220kV in 400kV

→ Z Madžarsko: načrtovana povezava 400kV

→ S Hrvaško: tri 110kV, dve 220kV in dve 400kV

Povezovanje elektroenergetskih sistemov je pomembno:

- Ekonomska izraba proizvodnih in prenosnih naprav pri različnih značilnostih porabe električne energije (dnevni diagram, po dnevi porabimo več energije, ponoči pa manj) na določenih območjih
- Zanesljivost obratovanja je večja, lažja in natančnejša je regulacija frekvence in napetosti, tako je kakovost električne energije večja
- Možnost instalacije večjih in s tem rentabilnejših proizvodnih enot

## Interkonekcijska povezava slovenskega elektroenergetskega sistema s sistemi sosednjih držav

- Interkonekcijska ali mednarodni sistemi (potem ko so se sistemi poenotili in se začeli med seboj povezovati ne glede na območja držav, kjer so se nahajali)
- Pred 1974: povezovanje s sosedi: odtočno in usmerjeno obratovanje (ni bilo še sinhronizacije frekvence, zaradi različnih pristopov regulacije frekvence)
- Odtočno obratovanje: je od matičnega sistema ločen del obmejnih porabnikov, ki so povezani s sosednjim sistemom
- Usmerjeno obratovanje: od matičnega sistema so ločeni obmejni proizvodni viri in povezani s sosednjim sistemom.
- UCPTTE – Združenje za koordinacijo proizvodnje in prenosa električne energije
- Vzhodna Evropa v času Sovjetske zveze: električno omrežje se imenuje SEV, enosmerne povezave- ni sinhronnega obratovanja z zahodom; (Rusija + Baltske države + še nekatere iz bivše Sovjetske zveze = IPS/UPS)
- 1991: UCPTTE, razpad na dve coni (I in II):
  - I cona: CENTREL: Poljska, Češka, Slovaška in Madžarska(1995), Maroko(1997),Alžirija, Tunizija, vzporedno Ukrajina (2002)
  - II cona: Bolgarija in Romunija, vzporedno še Albanija
  - 1999: UCPTTE →UCTE (Združenje za koordinacijo prenosa električne energije)
  - 2004: Ponovna sinhronizacija med I in II cono
  - UCTE ima 23 držav članic + Dansko (kot izredna, saj z UCTE obratuje družba ELSAM, ELKRAFT pa je povezan z NORDELOM ), (Albanije ni med njimi)
- Skupina NORDEL: skandinavske države
- Povezava med NORDELOM in UCTE: povezave 380kV in 220kV
- VB in Irska, otočno delovanje, vzrok: geografska lega
- VB povezana s FR prek morskega kabla, velik prenos energije
- Prihodna nadaljnja širitev na Turčijo, Libijo, Egipt, Jordanijo, Sibirijo in Libanon.
- Prednosti povezav: kakovost frekvence, napetost in neprekinjenost dobave
- Za koordinacijo obratovanja in izmenjavo med posameznimi področji skrbita centra Brauweiler (Nemčija) in Laufenburg (Švica)
- Nivoji napetosti:
  - VN: 380kV, občasno odstopanje korigirajo regulacijski TR, regulatorji jalove moči in odklopi slabo obremenjenih daljnovodov
  - SN: zadovoljiv v Slo

→ NN: slabe napetostne razmere, problem visokih specifičnih investicij za rekonstrukcijo omrežij

### Splošna delitev električnih omrežij

- V javni uporabi Teslin trifazni sistem prenosa in razdeljevanja električne energije
- 4 vodniki na strani nizke napetosti in 3 vodniki na strani visoke napetosti
- Povezovalni členi med omrežji (visoke, srednje in nizke) so transformatorji
- Nadzemna in kabelska omrežja:
  - Nadzemni vodi so izpostavljeni neposrednim atmosferskim vplivom (že do 225kV)
  - Kabelska omrežja so nameščeni v zemlji in so zato zanesljivejši in lahko 7x in več dražji od nadzemnih vodov; prenašajo zelo velike moči
- Na splošno delimo električna omrežja po:
  - Nazivnih napetostih:
    - Nizka napetost: do 1kV
    - Srednje-visoka: okoli 35kV
    - Visoka napetost: nad 1kV (400kV – 1300kV v Sloveniji)

Nazivna napetost (kV)	3	6	10	20	35	60	110	220	400
Najvišja obratovalna napetost (kV)	3,6	7,2	12	24	38	72,5	123	245	420

- 3 in 6 kV – rudarstvo, industrija
- 60kV - v Sloveniji izumrla
- 10kV – obratujejo kabelska omrežja
- 20kV – obratujejo nadzemeljska
- 35kV in 220kV - pri razdeljevalnih omrežjih se opuščata

→ Funkcijah, ki jih v sistemu uporabljamo

- Prenosno omrežje (110kV in 400kV), ,
  - na daljše razdalje
  - običajno zankasto
  - tudi povezovalna ali interkonekcijska

(povezujejo sosednje elektroenergetske sisteme)

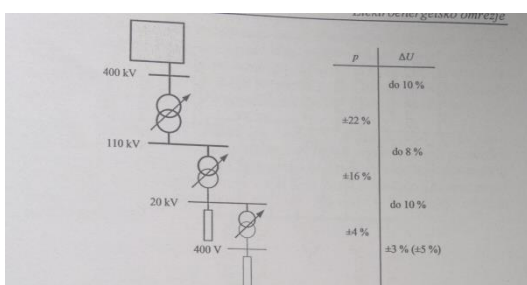
- Razdeljevalna ali distribucijska omrežje (20 in 0,4kV)
- Porabniška (npr. znotraj »tovarne«)

→ Strukturah ali konfiguracijah pri normalnem obratovanju in ob okvarah

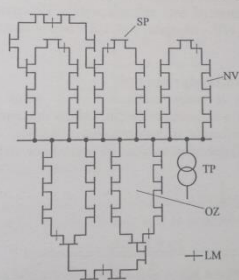
- Zankasta (v praksi odprte zanke) za srednje-napetostnem nivoju
  - Če eden od napajalnih vodov zaradi okvare izpade, lahko z vklopom predhodno izklopljenega odklopnika na ločenem mestu zagotovimo nemoteno napajanje porabnikov

- Radialna

• Priporočila UCTE opredeljujejo zahtevo po regulaciji napetosti, ki se izvaja prek avtomatske regulacije na



Slika 1.6: Dopusne napetostne spremembe v omrežju po UCTE

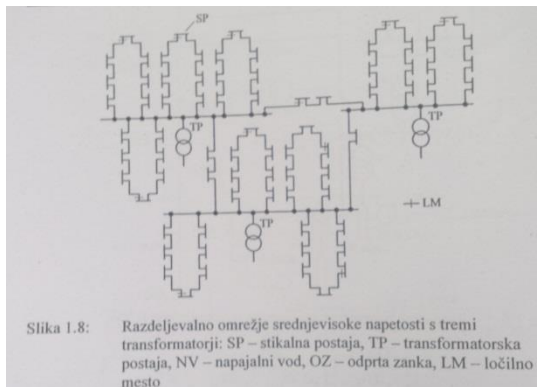


Slika 1.7: Razdeljevalno omrežje srednjevisoke napetosti z enim transformatorjem: SP – stikalna postaja, TP – transformatorska postaja, NV – napajalni vod, OZ – odprta zanka, LM – ločilno mesto

močnostnih transformatorjih 400/110 kV in 110/20 kV ter neavtomatske regulacije napetosti na močnostnih transformatorjih 20/0,4 kV (preklop v neobremenjenem stanju). Priporočene

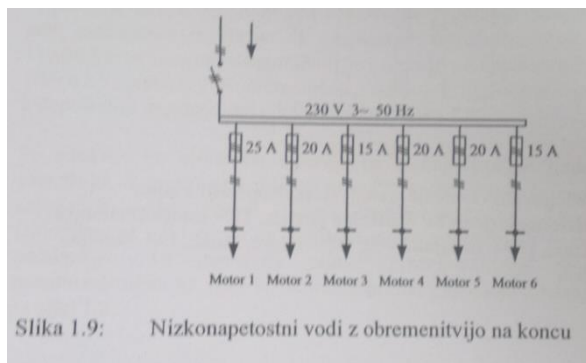
regulacijske stopnje z dopustnimi napetostmi odstopanj (slika 1.6)

- Po strukturi so električna omrežja na srednjevisokem napetostnem nivoju ZAKNASTA, v praksi pa uporabljamo izvedbo v obliki odprte zanke. Če eden izpade (zaradi okvare), potem z vklopom (prej izklopljenega) odklopnika zagotovimo nemoteno napajanje porabnikov. (slika 1.7 in slika 1.8)

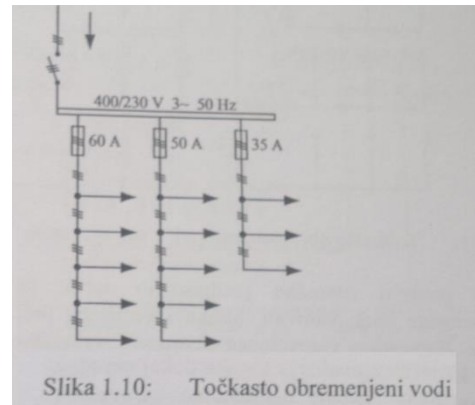


#### NIZKONAPETOSTNA OMREŽJA ODPRTEGA TIPA

- Napajanje iz enega mesta
- Napajanje iz istega mesta več porabnikov → žarkasta omrežja (na sliki 1.9)
- Slika 1.9: niskonapetostna stikališča, kjer so posamezni porabniki priključeni na posamezno samostojne vode
- Ločevalna napajanja: Imajo sorazmerno visoko obratovalno zanesljivost (ko izpade en vod, ostali obratujejo nemoteno)



- Slika 1.10 – omrežje odprtega tipa s točkasto obremenjenimi vodi
- Pri okvari pri katerem od posameznih vodov, izpade cel vod
- Odsek na začetku je najbolj obremenjen, glede na ta začetek se dimenzionira enotni prerez moči za celotni vod, vod v ostalih odsekih je predimenzioniran.
- Zmanjšana obratovalna zanesljivost ter dolgotrajne prekinitve → tak sistem je primeren le tam, kjer so priključeni porabniki manjših in enakih moči



Radialna niskonapetostna omrežja

- Slika 1.11 (omrežje odprtega tipa s točkasto obremenjenimi vodi in porabniki s samostojnimi vodi)
- So pogosto v uporabi
- Večja zanesljivost kot pri omrežjih odprtega tipa s točkasto obremenjenimi vodi
- Tehnični predpisi:
  - kdaj in kje moramo take vode zavarovati
  - vsaka sprememba prereza zahteva ponovno varovanje
  - Namestitev varovalke: na nosilnem drogu ali konzoli (nerodna menjava)
  - Namestitev varovalke: v dostopnih kanalih, na strojih, razdelilnih ploščah (lažja menjava)

## Prednosti in slabosti NIZKONAPETOSTNIH OMREŽIJ ODPRTEGA TIPA

### PREDNOSTI:

- Odprta omrežja so pregledna in enostavna
- Napake zlahka odkrijemo
- Kratkostične moči so majhne (enostransko napajanje)
- Zaščita vodov je enostavna

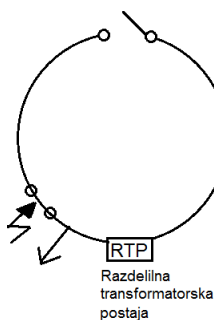
### SLABOSTI

- Obratovalna zanesljivost je nižja kot pri dvostranskem napajanju
- Izgube so večje kot pri dvostranskem napajanju
- Za zmanjšanje izgub je treba velikokrat povečati prerez vodov, kar pomeni večjo rabo materiala (večanje stroškov)
- Pri dolgih vodih niso vedno izpolnjeni pogoji za ničenje

## NIZKONAPETOSTNA OMREŽJA ZAPRTEGA TIPA

- Dvostransko napajanje in tako omrežje → večja obratovalna zanesljivost omrežja
- Uporaben tip na vseh nivojih
- Tak tip omrežja se uporablja predvsem za napajanje tovarniških naprav in drugih industrijskih obratov
- Slika 1.12
- Omrežje z več viri → zvezdno napajanje (Slika 1.13)
- Napajalni vod z prečno zvezdo → oblika zazankanega omrežja (slika 1.13)
- Zaprta ali zankasta omrežja so obratovalno zanesljivejša od odprtih predvsem zato, ker lahko po izpadu enega voda dovedemo porabnikom električno energijo po dveh poteh. Zaradi napajanja po dveh ali več poteh so običajno tudi napetostne razmere boljše kot v odprtih omrežjih
- Lažje se prilagajajo kot žarkasta omrežja, vendar morajo biti pravilno varovana, saj v tem primeru dosežemo nasprotni učinek (razpad sistema)
- Primer zazankastih omrežij, napajan z TR: zazankasto omrežje s krožnih vodom (slika 1.14)
- Primer odprte zanke (slika 1.15): normalno obratovanje-zanka prekinjena na določenem mestu (S). V primeru izpada lahko S povežemo izpadni odcep z ostalim delom omrežja.

### Odprta zanka:



Če pride do napake (KS) → izpad napajanja.

Najprej se poskuša po 2 minutah še 1x vklopit.

Največkrat gre za prehodne napake (ptiči...)

Če ponovni vklop ne uspe, se vaja ponovi čez pol ure, če ne se naredi prevezava

### Poglavitni pomeni pri načrtovanju omrežij:

- Obratovalna zanesljivost
- Preglednost
- Majhne izgube moči
- Majhni padci napetosti
- Majhna poraba materiala
- Enostavna in učinkovita zaščita

## Ozemljitveni sistemi nevtralne točke v prenosnih in razdeljevalnih omrežjih

- Zankasta struktura omrežja ali pa večkrat napajana – nevtralna točka direktno ozemljena → dosežemo visoko zanesljivost napajanja porabnikov (lažje zagotavljanje selektivne zaščite)
- Ob napakah – manjša prednapetost (dobro s stališča koordinacije izolacije in opreme)
- Ozemljitve

### → Direktna ozemljitev (VISOKA)

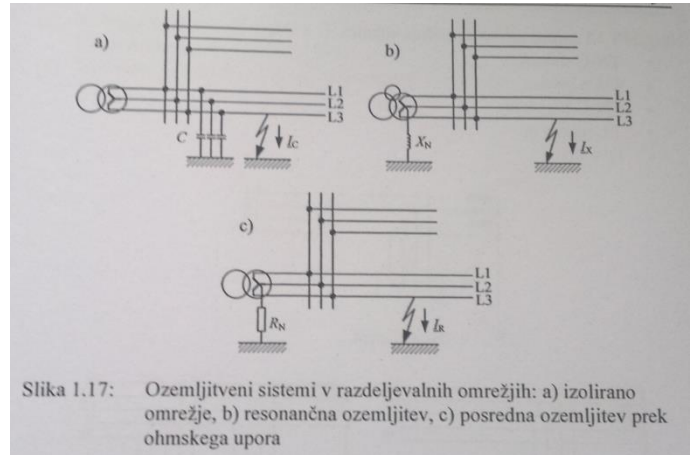
- Ničlišče je direktno povezano z zemljo
- KS tokove omejuje le lastna impedanca voda (veliki in takojšnji KS-tokovi) → hitro zaznavanje in odklopitev
- Distribucija

### → Ozemljitev prek upora

- Med ničlišče in zemljo je upor, ki omejuje tokove na 150A.
- Ni prehuda omejitev, omeji napetost koraka

### → Izolirano zvezdišče (SN)

- Celotno omrežje je na plavajočem potencialu
- Edina povezava med zemljo je kapacitivnost voda
- KS v »nezdravi« fazi → dvig napetosti v »zdravih« dveh fazah za  $\sqrt{3}$



## Ozemljitveni sistemi v porabniških omrežjih

- Zaščita pred vplivom električnega toka: uporabljamo določene sisteme napajanja, pri katerih imamo različne povezave nevtralne točke napajalnega transformatorja z izpostavljenimi prevodnimi deli električnih porabnikov → TN, TT, IT sistemi napajanja
- TN, TT, IT :
  - Prva črka: označuje povezavo napajalnega sistema z zemljo
  - Druga črka: povezavo izpostavljenih prevodnih delov električne inštalacije z zemljo
  - Črka T: terra – neposredna povezava nevtralne točke TR z zemljo
  - Črka I: insulated – vsi vodniki pod napetostjo so izolirani proti zemlji
  - Črka N: neutral – neposredna električna povezava izpostavljenih prevodnih delov z ozemljitveno točko napajalnega sistema.
  - Črka S: separated – nevtralna in zaščitna funkcija izvedena z določenim ločenim vodnikom N in zaščitnim vodnikom PE
  - Črka C: combined – združena funkcija zaščitnega in nevtralnega vodnika
  - Slika 1.18

## 2. Matematične osnove

---

### SISTEMI KOMPONENT

- Predpostavka o simetričnem sistemu ne velja
- Pri nesimetričnih napakah moramo računati z nesimetrijami impedanc
- Za lažje računanje: uporaba pretvorbe originalnega sistema v sistem komponent
- Tokove, napetosti, impedance in moči pretvorimo z določenimi koraki v odgovarjajoče veličine novega sistema, kjer je izračun enostavnejši in preglednejši
- Rezultate lahko s povratnimi pretvorbami spet prenesemo v originalni sistem, ki ga poimenujemo tudi naravni sistem.

### SIMETRIČNE KOMPONENTE

- Nesimetrični sistem lahko pretvorimo v tri simetrične sisteme – nični, direktni in inverzni.

0: Nični – kazalci imajo isto smer kot pri naravnem

1: Direktni – sistem z enakim zaporedjem faz kot pri naravnem sistemu

2: Nični – sistem z nasprotnim zaporedjem faz kot pri naravnem sistemu

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{0L1} \\ \underline{V}_{1L1} \\ \underline{V}_{2L1} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_{L1} \\ \underline{V}_{L2} \\ \underline{V}_{L3} \end{bmatrix}$$

$$\underline{S}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{L1} \\ \underline{V}_{L2} \\ \underline{V}_{L3} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_{0L1} \\ \underline{V}_{1L1} \\ \underline{V}_{2L1} \end{bmatrix}$$

$$\underline{T}$$

$\underline{a}$  je rotor

Pomembne povezave:

$$1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0$$

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$(1 - \underline{a}) = j\sqrt{3}\underline{a}^2$$

$$(1 - \underline{a}^2) = -j\sqrt{3}\underline{a}$$

$$(\underline{a}^2 - \underline{a}) = -j$$

### NORMIRANE SIMETRIČNE KOMPONENTE

- Da zagotovimo invarianco moči, vpeljemo normirane simetrične komponente
- Invarianca moči: moč izražena z naravnimi komponentami tokov in napetosti mora biti enaka veličinami transformiranega sistema

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{0L1}^0 \\ \underline{V}_{1L1}^0 \\ \underline{V}_{2L1}^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_{L1} \\ \underline{V}_{L2} \\ \underline{V}_{L3} \end{bmatrix}$$

$$\underline{S}^0$$

$$\underline{S}^0 = \sqrt{3}\underline{S}$$

Transformacijska povratna matrika:

$$\underline{T}^0 = \underline{S}^{0-1}$$

$$\underline{T}^0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix}$$

$\underline{S}^0$  in  $\underline{T}^0$  sta unitarni matriki. Unitarna matrika je kompleksna matrika za katero velja  $\underline{S}^0 \underline{T}^0 = E$ , pri čemer je E enotska matrika.

Invarianca moči:  $\underline{S} = \underline{U}^T \underline{I}^* = \underline{U}_S^T \underline{I}_S^*$

T...transponirano (zamenjava stolpcev in vrstic)

\*... konjugirano, sprememba predznaka pred imaginarnim delom

## DIAGONALNE KOMPONENTE

E. Clark je razvila vrsto linearne transformacije, ki vodi k realni transformacijski matriki in tudi razklopi naravni trifazni sistem. Diagonalne komponente se lahko uporabljajo pri regulaciji elektroenergetskih naprav, ki temeljijo na močnostni elektroniki.

Pretvorba naravnega sistema (1,2,3) v sistemi z (0,α,β).

Če seštejemo nesimetrične fazorje med seboj ne dobimo nič oz. ne tvorijo zaprtega kazalčnega trikotnika. Ker pa do tega trikotnika želimo priti, uporabimo modificirano ničelno komponento.  $\underline{V}_0 = \frac{1}{3}(\underline{V}_{L1} + \underline{V}_{L2} + \underline{V}_{L3})$  pri čemer je  $\underline{V}_0 = \underline{V}_{0L1} = \underline{V}_{0L2} = \underline{V}_{0L3}$

Po izpeljavi, dobimo matriko:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_0 \\ \underline{V}_\alpha \\ \underline{V}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_{L1} \\ \underline{V}_{L2} \\ \underline{V}_{L3} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{L1} \\ \underline{V}_{L2} \\ \underline{V}_{L3} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_0 \\ \underline{V}_\alpha \\ \underline{V}_\beta \end{bmatrix}$$

Tudi tukaj velja, da je inverzna transformacijska matrika enaka povratni matriki in obratno.

Za praktično uporabo diagonalnih komponent je zelo pomembno, da so transformacijske matrike realne. Diagonalne matrike imajo pri reševanju mrežnih problemov prednost pred simetričnimi

## NORMIRANE DIAGONALNE KOMPONENTE

- Za zagotovitev invariance moči
- Unitarni matriki  $\underline{K}^0$  in njena povratna matrika  $\underline{L}^0$

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_0^0 \\ \underline{V}_\alpha^0 \\ \underline{V}_\beta^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_{L1} \\ \underline{V}_{L2} \\ \underline{V}_{L3} \end{bmatrix} \quad \underline{T}^0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2} & 0 \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix}$$

## DVOOSNE KOMPONENTE

Razvite so bile za predstavitev električnih strojev, posebno za simetrični stroj.

Naravni sistem se transformira v vrtečo se vzdolžno in prečno os rotorja. Pri prehodu od naravnih komponent trifaznega sistema k dvoosnim komponentam poteka frekvenčna transformacija.

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_0 \\ \underline{V}_d \\ \underline{V}_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos\vartheta & \cos(\vartheta - 120^\circ) & \cos(\vartheta + 120^\circ) \\ -\sin\vartheta & -\sin(\vartheta - 120^\circ) & -\sin(\vartheta + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_{L1} \\ \underline{V}_{L2} \\ \underline{V}_{L3} \end{bmatrix} \quad \underline{v}_p = \tilde{\underline{P}} \cdot \tilde{\underline{v}} \quad \text{so časovno odvisne}$$

$$\underline{v}_{L1}(t) = \underline{V}_{L1} \sin(\omega t + \vartheta).$$

Če sta frekvenci enaki, potem dobimo 0.

Izmenično količino pretvorimo v stacionarno, če se frekvenci prekrivata.

V stacionarnih razmerah lahko ločeno korigiramo d,q, pretvorimo nazaj → vektorska regulacija

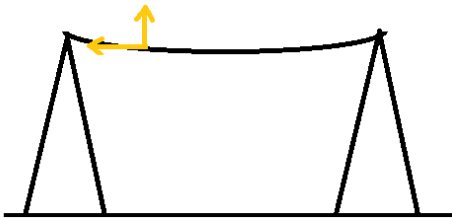
Povratna transformacijska:  $\tilde{\underline{v}} = \tilde{\underline{P}}^{-1} \cdot \underline{v}_p$

### 3. TEORIJA NADZEMNIH ELEKTROENEGRETSKIH VODOV

#### MEHANSKI PARAMETRI VODA

Daljnovidna vrv:

- Fe jedro + Al za prenos toka (večja prevodnost)
- Lahko se strga, ali pa stebri padejo (sneg, žled) (če vrv preveč napnemo)
- Če jo premalo napnemo: poleti se zaradi visokih temperatur povesi do tal
- Največja natezna sila je na mestu vpetja
- Horizontalna komponenta je konstantna, vertikalna pa odvisna od naklona



Temperaturno območje ( $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$ )

Dodatno zimsko breme poveča maso vrvi, kar sledi večji povesi. Povesi se še bolj, pri tem lahko vodnik se dotakne ob drugega in imamo kratek stik med dvema fazama (prehodna napaka)

Sneg in žled ponavadi nimamo pri  $-20^{\circ}\text{C}$ , ampak pri  $0^{\circ}\text{C}$ , vendar vzamemo kritično temperaturo pri  $-5^{\circ}\text{C}$ .

Z 3 ekstremi:

- $-20^{\circ}\text{C}$ : nateg
- $40^{\circ}\text{C}$ :poves
- $-5^{\circ}\text{C}$  z dodatnim zimskim bremenom: nateg in poves

#### POVESNA VERIŽNICA

Enačba:  $y = a \cdot \operatorname{ch}\left(\frac{x}{a}\right) + K$ ,  $a = \frac{\sigma_h}{\gamma}$ ,  $K = -a$

Natezne napetosti so v ravnovesju. Razstavimo na:

- Horizontalna komponenta: konstantna v vsaki točki; definirana s tem, kako močno napnemo vrv med dva stebra. Bolj kot napnemo, manjši poves bo, vendar do mene natezne elastičnosti
- Vertikalna komponenta: največja na mestu vpetja, nosi polovico mase vrvi. Na temenu vrvi pa je enaka nič

Dolžina verižnice:  $l = \int_0^x dl = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \dots = a \operatorname{sh}\left(\frac{x}{a}\right)$

**Hookov zakon:** relativni raztezek je enak razmerju natezne napetosti in modula elastičnosti.

$$\left[\frac{\Delta l}{l_0}\right]_{\sigma} = \frac{\sigma}{E}$$

$\sigma$  ... Natezna napetost

$E$  ... Modul elastičnosti

Hookov zakon definira področje proporcionalnosti, področje navidezne proporcionalnosti, področje nestabilnosti ter področje neelastičnosti. Pri kombinirani vrvi upoštevamo osnovna tri izhodiščna stanja, in sicer da:

- Pri izdelavi nastopa nevtralna temperatura  $\vartheta_{15} = 15^{\circ}\text{C}$ , pri kateri ne nastopajo natezne napetosti med Fe jedrom in Al plaščem
- Sta pri obremenitvi vrvi obremenjena tako Al kot Fe ter

- Je lepenje med Al in Fe, tolikšno da ne prihaja do medsebojnih premikov  
Pri nadaljnji izpeljavi upoštevamo še spremembo dolžine vrvi zaradi temperature, v tem primeru je relativni raztezek enak

$$\left[ \frac{\Delta l}{l_0} \right]_{\vartheta} = \alpha \Delta \vartheta$$

$\alpha$  ... temperaturni koeficient

### KRITIČNA RAZPETINA (natezna napetost enaka pri $-20^{\circ}\text{C}$ kot pri $-5^{\circ}\text{C}$ )

- Kritično razpetino  $s_k$  imenujemo tisto razpetino, pri kateri je natezna napetost pri  $-5^{\circ}\text{C}$  z dodatnim bremenom  $\sigma_{-5+db}$  natanko enaka natezni napetosti pri  $-20^{\circ}\text{C}$  brez dodatnega bremena  $\sigma_{-20}$  (slika 3.5b).
- Če ustrezno natezno napetost označimo s  $\sigma_{-5+db} = \sigma_{-20} = \sigma_{hd}$ , ki predstavlja dopustno horizontalno natezno napetost, dobimo iz položajne enačbe ob upoštevanju razlike temperatur  $\vartheta - \vartheta_0 = -20^{\circ}\text{C} - (-5^{\circ}\text{C}) = -15^{\circ}\text{C}$ , iz kjer sledi enačba za  $s_k$

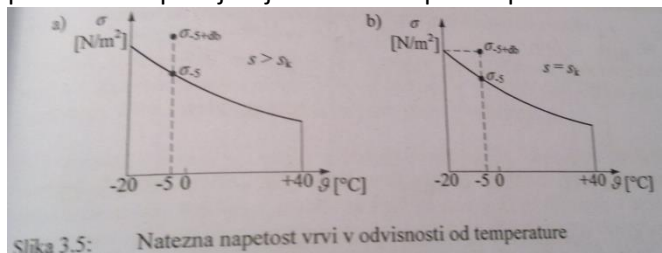
$$s_k = \sigma_{hd} \sqrt{\frac{360\alpha}{(\gamma + \Delta\gamma)^2 - \gamma^2}}$$

$\gamma$ ... specifična teža vodnika

$\alpha = \frac{\sigma_h}{\gamma}$ ,  $\sigma_h$  ... Horizontalna komponenta natezne napetosti

$\sigma_{hd}$ ... dopustna horizontalna natezna napetost

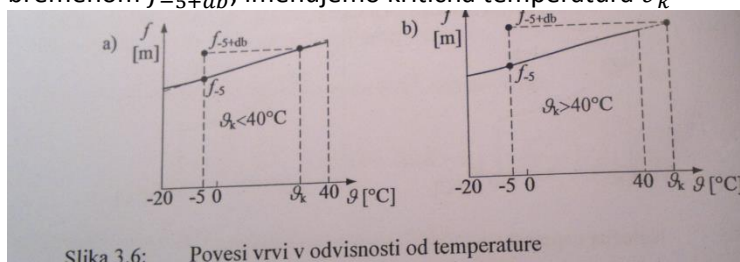
- Če je dejanska razpetina večja od kritične (slika 3.5a), potem velja, da nastopi največja natezna napetost pri  $-5^{\circ}\text{C}$  z dodatnim bremenom. Če je dejanska razpetina manjša od kritične razpetine, potem nastopi največja natezna napetost pri  $-20^{\circ}\text{C}$ .



Slika 3.5: Natezna napetost vrvi v odvisnosti od temperature

### KRITIČNA TEMPERATURA (pri kateri je poves enak pri $-5^{\circ}\text{C}$ z dodatnim bremenom)

- Pri različnih temperaturah znane natezne napetosti, izračunamo ustrezne poves.  $f = \frac{\gamma s^2}{8\sigma_h}$  ( $s$  ... razpetina,  $f$ ...poves)
- Krivulja  $f$  s temperaturo narašča
- Za poves pri  $-5^{\circ}\text{C}$  dobimo dve krivulji – z dodatnim zimskim bremenom  $f_{-5+db}$  in brez njega  $f_{-5}$
- Pozitivno temperaturo, pri kateri je poves natanko enak povesu pri  $-5^{\circ}\text{C}$  z dodatnim zimskim bremenom  $f_{-5+db}$ , imenujemo kritična temperatura  $\vartheta_k$



Slika 3.6: Povesi vrvi v odvisnosti od temperature

- Izraz za kritično temperaturo

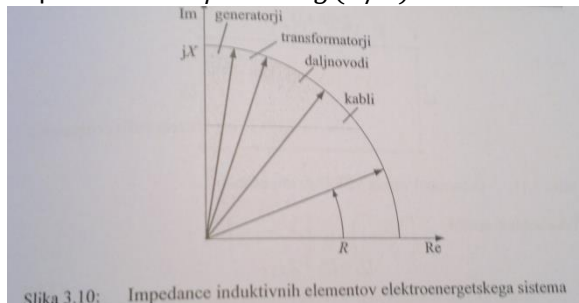
$$\vartheta_k = \frac{\sigma_{-5+db\Delta\gamma}}{\alpha E(\gamma + \Delta\gamma)} - 5^\circ C$$

- Če je povos pri kritični temperaturi manjši kot pri predpostavljene največji temperaturi, npr.  $40^\circ C$  (slika 3.6a), določamo največji povos pri predpostavljene največji temperaturi. V nasprotnem primeru, ko kritična temperatura presega predpostavljeno največjo temperaturo (slika 3.6b), računamo največji povos pri kritični temperaturi  $-5^\circ C$  z dodatnim bremenom.

## SPLOŠNO O IMPEDANCAH ELEMENTOV ELEKTROENERGETSKEGA SISTEMA

Splošne ugotovitve glede impedanc:

- o Impedanca prostih vodov (oz. kablovodov) v komponentni obliki:  $\underline{Z} = R + jX$
- o R je ohmska upornost – snovno geometrijska lastnost, ki določa reaktanco X poleg tega še razporeditev vodnikov v prostoru
- o R in X odvisna od: snovnih parametrov, frekvence, oblike vodnikov in njihove razporeditve v prostoru
- o Impedančni kot  $\varphi = \arctg(X/R)$  zelo različen → Gaussova ravnina



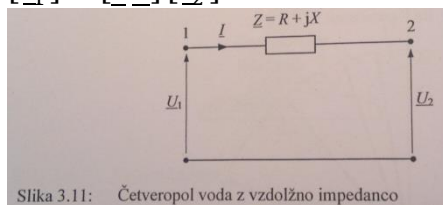
Slika 3.10: Impedance induktivnih elementov elektroenergetskega sistema

	$\varphi [^\circ]$
generatorji	$\geq 88$
transformatorji	84 – 89
daljnovodi	45 – 84
kablovodi	5 – 45

- o Teorija četveropolov za določitev impedance (vodnih in izhodnih veličin)

ČETVEROPOL VODA Z VZDOLŽNO IMPEDANCO:

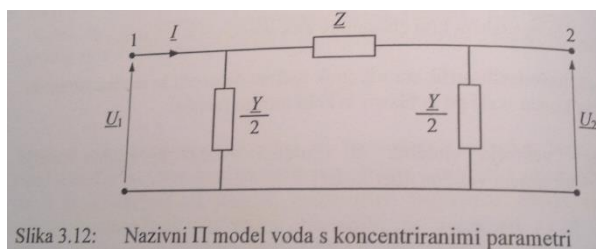
$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \text{ pri čemer velja: } \underline{a} = 1, \underline{b} = \underline{Z}, \underline{c} = 0 \text{ in } \underline{d} = 1.$$



Slika 3.11: Četveropol voda z vzdolžno impedanco

NAZIVNI  $\pi$  MODEL VODA

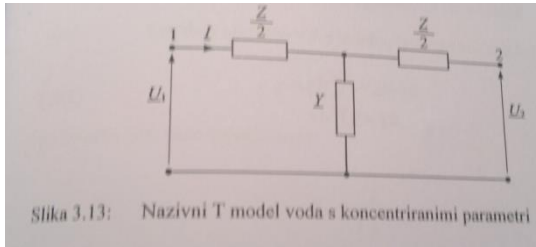
$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \text{ pri čemer velja: } \underline{a} = (1 + \frac{ZY}{2}), \underline{b} = \underline{Z}, \underline{c} = (\underline{Y} + \frac{ZY^2}{4}) \text{ in } \underline{d} = (1 + \frac{ZY}{2}).$$



Slika 3.12: Nazivni  $\pi$  model voda s koncentriranimi parametri

NAZIVNI T MODEL VODA

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \text{ pri čemer velja: } \underline{a} = (1 + \frac{ZY}{2}), \underline{b} = (\underline{Z} + \frac{ZY^2}{4}), \underline{c} = \underline{Y} \text{ in } \underline{d} = (1 + \frac{ZY}{2}).$$



Slika 3.13: Nazivni T model voda s koncentriranimi parametri

Vod največkrat ponazorimo z modelom  $\pi$  voda.

### PROBLEM IMPEDANC TRIFAZNIH SISTEMOV

- Trifazni sistem: Vrednost impedanc v vseh treh fazah niso enake
  - Če poenostavimo enakost impedanc, se poruši enakost do zemlje
  - Tri različne fazne napetosti in impedance lahko ponazorimo s simetričnimi komponentami
  - Želimo doseči enakovrednost faz, zato se uvaja ukrep prepletanja daljnovodnih faznih vodnikov, pri čemer zavzame vsak fazni vodnik vzdolž neke tri enake dele razdeljene trase vse tri možne položaje na stebrih
  - Izpeljava na straneh 99-101 v učbeniku
- Impedančna matrika simetrične impedance:

$$\underline{Z}_s = \begin{bmatrix} \underline{Z}_l + 2\underline{Z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_l - \underline{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_l - \underline{Z}_m \end{bmatrix}$$

Ničelni sistem  
Direktni sistem  
Invezni sistem

### OHMSKA UPORNOST NADZEMNIH VODOV

- $R'$  razumemo kot ohmsko upornost faznih vodnikov na km dolžine ob normalni frekvenci 50Hz.
- Za  $R$  vzamemo ohmsko upornost direktnega oz. pozitivnega so-faznega zaporedja, ki je enaka ohmski upornosti inverznega zaporedja.
- Ohmska upornost ali rezistanco za nek vodnik:  $R' = \frac{\rho}{A} (\Omega/m)$   
 $A$  ... električni aktivni prerez faznega vodnika  
 $\rho$  ... specifična ohmska upornost  
 $\gamma$  ... specifična ohmska prevodnost  $\rho^{-1}$ .  $\gamma_{Cu} = 56 \cdot 10^6 S/m$ ,  $\gamma_{Al} = 35,38 \cdot 10^6 S/m$
- Temperaturno odvisna:  $R'_{\vartheta} = R'_{20} (1 + \alpha_{20} (\vartheta - 20^{\circ}C))$   
 $\alpha$  ... temperaturni koeficient,  $\alpha_{Cu} = 0,00393/^{\circ}C$ ,  $\alpha_{Al} = 0,003403/^{\circ}C$

### ZNAČILONOSTI

- Pri Al/Fe prevaja samo Al
- Enoplastne vrvi: Ker aluminijaste žice napredujejo vzdolž voda v obliki spirale, teče tok okrog jeklenega jedra kot v tuljavi. Jeklo se magnetizira in v njem se pojavijo vrtnični tokovi in s tem joulske izgube. Upornost je tako navidezno povečuje.
- Večplastne vrvi: tukaj so žice navite enkrat v desno drugič v levo, magnetno polje se pa tako kompenzira.
- Z gostoto električnega toka se namreč povečuje upornost.
- Učinki:
  - Kožni pojav (skin efekt): pri izmeničnem toku je gostota toka bližje površini večja kot v notranjosti vodnika

- Bližinski učinek: povzroči, da v vodniku zaradi tokov v sosednjih vodnikih nastopi neenaka gostota toka.
- Dobimo nov zapis upornosti za vodnik (upoštevajoč faktorja krožnega pojava  $y_s$  in bližinskega učinka  $y_p$ ):

$$R'_v = R'_{20}(1 + \alpha_{20}(\vartheta - 20^\circ C))(1 + y_s + y_p)$$

- Kombinirane vrvi: celotni prerez vodnika z upoštevanjem polnilnega faktorja 1,3:

$$r_v = \frac{1,3\sqrt{A_{Al} + A_{Fe}}}{2}$$

- Pri najnovejših obratovalnih napetostih se danes v vsaki fazi običajno uporablja  $n$  vzporednih, z distančniki med seboj povezanih vodnikov v snopu. Če je obratovalna ohmska upornost enega vodnika v snopu  $R'$ , znaša obratovalna ohmska upornost:  $R'_s = \frac{R'}{n}$
- Ohmska upornost ničelnega sistema:
  - Če imajo trifazni vodi nevtralni vodnik enakega prereza kot fazni vodniki, upoštevamo za ničelni sistem tokov poleg ohmske upornosti enega faznega vodnika še trojno vrednost nevtralnega vodnika, torej:  $R'_0 = R'_f + 3R'_n$
  - Pri daljnovidih (brez nevtralnega vodnika) nične komponente tokov nastopijo le pri zemeljskih stikih. Pri zemeljskih stiki tečejo tokovi ničelnega sistema skozi zemljo, ki ima določeno ohmsko upornost, v takem primeru velja  $R'_n = R'_z$ .
  - Pri nizkih frekvencah ohmska upornost zemlje ni odvisna od specifične prevodnosti tal, temveč le od obratovalne frekvence  $R'_z \approx f \cdot 10^{-3} (\Omega/\text{km})$
  - Ohmska upornost ničelnega sistema pri  $f = 50\text{Hz}$  velja  $R'_z = 0,05\Omega/\text{km}$ :

$$R'_0 = R'_f + 0,15 \quad (\Omega/\text{km})$$

## INDUKTIVNOST NADZEMNIH VODOV

Notranja in zunanja induktivnost ter ekvivalentni polmer vodnika

Glej izpeljavo v učbeniku 104-109

- Zunanja induktivnost:  $L'_{zun} = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{d}{r_v}$  (H/km)
- Notranja induktivnost:  $L'_{not} = \frac{1}{2} \cdot 10^{-4}$  (H/km)
- Skupna induktivnost:  $L' = L'_{zun} + L'_{not} = \left(\frac{1}{2} + 2 \ln \frac{d}{r_v}\right) 10^{-4}$  (H/km)

Če zgornji izraz, pomnožimo z  $j\omega$  in tokom v danem opazovanem vodniku, nam poda induktivni padec napetosti v opazovani zanki vodnik-poljubni vodnik, ki leži v oddaljenosti  $d$ .

$$L' = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{d}{r_v e^{-0,25}} = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{d}{r_e}$$

- Ekvivalentni polmer vodnika:  $r_e = r_v e^{-0,25} = 0,779 r_v$ 
  - Velja za masivni cilindrični vodnik
  - Daljnovidne vrvi so sestavljene iz večjega števila žic
  - Razmerje med ekvivalentnim in geometrijskim polmerom vrvi podaja ekvivalentni faktor vrvi  $f_e$

- Če je posamezna faza sestavljena iz snopa večjega števila vrvi, polmer vodnika nadomestimo z ekvivalentnim polmerom snopa

$$r_{es} = \sqrt[n]{n r_v r_d^{n-1}}$$

$r_v$  ... polmer delnih vodnikov snopa

$n$  ... število vodnikov v snopu

$$r_d = \frac{a}{2 \sin \frac{\pi}{n}}$$

$a$  ... razdalja med vodniki snopa ( $a=40\text{cm}$ )

## Induktivnosti trifaznega sistema

- Za izmenični trifazni sistem velja  $I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} = 0$
- Recimo: nevtralni vodnik fiksno nameščen na veliki razdalji in so njegove razdalje do faznih vodnikov enake:  $d_{L1N} = d_{L2N} = d_{L3N} = d_N$
- Magnetni pretok med posameznimi fazami in nevtralnim vodnikom:

$$\underline{\Phi}_{L1N} = I_{L1}L_{L11} + I_{L2}L_{L12} + I_{L3}L_{L13}$$

$$\underline{\Phi}_{L2N} = I_{L1}L_{L21} + I_{L2}L_{L22} + I_{L3}L_{L23}$$

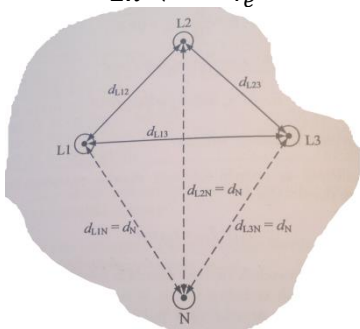
$$\underline{\Phi}_{L3N} = I_{L1}L_{L31} + I_{L2}L_{L32} + I_{L3}L_{L33}$$

$L_{L11}, L_{L22}, L_{L33}$ .... Koeficienti lastne indukcije

$L_{L12} = L_{L21}, L_{L13} = L_{L31}, L_{L23} = L_{L32}$  ... koeficienti medsebojne indukcije med posameznimi fazami

Glede na že izpeljano ( $\underline{\Phi}_{L1N}$ )

$$\underline{\Phi}_{L1N} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( I_{L1} In \frac{1}{r_e} + I_{L2} In \frac{1}{d_{L12}} + I_{L3} In \frac{1}{d_{L13}} \right)$$



Slika 3.21: Velika oddaljenost fiktivnega nevtralnega vodnika od faznih vodnikov

Koeficienti lastne indukcije

$$L_{L11} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} In \frac{1}{r_e}, L_{L22} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} In \frac{1}{d_{L12}}, L_{L33} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} In \frac{1}{d_{L13}}$$

Koeficienti medsebojne indukcije

$$L_{L12} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} In \frac{1}{d_{L12}}, L_{L13} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} In \frac{1}{d_{L13}}, L_{L23} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} In \frac{1}{d_{L23}}$$

Padci napetosti:

Izpeljava v učbeniku (113-115)

Z združitvijo notranje impedance s koeficientom zunanje indukcije dobimo:

$$\underline{Z}_{L1} = \underline{Z}_{L2} = \underline{Z}_{L3} = R + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} In \frac{1}{r_e}$$

Če v enačbo vstavimo številsko vrednost za  $\mu_0$  in upoštevamo frekvenco 50Hz, dobimo za 1 km dolžine vodnika naslednjo obratovalno impedanco:

$$\underline{Z}' = R' + j0,1455 \log \frac{d}{r_e}$$

Ali splošno:

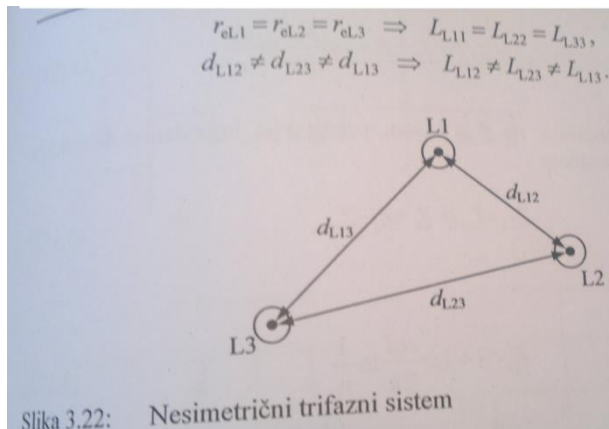
$$\underline{Z}'_{ii} = R'_i + j0,1455 \log \frac{1}{r_{ei}}$$

$$\underline{Z}'_{ik} = j0,1455 \log \frac{1}{d_{ik}}$$

## Induktivnost simetriranega trifaznega sistema

Iz konstrukcijskih razlogov vodniki večinoma niso nameščeni simetrično. Posledice:

- Neenakomerna tokovna porazdelitev
- Povečan vpliv induktivnosti in kapacitivnosti na sosednje telefonske napeljave
- Neenakomerna napetost posameznih faz do zemlje



Na sliki 3.22 so prikazani neenakomerno porazdeljeni vodniki različnih faz enakih prerezov. Zaradi enakih prerezov so tudi koeficienti lastnih indukcij posameznih faz enaki, medtem ko različne razdalje pomenijo različne koeficiente medsebojnih indukcij med posameznimi vodniki.

Izvedemo simetriranje– prepletanje vodnikov (ne tretjinah dolžine trase)  
 Koeficient fazne indukcije

$$L_{L1} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} In \frac{d_{sr}}{r_e}$$

Pri čemer je  $d_{sr}$  srednja geometrijska razdalja vodnikov  $d_{sr} = \sqrt[3]{d_{L12}d_{L23}d_{L13}}$

Impedanca direktnega/inverznega sistema:

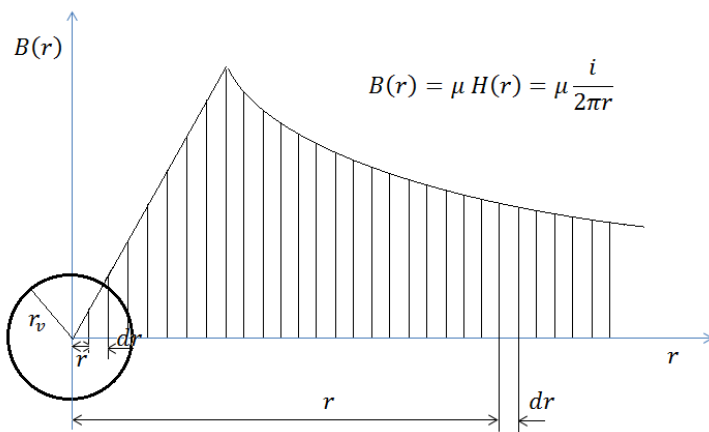
$$\underline{Z} = \underline{Z}_l - \underline{Z}_m$$

Upoštevajoč  $\underline{Z}_l = R + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} In \frac{1}{r_e}$  in  $\underline{Z}_m = j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} In \frac{1}{d_{sr}}$

Če v enačbo vstavimo številsko vrednost za  $\mu_0$  in upoštevamo frekvenco 50Hz, dobimo za 1 km dolžine vodnika naslednjo obratovalno impedanco:

$$\underline{Z}' = R' + jX' = R' + j0,1455 \log \frac{d_{sr}}{r_e}$$

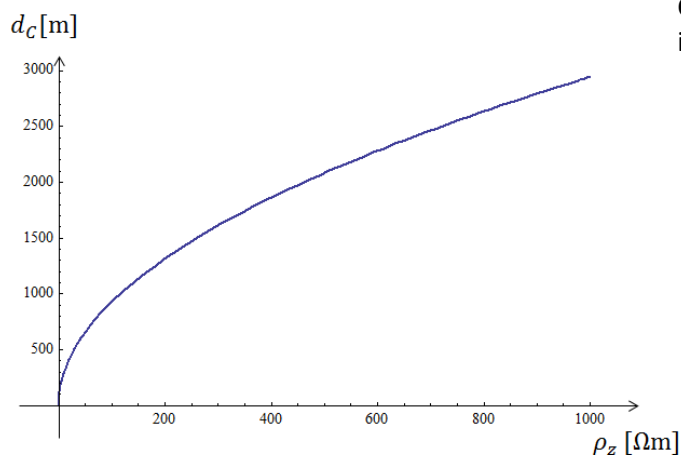
### Magnetno polje okoli vodnika



## Carsonova razdalja

Carson je prišel do zaključka, da segajo silnice v zemljo v odvisnosti od specifične upornosti tal, in sicer po enačbi  $d_c = 9,31\sqrt{\rho_z}$  (m)

Do te razdalje, ki je fiktivna, se računajo le magnetne silnice



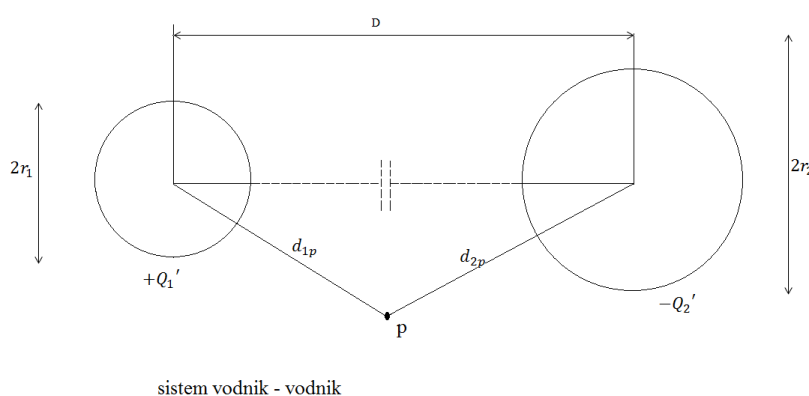
Carsonovo razdaljo upoštevamo za izračun induktivnosti: lastna in medsebojna induktivnost

Zaščitna vrv ima vpliv le na ničelno ali homopolarno impedanco. Obratovalna impedanca ostane nespremenjena (obratovalna reaktanca).

Prisotnost ničelnega sistema: V omrežju lahko ničelni sistem obstaja le takrat, kadar je najmanj eno navitje vezano v zvezd in je zvezdiščna točka vezana v zemljo direktno ali prek upora.

## Izpeljava enačbe za kapacitivnost:

a) Vodnik-vodnik



Za katero koli točko p dobimo:

$$V = \frac{Q'}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{2p}}{d_{1p}} + K$$

V primeru da opazujemo

potencial na površini enega vodnika, velja

- Za potencial na površini prvega vodnika  $d_{1p} = r_1$  in  $d_{2p} = D$ ,
- Za drugi vodnik  $d_{1p} = D$  in  $d_{2p} = r_2$

Iz tega sledi:

$$U = V_1 - V_2 = \frac{Q'}{2\pi\epsilon} \left( \ln \frac{D}{r_1} - \ln \frac{r_2}{D} \right)$$

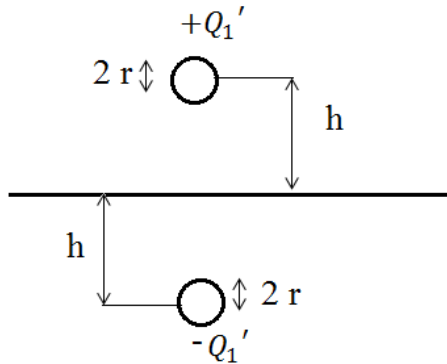
$$C' = \frac{Q'}{U} = \frac{\pi\epsilon}{\ln \frac{D}{\sqrt{r_1 r_2}}} \left( \frac{As}{Vm} \right)$$

Ta kapacitivnost se nanaša na celotno kapacitivnost zanke, to je na dvovodni in odvodni vodnik. Za en vodnik proti nevtralni točki bi bila kapacitivnost 2x tako velika:  $C'_1 = 2C'$

b) Vodnik-zemlja

Kapacitivnost enega vodnika proti zemlji določimo s predpostavko, da zemlja z vodnikom tvori isto polje kot zrcalna slika vodnika, pri čemer zemljo odstranimo.

Če za razdaljo D vzamemo 2h, dobimo



$$C' = \frac{\pi\epsilon}{\ln \frac{2h}{r}} \left( \frac{As}{Vm} \right)$$

$$C'_1 = 2C' = 2 \frac{\pi\epsilon}{\ln \frac{2h}{r}}$$

sistem vodnik-zemlja

*Izraz za dozemno ali nično kapacitivnost:*

$$C'_z = C'_0 = \frac{1}{P_1 + 2P_m}$$

Medsebojna kapacitivnost:

$$C'_v = \frac{1}{P_1 + 2P_m} \frac{P_m}{P_1 - P_m} = C'_z \frac{P_m}{P_1 - P_m}$$

Kako zaščitna vrv vpliva na kapacitivnost

- Zaščitna vrv vpliva samo na dozemno ali ničelno kapacitivnost.

## 4. ENERGETSKI VISOKONAPETOSTNI KABLI

- so izolirani vodniki s specifično zgradbo
- uporabljajo se za horizontalno, poševno in vertikalno polaganje v suhih in vlažnih prostorih, neposredno v zemlji, kabelskih kanalih, pod vodo, na odprtem in v rudnikih
- za prenos večjih moči (kabli)
- za prenos manjših moči (izolirani vodi)
- običajno za krajše razdalje
- pojav uporabe kablov za večje moči in razdalje
- delitev glede na napetostni nivo:
  - standardizirani kabli za napetosti  $U_n < 60kV$
  - specialni kabli za napetosti  $U_n > 60kV$

Označevanje kablov:

1. črke, ki označujejo material izolacije in plašč kabla
2. dvomestno število, ki govori o zaščitnih lastnosti konstrukcije
3. črka, ki pove o vrsti materiala in preseka vodnika
4. zapis števila žil in nazivni presek vodnikov z električno zaščito ter krmilni in kontrolni vodnik
5. nazivna napetost

## *SESTAVA ENERGETSKIH VISOKONAPETOSTNIH KABLOV*

Vodnik

- najbolj pogosta uporaba bakrenih in aluminijastih vodnikov
- aluminij: trdnější material, odpornejši za obdelavo, slabša električna prevodnost, nižja cena (kot baker 50%)
- ker je aluminij cenejši, se ga uporablja več kot baker
  
- delitev glede na število vodnikov oziroma žil:
  - enožilni
  - večžilni kabli
- Sestava žile: vodnik + pripadajoča izolirana plast

Izolacija

PAPIR

- Vodnik je v več plasteh ovit s posebnim papirjem (0,04 ...0,2mm) in prepojen z kabelskim izolacijskim oljem

UMETNI MATERIALI

- Odporni proti vlagi in kemikalijami, so lahki, fleksibilni
- Sestavljeni so iz sintetičnih snovi – polimeri (izolacija se vliva z vbrizgavanjem)

Zaščitni plašč

- zaščita pred vlago in mehanski obremenitvi

KOVINSKI PLAŠČ

- brezšivne svinčeve cevi (vtisnjene na jedro kabla)
- aluminijast (gladkejši, lažji, bolj prevoden in mehansko trši kot svinec), ne potrebuje armaturne zaščite

PLAŠČ IZ UMETNIH MATERIALOV

- PVC (odporen na tlak in kemične vpliv, je upogljiv)
- Ne potrebujejo korozijske in armaturne zaščite

Korozijska zaščita

- Pri kovinskih plaščih je elektrokemijska zaščita nujna
- Sestava: več plasti papirja in jute, prepojene z bitumnom
- Moderna izvedba: kombinacija PVC in svinčevega plašča zlepljena skupaj

Armatura

- Zaščita plašča pred mehanskimi vplivi
- Jeklene žice/palice

- Kovinska armatura: potrebujem še korozijsko zaščito (jota z bitumnom)

## *IZVEDBE KABLOV*

### Pasasti kabli

- Plastasta izolacija: kabel izoliran z papirno izolacijo, prepojeno z oljem, med seboj povezan z papirnim omotom
- Polnilna masa: juta, papir in vtisnjena masa
- Brezšivni plašč, armatura in korozijska zaščita
- Uporabljajo se le za napetosti do 6kV. (pri spremembi temperatur, prihaja zaradi različnih razteznostnih koeficientov do raztezanja plašča → pojav zračnih prostorov → 3-5x večje magnetno polje kot v izolatorju)
- Hochstadterjev kabel: do 30kV
- Kabel s tremi plašči: trije žilni kabli povezani med seboj s svinčevim plaščem in s zunanjo skupno oblogo. Pomanjkljivost je pojav indukcije in vrtničnih tokov v svincu, kar povzroča dodatne izgube, do 30kV

### Oljni kabli

#### NIZKOTLAČNI OLJNI KABLI

- Tlak olja v kablu znaša 1,5 do 6 barov oz. 0,15 do 0,6MPa.
- Papirna izolacija je prepojena z viskozno izolacijskim oljem.
- Pri segrevanju se olje pretaka v izenačevalne posode na koncih kablov, po ohladitvi pa gre ponovno v izolacijo kabla
- Izolacijska trdnost je neprimerno večja kot pri prej omenjenih kablilih.

## *Primerjava TERMOPLASTIČNIH in KLASTIČNIH KABLOV*

### Ugotovitve (termoplastični so):

- Lažji in upogljivejši
- Manjši krvni radij
- Ni treba vzdrževati tlaka
- Manjše dielektrične izgube
- Manjši polnilni tokovi
- Manjši zemeljski kratkostični tok
- Večja obremeljivost
- Ni občutljiv na vlago

## *TERMIČNA OBREMENITEV KABLA*

### Je odvisna od:

- Material vodnika
- Prerez
- Izolacijski material
- Vrta namestitve (zrak, zemlja-toplotna prevodnost zemlje, kanal-možnost zračenja)
- Število kablov (eno/več žilni, en ali več kablov en ob drugem)
- Vrsta obremenitve (trajna obremenitev – sušenje tal)

Pri sušenju tal se povečuje toplotna upornost tal → ↑  $T$  → preobremenitev, poškodbe na koncu kabla  
Posledice lahko zmanjšamo z:

- Z zmanjšanjem obremenitve

- Termična stabilizacija tal: droben pesek, suh cement, beton
- Povečanje obremenitve: umetno hlajenje (zunanje vodno hlajenje, notranje hlajenje )

### *HLAJENJE KABLOV IN NADZEMNIH VODOV*

#### NADZEMNI VODI:

- Ves čas so v stiku z zrakom
- Zrak ni dober prevodnik toplote, zato dobro hladi vod tudi zaradi konvekcije (zrak)
- Goli vodniki se hladijo s pomočjo sevanja

#### KABLI

- Izoliran vodnik v zraku se hladi podobno kot vodi
- Hlajenje kablov je odvisno od vlažnosti zemlje, temperatura ter medsebojne bližine kablov
- Zemlja vlažna → prevajanje večje
- Segrevanje kabla → prst se suši

### *PADCI NAPETOSTI*

$$\Delta U = \frac{PR' + QX'}{|U_n|} \cdot l + j \frac{PX' - QR'}{|U_n|} \cdot l.$$

- Manjši padec napetosti pri kablu
- Vodi imajo večje zanke in večje razdalje med faznimi vodniki, zato je padec napetosti pri njih večji
- OHMSKA UPORNOST: določena z Al in Cu ter z temperaturo obratovanja.  $\uparrow T \rightarrow \uparrow R$
- INDUKTIVNOST: padec napetosti na vodu. Povečevanje kota  $\delta_{ij} = (\delta_i - \delta_j)$
- KAPACITIVNOST: odvisna od položaja prevodnih teles v prostoru (med faznimi vodniki in med vodnik-zemlja), kapacitivno breme , ki v primeru induktivnih bremen kompenzira jalovo moč

### *POLNILNI TOKI*

- Zaradi spreminjana napetosti na vodih teče skozi navidezne kondenzatorje med zemljo in vodniki kapacitivni izmenični tok.
- V kabljih so večji kapacitivni toki (20-30x) → Jouske izgube so do 900x večje  $I_p = \omega C \frac{U_n}{\sqrt{3}}$
- Pri kabljih lahko  $\vec{E}$  še bolj odpravimo, vendar imamo večje magnetno polje, kot pri nadzemnih tokih