

## 15. Pracovní oblast a provozní diagram alternátoru

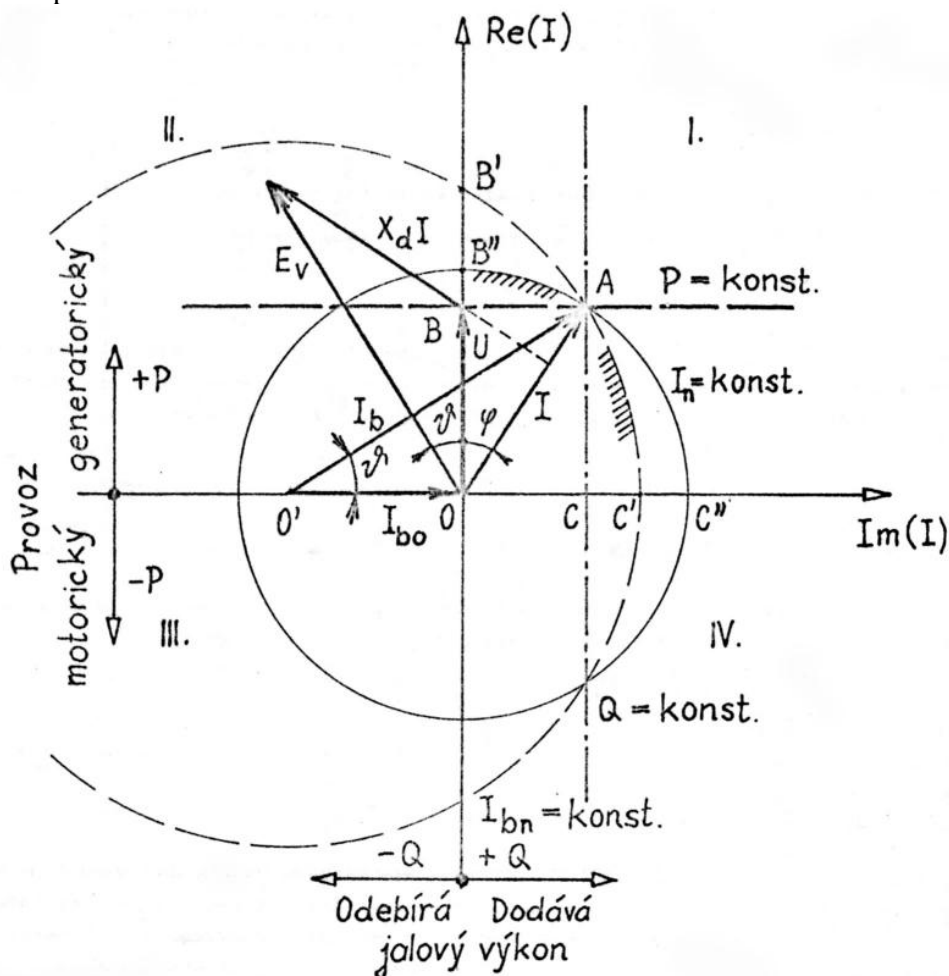
Dovolená pracovní oblast ohraničená maximálním mezním zatížením je určena mnoha faktory, z nichž nejdůležitější jsou:

- Oteplení statorového vinutí
- Oteplení „železa“ magnetického jha statoru
- Oteplení rotorového budícího vinutí
- Oteplení tělesa rotoru
- Statická stabilita alternátoru

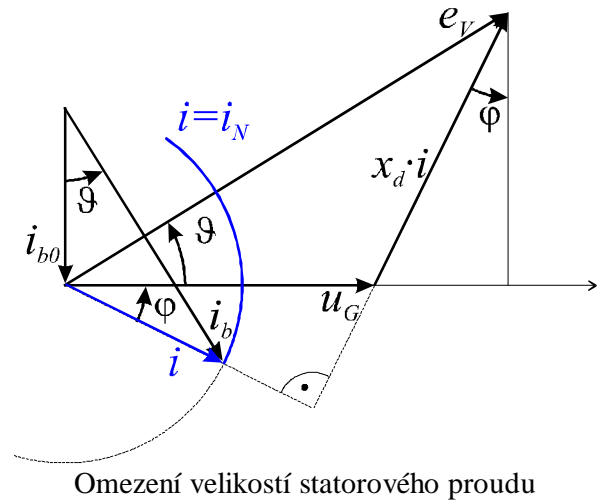
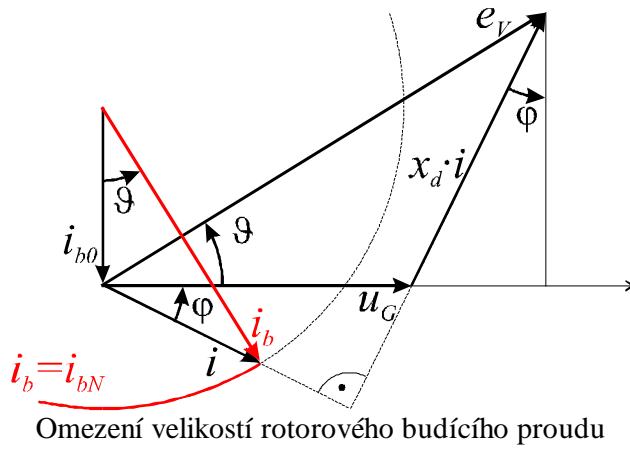
Kromě toho je nutno řídit chod alternátoru dle maximálního dodávaného činného výkonu dodávaného do sítě, který je dán především výkonem turbíny. Komplikovanější je volba velikosti dodávky jalového výkonu, jehož požadavky se v soustavě více mění a je nutno přenos jalového výkonu optimalizovat. Kromě toho 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 chránící 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 budícího proudu. Analogicky ve statoru na omezení jmenovitou velikostí statorového proudu:



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

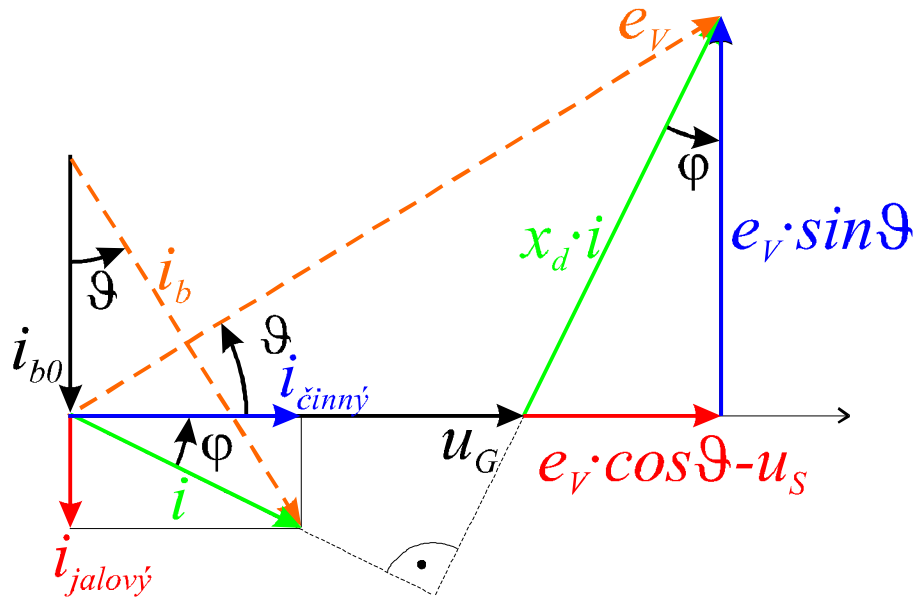


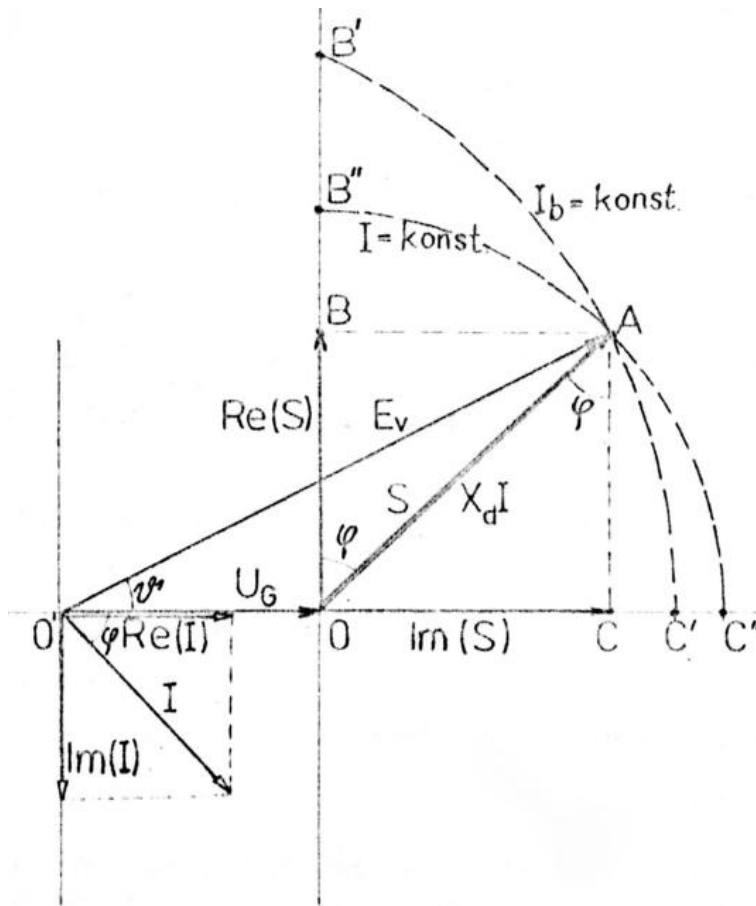
Totéž omezení v napěťové rovině kde:

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

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

$$q = \frac{u_G \cdot e_V}{x_d} \cos J - \frac{u_G^2}{x_d} \approx e_V \cos J - u_G = x_d \cdot i \cdot \sin j \approx i_{JALOV\acute{Y}}$$





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 statorového 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:

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

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

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

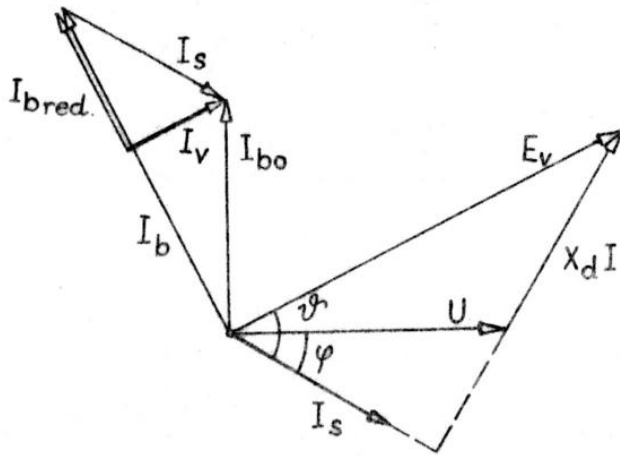
Pro jmenovitý účinník  $\cos j_N = 0.8$ :

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

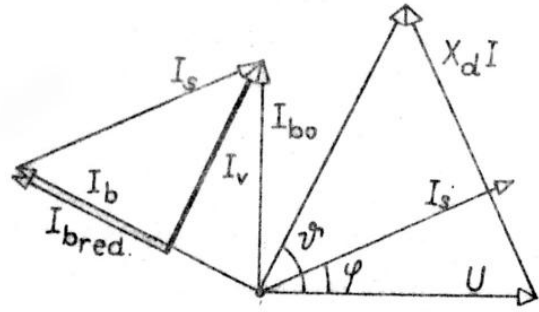
### Provoz alternátoru v podbuzeném stavu

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 podléjících se na vytváření magnetické pole v rotoru  $I_{bRED}$  a statoru  $I_S$ :

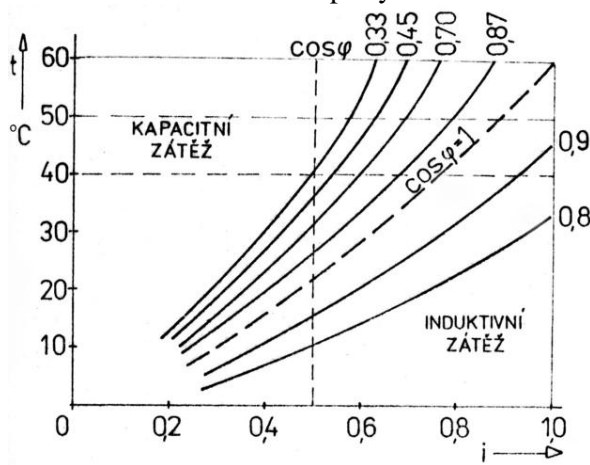


Přebuzení stav

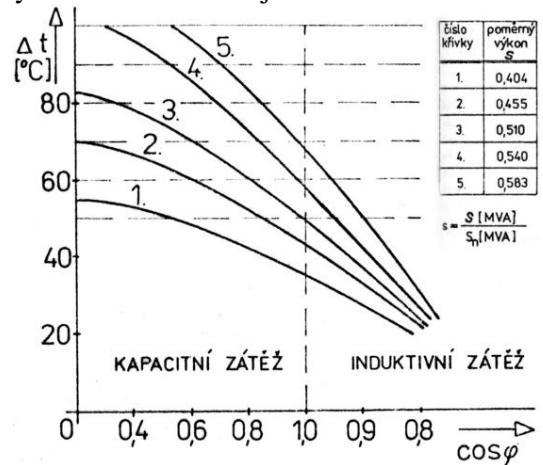


Podbuzení stav

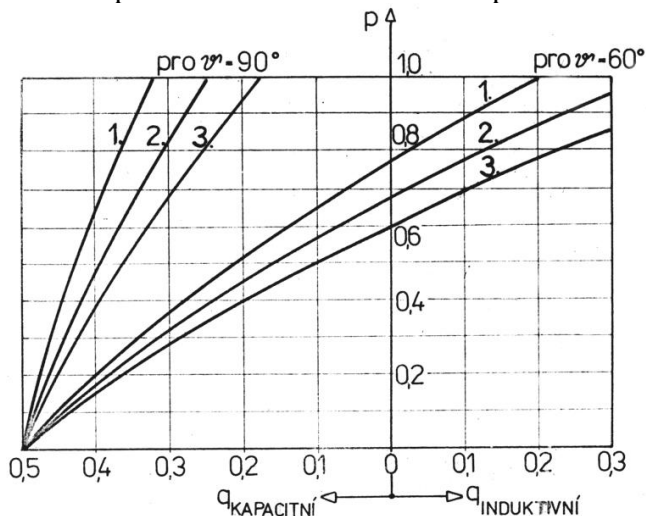
Výsledné oteplení a dovolené zatížení v závislosti na míře kapacitního zatížení alternátoru na základě měření teploty stínící a stahovací desky čel konstrukce stroje:



Oteplení čel statoru v závislosti na proudu



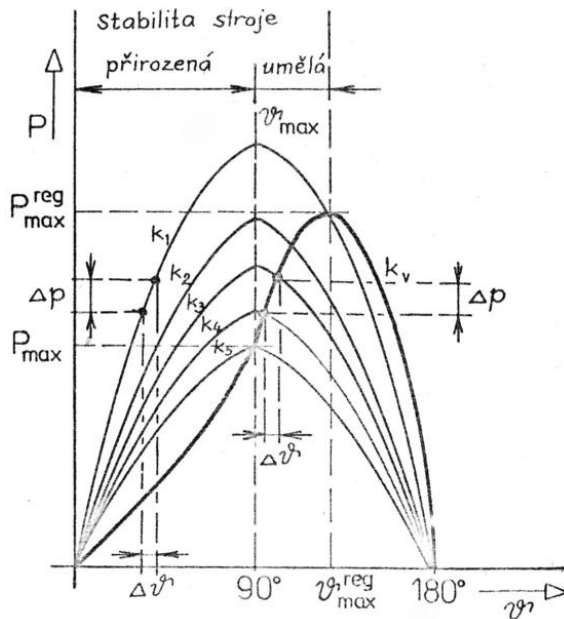
Oteplení čel statoru v závislosti na účinnku



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:

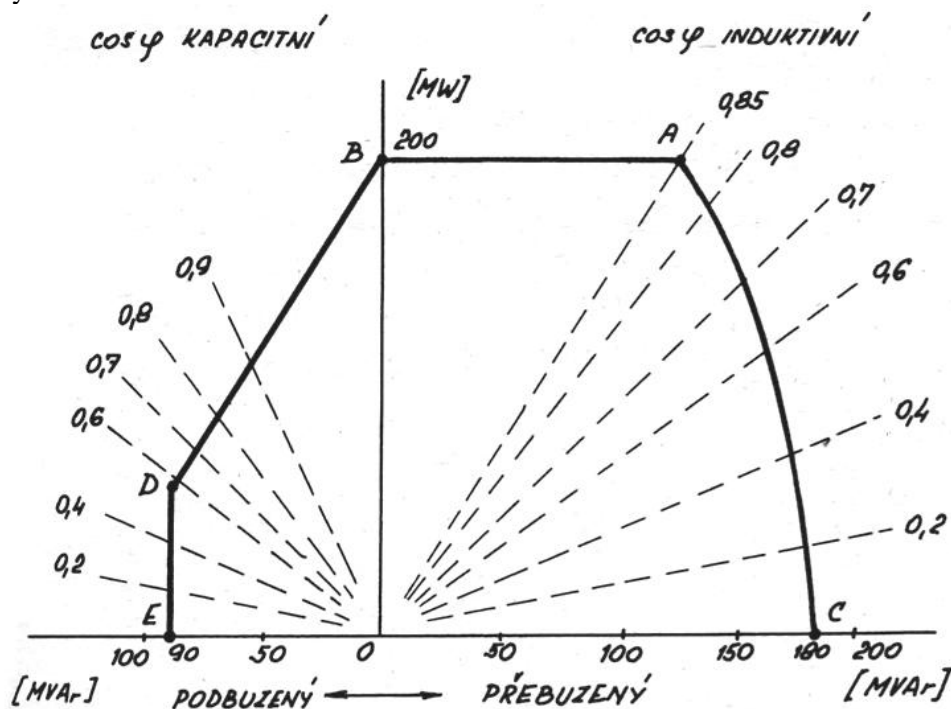
Křivka statické stability je dána potřebou rezervou bloku pro zátěžný úhel, která je ovlivněna dynamikou soustrojí, buzení a regulátoru. Nutno dodržet podmínku:

$$\frac{dP}{dJ} > 0$$

Maximální zátěžný úhel je dán 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.



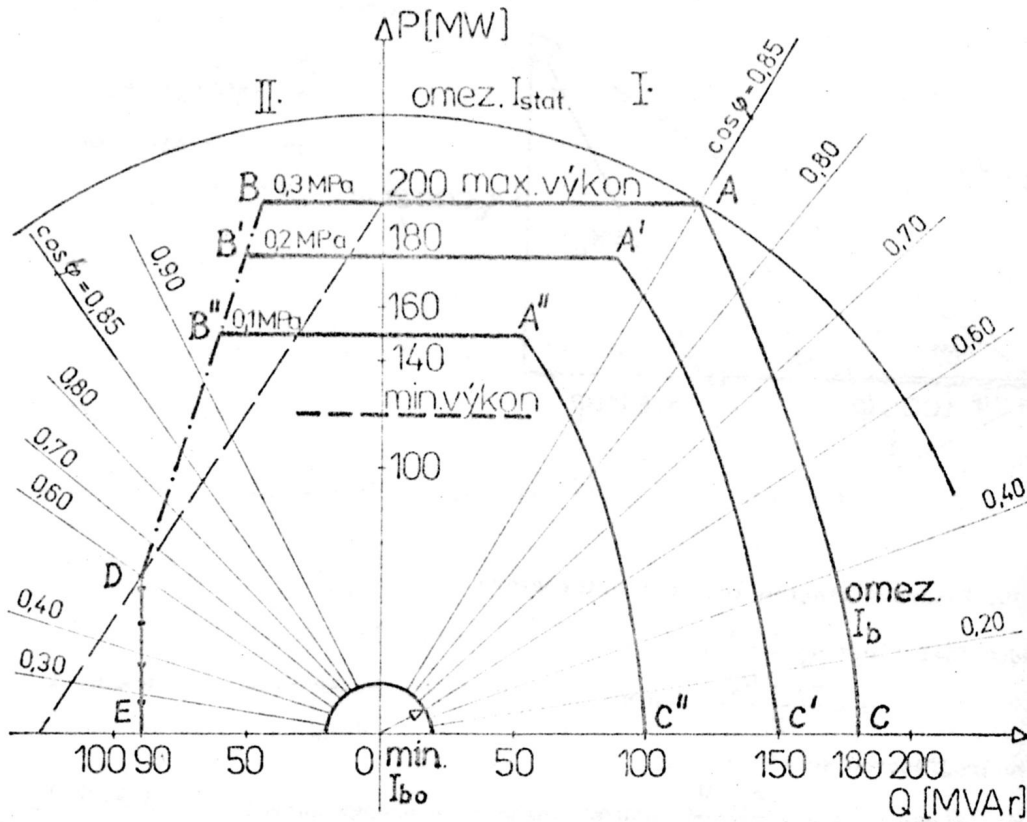
Provozní P-Q diagram alternátoru elektrárenského bloku 235 MVA

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:

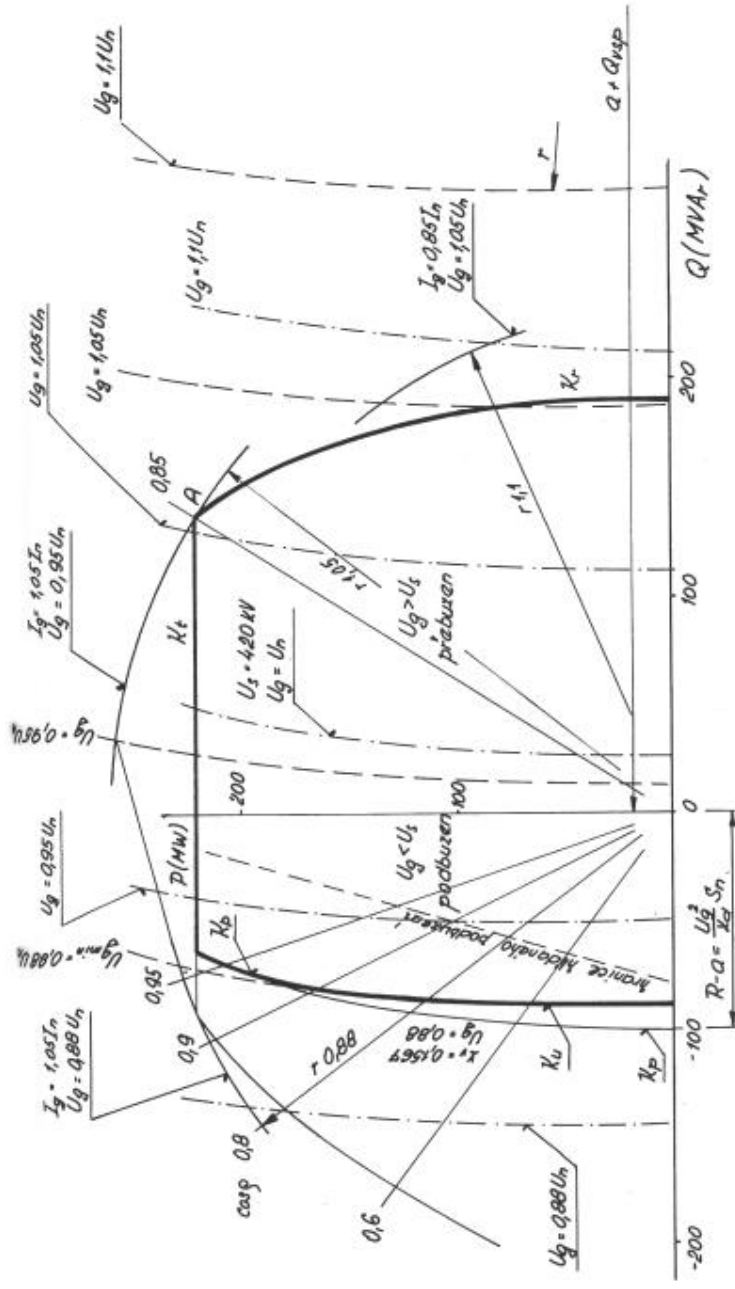


Pro praktické určení mezí platí následující upřesňující parametry:

- Pro svorkové napětí  $u_G \leq 1.05 \cdot u_N$  nesmí proud satoru přesáhnout  $0.95 \cdot i_N$
- Pro svorkové napětí  $u_G > 1.05 \cdot u_N$  nesmí proud satoru přesáhnout  $0.85 \cdot i_N$
- Nejvyšší svorkové napětí je  $u_G = 1.1 \cdot u_N$  přitom proud satoru nesmí přesáhnout  $0.85 \cdot i_N$ , tedy výkon nesmí přesáhnout  $u_G \cdot i_N = 1.1 \cdot 0.85 \cdot s_N = 0.935 \cdot s_N$
- Minimální napětí na svorkách je určené statickou stabilitou při konkrétní vnější reaktanci a proud nesmí přesáhnout  $1.05 \cdot i_N$  při  $u_G < 0.95 \cdot u_N$ . Napětí pod limit  $u_G < 0.85 \cdot u_N$  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  $u_G = 1.1 \cdot u_N$  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  $S_N=259$  MVA,  
 $\cos \varphi=0.85$ ,  $U_N=15.75$  kV,  
 $x_d=1.97$   
 Pracujícího s blokovým  
 transformátorem o  $u_K=0.132$ ,  
 $p=15.75$  kV/420 kV do sítě  
 400 kV s  $x_V=0.1567$ .

-----  
 Vypočtená křivka  
 pro  $U_S = 420$  kV

-----  
 Vypočtená křivka  
 pro  $U_S = 400$  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:

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

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

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

#### Omezení velikostí budícího proudu

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

$$s_{\text{MAX}1} = \frac{c \cdot i_{b \text{ MAX}} \cdot u_S}{x_d} e^{-j\left(\frac{p}{2} - J\right)} + j \frac{u_S^2}{x_d}$$

$$z_{\text{MAX}1} = \frac{u_S^2}{s_{\text{MAX}1}} = \frac{u_S \cdot x_d \cdot c \cdot i_{b \text{ MAX}}}{c^2 \cdot i_{b \text{ MAX}}^2 - u_S^2} e^{j\left(\frac{p}{2} - J\right)} + j \frac{x_d \cdot u_S^2}{c^2 \cdot i_{b \text{ MAX}}^2 - u_S^2}$$

#### Omezení velikostí statorového proudu

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

#### Omezení mechanickým výkonem turbíny

$$s_{\text{MAX}3} = \frac{p_{\text{MAX}}}{\cos j} \cdot e^{-j \cdot j} \quad z_{\text{MAX}3} = \frac{u_S^2}{s_{\text{MAX}3}} = \frac{u_S^2}{2 \cdot p_{\text{MAX}}} e^{j \cdot j} + \frac{u_S^2}{2 \cdot p_{\text{MAX}}}$$

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

$$s_{\text{MAX}4} = -\frac{\Delta p}{\cos j} \cdot e^{-j \cdot j} \quad z_{\text{MAX}4} = \frac{u_S^2}{s_{\text{MAX}4}} = \frac{u_S^2}{2 \cdot \Delta p} e^{j \cdot j} - \frac{u_S^2}{2 \cdot \Delta p}$$

#### Omezení mezí stability

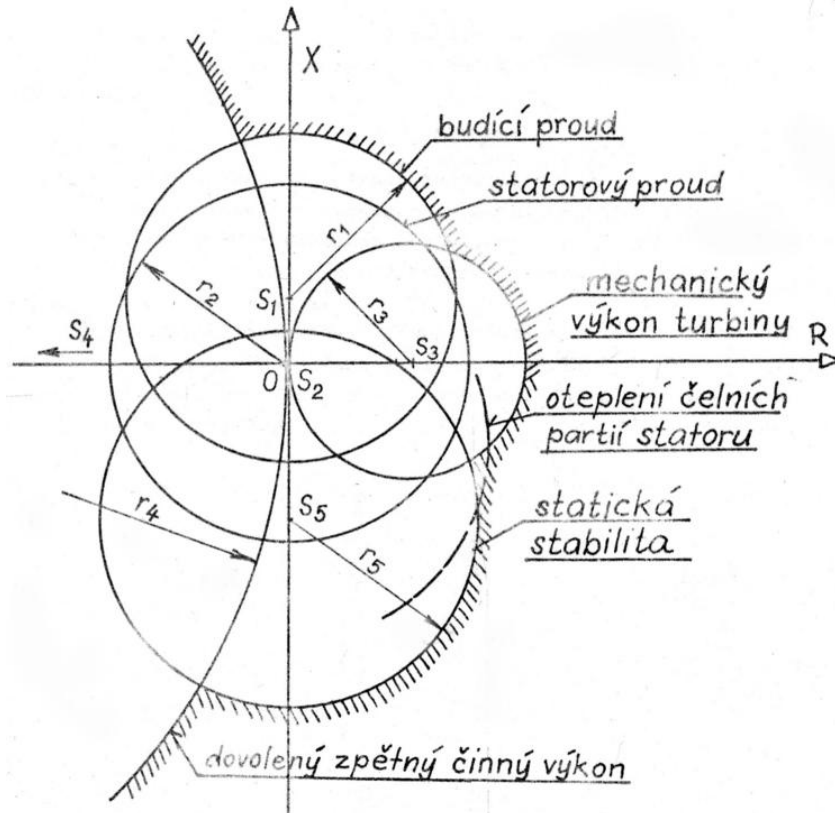
Nutno uvažovat zátěžný úhel mezi svorkami a sítí:

$$s_{\text{MAX}5} = u_S^2 \frac{x_d + x_S}{2 \cdot x_d \cdot x_S} e^{-j\left(2J_s - \frac{p}{2}\right)} - j \cdot u_S^2 \frac{x_d - x_S}{2 \cdot x_d \cdot x_S}$$

$$z_{\text{MAX}5} = \frac{x_d + x_S}{2} e^{-j\left(2J_s - \frac{p}{2}\right)} - j \cdot \frac{x_d - x_S}{2}$$



Výsledný omezující stavový diagram v impedanční rovině:



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

