

**Анализа
електроенергетских
система
-Временска промена
струје кратког споја-**

- Апериодична компонента (брзо се пригушује са T_a , реда 50-100 ms, зависи од карактеристика ЕЕС-а и локације квара)
- Синусоидална (наизменична компонента)

$$i_k(t) = i_{DC}(t) + i_{AC}(t)$$

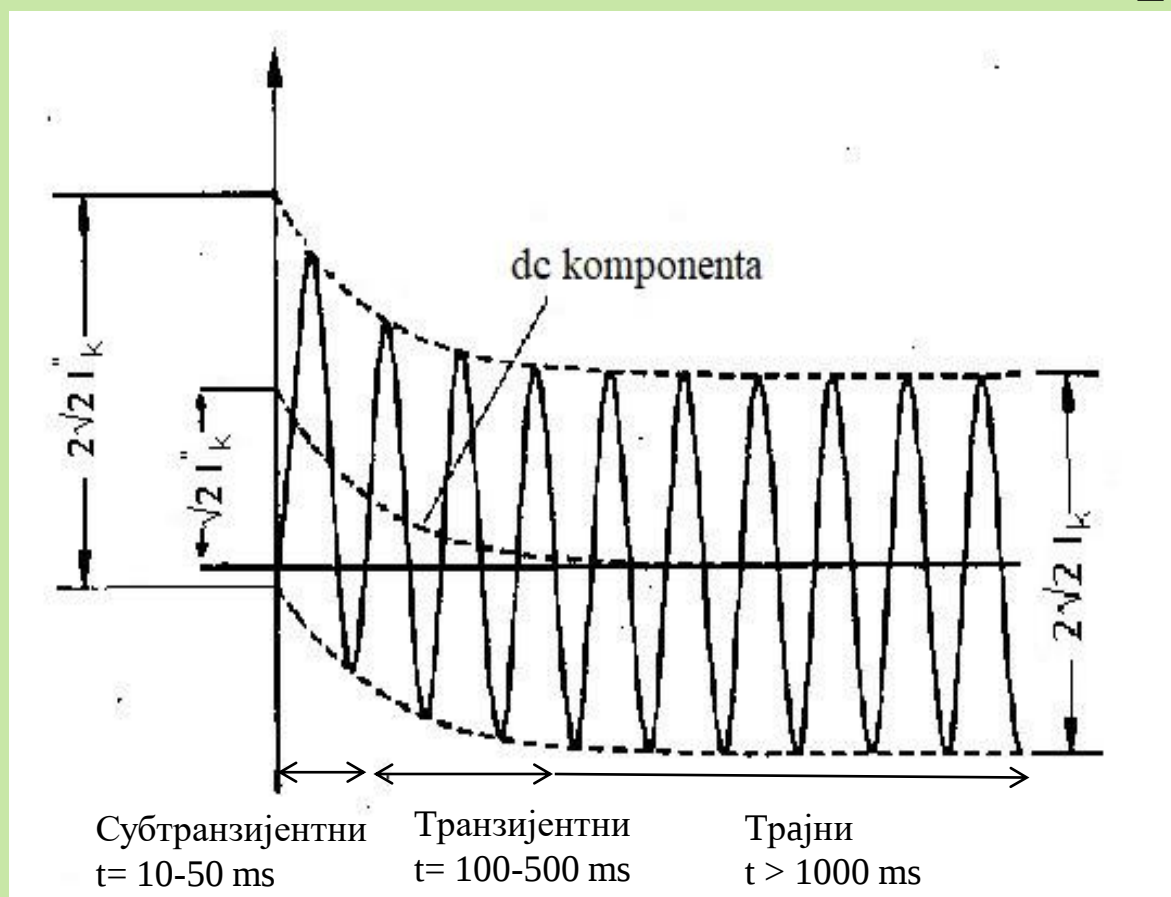
$$i_{DC}(t) = \sqrt{2} I_k'' e^{-t/T_a} \sin \alpha$$

$$i_{AC}(t) = \sqrt{2} \left[\left(I_k'' - I_k' \right) e^{-t/T_d''} \sin(\omega t - \alpha) + \right. \\ \left. + \left(I_k' - I_k \right) e^{-t/T_d'} \sin(\omega t - \alpha) + \right. \\ \left. + I_k \sin(\omega t - \alpha) \right]$$

α – угао флуksа у односу на осу намотаја у тренутку квара

Ефективна вредност

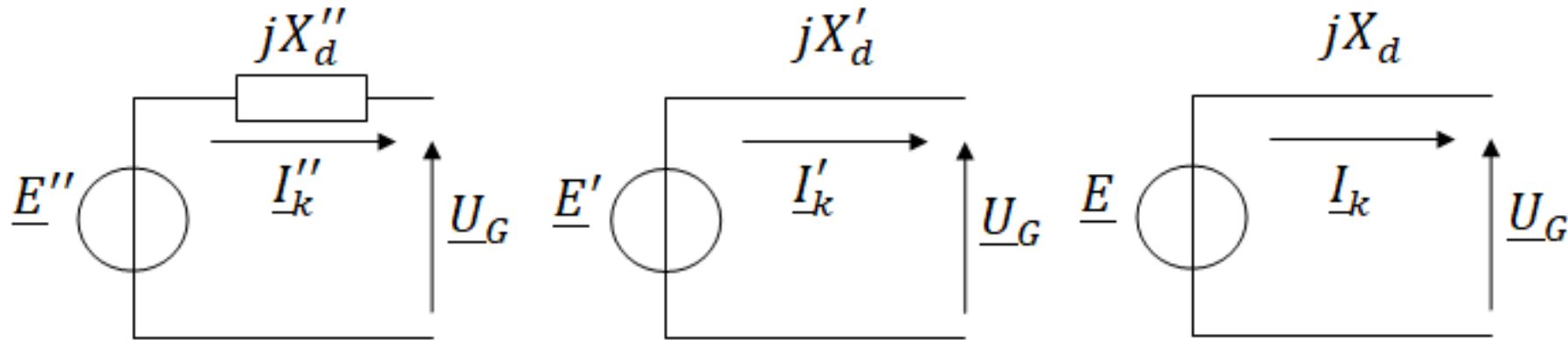
$$I_k^{eff} = \sqrt{i_{AC}^2(t) + i_{DC}^2(t)} = \left\{ \left[\sqrt{2} (I_k'' - I_k') e^{-t/T_d''} + \sqrt{2} (I_k' - I_k) e^{-t/T_d'} + \sqrt{2} I_k \right]^2 + (\sqrt{2} I_k e^{-t/T_a})^2 \right\}$$



Претпоставке при прорачуну наизменичне компоненте струје кратког споја:

- брзе прелазне појаве ишчезле – кратак спој преко прорачуна квазистационарних струја кратког споја
- стање пре квара се не узима у обзир
- игнорише се утицај струја кратког споја код потрошача
- игнорише се дејство регулатора побуде (константне ЕМС E'' , E' , E)
- игноришу се оточне компоненте (сем код резонатних уземљења)
- трансформатори раде са минималним односом трансформације
- обично важне амплитуде, обично се занемарује R (код каблова се узима Z)
- код трансформатора се занемарују фазни помераји (тачно само у делу мреже)

Модели синхроних машина за прорачун кратких спојева



Субтранзијентно стање

Транзијентно стање

Трајно стање

Модели синхроних машина – општа теорија

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_p \\ u_D \\ u_Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & & & & & \\ & R_s & & & & \\ & & R_s & & & \\ & & & R_s & & \\ & & & & R_s & \\ & & & & & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_p \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_p \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix}$$

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_p \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = L i = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{ap} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bp} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{bc} & L_{cc} & L_{cp} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{pa} & L_{pb} & L_{pc} & L_{pp} & L_{pD} & 0 \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{Dp} & L_{DD} & 0 \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & 0 & 0 & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_p \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta$$

$$L_{bb} = L_s + L_m \cos(2(\theta - 2\pi / 3))$$

$$L_{cc} = L_s + L_m \cos(2(\theta + 2\pi / 3))$$

$$L_{ab} = L_{ba} = -M_s - L_m \cos(2(\theta + \pi / 6))$$

$$L_{bc} = L_{cb} = -M_s - L_m \cos(2(\theta - \pi / 2))$$

$$L_{ca} = L_{ac} = -M_s - L_m \cos(2(\theta + 5\pi / 6))$$

$$L_{ap} = L_{pa} = M_p \cos \theta$$

$$L_{bp} = L_{pb} = M_p \cos(\theta - 2\pi / 3)$$

$$L_{cp} = L_{pc} = M_p \cos(\theta + 2\pi / 3)$$

$$L_{aD} = L_{Da} = M_D \cos \theta$$

$$L_{bD} = L_{Db} = M_D \cos(\theta - 2\pi / 3)$$

$$L_{cD} = L_{Dc} = M_D \cos(\theta + 2\pi / 3)$$

$$L_{aQ} = L_{Qa} = M_Q \sin \theta$$

$$L_{bQ} = L_{Qb} = M_Q \sin(\theta - 2\pi / 3)$$

$$L_{cQ} = L_{Qc} = M_Q \sin(\theta + 2\pi / 3)$$

$$L_{pp} = L_p$$

$$L_{DD} = L_D$$

$$L_{QQ} = L_Q$$

$$L_{pD} = L_{Dp} = M_R$$

$$L_{pQ} = L_{Qp} = L_{DQ} = L_{QD} = 0$$

$$u = -Ri - i \frac{d}{dt} L(\theta) - L(\theta) \frac{di}{dt}$$

Паркова трансформација

Због ортогоналности $K = \sqrt{\frac{3}{2}}$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi / 3) & \cos(\theta + 2\pi / 3) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 2\pi / 3) & \sin(\theta + 2\pi / 3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$\psi = L(\theta)i$$

$$\psi^{dq0} = PL_{11}(\theta)P^{-1}i^{dq0} \Rightarrow L_{11} = PL_{11}(\theta)P^{-1}$$

$$L_B = \begin{bmatrix} PL_{11}(\theta)P^{-1} & PL_{12} \\ PL_{12}^T & L_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_p & \sqrt{\frac{3}{2}}M_D & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_Q \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}}M_p & 0 & 0 & L_p & 0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}}M_D & 0 & 0 & 0 & L_D & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_Q & 0 & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}$$

Напонске једначине :

$$\frac{\partial \psi^{ab0}}{\partial t} = \frac{\partial (P^{-1} \psi^{dq0})}{\partial t} = \frac{dP^{-1}}{dt} \psi^{dq0} + P^{-1} \frac{\partial \psi^{dq0}}{\partial t}$$

$$L_d = L_s + M_s + \frac{3}{2} L_m$$

$$L_q = L_s + M_s - \frac{3}{2} L_m$$

$$L_0 = L_s - 2M_s$$

d-оса

$$u_d = -R_s i_d - \omega \psi_q - \frac{d\psi_d}{dt}$$

$$u_p = R_p i_p + \frac{d\psi_p}{dt}$$

$$u_D = R_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt}$$

q-оса

$$u_q = -R_s i_q + \omega \psi_d - \frac{d\psi_q}{dt}$$

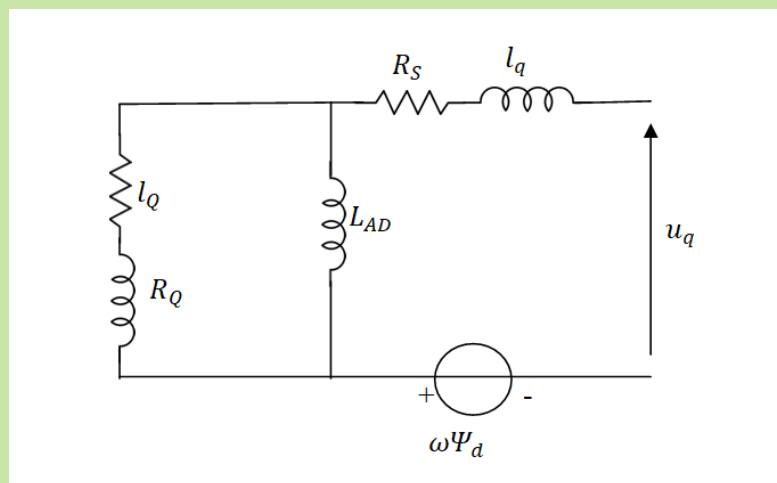
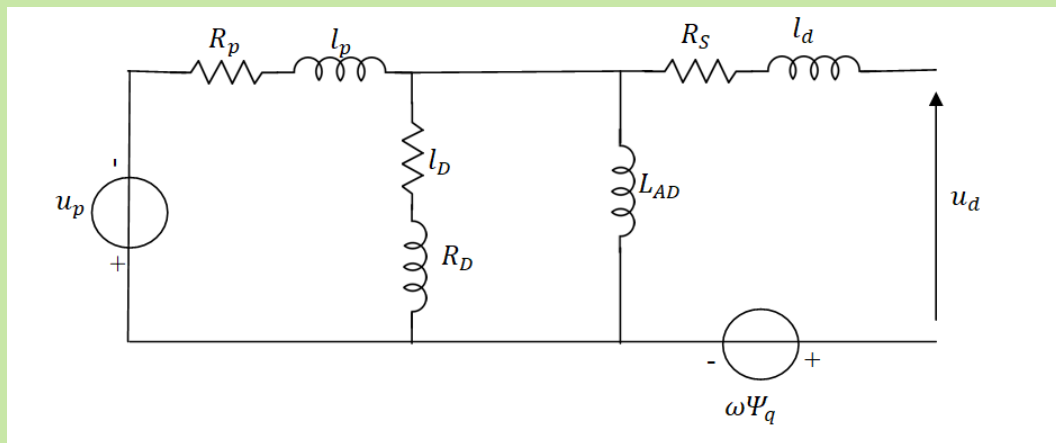
$$u_Q = R_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt}$$

$$u_0 = -R_0 i_0 - \frac{d\psi_0}{dt}$$

Нормализација-једнакост међусобног обухватног флукса

$KM_p = KM_D = M_R = L_\mu = L_{AD}$ у релативним јединицама

$$KM_Q = L_{AQ}$$

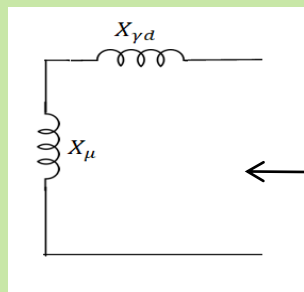
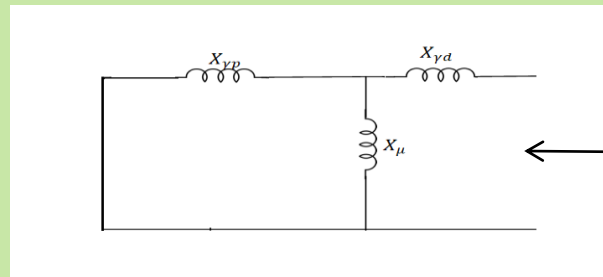
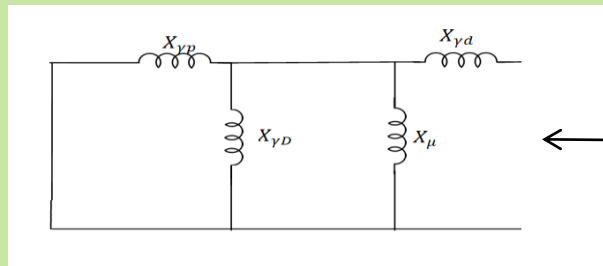
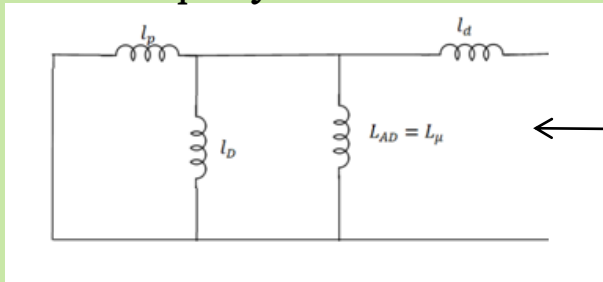


$$L_p = l_p + L_{AD}$$

$$L_D = l_D + L_{AD}$$

$$L_d = l_d + L_{AD}$$

d-оса (занемарене отпорности, $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{const}$)
 слично и за q-осу



$$\begin{array}{ll} X_d \approx 200\% & \text{за ТГ} \\ X_d \approx 120\% & \text{за ХГ} \end{array} \quad \begin{array}{ll} X_q = X_d & \text{за ТГ} \\ X_q \approx 80\% & \text{за ХГ} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} X_d' \approx \frac{X_d}{10} & \text{за ТГ} \\ X_d' \approx \frac{X_d}{10} & \text{за ХГ} \end{array} \quad \begin{array}{ll} X_q' \approx X_d' & \text{за ТГ} \\ X_q' \approx X_q & \text{за ХГ} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} X_d'' \approx 0.8 X_d' & \text{за ТГ} \\ X_d'' \approx 0.8 X_d' & \text{за ХГ} \end{array} \quad \begin{array}{ll} X_q'' \approx X_d'' & \text{за ТГ} \\ X_q'' \approx X_d'' & \text{за ХГ} \end{array}$$

X_0 испод 5%

(везујемо статорске намотаје на ред, нема обртног магнетског поља)

$$X_i = \frac{X_d'' + X_q''}{2}$$

Незасићене реактансе су нешто веће.

У прорачуну кратких спојева се примењују засићене реактансе.

		ТГ	ХГ
засићено	X_d''	9-22 %	12-30%
засићено	X_d'	14-35%	20-45%
незасићено	X_d	140-300%	80-180%
	X_i	9-22%	10-25%
	X_0	3-10%	5-20%

Временске константе

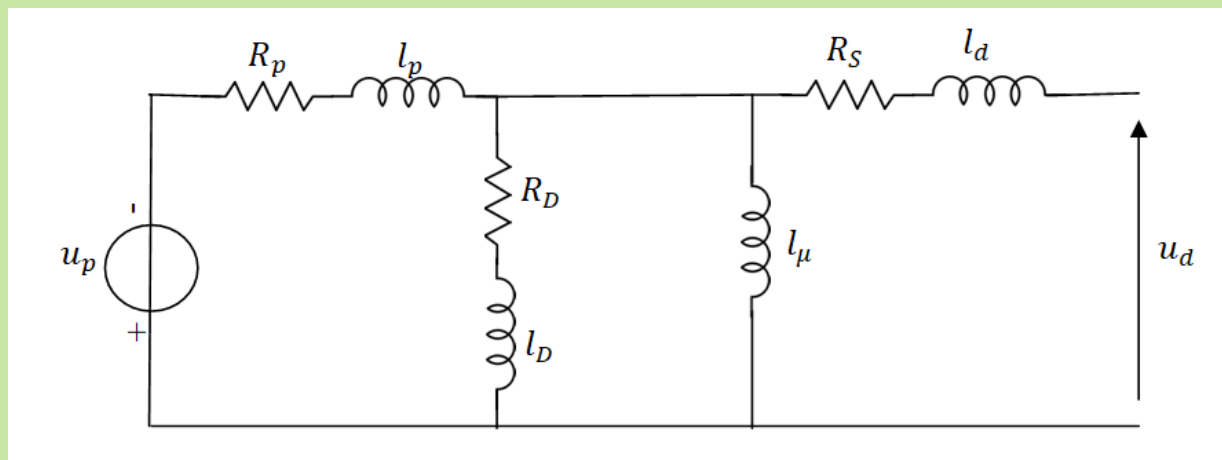
$$T'_{d0} = \frac{L_p}{R_p} = \frac{X_{\gamma p} + X_{\mu}}{\omega_s R_p} \quad \sim \quad 3-10 \text{ s}$$

(R_p мало да би били мали губици)

$$T'_d = T'_{d0} \frac{X'_d}{X_d} \quad \sim \quad 1-1.5 \text{ s}$$

(R_D велико да би се што пре пригушили прелазни процеси)

$$T''_{d0} = \frac{1}{R_d \omega_s} \left(X_{\gamma d} + \frac{X_{\gamma p} X_{\mu}}{X_{\gamma p} + X_{\mu}} \right) \quad \sim \quad 0.125 \text{ s (0.04 s)}$$



$$T_d'' = T_{d0}'' \frac{X_d''}{X_d'} \sim \begin{array}{l} 0.01-0.03 \text{ s} \text{ за мале генераторе} \\ 0.03-0.05 \text{ s} \text{ за велике генераторе} \end{array}$$

$$T_{q0}'' = \frac{1}{R_q \omega_s} (X_{\gamma Q} + X_{\mu Q})$$

код ХГ $T_q'' = T_d'' \approx 0.01 \text{ s}$

код ТГ $T_q' \approx 0.8 \text{ s}$
 $T_q'' \approx 0.04 \text{ s}$

$$T_a = \frac{X_s}{R_s \omega_s} \sim 0.15 - 0.2 \text{ s}$$

Одређивање ЕМС и заменских шема

Еквивалентне ЕМС које одговарају роторским величинама: (у SI јединицама)

$$i_p : \quad i_p \omega_n M_p = \sqrt{2} E_f \quad \Rightarrow \quad i_p \omega_n K M_p = \sqrt{3} E_f$$

$$\psi_p : \quad \text{у стационарном стању} \quad \psi_p = L_p i_p$$
$$\Rightarrow \quad \psi_p \frac{\omega_n K M_p}{L_p} = \sqrt{3} E'_q$$

$$v_p : \quad \text{у стационарном стању} \quad v_p = R_p i_p$$
$$\Rightarrow \quad v_p \frac{\omega_n K M_p}{R_p} = \sqrt{3} E_{FD}$$

Да би се компензовало извесно смањење вредности струје због занемарења ефеката по q-оси, уместо компоненти ЕМС по q-оси у прорачуну се користе ЕМС или падови напона на рекатансама при протицању укупне струје намота фазе.

$$E'' = \sqrt{(U + X_d'' I \sin \varphi)^2 + (X_d'' I \cos \varphi)^2}$$

$$E' = \sqrt{(U + X_d' I \sin \varphi)^2 + (X_d' I \cos \varphi)^2}$$

$$E = \sqrt{(U + X_d I \sin \varphi)^2 + (X_d I \cos \varphi)^2}$$

Под претпоставком да се кратак спој десио при називном напону и струји:

$$E'' = U_n \sqrt{1 + 2 X_d'' \sin \varphi + X_d''^2}$$

$$E' = U_n \sqrt{1 + 2 X_d' \sin \varphi + X_d'^2}$$

$$E = U_n \sqrt{1 + 2 X_d \sin \varphi + X_d^2}$$

X овде у p.j.

Типичне вредности:

	$\cos \varphi_n$	E'' / U_n	E' / U_n	E / U_n
ТГ	0.8 (ind)	1.13	1.2	2.72
ХГ	0.95 (ind)	1.08	1.11	1.70

У практичним прорачунима:

$$E'' = 1.1 U_n$$

$$E' = 1.15 U_n$$

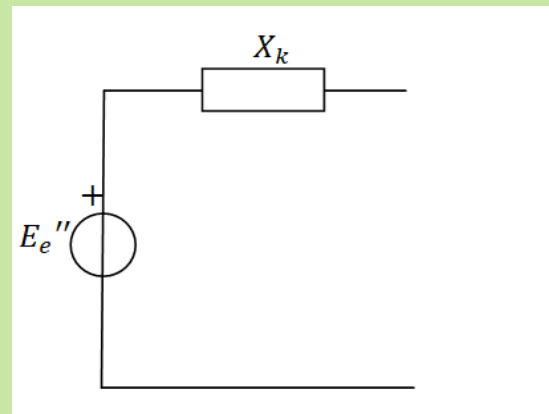
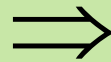
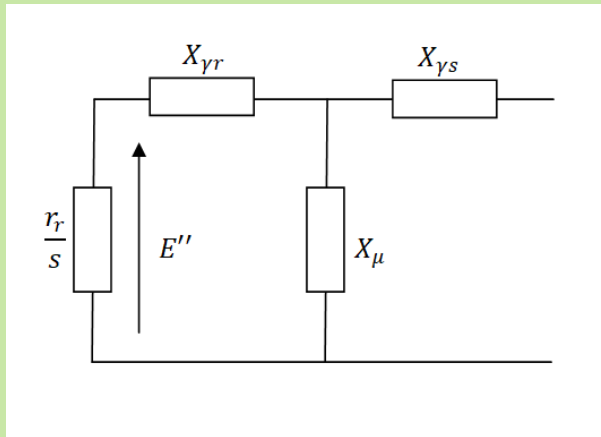
Утицај мотора на струју кратког споја

Приближно:

$$i = \sqrt{2}I'' e^{-\frac{t}{T''}} \cos \omega t - I_a e^{-\frac{t}{T_a}}$$

T'' – временска константа пригушења флукса обухваћеног намотајима ротора

T_a – временска константа пригушења једносмерне компоненте



(као са укоченим ротором)

$$E_e'' = E'' \frac{X_\mu}{X_{\gamma r} + X_\mu} \approx E''$$

Типично $E'' \approx 0.95 U_n$

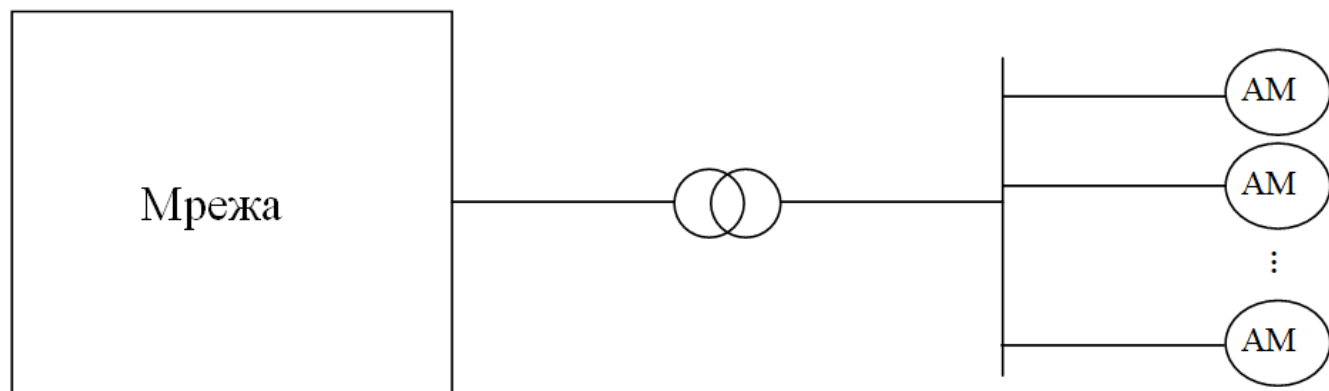
$$X_k = X_{\gamma s} + \frac{X_{\gamma r} X_\mu}{X_{\gamma r} + X_\mu}$$

У практичним прорачунима $E'' \approx 1.1 U_n$, као код синхроних генератора, да би се обухватио ефекат засићења реактанси.

P_n [kW]	100	500	1000	2000
T' [s]	0.02	0.08	0.12	0.2

T_a обично мање од T''

$$T_a = \frac{1}{\omega} \frac{X_k}{r} \quad r \approx 0.7 X_k \quad \text{отпор намотаја статора}$$

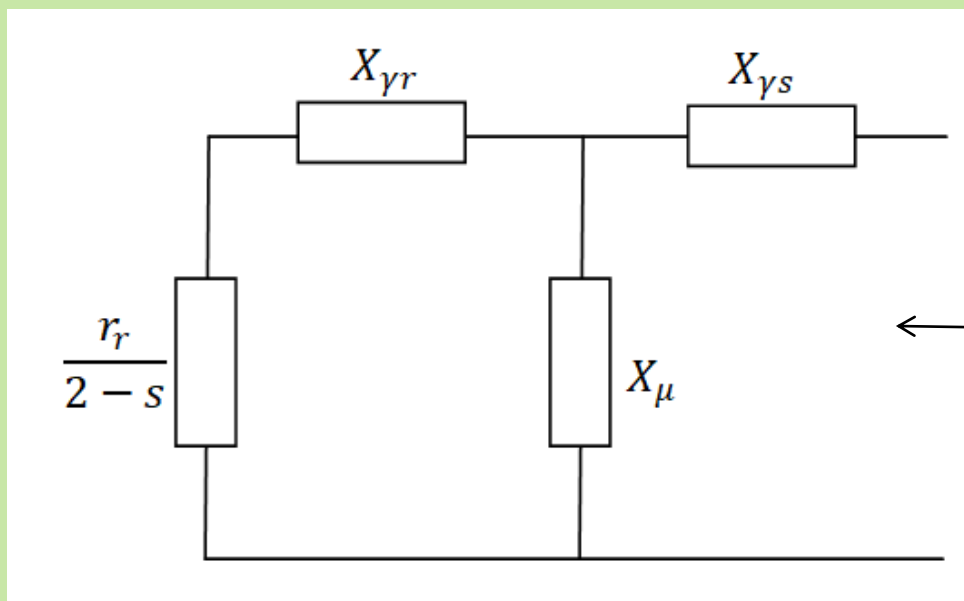


$$I'' = 1.1 \sum I_{pk}$$

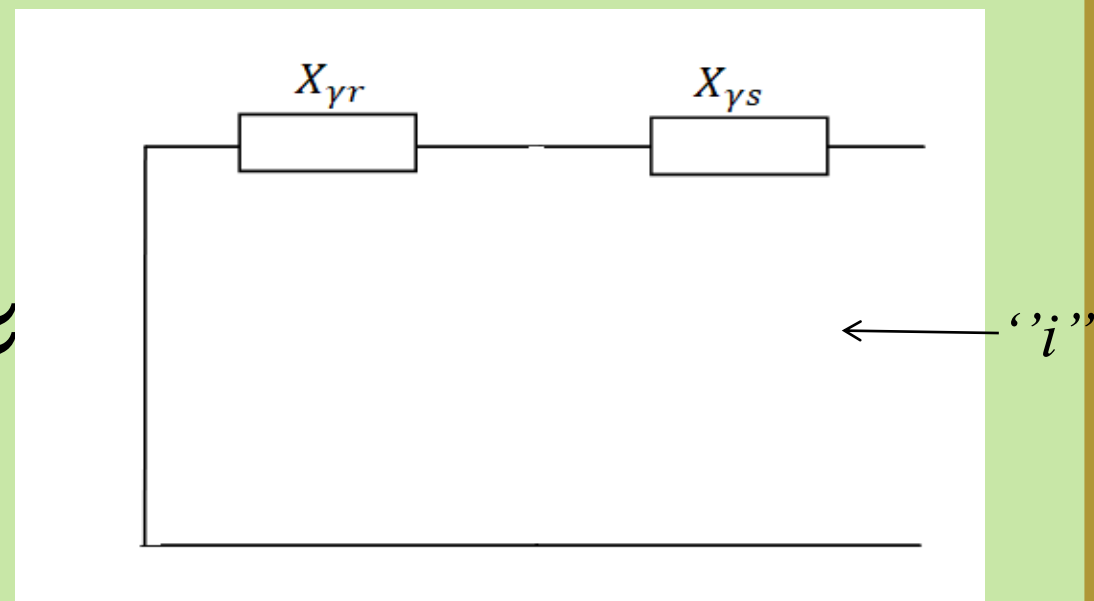
$$T'' = \frac{\sum_k T_k P_{nk}}{\sum_k P_{nk}}$$

$$T_a = \frac{\sum_k T_{ak} P_{nk}}{\sum_k P_{nk}}$$

“i” редослед

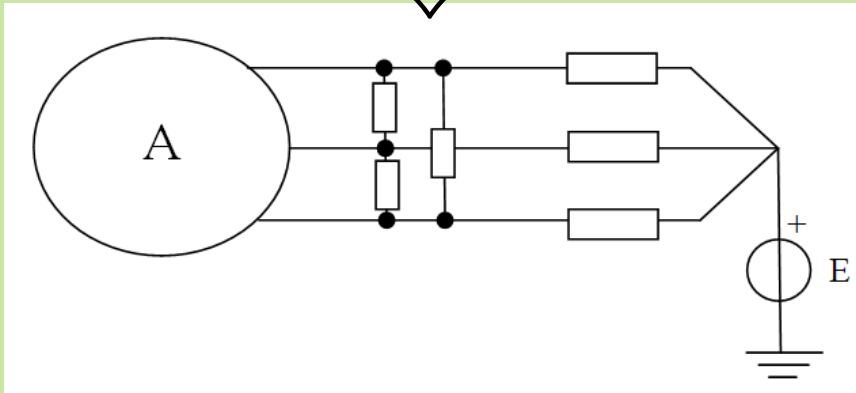
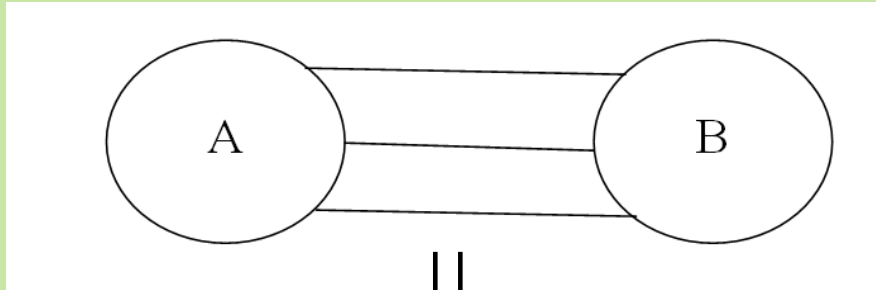


← “i” $\approx$

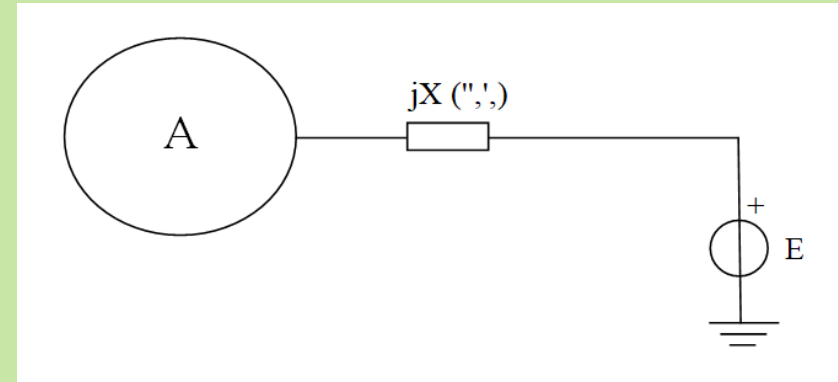


Утицај мреже

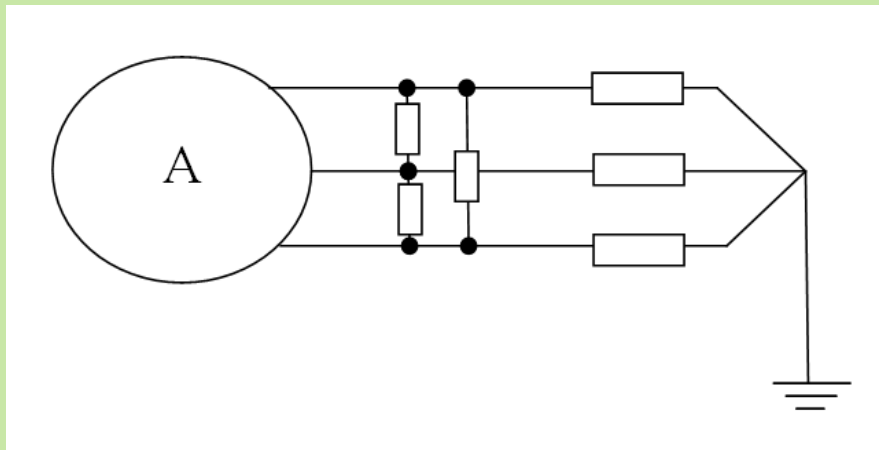
-када је радијална:



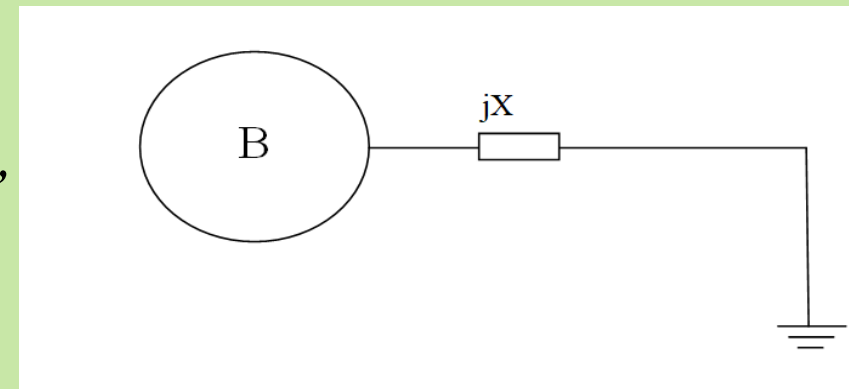
“d”



“d”



“i”, “0”



“i”, “0”

Ако из празног хода посматрамо кратак спој (што је најчешћи случај):

$$X = \frac{U_n}{I_B} = \frac{U_n^2}{S_B}$$

струја из В дела

$$X_i \approx X'' = \frac{U_n^2}{S_B''}$$

Водови

Дубина повратног пута из Карсоновог обрасца:

$$h = 658.5 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad \begin{array}{l} \rho - \text{специфична електрична отпорност тла (50-80 } \Omega\text{m)} \\ f - \text{фреквенција (50 Hz)} \end{array}$$

$$l_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{h^3}{r_e D^2}\right) \quad x_0 \approx 1.42 \Omega / km \quad (\text{за 400 kV})$$

$$l_i = l_d = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{r_e}\right)$$

$$l_0 \approx 3l_d$$

$$r_0 = r + 3r_z$$

$$r_z = \pi^2 f 10^{-4} \Omega / km \approx 0.05 \Omega / km \quad (\text{за 50 Hz})$$

$$c_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{h^3}{r D_{sg}^2}\right)} \quad c_0 \approx 5 \cdot 10^{-9} F / km$$

$$c_d = c_i \approx 9 \cdot 10^{-9} F / km$$

$$c_d = c_i = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_{sg}}{r}}$$

Типичне вредности односа x_0/x_d за надземне водове:

Заштитно уже	Једноструки вод	Двоструки вод
He	3.2	5.1
Од челика	2.9	4.4
Al-Ће	2.5	3.5

Нулте шеме трансформатора

Зависе од:

1. Магнетског кола
 2. Начина уземљења звездишта
 3. Спреге трансформатора
- 1. Магнетско коло

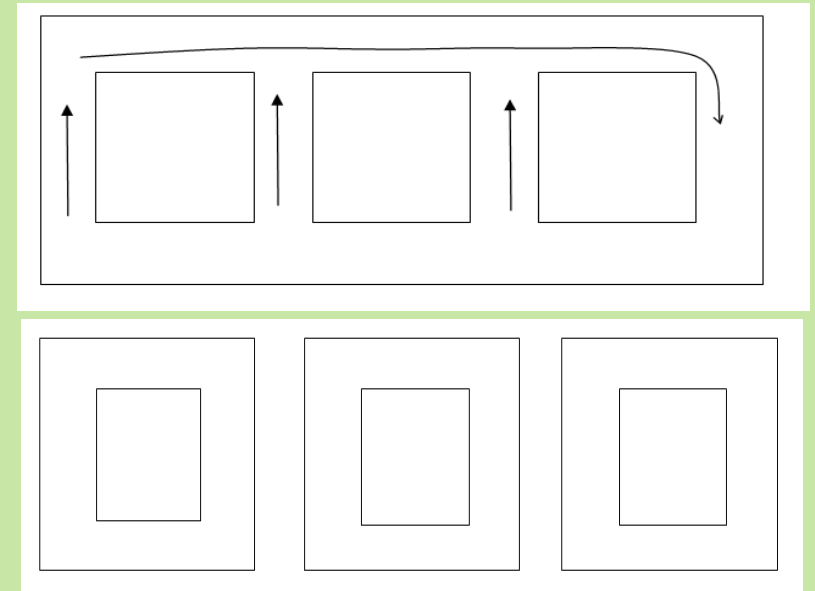
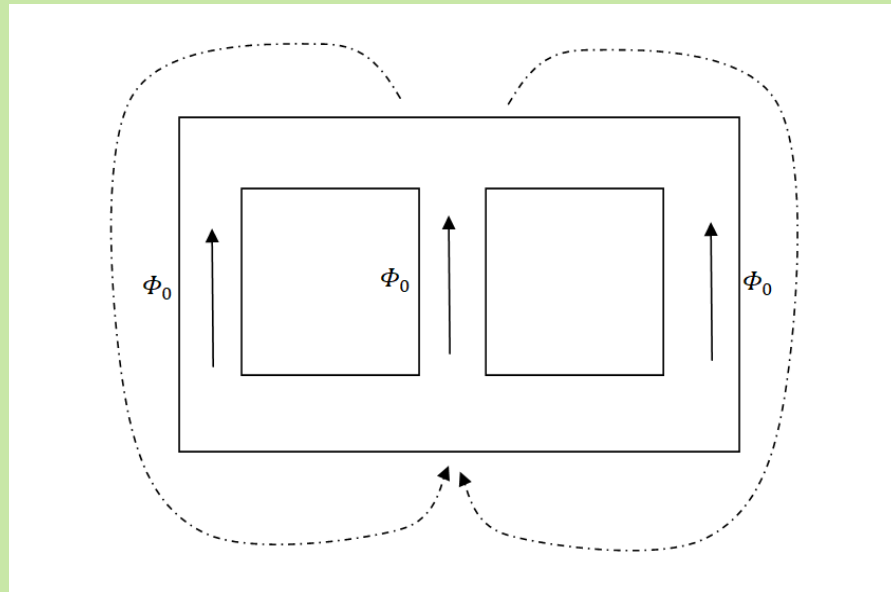
$$X_{\mu\%} = \frac{X_{\mu}}{U_n} I_n \cdot 100 = \frac{I_n}{I_0} \cdot 100$$

$$X_{\mu} = \frac{U_n}{I_0}$$

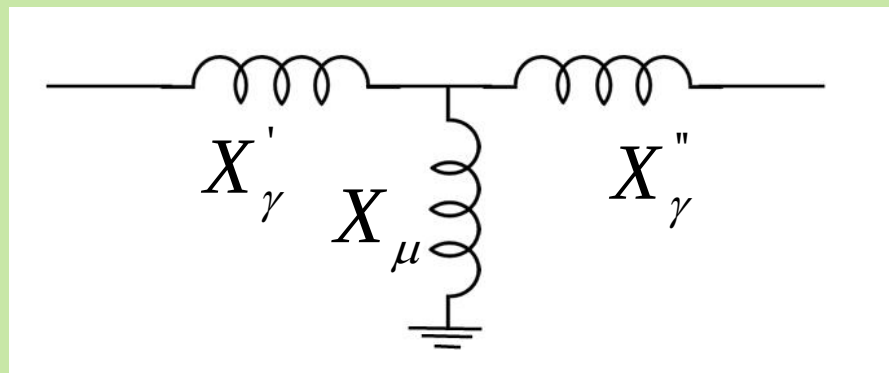
I_0 —за велике трансформаторе
око 1%

R_{μ} — велико
 $X_{\mu 0}$ — 30- 100%
 $X_{\mu 0} \ll X_{\mu}$

R_{μ} — мало
 $X_{\mu 0}$ — 4000- 10000%
 $X_{\mu} \sim X_{\mu 0}$

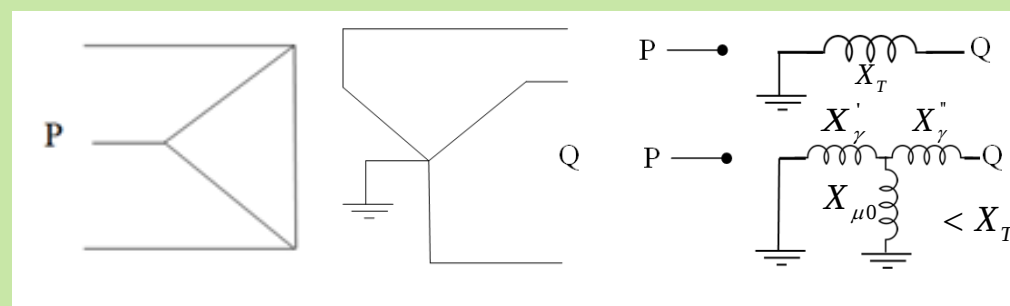
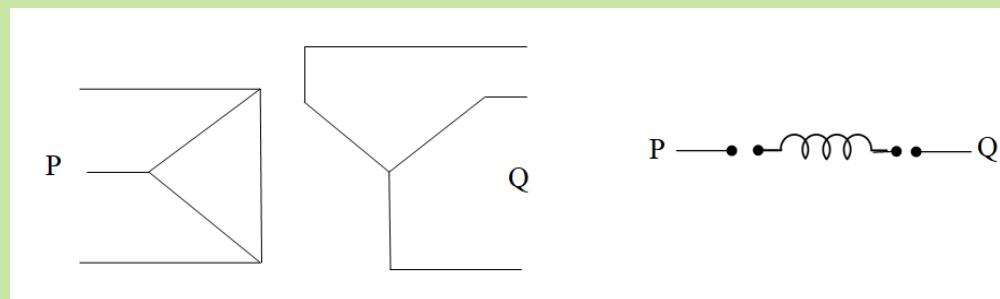
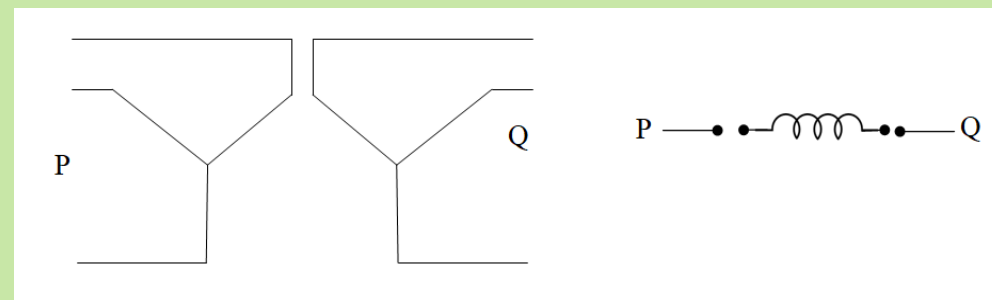
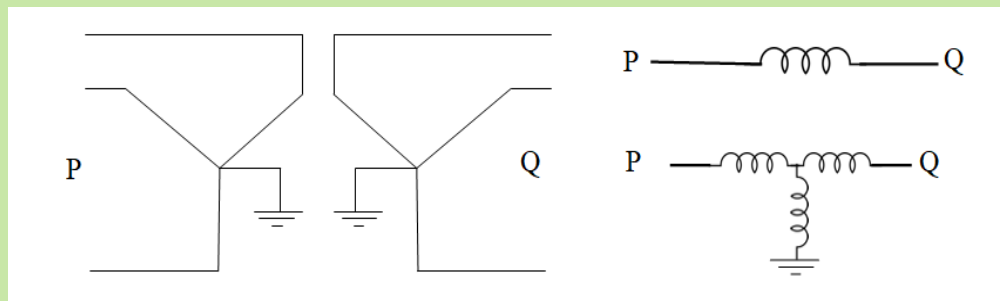


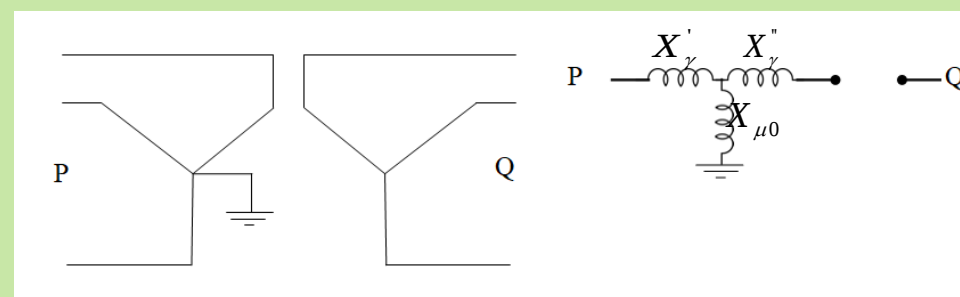
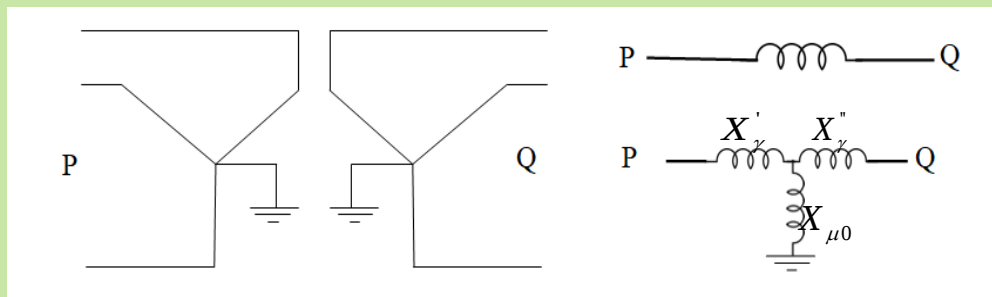
2. Начин уземљења звездишта, спрега



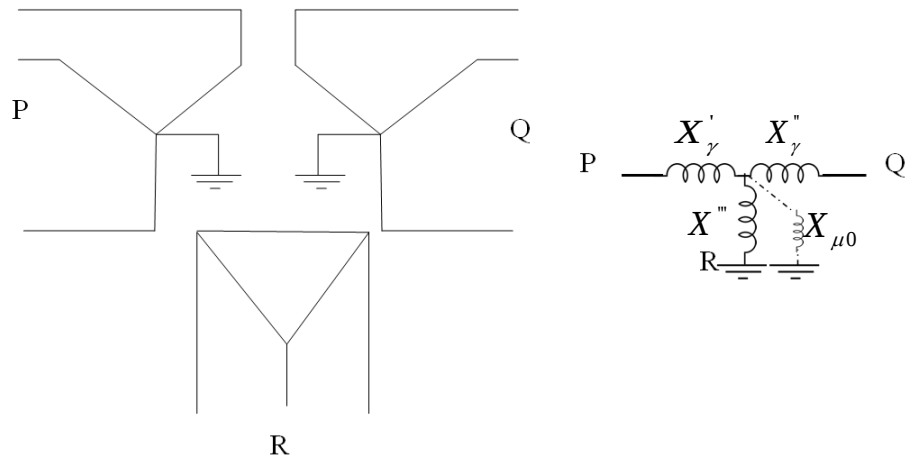
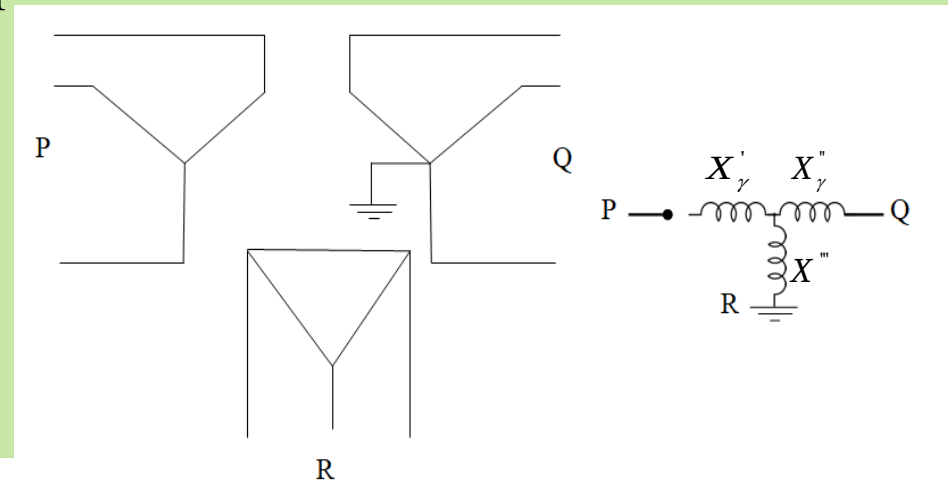
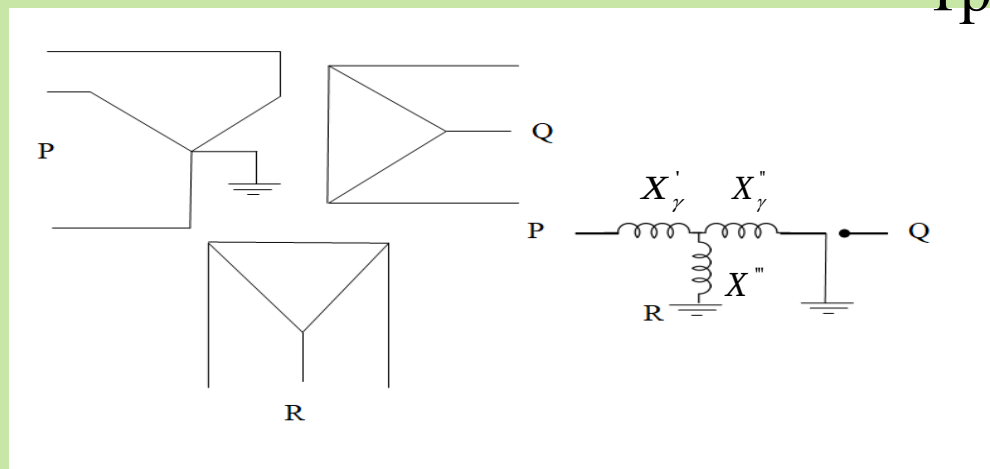
← За све спреге и начине уземљења звездишта за “d” и “i”

За “0” зависи од затварања нултих струја:

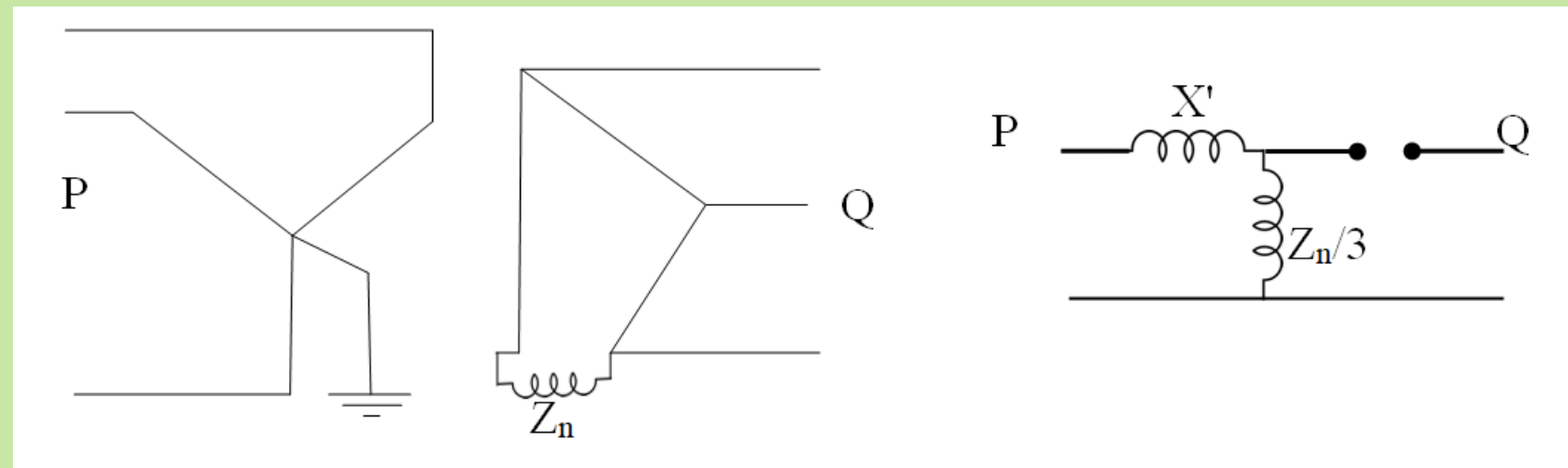
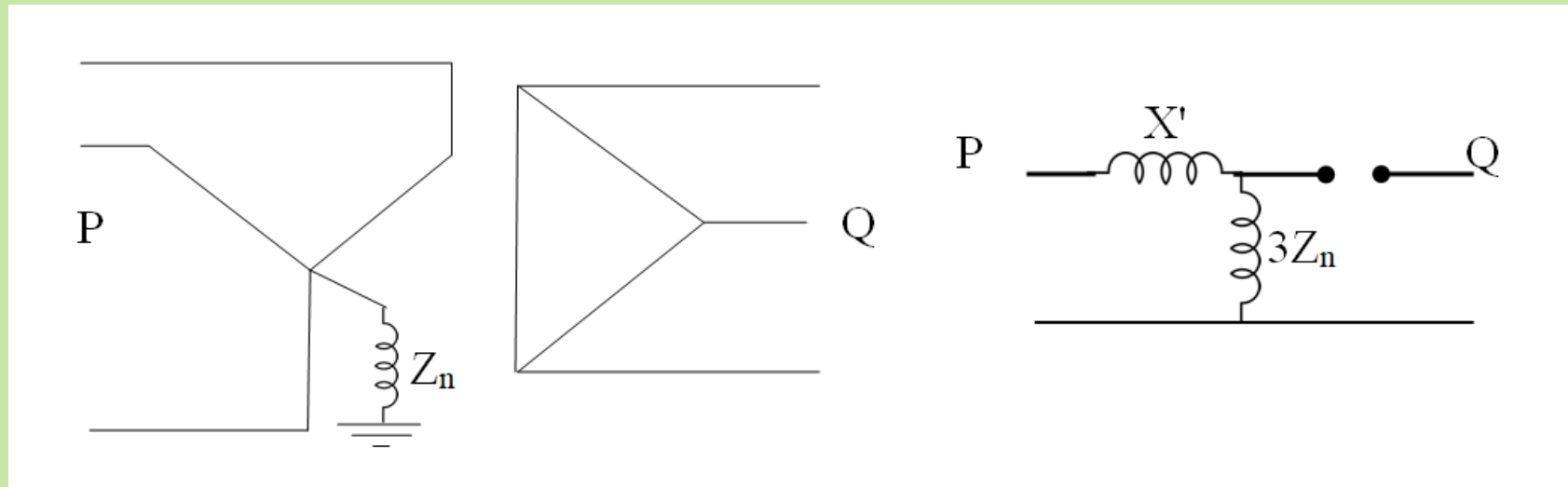




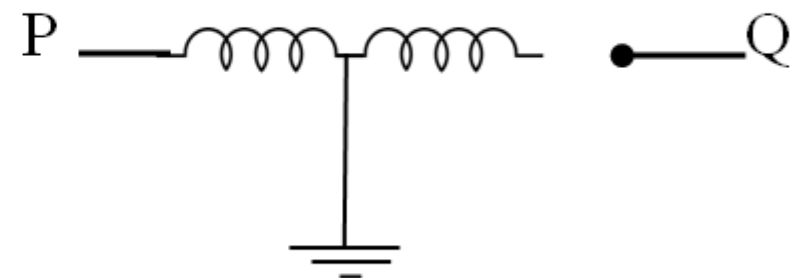
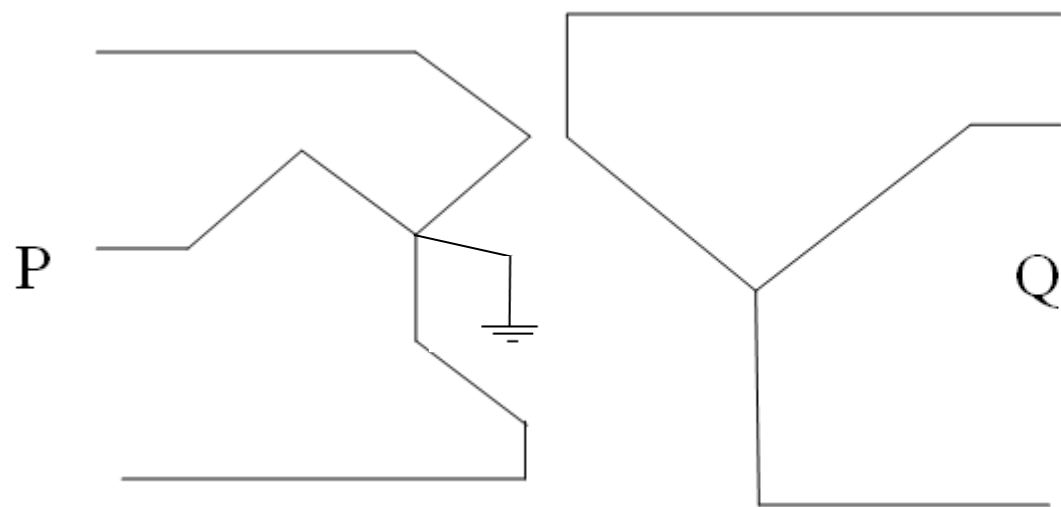
Тронамотајни



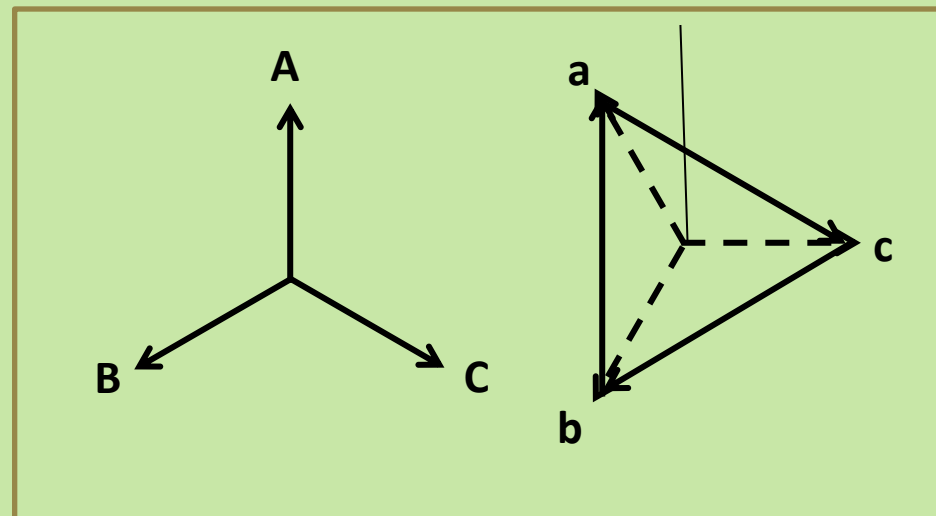
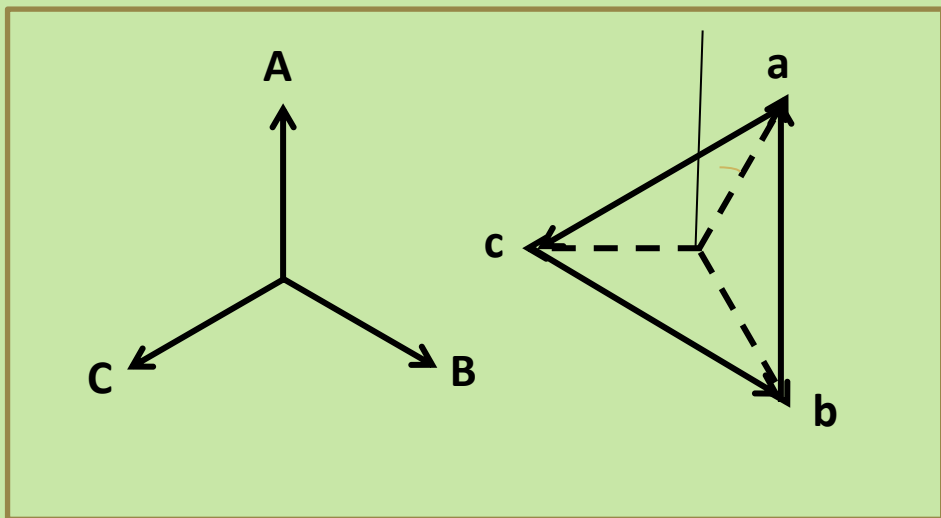
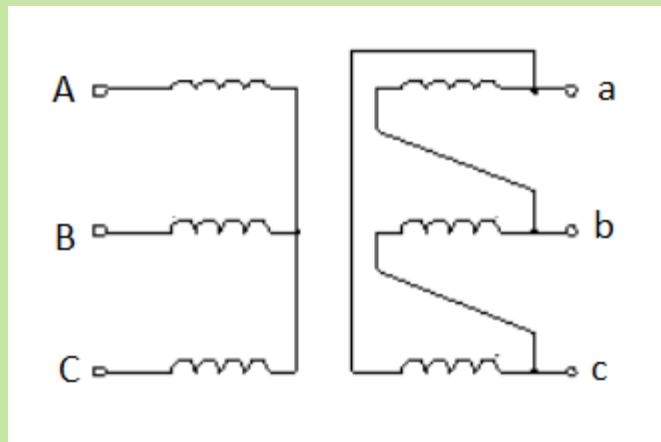
Уземљење



Zig-zag, сломљена звезда



Преношење струја преко спреге Yd

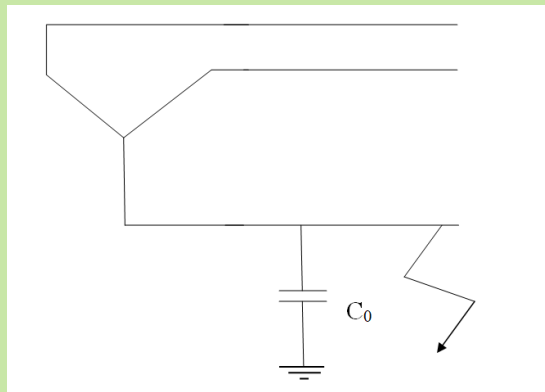


Врсте узмељења звездишта

- А) изоловано
- Б) са резонантним узмељењем (Петерсенова прогушница)
- В) узмељење преко мале импедансе
- Г) директно узмељено

А) Изоловано звездиште

- Најједноставније и најјефтиније
- Граница до које се користи везана са струјом.



$$c_0 \sim 5 \cdot 10^{-9} \frac{F}{km}$$

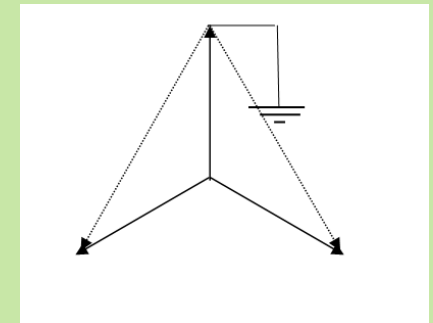
$$\underline{Z}_0 \approx \frac{1}{j\omega c_0} \approx -j0.6 \cdot 10^6 \frac{\Omega}{km}$$

$$\underline{I}_z = 3 \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0}$$

$$\underline{Z}_0 \gg \underline{Z}_d, \underline{Z}_i$$

$\underline{I}_z$ - реда неколико А, врло мало

Напони:



Напони здравих фаза се димензионишу на $\sqrt{3}U_f$

Самогашење лука

Зависи од:

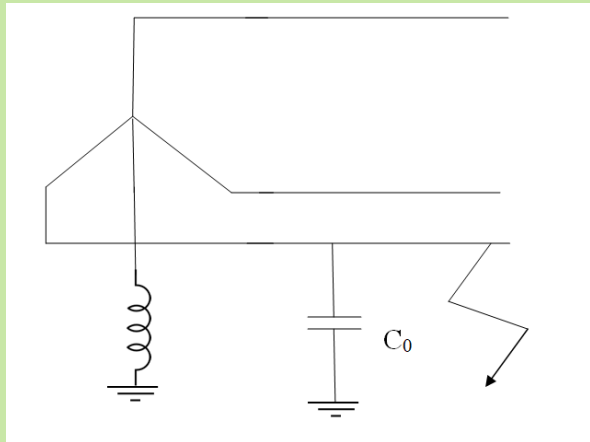
- Притиска
- Температуре
- Влажности ваздуха
- Запрљаности
- Ветра

Може бити до 50 А. Као граница се узима 5 А (све испред ће се сигурно угасити).

У супротном, могућност појаве интермитентних пренапона. ($3 U_n$)

Прелази се на уземљење са нискоомском импедансом или Петерсеновом пригушницом.

Б) Компензована мрежа (Петерсенова пригушница)



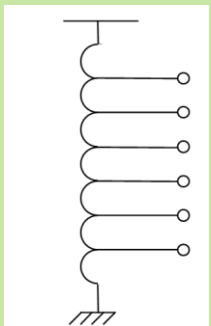
$$C_0 = \sum c_{0i} l_i$$

Услов резонантног уземљења:

$$\underline{Z}_0 = \frac{3j\omega L_p \frac{1}{j\omega C_0}}{j(\omega L_p - \frac{1}{\omega C_0})}$$

$$3\omega^2 L_p C_0 = 1$$

- Увек нешто испод резонантног
- Користи се до напона 110 kV. Типично у 35 kV.
- Распоређује се уземљење у више звездишта.
- Код мрежа виших напона мора се узети у обзир и оточна проводност (остаје некомпензована).
- Услови гашења активне компоненте су лакши па је услов самогашења ≈ 70 А што олакшава примену.
- Цена Петерсенове пригушнице $\sim 10\%$ цене трансформатора.



(Може аутоматским
уређајем даљинског
управљања)

В) Уземљење преко мале импедансе

2 варијанте: R, X

1. Преко R (електролитички, метални)

$$\underline{I}_z = 3 \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0 + 3R} = \frac{\underline{U}_{fr}}{R}$$

- Пригушује прелазне процесе везане за пренапоне

Код изолованих – типичне вредности пренапона $2 U_{\max, \text{rad}}$

Код уземљених преко импедансе 1.6, 1.7 $U_{\max, \text{rad}}$

- Повећане струје земљоспоја
- Обезбеђује се стабилан електрични лук (елиминација интермитентних пренапона)
- Олакшава детекцију квара и поједностављује заштиту
- Захтева се аутоматско искључење кратког споја

Подешава се да струје земљоспоја буду 20-30% веће од I_n (детекција квара)

Називни напон мреже (kV)	6	10	20	35
Гранична струја (A)	30	20	15	10

Г) Директно уземљена звездишта

Напони остају фазни, а изолација се димензионише према критеријуму за ефикасно уземљене мреже:

Мрежа је ефикасно уземљена ако при 1fks напони здравих фаза не пређу 80% максималног радног међуфазног напона мреже.

Користи се техника АПУ (за пролазне кварове).

Фактор уземљења

$$\underline{K}_U = \frac{\underline{Z}_0^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv}}$$

$$\text{за 1fks: } \frac{\underline{U}_B}{\underline{U}_A^{radno}} = \frac{(\underline{a}^2 - \underline{a}) + \underline{K}_U (\underline{a}^2 - 1)}{2 + \underline{K}_U}$$

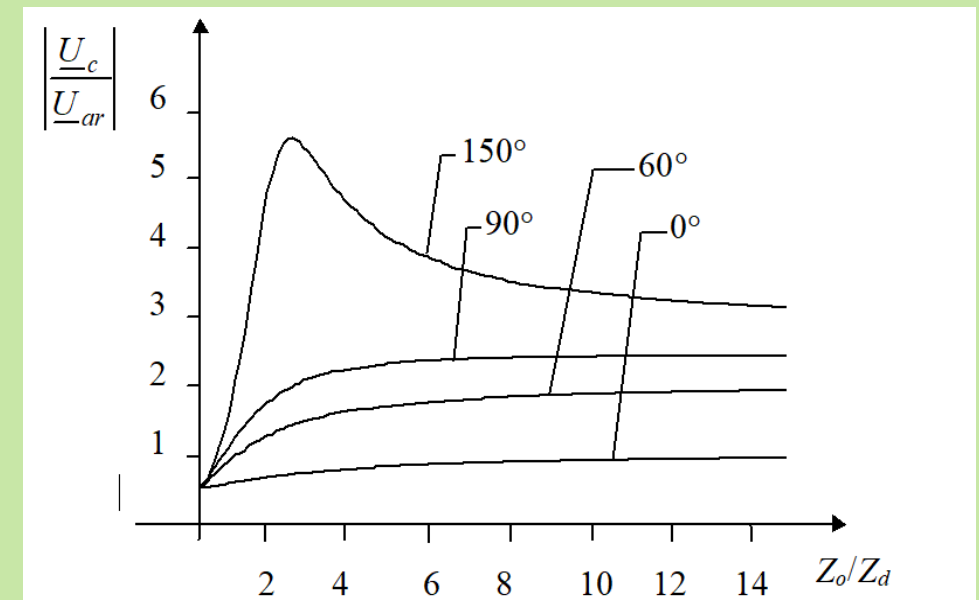
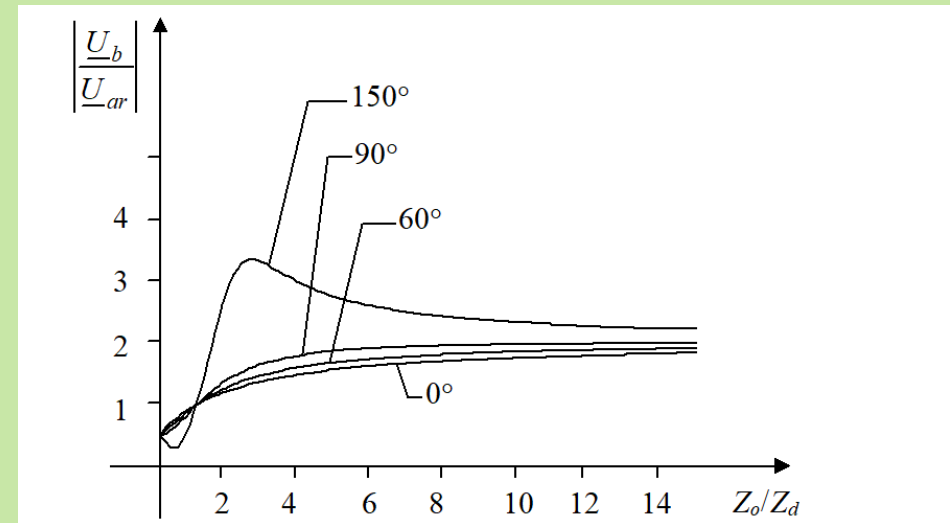
$$\frac{\underline{U}_C}{\underline{U}_A^{radno}} = \frac{(\underline{a} - \underline{a}^2) + \underline{K}_U (\underline{a} - 1)}{2 + \underline{K}_U}$$

за $\underline{Z}_0 = Z_0 \underline{\varphi}_0 \quad \underline{Z}_d = Z_d \underline{\varphi}_d$

$\varphi_d \approx 90^\circ$ (R јако мало)

$$\varphi_0 = \begin{cases} 0, & \text{ако је уземљење преко R} \\ 90^\circ, & \text{ако је уземљење преко X} \\ 90^\circ, & \text{директно уземљење} \\ -90^\circ, & \text{Петерсенова или изоловано} \end{cases}$$

$$\varphi_d - \varphi_0 = \begin{cases} 90^\circ \\ 0^\circ \\ 180^\circ \end{cases}$$



Услов ефикасног уземљења звездишта

$$\frac{X_o^{ekv}}{X_d^{ekv}} \leq 3$$

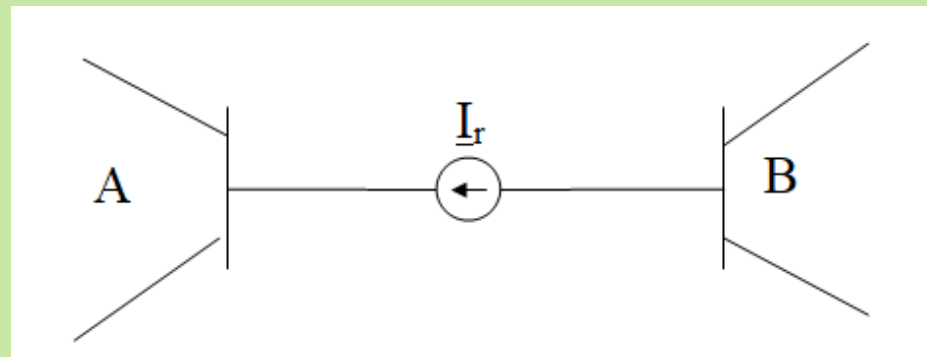
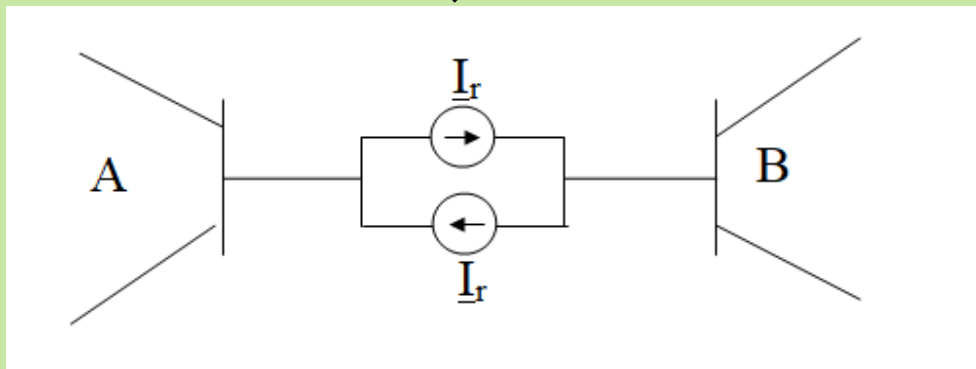
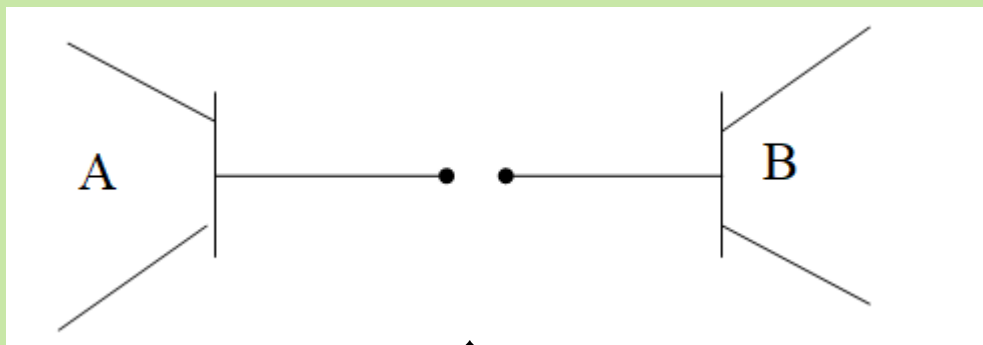
$$\frac{R_o^{ekv}}{X_d^{ekv}} \leq 1$$

У високонапонским мрежама R сигурно мање, а X_{ekv} зависи од броја и локације уземљених звездишта трансформатора.

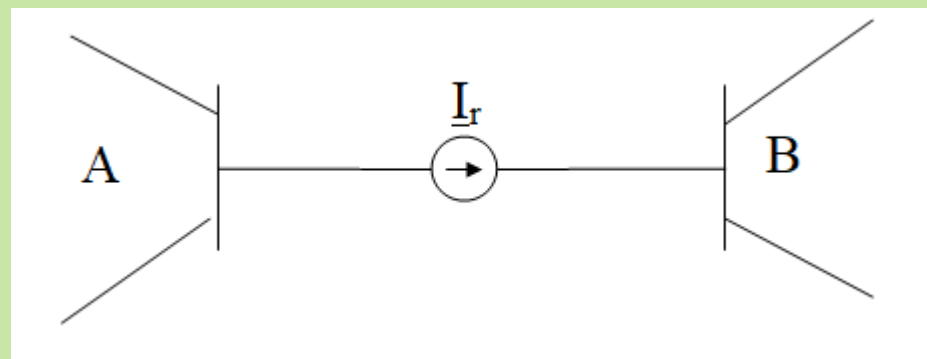
$$\frac{I_{k1Z}}{I_{k3}} = \frac{3}{2 + k_u}$$

Може и : $I_{k1Z} > I_{k3}$

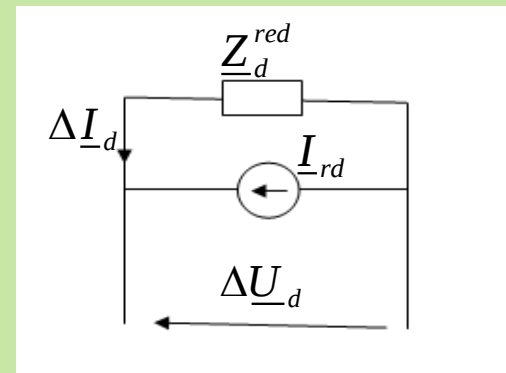
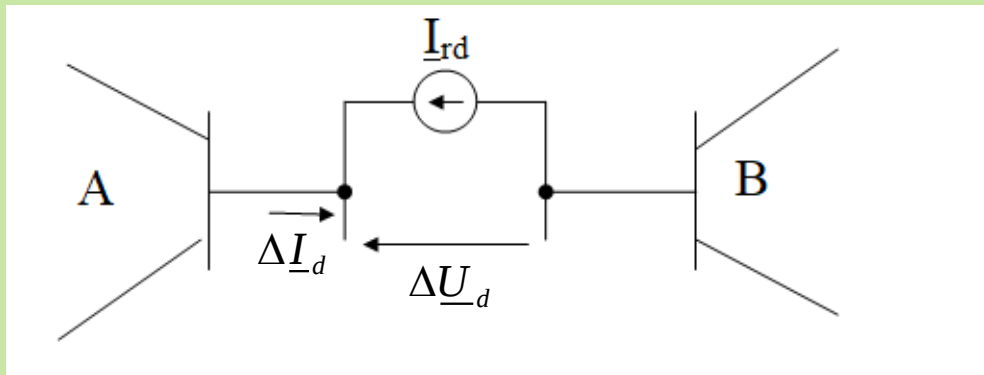
Редни кварови



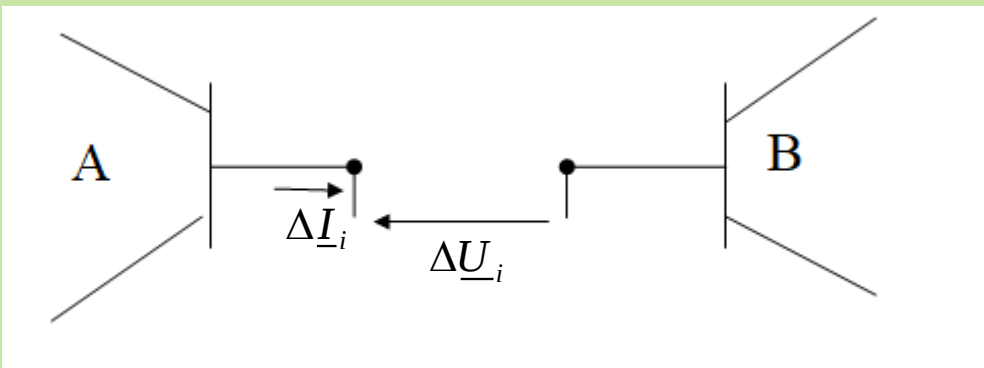
+



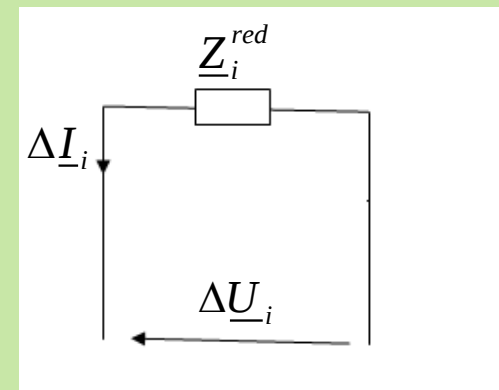
Несиметрија



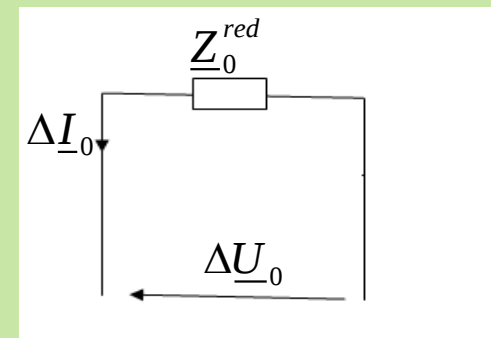
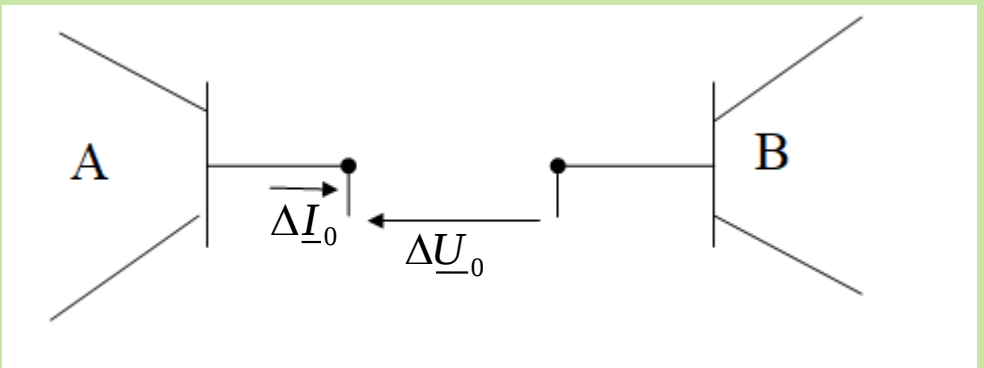
$$\Delta \underline{I}_d = -\frac{\Delta \underline{U}_d}{\underline{Z}_d^{red}}$$



$\Leftrightarrow$

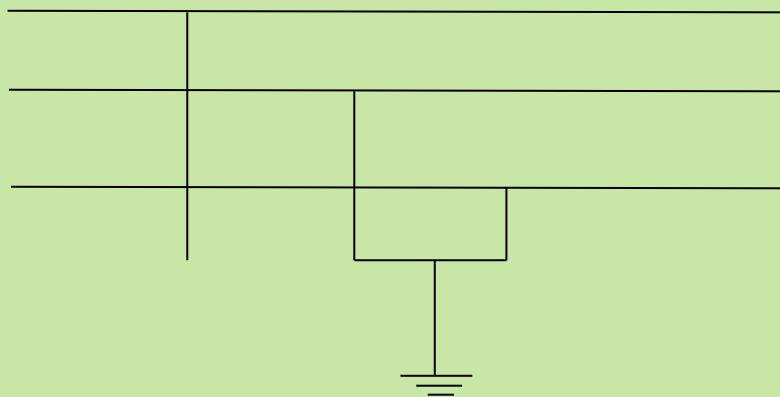


$$\Delta \underline{I}_i = -\frac{\Delta \underline{U}_i}{\underline{Z}_i^{red}}$$

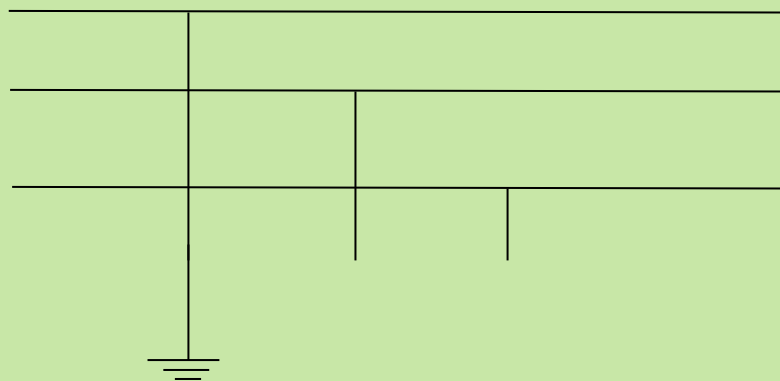


$$\Delta \underline{I}_0 = -\frac{\Delta \underline{U}_0}{\underline{Z}_0^{red}}$$

Оточни кварови



$$\underline{I}_a = 0 \quad \underline{U}_b = \underline{U}_c = 0$$



$$\underline{I}_b = \underline{I}_c = 0 \quad \underline{U}_a = 0$$

Редни кварови

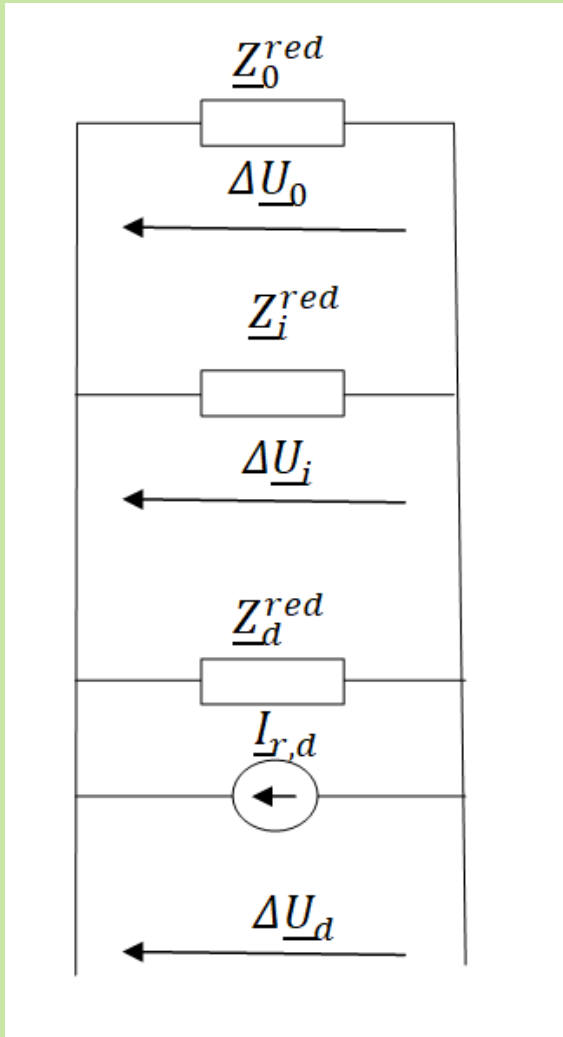


$$\underline{I}_a = 0 \quad \Delta \underline{U}_b = \Delta \underline{U}_c = 0$$



$$\underline{I}_b = \underline{I}_c = 0 \quad \Delta \underline{U}_a = 0$$

Прекид једне фазе



$$\Delta \underline{U}_d = \Delta \underline{U}_i = \Delta \underline{U}_0$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{rd} &= -\Delta \underline{I}_d - \Delta \underline{I}_i - \Delta \underline{I}_0 = \\ &= \frac{\Delta \underline{U}_d}{\underline{Z}_d^{red}} + \frac{\Delta \underline{U}_i}{\underline{Z}_i^{red}} + \frac{\Delta \underline{U}_0}{\underline{Z}_0^{red}} \end{aligned}$$

$$\Delta \underline{U}_d = \frac{\underline{I}_{rd}}{\frac{1}{\underline{Z}_d^{red}} + \frac{1}{\underline{Z}_i^{red}} + \frac{1}{\underline{Z}_0^{red}}}$$

$$\underline{U}_d = \Delta \underline{U}_d$$

$$\underline{U}_i = \Delta \underline{U}_i$$

$$\underline{U}_0 = \Delta \underline{U}_0$$

$$\underline{I}_d = \underline{I}_{rd} + \Delta \underline{I}_d$$

$$\underline{I}_i = \Delta \underline{I}_i$$

$$\underline{I}_0 = \Delta \underline{I}_0$$

Прекид две фазе

$$\underline{I}_{rd} + \Delta \underline{I}_d = \Delta \underline{I}_i = \Delta \underline{I}_0$$

$$\Delta \underline{U}_d + \Delta \underline{U}_i + \Delta \underline{U}_0 = 0$$

$$\underline{Z}_d^{red} \Delta \underline{I}_d + \underline{Z}_i^{red} \Delta \underline{I}_i + \underline{Z}_0^{red} \Delta \underline{I}_0 = 0$$

$$\underline{Z}_d^{red} \Delta \underline{I}_d + (\underline{Z}_i^{red} + \underline{Z}_0^{red})(\underline{I}_{rd} + \Delta \underline{I}_d) = 0$$

$$\Delta \underline{I}_d = -\frac{\underline{Z}_0^{red} + \underline{Z}_i^{red}}{\underline{Z}_d^{red} + \underline{Z}_i^{red} + \underline{Z}_0^{red}} \underline{I}_{rd}$$

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{Z}_d^{red}}{\underline{Z}_d^{red} + \underline{Z}_i^{red} + \underline{Z}_0^{red}} \underline{I}_{rd}$$

$$\underline{I}_i = \Delta \underline{I}_i = \underline{I}_d$$

$$\underline{I}_0 = \Delta \underline{I}_0 = \underline{I}_d$$

