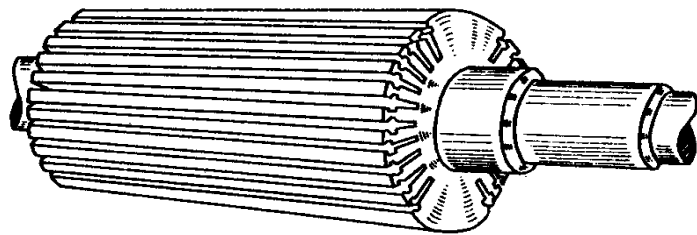
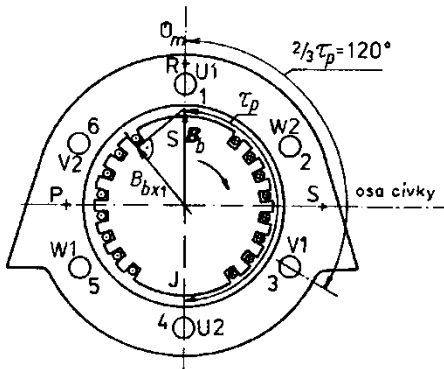
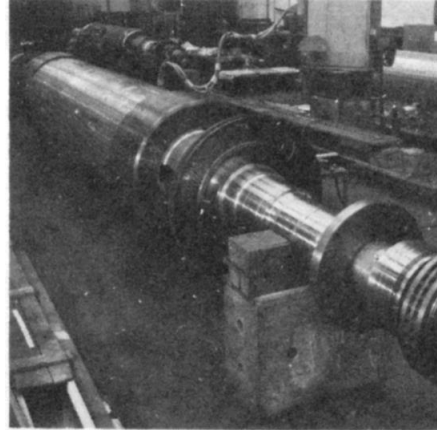
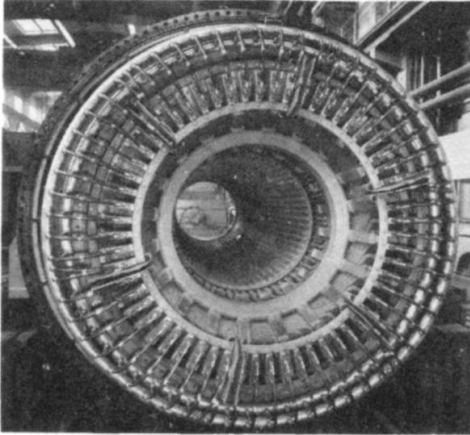


12. Alternátory

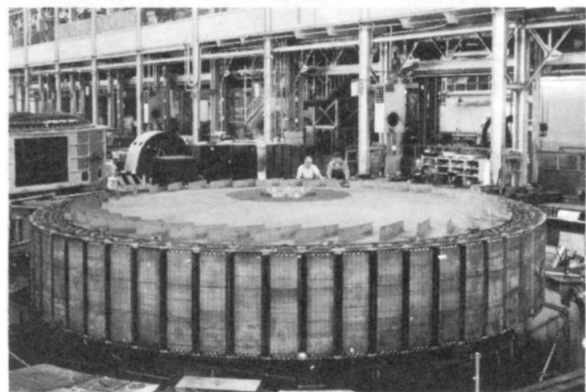
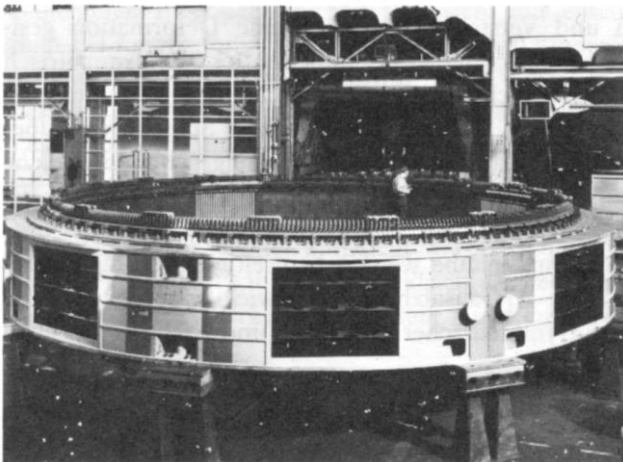
Alternátory velkých výkonů jsou synchronní stroje (asynchronní pouze pro malé výkony). Dle použité turbíny dělíme stroje na:

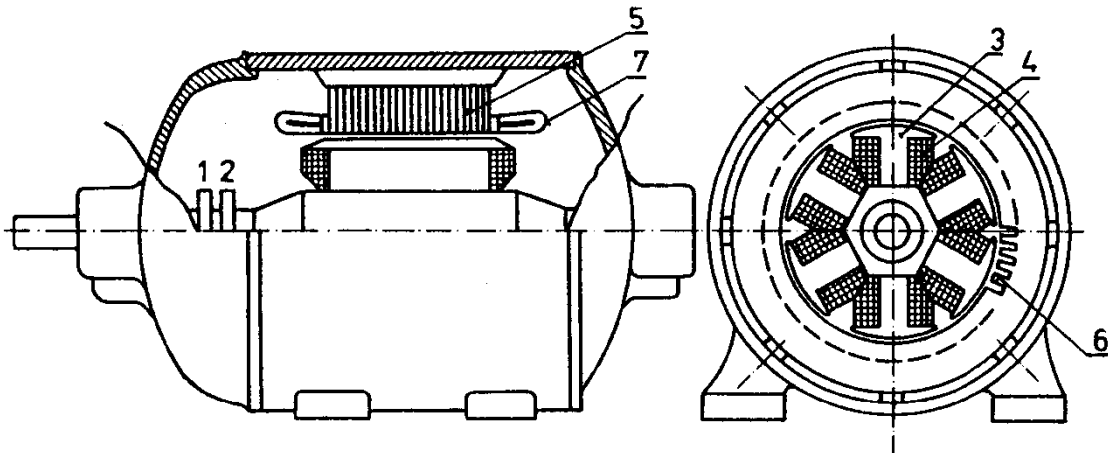
- Turboalternátory pracující s parními turbínami – alternátory s hladkým rotorem obvykle dvojpólové pro velké výkony (přes 1000 MVA) výjimečně čtyřpólové (otáčky 3000, resp. 1500 ot./min) (na obrázku 400 MVA)



V drážkách uloženo budící vinutí zajištěné kovovými klíny (tvoří tlumící vinutí).

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





1, 2 kroužky budicího vinutí, 3 póly s pólovými nastavci, 4 budicí vinutí, 5 železo statoru, 6 statorové plechy, 7 vinutí statoru

Tlumící vinutí (tlumič) se umísťuje v drážkách pólových nastavců a spojuje čelními spojkami do krátka

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

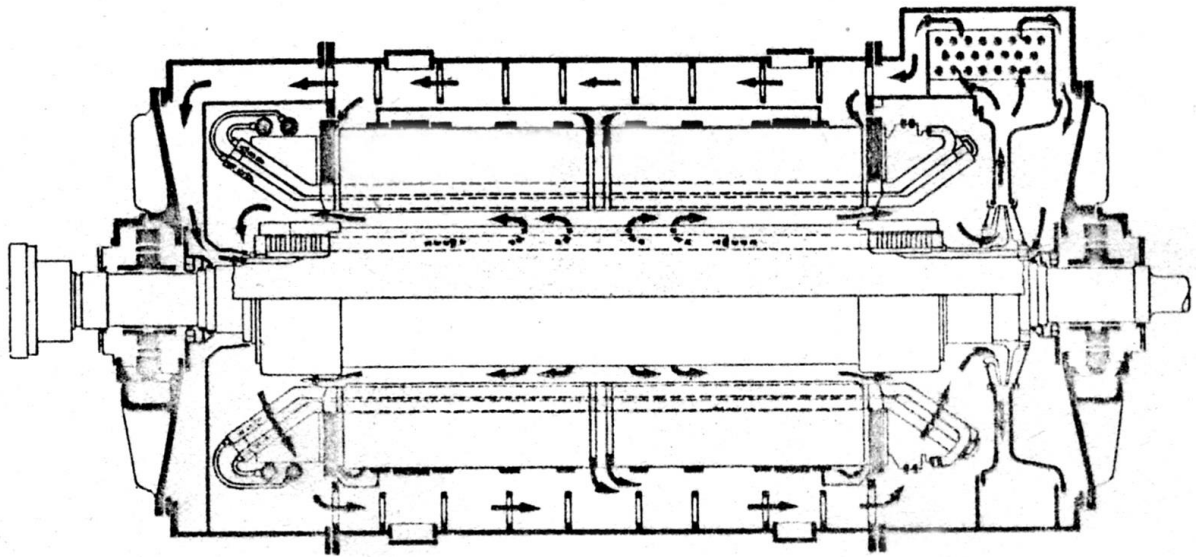
Výkon alternátoru je omezen vzhledem k vývinu tepelných ztrát velikostí jeho objemu, který je dán vnějšími rozměry dle dopravních a manipulačních možností. Průměr rotoru je navíc omezen odstředivými silami. Stroje s hladkým rotorem velkých výkonů jsou tedy spíše protáhlého válcového tvaru. Kromě toho 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.

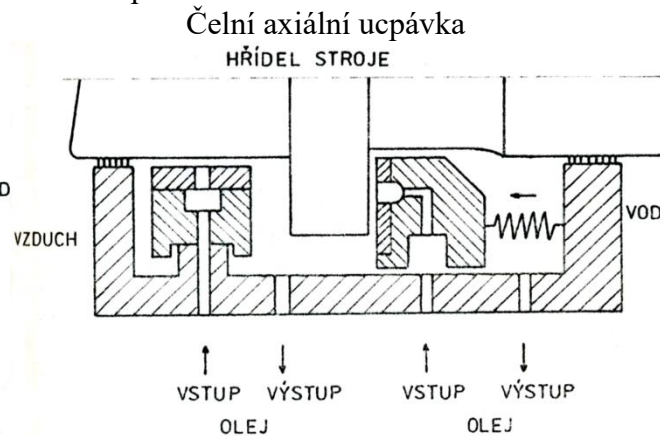
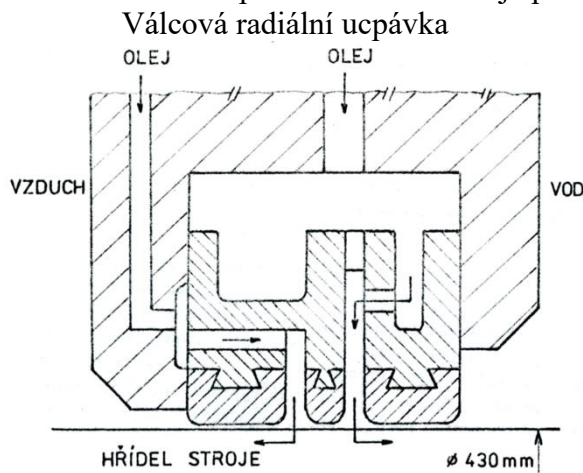
Přímé chlazení rotoru a nepřímé statoru vodíkem

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 axiálními kanály v magnetickém obvodu. Cirkulace je opět podpořena axiálními ventilátory a chlazení vodou.



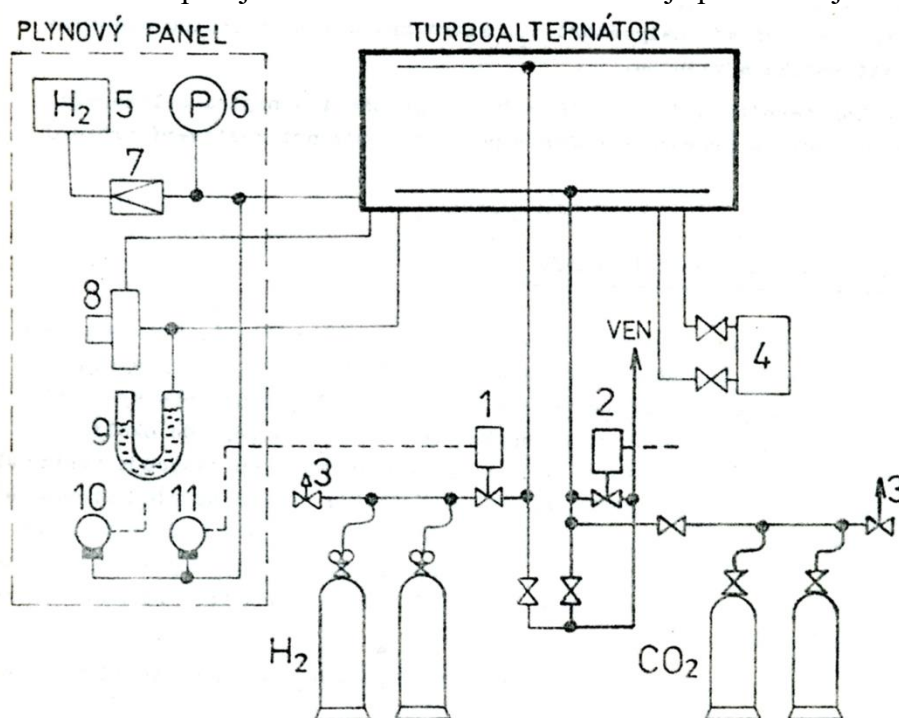
Vodík je třaskavý v koncentraci 4 až 75 % se vzduchem. Pro plnění a vyprazdňování je proto nutno použít inertní CO_2 . Při provozu se udržuje čistota H_2 98% kriticky nízká hodnota je 92%. Plnění je elektrolytickým vodíkem o čistotě 99.5%, tlak z lahví je redukován na 0.5 MPa. Často je projektováno více 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:



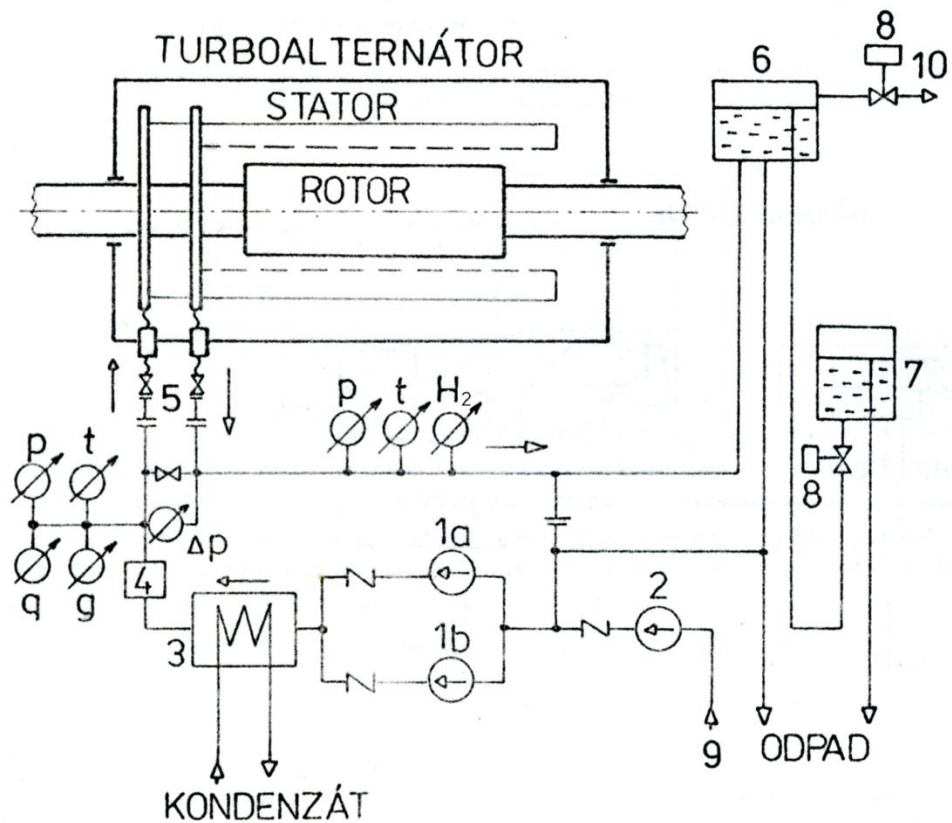
- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1, 2 – přepouštěcí ventily | 7 – regulátor konstantního průtoku |
| 3 – pojistný ventil | 8 – měřící ventilátor |
| 4 – vysoušeč vodíku se silikagelem | 9 – měření čistoty plynů při plnění |
| 5 – analyzátor vodíku dle tep. vodivosti | 10 – signalizace 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 ₂ 300 kPa	H ₂ 400 kPa H ₂ O	H ₂ 500 kPa H ₂ 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 ₂	H ₂ O	H ₂ O
Rotorová drážka				
Chlazení	Vzduch	H ₂	H ₂	H ₂ 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

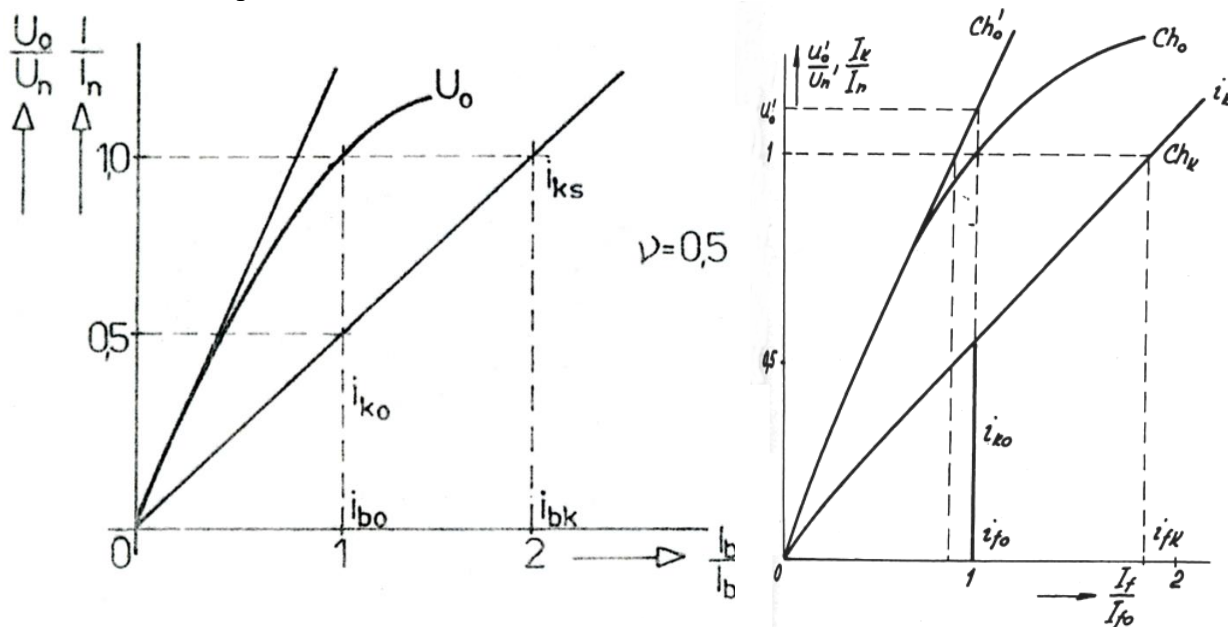
Volí se s ohledem na velikost proudů a nutné izolace:

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

Účinek $\cos \varphi$ 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 účinek nižší, což klade zvýšené nároky na budicí systém a rotor jako takový. Pro velké výkony minimálně $\cos \varphi \geq 0.8$ (typicky 0.85), pro malé výkony se volí $\cos \varphi$ relativně menší.

Charakteristika naprázdno a nakrátko



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

$$\nu = \frac{I_{K0}}{I_N} = i_{K0} = \frac{I_{b0}}{I_{bK}}$$

Na výše uvedené konkrétní charakteristice je: $\nu = 0.5$ $i_{K0} = 0.5$

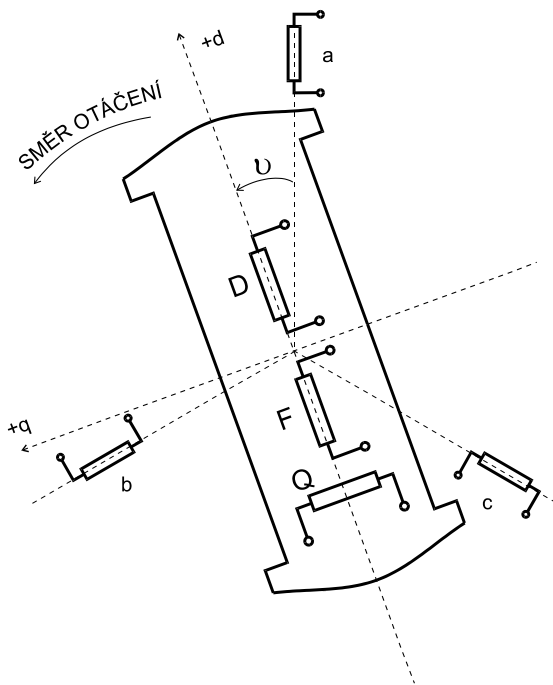
Ze stavu nakrátko lze určit: $x_{dS} = \frac{e}{i_{K0}} = \frac{e}{v} \approx \frac{1}{0.5} = 2$

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 v 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 v 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 linearoty 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:

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

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

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

Indukčnosti statoru vs tlumič v ose q :

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

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

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

Indukčnosti statoru vs tlumič v ose d :

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

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

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

Indukčnosti statoru vlastní:

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

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

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

Indukčnosti statoru vzájemné:

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

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

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

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

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \cos(\vartheta - 2/3\pi) & \cos(\vartheta + 2/3\pi) \\ \sin \vartheta & \sin(\vartheta - 2/3\pi) & \sin(\vartheta + 2/3\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$[u_{d,q,0}] = [P] \cdot [u_{a,b,c}]$$

$$[i_{d,q,0}] = [P] \cdot [i_{a,b,c}]$$

$$[\Psi_{d,q,0}] = [P] \cdot [\Psi_{a,b,c}]$$

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:

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

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

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

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

$$\Psi_0 = L_0 I_0$$

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

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:

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

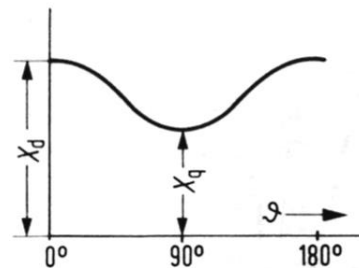
$$P_i = \frac{3}{2} U_d I_d + \frac{3}{2} U_q I_q + \frac{3}{1} U_0 I_0$$

Momentová rovnice stroje pro dvupólový stroj je:

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

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

kde J_{mot} je moment setrvačnosti



Fázorový diagram synchronního stroje v ustáleném synchronním chodu

(veškeré časové změny toků jsou nulové, proudy tlumičem taktéž)

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

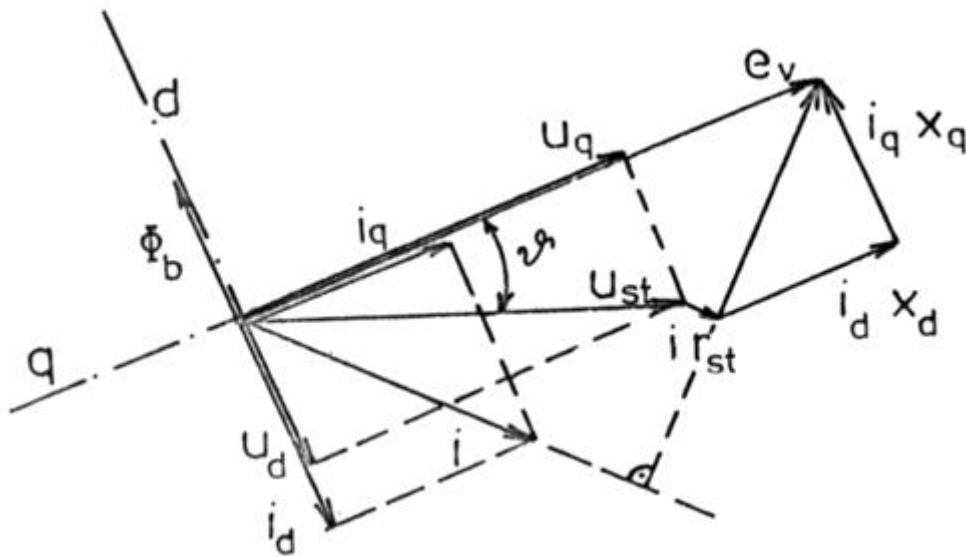
$U_q = -RI_q - \omega\Psi_d = -RI_q - x_d I_d + e_V$

Zavedeme fázorový diagram pro velikosti těchto veličin:

$$\bar{e}_V = (\bar{U}_d + \bar{U}_q) + R \cdot (\bar{I}_d + \bar{I}_q) + j \cdot x_d \bar{I}_d + j \cdot x_q \bar{I}_q$$

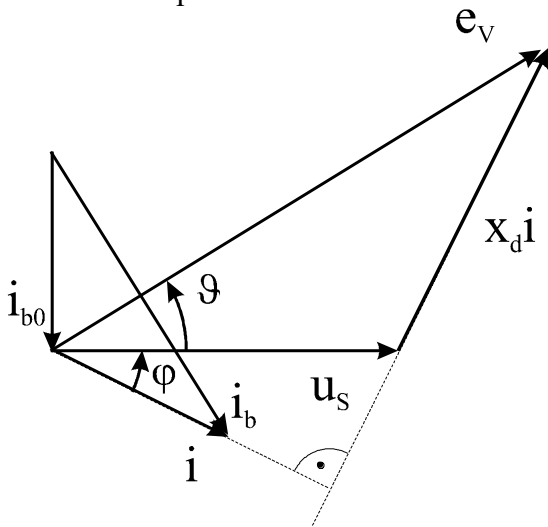
$$\bar{e}_V = \bar{U}_S + R \cdot \bar{I} + j \cdot x_d \bar{I}_d + j \cdot x_q \bar{I}_q$$

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

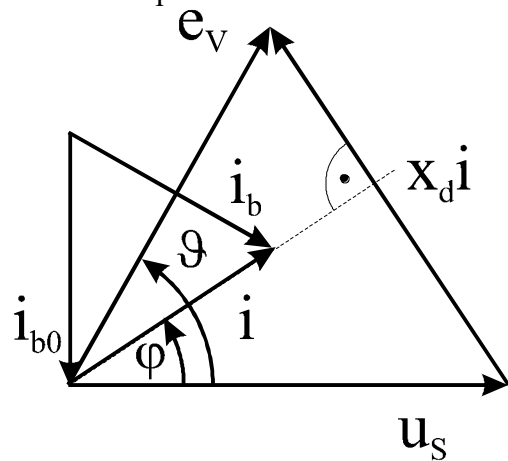


Fázorový diagram synchronního stroje s hladkým rotorem (turboalternátoru):

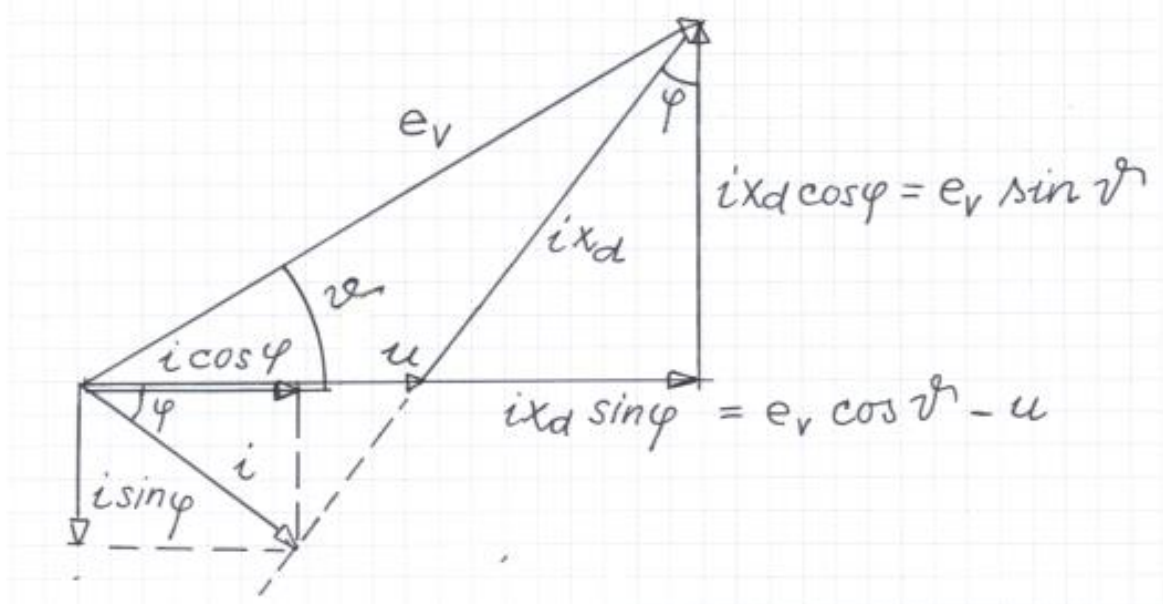
V přebuzeném stavu



V podbuzeném stavu



Elektrický výkon alternátoru:

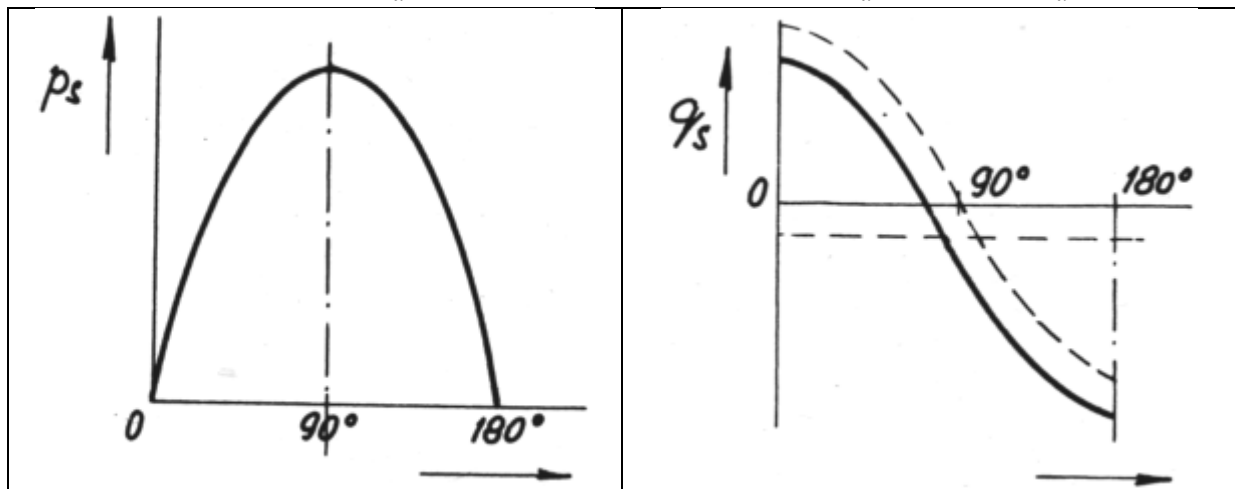


$$i \cdot \cos \varphi = \frac{e_V \cdot \sin \vartheta}{x_d}$$

$$p_S = u \cdot i \cdot \cos \varphi = \frac{u_S \cdot e_V}{x_d} \sin \vartheta$$

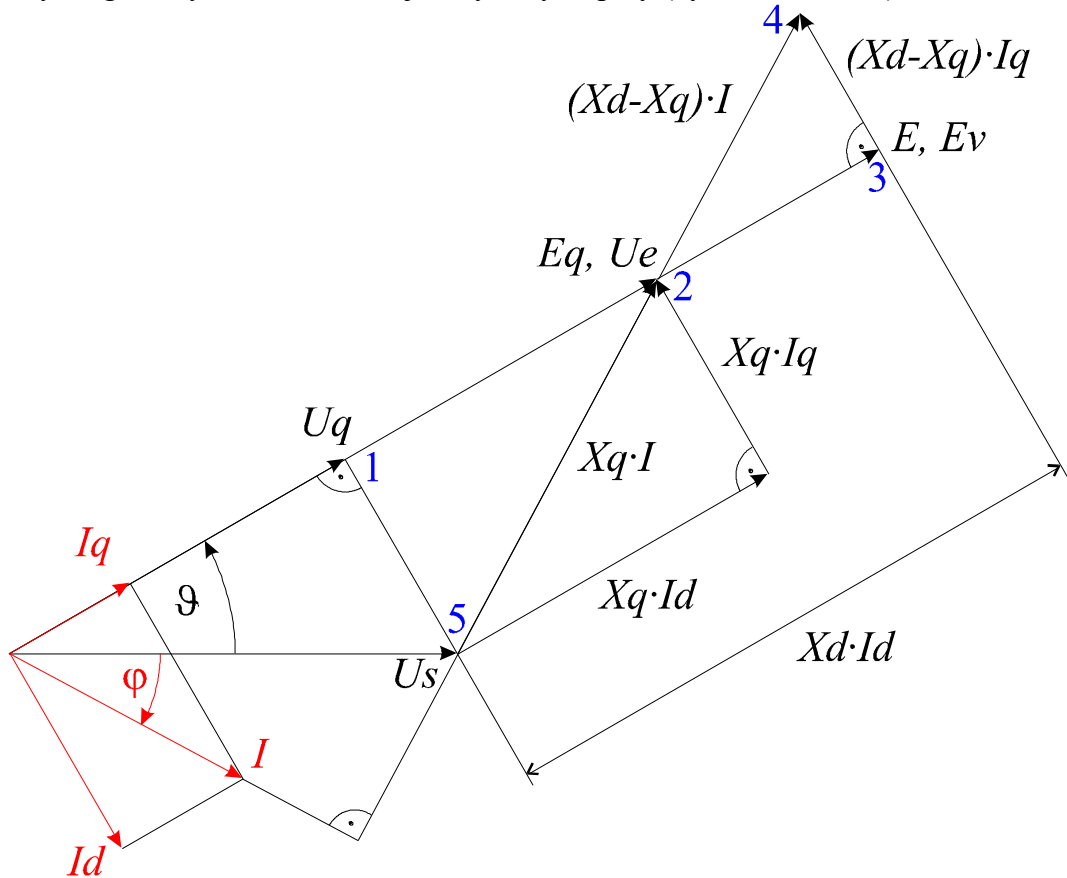
$$i \cdot \sin \varphi = \frac{e_V \cdot \cos \vartheta - u}{x_d}$$

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



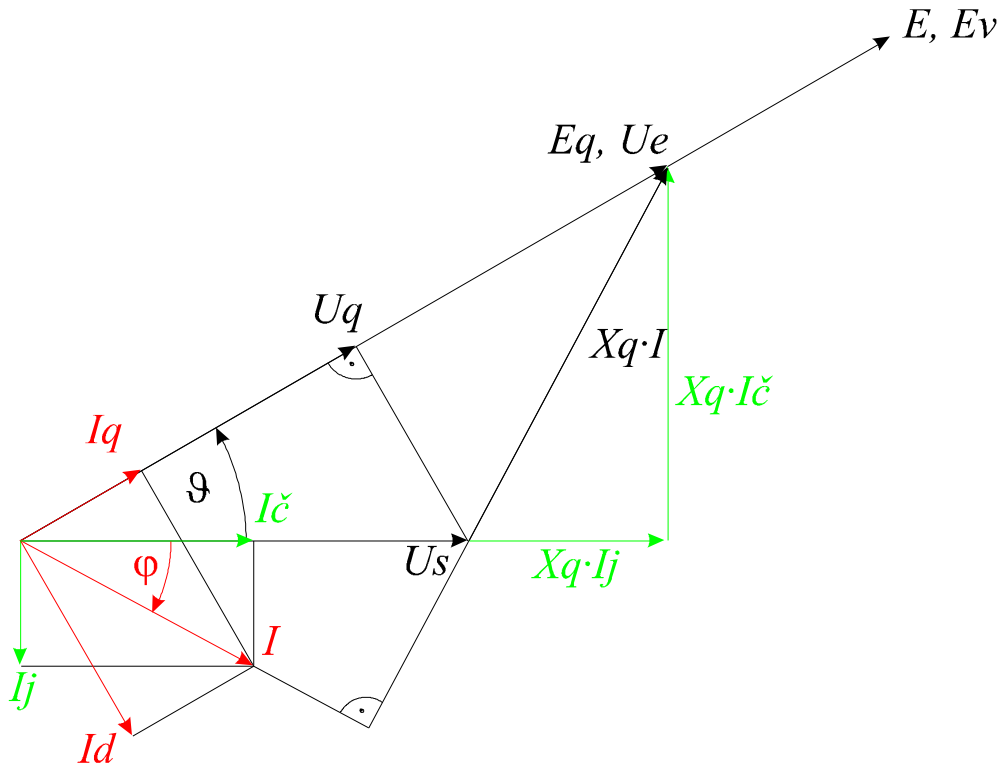
Trojfázový zdánlivý výkon:
$$s = 3 \frac{u_S \cdot e_V}{x_d} \left(\sin \vartheta + j \left(\cos \vartheta - \frac{u_S}{e_V} \right) \right)$$

Fázorový diagram synchronního stroje s vyniklými póly (hydroalternátoru):



Dle podobnosti trojúhelníků:

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



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

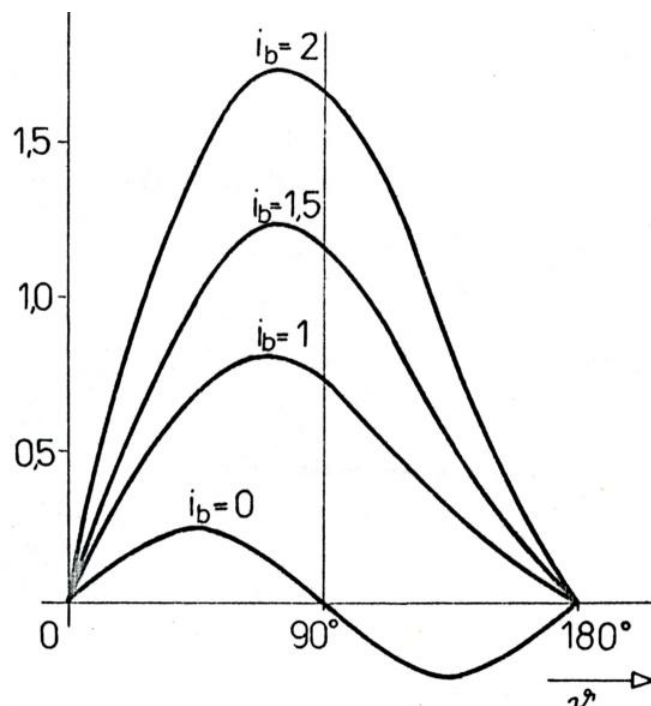
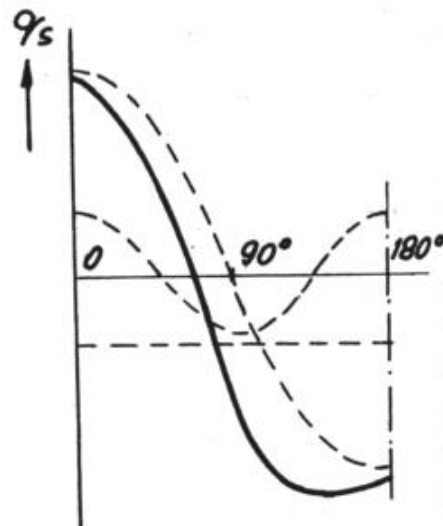
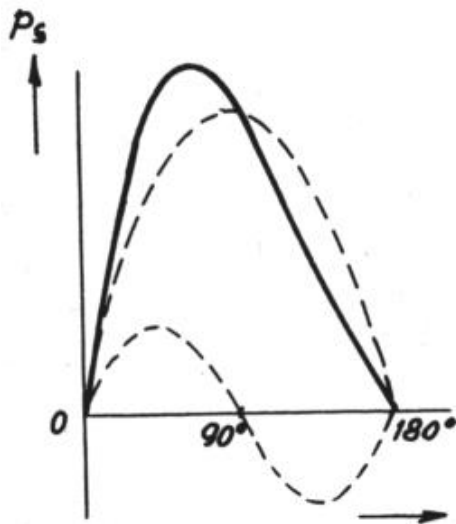
$$P_S = U_S \frac{E_q}{X_q} \sin \vartheta = \frac{U_S}{X_q} \left[E_V \frac{X_q}{X_d} + U_q \frac{X_d - X_q}{X_d} \right] \sin \vartheta =$$

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

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

Analogicky:

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

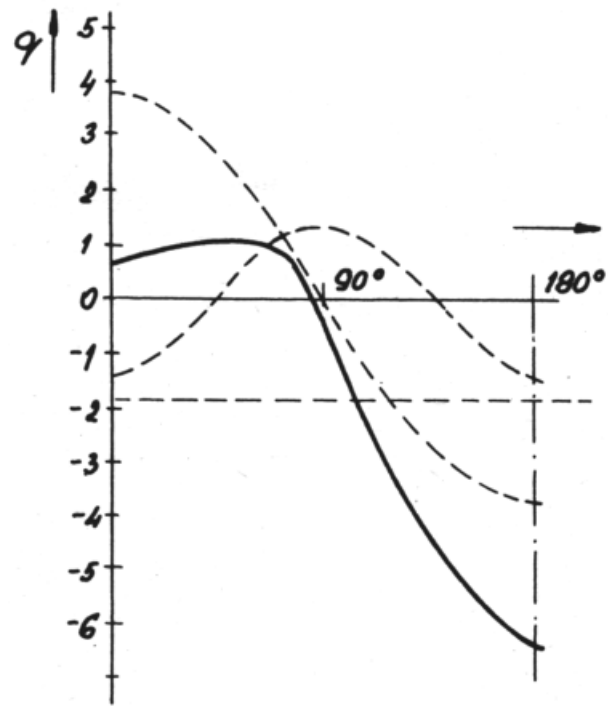
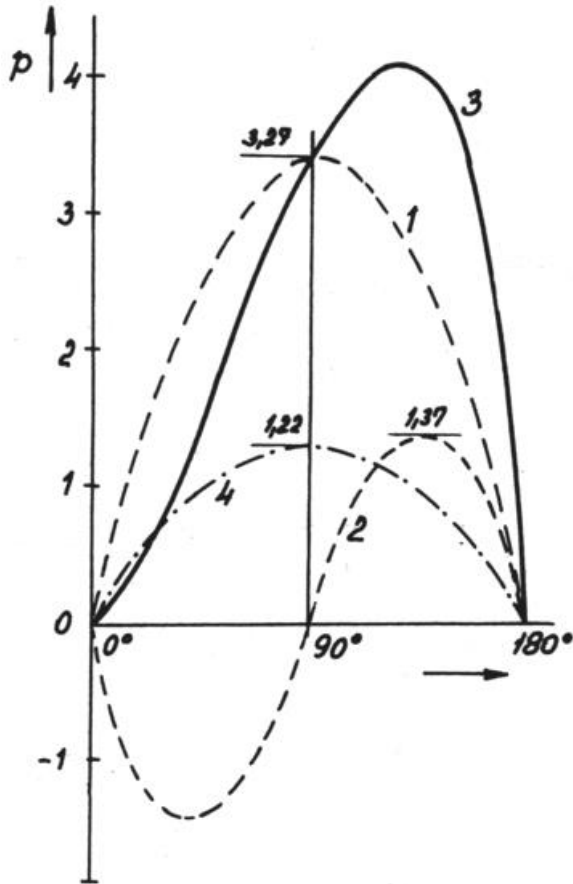


Výkon dodávaný synchronním strojem s regulací buzení:

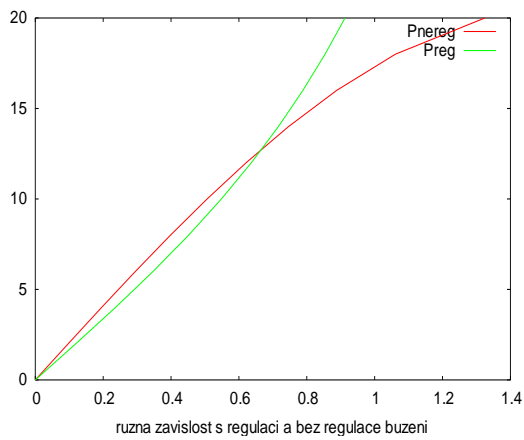
Pro regulaci jako základní kritérium obvykle uvažujeme konstantní velikost svorkového napětí alternátoru. Potom:

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

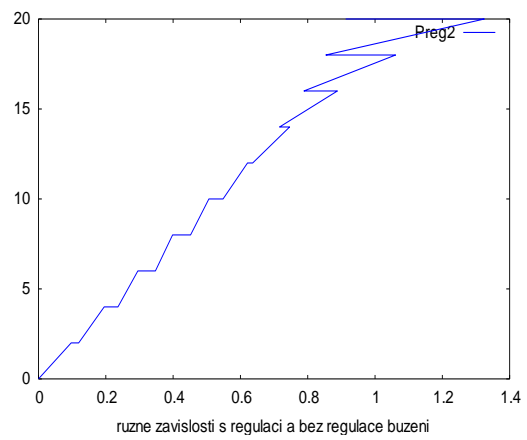
$$Q_{SREG} = \frac{U_q \cdot U_S}{X_V} \cos \vartheta - \frac{U_S^2}{2} \cdot \frac{X_q}{(X_q + X_V) \cdot X_q} \cos(2\vartheta) - \frac{U_S^2}{2} \cdot \frac{X_q + 2X_V}{(X_d + X_V) \cdot X_q}$$



Zavislost vykonu dodavaneho do site na zateznom uhlu

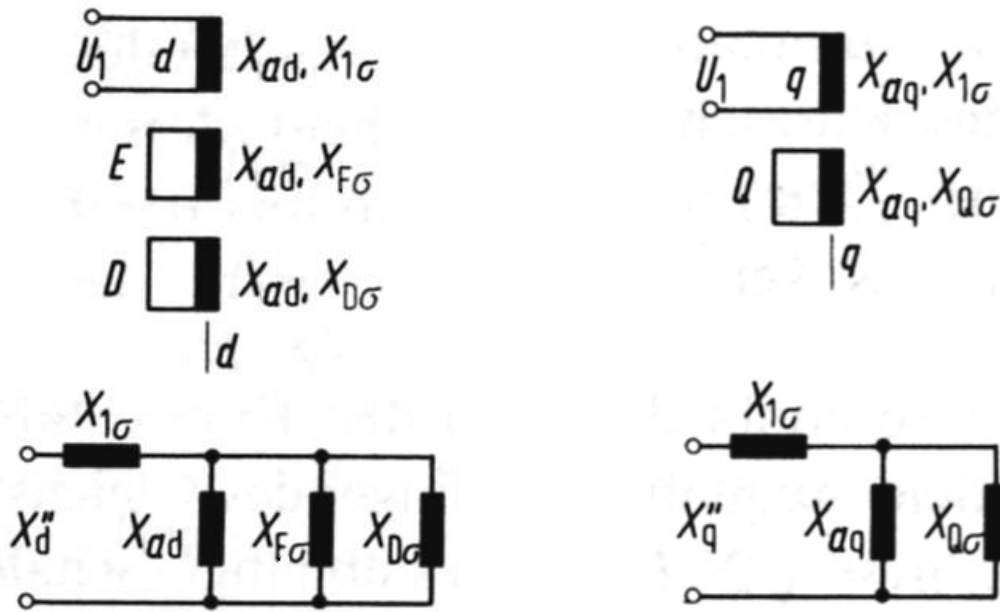


Zavislost vykonu dodavaneho do site na zateznom uhlu



Další parametry alternátoru pro neustálené stavy:

Reaktance



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

(tranzitní) reaktance

x'_q - příčná přechodná reaktance

$$x''_d = x_\sigma + \frac{x_{F\sigma}x_{ad}x_{D\sigma}}{x_{F\sigma}x_{ad} + x_{F\sigma}x_{D\sigma} + x_{ad}x_{D\sigma}}$$

- podélná rázová (subtranzitní) reaktance

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

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)