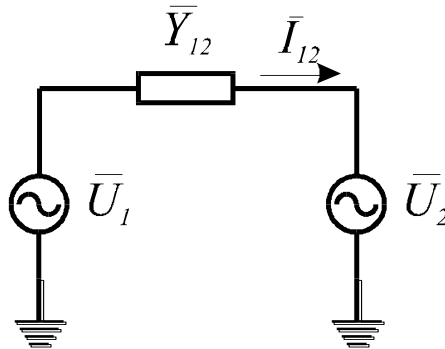


PJS – Přednáška číslo 9

Elektromechanické přechodné děje v ES

Přenos výkonu mezi alternátorem a tvrdou sítí a jeho stabilita

Řešení jednoduchého přenosu



$$\bar{I}_{12} = \bar{Y}_{12}(\bar{U}_1 - \bar{U}_2)$$

$$\bar{S}_{12} = \bar{U} \cdot \bar{I}_{12}^* = \bar{U}(\bar{U}_1^* - \bar{U}_2^*)\bar{Y}_{12}^*$$

$$\bar{U}_1 = U_1 e^{j\vartheta_1}$$

$$\bar{U}_2 = U_2 e^{j\vartheta_2}$$

$$\bar{Y}_{12} = \frac{1}{\bar{Z}_{12}} = \frac{1}{Z_{12} e^{j\alpha_{12}}}$$

Protože ve vazebním členu převažuje indukční reaktance nad činným odporem v poměru X:R v podélném směru:

Vedení vvn	2 : 1	až	10 : 1
Transformátory	10 : 1	až	100 : 1
Alternátory	20 : 1	až	200 : 1

Ize přibližně podélnou vazební impedanci považovat za čistě indukční: $\bar{Z}_{12} \approx X_{12} e^{j90^\circ} = jX_{12}$

$$\bar{Y}_{12} = \frac{1}{Z_{12} e^{j\alpha_{12}}} \approx \frac{1}{jX_{12}} = \frac{-j}{X_{12}} \quad \text{a} \quad \bar{S}_{12} = (\bar{U}U_1 e^{-j\vartheta_1} - \bar{U}U_2 e^{-j\vartheta_2}) \left(\frac{-j}{X_{12}} \right)^*$$

Výkon dodávaný do sítě:

$$\bar{S}_2 = \bar{U}_2 \bar{I}_{12}^* = \bar{U}_2 (\bar{U}_1 - \bar{U}_2)^* \bar{Y}_{12}^* = \frac{\bar{U}_2 \bar{U}_1^*}{\bar{Z}_{12}^*} - \frac{\bar{U}_2 \bar{U}_2^*}{\bar{Z}_{12}^*}$$

$$\bar{S}_2 = (U_2 U_1 e^{j(\vartheta_2 - \vartheta_1)} - U_2 U_2 e^{j(\vartheta_2 - \vartheta_2)}) \left(\frac{j}{X_{12}} \right) \quad \Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2$$

$$\bar{S}_2 = (U_1 U_2 e^{j(-(\vartheta_1 - \vartheta_2))} - U_2^2) \left(\frac{j}{X_{12}} \right) \quad \bar{S}_2 = \frac{U_1 U_2}{X_{12}} j(\cos(-\Delta\vartheta) + j \sin(-\Delta\vartheta)) - \frac{j U_2^2}{X_{12}}$$

$$P_2 = \text{Re}(\bar{S}_2) = \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \sin \Delta\vartheta \quad Q_2 = \text{Im}(\bar{S}_2) = \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \cos \Delta\vartheta - \frac{U_2^2}{X_{12}}$$

Výkon vnitřní alternátoru:

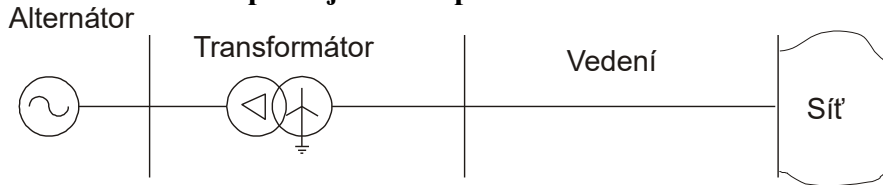
$$\bar{S}_1 = \bar{U}_1 \bar{I}_{12}^* = \bar{U}_1 (\bar{U}_1 - \bar{U}_2)^* \bar{Y}_{12}^* = \frac{\bar{U}_1 \bar{U}_1^*}{\bar{Z}_{12}^*} - \frac{\bar{U}_1 \bar{U}_2^*}{\bar{Z}_{12}^*}$$

$$\bar{S}_1 = (U_1 U_1 e^{j(\vartheta_1 - \vartheta_1)} - U_1 U_2 e^{j(\vartheta_1 - \vartheta_2)}) \left(\frac{j}{X_{12}} \right)$$

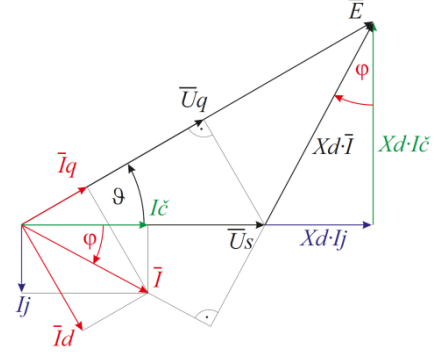
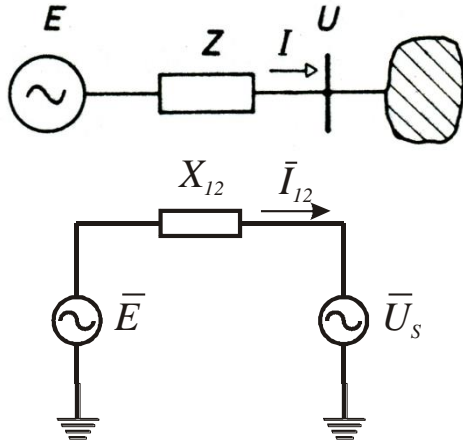
$$\bar{S}_1 = (U_1^2 - U_1 U_2 e^{j(\vartheta_1 - \vartheta_2)}) \left(\frac{j}{X_{12}} \right) \quad \bar{S}_1 = \frac{j U_1^2}{X_{12}} - \frac{U_1 U_2}{X_{12}} j(\cos(\Delta\vartheta) + j \sin(\Delta\vartheta))$$

$$P_1 = \text{Re}(\bar{S}_1) = \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \sin \Delta\vartheta \quad Q_1 = \text{Im}(\bar{S}_1) = \frac{U_1^2}{X_{12}} - \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \cos \Delta\vartheta$$

Statická stabilita alternátoru pracujícího do pevné sítě



Stabilita v elektrizační soustavě souvisí se schopností udržet konstantní jak velikost (tzv. „stabilita napěťová“), tak fázi (tzv. „stabilita úhlová“) sledovaných uzlových napětí, přičemž obvykle první podmínka souvisí s vyrovnaností bilance jalových a druhá činných výkonů.

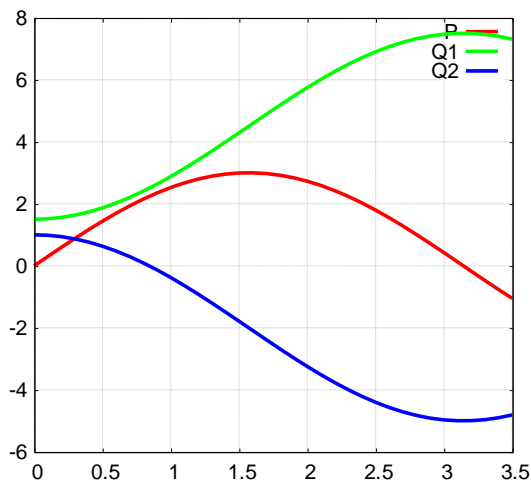


$$P = U_s I_s \cos \varphi = U_s I_c = \frac{E \cdot U_s}{X_{12}} \sin \Delta \vartheta$$

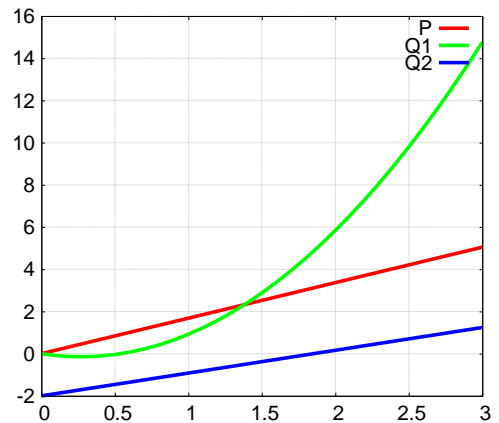
$$Q_2 = \frac{E \cdot U_s}{X_{12}} \cos \Delta \vartheta - \frac{U_s^2}{X_{12}}$$

$$Q_1 = \frac{E^2}{X_{12}} - \frac{E \cdot U_s}{X_{12}} \cos \Delta \vartheta$$

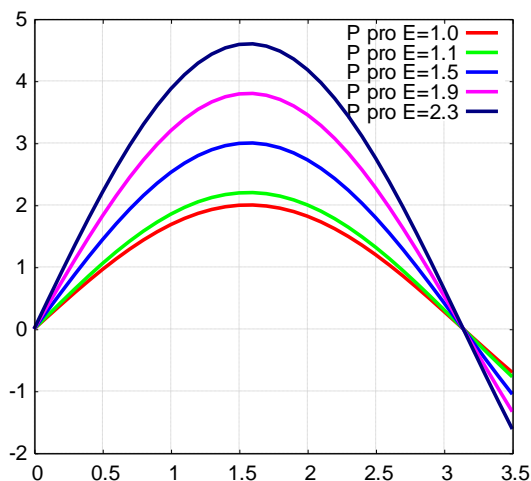
Závislost výkonů na velikosti ϑ ($E=1.5$)



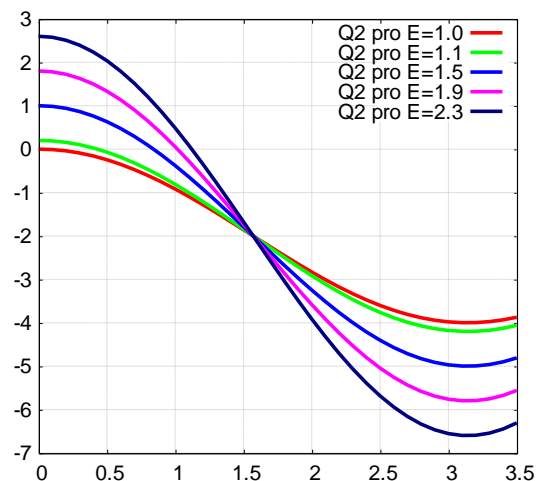
Závislost výkonů na velikosti E ($\vartheta=1$ rad)



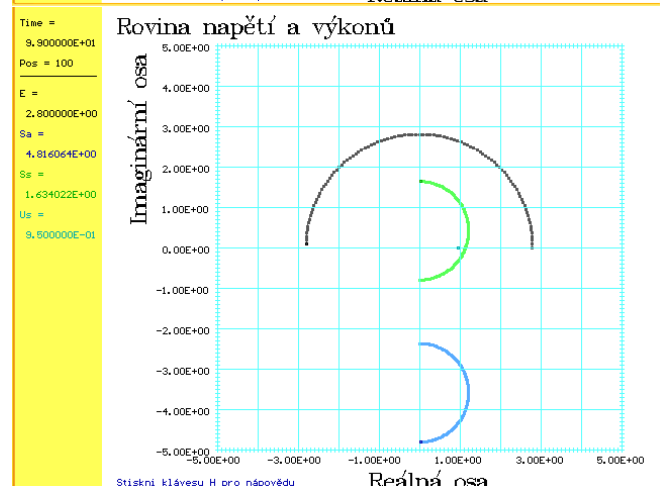
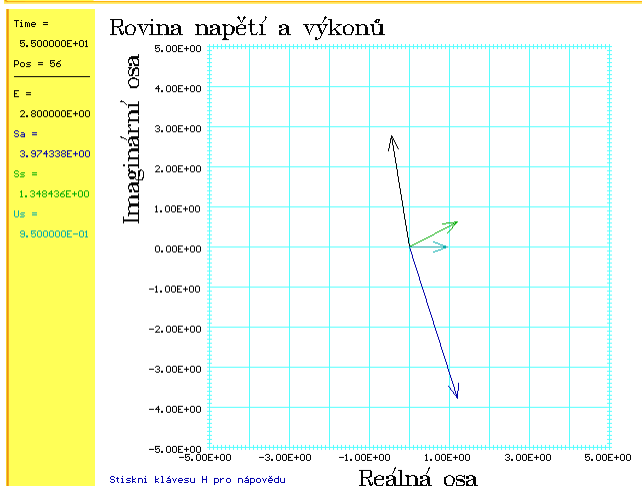
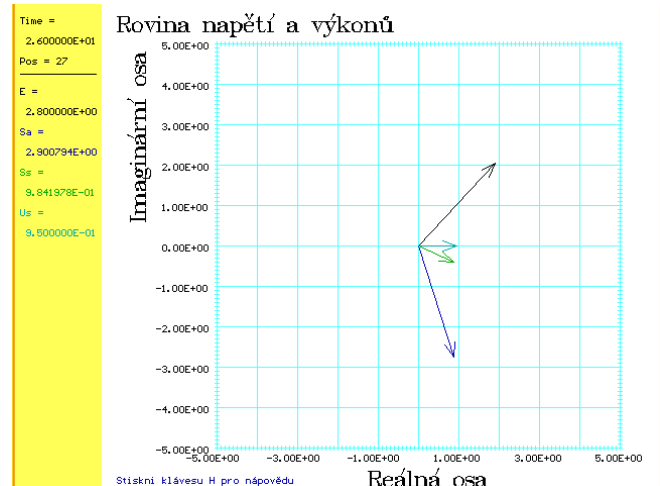
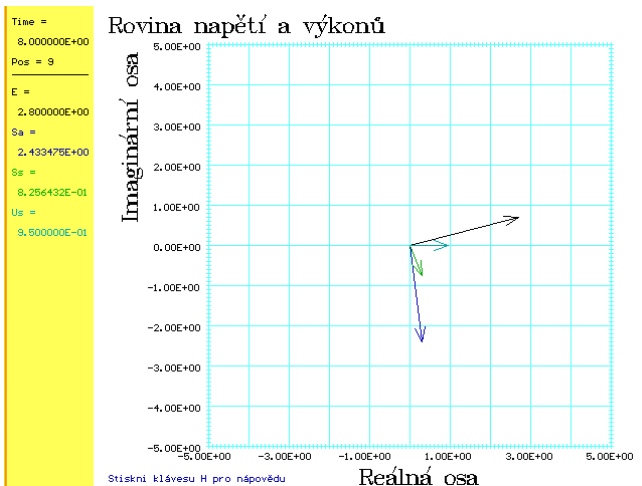
Závislost činného výkonu P na velikosti ϑ a E



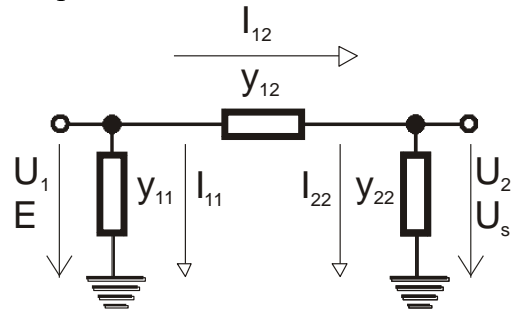
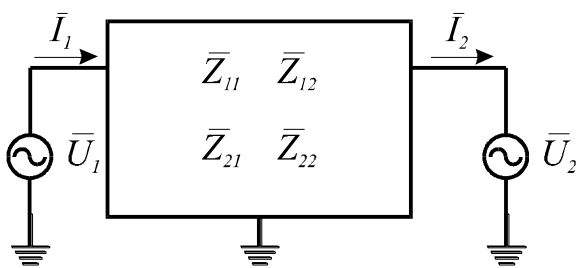
Závislost jalového výkonu Q_2 na velikosti ϑ a E



Závislost komplexního vnitřního výkonu a výkonu dodávaného do sítě na zátěžném úhlu při konstantním buzení $E=2.8$.



Řešení jednoduchého přenosu pro případ respektování příčné části náhradního schématu:



$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ -\bar{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{E} \\ \bar{U}_S \end{bmatrix}$$

$$\bar{A}_{11} = \bar{y}_{11} + \bar{y}_{12} = \frac{1}{Z_{11}}$$

$$\bar{A}_{22} = \bar{y}_{22} + \bar{y}_{12} = \frac{1}{Z_{22}}$$

$$\bar{A}_{12} = \bar{A}_{21} = -\bar{y}_{12} = -\frac{1}{Z_{12}}$$

Výkon vnitřní:

$$\bar{S}_1 = 3E \cdot \bar{I}_1^* = 3E(\bar{A}_{11}E + \bar{A}_{12}U_S)^* = 3\left(\frac{E^2}{Z_{11}^*} - \frac{E \cdot U_S^*}{Z_{12}^*}\right)$$

$$\bar{S}_1 = 3\left(\frac{E^2}{Z_{11}} e^{j0} - \frac{E \cdot U_S}{Z_{12}} e^{j\Delta\theta}\right) \quad \alpha_{11} = \frac{\pi}{2} - \beta_{11} \quad \alpha_{12} = \frac{\pi}{2} - \beta_{12}$$

$$\bar{S}_1 = 3\left(\frac{E^2}{Z_{11}} e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \beta_{11}\right)} - \frac{E \cdot U_S}{Z_{12}} e^{j\Delta\theta} e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \beta_{12}\right)}\right) = 3\left(\frac{E^2}{Z_{11}} e^{j\frac{\pi}{2}} e^{-j\beta_{11}} - \frac{E \cdot U_S}{Z_{12}} e^{j\Delta\theta} e^{j\frac{\pi}{2}} e^{-j\beta_{12}}\right)$$

$$\bar{S}_1 = 3 \left(j \frac{E^2}{Z_{11}} e^{-j\beta_{11}} - j \frac{E \cdot U_s}{Z_{12}} e^{j(\Delta\vartheta - \beta_{12})} \right)$$

$$P_1 = 3 \left(j \frac{E^2}{Z_{11}} j \sin(-\beta_{11}) - j \frac{E \cdot U_s}{Z_{12}} j \sin(\Delta\vartheta - \beta_{12}) \right)$$

$$P_1 = 3 \left(\frac{E^2}{Z_{11}} \sin(\beta_{11}) + \frac{E \cdot U_s}{Z_{12}} \sin(\Delta\vartheta - \beta_{12}) \right)$$

$$Q_1 = 3 \left(\frac{E^2}{Z_{11}} \cos(\beta_{11}) - \frac{E \cdot U_s}{Z_{12}} \cos(\Delta\vartheta - \beta_{12}) \right)$$

Výkon dodávaný do sítě:

$$\bar{S}_2 = 3U_s \cdot \bar{I}_2^* = 3U_s (-\bar{A}_{21}E - \bar{A}_{22}U_s)^* = 3 \left(\frac{U_s \cdot E^*}{Z_{12}^*} - \frac{U_s^2}{Z_{22}^*} \right)$$

$$\bar{S}_2 = 3 \left(\frac{U_s \cdot E}{Z_{12} e^{-j\alpha_{12}}} e^{-j\Delta\vartheta} - \frac{U_s^2}{Z_{22} e^{-j\alpha_{22}}} e^{j0} \right) \quad \alpha_{22} = \frac{\pi}{2} - \beta_{22}$$

$$\bar{S}_2 = 3 \left(\frac{U_s \cdot E}{Z_{12}} e^{-j\Delta\vartheta} e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \beta_{12}\right)} - \frac{U_s^2}{Z_{22}} e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \beta_{22}\right)} \right) = 3 \left(\frac{U_s \cdot E}{Z_{12}} e^{-j\Delta\vartheta} e^{j\frac{\pi}{2}} e^{-j\beta_{12}} - \frac{U_s^2}{Z_{22}} e^{j\frac{\pi}{2}} e^{-j\beta_{22}} \right)$$

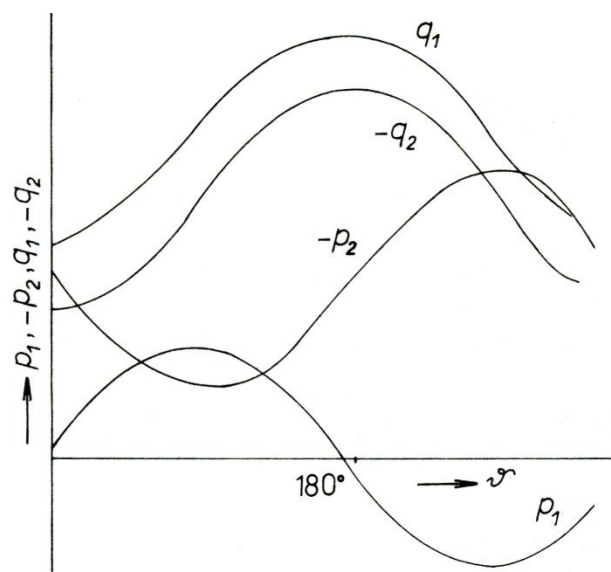
$$\bar{S}_2 = 3 \left(j \frac{U_s \cdot E}{Z_{12}} e^{-j(\Delta\vartheta + \beta_{12})} - j \frac{U_s^2}{Z_{22}} e^{-j\beta_{22}} \right)$$

$$P_2 = 3 \left(j \frac{E \cdot U_s}{Z_{12}} j \sin(-(\Delta\vartheta + \beta_{12})) - j \frac{U_s^2}{Z_{22}} j \sin(-\beta_{22}) \right)$$

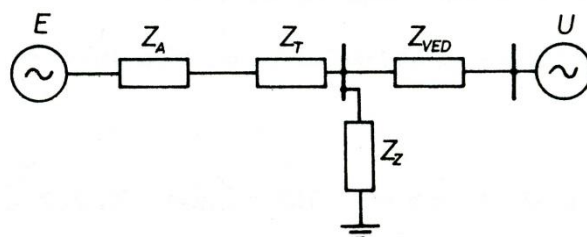
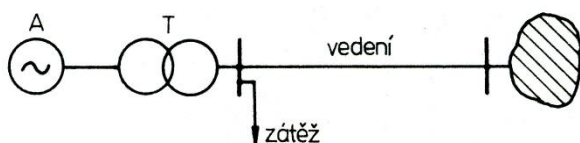
$$P_2 = 3 \left(\frac{E \cdot U_s}{Z_{12}} \sin(\Delta\vartheta + \beta_{12}) - \frac{U_s^2}{Z_{22}} \sin(\beta_{22}) \right)$$

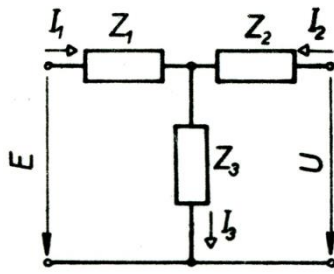
$$Q_2 = 3 \left(\frac{E \cdot U_s}{Z_{12}} \cos(\Delta\vartheta + \beta_{12}) - \frac{U_s^2}{Z_{22}} \cos(\beta_{22}) \right)$$

Pro případ výrazné spotřeby uvnitř dvojbranu mohou výkony P_2 a Q_2 změnit směr a síť se rovněž podílí na napájení, tedy se zvyšujícím se zátěžným úhlem alternátor pouze přebírá příslušný podíl celého zatížení.



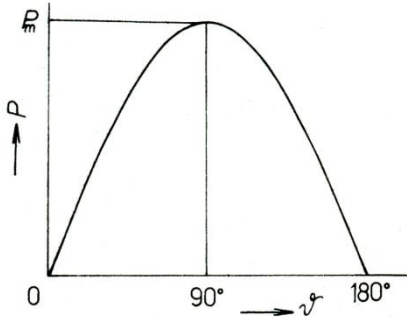
Statická stabilita pro případ alternátoru pracujícího do pevné sítě:





$$\bar{A}_{11} = \left[Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3}} \right]^{-1} \quad \bar{A}_{22} = \left[Z_2 + \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_3}} \right]^{-1}$$

$$\bar{A}_{12} = \frac{\bar{I}_1}{\bar{U}_S} = \bar{A}_{21} = \frac{-\bar{I}_2}{\bar{E}} = \left[Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_3} \right]^{-1}$$

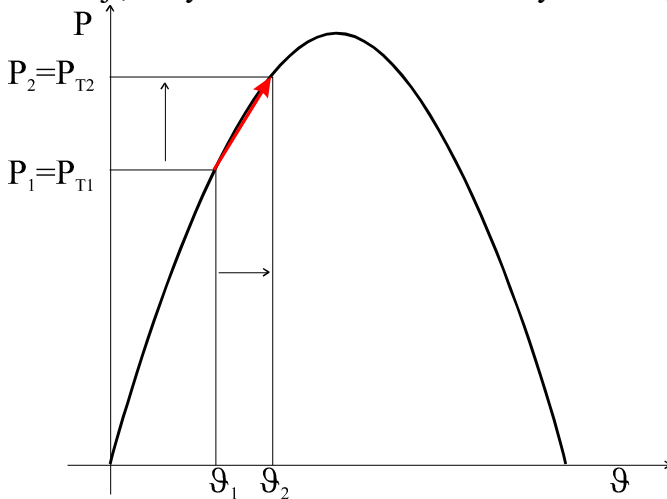


$$P = \frac{E \cdot U_S}{X_{12}} \sin \vartheta$$

$$P_T > P \Rightarrow \vartheta \text{ se zvětšuje}$$

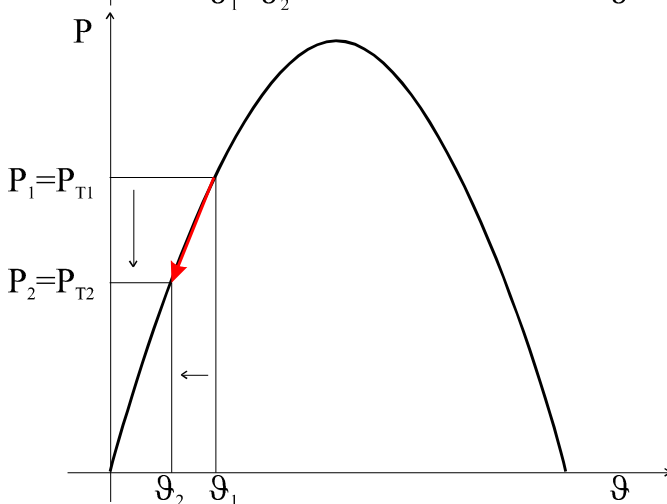
$$P_T < P \Rightarrow \vartheta \text{ se zmenšuje}$$

Statická stabilita alternátoru pracujícího do pevné sítě je schopnost systému nalézt při nekonečně malých a nekonečně pomalých změnách zátěžného úhlu, výkonu turbíny, parametrů přenosu elektrického činného výkonu, nebo jiných veličin, které tyto parametry ovlivňují, nový stav s konstantním zátěžným úhlem, čili synchronní stav.



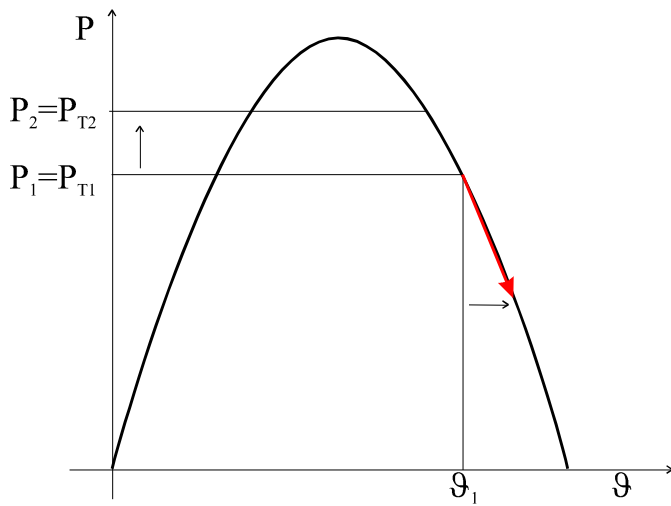
$$P_{T2} > P \Rightarrow \vartheta \text{ se zvětšuje}$$

$$\Rightarrow (P \rightarrow P_{T2}) \Rightarrow \text{stabilní stav}$$

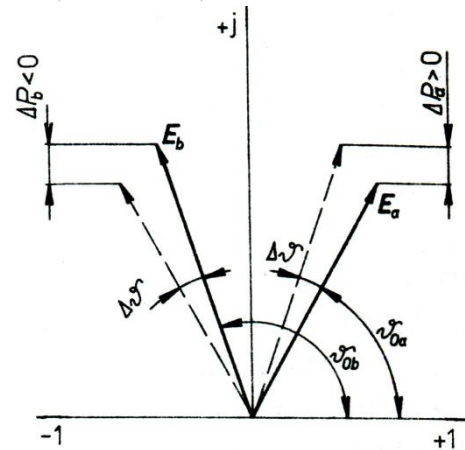


$$P_{T2} < P \Rightarrow \vartheta \text{ se zmenšuje}$$

$$\Rightarrow (P_{T2} \leftarrow P) \Rightarrow \text{stabilní stav}$$



$P_{T2} > P \Rightarrow \vartheta$ se zvětšuje
 $\Rightarrow (\leftarrow P \ P_{T2}) \Rightarrow$ nestabilní



Podmínka splnění statické stability: $\left(\frac{\partial P}{\partial \vartheta}\right)_{\vartheta=\vartheta_1} > 0, \rightarrow -90^\circ < \vartheta < 90^\circ$

Maximální přenositelný výkon určen vztahem: $0 = \left(\frac{dP}{d\vartheta}\right)_{\vartheta=\vartheta_{\max}} = 3 \frac{E \cdot U}{X_{12}} \cos \vartheta_{\max}$

$$P_{\max} = 3 \frac{E \cdot U}{X_{12}}$$

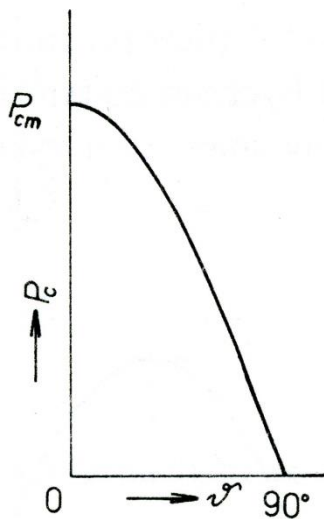
$$P_c(\vartheta_1) = \left(\frac{\partial P}{\partial \vartheta}\right)_{\vartheta=\vartheta_1}$$

je tzv. synchronizační výkon (velikost přírůstku výkonu pro jednotkovou změnu úhlu ϑ).

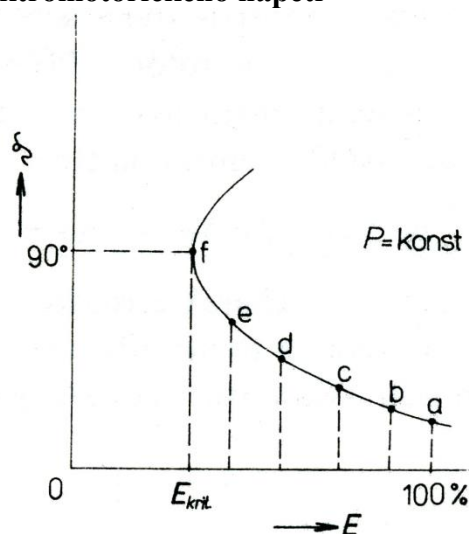
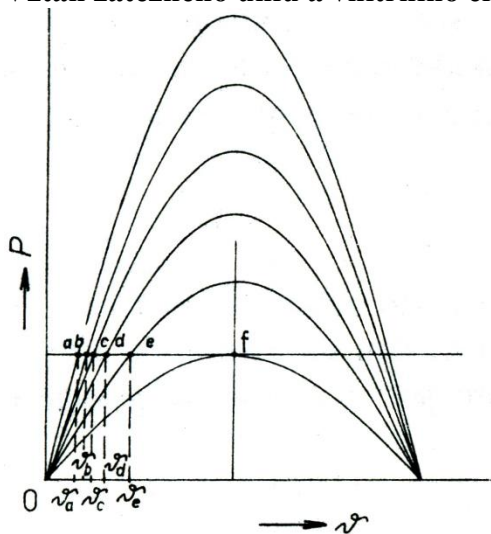
Existuje dále tzv. činitel rezervy

$$k_{p\%}(\vartheta_1) = \frac{P_{\max} - P_1}{P_1} 100 \geq 20\%$$

Nutný provozní činitel rezervy je možno uvažovat nižší pro ojedinělé havarijní stavy.

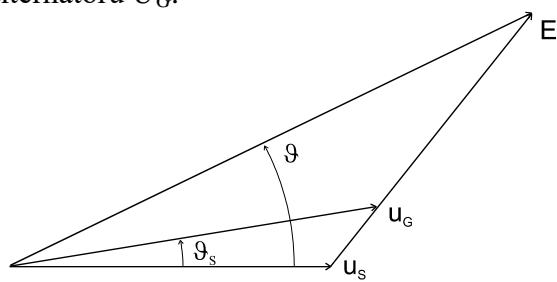
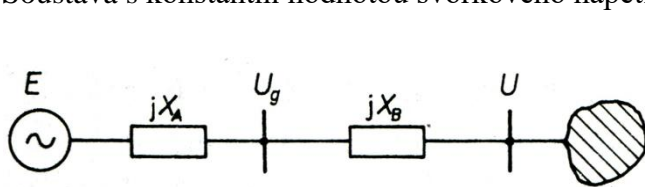


Vztah zátěžného úhlu a vnitřního elektromotorického napětí

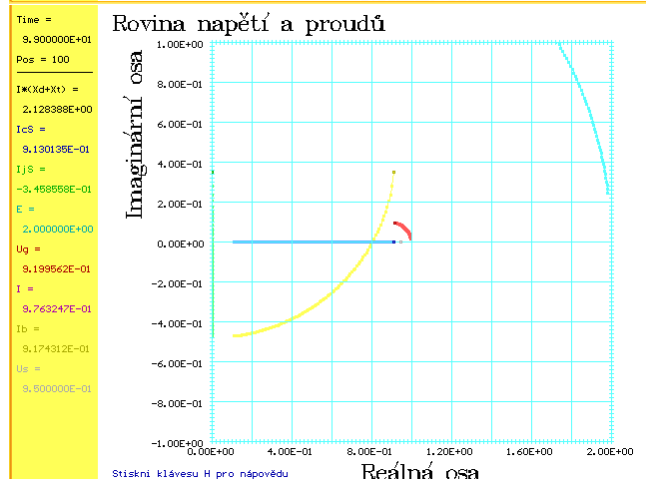
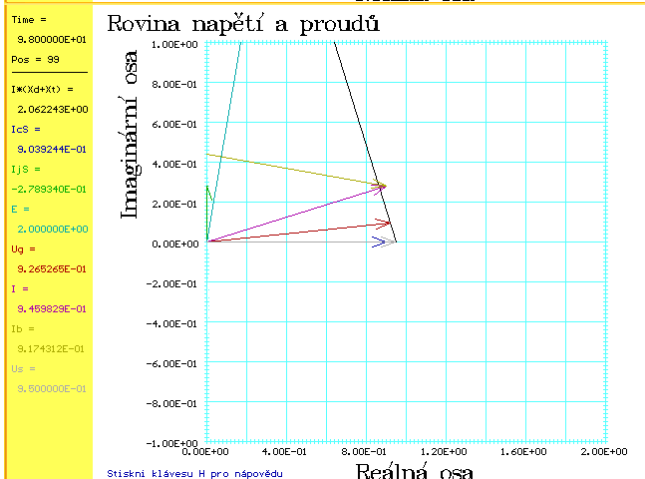
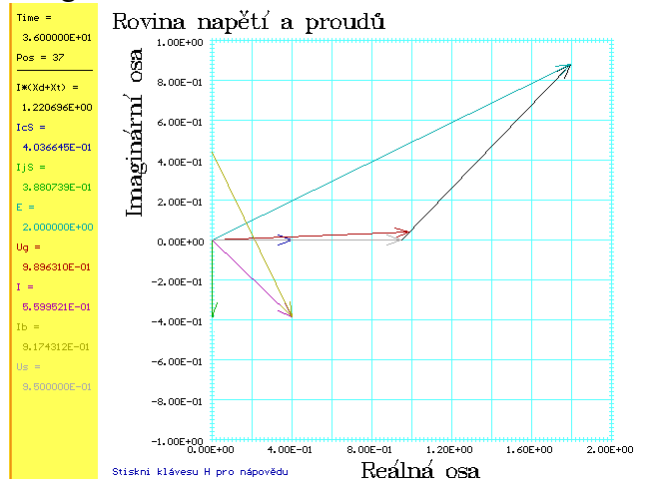
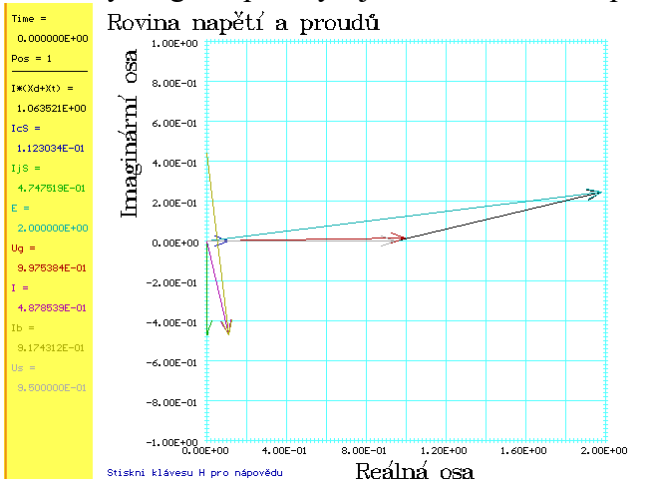


Závislost činného výkonu alternátoru při regulaci buzení

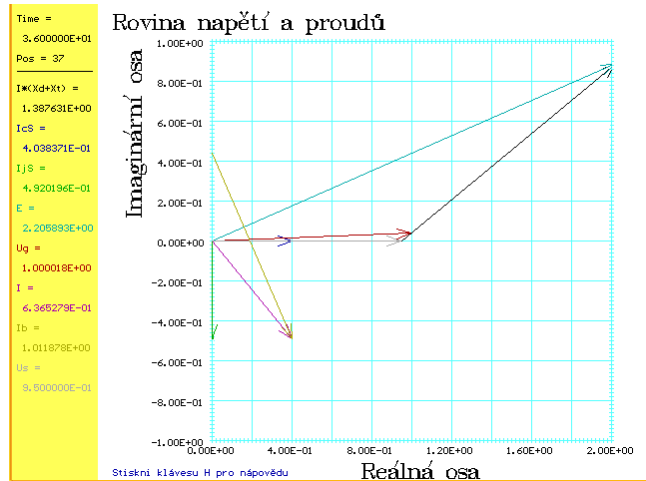
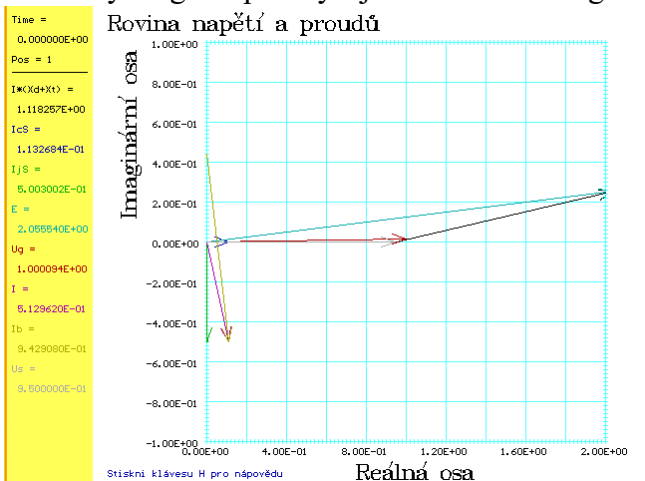
Soustava s konstantní hodnotou svorkového napětí alternátoru U_G .

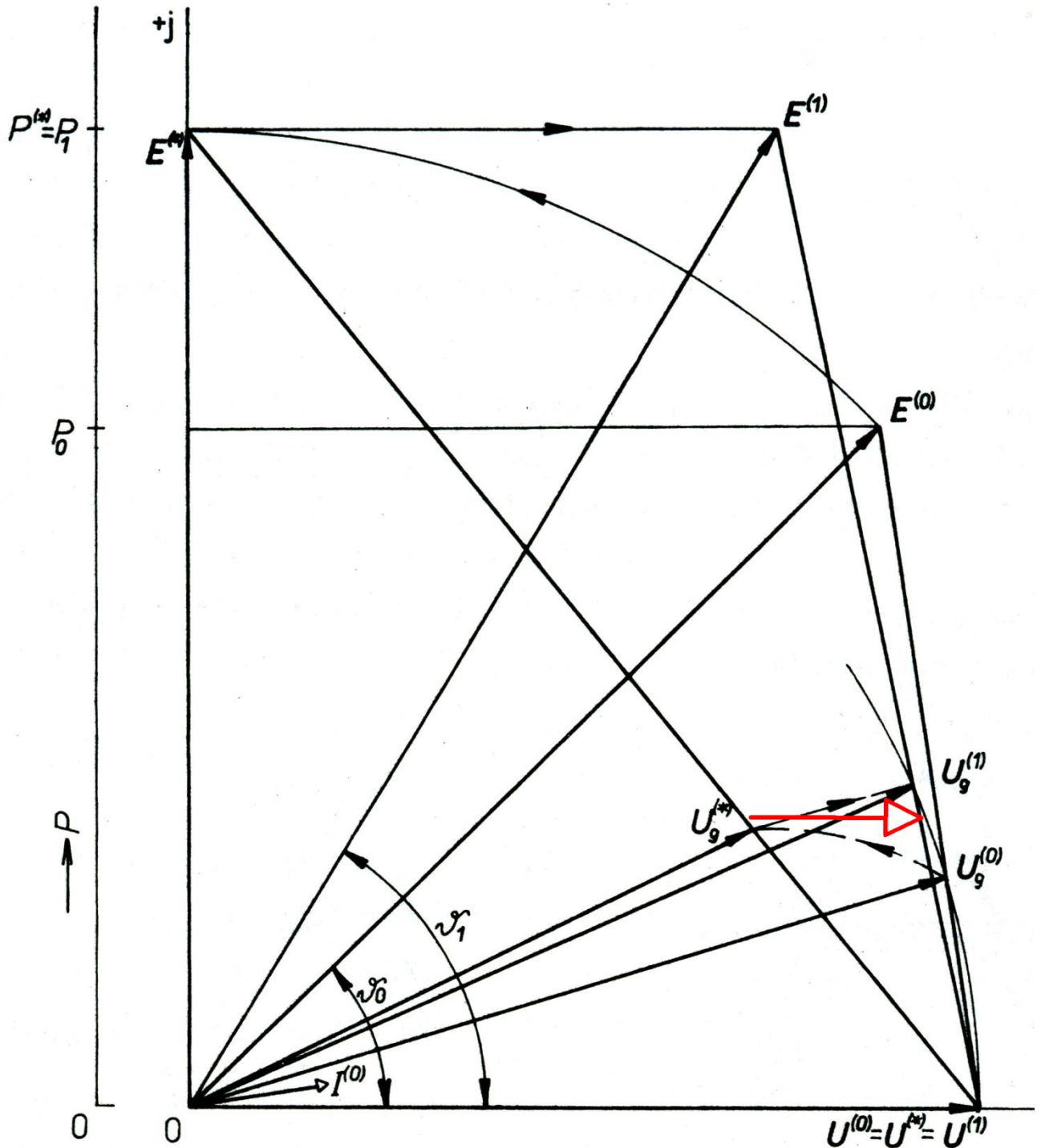
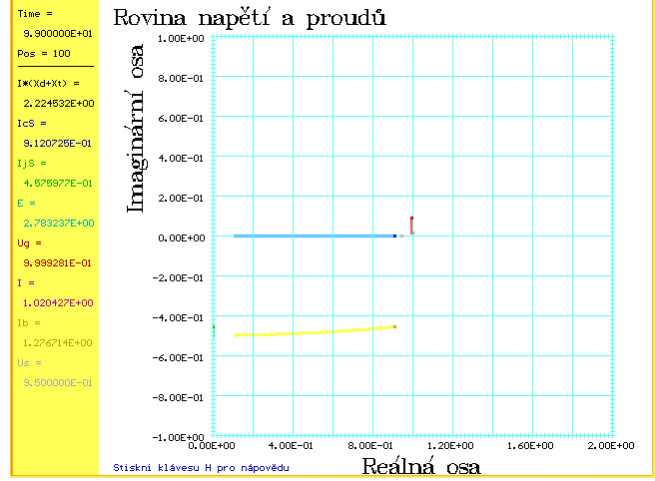
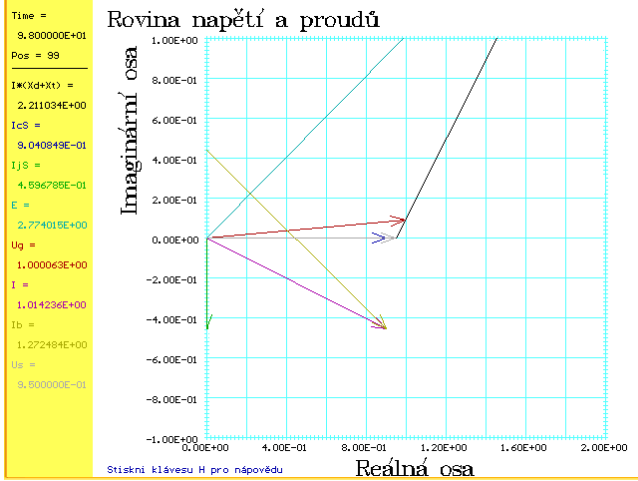


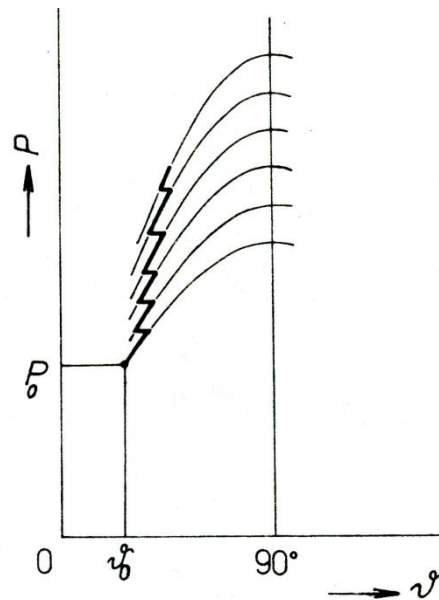
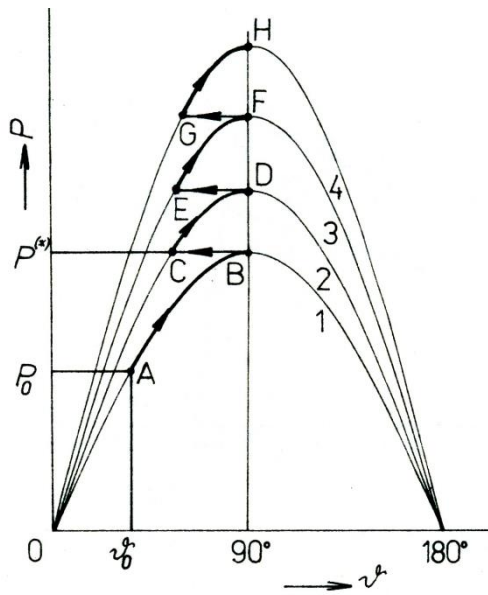
Fázorový diagram při zvyšujícím zatížení bez aplikace regulace buzení:



Fázorový diagram při zvyšujícím zatížení s regulací buzení:







Vnější charakteristika



Výsledná vnější charakteristika:

$$P_{SREG} = \frac{U_q \cdot U_s}{X_{ext}} \sin \vartheta - \frac{U_s^2}{2} \cdot \frac{X_q}{(X_q + X_{ext}) \cdot X_{ext}} \sin(2\vartheta)$$

Existuje oblast přirozené $0 < \vartheta < 90^\circ$ a umělé stability $\vartheta > 90^\circ$.

Matematický model vyšetření vnější charakteristiky (hledání potřebné hodnoty E_{Xn}):

$$X_{12} = X_d + X_{ext} \quad \vartheta = \arcsin\left(\frac{P \cdot X_{12}}{3E \cdot U_s}\right)$$

$$E_x = E \cos \vartheta \quad E_y = E \sin \vartheta$$

$$\frac{U_{GX} - U_s}{X_{ext}} = \frac{E_x - U_s}{X_d + X_{ext}} \rightarrow$$

$$U_{GX} = U_s + (E_x - U_s) \frac{X_{ext}}{X_d + X_{ext}}$$

$$\frac{U_{GY}}{X_{ext}} = \frac{E_y}{X_d + X_{ext}}$$

$$|U_G| = \sqrt{U_{GX}^2 + U_{GY}^2}$$

$$\frac{E_{Xn} - U_s}{X_d + X_{ext}} = \frac{U_{GXn} - U_s}{X_{ext}} \rightarrow E_{Xn} = U_s + (U_{GXn} - U_s) \frac{X_d + X_{ext}}{X_{ext}}$$

$$|E| = \sqrt{E_{Xn}^2 + E_y^2}$$

Alternativně: $\vartheta_s = \arcsin\left(\frac{P \cdot X_{ext}}{3U_G \cdot U_s}\right)$

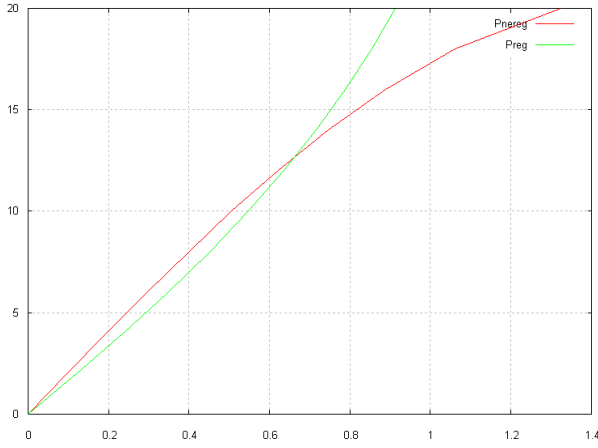
$$Q = 3 \left(\frac{U_G U_s}{X_{ext}} \cos \vartheta_s - \frac{U_s^2}{X_{ext}} \right)$$

$$\bar{I} = \left(\frac{P - jQ}{3U_s} \right)^*$$

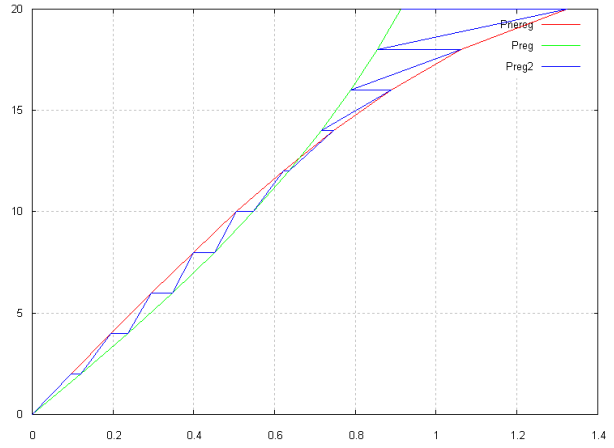
pro kontrolu: $\bar{U}_G = U_s + \bar{I} \cdot jX_{ext}$

$$\bar{E} = U_s + \bar{I} \cdot j(X_d + X_{ext})$$

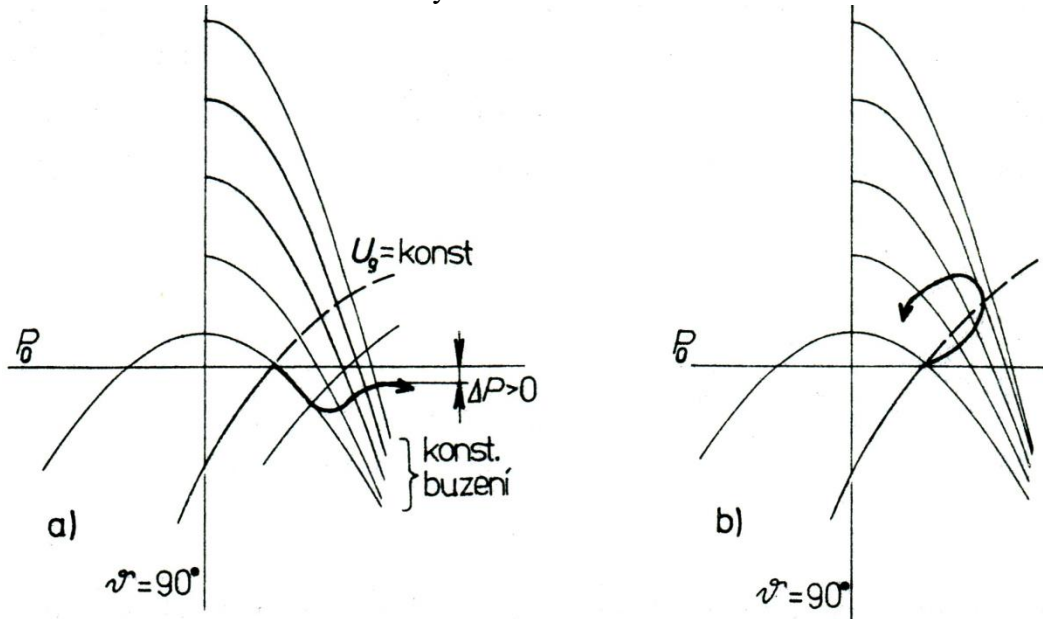
Zavislost výkonu dodavaného do site na zateznom uhlu



Zavislost výkonu dodavaného do site na zateznom uhlu



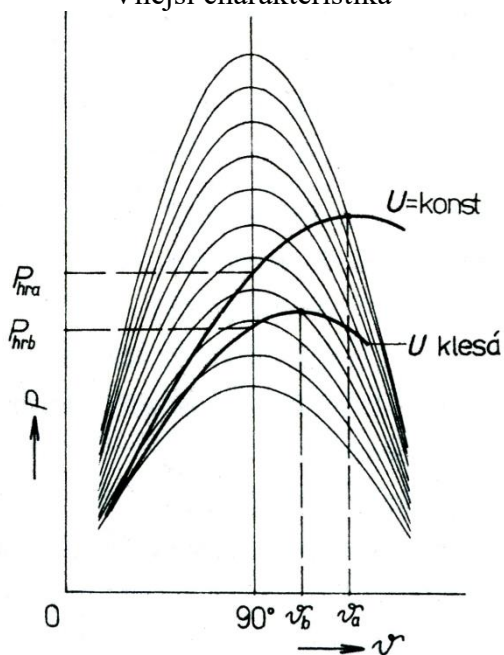
Negativní průběh změny mezi pracovními bodu může ovlivnit pásmo necitlivosti regulátoru a případná tendence k samovolnému rozkvyání zátěžného úhlu.



a) pomalý regulátor b) regulátor bez mrtvé zóny

Vliv kolísání napětí vnější sítě

Vnější charakteristika



Možné snížení napětí sítě ovlivňuje negativně výkonovou charakteristiku.

Snižuje se jak maximální přenositelný výkon, tak mezní zátěžný úhel.

Závislost činného výkonu alternátoru pro alternátor s vyniklými póly

Projektuje se proměnnost velikosti vzduchové mezery. Původní vztahy je třeba zobecnit:

$$I \cdot X_q \cos \varphi = E_q \sin \vartheta$$

$$E_q = E - I_d(X_d - X_q)$$

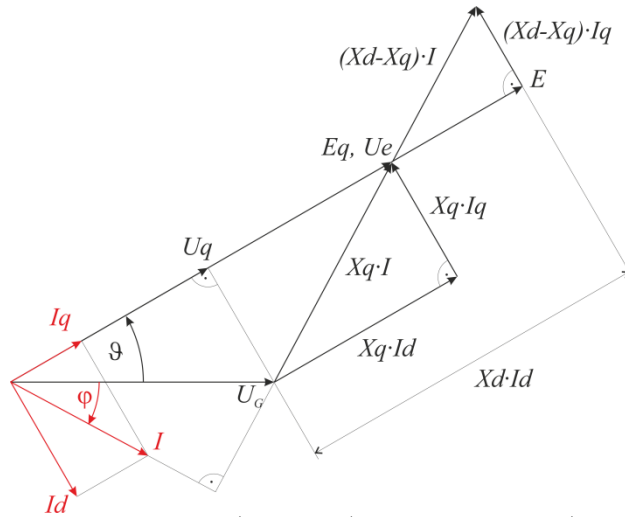
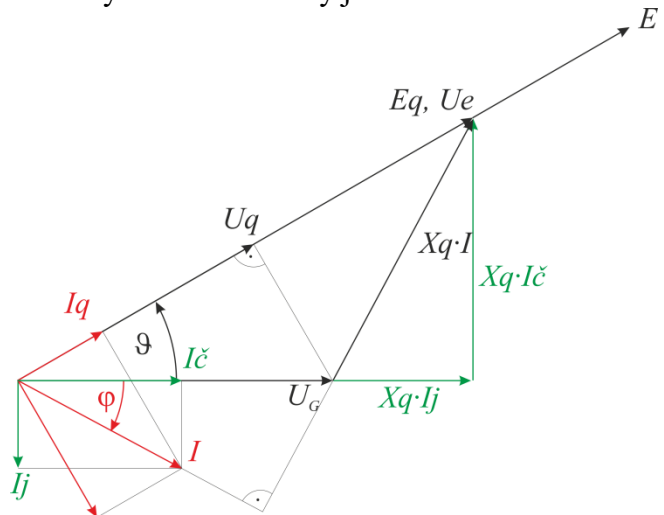
$$I_d X_d = E - U_q = E - U_G \cos \vartheta$$

$$\rightarrow I_d = \frac{E}{X_d} - \frac{U_G}{X_d} \cos \vartheta$$

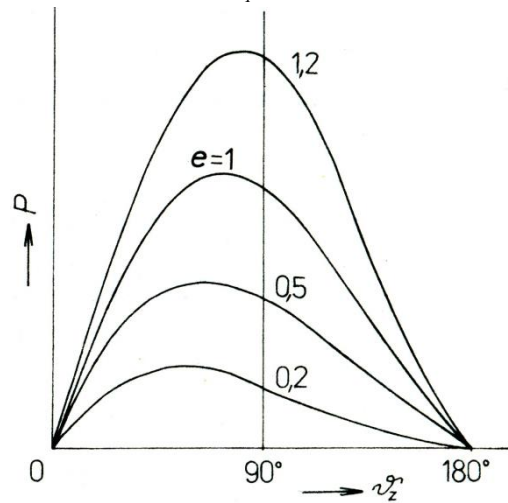
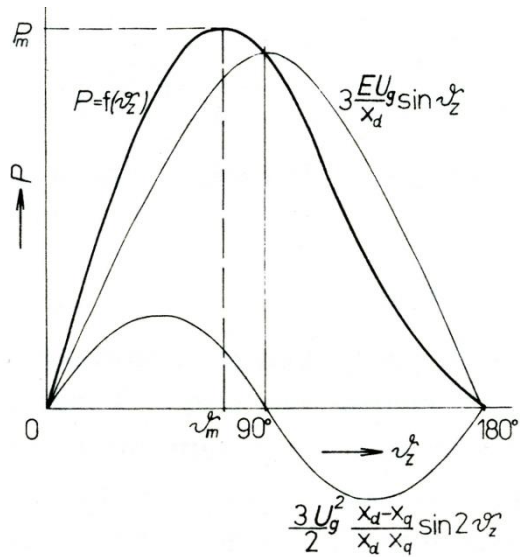
$$\rightarrow E_q = E \frac{X_q}{X_d} + U_G \frac{X_d - X_q}{X_d} \cos \vartheta$$

$$P = 3U_G I \cos \varphi = 3U_G \frac{E_q}{X_q} \sin \vartheta$$

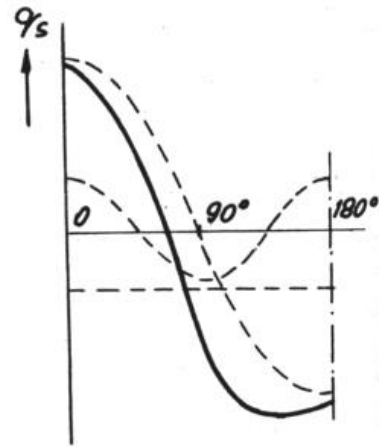
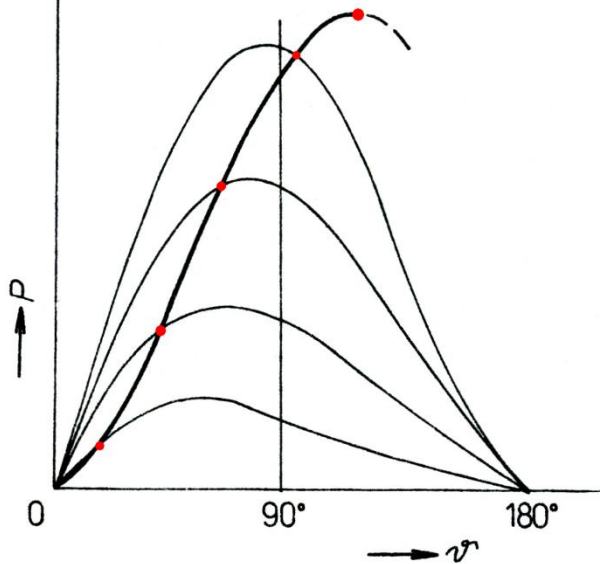
$$P = 3 \frac{E \cdot U_G}{X_d} \sin \vartheta + 3 \frac{U_G^2 (X_d - X_q)}{2X_d X_q} \sin(2\vartheta)$$



$$\text{Analogicky: } Q_s = 3 \frac{E \cdot U_G}{X_d} \cos \vartheta + 3 \frac{U_G^2 (X_d - X_q)}{2X_d X_q} \cos(2\vartheta) - 3 \frac{U_G^2 (X_d + X_q)}{2X_d X_q}$$



Vnější charakteristika stroje s vyniklými póly

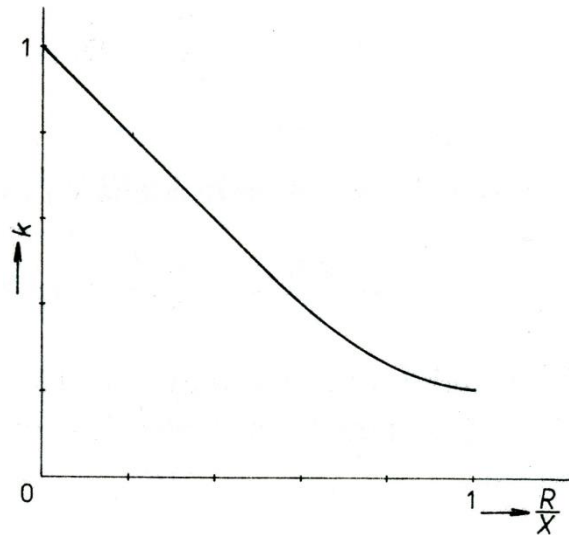
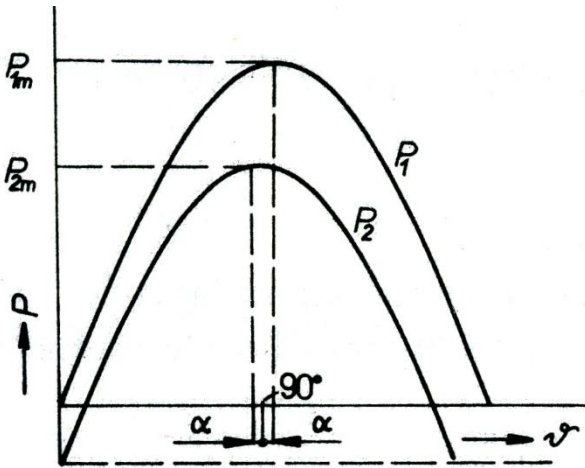


Závislost činného výkonu alternátoru při nezanedbnání činného odporu vazebního členu

Při nezanedbnání činného odporu ve vazebním dvojbranu nastává maximální výkon při zátěžném úhlu: $\alpha_{\max} = 90^\circ + \beta_{12}$, neboť se projevuje pozitivní účinek činného odporu (kladné β_{12}). Negativní vliv záporného β_{12} se uplatní při induktivní zátěži v rámci vazebního

dvojbranu. Zavádíme činitel zmenšení výkonu: $k = \frac{P_{\max Z}}{P_{\max X}} = \frac{\frac{3EU_s}{Z} - \frac{3U_s^2}{Z} \sin \alpha}{\frac{3EU_s}{X}}$

$$k \approx \frac{X}{Z} (1 - \sin \alpha) = \frac{Z \cos \alpha}{Z} (1 - \sin \alpha) = \cos \alpha (1 - \sin \alpha)$$



Analytické řešení stability přenosu výkonu mezi alternátorem a tvrdou sítí

$$\Delta M = J_M \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad J_M = \frac{T_M \cdot S_{NG}}{\omega_s^2} \quad \Delta M = \frac{\Delta P}{\omega_s}$$

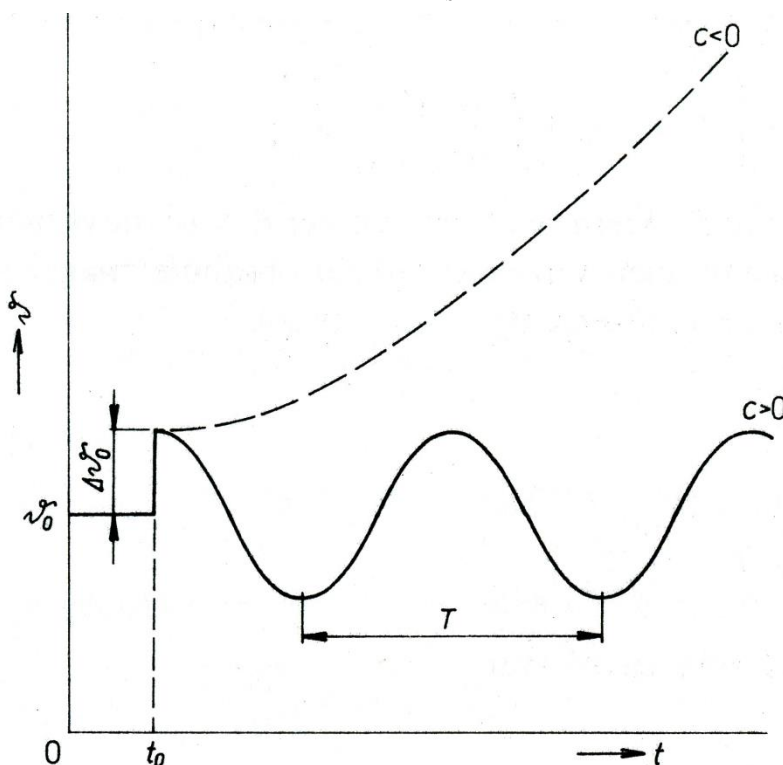
$$\frac{d^2\vartheta}{dt^2} = \Delta P \frac{\omega_s}{T_m \cdot S_N} \quad \frac{T_m \cdot S_N}{\omega_s} \cdot \frac{d^2\vartheta}{dt^2} = P_T - P_{\max} \sin \vartheta$$

Řešení provedeme numericky, nebo linearizací v počátečním bodě Taylorovým rozvojem a Laplaceovou transformací:

$$\vartheta = \vartheta_0 + \Delta\vartheta \rightarrow P_{\max} \sin \vartheta \approx P_{\max} \sin \vartheta_1 + \left(\frac{dP}{d\vartheta} \right)_{\vartheta=\vartheta_0} \Delta\vartheta \quad \frac{d^2\vartheta}{dt^2} \approx \frac{d^2\Delta\vartheta}{dt^2}$$

$$\frac{T_m \cdot S_N}{\omega_s} \cdot p^2 \Delta\vartheta = P_T - \left(P_{\max} \sin \vartheta_1 + \left(\frac{dP}{d\vartheta} \right)_{\vartheta=\vartheta_0} \Delta\vartheta \right) \quad a \cdot p^2 \Delta\vartheta + c \cdot \Delta\vartheta = 0$$

$$\text{kde } P_T = P_{\max} \sin \vartheta_0 \quad a = \frac{T_m \cdot S_N}{\omega_s} \quad c = P_C = \left(\frac{dP}{d\vartheta} \right)_{\vartheta=\vartheta_0} \quad p_{1,2} = \pm \sqrt{-\frac{c}{a}}$$



Pro $c > 0$ vzniká oscilace ϑ s frekvencí

$$f = \sqrt{\frac{c}{a}}$$

Pro $c < 0$ vzniká aperiodický přechodný děj mající za následek ztrátu stability.

Podmínka statické stability, tedy podmínka

$$c = P_C = \left(\frac{dP}{d\vartheta} \right)_{\vartheta=\vartheta_0} > 0$$

byla potvrzena.

Pokud bude respektováno budící a tlumící vinutí, dochází k tlumenému přechodnému ději díky vznikajícímu přídavnému asynchronnímu momentu. Tento moment má aperiodickou a tři zanedbatelné složky harmonické. Střední hodnota tohoto momentu je vyjádřena vztahem:

$$M_{as} = \frac{U_G^2}{2} \left[\left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d'} \right) \frac{sT_d'}{1+(sT_d')^2} - \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d''} \right) \frac{sT_d''}{1+(sT_d'')^2} + \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_q''} \right) \frac{sT_q''}{1+(sT_q'')^2} \right]$$

$$\text{Příslušný skluz je definován jako: } s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = -\frac{\Delta\omega}{\omega_s} = -\frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{d\vartheta}{dt}$$

Pokud uvážíme pro nepatrné změny zátěžného úhlu a pro stroj s hladkým rotorem $X_d \approx X_q$,

$X_d' \approx X_d'' \approx X_q''$ a $T_d' = T_q''$, potom lze moment přibližně uvažovat:

$$M_{as} = \frac{U_G^2}{2} \left[2 \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d'} \right) \frac{sT_d'}{1+(sT_d')^2} \right] = U_G^2 \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d'} \right) sT_d' = \frac{B}{\omega_s} \cdot \frac{d\vartheta}{dt}$$

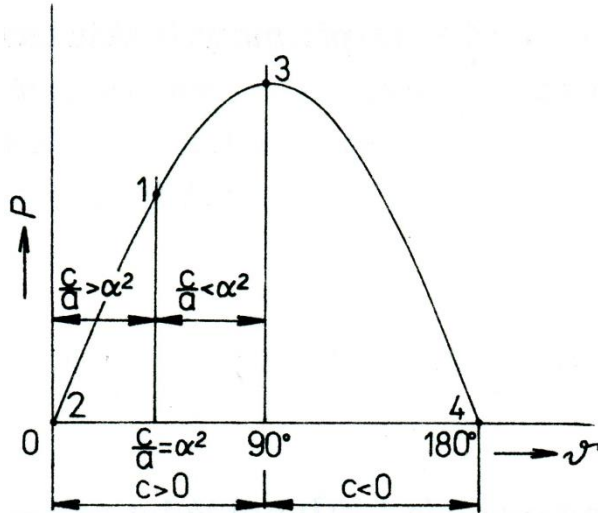
kde $B = -U_G^2 \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d'} \right) T_d'$

Pohybová rovnice soustrojí je potom ve tvaru: $\frac{T_m \cdot S_N}{\omega_s} \cdot \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} + B \cdot \frac{d\vartheta}{dt} = P_T - P_{\max} \sin \vartheta$

Opět aplikujeme linearizaci Taylorovým rozvojem a Laplaceovu transformaci:

$a \cdot p^2 \Delta \vartheta + b \cdot p \cdot \Delta \vartheta + c \cdot \Delta \vartheta = 0$ kde $b = B$.

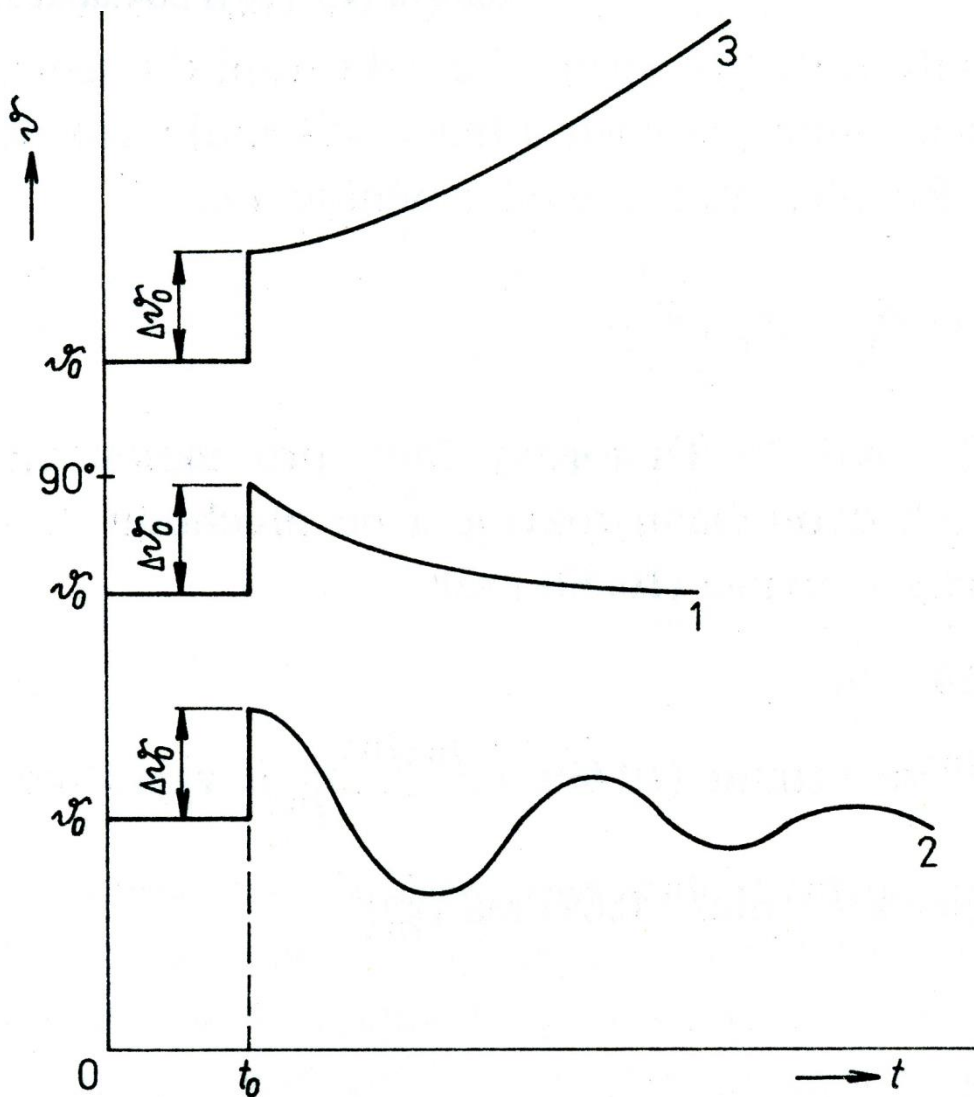
Pokud zavedeme $\alpha = -\frac{b}{2a}$, je řešení tentokrát ve tvaru: $p_{1,2} = \pm \sqrt{-\left(\frac{c}{a} - \alpha^2\right)} + \alpha$



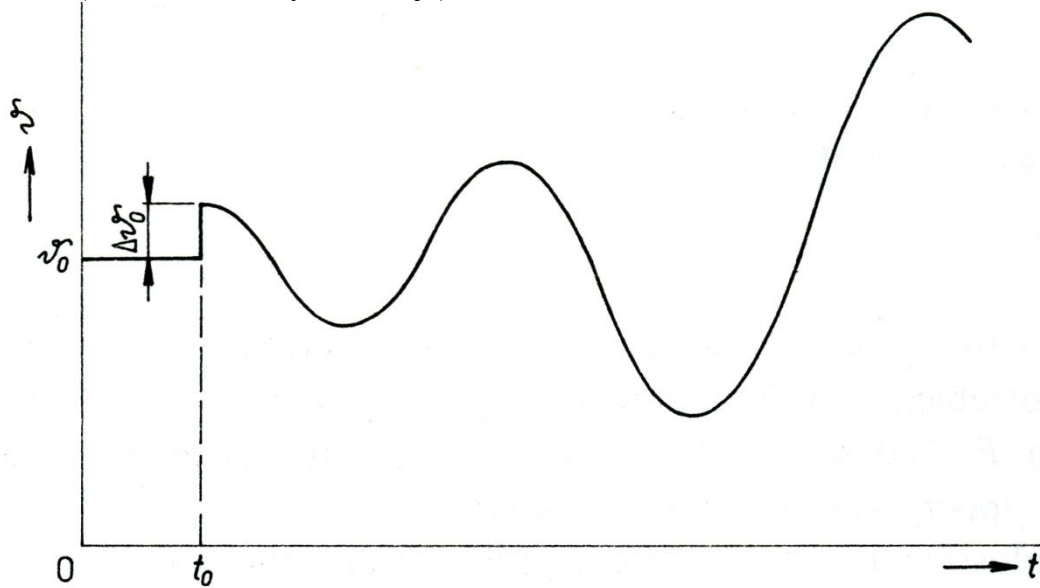
Tedy pro $c > 0$ vzniká dynamicky stabilní přechodný děj.

Pro navíc splněnou podmínku $\frac{c}{a} < \alpha^2$ se bude jednat o průběh aperiodický.

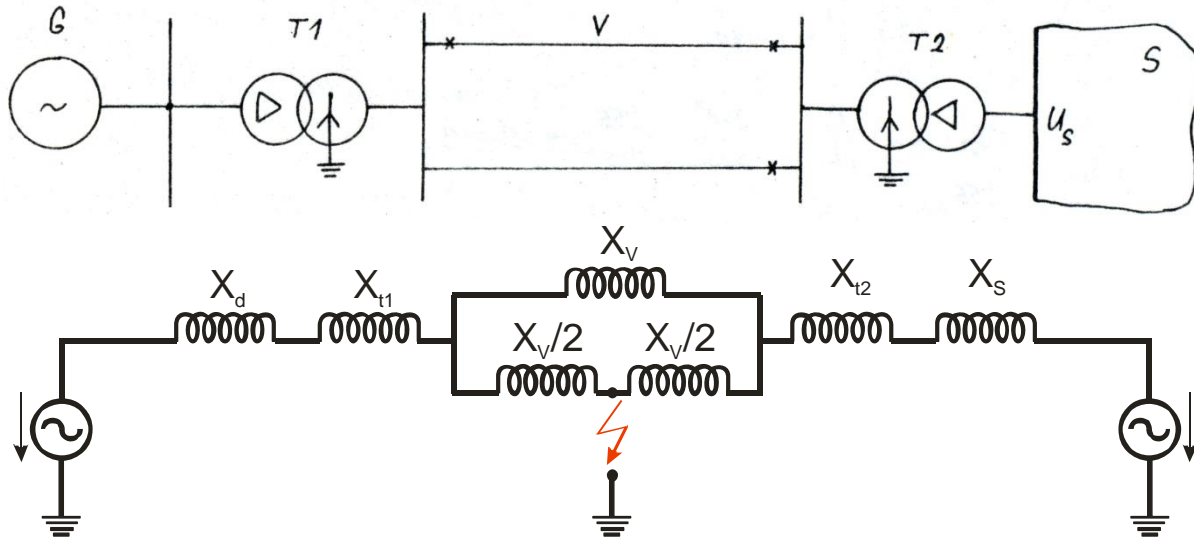
Pod bude platit $\frac{c}{a} > \alpha^2$, potom vzniká tlumený oscilující průběh.



Obecně lze konstatovat, že budící a tlumící vinutí pozitivně tlumí vznikající přechodný děj. Pouze výjimečně při vysokých hodnotách rezistence může koeficient tlumení B nabývat záporných hodnot a v oblasti $\frac{c}{a} > \alpha^2$ potom vzniká kmitavý děj se samovolně narůstající amplitudou (samovolné rozkývání stroje):



Výpočet vazebních reaktancí a admitancí pro různé případy provozních a poruchových stavů



Bezporuchový stav:

$$X_{11} = X_{12} = X_d + X_{T1} + \frac{X_v}{2} + X_{T2} + X_s$$

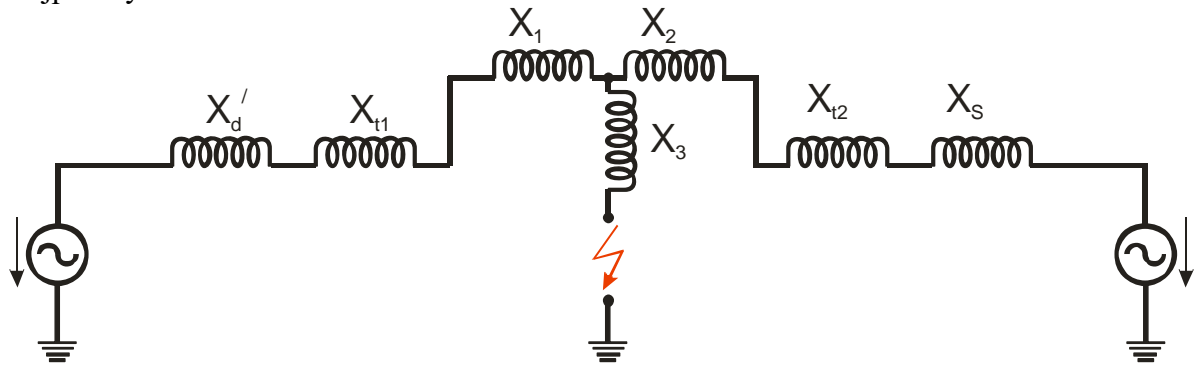
Maximální přenositelný činný výkon:

$$P_{\max} = 3 \frac{E \cdot U_{Nf}}{X_{12}}$$

Počáteční podmínka zátěžného úhlu:

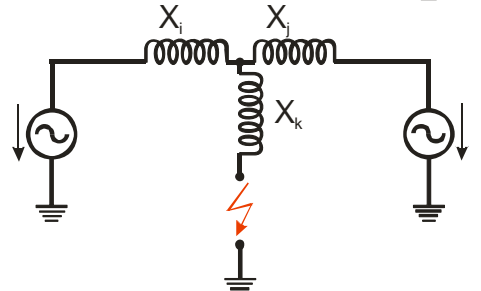
$$g = \arcsin \left(\frac{P}{P_{\max}} \right)$$

Trojpólový zkrat:



Přepočítání trojúhelník hvězda:

$$X_1 = X_2 = \frac{X_v \cdot \frac{X_v}{2}}{X_v + \frac{X_v}{2} + \frac{X_v}{2}} \quad X_3 = \frac{\frac{X_v}{2} \cdot \frac{X_v}{2}}{X_v + \frac{X_v}{2} + \frac{X_v}{2}}$$



$$X_i = X_d' + X_{T1} + X_1$$

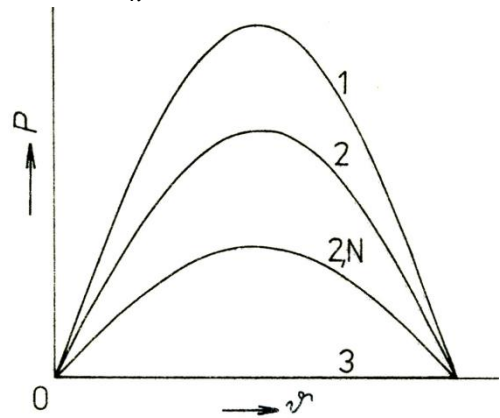
$$X_j = X_2 + X_{T2} + X_S$$

$$X_k = X_3$$

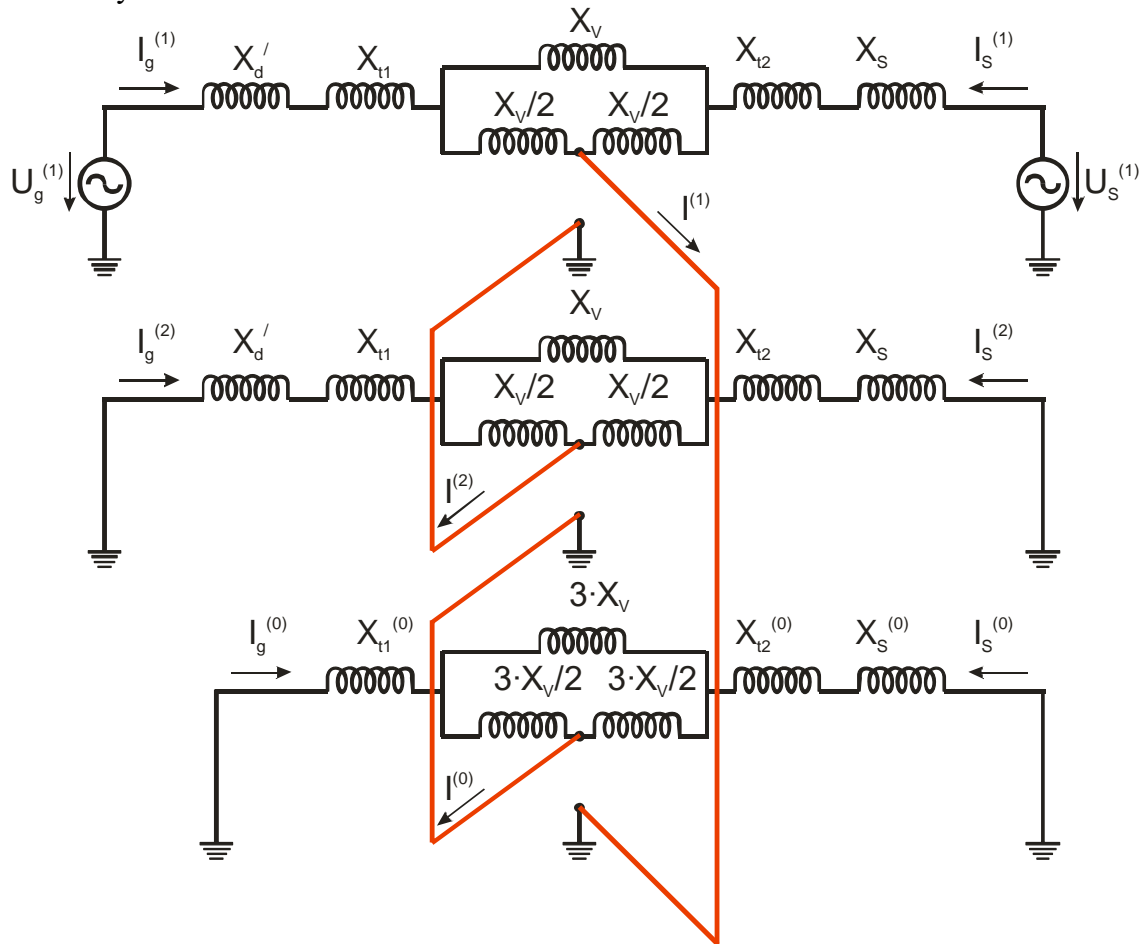
$$X_{11} = X_i + \frac{X_j X_k}{X_j + X_k}$$

$$X_{12} = \frac{X_i X_j}{X_k} + X_i + X_j$$

Závislost výkonové charakteristiky na typu vzniklé poruchy pro případ pouze jednoduchého vazebního vedení:



Jednofázový zemní zkrat:



$$Z_{ekv} = Z^{(2)} + Z^{(0)}$$

$$X_i = X_d' + X_{T1}^{(1)} + X_1^{(1)}$$

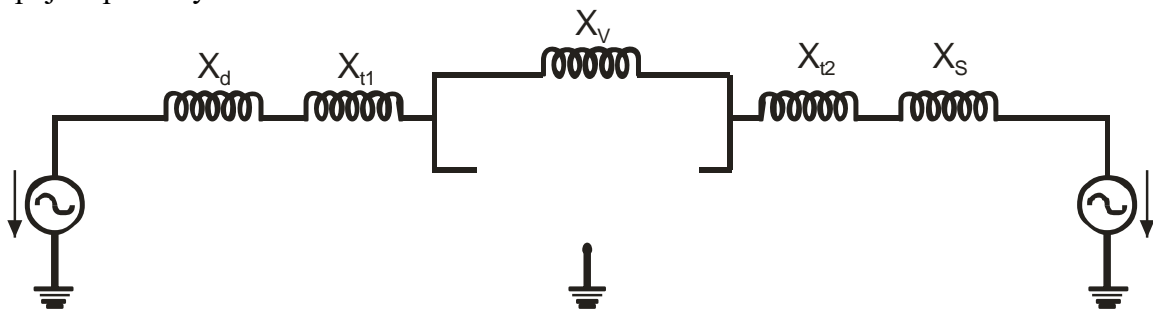
$$X_j = X_2^{(1)} + X_{T2} + X_S$$

$$X_k = X_3^{(1)} + Z_{ekv}$$

$$X_{11} = X_i + \frac{X_j X_k}{X_j + X_k}$$

$$X_{12} = \frac{X_i X_j}{X_k} + X_i + X_j$$

Odpojení poruchy:



$$X_{11} = X_{12} = X_d' + X_{T1} + X_V + X_{T2} + X_S$$