

## 15. Pracovní oblast a provozní diagram alternátoru

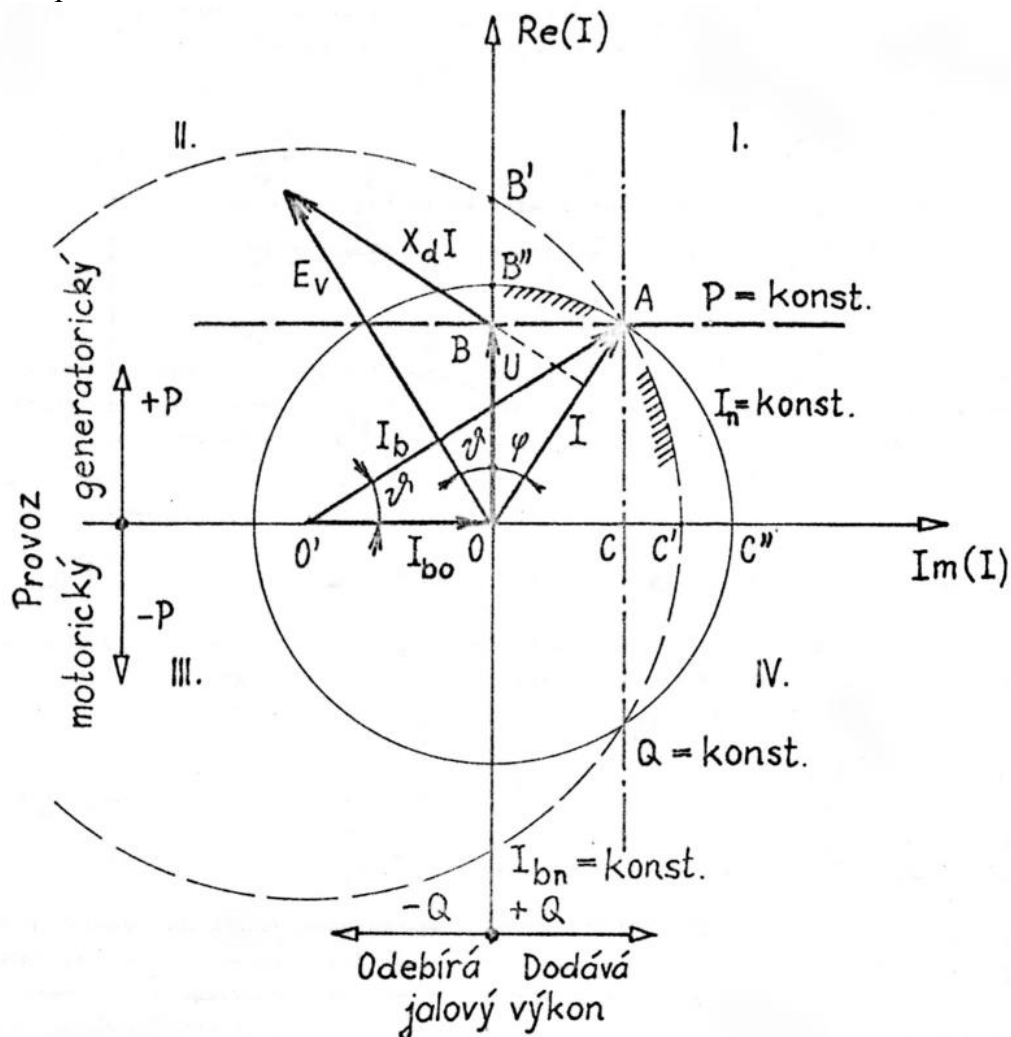
Dovolená pracovní oblast ohraničená maximálním mezním zatížením je určena mnoha faktory, z nichž nejdůležitější jsou:

- Oteplení statorového vinutí
- Oteplení „železa“ magnetického jádra statoru
- Oteplení rotorového budicího vinutí
- Oteplení tělesa rotoru
- Statická stabilita alternátoru

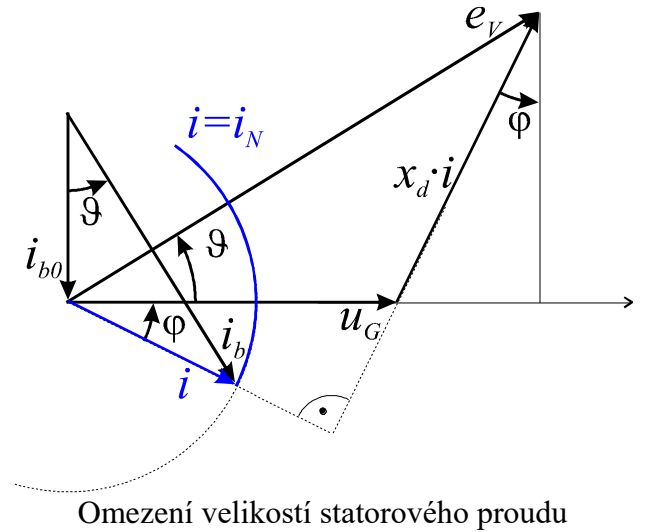
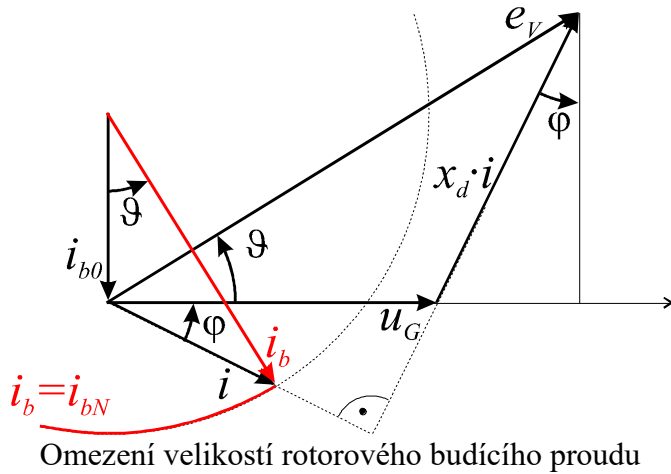
Kromě toho je nutno řídit chod alternátoru dle maximálního dodávaného činného výkonu dodávaného do sítě, který je dán především výkonem turbíny. Komplikovanější je volba velikosti dodávky jalového výkonu, jehož požadavky se v soustavě více mění a je nutno přenos jalového výkonu optimalizovat. Kromě toho musí mít každý stroj jistou výkonovou rezervu aby byl schopen se udržet v synchronismu i v době poruch na síti nebo na budícím obvodu. Podle výsledného P-Q pracovního diagramu se nastavují regulační a chránicí prvky.

### Provoz alternátoru v přebuzeném stavu

Při základním rozboru omezíme pro všechny stavy chod alternátoru tepelnými parametry odpovídajícími jmenovitému chodu. V rotoru to vede přímo na omezení jmenovitou velikostí budicího proudu. Analogicky ve statoru na omezení jmenovitou velikostí statorového proudu:



kde  $|OA| \approx i_N$        $|O'A| \approx i_{bN}$        $|O'O| \approx i_{b0}$   
 $|OB| \approx i_{\check{C}INN\check{Y}}$        $|OC| \approx i_{JALOV\check{Y}}$   
 $|B''A|$  - omezení velikostí satorového proudu  
 $|AC'|$  - omezení velikostí rotorového budícího proudu

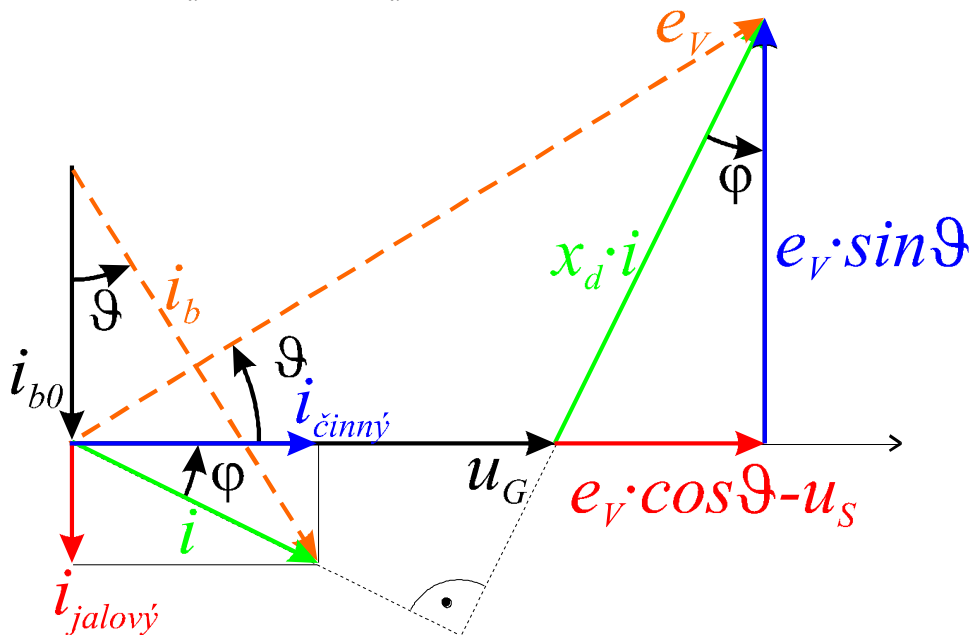


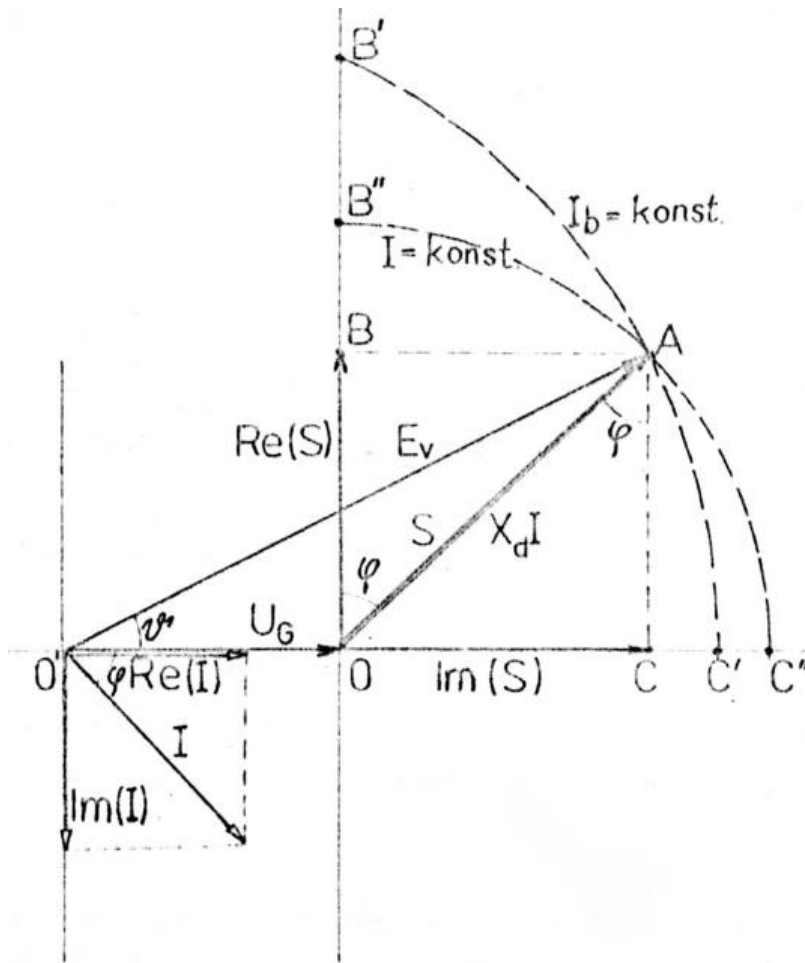
Totéž omezení v napět'ové rovině kde:

$$e_V \approx i_b \quad x_d \cdot i \approx i$$

$$p = \frac{e_V \cdot u_G}{x_d} \sin \vartheta \approx e_V \sin \vartheta = x_d \cdot i \cdot \cos \varphi \approx i_{\check{C}INN\check{Y}}$$

$$q = \frac{u_G \cdot e_V}{x_d} \cos \vartheta - \frac{u_G^2}{x_d} \approx e_V \cos \vartheta - u_G = x_d \cdot i \cdot \sin \varphi \approx i_{JALOV\check{Y}}$$





Po přechodu do napěťové roviny a přesunu počátku do vrcholu napětí sítě lze po změně měřítka zobrazovat přímo činný a jalový výkon.

Zde opět stejně označeny úseky omezení:

$|B''A|$  - omezení velikostí satorového proudu

$|AC'|$  - omezení velikostí rotorového budícího proudu

Měřítka veličin pro  $i_N=1$ ,  $S_N=1$  a  $x_d=2$  jsou:

$$k_U = \frac{i_N \cdot x_d}{|OA|} = \frac{1 \cdot 2}{|OA|}$$

$$k_S = \frac{S_N}{|OA|} = \frac{1}{|OA|}$$

Maximální činný výkon je omezen velikostí jmenovitého zdánlivého výkonu alternátoru  $S_N$ .

Maximální jalový výkon je omezen velikostí budícího proudu a je dán  $|OC'| \approx q_{MAX}$

(přibližně 80%  $S_N$ ). Pro výše uvedené hodnoty:

$$q_{MAX} = k_S \cdot |OC'| = \frac{|OC'|}{|OA|} \quad k_U \cdot |OC'| = e_V - u_G$$

$$q_{MAX} = \frac{1}{|OA|} \cdot \frac{e_V - u_G}{k_U} = \frac{e_V - u_G}{x_d} = i_{JALOVÝ MAX}$$

$$e_V = \sqrt{(u_G + i \cdot x_d \sin \varphi_N)^2 + (i \cdot x_d \cos \varphi_N)^2}$$

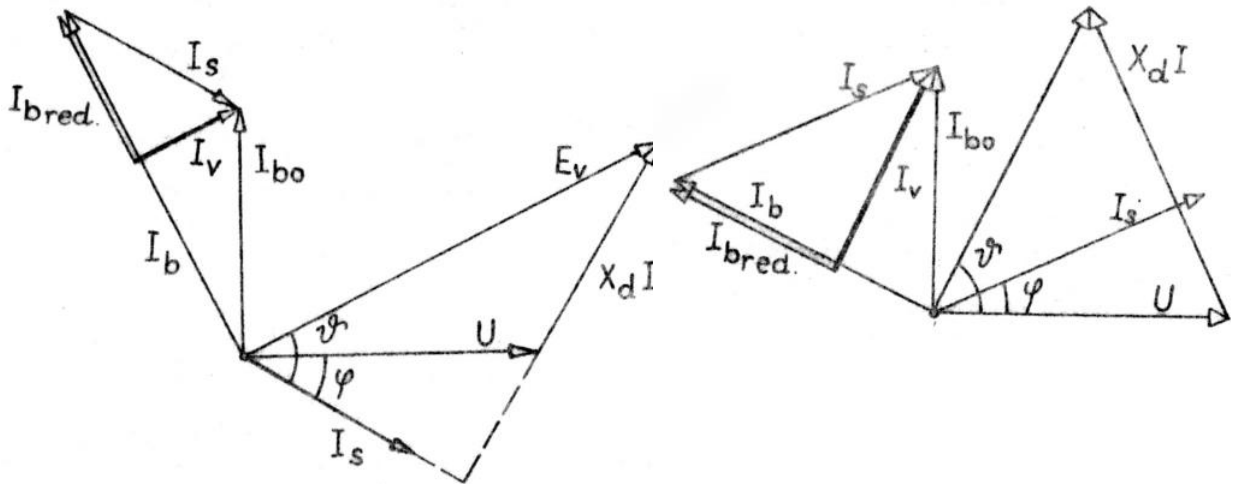
Pro jmenovitý účinník  $\cos \varphi_N = 0.8$ :

$$e_V = \sqrt{(1 + 1 \cdot 2 \cdot 0.6)^2 + (1 \cdot 2 \cdot 0.8)^2} = 2.72 \quad q_{MAX} = \frac{2.72 - 1}{2} = 0.86$$

### Provoz alternátoru v podbuzeném stavu

Tento režim generatorického provozu je obvyklý při odlehčení elektrizační soustavy v noci či o víkend. V této oblasti je omezení chodu dáno zejména oteplením čelních prostorů statoru a statickou stabilitou stroje. Zvýšený ohřev vinutí a konstrukce alternátoru je způsoben změnou rozptylového toku díky jinému prostorovému vzájemnému rozložení polí statoru a rotoru při malém účinníku, kdy je poměrně velký zátěžný úhel (pole se neuzavírá přes pólové nástavce a směr polí statoru a rotoru není natolik „proti sobě“), kromě toho je v tomto stavu

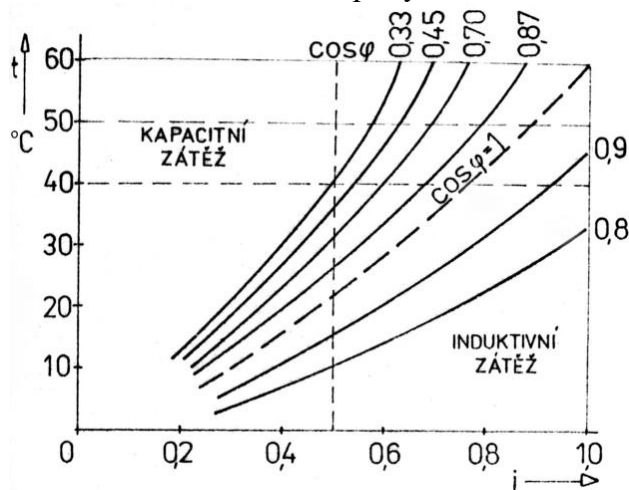
budící proud poměrně malý. Vyhodnocení vlivu oteplení je nutno vyšetřit příslušnými praktickými měřeními na obdobném stroji. Na velikost v různých režimech lze ale usuzovat dle velikosti výsledného vektorového součtu  $I_V$  proudů podílejících se na vytváření magnetického pole v rotoru  $I_{bRED}$  a statoru  $I_S$ :



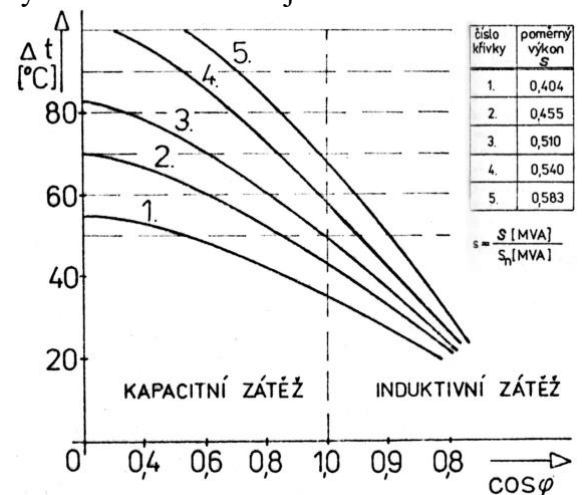
Přebuzený stav

Podbuzený stav

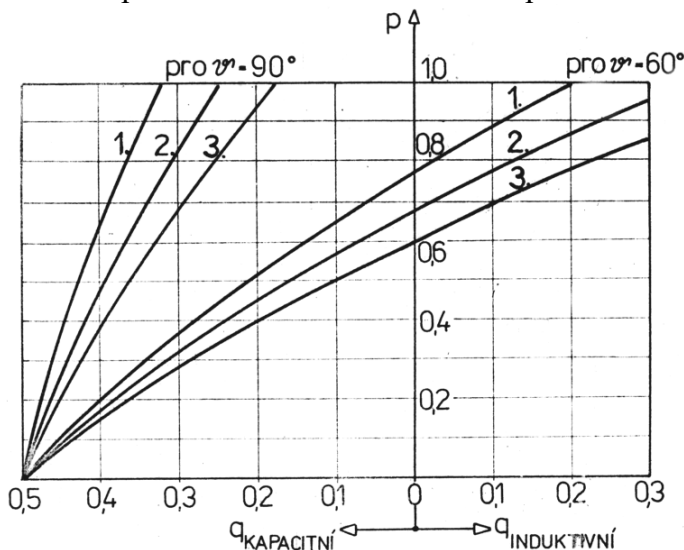
Výsledné oteplení a dovolené zatížení v závislosti na míře kapacitního zatížení alternátoru na základě měření teploty stínící a stahovací desky čel konstrukce stroje:



Oteplení čel statoru v závislosti na proudu



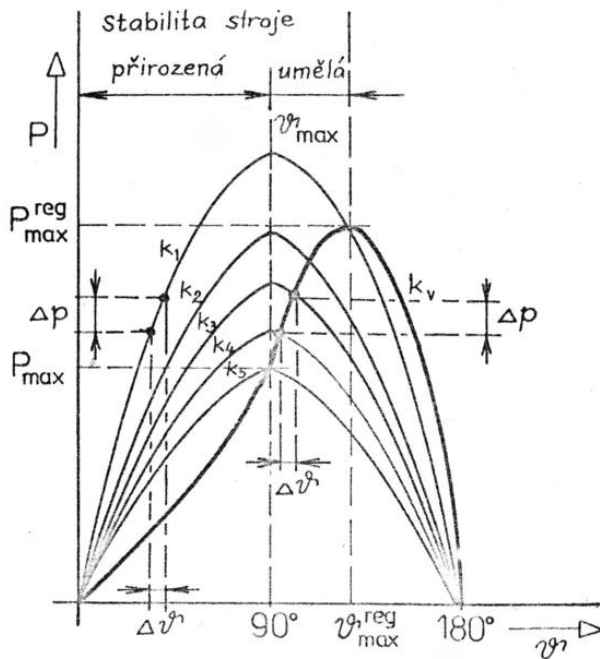
Oteplení čel statoru v závislosti na účinníku



Dovolená induktní zátěž alternátoru pro různou vnější reaktanci:

1. -  $x_v = 0.1$
2. -  $x_v = 0.2$
3. -  $x_v = 0.3$

a pro různý mezní zátěžný úhel  $\vartheta$  při maximální přípustné teplotě čel stroje do 100 °C.



Závislost činného výkonu na zátěžném úhlu na buzení:

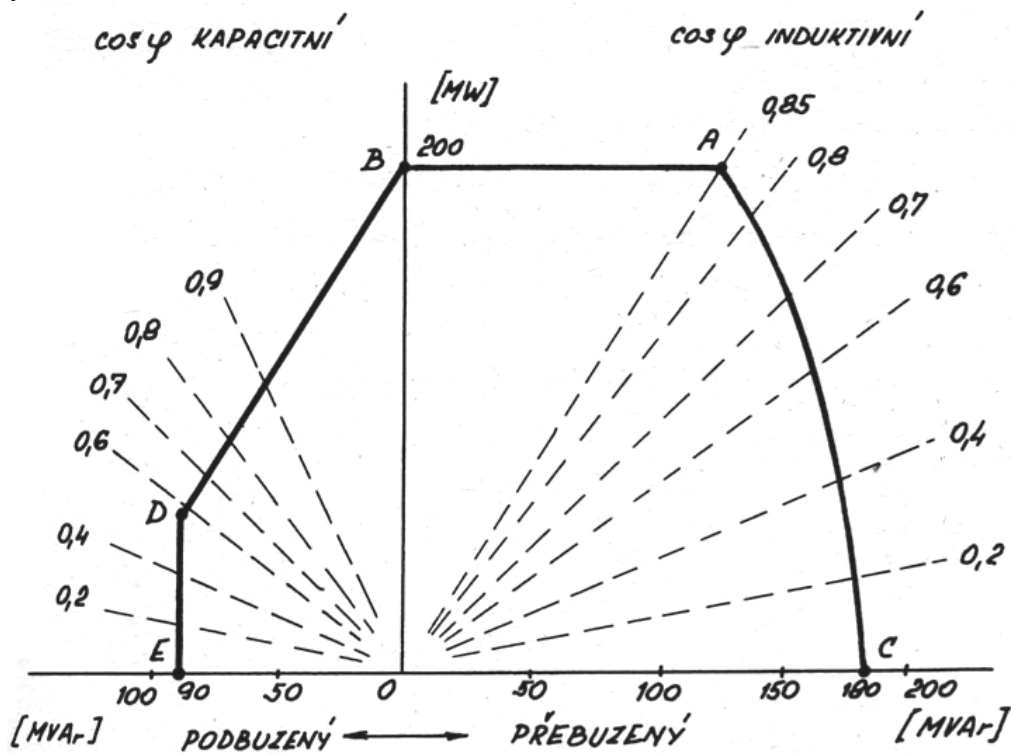
Křivka statické stability je dána potřebou rezervou bloku pro zátěžný úhel, která je ovlivněna dynamikou soustrojí, buzení a regulátoru. Nutno dodržet podmínku:

$$\frac{dP}{d\vartheta} > 0$$

Maximální zátěžný úhel je dán především schopnostmi regulace buzení. Pro stroj bez regulace, nebo s výrazným pásmem necitlivosti regulátoru se omezuje  $\vartheta_{MAX} < 60^\circ$ . U rychlého regulátoru bez pásma necitlivosti lze provozovat  $\vartheta_{MAX} > 90^\circ$ . U hydroalternátorů je mez o něco nižší vzhledem k účinku reluktančního momentu stroje.

### Provozní P-Q diagram alternátoru

Kromě uvedených omezení je nutno pro konečnou konstrukci P-Q diagramu ještě zahrnout vliv maximálního dodávaného činného výkonu soustrojí daný stropem mechanického výkonu turbíny, popřípadě naopak vliv minimální technologické hodnoty tohoto výkonu.



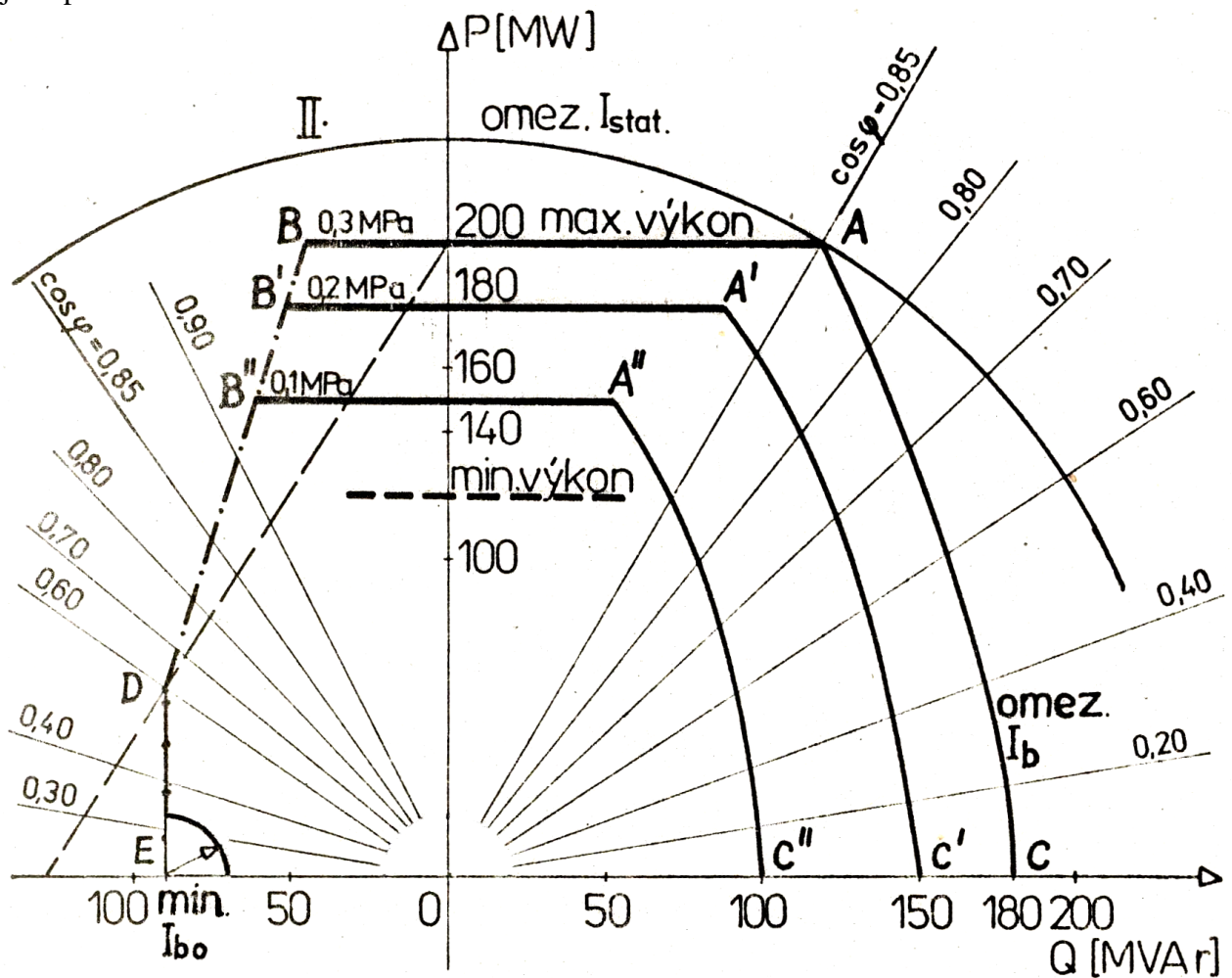
Provozní P-Q diagram alternátoru elektrárenského bloku 235 MVA

Omezení jsou dána:

AB - Omezení výkonem turbíny  
AC - Oteplení rotorového budícího vinutí

BD - Oteplení čelních konstrukcí  
DE - Omezení statickou stabilitou stroje

Výsledný P-Q diagram pro blok 235 MVA je navíc závislý na tlaku chladícího vodíku jako parametru:

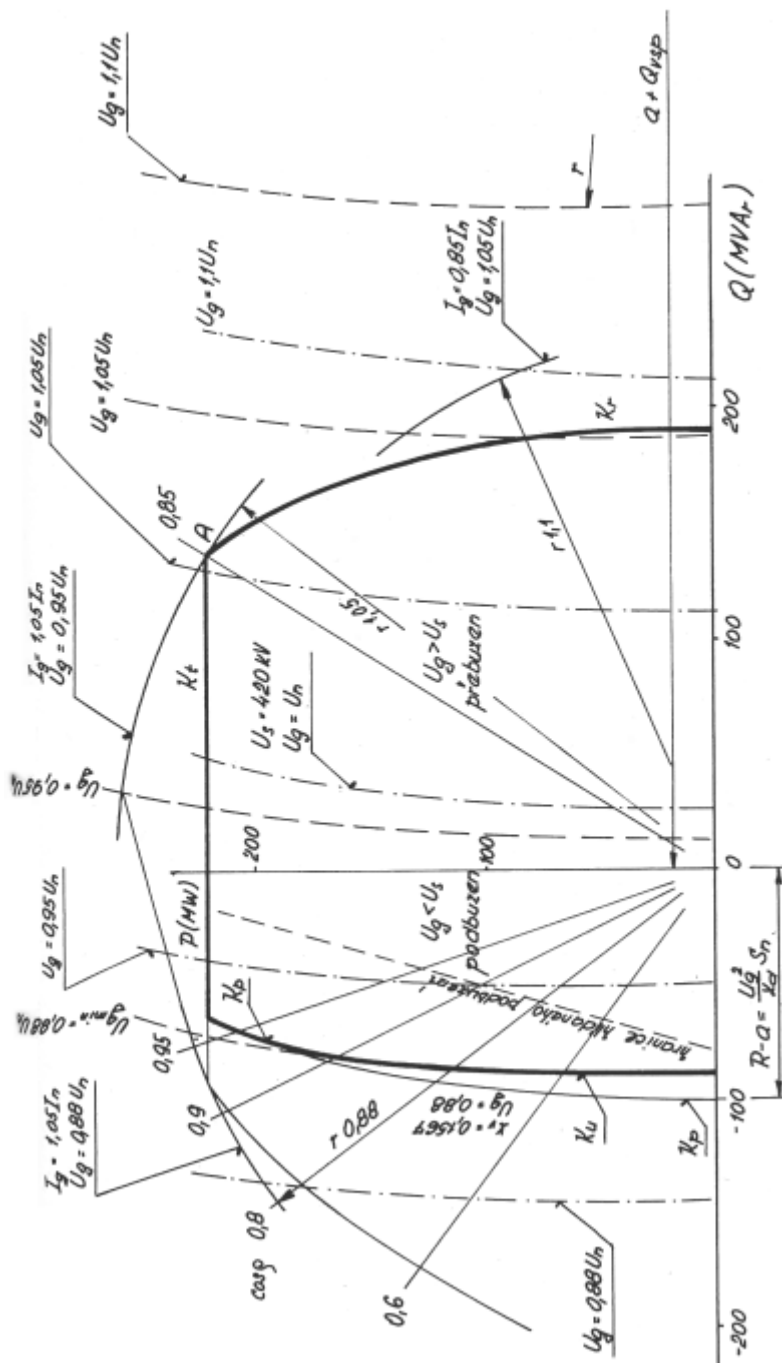


Pro praktické určení mezí platí následující upřesňující parametry:

- Pro svorkové napětí  $u_G \leq 1.05 u_N$  nesmí proud statoru přesáhnout  $0.95 i_N$
- Pro svorkové napětí  $u_G > 1.05 u_N$  nesmí proud statoru přesáhnout  $0.85 i_N$
- Nejvyšší svorkové napětí je  $u_G = 1.1 u_N$  přitom proud statoru nesmí přesáhnout  $0.85 i_N$ , tedy výkon nesmí přesáhnout  $u_G i_N = 1.1 \cdot 0.85 \cdot S_N = 0.935 \cdot S_N$
- Minimální napětí na svorkách je určeno statickou stabilitou při konkrétní vnější reaktanci a proud nesmí přesáhnout  $1.05 i_N$  při  $u_G < 0.95 u_N$ . Napětí pod limit  $u_G < 0.85 u_N$  se provozovat nedoporučuje.
- Velikost oteplení budícího vinutí nesmí přesáhnout dovolenou provozní teplotu

Další omezení vyplývají z provozu blokového transformátoru, transformátoru vlastní spotřeby a sítě:

- Napětí na straně sítě nesmí přesáhnout maximální dovolenou hodnotu
- Při napětí alternátoru  $u_G = 1.1 u_N$  smí blokový transformátor i transformátor vlastní spotřeby pracovat pouze s 90% jmenovitého výkonu  $0.9 \cdot S_{NT}$
- Na spotřebičích ve vlastní spotřebě musí být jmenovité napětí s povolenou tolerancí



Provozní p-Q diagram  
alternátoru  $S_N=259 \text{ MVA}$ ,  
 $\cos \varphi=0.85$ ,  $U_N=15.75 \text{ kV}$ ,  
 $x_d=1.97$

Pracujícího s blokovým  
transformátorem o  $u_K=0.132$ ,  
 $p=15.75 \text{ kV}/420 \text{ kV}$  do sítě  
400 kV s  $x_V=0.1567$ .

---  
Vypočtená křivka  
pro  $U_S = 420 \text{ kV}$

---  
Vypočtená křivka  
pro  $U_S = 400 \text{ kV}$

Omezující křivky:

- $K_r$  - omezení budícím proudem
- $K_t$  - omezení výkonem turbíny
- $K_p$  - omezení statickou stabilitou
- $K_u$  - omezení minimálním svorkovým napětím

## Mezní zatížení alternátoru v impedanční rovině

Z fázorového diagramu alternátoru bylo odvozeno:

$$p_S = u \cdot i \cdot \cos \varphi = \frac{u_S \cdot e_V}{x_d} \sin \vartheta \quad q_S = u_S \cdot i \cdot \sin \varphi = \frac{u_S \cdot e_V}{x_d} \cos \vartheta - \frac{u_S^2}{x_d}$$

$$s_S = p_S - j \cdot q_S = \frac{u_S \cdot e_V}{x_d} \sin \vartheta - j \frac{u_S \cdot e_V}{x_d} \cos \vartheta + j \frac{u_S^2}{x_d} =$$

$$s_S = \frac{u_S \cdot e_V}{x_d} \cos \left( \frac{\pi}{2} - \vartheta \right) - j \frac{u_S \cdot e_V}{x_d} \sin \left( \frac{\pi}{2} - \vartheta \right) + j \frac{u_S^2}{x_d} = \frac{u_S \cdot e_V}{x_d} e^{-j \left( \frac{\pi}{2} - \vartheta \right)} + j \frac{u_S^2}{x_d}$$

### Omezení velikostí budícího proudu

$$|e_V| = |x_{dF} \cdot i_F| \Rightarrow e_{V \text{ MAX}} = c \cdot i_{b \text{ MAX}}$$

$$s_{\text{MAX1}} = \frac{c \cdot i_{b \text{ MAX}} \cdot u_S}{x_d} e^{-j \left( \frac{\pi}{2} - \vartheta \right)} + j \frac{u_S^2}{x_d}$$

$$z_{\text{MAX1}} = \frac{u_S^2}{s_{\text{MAX1}}} = \frac{u_S \cdot x_d \cdot c \cdot i_{b \text{ MAX}}}{c^2 \cdot i_{b \text{ MAX}}^2 - u_S^2} e^{j \left( \frac{\pi}{2} - \vartheta \right)} + j \frac{x_d \cdot u_S^2}{c^2 \cdot i_{b \text{ MAX}}^2 - u_S^2}$$

### Omezení velikostí statorového proudu

$$s_{\text{MAX2}} = u_S \cdot i_{\text{MAX}} \cdot e^{-j \cdot \varphi} \quad z_{\text{MAX2}} = \frac{u_S^2}{s_{\text{MAX2}}} = \frac{u_S}{i_{\text{MAX}}} e^{j \cdot \varphi}$$

### Omezení mechanickým výkonem turbíny

$$s_{\text{MAX3}} = \frac{P_{\text{MAX}}}{\cos \varphi} \cdot e^{-j \cdot \varphi} \quad z_{\text{MAX3}} = \frac{u_S^2}{s_{\text{MAX3}}} = \frac{u_S^2}{2 \cdot P_{\text{MAX}}} e^{j \cdot \varphi} + \frac{u_S^2}{2 \cdot P_{\text{MAX}}}$$

### Omezení činným motorickým výkonem (odebíraným ze sítě)

$$s_{\text{MAX4}} = -\frac{\Delta p}{\cos \varphi} \cdot e^{-j \cdot \varphi} \quad z_{\text{MAX4}} = \frac{u_S^2}{s_{\text{MAX4}}} = \frac{u_S^2}{2 \cdot \Delta p} e^{j \cdot \varphi} - \frac{u_S^2}{2 \cdot \Delta p}$$

### Omezení mezí stability

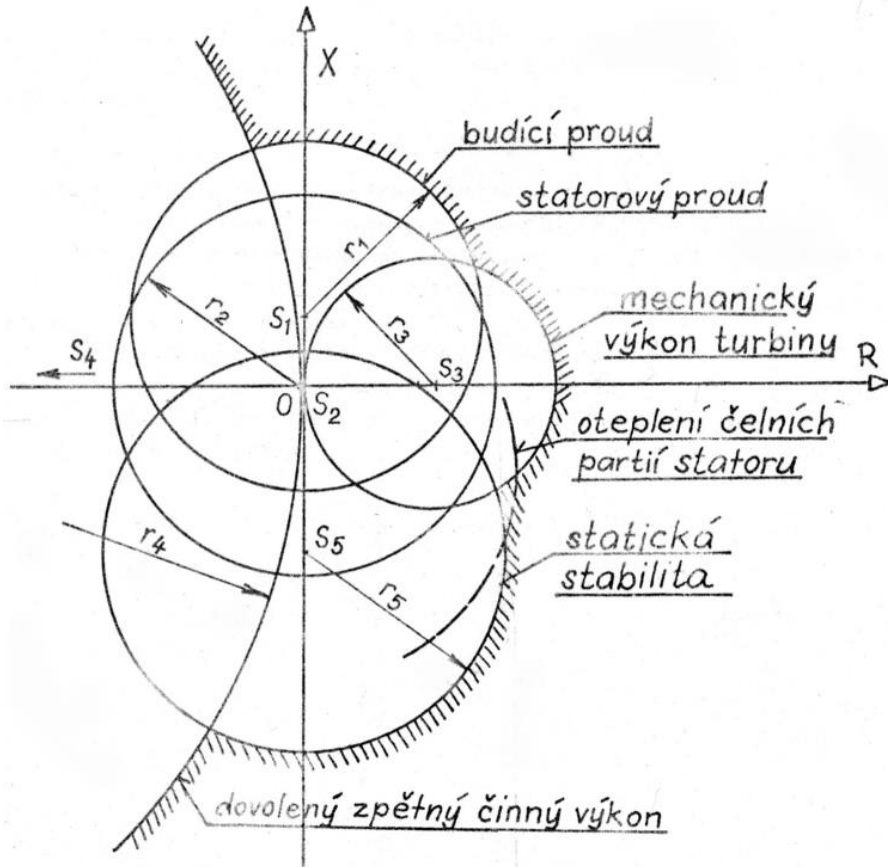
Nutno uvažovat zátěžný úhel mezi svorkami a sítí:

$$s_{\text{MAX5}} = u_S^2 \frac{x_d + x_S}{2 \cdot x_d \cdot x_S} e^{-j \left( 2\vartheta_S - \frac{\pi}{2} \right)} - j u_S^2 \frac{x_d - x_S}{2 \cdot x_d \cdot x_S}$$

$$z_{\text{MAX5}} = \frac{x_d + x_S}{2} e^{-j \left( 2\vartheta_S - \frac{\pi}{2} \right)} - j \cdot \frac{x_d - x_S}{2}$$



Výsledný omezující stavový diagram v impedanční rovině:



Transformace z roviny P-Q do impedanční s pomocí inverzního zobrazení přes jednotkovou kružnici:

