

Cvičení z předmětu

Přechodné jevy v elektrizačních soustavách

Obsah cvičení

- náhradní schémata základních prvků elektrizační soustavy vhodná pro modelování
- způsoby modelování rázových přechodných dějů na transformátoru s využitím analytických i numerických matematických metod, softwarového balíku MATLAB a modelovacího nástroje DYNAST
- matematické řešení elektromechanických přechodných dějů synchronního stroje s důrazem na jeho stabilitu
- metoda symetrických složkových soustav řešení nesymetrických stavů, příklad řešení nesymetrické poruchy na vedení vyvedení výkonu elektrárny, řešení matematické a s využitím aplikačního software
- modelování elektromechanických přechodných dějů synchronního stroje v prostředí nástroje DYNAST

Doporučená literatura

1. Mühlbacher: Metody řešení přechodných jevů v elektrizačních soustavách I+II – skriptum, ZČU Plzeň 1993
2. Trojánek, Zdeněk, Hájek, Josef, Kvasnica, Pavol: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách – kniha, Praha SNTL 1987
3. Hájek J.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách – skriptum, VŠSE Plzeň 1983
4. Beran, Mertlová, Hájek: Přenos a rozvod elektrické energie – skriptum, VŠSE Plzeň 1983
5. Mühlbacher, Noháč: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách - Řešené příklady – skriptum, ZČU Plzeň 1995
6. Trojánek, Zdeněk, Chladová, Miloslava: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách - Cvičení – skriptum, ČVUT, Praha 1988
7. Stránky na VŠB - TU Ostrava jako doplnění pro cvičení:
<https://homel.vsb.cz/~mah30/pokrocily/html/pokrocily.html>

Organizační pokyny

Nutné podmínky získání zápočtu:

- docházka na cvičení s průběžným prokazováním znalostí
- případná semestrální práce
- případný test na konci semestru

Obsah cvičení detailně:

- Organizační pokyny
- Opakování látky z předmětů
 - Elektroenergetika 1 (a popř. 2)
 - Přenos a rozvod elektrické energie
 - dále Elektrárny 2, Teoretická elektrotechnika, Fyzika, Matematická analýza, ...
- Řešení přechodných dějů na transformátoru
 - sestavení náhradního schématu
 - analytické řešení zapnutí do chodu naprázdno a nakrátko
 - numerické řešení zapnutí do chodu naprázdno a nakrátko (MATLAB, Simulink, DYNAST, Open Modelica, ...)
 - řešení zapnutí do chodu naprázdno a nakrátko s využitím modelovacích nástrojů (Simscape Electrical, DYNAST, ...)
 - rozšíření modelovaného systému o spotřebu, přenosové vedení a zapracování respektování poruch
- Řešení příkladu stability provozu alternátoru pracujícího do tvrdé sítě
 - sestavení náhradního schématu a rovnic elektromechanického systému
 - vyšetření poměrů při ustálených poruchových nesymetrických stavech pomocí SKM a metody souměrných složkových soustav
 - sestavení modelu a výpočet přechodného děje numerickým řešením a vyžitím modelovacích nástrojů (DYNAST, ...)
- Příprava případné semestrální práce
- Kontrola semestrální práce, závěrečný test, udílení zápočtů

Opakování látky z předchozích předmětů

Přepočet parametrů

- Základní vstupní hodnoty pro přepočet - vztažné napětí U_V , vztažný výkon S_V
- Odvozené hodnoty pro přepočet

- vztažný proud $S_V = 3U_{VF}I_V = \sqrt{3}U_VI_V \Rightarrow I_V = \frac{S_V}{\sqrt{3}U_V}$ [A]
- vztažná impedance $Z_V = \frac{U_{Vf}}{I_V} = \frac{U_V}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3}U_V}{S_V} = \frac{U_V^2}{S_V}$ [Ω]
- alternativně $S_V = 3(Z_VI_V)I_V \Rightarrow Z_V = \frac{S_V}{3I_V^2} = \frac{S_V}{3} \left(\frac{\sqrt{3}U_V}{S_V} \right)^2 = \frac{U_V^2}{S_V}$
- vztažná reaktance $X_V = \frac{U_V^2}{S_V}$ [Ω]
- vztažná rezistance $R_V = \frac{U_V^2}{S_V}$ [Ω]
- vztažná admittance $Y_V = \left(\frac{U_V^2}{S_V} \right)^{-1} = \frac{S_V}{U_V^2}$ [S]
- vztažná reluktance $G_V = \left(\frac{U_V^2}{S_V} \right)^{-1} = \frac{S_V}{U_V^2}$ [S]
- vztažná susceptance $B_V = \left(\frac{U_V^2}{S_V} \right)^{-1} = \frac{S_V}{U_V^2}$ [S]

Všeobecný postup využití je pak následující:

- z poměrné a procentní na pojmenovanou:

$$\Sigma_{index} = \sigma_{index} \cdot \Sigma_V \qquad \Sigma_{index} = \frac{\sigma_{index\%}}{100} \cdot \Sigma_V$$
- z pojmenované na poměrnou a procentní:

$$\sigma_{index} = \frac{\Sigma_{index}}{\Sigma_V} \text{ (-)} \qquad \sigma_{index} = \frac{\Sigma_{index}}{\Sigma_V} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

Další detaily jsou dostupné v podrobném popisu v rámci dokumentu:
 „Přepočítání veličin v elektroenergetice“

https://home.zcu.cz/~nohac/EE1/Prepocet_velicin/Prepocety_velicin_v_elektroenergetice.pdf

Přepočítání mezi napěťovými hladinami

Přepočítání vychází z toho, že veškeré veličiny vlastně nejprve přepočteme na vztažné veličiny v jedné napěťové hladině a pak zpětně vypočteme veličinu s rozměrem podle vztažných hodnot v druhé napěťové hladině při zachování stejného vztažného výkonu v obou napěťových hladinách. Výsledkem je přepočítání v poměru napěťových úrovní, nebo v kvadrátu tohoto poměru podle přepočítávané veličiny. Např. impedance (indexy určují napěťovou hladinu):

$$\begin{aligned}
 S_{V1} &= S_{V2}, & z_1 &= Z_1[\Omega] / Z_{V1}[\Omega], \\
 z_2 &= z_1, & Z_2[\Omega] &= z_2 \cdot Z_{V2}[\Omega] \\
 Z_2[\Omega] &= Z_1[\Omega] / Z_{V1}[\Omega], & Z_{V2}[\Omega] &= Z_1[\Omega] \cdot (S_{V1} / U_{V1}^2) \cdot (U_{V2}^2 / S_{V2}), \\
 Z_2[\Omega] &= Z_1[\Omega] \cdot U_{V2}^2 / U_{V1}^2, & & \text{jestliže zavedeme } p_{12} = U_{V2} / U_{V1},
 \end{aligned}$$

potom:

$$Z_2[\Omega] = Z_1[\Omega] \cdot p_{12}^2$$

a podobně:

$$Y_2[\Omega] = Y_1[\Omega] / p_{12}^2$$

$$U_2[\Omega] = U_1[\Omega] \cdot p_{12} \quad I_2[\Omega] = I_1[\Omega] / p_{12}, \quad \text{atd.}$$

Výpočet souměrných zkratových poměrů

- Vytvoření náhradního schématu
- Veškeré rezistivní parametry $R \rightarrow 0$
- Přepočítání impedancí na jednu napěťovou hladinu, nebo do poměrných veličin a určení výsledné součtové podélné reaktance x_C
- Výpočet zkratového výkonu a proudu:

$$S_{KS0.01} = 1.1 \frac{S_V}{x_C} \quad I_{KS0.01} = 1.1 \frac{I_V}{x_C}$$

$S_{KS0.01}$ a $I_{KS0.01}$ jsou fiktivní zkratové proudy efektivní, které by nastaly, pokud by neexistoval exponenciální útlum zkratového proudu během první půlperiody (v čase 0.01 s).

Druhy parametrů zkratových proudů

- **Dynamický (nárazový) $I_{KM} = k \sqrt{2} I_{KS0.01}$**
koeficient k je závislý na síti (1.2 až 2)
Tento proud je důležitý pro výpočty dynamických (silových) účinků proudů. Vyjadřuje tedy maximální možnou okamžitou hodnotu proudu. Koeficient $\sqrt{2}$ respektuje přepočítání efektivní hodnoty na maximální. Koeficient k respektuje navýšení maximální hodnoty vzhledem k existenci ss složky, teoreticky má celý průběh zpočátku kladnou hodnotu, ale nikdy nedosahuje hodnoty 2, protože vždy dojde k jistému útlumu proudu během první půlperiody. Útlum je dán poměrem L/R , a je dán tedy charakterem sítě. V praxi se volí koeficient pro vvn zpravidla $k=1.8$.
- **Ekvivalentní oteplovací $I_{KE} = k_E I_{KS0.01}$**
koeficient k_E je závislý na době zkratu
Tento proud je důležitý pro výpočty tepelných účinků proudů. Hodnota odpovídá velikosti ss proudu, který by působil stejnou dobu a měl stejné tepelné účinky (průměrná integrální hodnota kvadrátu proudu stejná). Doba trvání zkratu se odvodí z nastavení vypínacích ochrany. Rovněž odpovídající koeficienty k_E bývají na štítku ochrany uvedeny (pro danou vypínací dobu a pro danou síť).
Tedy podle normy:

$$I_{KE} = \sqrt[3]{Q/t_K}, \quad Q = \int_0^{t_K} i^2(t) dt, \quad \text{kde } t_K \text{ je doba trvání zkratu.}$$

Přepočít trojúhelník ↔ hvězda

Vycházíme z rovnic:

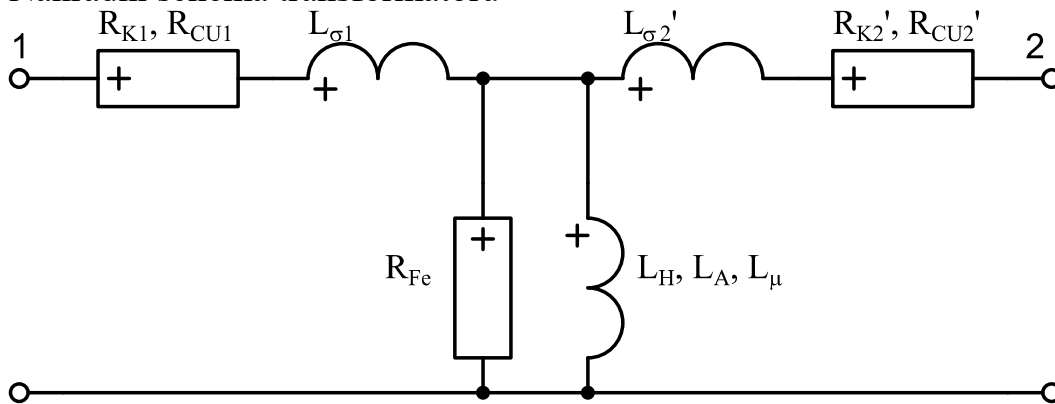
$$\frac{1}{Z_{IJ}} + \frac{1}{Z_{IK} + Z_{JK}} = \frac{1}{Z_I + Z_J} \text{ a vyřešením dostaneme:}$$

$$Z_I = \frac{Z_{IJ}Z_{IK}}{Z_{IJ} + Z_{IK} + Z_{JK}}$$

$$Z_{IJ} = \frac{Z_I Z_J + Z_I Z_K + Z_J Z_K}{Z_K}$$

Parametry transformátorů

- Náhradní schéma transformátoru



- Měřené / štítkové parametry jsou:

$$U_N, S_N, u_K, i_0, \Delta p_{Cu} = \Delta p_K, \Delta p_{Fe} = \Delta p_0$$

Obvyklé hodnoty:

$u_K[\%]$	~ 10
$i_0[\%]$	< 1
$\Delta p_{Cu}[\%]$	$\leq u_K[\%]/10, \leq 1$
$\Delta p_{Fe}[\%]$	$< i_0[\%], \leq \Delta p_{Cu}[\%]/3, \leq 0.3$

- Jmenovité parametry

$$S_N = 3 \cdot U_{Nf} \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \Rightarrow I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N}$$

$$Z_N = \frac{U_{Nf}}{I_N} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{S_N} = \frac{U_N^2}{S_N}$$

- Podélná část:

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot R_K I_N^2 \Rightarrow R_K = \frac{\Delta P_{Cu}}{3 \cdot I_N^2} = \frac{\Delta P_{Cu}}{3} \left(\frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{S_N} \right)^2$$

$$R_K = (\Delta P_{Cu}/S_N) Z_N = (\Delta P_{Cu}/S_N) (U_N^2/S_N) = (\Delta p_{Cu}[\%]/100) (U_N^2/S_N)$$

Z toho vyplývá, že $r_K = R_K/Z_N = \Delta P_{Cu}/S_N = \Delta p_{Cu}$

$$Z_K = \frac{U_{Kf}}{I_N} = \frac{U_K}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{S_N} = \frac{U_K}{U_N} \frac{U_N^2}{S_N} = u_K \cdot Z_N$$

Z toho vyplývá, že $u_K = z_K$ a tedy:

$$Z_K = z_K \cdot Z_N = (u_K[\%]/100)(U_N^2/S_N)$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$$

- Příčná část:

$$\Delta P_{Fe} = 3 \cdot R_{Fe} \left(\frac{U_{Nf}}{R_{Fe}} \right)^2 \Rightarrow R_{Fe} = \frac{3 \cdot U_{Nf}^2}{\Delta P_{Fe}} \Rightarrow$$

$$G_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{3 \left(\frac{U_N}{\sqrt{3}} \right)^2} = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_N^2}$$

$$G_{FE} = \Delta P_{Fe} / U_n^2 = (\Delta P_{fe} / S_N)(S_N / U_n^2) = (\Delta P_{Fe} / S_N)(1 / Z_N) = (\Delta p_{Fe}[\%] / 100)(S_N / U_n^2)$$

Z toho vyplývá, že $g_{Fe} = G_{FE} / Y_N = \Delta P_{Fe} / S_N = \Delta p_{Cu}$

$$Y_G = \frac{I_0}{U_{Nf}} = \frac{I_0}{I_N} \frac{I_N \cdot \sqrt{3}}{U_N} = \frac{I_0}{I_N} \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} \frac{\sqrt{3}}{U_N} =$$

$$= \frac{I_0}{I_N} \frac{S_N}{U_N^2} = i_0 \cdot Y_N = i_0 \cdot Y_N$$

Z toho vyplývá, že $i_0 = y_G$ a tedy:

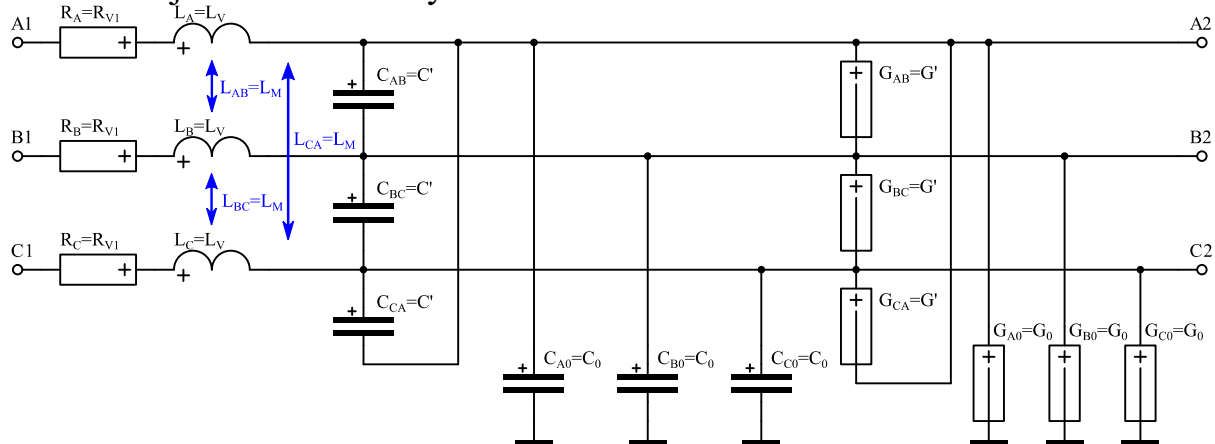
$$Y_G = y_G \cdot Y_N = (i_0[\%] / 100)(S_N / U_n^2)$$

$$X_M = 1 / \sqrt{Y_G^2 - G_{Fe}^2}$$

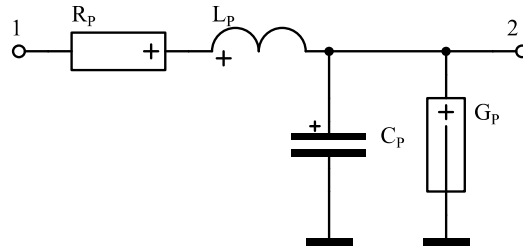
Parametry vedení

Veškeré parametry se přepočítávají jako běžné impedance (resp. admittance), které jsou zadané přímo v $[\Omega]$ (resp. admittance v $[S]$). Tedy je zapotřebí jen přepočet na jinou napěťovou hladinu, nebo na vztažnou impedanci, resp. admitanci.

Obecné trojfázové schéma symetrického vedení bez zemního lana:



Zjednodušené jednofázové schéma vedení:



Závislost parametrů:

$$R_P - l[\text{km}], R[\Omega / \text{km}] \Leftrightarrow S[\text{mm}^2] + \rho[\mu\Omega\text{m}], \vartheta[^\circ\text{C}],$$

$$\alpha[\Omega / ^\circ\text{C}] \Leftrightarrow \vartheta_F[^\circ\text{C} / \Omega]$$

$$R_{SS} = \rho \frac{l}{S} \quad [\Omega]$$

$$[\Omega] = \frac{[\Omega \cdot m][m]}{[m^2]} = \frac{\left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{m} \right][m]}{[\text{mm}^2]} = \frac{[\mu\Omega \cdot m][m]}{[\text{mm}^2]}$$

$$R_P = R_{SS} \cdot k_g \cdot k_S \cdot k_e \cdot k_p \quad k_g = 1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_{20}) + \beta(\vartheta - \vartheta_{20})^2$$

$$L_P - l[\text{km}], d_{ij}[m], r_e[\text{mm}] \quad L_P = L_V - L_M = 0,46 \log \frac{d}{r} + 0,05 \quad [\text{mH} / \text{km}]$$

$$X_P = \omega \cdot L_P \quad [\Omega]$$

$$C_P - l[\text{km}], d_{ij}[m], h_i[m], R[\text{mm}], r_e[\text{mm}]$$

$$C_P = C_0 + 3C' = \frac{1}{(D - D')} \quad D = 41,4 \cdot 10^6 \log \frac{2 \cdot h_{stř}}{r_{stř}}$$

$$B_P = \omega \cdot C_P \quad [S] \quad D' = 41,4 \cdot 10^6 \log \frac{\sqrt{(2h_{stř})^2 + d_{stř}^2}}{d_{stř}}$$

$$G - l[\text{km}], U_m[\text{kV}], d_{ij}[m], r_e[\text{mm}], h_m[m], m[],$$

Souhrnné přibližné provozní parametry venkovních vedení a kabelů:

Venkovní vedení

Un [kV]/S[mm ²]	Rp [Ohm/km]	Lp [mH/km]	Xp [Ohm/km]	Cp [nF/km]	Bp [uS/km]	Gp [nS/km]
22 / 50 - 150	0.7 - 0.2	1.1 - 1.3	0.35 - 0.4	9 - 10	2.8 - 3.1	0
110 / 120 - 670	0.2 - 0.06	0.9 - 1.3	0.27 - 0.4	9	2.8	0 nebo 50
220 / 210, 300	0.08, 0.06	1	0.32	11	3.5	30
400 / 350, 450	0.03, 0.02	1.0, 1.1	0.31, 0.35	11, 12	3.6, 3.9	20

Kabelová vedení

Un [kV]/S[mm ²]	Rp [Ohm/km]	Lp [mH/km]	Xp [Ohm/km]	Cp [nF/km]	Bp [uS/km]	Gp [nS/km]
6 / 50 - 240	0.62 - 0.13	0.25 - 0.22	0.08 - 0.07	290 - 370	90 - 115	0
22 / 35 - 240	0.9 - 0.1	0.7 - 0.4	0.22 - 0.12	200 - 400	65 - 125	0

Parametry alternátorů

Zjednodušené schéma alternátoru v souřadnicích a-b-c:

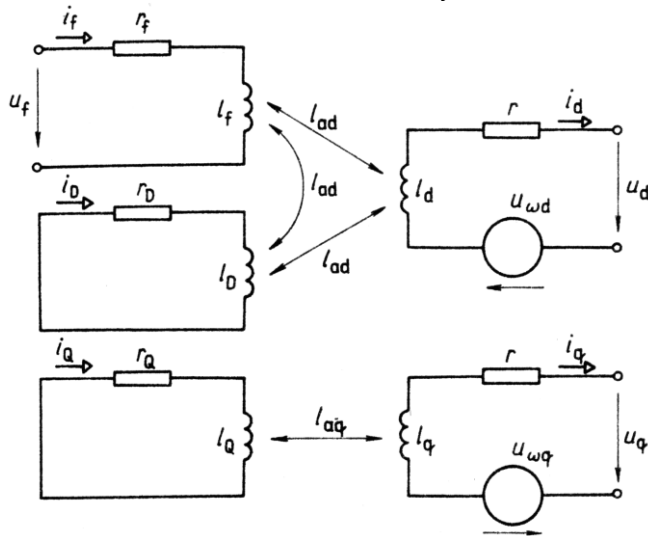
$$U_k = -R_k I_k - \frac{d\Psi_k}{dt}$$

kde k je a, b, c, F, D, Q

Ψ_a	L_{aa}	L_{ab}	L_{ac}	L_{aF}	L_{aD}	L_{aQ}	I_a
Ψ_b	L_{ba}	L_{bb}	L_{bc}	L_{bF}	L_{bD}	L_{bQ}	I_b
Ψ_c	L_{ca}	L_{cb}	L_{cc}	L_{cF}	L_{cD}	L_{cQ}	I_c
Ψ_F	L_{Fa}	L_{Fb}	L_{Fc}	L_{FF}	L_{FD}	0	I_F
Ψ_D	L_{Da}	L_{Db}	L_{Dc}	L_{DF}	L_{DD}	0	I_D
Ψ_Q	L_{Qa}	L_{Qb}	L_{Qc}	0	0	L_{QQ}	I_Q

Všechny veličiny U_k, I_k, Ψ_k, L_{ik} jsou v ustáleném stavu závislé na čase s harmonickou složkou.

Schéma alternátoru v Parkových souřadnicích d-q-0:



$$u_d = -r i_d - \frac{d}{dt} (l_d i_d + l_{ad} i_f + l_{ad} i_D) - \omega (l_q i_q + l_{aq} i_Q)$$

$$u_q = -r i_q - \frac{d}{dt} (l_q i_q + l_{aq} i_Q) + \omega (l_d i_d + l_{ad} i_f + l_{ad} i_D)$$

$$u_0 = -r i_0 - l_0 \frac{di_0}{dt}$$

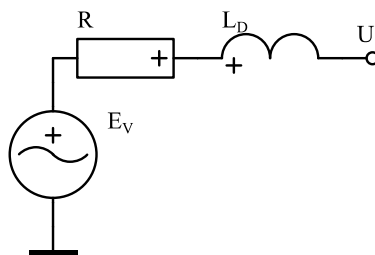
Pro ustálený stav:

$$U_d = -R I_d + \omega \Psi_q = -R I_d + x_q I_q$$

$$U_q = -R I_q - \omega \Psi_d = -R I_q - x_d I_d + e_v$$

Všechny veličiny $U_d, U_q, I_d, I_q, \Psi_d, \Psi_q, L_d, L_q, L_{ad}, L_{aq}$ a odvozené mají charakter stejnosměrných veličin, nebo fázorů v rovině $d-q$ a jsou v ustáleném stavu konstantní.

Jednofázové schéma:



Reaktance alternátorů

Pro ustálené stavy nutno používat:

x_d - podélná reaktance

x_q - příčná reaktance

Rozdíl mezi x_d a x_q je dán rozdílnou mg. vodivostí v ose d a q pro stroje s vyniklými póly je tedy $x_q = 60\% x_d$ u hladkého rotoru $x_q > 80\% x_d$

x_d' - podélná přechodná reaktance

x_q' - příčná přechodná reaktance

Dáno především časovou konstantou buzení, proto je $x_q' \sim x_q$ (v příčné ose není vliv buzení významný, zvláště u strojů s vyniklými póly).

x_d'' - podélná rázová reaktance

x_q'' - příčná rázová reaktance

Dáno především časovou konstantou tlumiče (zde tedy rozdíl mezi x_d'' a x_q'' závisí na konstrukci tlumiče).

Časové konstanty alternátorů

T_{d0}' - přechodná časová konstanta v podélné ose při chodu naprázdno

T_d' - přechodná časová konstanta v podélné ose při chodu nakrátko

T_d'' - rázová časová konstanta

T_q'' - rázová časová konstanta

T_D - časová konstanta tlumiče

T_m - mechanická časová konstanta (podle velikosti alternátoru)(např. 7 až 10 sec.).

T_f - časová konstanta buzení (např. 0,35 sec.)

	Stroj s vyniklými póly	stroj s hladkým rotorem
x_d	0.9 ÷ 1.5 (1.2)	1.5 ÷ 2.5 (2)
x_q	0.5 ÷ 1.1 (0.8)	÷ x_d
x_d'	0.3 ÷ 0.5 (0.4)	0.2 ÷ 0.35 (0.25)
x_d''	0.25 ÷ 0.35 (0.3)	0.15 ÷ 0.25 (0.2)
x_q''	÷ x_d''	= x_d''
T_{d0}'	3 ÷ 8 (5)	8 ÷ 12 (10)
T_d''	0.02 ÷ 0.05 (0.04)	0.02 ÷ 0.05 (0.04)
T_q''	÷ T_d''	÷ T_d''
T_D	÷ 0.02	÷ 0.02

Ostatní prvky ES

Ostatní prvky (odběry, kompenzace, reaktory, ...) do výpočtů simulujeme jednoduchými konstantními náhradními impedancemi.