

Synchronní stroje

Synchronní stroje

- mohou pracovat jako:
 - synchronní generátory - alternátory,
 - synchronní motory,
 - synchronní kompenzátory – dodávají do sítě pouze jalovou složku proudu a ze sítě odebírají činný výkon spotřebovaný na krytí mechanických ztrát.
- podle rychlosti otáčení se dělí na:
 - rychloběžné – turboalternátory, turbomotory,
 - pomaloběžné - s vyniklými (vyjádřenými) póly.

Princip činnosti alternátoru:

- magnetický obvod statoru ve tvaru dutého válce je složený z tenkých izolovaných plechů 0,5 mm silných, (na rozdíl od transformátoru nejsou tyto plechy orientované a proto mají větší ztráty),
- v drážkách statoru je uloženo vinutí 3 fází, posunutých o 120°, připojené k trojfázové síti,
- rotor může být dvou provedení:
 - **rychloběžné stroje** mají rotor dlouhý (několik m), jedná se o opracovaný válcový výkovek (maximální průměr je něco přes 1 m) s vyfrézovanými drážkami a obsahující rotorové vinutí,
 - **pomaloběžné stroje** mají tzv. vyniklé póly = nástavce rotoru přišroubované ke hřídeli, vyniklý pól je obepnut budícím vinutím, pól je ukončen pólovým nástavcem, vyniklé póly a jejich nástavce se při velkých rozměrech rotoru (průměr až 5 m) vyrábí z několik mm silných ocelových plechových výlisků, spojených nýtováním nebo šroubováním,
- rotor je napájen stejnosměrným proudem, proto nemusí být magnetický obvod rotoru složen z tenkých ocelových plechů,
- rotorové – budící – vinutí je napájeno přes kroužky a kartáče stejnosměrným budícím proudem,
- budícím proudem vytvořený stálý magnetický tok se uzavírá přes magnetický obvod statoru,
- otáčením nabuzeného rotoru se v důsledku měnícího se magnetického toku (otáčejícího se rotoru a jeho magnetického pole) ve statorovém vinutí indukuje napětí,
- velikost indukovaného napětí je obecně dána indukčním zákonem:

$$u_i = \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \Rightarrow u_i = B \cdot l \cdot v$$

kde: B je velikost indukce ve vzduchové mezeře mezi rotorem a statorem,
 l – délka vinutí rotoru,
 v – obvodová rychlost rotoru

- pro efektivní hodnotu napětí indukovaného ve vinutí statoru platí:

$$U_i = 4,44 \cdot B_{\delta} S_{Fe} \cdot N \cdot f \cdot k_V$$

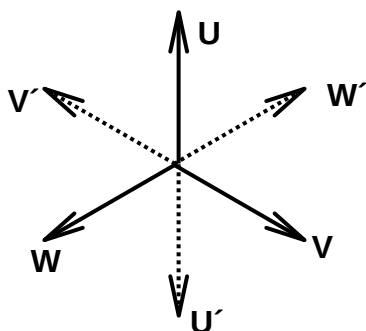
kde: B_{δ} – indukce ve vzduchové mezeře,
 S_{Fe} – průřez magnetického obvodu cívky,
 N – počet závitů cívky,
 f – kmitočet sítě,
 k_V – činitel vinutí - zohledňuje krok cívky a počet pólů stroje bývá 0,95÷0,97

- kmitočet indukovaného napětí je dán otáčkami rotoru a počtem pólových dvojic,
- synchronní otáčky jsou dány počtem pólových dvojic (počtem pólů):

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

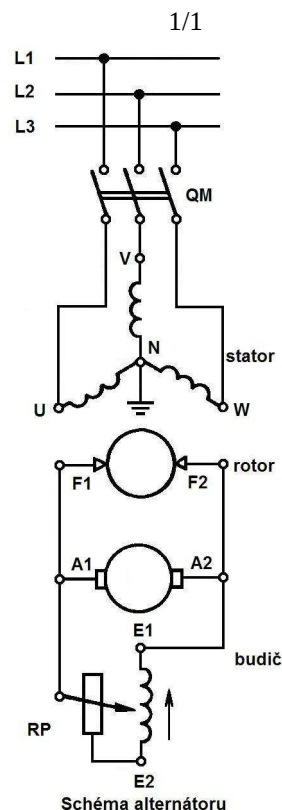
kde: p – počet pólových dvojic

- pro stroj se 4 pólovými dvojicemi pro průmyslový kmitočet 50 Hz: $n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ ot. min}^{-1}$
- pólová dvojice rotoru je tvořena severním a jižním pólem, má-li motor více pólů střídají se póly rotoru v pořadí S-J-S-J-S-J-S-J...
- obdobným způsobem se musí střídát i vinutí statorové, jeho cívka se skládá ze sudého počtu stran (nejméně 2) uložených v drážkách magnetického obvodu statoru, strany cívek jsou spojeny čely (předním a zadním),



Fázory indukovaných napětí v 3-fázovém vinutí statoru zohledňující orientaci indukovaných napětí v jednotlivých fázích vinutí 2- pólového synchronního generátoru, symboly U' , V' a W' značí druhou polovinu vinutí nacházejícího se pod opačným pólem rotoru

- stator i rotor musí mít stejný počet pólových dvojic (pólů),



- vzdálenost mezi fázemi statorového vinutí je $\alpha_{el}=120^\circ$ elektrických,
- pro motor s více pólovými dvojicemi je skutečná vzdálenost jednotlivých pólů (fází):

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_{el}}{p}$$

kde: α_0 je skutečné posunutí vinutí jednotlivých fází,

α_{el} je posunutí fází v rámci jedné periody indukovaného napětí – pro 3 fázové napětí je rovno 120° ,

- pro stroj se 4 pólovými dvojicemi:

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_{el}}{p} = \frac{120}{4} = 30^\circ$$

- napájení budícího vinutí se provádí z budiče – tím je nejčastěji cize nebo paralelně buzené dynamo umístěné na stejné hřídeli jako alternátor, budičem může být i usměrňovač,
- výstupní napětí se reguluje velikostí budícího proudu = indukci **B**,

Rychloběžné alternátory – turboalternátory, mají nejčastěji 1 pólovou dvojici $p=1 \Rightarrow$ otáčí se rychlostí $3\,000\text{ ot.min}^{-1}$, jejich hřídel je horizontální – vodorovná. Vzhledem k vysokým otáčkám musí být rotor hladký a dobře vyvážený (nejčastěji pracují synchronní rychloběžné stroje v nadkritických otáčkách). Hřídele turboalternátorů se vyrábí z chomnikové oceli s přísadou molybdenu, ve vyfrézované drážce je uloženo budící vinutí, drážky jsou uzavřeny nemagnetickým mosazným klínem. Spojené klíny plní funkci tlumiče kyvů – amortizéru, omezujícího kývání alternátoru okolo jmenovitého kmitočtu, kdy hrozí vypadnutí stroje ze synchronních otáček.

Pomaloběžné alternátory – hydroalternátory, jsou poháněny vodními turbínami otáčejícími se rychlostí v řádu stovek otáček za minutu, tomu odpovídá i velký počet pólových dvojic až 34 pólových dvojic (tomu odpovídají otáčky $88,24\text{ ot.min}^{-1}$). Jejich hřídel je nejčastěji svislý a rotor má značný průměr i několik metrů. Konstrukce hydro alternátoru je z větší části svařovaná s magnetickým obvodem je složeným z plechů !

Měděná vinutí se izolují hedvábím, bavlnou nebo skelným vláknem.

Chlazení stroje se provádí u menších výkonů vzduchem, u turboalternátorů velkých výkonů je stroj hermeticky uzavřen a chlazen vodíkem (malá měrná hmotnost vodíků snižuje aerodynamické ztráty otáčejícího se rotoru, ale současně vodík lépe odvádí teplo). Magnetický obvod obsahuje podélné mezery umožňují proudění chladícího média (vzduchu nebo vodíku). Magnetický obvod statorů velkých strojů může být chlazen vodou proudící v trubkách chlazení.

V elektrárnách ČR se používají turboalternátory viz. tabulka

Elektrárna	Generátor		Chlazení alternátoru
	výkon[MW]	napětí[kV]	
Opatovice	60	10,5	vzduchem (vodíkem)
Pruněrov I	110	13,8	vodíkem
Dětmárovice	200	15,75	stator vodou, ostatní části vodíkem
Dukovany	220	15,75	
Mělník III	500	20	
Temelín	1 000	24	

Paralelní chod alternátoru a podmínky jeho připojení k síti:

- alternátory mohou pracovat paralelně, výkon se mezi alternátory rozděluje v závislosti na výkonu turbín a velikosti budícího proudu – buzení (jeho velikost ovlivňuje vnitřní indukované napětí ve statoru),
- **pro připojení generátoru k síti je třeba splnit tyto podmínky** – (generátor a síť mají) :
 - 1) stejný směr otáčení točivého pole – nastaví se jednou pro vždy při instalaci,
 - 2) stejné napětí,
 - 3) stejný kmitočet,
 - 4) napětí jsou ve fázi – ve stejný okamžik je napětí daných fází stejné, tj. fáze nejsou vůči sobě posunuty,
- proces připojení k síti se nazývá fázování – nejjednodušší způsob používal žárovky – např. na tmou, kdy napětí mezi stejnými fázemi bylo nulové a žárovky připojené na stejné fáze zhasly, dnes se používají samočinné fázovací přístroje,
- případný proudový náraz vzniklý při fázování se do 1 sekundy vyrovná a alternátor je vtažen do kmitočtu sítě,
- automatika samočinně nastavuje budící proud tak, aby bylo zajištěno stálé výstupního napětí v závislosti na zatěžovacím proudu a jeho účinnosti,
- v minulosti bylo problémem udržet stálý kmitočet velmi zatížené sítě, důvodem byla nepřesná odstředivá regulace otáček turbín a současně snahy o snížení ztrát v rozvodné síti snížením kmitočtu až o 1 Hz, (ztráty vířivými proudy v magnetickém obvodu jsou závislé na druhé mocnině kmitočtu),
- dne s se používá číslicové měření otáček turbín umožňující jejich přesnou regulaci – proto se chyby v kmitočtu se pohybují až v setinách Hz, to umožnilo přímé napojení naší energetické soustavy na západoevropskou, to umožňuje ČEZ exportuje až 40% vyrobené energie hlavně do Německa a Itálie.

Zátěžný úhel:

- při zatížení alternátoru dochází k úbytkům napětí hlavně na reaktancích vinutí $\Rightarrow$ zpoždění točivého pole statoru za rotorem, toto zpoždění je představuje tzv. **zátěžný úhel** β ,
- při přetížení alternátoru může stoupnout **zátěžný úhel** až na mezní hodnotu, následkem je vypadnutí generátoru ze synchronismu doprovázené průtokem velkých proudů statorovým vinutím, nadproudové ochrany následně generátor odpojí od sítě a automatika turbínu odbudí a zastaví,
- u motoru se v důsledku zatížení zpožďuje rotor o **zátěžný úhel** β za točivým polem rotoru, při přetížení motoru = překročení mezní hodnoty **zátěžného úhlu** ($\pi/2_{el}$) se motor zastaví a statorem začne protékat velký proud $\Rightarrow$ odpojení motoru nadproudovými ochranami.

Rízení napětí a buzení synchronních strojů:

- každá změna zátěže způsobuje změnu výstupního napětí generátoru v důsledku úbytku napětí na vinutí stroje, které je nejvíce ovlivněno celkovou reaktancí stroje X_d ,
- pokles napětí se kompenzuje zvýšením budicího proudu v jehož důsledku se zvětší indukované napětí U_{fb} , současně dochází ke změně zátěžného úhlu β ,
- pro zabezpečení stálého napětí na svorkách generátoru jsou generátory vybaveny systémem regulace výstupního napětí,
- **ruční řízení napětí** se ještě ojediněle používá u starších samostatně pracujících náhradních zdrojů – dieselagregátů, stroj používající ruční regulaci musí být tvrdý, aby se při změně zátěže měnilo výstupní napětí pouze nepatrně,
- základem správné regulace napětí je kromě měření výstupního napětí i vyhodnocení zatížení generátoru,
- **starší regulátory** používaly mechanické spojení vyhodnocovacího členu (systému měřícího U a I) s výkonovým členem (reostatem) ovládajícím buzení derivačního (paralelně buzeného) dynamu,
- **moderní samočinné regulátory** zpracovávají údaje z měření výstupního napětí a proudu alternátorů, tyto údaje vyhodnotí řídicí jednotka, která předá povely akčnímu členu, který nastaví odpovídající parametry řízeného usměrňovače,

Buzení synchronních strojů:

- derivačním dynamem** (paralelně buzeným) - nejjednodušší a nejstarší způsob buzení rotorového vinutí,
 - dynamo je spojeno s hřídelí alternátoru,
 - výhodou systému je nezávislost na jiném zdroji elektrické energie, dnes se tento systém používá hlavně u náhradních zdrojů.
- buzení alternátorů s fázovou kompaudací přes usměrňovač**
 - napájení rotoru je provedeno přes do hvězdy zapojenou sériovou kombinaci měřícího transformátoru proudu a napětí (pro všechny 3 fáze), získané výstupní napětí pro napájení budicího vinutí je usměrněno dvoucestným (můstkovým) trojfázovým usměrňovačem,
 - výhodou systému se schopnost regulovat buzení v závislosti na zatížení alternátoru (to je umožňuje zapojení měřících transformátorů proudu do obvodubuzení) v plném rozsahu zatížení a účinníku.
- bezkrůžkový stroj s rotujícím usměrňovačem** – k napájení budicího vinutí je použit pomocný alternátor,
 - pomocný alternátor je mechanicky spojen s rotorem alternátoru,
 - rotor (kotvu) pomocného alternátoru tvoří 3 –fázové vinutí spojené do hvězdy, výstupní napětí je usměrněno 3-fázovým dvoucestným usměrňovačem a napájí budicí vinutí (diody usměrňovače jsou unášeny rotorem !),
 - řízení napětí se provádí změnou buzení pomocného generátoru regulátorem snímajícím údaje z výstupu alternátoru,
 - výhodou systému je odstranění kroužků budicího vinutí.
- řízeným usměrňovačem** – napájení budicího vinutí je provedeno přes kroužky,
 - zdrojem proudu je tyristorový řízený usměrňovač napájený ze sítě nebo z pomocného generátoru,
 - řízení usměrňovače se provádí regulační jednotkou generující řídicí impulsy pro řízení usměrňovače,
 - výhodou systému je velká přesnost regulace.

Odbuzovač

- při zkratech je nutné rychlé odpojení generátoru, aby nedošlo k jeho poškození (hlavně v důsledku tepelného a dynamického působení zkratového proudu),
- při odpojení musí být alternátor odbuzen, aby nedošlo k překročení výstupního napětí na nezatíženém stroji a při zkratech byly omezeny účinky zkratových proudů,
- rychlé odpojení budicího vinutí, které má značnou indukčnost (L_b) by způsobilo značné přepětí $\left(u = L \frac{\Delta i}{\Delta t}\right)$ a v jejich

důsledku by došlo k poškození izolace vinutí a vypínače (v magnetickém obvodu je akumulována značná energie

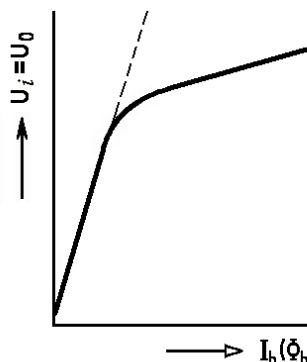
$$\left(W_b = \frac{1}{2} L_b \cdot I_b^2\right)$$

- **rychlé odpojení generátoru zajistí odbuzovač těmito úkony:**

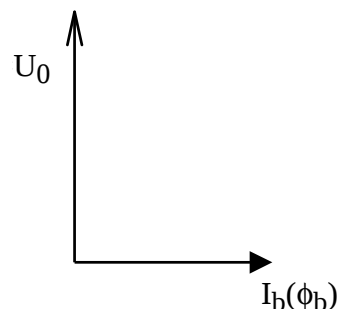
- 1) připojí k budicímu vinutí alternátoru zatěžovací odpor omezující indukovaná napětí v rotoru po odpojení buzení,
- 2) zatíží budič náhradní zátěží pro bezpečné odstavení budiče bez vzniku přepětí při rychlém odpojení zátěže,
- 3) odpojí budicí vinutí od budiče – ten pak dočasně (do zastavení turbíny) pracuje do náhradní zátěže.

Provozní stavy alternátoru:**a) Chod naprázdno:**

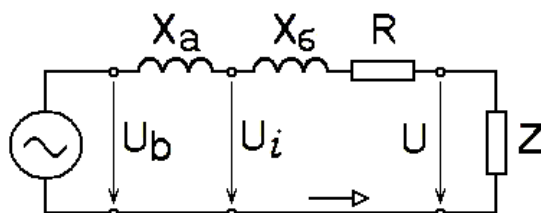
- alternátor je roztočený na synchronní otáčky a nabuzený,
- velikost výstupního napětí je dáno budícím proudem,
- výstupní napětí předbíhá budící proud o 90° a sleduje magnetizační charakteristiku,



Charakteristika alternátoru naprázdno

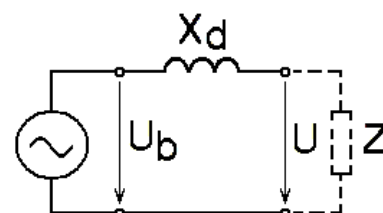
**b) Chod při zatížení:**

- při zatížení alternátoru začne statorovým vinutím protékat proud a okolo vodičů statorového vinutí se vytvoří magnetické pole – mluvíme o reakci statorového vinutí – reakci kotvy (kotvou je nazývána ta část stroje v jehož vinutí se indukují napětí),
- magnetické pole kotvy (statoru) ovlivňuje budící pole rotoru – nejlépe budou důsledky vidět na fázorovém diagramu,
- pro výsledný budící tok platí: $\Phi_V = \Phi_b + \Phi_a$
- při zanedbání odporu statorového vinutí je možné nakreslit fázorový diagram:

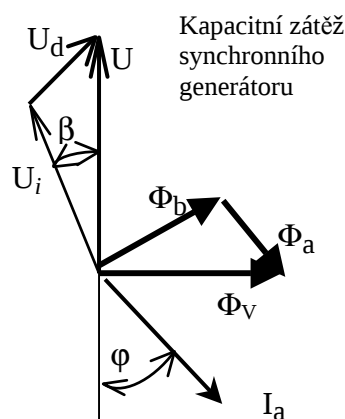
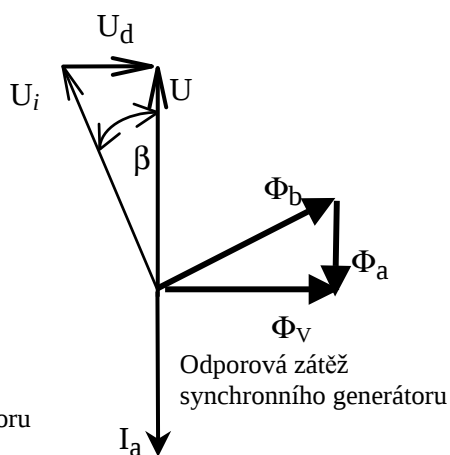
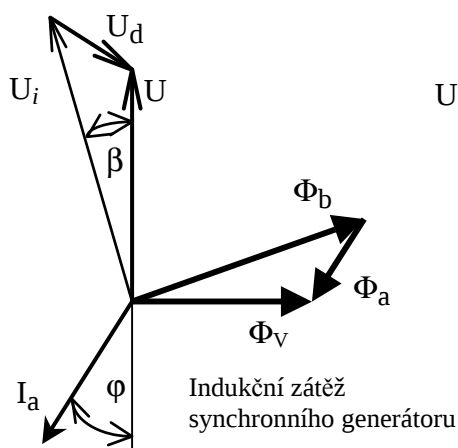


Náhradní schéma synchronního alternátoru

X_a – reaktance reakce statorového vinutí,
 X_σ – rozptylová reaktance, R – činný odpor vinutí,
 U_b – budící napětí, U_i – indukované napětí,
 U – svorkové napětí



Zjednodušené náhradní schéma synchronního stroje

**Zhodnocení důsledku vlivu zátěže na synchronní alternátor:**

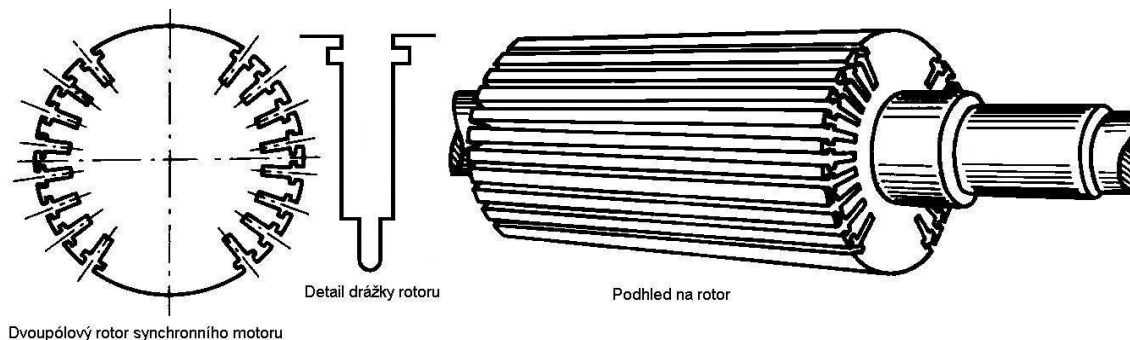
- při chodu naprázdno je výstupní napětí rovno indukovanému $U = U_i$ danému budícím proudem $I_b \Rightarrow$ tokem Φ_b ,
- reaktance kotvy má při induktivní i odporové zátěži má za následek pokles napětí na výstupu alternátoru, alternátor je třeba po připojení zátěže přibudit, aby výstupní napětí bylo shodné s napětím sítě,
- při připojení zátěže kapacitního charakteru se naopak v důsledku reaktance kotvy výstupní napětí zvýší a v obvodu buzení alternátoru je třeba snížit budící proud,
- změnu buzení podle okamžitého zatížení alternátoru provádí automatika regulace napětí,
- při zkratu musí ochrany urychleně odpojit buzení, protože automatika regulace napětí by generátor neustále přibuzovala.

c) Chod nakrátko:

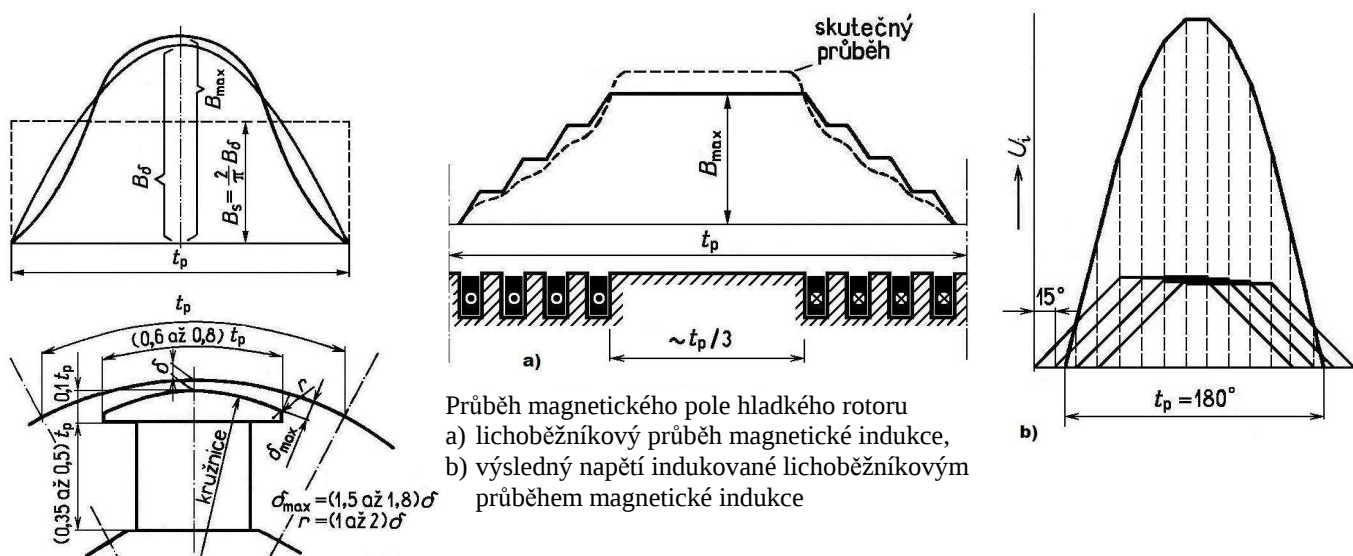
- při zkratu na výstupu alternátoru protéká alternátorem nejprve veliký zkratový proud, postupně se veškeré budící napětí spotřebuje na pokrytí úbytků napětí na reaktancích a činném odporu vinutí (činný odpor ten lze pro jeho malou hodnotu zanedbat),
- po doznění přechodového děje se proud ustálí na hodnotě proudu nakrátko I_k ,
- důležitým parametrem je poměrný proud nakrátko: $i_k = \frac{I_k}{I_N}$ ten bývá v rozmezí (0,5 až 1,4), dnes je to spíše nižší hodnota,
- zkratový proud dosahuje zpočátku až $20 I_N$! jeho maximum je značně závislé na okamžiku zkratu (při jaké okamžité hodnotě napětí dojde ke zkratu).

Vinutí synchronních strojů:

- aby výstupní napětí statoru mělo sinusový průběh je nutné zajistit i sinusový průběh budícího toku vytvořeného **rotorovým vinutím**, toho se dosahuje:
 - a) u **pomaloběžných strojů** s vyniklými póly se sinusového průběhu indukce ve vzduchové mezeře dosahuje úpravou tvaru pólového nástavce budícího vinutí – zakřivení okrajů je větší než by odpovídalo kružnici vedené ze středu rotoru,
 - b) u **turboalternátorů** je vinutí rozloženo na část obvodu rotoru (nejedná se tedy o válcovou cívku, ale několik cívek oddělených zuby magnetického obvodu rotoru), v důsledku rozptylu magnetického toku procházejícího zuby magnetického obvodu mezi drážkami vinutí je výsledkem stupňovitý průběh magnetického toku ve vzduchové mezeře stroje jehož průběh se velmi přibližuje sinusovému průběhu,



- **vinutí statoru** jsou rozložena následujícím způsobem:
 - jedna strany vinutí jedné fáze se musí nacházet pod severní pól a druhá strana pod jižním pól, tj. konce vinutí jsou posunuta o 180° elektrických proti začátkům,
 - začátky 3-fázového vinutí se pravidelně střídají po 120° el. a stejným způsobem pak jejich konce posunuté o 180° el. proti svým začátkům,
 - vinutí se izolují bavlnou, hedvábím nebo skelným vláknem



Tvar pólového nástavce pro dosažení sinusového průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře pomaloběžného stroje

Kývání

- je stav, kdy v důsledku změny zátěže dochází ke změně zátěžového úhlu β - náhlém odlehčení alternátoru,
- k zamezení tzv. kývání rotoru velkých alternátorů je na rotoru umístěn tlumič kyvů (amortizér) omezující tyto nepříznivé vlivy,
- tlumič kyvů alternátoru s vyniklými póly je tvořen měděnými nebo bronzovými tyčemi umístěnými u povrchu magnetického obvodu pólového nástavce (složeného z plechů), jednotlivé tyče jsou spojenými měděnými kruhy a vytváří neúplnou klec (podobně jako vinutí rotoru nakrátko asynchronního motoru),
- tlumič kyvů turboalternátoru je tvořen bronzovými klíny, zajišťující rotorové vinutí proti působení odstředivých sil, spojených v čelech rotoru vodivým měděným prstencem,
- při kývání se v tlumiči indukuje napětí a následně jim protékají velké proudy, mechanická energie kyvů se mění na teplo, tím je kývání rotoru tlumeno,
- při náhlé změně zatížení může vlivem setrvačnosti proběhnout rotor do nové rovnovážné polohy, překročí-li zátěžný úhel $\beta > 1/2\pi$ elektrických dojde k zastavení motoru,
- při přetížení alternátoru může dojít k proběhnutí rotoru tehdy, dosáhne-li zátěžný úhel $\beta > 1/2\pi$ elektrických, generátor vypadne ze synchronismu $\Rightarrow$ stoupnou jeho otáčky, následkem je průtok zpětného proudu a odpojení stroje činností ochran.

Synchronní motor

- konstrukce motoru je podobná konstrukci alternátoru,
- problémem motorů je jejich spouštění – synchronní motor není schopen se sám roztočit - jeho záběrný moment je nulový,
- u stojícího motoru dochází k indukci značného napětí v budícím rotorovém vinutí (vinutí rotoru se chová jako transformátor nakrátko), proto se při spouštění vinutí odpojeno od budiče a zatíženo vhodným odporem, velikost omezovacího odporu se volí $R = 5 \div 7 R_b$ (R_b - odpor budícího vinutí),
- spouštěcí proud dosahuje $(3 \div 6) I_n$

Podmínky pro rozběh motorů:

- při rozbíhání je buzení odpojeno a budící vinutí zatíženo odporem,
- má-li motor rozběhové vinutí je tvořeno klecí nakrátko jako u asynchronního motoru nakrátko nebo omezovačem kyvů (alternátoru),
- při dosažení asi 95% n_s je po zapojení buzení je motor schopen se vtáhnout do synchronních otáček,

Problém spouštění motorů se řeší:

- 1) **roztočením** nezatíženého motoru **asynchronním motorem** s menším počtem pólových dvojic
 - rozběhový motor se otáčí na synchronními nebo nadsynchronními otáčkami a oři dosažení otáček následuje nabuzení a přifázování k síti,
 - způsob se používá pro velmi velké výkony až 10MW a synchronní kompenzátory,
- 2) **autosynchronní rozběh** – nejčastější způsob spouštění
 - při rozběhu má motor odpojené buzení(to je zatíženo náhradním odporem),
 - motor se po připojení k napájení roztočí pomocí klece rozběhového vinutí na asynchronní otáčky (asi 95% n_s)
 - po připojení buzení je motor vtažen do synchronních otáček,
 - k zatížení motoru může dojít až po ukončení rozběhu.

Omezení záběrného proudu se dosahuje:

- tlumivkou připojenou do uzlu statorového vinutí zapojeného do hvězdy – po rozběhu je tlumivka přemostěna spínačem nakrátko,
- přepojováním statorového vinutí z hvězdy nebo trojúhelníka,
- spouštěcím autotransfornátorem – autotransfornátor s pevnou odbočkou nejprve sníží napájecí napětí $\Rightarrow$ i snížení záběrného proudu, v druhém kroku je část transformátoru zapojena jako tlumivka (střed vinutí autotransfornátoru je rozpojen), v posledním kroku je motor připojen na plné napětí a následně nabuzen,
- postupným paralelním spojováním větví statorového vinutí – statorové vinutí jednotlivých fází některých strojů tvoří několik větví a jejich postupným paralelním spojováním se snižuje impedance vinutí stroje.

Výhody synchronního motoru:

- 1) větší účinnost než asynchronní motor,
- 2) stálé otáčky,
- 3) nezatěžuje síť jalovým výkonem ($\cos\varphi=1$), dokáže dokonce vyrábět jalový proud,
- 4) výkon i moment závisí na první mocnině napětí (u asynchronních motorů na 2-hé mocnině napětí !).

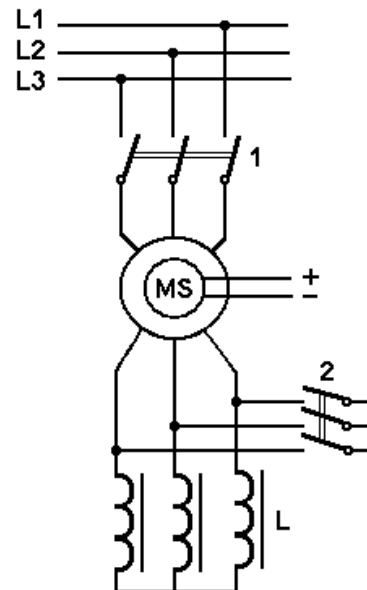
Nevýhody synchronního motoru:

- 1) komplikovaný rozběh,
- 2) malý záběrný moment,
- 3) nutnost budiče – může jím být i řízený polovodičový usměrňovač,
- 4) nemožnost rychlé reverzace,
- 5) nemožnost regulace otáček –je nutný frekvenční měnič,
- 6) při vypadnutí ze synchronizace se musí motor znovu rozbíhat.

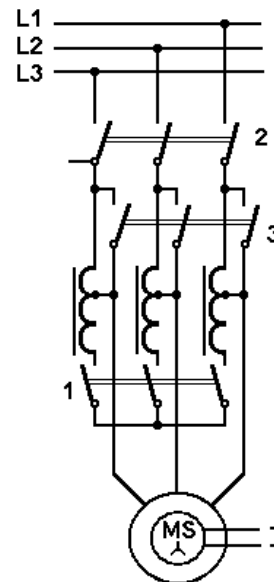
Užití synchronních motorů:

pohon všech trvale provozovaných a rovnoměrně zatížených strojů velkých výkonů:

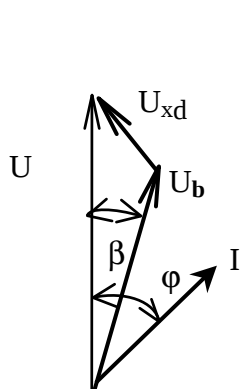
- 1) kompresory a dmýchadla,
- 2) kulové mlýny v cementárnách a elektrárnách,
- 3) čerpadla.



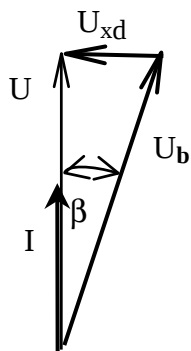
Spouštění synchronního motoru tlumivkou



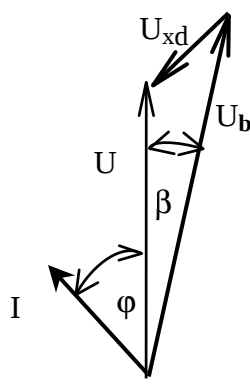
Spouštění synchronního motoru autotransfornátorem

Provozní stavy synchronního motoru:

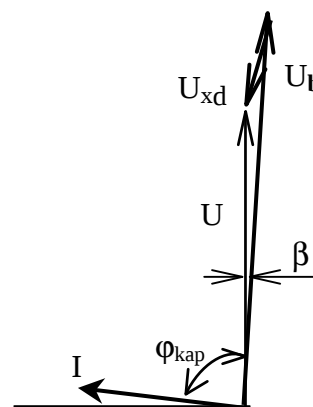
Podbuzený synchronní motor - RL zátěž sítě



Synchronní motor – jako činná (odporová) zátěž sítě



Přebuzený synchronní motor - RC zátěž sítě



Synchronní kompenzátor

Moment synchronního stroje:

Obecně při zanedbání ztrát pro točivý moment platí:

$$M = 9,55 \frac{m}{n_s} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

kde: m – počet fází

Pro stroj s hladkým rotorem z fázorového diagramu vyplývá:

$$X_d \cdot I \cdot \cos \varphi = U_{ib} \cdot \sin \beta$$

po úpravě :

$$I \cdot \cos \varphi = \frac{U_{ib}}{X_d} \cdot \sin \beta$$

po dosazení do první rovnice dostaneme:

$$M = 9,55 \cdot \frac{m}{n_s} \cdot U \cdot \frac{U_{ib}}{X_d} \cdot \sin \beta$$

Při stálém buzení a stálém napětí je moment závislý pouze na zátěžném úhlu β .

Maximální moment dává stroj při zátěžném úhlu $\beta = 1/2 \pi$, až po tento úhel pracuje stroj stabilně, při jeho překročení se motor zastaví, naopak u generátoru se otáčky zvýší, a stroj vypadne ze synchronismu.

S rostoucím zátěžným úhlem se moment motoru zvětšuje (u generátoru se jeho výkon dodávaný do sítě zvyšuje).

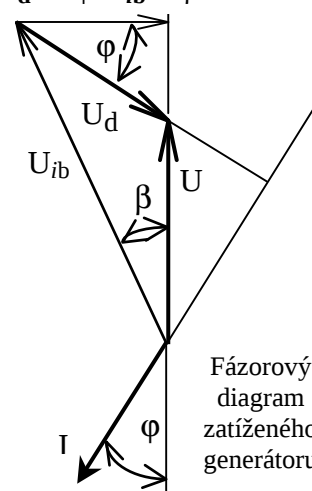
Maximální moment $M_{\max}$ odpovídá úhlu $\beta = 1/2 \pi$:

$$M_{\max} = 9,55 \cdot \frac{m}{n_s} \cdot U \cdot \frac{U_{ib}}{X_d}$$

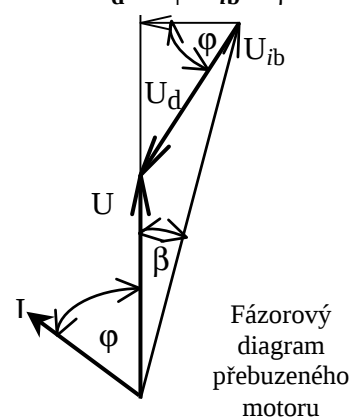
Mírou statické stability je přetížitelnost:

$$\frac{M_{\max}}{M_n} = \frac{P_{\max}}{P_n} = \frac{9,55 \frac{m}{n_s} U \frac{U_{ib}}{X_d} \cdot 1}{9,55 \frac{m}{n_s} U \frac{U_{ib}}{X_d} \cdot \sin \beta_n} = \frac{1}{\sin \beta_n}$$

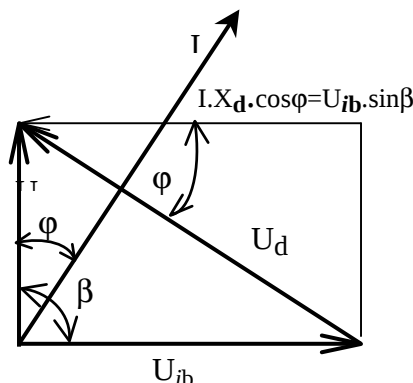
$$I \cdot X_d \cdot \cos \varphi = U_{ib} \cdot \sin \beta$$



$$I \cdot X_d \cdot \cos \varphi = U_{ib} \cdot \sin \beta$$



Moment stroje s vyniklými póly je kromě toho ještě ovlivněn příčnou synchronní reaktancí, výsledný moment se skládá z synchronního momentu a z reakčního momentu závislého na druhé harmonické síťového kmitočtu a nezávislého na buzení. Moment zvratu je větší než u stroje s hladkým rotorem, ale nastane při úhlu $\beta < 1/2 \pi$. Působením reakčního momentu se schopen se roztočený stroj udržet v chodu i při vypnutém buzení pokud $M < M_{r \max}$ a $\beta < 1/4 \pi$, maximální reakční moment ($M_{r \max}$) je však několikanásobně menší než maximální synchronní moment ($M_{s \max}$).



Fázorový diagram motoru při stálém buzení
a maximálním momentu

Ochrany generátorů:

- jsou samočinná zařízení zabráňující šíření poruchy a nedovolenému přetížení strojů v důsledku poruch,
- základem velké části ochrany chránících stroj před přetížením jsou měřicí transformátory napětí a hlavně proudů,
- informace získané měřicími členy jsou vyhodnocovány regulačními a ochrannými prvky a na základě jejich podnětů jsou provedeny akce zabráňující šíření nežádoucího stavu – ten je nejčastěji řešen odpojením a zastavením generátoru.

Rozdělení ochrany synchronních generátorů:

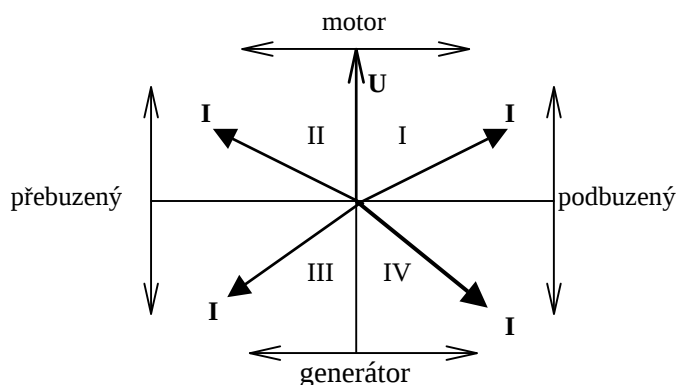
- nadproudová ochrana** – chrání generátor před přetížením s nastavením na $1,3 \div 1,5 I_N$ s nastavenou dobou působení $5 \div 10$ s.
- rozdílová ochrana** – chrání generátor před zkratem mezi vinutími fází, vinutí generátoru jsou zapojena do hvězdy a ve sledované fázi se porovnávají proudy na obou koncích vinutí dané fáze. Při překročení povolené hodnoty ΔI dojde k odpojení generátoru, jeho odbuzení a zastavení turbíny (na stejném principu pracuje proudový chránič). Nerovnoměrnost zatížení v síti se omezuje různým zapojením vinutí trojfázových transformátorů – Yd, Dy, Yz.
- závitová ochrana** – chrání stroj před důsledky mezizávitového zkratu – porovnávají se napětí jednotlivých fází,
- zemní ochrana statoru** – vybaví při porušení izolace vinutí statoru proti zemi – snímá se napětí mezi uzlem a statorem, velikost tohoto napětí je závislá na vzdálenosti zkratu od středu vinutí.
- zemní ochrana rotoru** – signalizuje jednoduché zemní spojení rotorového vinutí s kotrrou,
- napětíová ochrana** – chrání generátor před přepětím (jeho důsledkem je následné přetížení generátoru),
- zpětná wattová ochrana** – ochrana před zpětným výkonem ze sítě, např. při poklesu otáček a výkonu turbíny přejde generátor do motorického stavu $\Rightarrow$ poškození turbíny a generátoru, ochrana se realizuje dvěma wattmetry v Aronově zapojení,
- ochrana proti přehřátí** – hlídá jednotlivé části generátoru před zvýšením teploty nad mezní hodnotu, nejčastěji se do vinutí vkládají tepelná čidla,
- ochrana proti požáru** – nejjednodušším řešením je vhánění CO_2 do místa požáru na základě informací čidel reagujících na kouř nebo teplotu,
- ochrana brzděním generátoru** – při odpojení o síť se generátor brzdí mechanicky a současně také elektricky - stator se spojí nakrátko a buzení rotoru se sníží tak, aby vinutím statoru zapojeného nakrátko protékal jmenovitý proud I_N .

Ochrany motorů:

- nejsou tak rozsáhlé jako ochrany generátorů,
- základem je nadproudová ochrana chránící stroj před přetížením a zkratem, např. kombinace pojistek a tepelného relé nebo jističe s tepelnou spouští s odpovídající vypínací charakteristikou, u velkých výkonů je nadproudová ochrana realizována měřicími transformátory proudu napájejícími obvody ochrany,
- mnohé stroje mohou být vybaveny podpětíovými ochranami (následkem podpětí vyvine motor nedostatečný hnací moment a může být zátěžným momentem zastaven $\Rightarrow$ vinutím statoru začnou protékat velké proudy),
- dalšími často používanými ochranami jsou tepelné ochrany a ochrany proti požárům.

Provozní stavy synchronního stroje

- synchronní stroj se může nacházet v různých provozních stavech daných vzájemnou polohou fázorů napětí a proudu



Provozní stavy synchronního stroje

- I) v I kvadrantu pracuje stroj jako podbuzený motor – ze sítě odebírá magnetizační proud - synchronní motor by v tomto stavu neměl pracovat,
- II) v II kvadrantu pracuje stroj jako přebuzený motor dodávající do sítě jalovou složku proudu – jedná se o obvyklý provozní stav při kompenzaci jalové energie,
- III) v III kvadrantu pracuje stroj jako generátor dodávající činnou i jalovou složku proudu – jedná se obvyklý stav generátoru,
- IV) v IV kvadrantu pracuje stroj jako podbuzený generátor dodávající do sítě pouze činnou složku proudu – v tomto stavu by synchronní motor neměl pracovat.

Synchronním kompenzátor

- je zvláštním provozním stavem je stav synchronního stroje (motoru), kdy motor pracuje naprázdno - odebírá ze sítě malý činný proud nutný ke krytí ztrát naprázdno běžícího motoru, ale do sítě dodává velký jalový (magnetizační) proud,
 - synchronní kompenzátory se používají v rozvodnách vvn ke kompenzaci účinnosti pro dosažení co nejmenších ztrát při dálkovém přenosu elektrické energie z elektráren, kdy se do rozvodny z elektrárny přenáší pouze činný výkon,
- z hlediska konstrukce jsou synchronní kompenzátory samostatnou skupinou strojů.