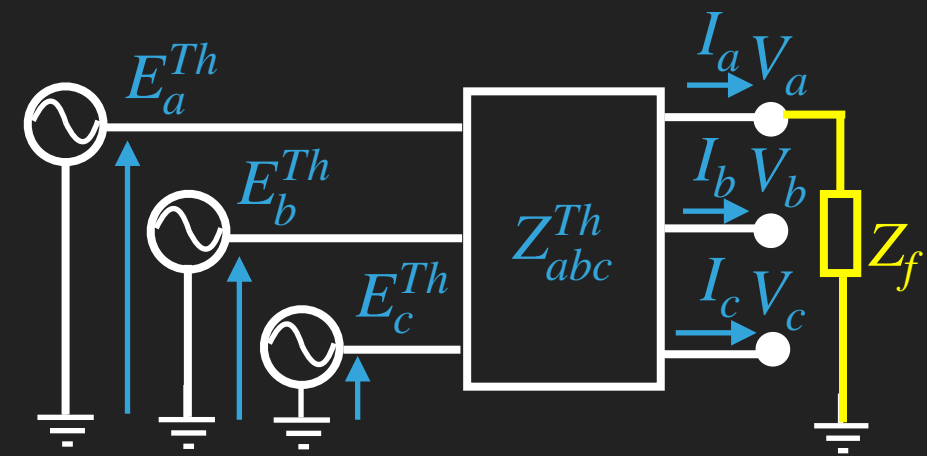


IZUDIN DŽAFIĆ



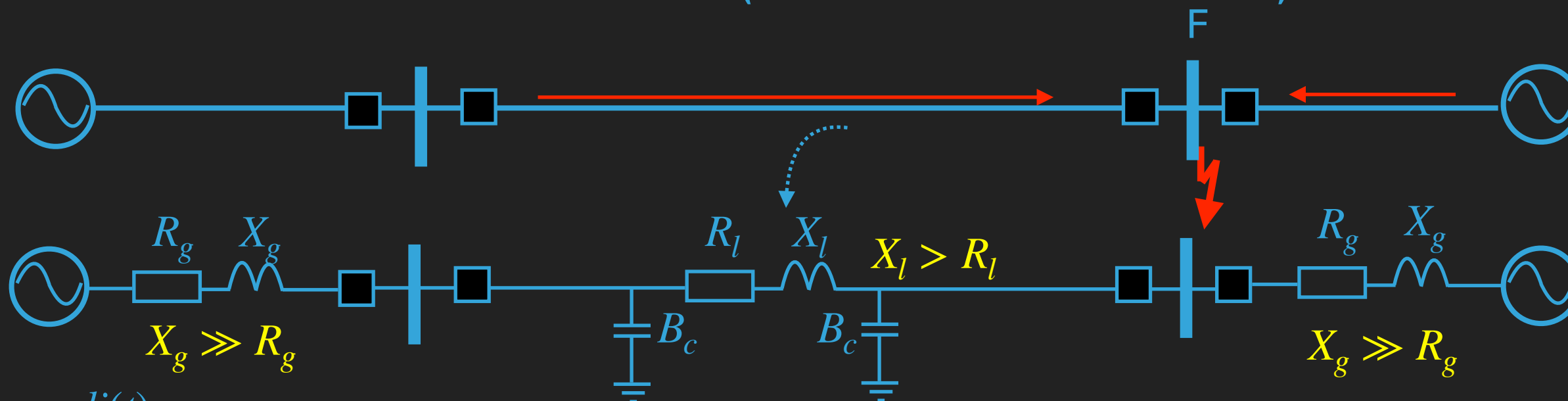
ZAŠTITA I UPRAVLJANJE EES

DIO 7: PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA

PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA

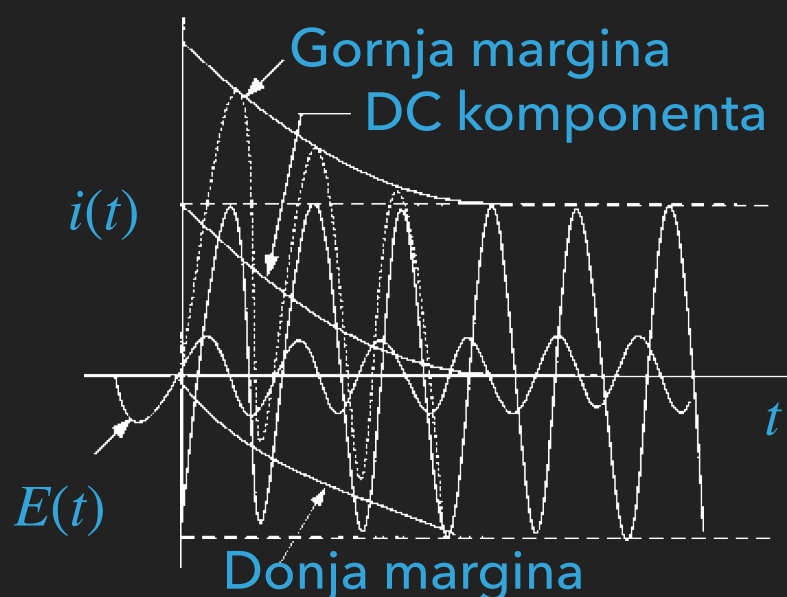
- ▶ EES mora zadovoljiti kriterije sigurnosti, stabilnosti i pouzdanosti
- ▶ Proračun kratkih spojeva je jedan od alata koji daje ulazne parametre za zaštitu te koordinaciju zaštite
- ▶ Za zaštitu su interesantne maksimalne i minimalne struje KS na prekidačima snage (za sve moguće kombinacije kvarova)
- ▶ Maksimalne struje su potrebne za
 - ▶ dimenzionisanje prekidača snage (prekidna snaga)
 - ▶ prekidači sa višom prekidnom snagom koštaju više → novčana investicija
 - ▶ za pravilno podešavanje određenih vrsta zaštite (visoko-impedantna diferencijalna zaštita)
- ▶ Minimalne struje su potrebne za
 - ▶ određivanje praga djelovanja zaštite
 - ▶ mora biti iznad maksimalne potrošnje a ispod minimalne struje

PRIRODA KRATKIH SPOJEVA (POJEDNOSTAVLJENO)



$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri = E(t) = E \sin(\omega t + \theta)$$

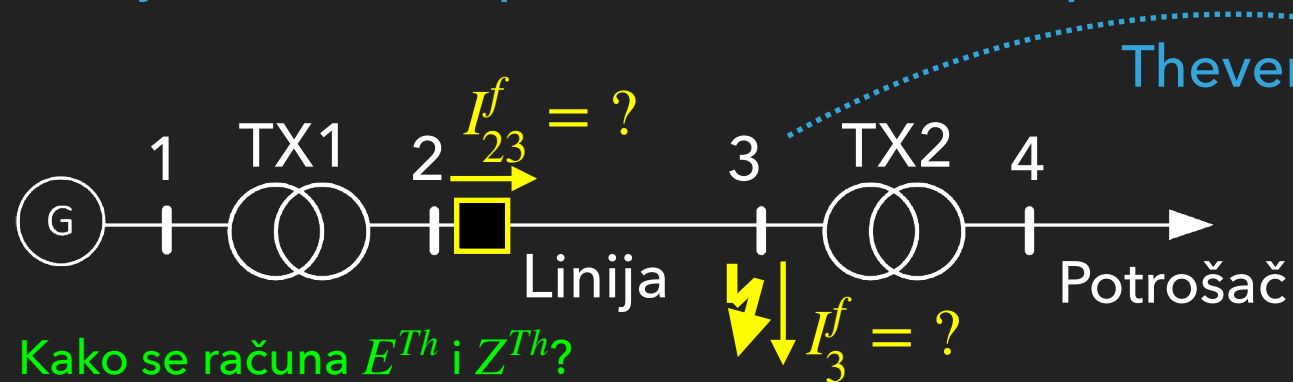
$$i(t) = I \sin(\omega t + \theta - \phi) - I \sin(\theta - \phi) e^{-\frac{t}{T}}, \quad T = \frac{L}{R}, \quad I = \frac{E}{Z_L}, \quad \tan \theta = \frac{\omega L}{R}$$



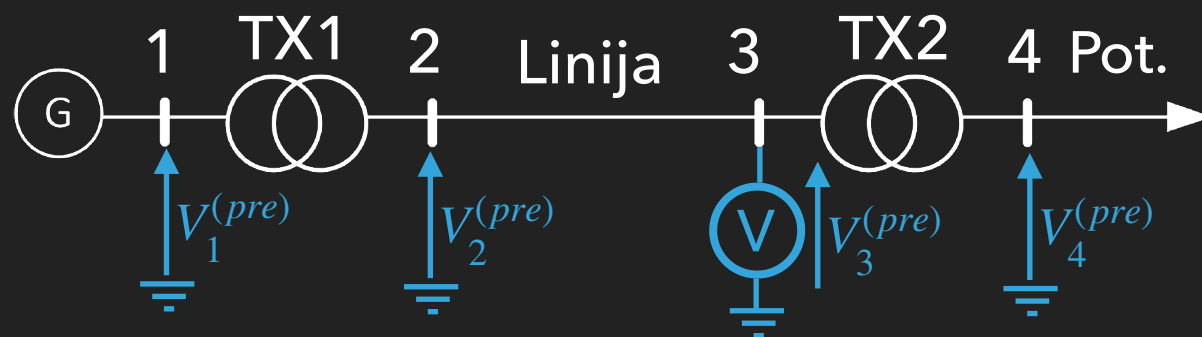
- ▶ U stvarnosti je problem "malo komplikovaniji"
- ▶ osim AC i DC komponente javljaju se harmonici usljed nelinearnig elemenata i potrošača
- ▶ javljaju se dodatnih inter-harmonici usljed prisustva elektronike, automatske regulacije, mjernih uređaja
 - ▶ naponski mjerni transformator sa kondenzatorom
 - ▶ C od kondenzatora i L iz transf. daju dodatnu komponentu koja se ne pojavljuje u strujnom signalu

TROFAZAN KRATAK SPOJ

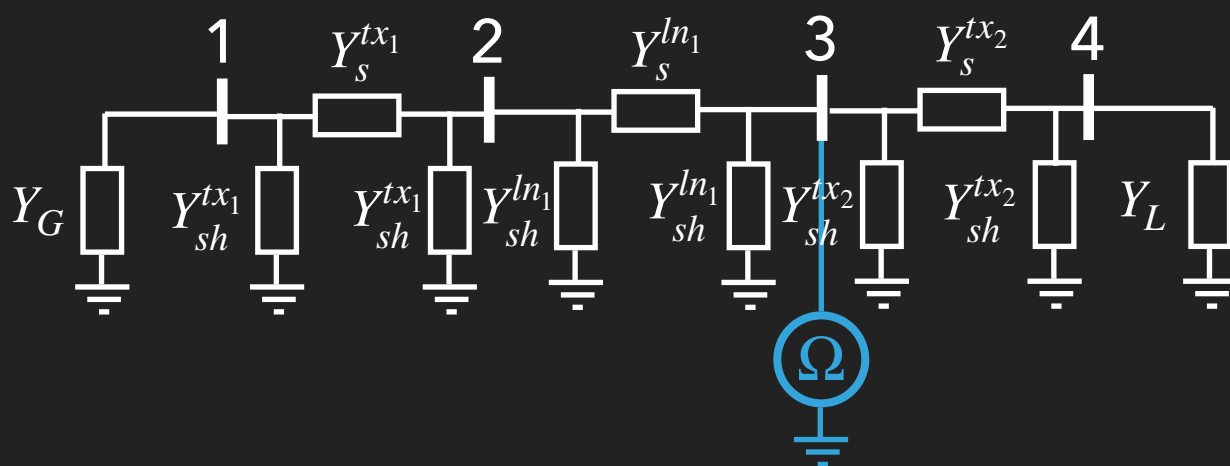
Kvar je simetričan pa se razmatra samo pozitivna komponenta sistema.



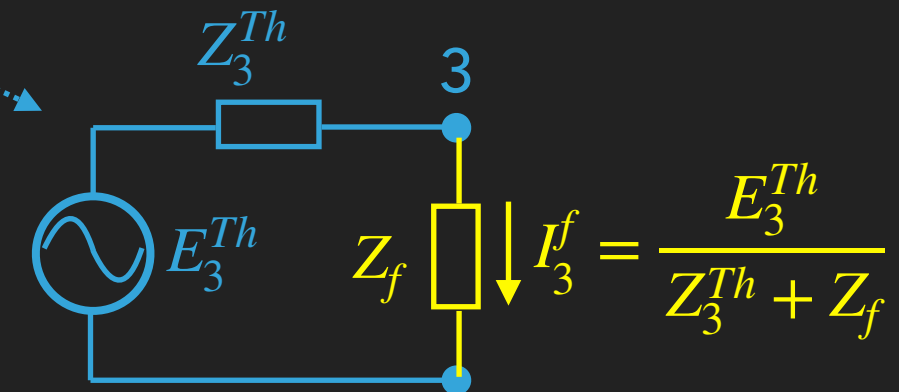
Thevenin-ova EMS E^{Th} :



Thevenin-ova imp Z^{Th} :



Thevenin



Thevenin-ov ekvivalent na mjestu kvara

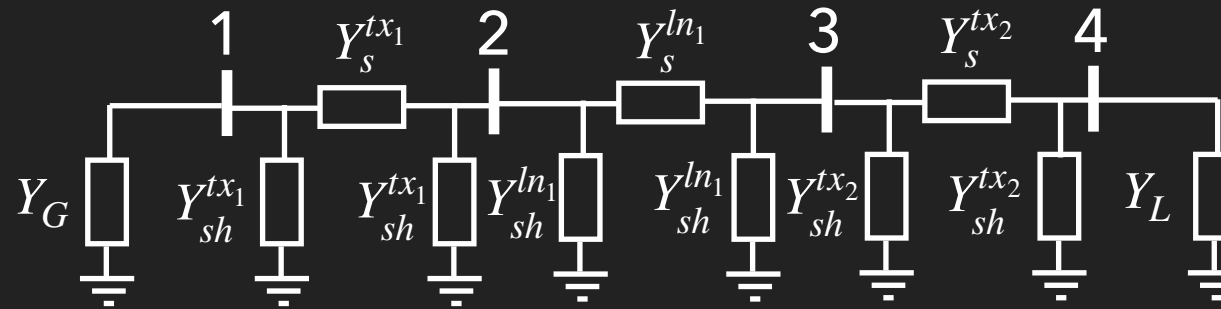
Thevenin-ova EMS E^{Th} je istovjetna očitaniu fazorskog napona u momentu prije kvara. Može se izračunati korištenjem alg. tokova snaga, napona čvorova ili uzeti nom. vrijednost. Dakle, za čvor k : $E_k^{Th} = V_{pre}(k)$

Thevenin-ova imp. Z^{Th} je istovjetna očitaniu cmplx Ohm-metra u pasivnom kolu na mjestu kvara. Pasivno kolo se formira mijenjanjem izvora i potr. ekvivalentnim tranzijentim impedansama.

Thevenin-ova imp. za čvor k se računa kao:

$$Z_k^{Th} = (Y_{pass})^{-1}(k, k) = Z_{pass}(k, k)$$

TROFAZAN KRATAK SPOJ



Primjer sistemske matrice Y_{pass} za pasivno kolo sa gornje slike:

$$Y_{pass} = \begin{bmatrix} Y_G + Y_{sh}^{tx1} + Y_s^{tx1} & -Y_s^{tx1} & 0 & 0 \\ -Y_s^{tx1} & Y_s^{tx1} + Y_{sh}^{tx1} + Y_{sh}^{ln1} + Y_s^{ln1} & -Y_s^{ln1} & 0 \\ 0 & -Y_s^{ln1} & Y_s^{ln1} + Y_{sh}^{ln1} + Y_{sh}^{tx2} + Y_s^{tx2} & -Y_s^{tx2} \\ 0 & 0 & -Y_s^{tx2} & Y_s^{tx2} + Y_{sh}^{tx2} + Y_L \end{bmatrix}$$

Budući da je $Y_{pass}Z_{pass} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ onda se za mjesto kvara $k = 3$ ne mora vršiti kompletna

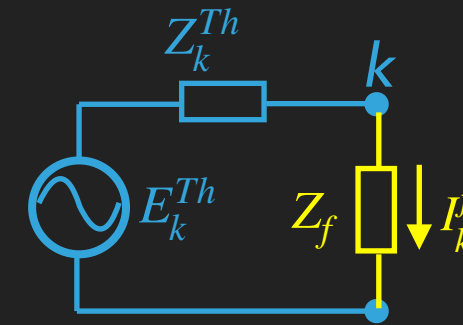
inverzija matrice nego je dovoljno izračunati k -tu kolonu matrice Z_{pass} : $Y_{pass}Z_{pass}^{(3)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$

Odavde se uzima $Z_3^{Th} = Z_{pass}^{(3)}(3)$

U generalnom slučaju $Y_{pass}Z_{pass}^{(k)} = e(k)$, gdje je $e(k) = \{e_i | 0 : i \neq k; 1 : i = k\} \rightarrow Z_k^{Th} = Z_{pass}^{(k)}(k)$

TROFAZAN KRATAK SPOJ

Struja pozitivne komponente na mjestu kvara : $I_k^f = \frac{E_k^{Th}}{Z_k^{Th} + Z_f}$

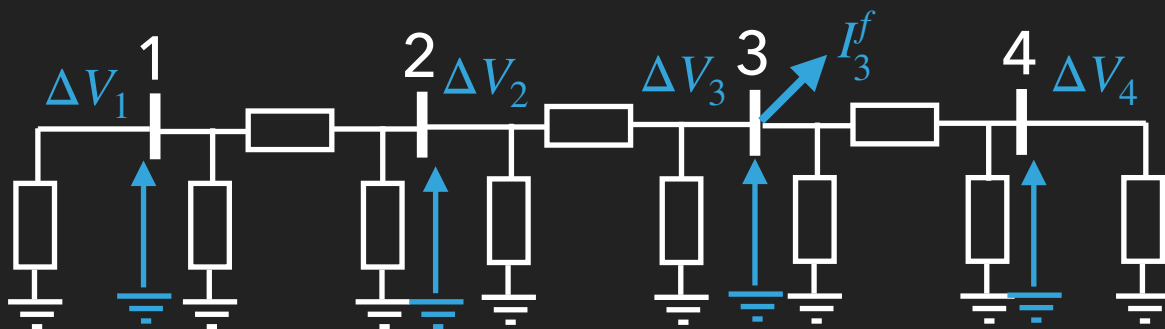


Kompenzacijski naponi koje struja kvara generira na svim čvorovima:

$Y_{pass} \Delta V^{(k)} = I_f^{(k)}$ gdje je $I_f^{(k)} = \{I_i | 0 : i \neq k; -I_k^f : i = k\}$

napon $\Delta V^{(k)}$ se dobiva rješavanjem gornje jednačbe ili kao $\Delta V^{(k)} = Z_{pass}^{(k)} I_k^f$

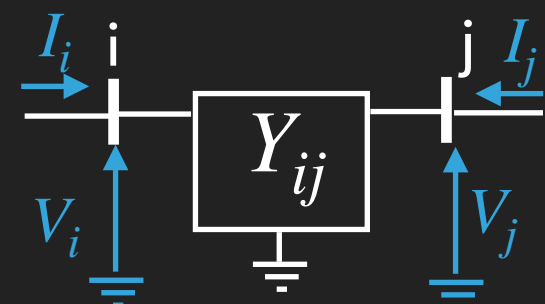
Kompenzacijski naponi za naš primjer:



$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & 0 & 0 \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & 0 \\ 0 & y_{32} & y_{33} & y_{34} \\ 0 & 0 & y_{43} & y_{44} \end{bmatrix}}_{Y_{pass}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \end{bmatrix}}_{\Delta V^{(3)}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -I_3^f \\ 0 \end{bmatrix}}_{I_f^{(3)}}$$

Napon po čvorovima u toku kvara se dobije superponiranjem: $V_f^{(k)} = V_{pre} + \Delta V^{(k)}$

Sada je moguće izračunati struje kvara po granama korištenjem π -ekvivalenta grane:



$$Y_{ij} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix}, \text{ korištenjem dobivenih } I_i \text{ i } I_j \text{ može se dobiti struje kvara kroz sve prekidače snage.}$$

PRINCIP PRORAČUNA NESIMETRIČNIH KRATKIH SPOJEVA

- ▶ Pored pozitivne komponente, potrebno je uzeti i negativnu odnosno nultu komponentu (ovisno od kvara)
- ▶ Izračunati napone prije kvara ($V_{pre}^{(0)} = 0, V_{pre}^{(1)} \neq 0, V_{pre}^{(2)} = 0$)
- ▶ Thevenin-ov napon se uzima samo za pozitivnu komponentu ($E_k^{Th(0)} = 0, E_k^{Th(1)} = V_{pre}^{(1)}(k), E_k^{Th(2)} = 0$)
- ▶ Thevenin-ove impedanse se računa za ekvivalentno kolo nulte, pozitivne i negativne komponente ($Z_k^{Th(0)}, Z_k^{Th(1)}, Z_k^{Th(2)}$)
 - ▶ Potrebno je voditi računa o zamjenskoj šemi nulte komponente u prisustvu transformatora
- ▶ Nakon toga se koristi odgovarajuća relacija za proračun struje na mjestu kvara ($I_k^{f(0)}, I_k^{f(1)}, I_k^{f(2)}$)
- ▶ Računaju se sve tri kompenzacijska napona za sve tri komponente ($\Delta V^{(0)} = Z_k^{Th(0)} I_k^{f(0)}, \Delta V^{(1)} = Z_k^{Th(1)} I_k^{f(1)}, \Delta V^{(2)} = Z_k^{Th(2)} I_k^{f(2)}$)
- ▶ Princip superpozicije za sve tri komponente
- ▶ Proračun struja po prekidačima za sve tri komponente
 - ▶ Konverzija struja iz 012 u abc

JEDNOFAZNI KRATAK SPOJ

- ▶ Struja kroz fazu b i c je nula pa imamo

$$\begin{bmatrix} I_0 & I_1 & I_2 \end{bmatrix}^T = T \begin{bmatrix} I_a & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \rightarrow I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1}{3} I_a \quad (1)$$

- ▶ Napon faze a na mjestu kvara je

$$V_a = Z_f I_a \stackrel{(1)}{=} 3Z_f I_1 \quad (2)$$

- ▶ Napon faze a izražen preko napona simetričnih komponenti je:

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 \quad (3)$$

- ▶ Iz Th. 012 ekvivalentnih šema i (1) imamo

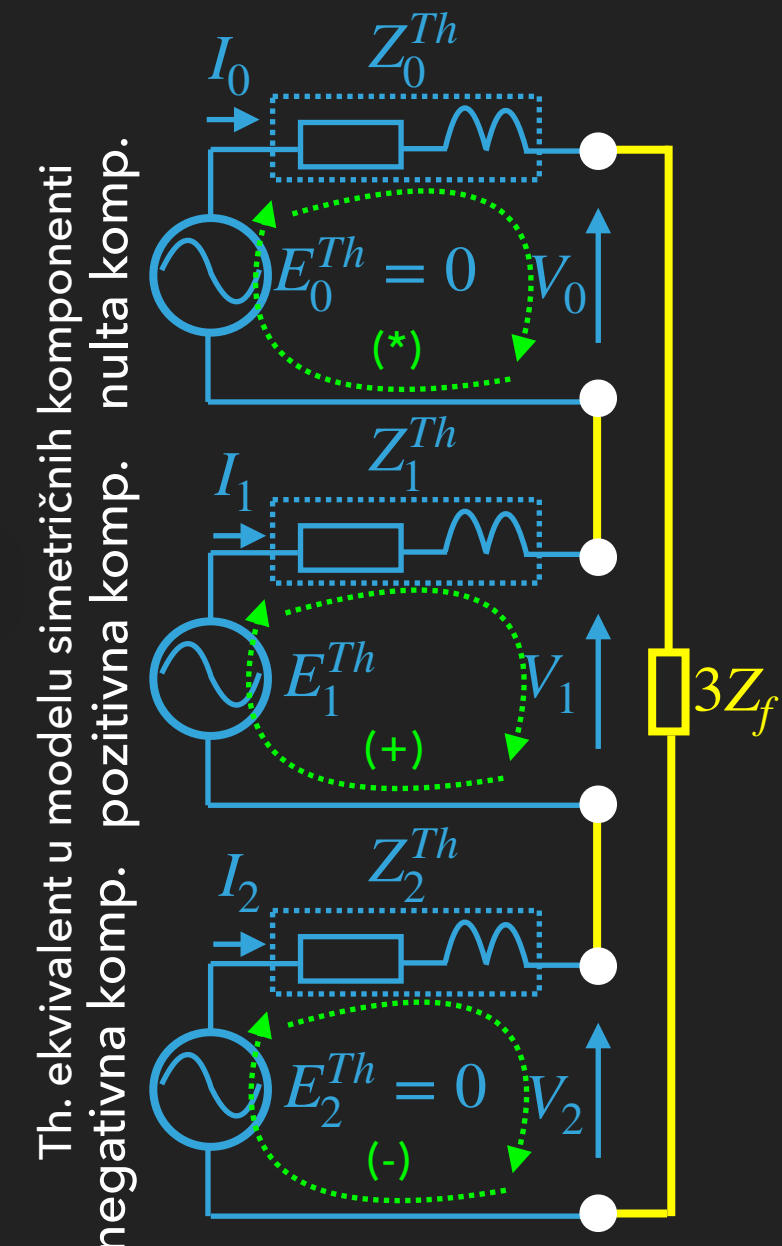
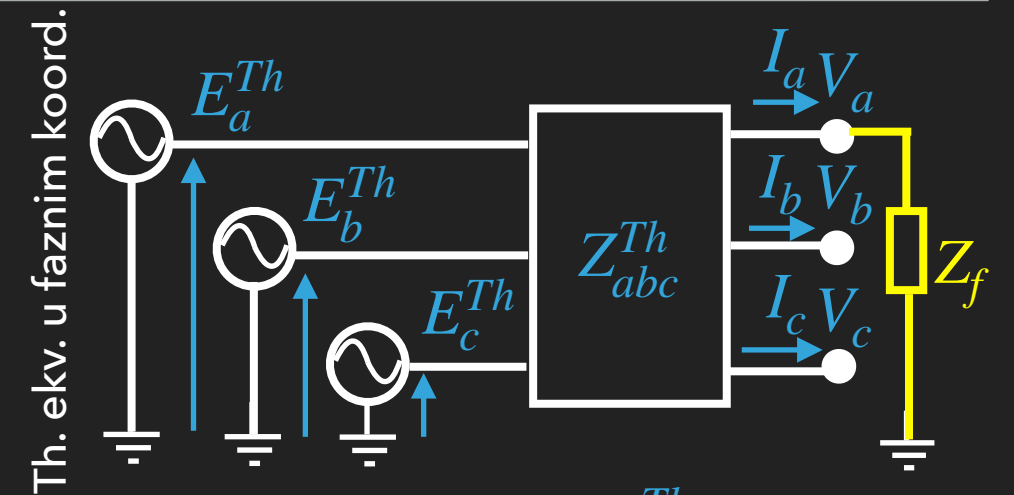
$$\text{KZN}(*): V_0 \stackrel{(1)}{=} -Z_0^{Th} I_1, \text{KZN}(+): V_1 = E_1^{Th} - Z_1^{Th} I_1 \text{ i } \text{KZN}(-): V_2 \stackrel{(1)}{=} -Z_2^{Th} I_1 \quad (4)$$

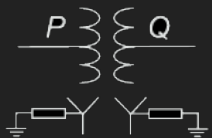
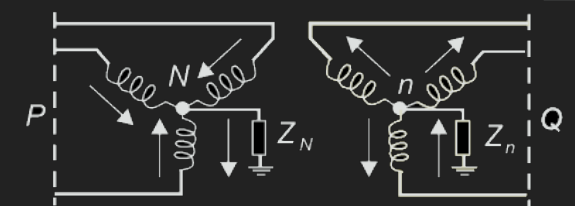
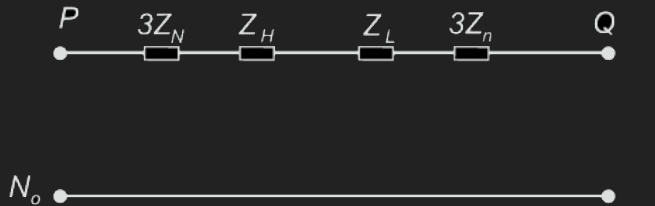
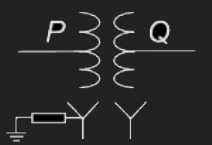
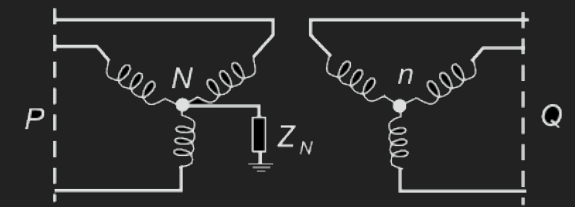
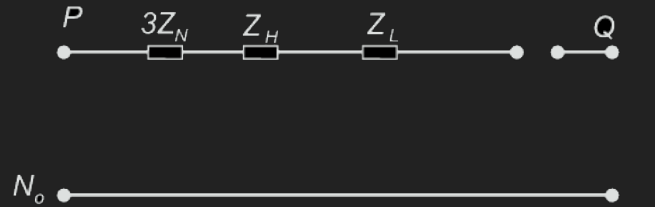
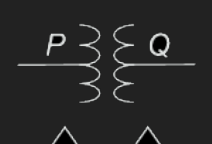
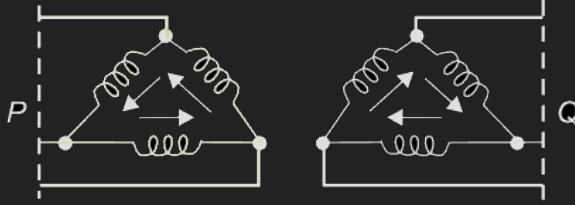
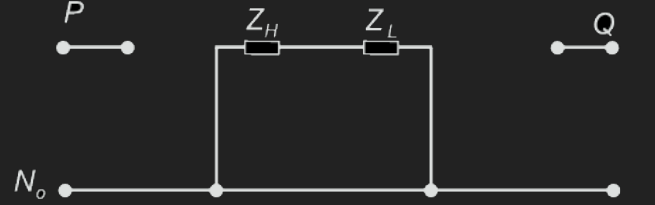
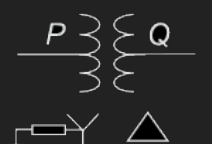
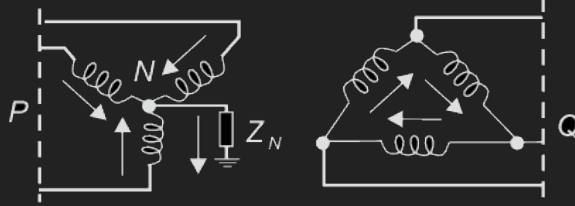
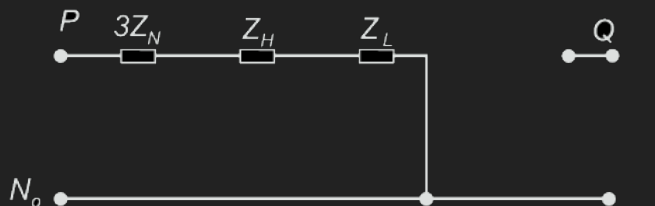
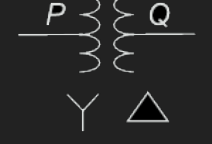
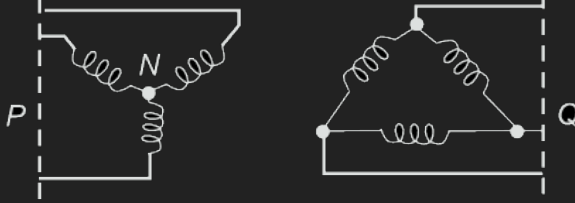
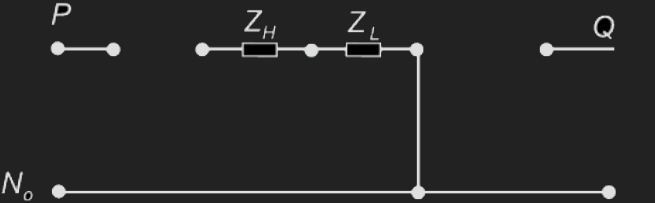
- ▶ Ako prema (3) saberemo sve izraze iz jedn. (4) dobićemo V_a

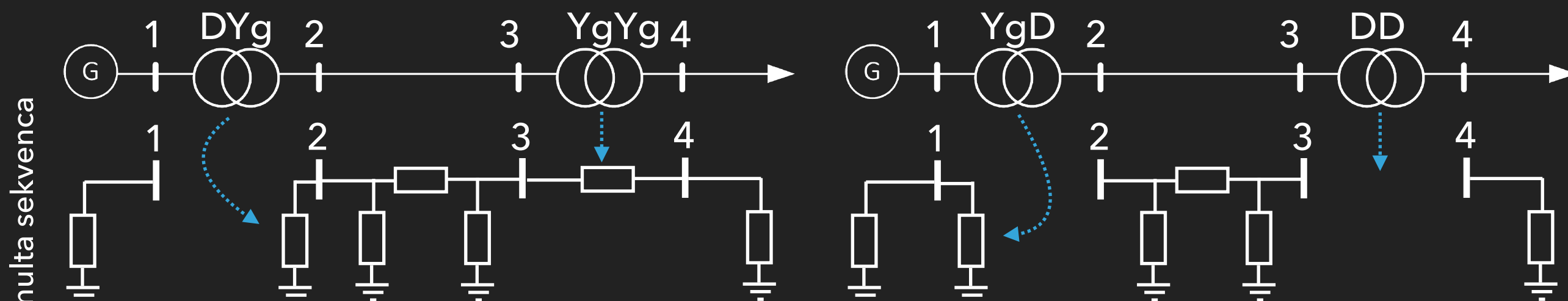
$$V_a = E_1^{Th} - (Z_0^{Th} + Z_1^{Th} + Z_2^{Th}) I_1 \quad (5)$$

- ▶ Ako (5) uvrstimo u (2) dobijemo struju kvara I_1

$$I_1 = \frac{E_1^{Th}}{Z_0^{Th} + Z_1^{Th} + Z_2^{Th} + 3Z_f} \text{ a prema (1) je } I_0 = I_1 \text{ i } I_2 = I_1$$

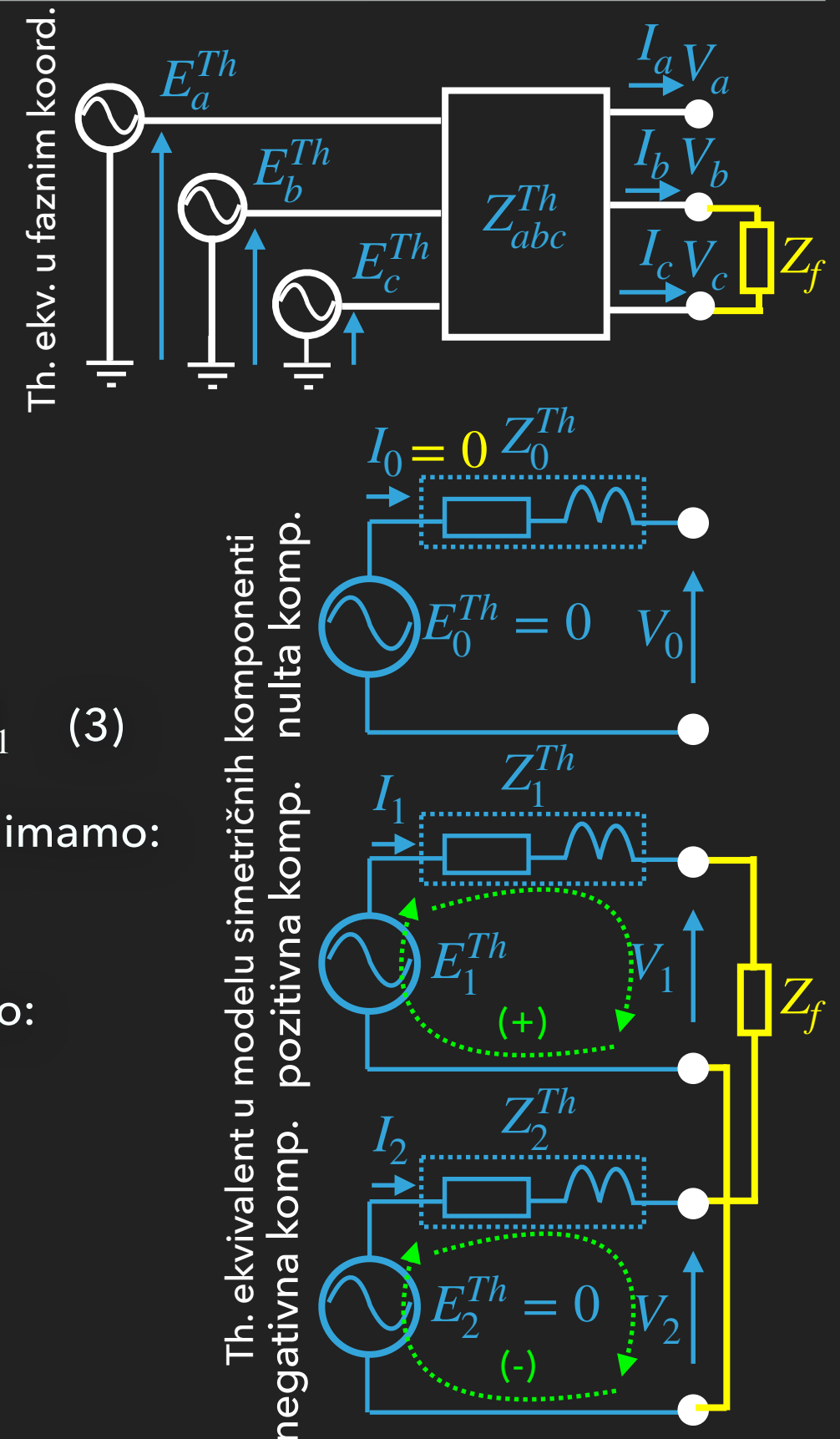


Simbol	Konekcioni dijagram	Ekviv. šema nulte sekvence
		
		
		
		
		



DVOFAZNI KRATAK SPOJ

- ▶ Iz faznog ekvivalenta imamo $I_a = 0, I_b = -I_c$ (1)
- ▶ U sistemu simetričnih komponenti (012) imamo
 - ▶ $[I_0 \ I_1 \ I_2]^T = T [0 \ -I_c \ I_c]^T$, odnosno
 - ▶ $I_0 = 0, \ I_1 = -I_2 = \frac{1}{3} (a^2 - a) I_c$ (2)
- ▶ Koristeći (1) i (2) i izraz $I_{abc} = T^{-1} I_{012}$ dobijemo I_b i I_c
 - ▶ $[I_a \ I_b \ I_c]^T = T^{-1} [0 \ I_1 \ -I_1]^T \rightarrow I_b = -I_c = (a^2 - a) I_1$ (3)
- ▶ Napon između faza b i c je $V_b - V_c = Z_f I_b$ te korištenjem (3) imamo:
 - ▶ $V_b - V_c = Z_f (a^2 - a) I_1$ odnosno koristeći
 - $V_b - V_c = (a^2 - a)(V_1 - V_2)$ te **KZN(+)** i **KZN(-)** i (2) imamo:
 - ▶ **KZN(+):** $V_1 = E_1^{Th} - Z_1^{Th} I_1$ i **KZN(-):** $V_2 \stackrel{(2)}{=} Z_2^{Th} I_1$ što daje
 - ▶ $(a^2 - a) [E_1^{Th} - (Z_1^{Th} + Z_2^{Th}) I_1] = Z_f (a^2 - a) I_1$ odakle je
 - ▶ $I_1 = \frac{E_1^{Th}}{Z_1^{Th} + Z_2^{Th} + Z_f}$ a prema (2) je $I_0 = 0$ i $I_2 = -I_1$



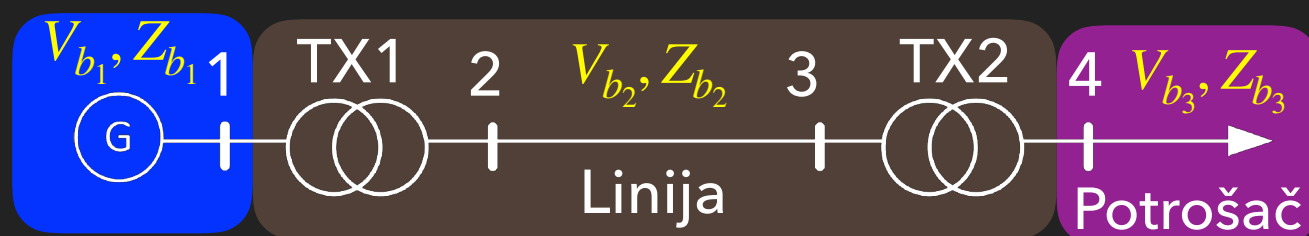
- ▶ 1. Konvertovati sve vrijednosti u per unit
- ▶ 2. Naći napone prije kvara za svaki čvor
 - ▶ (riješiti $Y_1^{(pre)} V_1^{(pre)} = I_1^{(pre)}$ korištenjem pozitivne komponente)
 - ▶ referentni (slack) čvor, PV čvorovi/generatori, PQ čvorovi/potrošači
 - ▶ za simetričan sistem je $V_0^{(pre)} = V_2^{(pre)} = 0$
- ▶ 3. Uzeti napon prije kvara na Thevenin-ov ekvivalentni napon na mjestu kvara
 - ▶ za čvor k , $u_1^{(Th)} = V_1^{(Th)}(k)$
- ▶ 4. Formirati matrice $Y_0^{(f)}, Y_1^{(f)}, Y_2^{(f)}$
 - ▶ mreža za pozitivnu (1) komponentu je topološki ekvivalentna mreži negativne (2) komponente
 - ▶ vrijednosti impedansi pozitivne i negativne komponente su različite za rotacione mašine
 - ▶ pojedine transformatorske konekcije unose prekid nulte (0) komponente pa se ova mreža mora nacrtati uz uvažavanje transformatorskih konekcija i vrijednosti impedansi nulte komponente
- ▶ 5. Naći ekvivalentnu Thevenin-ovu impedancu na mjestu kvara $z_0^{(Th)}, z_1^{(Th)}, z_2^{(Th)}$
- ▶ 6. Naći struj kvara $i_0^{(Th)}, i_1^{(Th)}, i_2^{(Th)}$ korištenjem modela kvara
- ▶ 7. Izračunati kompenzacione napone $\Delta V_0, \Delta V_1, \Delta V_2$ za svaki čvor i sve tri komponente
- ▶ 8. Izračunati napone u toku kvara superponiranjem (pre) i (Δ): $V_0^{(f)} = V_0^{(pre)} + \Delta V_0, V_1^{(f)} = V_1^{(pre)} + \Delta V_1, V_2^{(f)} = V_2^{(pre)} + \Delta V_2$
- ▶ 9. Korištenjem $V_0^{(f)}, V_1^{(f)}, V_2^{(f)}$ i π -ekvivalenata grana, izračunati struje kroz željene prekidače snaga (grane)

Projektni zadatak #8

Napraviti aplikaciju za proračun kratkih spojeva

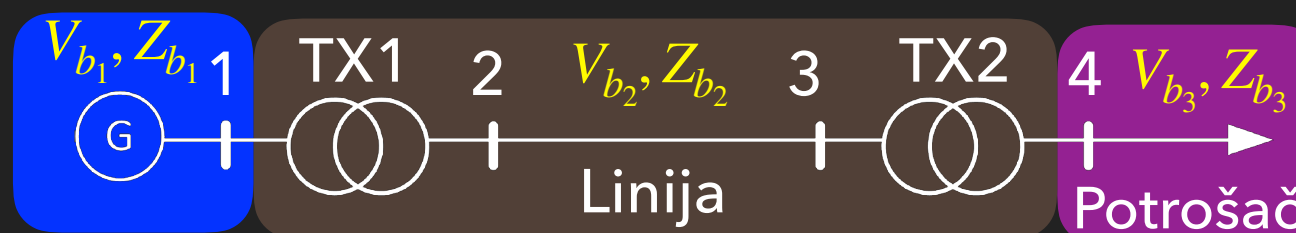
1. PER UNIT PRORAČUN

- ▶ 1. Odabrati baznu snagu S_b u MVA (za cijelu mrežu)
- ▶ 2. Prebaciti snage svakog potrošača/generatora u per unit sistem: $S_{pu_k} = \frac{S_{MVA_k}}{S_b}$
- ▶ 3. Odrediti zone sa istim nazivnim naponom
 - ▶ izbaciti transformatore i za svaku galvanski spojenu oblast k pridodjeliti linijski bazni napon V_{b_k} u kV
 - ▶ transformatore pridodjeliti oblasti obzirom na naponski nivo na kom su bili postavljeni instrumenti u toku eksperimenta praznog hoda i kratkog spoja (na slici TX1 mjereno na korištenjem nap. nivoa čvora 1, TX2 nap. nivoa čvora 3)
- ▶ 4. Za svaku oblast k izračunati baznu struju $I_{b_k} = \frac{S_b}{\sqrt{3} V_{b_k}} [kA]$ i baznu impedancu $Z_{b_k} = \frac{V_{b_k}}{\sqrt{3} I_{b_k}} = \frac{V_{b_k}^2}{S_b} [\Omega]$
 - ▶ unutar svake oblasti k izračunati per unit impedanse $Z_{pu_l} = \frac{Z_{\Omega_l}}{Z_{b_k}}$ za svaki element l
 - ▶ i per unit napone za svaki čvor l $V_{pu_l} = \frac{V_{kV_l}}{V_{b_k}}$



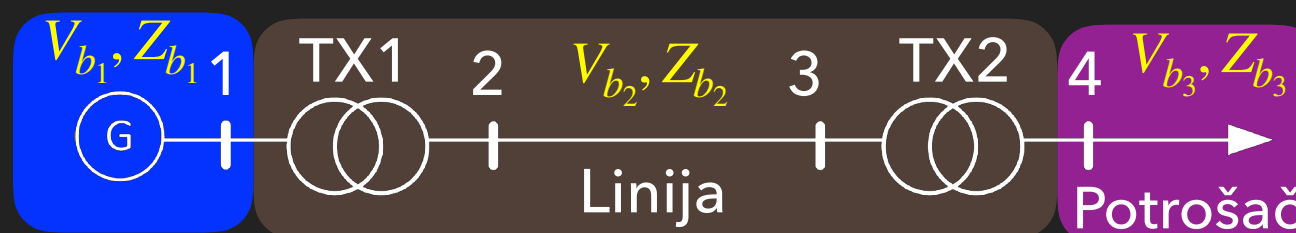
1. PER UNIT PRORAČUN – PRIMJER

► Podaci:



- Čvorovi $V_{n_1} = 6kV$ $V_{n_2} = V_{n_3} = 220kV$ $V_{n_4} = 20kVA$
- Generator: $S_n = 80MVA$ $V_n = 20kV$ $x = 9\%$
- TX1: $S_n = 200MVA$ $V_1/V_2 = 6/220kV$ $u_{sc\%} = 10\%$ $P_{cu} = 1.5kW$, mjereno na visokonaponskoj strani
- TX2: $S_n = 50MVA$ $V_1/V_2 = 220/20kV$ $u_{sc\%} = 8\%$ $P_{cu} = 0.5kW$, mjereno na visokonaponskoj strani
- Linija: $Z = 2.8 + j20\Omega$, otočna grana zanemarena
- Petrošač: $V_n = 20kV$ $S_4 = 35 + j45MVA$
- Prebaciti sistem u per unit vrijednosti

1. PER UNIT PRORAČUN – PRIMJER



► Rješenje:

► Odabiremo baznu snagu od $S_b = 50MVA$

► Petrošači u pu: $S_{pu4} = \frac{S_4}{S_b} = 0.7 + j0.9pu$

► Bazni naponi: $V_{b1} = 6kV$ $V_{b2} = 220kV$ $V_{b3} = 20kV$

► Per unit naponi čvorova: $V_{pu1} = V_{pu2} = V_{pu3} = V_{pu4} = 1pu$

► Bazne struje: $I_{bk} = \frac{S_b}{\sqrt{3}V_{bk}}[kA]$, $I_{b1} = \frac{50MVA}{\sqrt{3}6kV} = 4.82kA$, odnosno $I_{b2} = 0.131kA$, $I_{b3} = 1.445kA$

► Bazne impedances: $Z_{bk} = \frac{V_{bk}^2}{S_b}[\Omega]$, $Z_{b1} = \frac{V_{b1}^2}{S_b} = \frac{6^2}{50} = 0.72[\Omega]$, odnosno $Z_{b2} = \frac{V_{b2}^2}{S_b} = \frac{220^2}{50} = 968[\Omega]$, $Z_{b3} = \frac{V_{b3}^2}{S_b} = \frac{20^2}{50} = 32[\Omega]$

► Linija: $Z_{pu1} = \frac{Z_{\Omega_1}}{Z_{b1}}$, $Z_{pu2,3} = \frac{Z_{\Omega_{2,3}}}{Z_{b2}} = \frac{2.8 + j20}{968} = 0.003 + j0.021pu$

► TX1: Budući da su dati podaci iz eksperimenta kratkog spoja (sc) i praznog hoda, potrebno je prvo izračunati stvarne impedanse na visokonaponskoj strani pa ih onda prebaciti u pu

► Domaća zadaća: Pročitati dokumentaciju za eksperiment KS, PH, te završiti zadatak.

PITANJA?