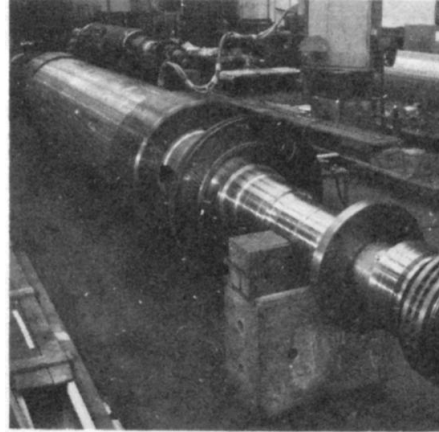
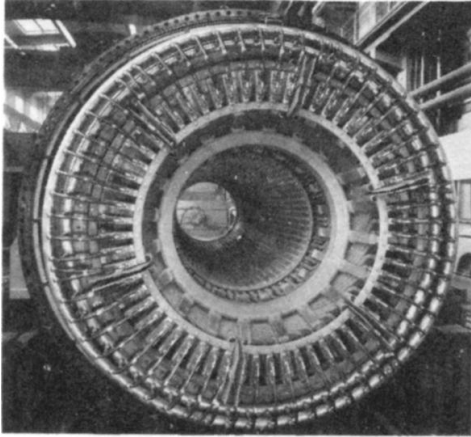


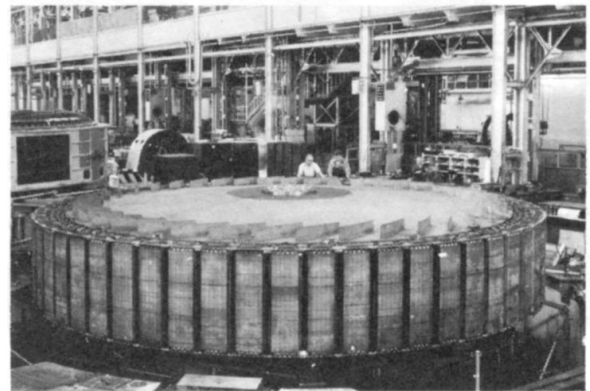
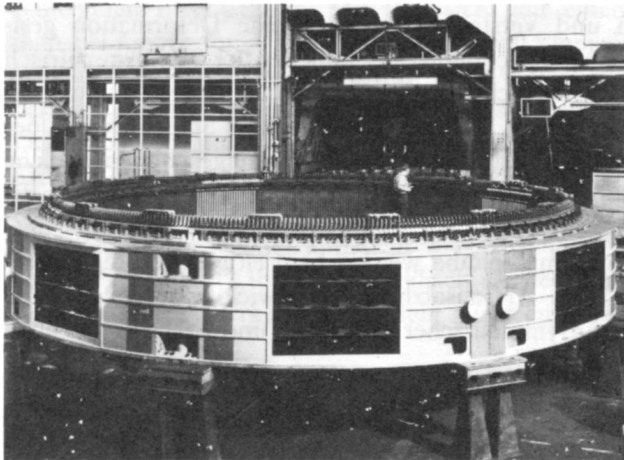
## 12. Alternátory

Alternátory velkých výkonů jsou synchronní stroje (asynchronní pouze pro malé výkony). Dle použité turbíny dělíme stroje na:

- Turboalternátory pracující s parními turbínami – alternátory s hladkým rotorem obvykle dvojpólové pro velké výkony (přes 1000 MVA) výjimečně čtyřpólové (otáčky 3000, resp. 1500 ot./min) (na obrázku 400 MVA)



- Hydroalternátory pracující s vodními turbínami – alternátory s vyniklými póly obvykle vícepólové (na obrázku 61 MVA, 100 ot./min)



Počet pólů je dán vztahem: 
$$P_p = \frac{60 \cdot f}{n}$$

Výkon alternátoru je omezen vzhledem k vývinu tepelných ztrát velikostí jeho objemu, který je dán vnějšími rozměry dle dopravních a manipulačních možností. Průměr rotoru je navíc omezen odstředivými silami. Stroje s hladkým rotorem velkých výkonů jsou tedy spíše protáhlého válcového tvaru. Kromě toho je ještě nutno brát v úvahu celkovou délku hřídele a vlastní kmity soustrojí. Pro vyšší výkony s rostoucím napětím a navyšující se nutnou izolací se možnost přirozeného chlazení ještě komplikuje. U vyšších výkonů nelze tedy rozměry dostatečně navyšovat a rostou tepelné ztráty v jednotce objemu a je tedy nutné aktivní chlazení:

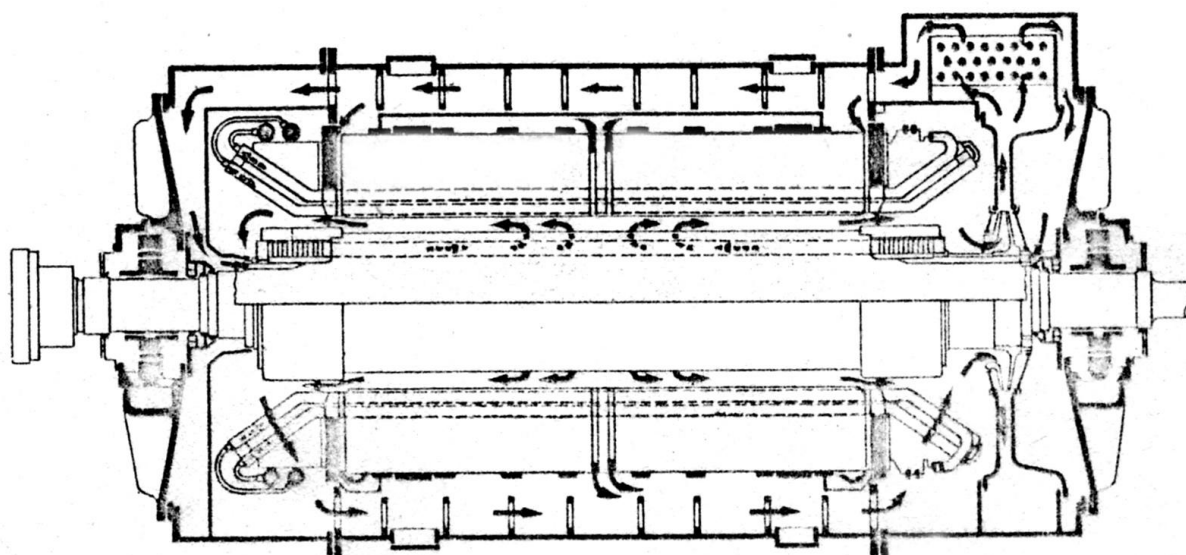
- Vzduchové chlazení podporované axiálními ventilátory na ose, vzduch cirkuluje přes vodní chlazení (pro výkony do 50 MW, ve světě až 200 MW pro svou jednoduchost a levnost přes nižší účinnost)

- Přímé chlazení magnetického obvodu rotoru vodíkem a nepřímé chlazení statoru vodíkem
- Přímé chlazení statorového vinutí vodou

Izolace vinutí je provedena termosetickou nebo pryskyřičnou umělou hmotou RELANEX.

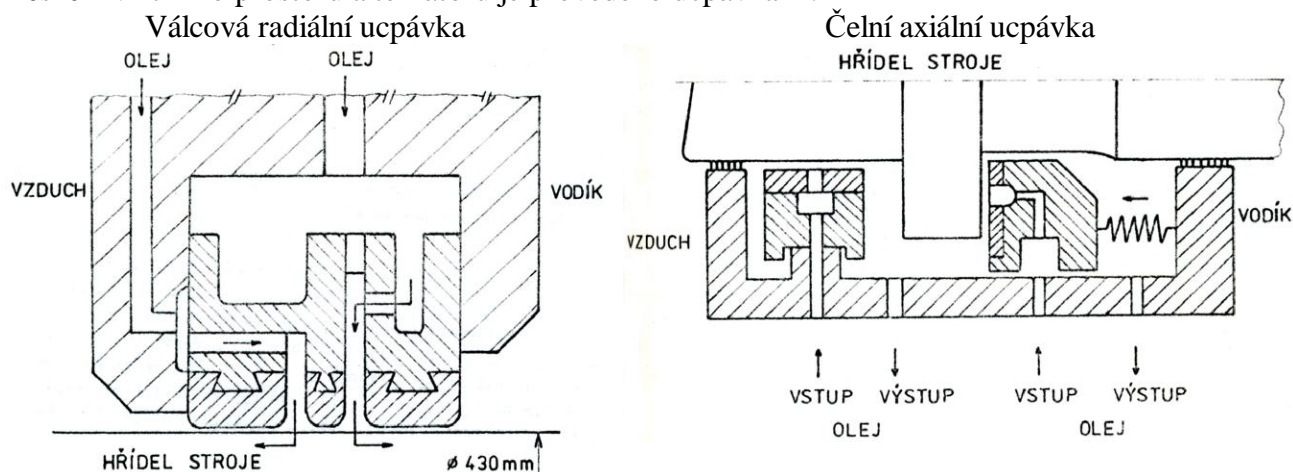
### Přímé chlazení rotoru a nepřímé statoru vodíkem

Vodík umožňuje zvýšení chlazení při nižších ventilačních ztrátách. Konstrukce vede na vyšší využití objemu a účinnost stroje. Pro výkony 60 až 165 MW. Tlak vodíku je 0.2 až 0.4 MPa. Rotor má duté vodiče a jimi se tlakově prohání vodík, stator je chlazen rovněž axiálními kanály v magnetického obvodu. Cirkulace je opět podpořena axiálními ventilátory a chlazení vodou.



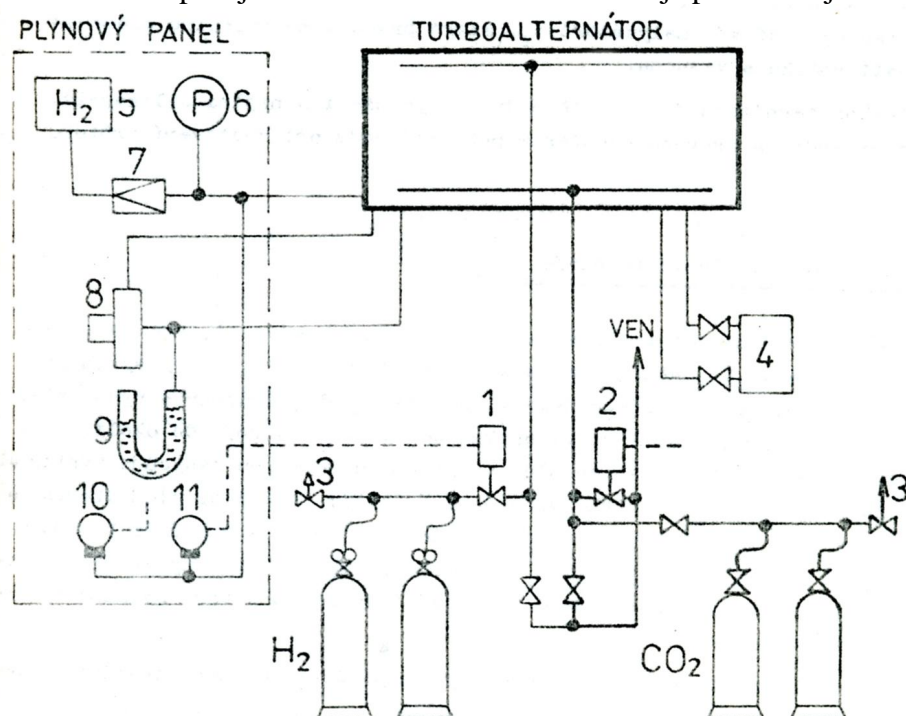
Vodík je třaskavý v koncentraci 4 až 75 % se vzduchem. Pro plnění a vyprazdňování je proto nutno použít inertní  $\text{CO}_2$ . Při provozu se udržuje čistota  $\text{H}_2$  98% kriticky nízká hodnota je 92%. Plnění je elektrolytickým vodíkem o čistotě 99.5%, tlak z lahví je redukován na 0.5 MPa. Často je projektováno více bloků se společným vodíkovým hospodářstvím a případným plynojemem mezi lahvemi a alternátory.

Těsnění vnitřního prostoru alternátoru je provedeno ucpávkami:



Využíván je systém dvou těsnících olejů aby se rozpuštěný vodík nemísil s případným rozpuštěným vzduchem.

Plynové hospodářství zabezpečuje čistotu a tlak vodíku a umožňuje plnění stroje:



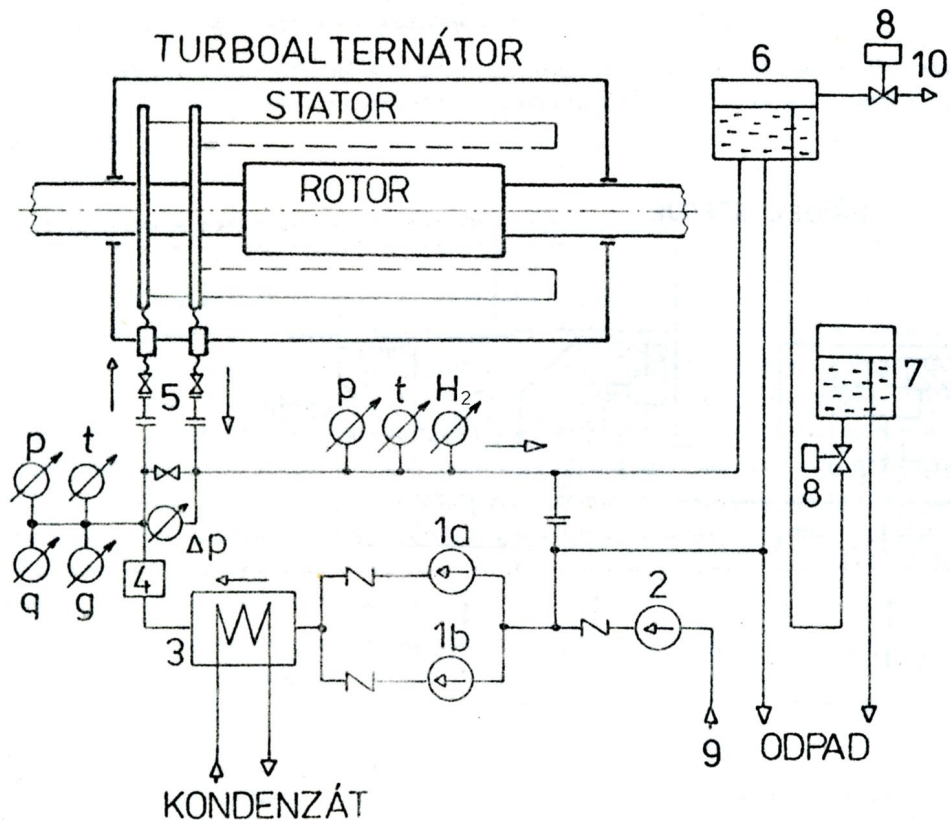
- |  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| 1, 2 – přepouštěcí ventily               | 7 – regulátor konstantního průtoku  |
| 3 – pojistný ventil                      | 8 – měřící ventilátor               |
| 4 – vysoušeč vodíku se silikagelem       | 9 – měření čistoty plynů při plnění |
| 5 – analyzátor vodíku dle tep. vodivosti | 10 – signalizace tlaku              |
| 6 – měření tlaku                         | 11 – automatické připouštění vodíku |

### Přímé chlazení vinutí statoru vodou

Pro alternátory nad 200 MW včetně. Nese s sebou problém zvyšování ztrát, které se omezují střídáním plných a dutých vodičů, použitím nemagnetických materiálů pro čela stroje. Tlak vodíku musí být vyšší než vody, aby jeho případný vnik byl snadno detekován a odstraněna netěsnost vodního systému. Používá se voda o vodivosti 2 až 5 S/cm. Systém je uzavřený, voda se regeneruje přes chemické filtry nebo připouštěním čistější vody:

Parametry alternátorů vzhledem k použitému systému chlazení:

Jmenovitý výkon činný $P_N$ [MW]	165	235	500
Jmenovitý výkon zdánlivý $P_N$ [MW]	194	277	588
Chladicí systém	H <sub>2</sub> 300 kPa	H <sub>2</sub> 400 kPa H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> 500 kPa H <sub>2</sub> O
Proudové využití [A/cm]	1522	1518	1965
Jmenovité napětí $U_N$ [kV]	15.00	15.75	20.00
Účinnost [%]	98.63	98.61	98.75
Měrná hmotnost [kg/kVA]	0.857	0.860	0.630



- |  |                                    |
|--|------------------------------------|
| 1 – pracovní a záložní čerpadlo                            | 6 – vyrovnávací nádoba             |
| 2 – podávací čerpadlo                                      | 7 – sifon (přepad)                 |
| 3 – chladič  | 8 – automatické uzavírání          |
| 4 – mechanický filtr                                       | 9 – čistá voda z filtrační stanice |
| 5 – vyjímatelní vložky při měření izolačního stavu statoru | 10 – vývod k vývěvě pro odplynění  |

Statorová drážka				
Chlazení	Vzduch	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
Rotorová drážka				
Chlazení	Vzduch	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Výkon v MVA	50	250	1000	2000

## Hlavní parametry a charakteristiky alternátorů

Jmenovitý výkon – odvíjí se od výkonu turbosoustrojí a ten od tepelného výkonu zdroje termodynamické energie. Pro klasické tepelné elektrárny dle jmenovité řady u nás výkony 110, 200 a 500 MW (resp. 125, 235 a 588 MVA). U JE dle tepelného výkonu rektoru dvě turbosoustrojí 220 MW (resp. 258 MVA) pro VVER440 a jedno soustrojí pro VVER1000 (resp. 1176 MVA).

Cena 1 kW i velikost ztrát s velikostí jmenovitého výkonu alternátoru i celého bloku klesají se čtvrtou odmocninou. Omezující faktory jsou zásobování palivem a vodou, popř. možnost odběru, vyvedení do ES či koncentrace exhalací.

### Napětí alternátoru

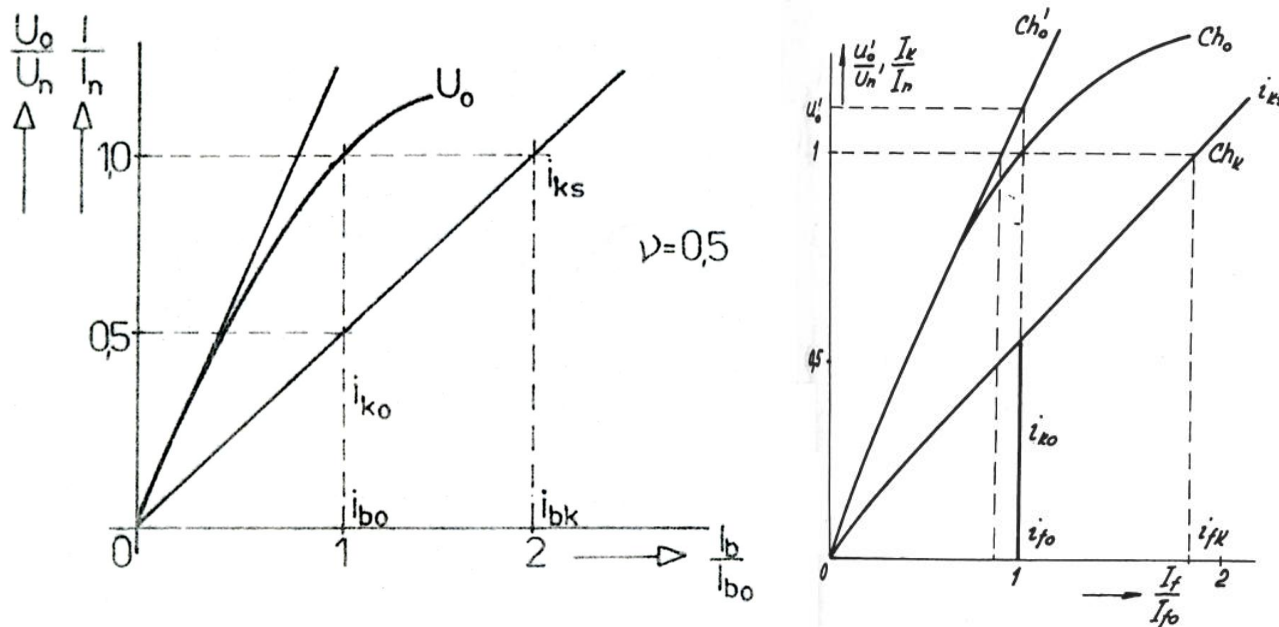
Volí se s ohledem na velikost proudů a nutné izolace:

Jmenovitý výkon $P_N$ [MW]	Jmenovité napětí $U_N$ [kV]	Jmenovitý výkon $P_N$ [MW]	Jmenovité napětí $U_N$ [kV]
50	6.3	220	15.75
110	13.8	500	20.00
200	15.0	1000	25.00

### Účinnost $\cos j$ alternátoru

Určen úlohou elektrárny v ES (zařazení elektrárny do regulace velikosti napětí a rozdělování jalového výkonu). Čím vyšší požadavky na dodávaný jalový (induktivní) výkon, tím účinnost nižší, což klade zvýšené nároky na budící systém a rotor jako takový. Pro velké výkony minimálně  $\cos j \geq 0.8$  (typicky 0.85), pro malé výkony se volí  $\cos j$  relativně menší.

### Charakteristika naprázdno a nakrátko



Pro alternátory stejného konstrukčního typu je tato charakteristika obdobná. Lze definovat tzv. zkratový poměr:

$$n = \frac{I_{K0}}{I_N} = i_{K0} = \frac{I_{b0}}{I_{bK}} = \frac{I_{bN}}{I_{bK}} = \frac{1}{i_{bK}}$$

Na výše uvedené konkrétní charakteristice je:  $n = 0.5$   $i_{K0} = 0.5$   $i_{bK} = 2$

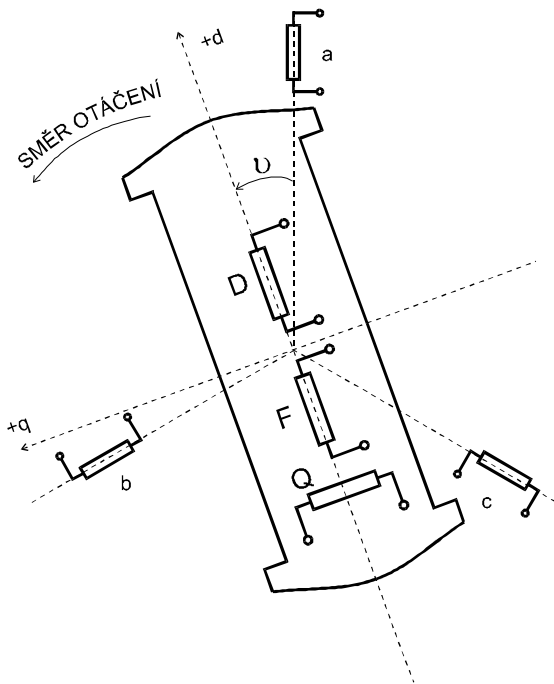
Ze stavu nakrátko lze určit:  $x_{dS} = \frac{e}{i_{K0}} = \frac{e}{n} \approx \frac{1}{0.5} = 2$

Náhradní reaktance při stavu nenasyčeném je analogicky:  $x_d = \frac{u_0'}{i_{K0}} = \frac{i_{bK}'}{i_{bO}'} > x_{dS}$

Pro provoz alternátoru je výhodná velká hodnota  $n$  z důvodu navýšení přirozené statické stability a snížení vlivu reakce kotvy a tedy při přechodných dějích snížení poruchových proudů v rotoru. Zmenšování  $x_d$  ale navyšuje konstrukční náklady alternátoru (vyžaduje zvětšení vzduchové mezery a v důsledku mohutnější budící vinutí). Moderní alternátoru mají  $n$  malé ( $< 0.5$ ) a  $x_d$  velké ( $> 2$ ). Snížená statická stabilita se dohání rychlým budičem a regulátorem.

### Rovnice chodu alternátoru

Vztahy vycházejí z Parkovy transformace (předpoklad kompletní linearity systému):



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

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

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \\ \Psi_F \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & 0 \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & 0 \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & 0 & 0 & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_F \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix}$$

kde:

Indukčnosti statoru vs buzení:

$$L_{aF} = L_{Fa} = L_{aFm} \cos J$$

$$L_{bF} = L_{Fb} = L_{aFm} \cos \left( J - \frac{2}{3} p \right)$$

$$L_{cF} = L_{Fc} = L_{aFm} \cos \left( J + \frac{2}{3} p \right)$$

Indukčnosti statoru vs tlumič v ose  $q$ :

$$L_{aQ} = L_{Qa} = L_{aQm} \cos \left( J + \frac{1}{2} p \right)$$

$$L_{bQ} = L_{Qb} = L_{aQm} \sin \left( J - \frac{2}{3} p + \frac{1}{2} p \right)$$

$$L_{cQ} = L_{Qc} = L_{aQm} \sin \left( J + \frac{2}{3} p + \frac{1}{2} p \right)$$

Indukčnosti statoru vs tlumič v ose  $d$ :

$$L_{aD} = L_{Da} = L_{aDm} \cos J$$

$$L_{bD} = L_{Db} = L_{aDm} \cos \left( J - \frac{2}{3} p \right)$$

$$L_{cD} = L_{Dc} = L_{aDm} \cos \left( J + \frac{2}{3} p \right)$$

Indukčnosti statoru vlastní:

$$L_{aa} = L_{a0} + L_2 \cos 2J$$

$$L_{bb} = L_{a0} + L_2 \cos \left[ 2 \left( J - \frac{2}{3} p \right) \right]$$

$$L_{cc} = L_{a0} + L_2 \cos \left[ 2 \left( J + \frac{2}{3} p \right) \right]$$

Indukčnosti statoru vzájemné:

$$L_{bc} = -L_{ab0} + L_2 \cos 2J$$

$$L_{ca} = -L_{ab0} + L_2 \cos \left[ 2 \left( J - \frac{2}{3} p \right) \right]$$

$$L_{ab} = -L_{ab0} + L_2 \cos \left[ 2 \left( J + \frac{2}{3} p \right) \right]$$

Po zavedení Parkovy transformace ve statoru (zavedení inerciální soustavy spojené s rotorem):

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos J & \frac{2}{3} \cos(J - 2/3 p) & \frac{2}{3} \cos(J + 2/3 p) \\ \sin J & \sin(J - 2/3 p) & \sin(J + 2/3 p) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{cases} [u_{d,q,0}] = [P] \cdot [u_{a,b,c}] \\ [i_{d,q,0}] = [P] \cdot [i_{a,b,c}] \\ [\Psi_{d,q,0}] = [P] \cdot [\Psi_{a,b,c}] \end{cases}$$

získáme namísto prvních tří napěťových rovnic:

$$U_d = -RI_d - \frac{d\Psi_d}{dt} + \omega\Psi_q$$

$$U_q = -RI_q - \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega\Psi_d$$

$$U_0 = -RI_0 - \frac{d\Psi_0}{dt}$$

a magnetické toky jsou:

$$\Psi_d = L_d I_d + L_{dF} I_F + L_{dD} I_D$$

$$\Psi_q = L_q I_q + L_{qQ} I_Q$$

$$\Psi_0 = L_0 I_0$$

$L_d$  je podélná synchronní indukčnost

$$L_d = L_{a0} + L_{ab0} + \frac{3}{2} L_2$$

$L_q$  je příčná synchronní indukčnost

$$L_q = L_{a0} + L_{ab0} - \frac{3}{2} L_2$$

$L_0$  je netočivá indukčnost  $L_0 = L_{a0} - 2L_{ab0}$

Výkon stroje:

$$P_i = U_a I_a + U_b I_b + U_c I_c$$

Momentová rovnice stroje pro dvupólový stroj je:

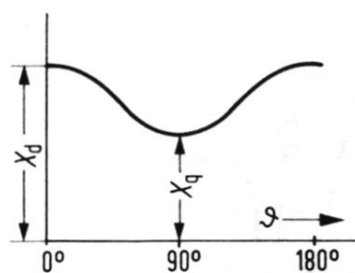
$$J_{mot} \frac{d\Omega}{dt} = M_{int} + M_Z$$

kde  $J_{mot}$  je moment setrvačnosti

$$\Psi_F = L_{Fd} I_d + L_{FF} I_F + L_{FD} I_D$$

$$\Psi_D = L_{Dd} I_d + L_{DF} I_F + L_{DD} I_D$$

$$\Psi_Q = L_{Qq} I_q + L_{QQ} I_Q$$



$$P_i = \frac{3}{2} U_d I_d + \frac{3}{2} U_q I_q + \frac{3}{1} U_0 I_0$$

$$M_{int} = \frac{P_i}{\Omega} = \frac{3}{2} (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d)$$

Fázorový diagram synchronního stroje v ustáleném synchronním chodu  
 (veškeré časové změny toků jsou nulové, proudy tlumičem taktěž)

Chod naprázdno:  $I_d = I_q = 0$  a  $\Psi_q = 0$ , tedy  $U_d = -\frac{d\Psi_d}{dt} = 0$  a  $U_q = -\omega\Psi_d$ , tedy

pokud se jedná o ustálený stav musí:  $U_d = 0$  a  $U_q = U_S = e_V$

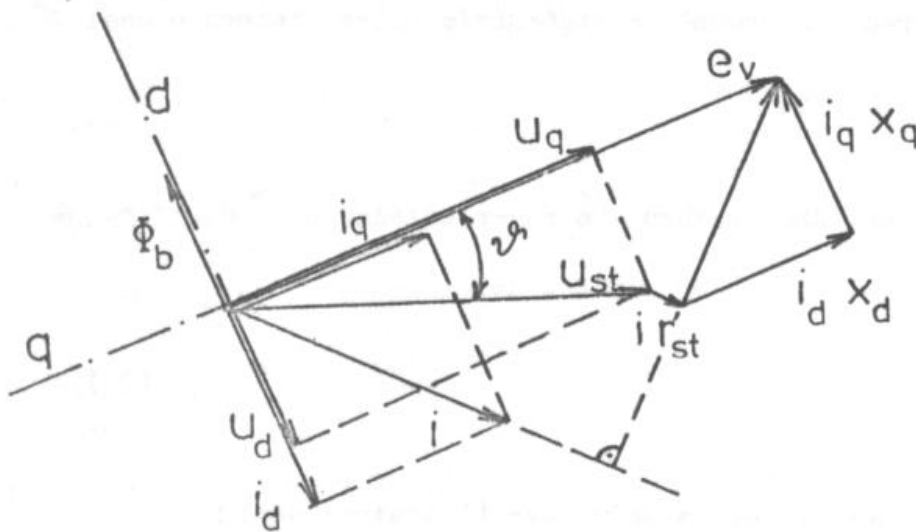
Zatížený stav:  $U_d = -RI_d + \omega\Psi_q = -RI_d + x_q I_q$

$U_q = -RI_q - \omega\Psi_d = -RI_q - x_d I_d + e_V$

Zavedeme fázorový diagram pro velikosti těchto veličin:

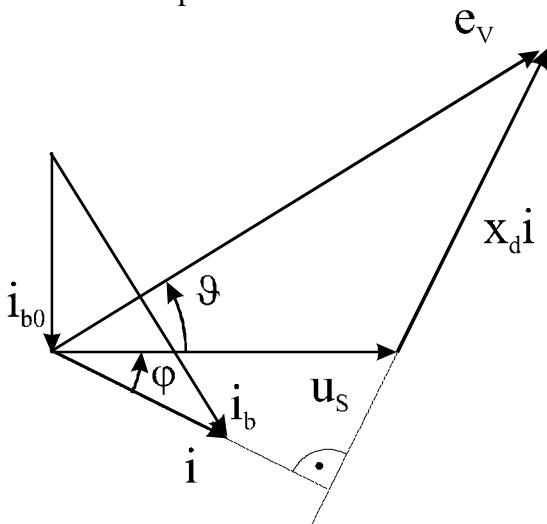
$$\bar{e} = \bar{U}_S + R \cdot \frac{\bar{I}_d + j\bar{I}_q}{\bar{I}} + j \cdot x_d I_d + j \cdot x_q I_q$$

kde:  $x_d = x_{ad} + x_S$  a  $x_q = x_{aq} + x_S$  jsou podélná a příčná synchronní reaktance ( $x_d, x_q$ ) a reaktance reakce kotvy v podélné a příčné ose ( $x_{ad}, x_{aq}$ )

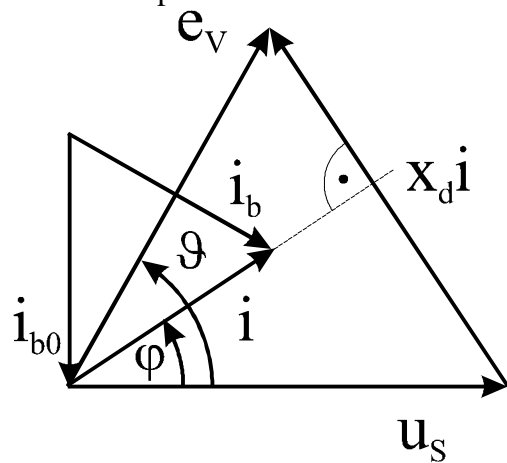


Fázorový diagram synchronního stroje s hladkým rotorem (turboalternátoru):

V přebuzeném stavu

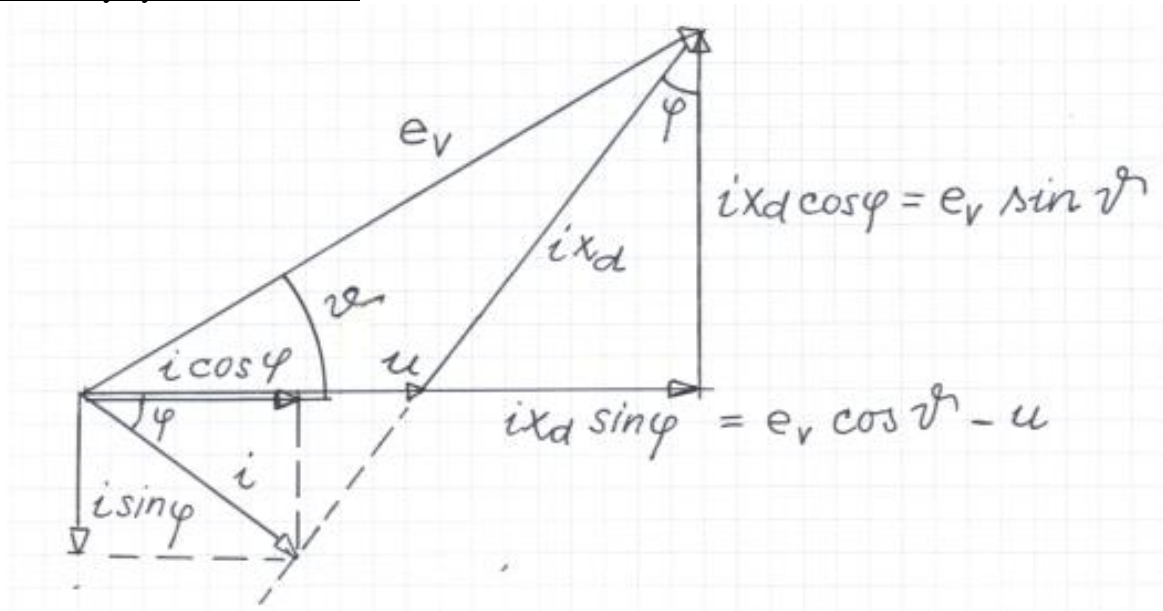


V podbuzeném stavu





Elektrický výkon alternátoru:

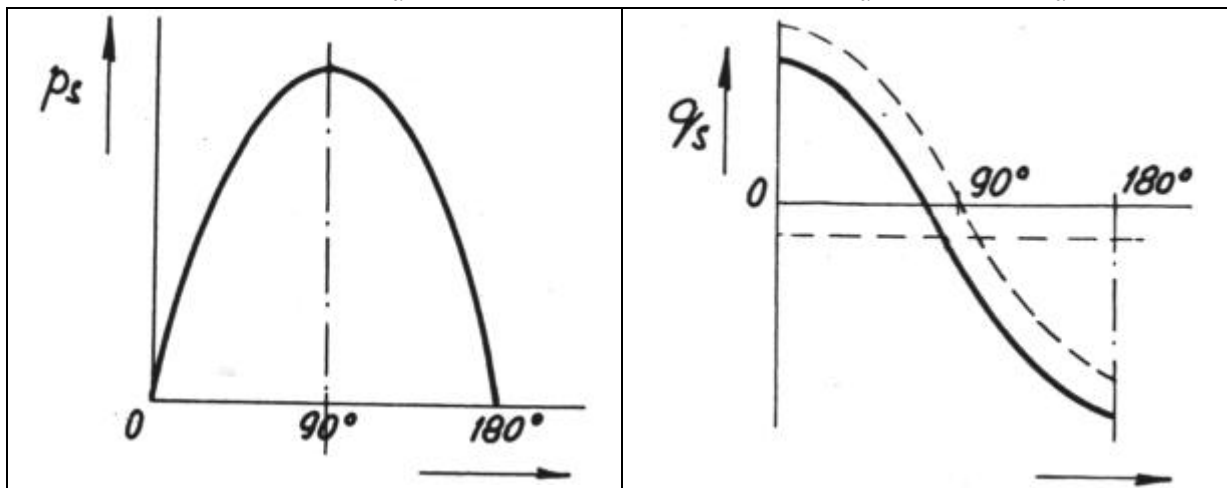


$$i \cdot \cos j = \frac{e_v \cdot \sin J}{x_d}$$

$$p_s = u \cdot i \cdot \cos j = \frac{u_s \cdot e_v}{x_d} \sin J$$

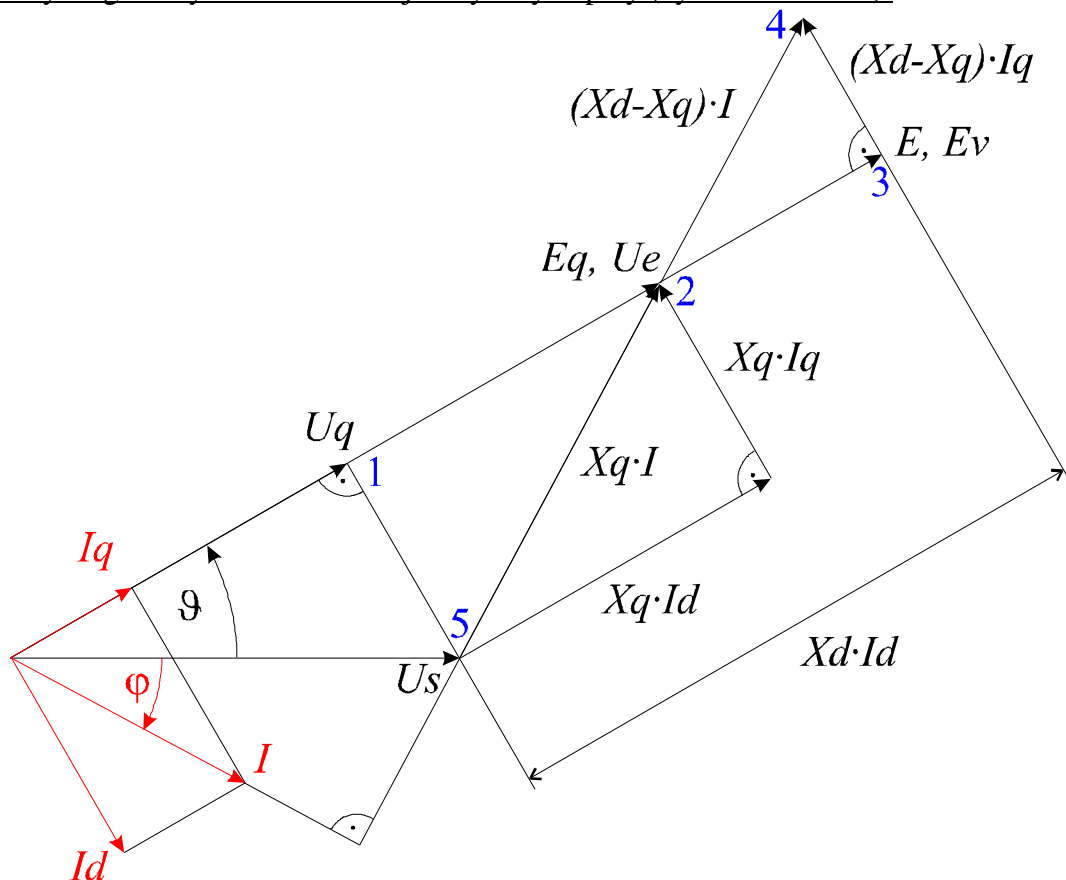
$$i \cdot \sin j = \frac{e_v \cdot \cos J - u}{x_d}$$

$$q_s = u_s \cdot i \cdot \sin j = \frac{u_s \cdot e_v}{x_d} \cos J - \frac{u_s^2}{x_d}$$



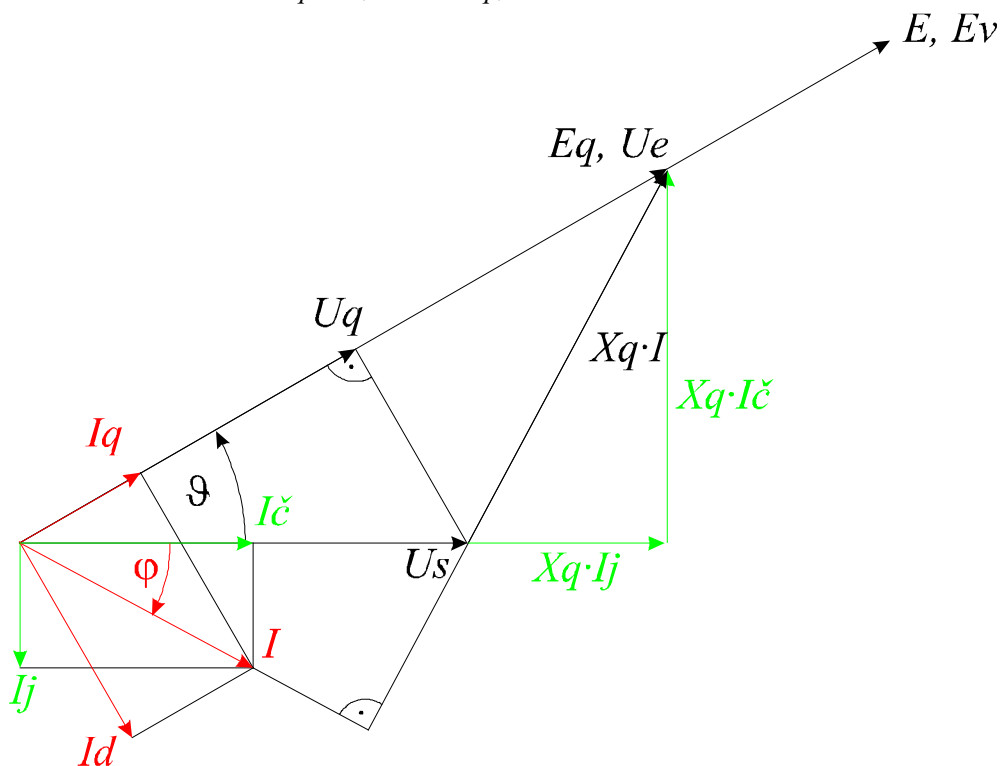
$$\text{Trojfázový zdánlivý výkon: } s = 3 \frac{u_s \cdot e_v}{x_d} \left( \sin J + j \left( \cos J - \frac{u_s}{e_v} \right) \right)$$

Fázorový diagram synchronního stroje s vyniklými póly (hydroalternátoru):



Dle podobnosti trojúhelníků:

$$\frac{1-2}{2-3} = \frac{5-2}{2-4} \quad \frac{E_q - U_q}{E_v - E_q} = \frac{X_q \cdot I}{(X_d - X_q) \cdot I} \quad E_q = E_v \frac{X_q}{X_d} + U_q \frac{X_d - X_q}{X_d}$$



$$P_S = U_S \cdot I \cdot \cos j \quad E_q \cdot \sin J = X_q \cdot I_{\dot{c}} = X_q \cdot I \cdot \cos j$$

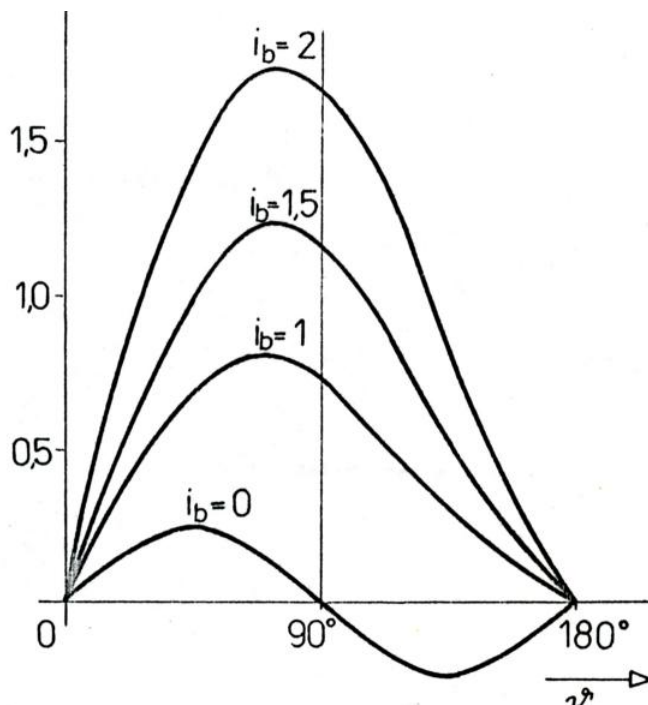
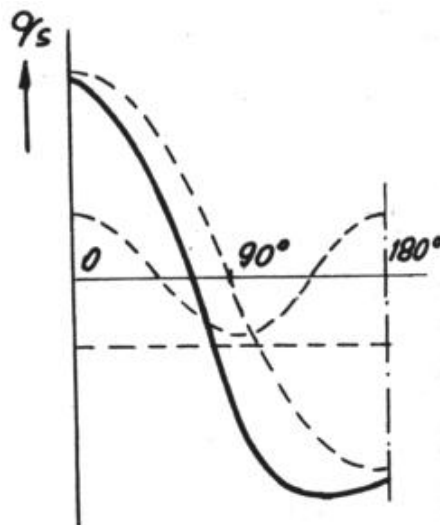
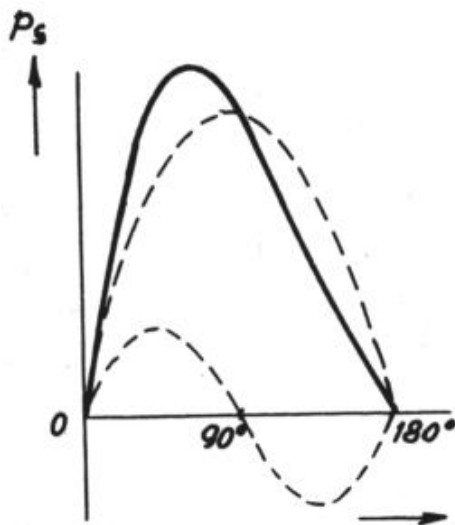
$$P_S = U_S \frac{E_q}{X_q} \sin J = \frac{U_S}{X_q} \left[ E_V \frac{X_q}{X_d} + U_q \frac{X_d - X_q}{X_d} \right] \sin J =$$

$$= \frac{E \cdot U_S}{X_d} \sin J + \frac{U_S \cdot U_q}{X_q} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d} \sin J \quad U_q = U_S \cos J$$

$$P_S = \frac{E \cdot U_S}{X_d} \sin J + \frac{U_S^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \sin(2J)$$

Analogicky:

$$Q_S = \frac{E \cdot U_S}{X_d} \cos J + \frac{U_S^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \cos(2J) - \frac{U_S^2}{2} \cdot \frac{X_d + X_q}{X_d \cdot X_q}$$

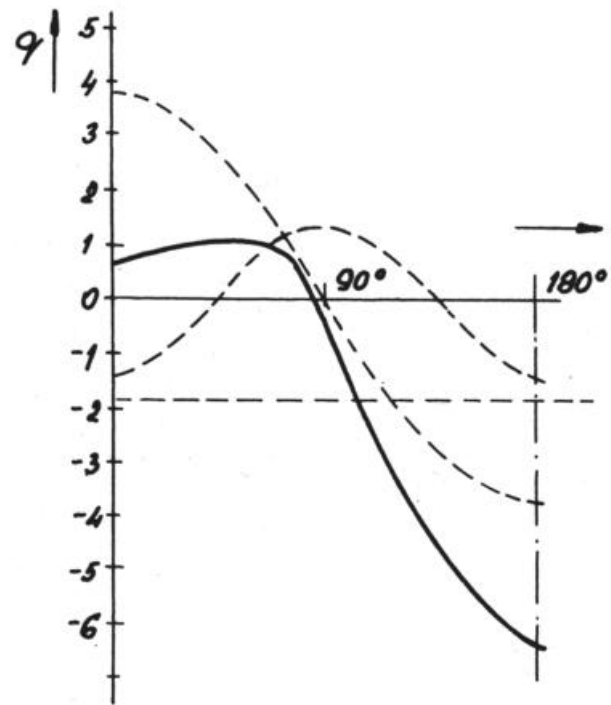
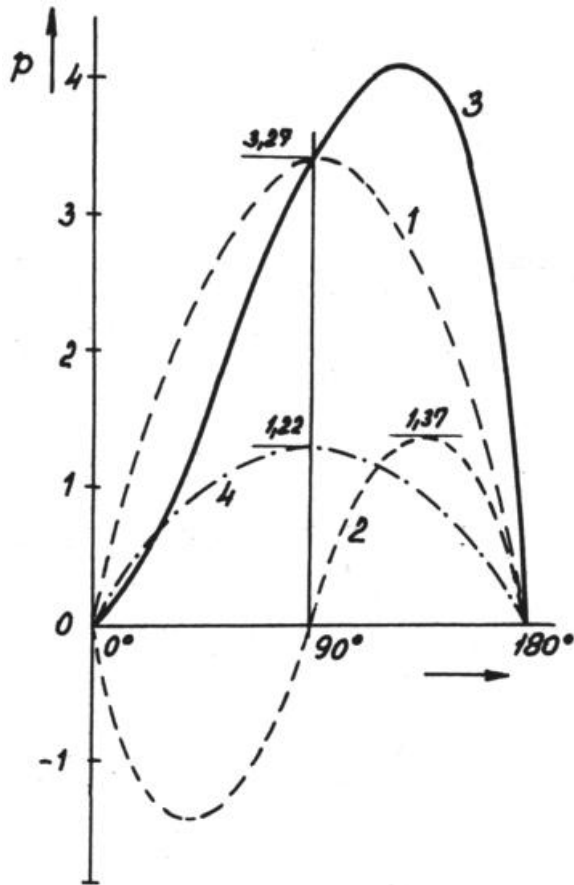


Výkon dodávaný synchronním strojem s regulací buzení:

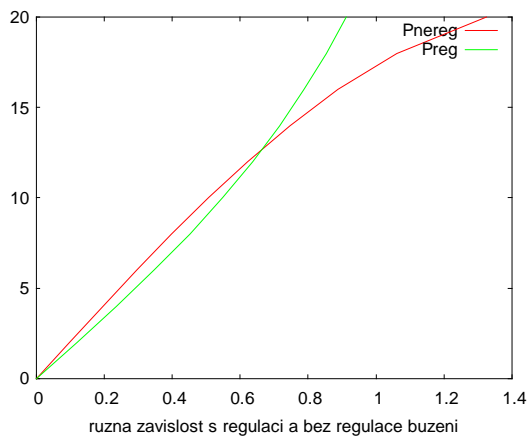
Pro regulaci jako základní kritérium obvykle uvažujeme konstantní velikost svorkového napětí alternátoru. Potom:

$$P_{SREG} = \frac{U_q \cdot U_S}{X_V} \sin J - \frac{U_S^2}{2} \cdot \frac{X_q}{(X_q + X_V) \cdot X_V} \sin(2J)$$

$$Q_{SREG} = \frac{U_q \cdot U_S}{X_V} \cos J - \frac{U_S^2}{2} \cdot \frac{X_q}{(X_q + X_V) \cdot X_q} \cos(2J) - \frac{U_S^2}{2} \cdot \frac{X_q + 2X_V}{(X_d + X_V) \cdot X_q}$$

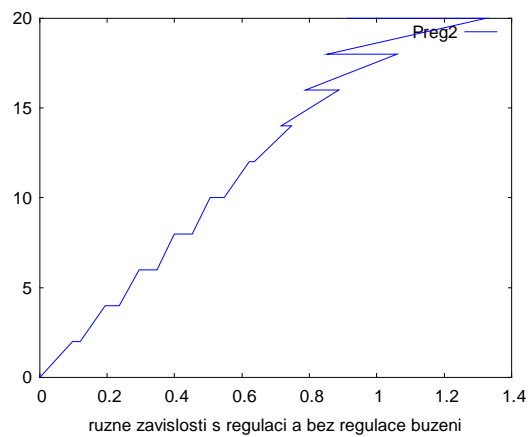


Zavislost vykonu dodavaneho do site na zateznom uhlu



ruzna zavislost s regulaci a bez regulace buzeni

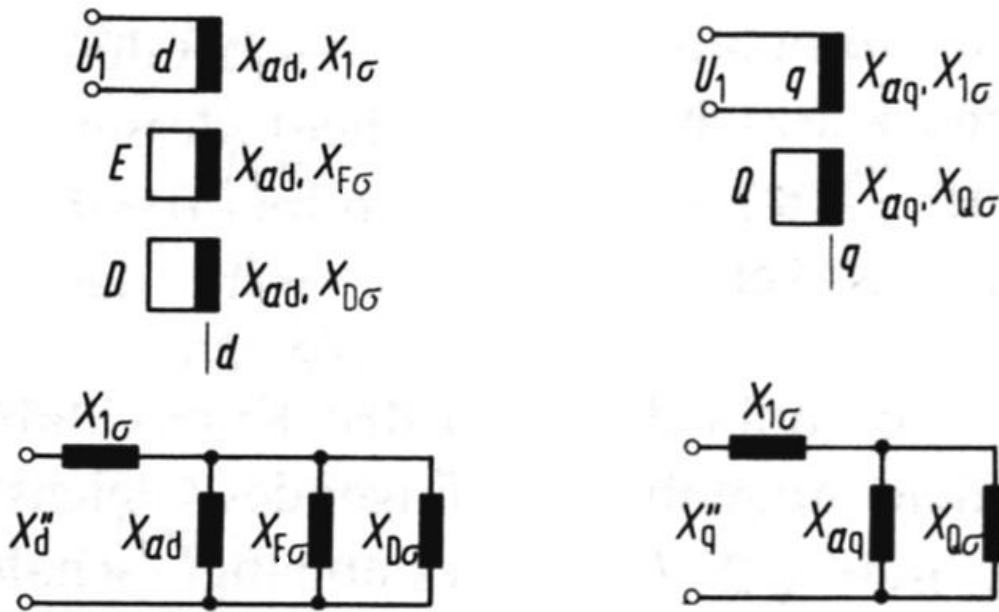
Zavislost vykonu dodavaneho do site na zateznom uhlu



ruzna zavislosti s regulaci a bez regulace buzeni

## Další parametry alternátoru pro neustálené stavy:

### Reaktance



$$x'_d = x_s + \frac{x_{ad} x_{Fs}}{x_{ad} + x_{Fs}} - \text{podélná přechodná}$$

(tranzitní) reaktance

$x'_q$  - příčná přechodná reaktance

$$x''_d = x_s + \frac{x_{Fs} x_{ad} x_{Ds}}{x_{Fs} x_{ad} + x_{Fs} x_{Ds} + x_{ad} x_{Ds}}$$

- podélná rázová (subtranzitní) reaktance

$$x''_q = x_s + \frac{x_{aq} x_{Qs}}{x_{aq} + x_{Qs}} - \text{příčná rázová}$$

reaktance

### Časové konstanty

$T_{d0}'$  - přechodná časová konstanta (budícího obvodu) v podélné ose při chodu naprázdno

$T_{d0}''$  - rázová časová konstanta (tlumícího obvodu) v podélné ose při chodu naprázdno

$T_{q0}''$  - rázová časová konstanta (tlumícího obvodu) v příčné ose při chodu naprázdno

$$T_d' = \frac{x'_d}{x_d} T_{d0}' - \text{přechodná časová konstanta v podélné ose při chodu nakrátko}$$

$$T_d'' = \frac{x''_d}{x_d} T_{d0}'' - \text{rázová časová konstanta v podélné ose}$$

$$T_q'' = \frac{x''_q}{x_q} T_{q0}'' - \text{rázová časová konstanta v příčné ose (hodnota cca jako } T_d'')$$

$T_m$  - mechanická časová konstanta (podle velikosti alternátoru a jeho  $J_{mot}$ )(např. 7 až 10 sec.).

$T_F$  - časová konstanta buzení (do 1 sec.)

Dány především časovou konstantou buzení, proto  $x'_q = x_q$  (protože v příčné ose není buzení). Používá se při výpočtech velikosti zkratových proudů po odeznění prvních několika silně tlumených period.

Dány především časovou konstantou tlumiče (zde je rozdíl mezi  $x''_d$  a  $x''_q$  závisí na konstrukci tlumiče). Používá se při výpočtech velikosti zkratových proudů bezprostředně po jejich vzniku.

	Stroj s vyniklými póly	stroj s hladkým rotorem
$x_d$	$0.9 \div 1.5$ (1.2)	$1.5 \div 2.5$ (2)
$x_q$	$0.5 \div 1.1$ (0.2)	$\sim x_d$ (nepatrně menší)
$x_d'$	$0.3 \div 0.5$ (0.4)	$0.2 \div 0.35$ (0.25)
$x_d''$	$0.25 \div 0.35$ (0.3)	$0.15 \div 0.25$ (0.2)
$x_q''$	$\sim x_d''$	$= x_d''$
$x_2$	$0.1 \div 0.25$	$0.1 \div 0.15$
$x_0$	$0.03 \div 0.2$	$0.02 \div 0.1$
$T_{d0}'$	$3 \div 8$ (5)	$8 \div 12$ (10)
$T_d''$	$0.02 \div 0.05$ (0.04)	$0.02 \div 0.05$ (0.04)