Elektrárny
A1M15ENY

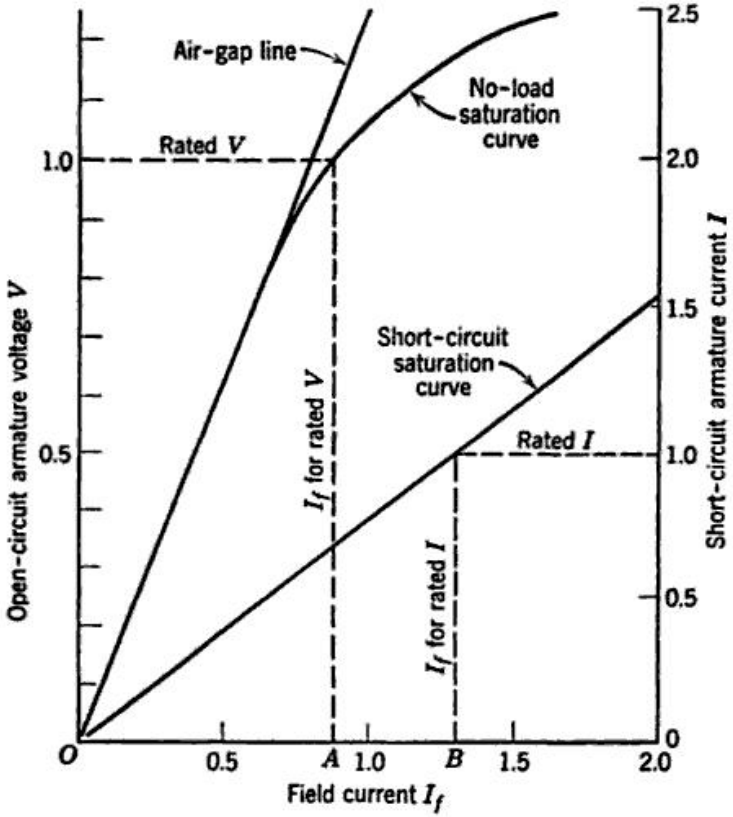
přednáška č. 6

Jan Špetlík

spetlij@fel.cvut.cz - v předmětu emailu „ENY"

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky ČVUT, Technická 2, 166 27 Praha 6

Charakteristika naprázdno, nakrátko



Vliv magnetické charakteristiky obvodu synchronního stoje:

Charakteristika naprázdno je:

$$U = E = f\left(I_f\right) \qquad u = e = f\left(i_f\right)$$

Charakteristika nakrátko je:

$$I_k = f\left(I_f\right) \qquad i_k = f\left(i_f\right)$$

Proud I_{f0} je takový proud buzení , při kterém dosáhne hodnota svorkového napětí v gen. zapojeného naprázdno hodnoty U_n (bod A)

Proud I_{fk} je takový proud buzení , při kterém dosáhne hodnota svorkového proudu v gen. zapojeného nakrátko hodnoty I_n (bod B)

Charakteristika naprázdno, nakrátko

Uvažujeme-li, že bodu A a I_{f0} odpovídá v char. $i_k = f\left(i_f\right)$ proud I_{0k} a označíme-li si napětí nesaturovaného stroje jako $\tilde{e}$

Definujeme zkratový poměr jako:

$$\nu = \frac{I_{f0}}{I_{fk}} = \frac{i_{f0}}{i_{fk}}$$

Nasycenou reaktanci x_{dS} ze stavu naprázdno:

$$x_{d(S)} = \frac{e}{i_{0k}} = \frac{1}{i_{0k}} = \frac{1}{\frac{i_{fk}}{i_{f0}}.1} = \frac{1}{\nu}$$

Nenasycenou reaktanci x_d ze stavu nakrátko:

$$x_d = \frac{\tilde{e}}{i_{0k}}$$

Charakteristika naprázdno, nakrátko

Z výše uvedeného vyplývá, že: $x_d > x_{d(S)}$

Z hlediska statické stability je výhodné mít velkou hodnotu ν

Velká hodnota zkratového poměru ale navyšuje rozměry, hmotnost i cenu generátoru

Typické hodnoty $\nu = 0,5 - 1,1$ u některých hydrostrojů až $\nu = 2$

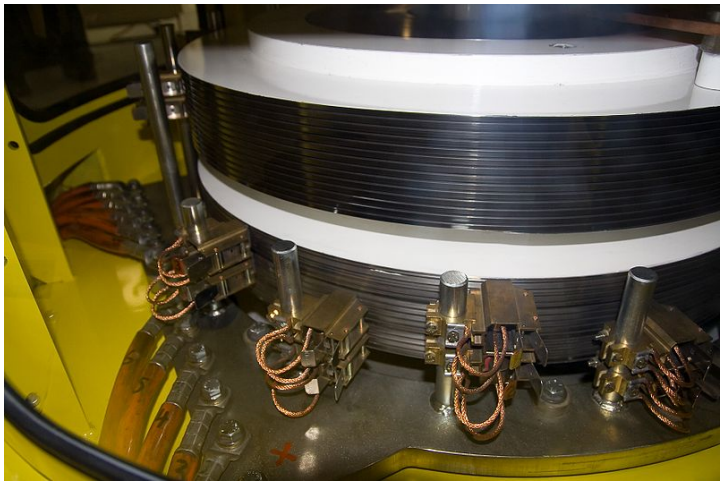
Budící systémy

Skládají se z:

- Systém zdroje budícího proudu
- Systém regulace buzení
- Systém odbuzování

Požadavky:

- Vysoká provozní spolehlivost
- Plynulá a rozsáhlá regulace budících proudů a napětí (až 2.U_{fn})
- Dostatečná rychlost změny budícího napětí
- Dostatečná rychlost odbuzení



Detail ss napájení přes kroužky

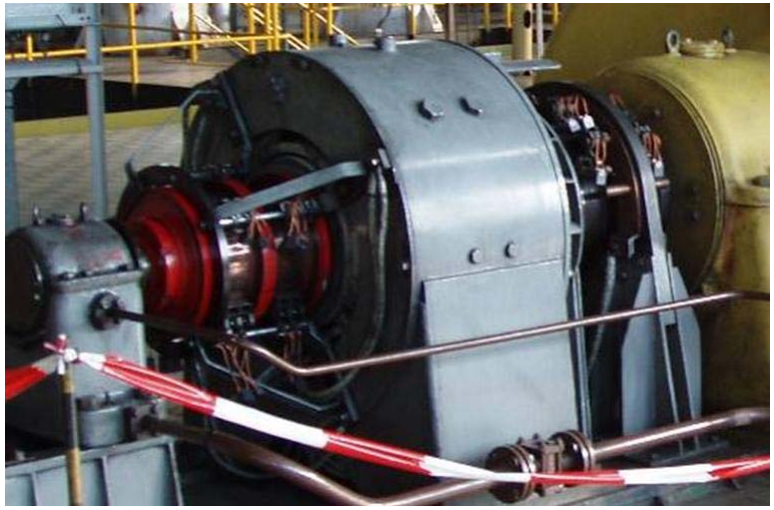
Zdroje budícího proudu

Dle provedení:

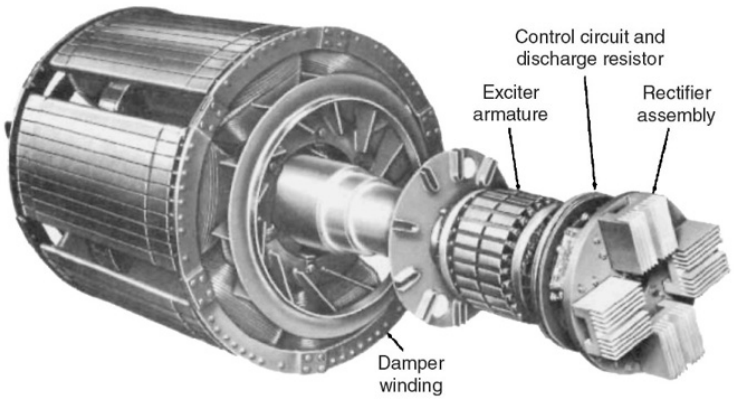
- S rotačním budičem (dynamo)
- Statický systém vyvedený na kroužky
- Statický systém v rotoru
- Systém s permanentními magnety (pouze malé aplikace)

Dle napájení:

- Odbočkou ze svorek generátoru přes trf. buzení
- Nezávislý zdroj (např. pomocný budič ss dynama)



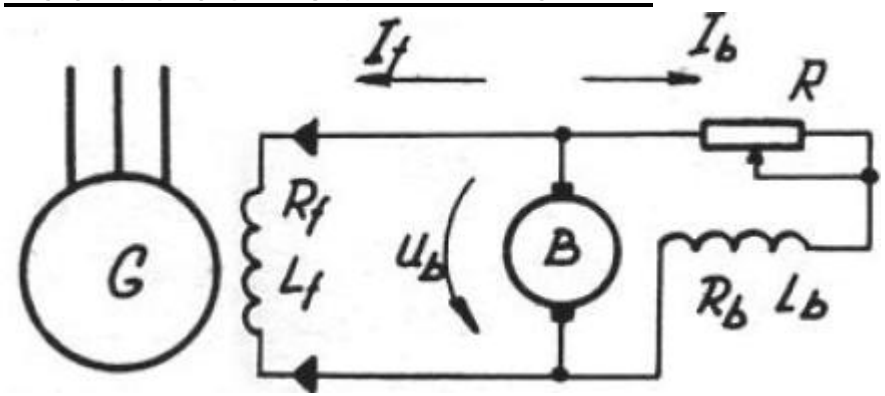
Rotační budič (s pom. budičem)



Bezkartáčový tyristorový systém integrovaný v rotoru

Zdroje budícího proudu

Budič s derivačním vinutím:

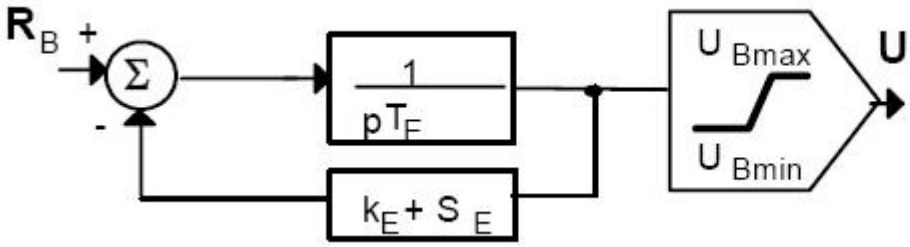


$$u_b = R_b.i_b - \frac{d\psi}{dt} = R_b.i_b - \frac{L_b}{R_b}\frac{du_b}{dt}$$

$$T_b = \frac{L_b}{R_b} \qquad U_b = \frac{R_b}{1+s.T_b}.I_b$$

$$s.T_E.U_b = \mathbf{R}_B - k_E.U_b$$

Model respektující sycení:



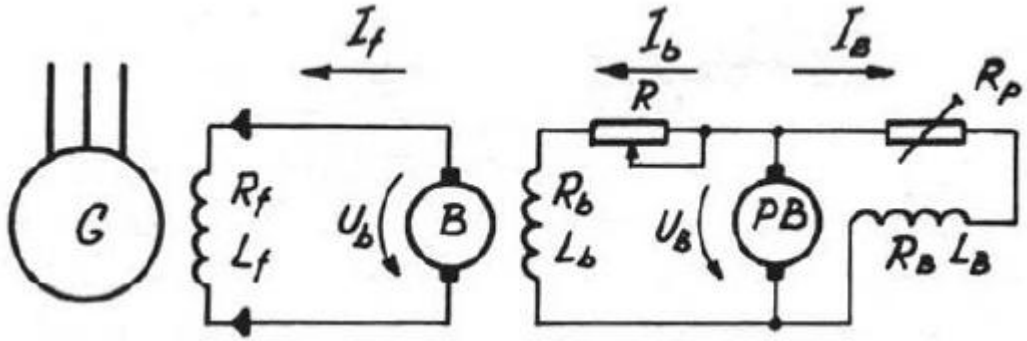
$S_E = A^*\exp(B^*U_B/U_{Bn})$

Funkce sycení

Přenos. fce ve tvaru:

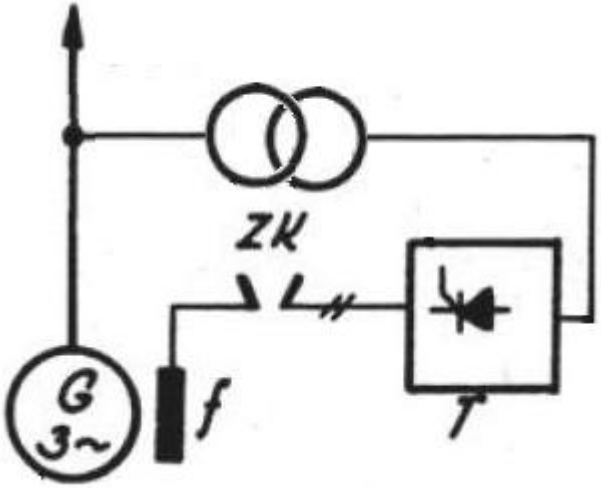
$$U_B = \frac{1}{k_E + s_E + s.T_E}.R_B$$

Budič s přídavným pomocným vinutím:



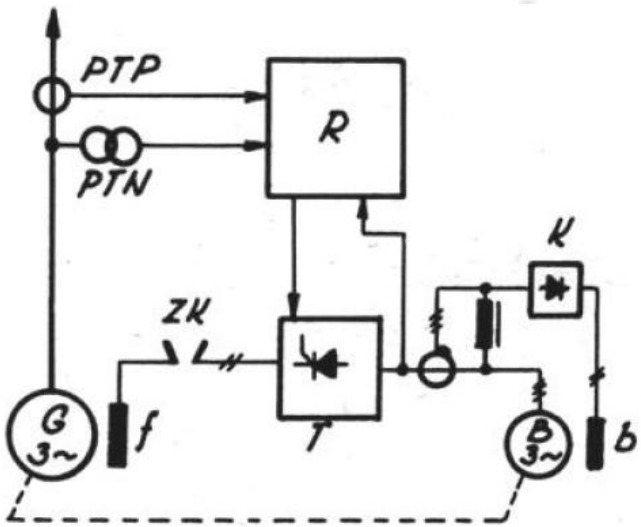
Zdroje budícího proudu

Statický budič s řízeným usměrňovačem napájený z odbočky:



Zdroj závislý na svorkovém napětí u generátoru. To může činit potíže při době regulace při změnách u_S (např. při vzdáleném zkratu)

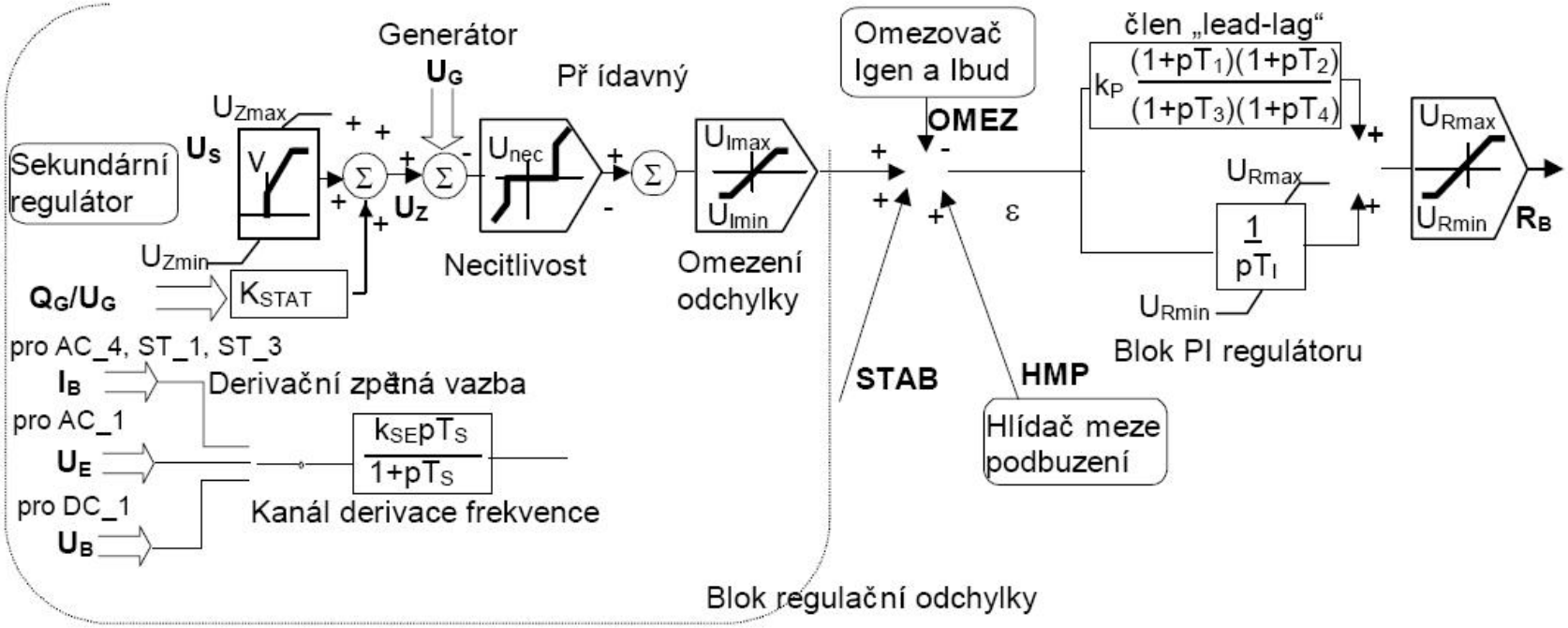
Statický budič s řízeným usměrňovačem napájený z 3f gen:



„Nezávislý" tyristorový budič

Regulace buzení

Obecné schéma regulace buzení:



Zdroj: www.ceps.cz

Žádané napětí (Uz) tvoří požadavky: SR a statiky regulátoru

Regulační odchylka dále prochází přes moduly necitlivost (Unec), omezení (Umax,Umin), omezovače Ig a If, hlídač meze podbuzení (HMP), systémový stabilizátor (STAB)

Takto omezená regulační odchylka nakonec prochází regulátorem typu PI a tvoří vstup do budiče

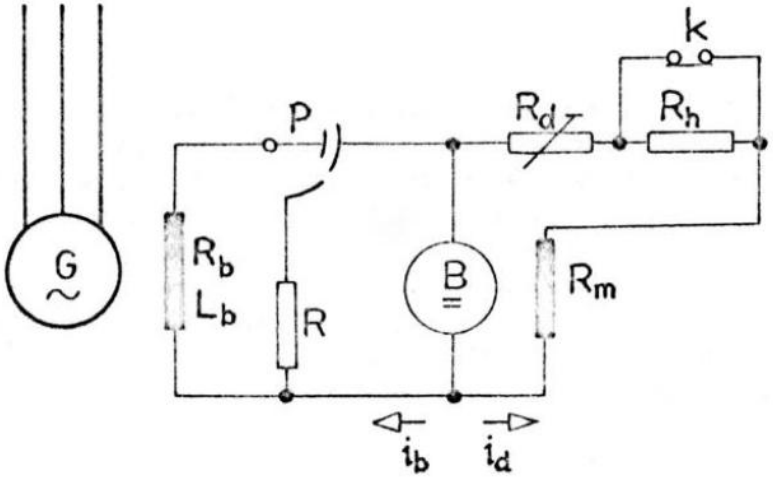
Odbuzovače

<u>Provedení:</u>

- s paralelním (zhášecím) odporem
- se zhášecí komorou
- invertorovým chodem budícího systému

Odbuzení zhášecím odporem

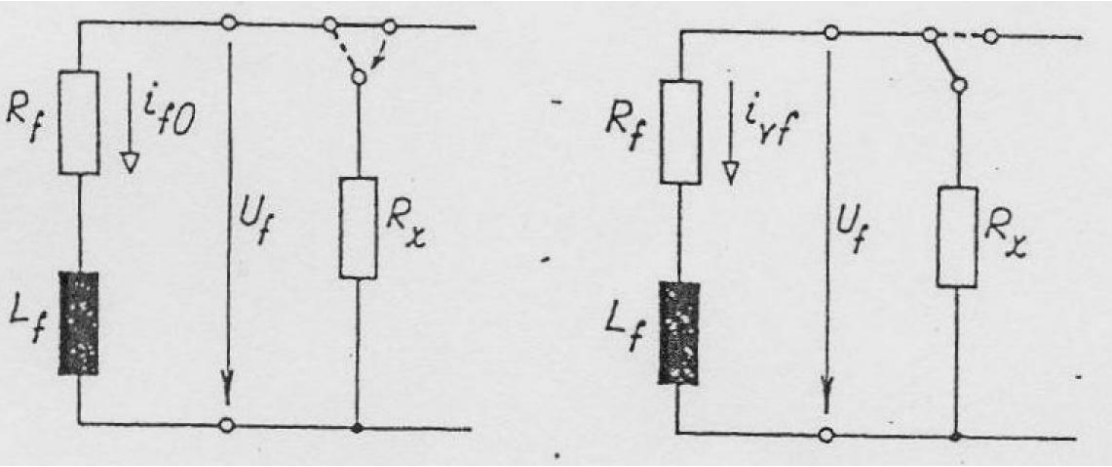
Schéma:



Dojde k sepnutí odporu R a zároveň rozpojení kontaktů k a připojení odporu Rh do budícího obvodu derivačního dynama

Volbou odporu R musí dojít k rychlému odbuzení, ale zároveň zamezení přepětí na kroužcích bud. vinutí

Zjednodušeně jde o (neuvažujeme-li tlum. vin.):



Platí:

$$u_f = L_f . \frac{di_{vf}}{dt} + R_f . i_{vf} = -R_x . i_{vf}$$

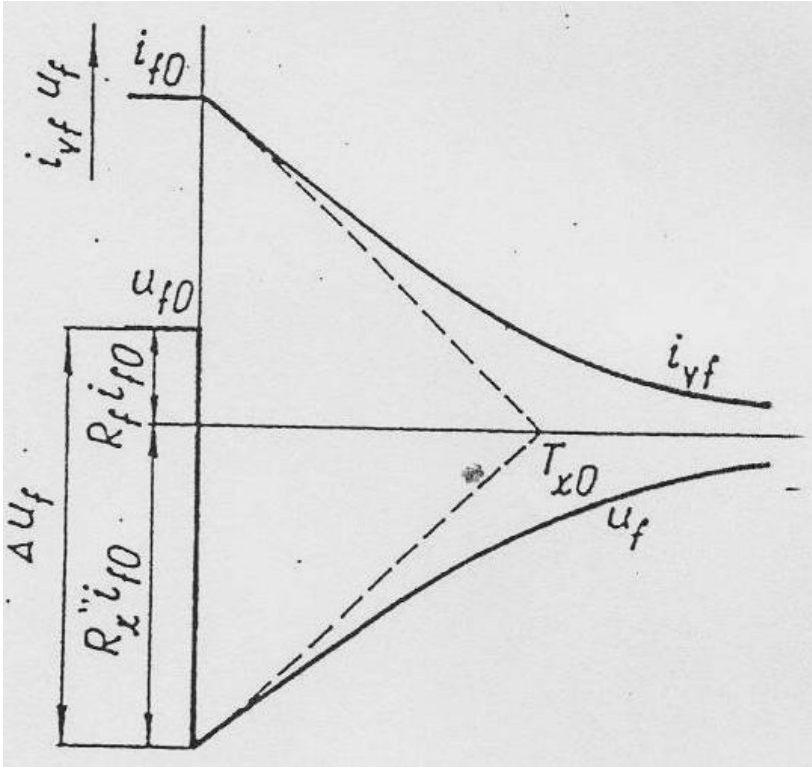
Odbuzení zhášecím odporem

<u>Řešení:</u>

$$i_{vf} = i_{f0}.e^{-\frac{t}{T_x}} \qquad u_f = -R_x.i_{f0}.e^{-\frac{t}{T_x}}$$

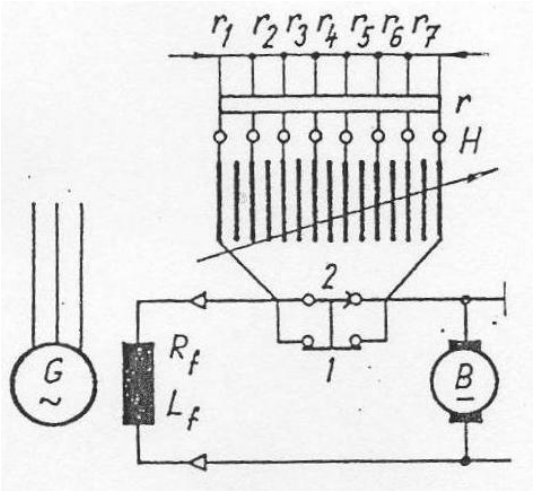
Je-li proud na počátku maximálně i_{fn} a požadujeme $u_f < 7.u_{fn}$

$$7.u_{fn} = 7.R_f.i_{fn} = R_x.i_{fn} \Rightarrow R_x = 7.R_f$$



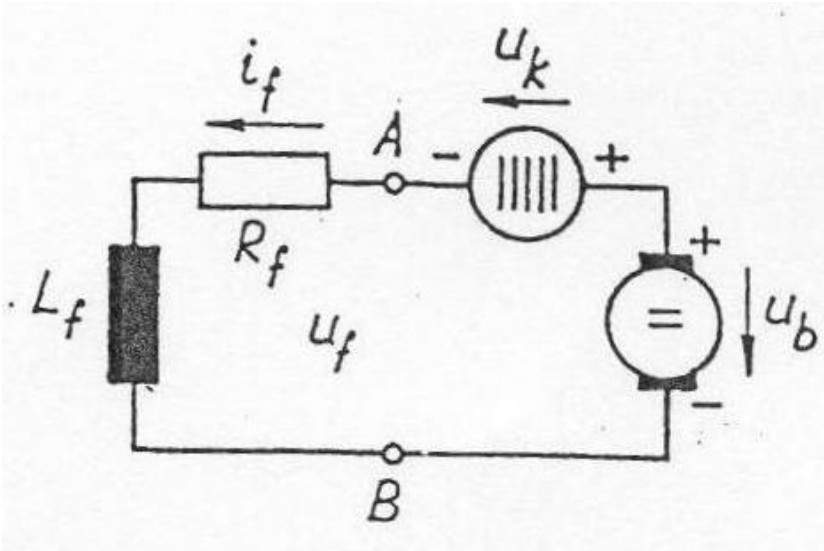
Odbuzení zhášecí komorou

Schéma:



Užívá se pro alternátory vyšších výkonů.
Po rozpojení hlavních kontaktů č. 1 je proud přemostěn přes hl. kontakty 2 s indukčnostmi, které po jejich rozpojení nasměrují proud do zhášecí komory
Kombinací odporů r1-r7 a celkové koncepce ZK je napětí uk během zhášení oblouku prakticky konstantní

Zjednodušeně jde o (neuvažujeme-li tlum. vin.):



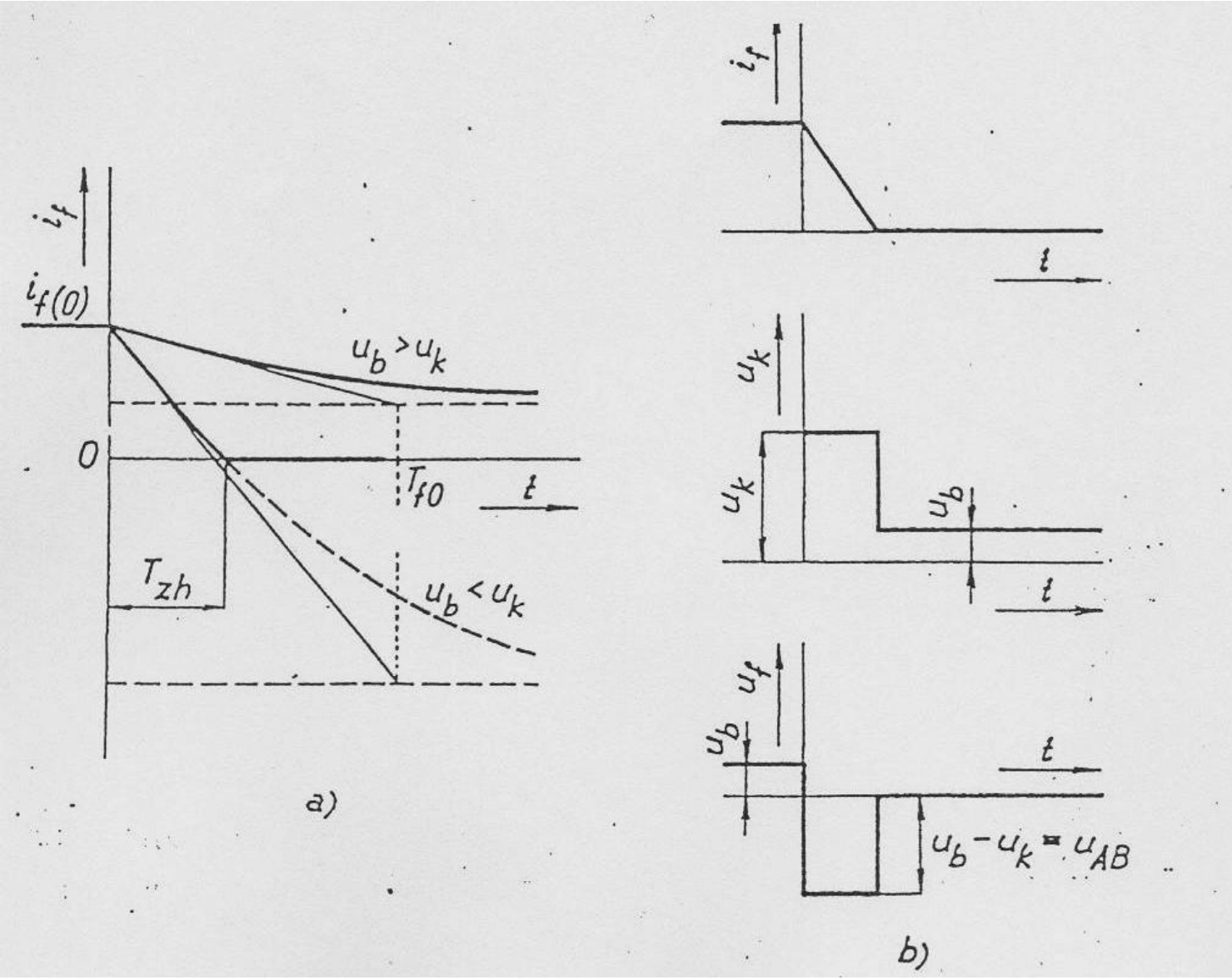
Platí:

$$i_f = \frac{1}{R_f}\left(u_b - u_k + u_k.e^{-\frac{t}{T_{f0}}}\right)$$

$$T_{f0} = \frac{L_f}{R_f}$$

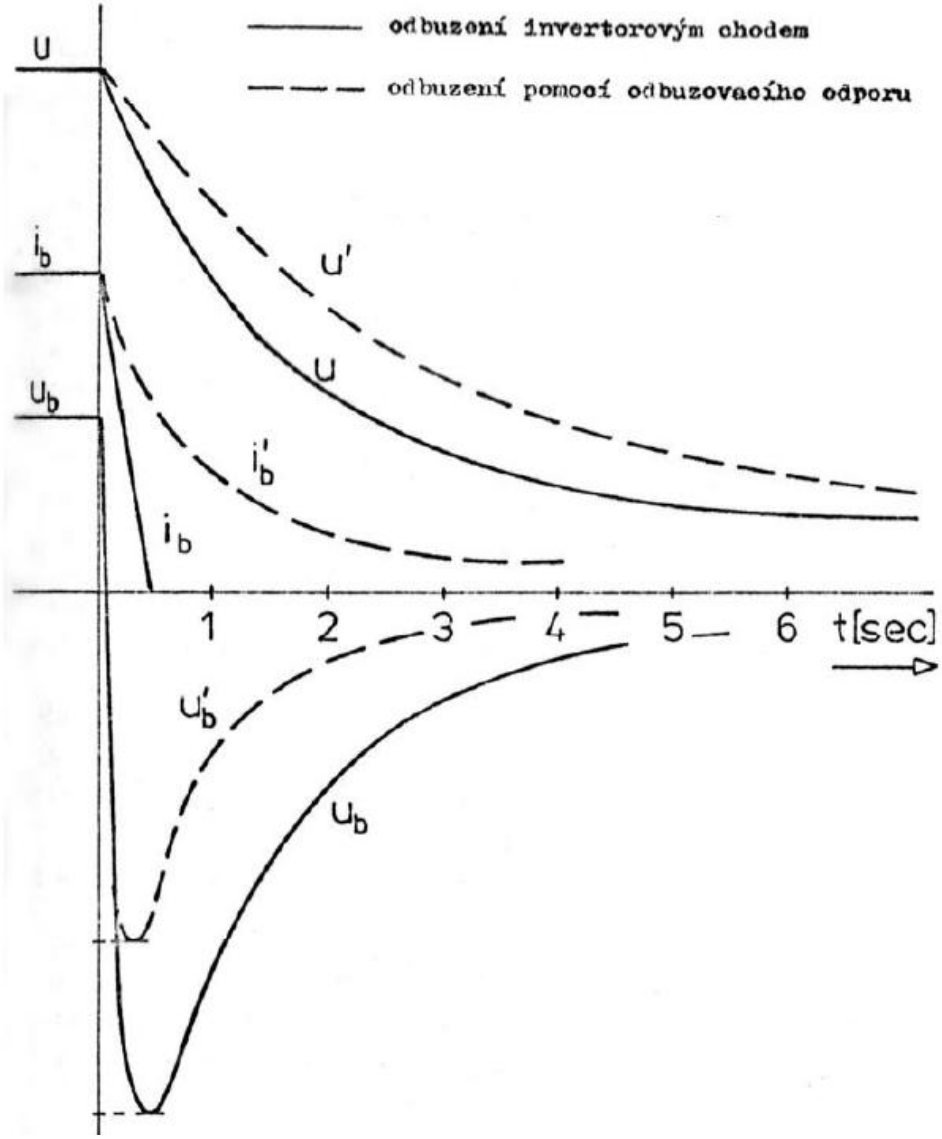
Odbuzení zhášecí komorou

Časové průběhy:



Odbuzení invertorovým chodem

Časové průběhy:



Lze použít u budících systémů s řízenými tyristory. Zajišťuje se při plánovaném odbuzování.

Za havarijních podmínek se používají klasické systémy kvůli možnému značnému napěťovému namáhání tyristorů

Fázování alternátoru

Průběh připojení generátoru k síti:

Soustrojí turbína-generátor se uvede na jmenovité otáčky, nabudí na jmenovité napětí, přifázuje a poté se uvede na požadované hodnoty P a Q. Přifázování musí být provedeno s minimálními proudovými a momentovými rázy, které jsou dány zejména:

- různým sledem fází generátoru/sítě
- různou velikostí napětí generátoru/sítě
- různým fázovým rozdílem napětí generátoru/sítě
- různou frekvencí generátoru/sítě

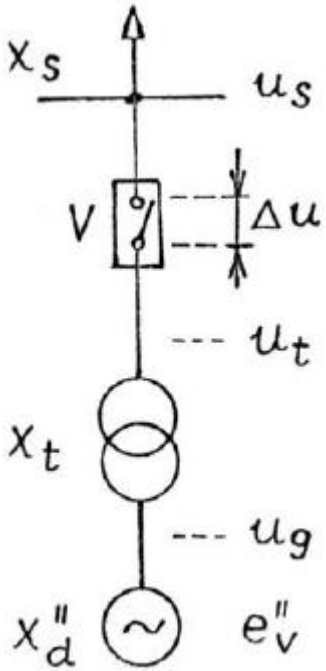
Tyto podmínky nelze splnit naprosto přesně, tolerované odchylky jsou následující:

Sled fází:

Nutno dodržet, kontrola sledu fází je dnes součástí každé multiunkční digitální ochrany bloku

Fázování alternátoru

Velikost napětí:



Před fázováním je na alternátoru rozdílové napětí Δu

Všechna napětí jsou ve fázi

Dojde k proudovému rázu:

$$i''_k = \frac{e'' - u_s}{x_t + x''_d} = \frac{\Delta u}{x_t + x''_d}$$

Dovolená odchylka při které $i''_k = i_n$:

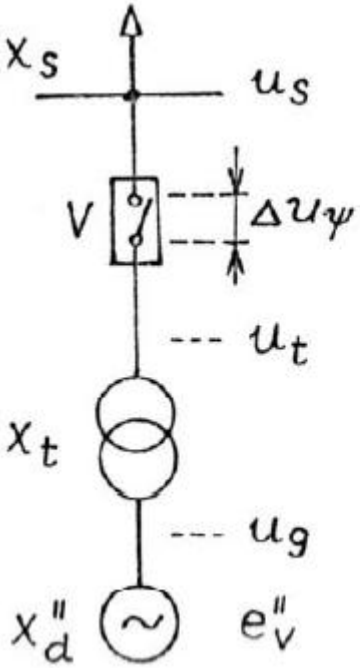
$$\Delta u_{\max} = i''_k . x''_d = i_n . x''_d \simeq 1.0{,}15 = 15\ \%$$

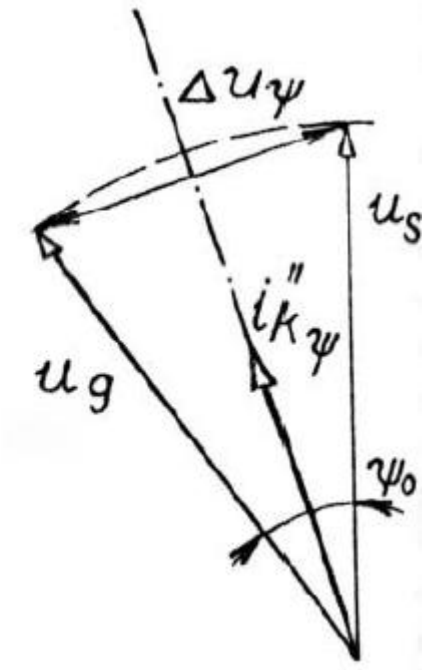
Je-li $u_s < e''$ dodává během přechodného děje alternátor jalový výkon do sítě a pracuje v přebuzeném (induktivním) režimu, je-li $u_s > e''$ pracuje naopak v podbuzeném (kapacitním) režimu

Aby nedošlo k druhému případu, alternátor se mírně přebudí

Fázování alternátoru

Fázový rozdíl napětí:





$$i''_k = \frac{e'' - u_s}{x_t + x''_d} = \frac{2u.\sin\frac{\psi}{2}}{x_t + x''_d}$$

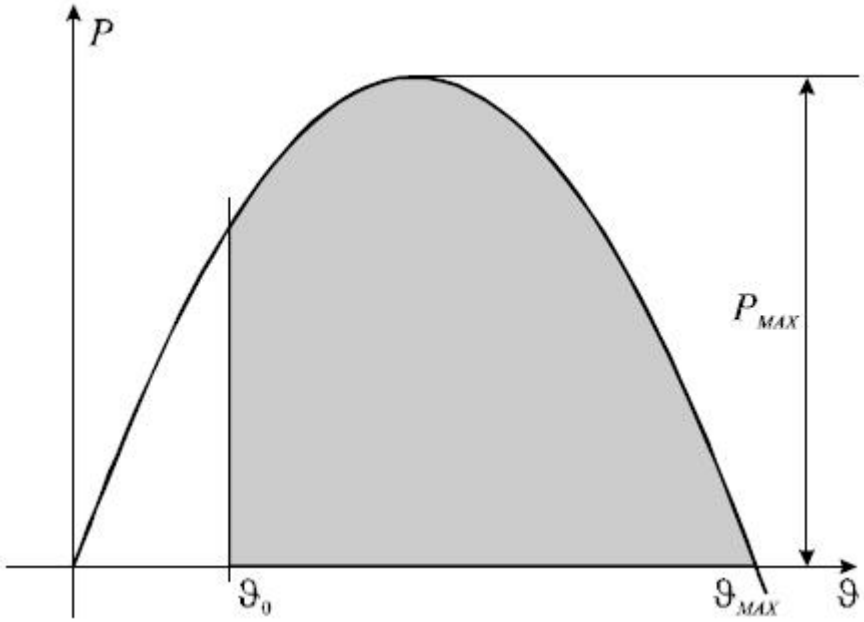
Analogicky:

$$i''_k = i_n = \frac{2u.\sin\frac{\psi_{\max}}{2}}{x''_d} \qquad \psi_{\max} = 2.\arcsin\frac{i_n.x''_d}{2u} = 2.\arcsin\frac{1.0{,}15}{2.1} = 8{,}6°$$

=> Na odchylku fáze je alternátor mnohem citlivější, v protifázi překračuje hodnoty 3f zkratu cca 2x

Fázování alternátoru

Frekvence:



Rovnost brzdné a urychlující energie:

$$\frac{1}{2}J\Delta\Omega^2 = \int_{t_0}^{t_{\max}} P_e(t).dt =$$

$$\cong \int_{\vartheta_0}^{\pi} P_e(\vartheta).\frac{dt}{d\vartheta}d\vartheta \cong$$

$$\cong \int_{\vartheta_0}^{\pi} p_{\max}.\sin\vartheta.\frac{M_n.\Omega_n}{\Omega_n}d\vartheta$$

$$\frac{1}{2}\frac{J.\Omega_n^2}{M_n}\Delta\omega^2 = \frac{1}{2}T_m\Delta\omega^2 = \int_{\vartheta_0}^{\pi} p_{\max}.\sin\vartheta.d\vartheta$$

a tedy

$$\Delta\omega_{\max} = \sqrt{\frac{2}{T_m}\int_{\vartheta_0}^{\pi} p_{\max}.\sin\vartheta.d\vartheta} = \sqrt{\frac{2}{T_m}p_{\max}.(1+\cos\vartheta_0)}$$

Samosynchronizace

Stroj se do sítě připojí nenabuzený na otáčkách blízkých synchronním, budící vinutí je zkratováno

Vzniká proudový ráz:

$$i_k'' \cong \frac{u}{x_t + x_d''}$$

Podobné rozběhu asynchronního stroje s kratší dobou trvání rázu (tzv. asynchronní rozběh)

Využití: Při havarijních stavech

Pracovní oblast alternátoru

<u>Omezení:</u>

- Výkon turbíny
- Mez podbuzení (ztráta stability)
- Oteplení vinutí rotoru
- Oteplení vinutí statoru
- Oteplení čel statoru
- Oteplení rotorového tělesa

Parametrické vyjádření pomocí zátěžného úhlu / fázovým posuvem:

<u>Omezení výkonem turbíny:</u>

$$p = n_t = s.\cos\varphi \qquad q = s.\sin\varphi$$

Jako komplexní funkce tedy:

$$\hat{s} = \frac{n_t}{\cos\varphi}\left(\cos\varphi - j.\sin\varphi\right) = \frac{n_t}{\cos\varphi}.e^{-j.\varphi}$$

Pracovní oblast alternátoru

Omezení budícím proudem:

$$e = x_{ad}.i_f = K.i_f \qquad p = \frac{K.i_{f\max}.u_s}{x_d}.\sin\vartheta \qquad q = \frac{K.i_{f\max}.u_s}{x_d}.\cos\vartheta - \frac{u_s^2}{x_d}$$

Jako komplexní funkce tedy:

$$\hat{s} = \frac{K.i_{f\max}.u_s}{x_d}.\sin\vartheta - j.\frac{K.i_{f\max}.u_s}{x_d}.\cos\vartheta + j.\frac{u_s^2}{x_d} =$$

$$= \frac{K.i_{f\max}.u_s}{x_d}.\cos\left(\frac{\pi}{2} - \vartheta\right) + j.\frac{K.i_{f\max}.u_s}{x_d}.\sin\left(\frac{\pi}{2} - \vartheta\right) + j.\frac{u_s^2}{x_d} =$$

$$= \frac{K.i_{f\max}.u_s}{x_d}.e^{j.\left(\frac{\pi}{2} - \vartheta\right)} + j.\frac{u_s^2}{x_d}$$

Omezení statorovým proudem:

$$\hat{s} = u_s.i_{\max}.e^{-j.\varphi}$$

Pracovní oblast alternátoru

<u>Stabilita:</u>

Pro stabilní řešení pohybové diferenciální rovnice musí být splněno:

$$\frac{\partial p}{\partial \vartheta} > 0$$

Je dána hodnotou $\vartheta_{\max}$ .Uvažujeme-li práci stroje do soustavy neomezeného výkonu:

$$\hat{s} = \frac{e.u_s}{x_d}.\sin\vartheta_{\max} - j.\frac{e.u_s}{x_d}.\cos\vartheta_{\max} + j.\frac{u_s^2}{x_d}$$ (přímka s parametrem e)

Uvažujeme-li práci stroje do soustavy přes vnější reaktanci xv, je při úhlu mezi svorkovým napětím stroje a napětím soustavy ϑ_s :

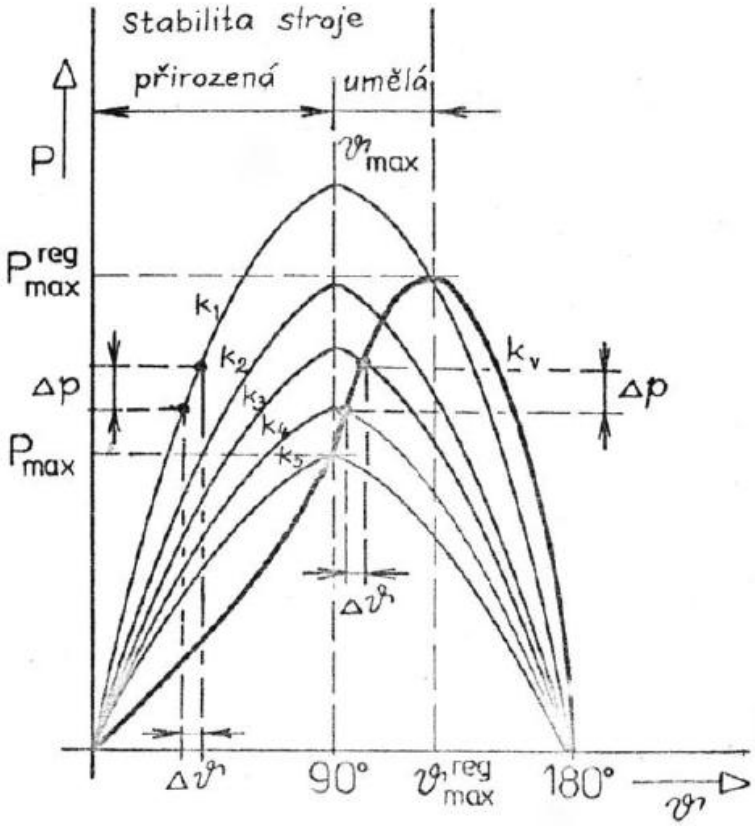
$$\hat{s} = u_s^2 \frac{x_d + x_v}{2.x_d.x_v}.e^{j.\left(\frac{\pi}{2} - 2.\vartheta_s\right)} - j.u_s^2 \frac{x_d - x_v}{2.x_d.x_v}$$ (kružnice s parametrem ϑ_s)

Pracovní oblast alternátoru

<u>Stabilita umělá:</u>

Je-li stroj v režimu řízení „na ruku“ bývá $\vartheta_{max} = 60°$

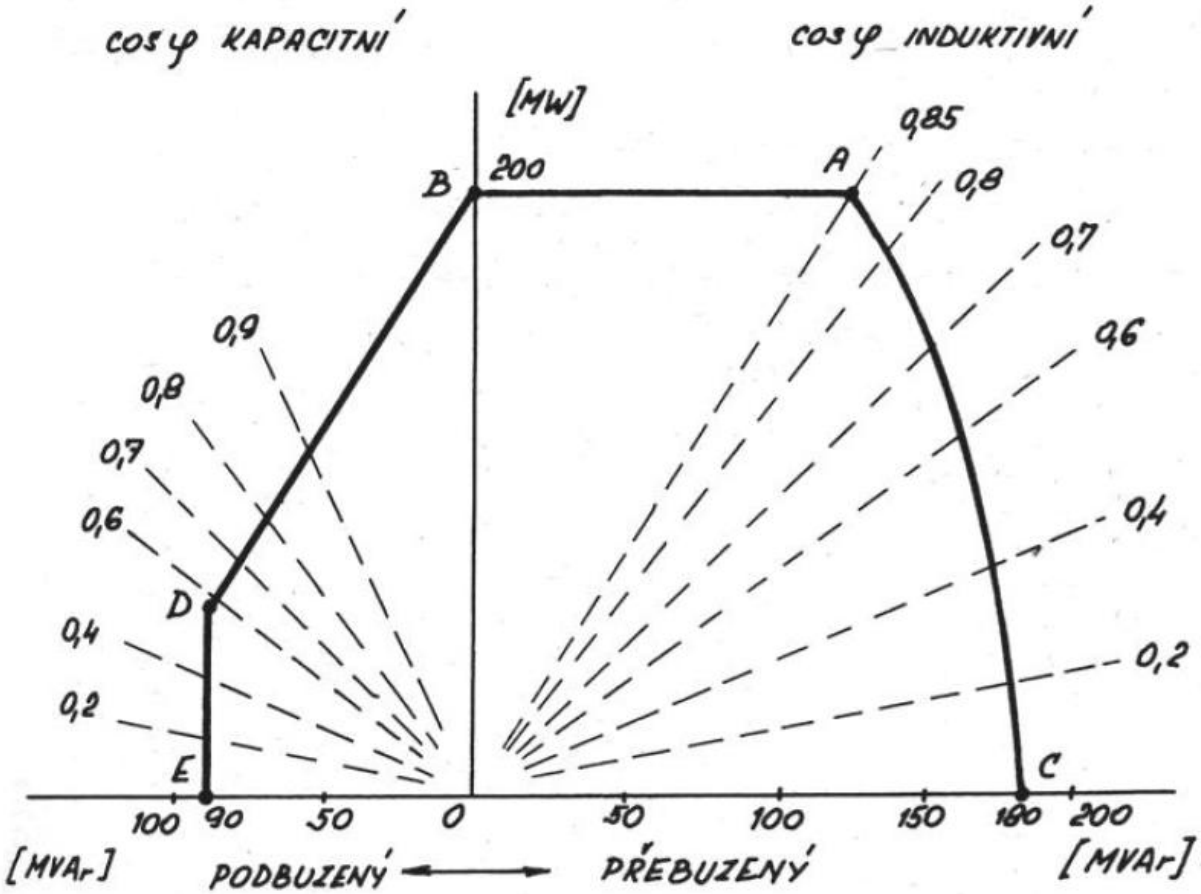
S rychlým regulátorem: $\vartheta_{max} < 90°$



Charakteristika $p(\vartheta)$ s uvažováním regulátoru

Pracovní oblast alternátoru

PQ diagram:



AB - Omezení výkonem turbíny

AC - Oteplení rotorového budícího vinutí

BD - Oteplení čelních konstrukcí

DE - Omezeni statickou stabilitou stroje