

SYNCHRONNÍ STROJE

Obsah

1. Konstrukce synchronních strojů
2. Princip činnosti synchronního generátoru
3. Výkon a moment synchronního stroje s hladkým rotorem
4. Paralelní chod synchronního generátoru se sítí
5. Synchronní motory

2000

Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB – TU Ostrava
Ing. Stanislav Kocman

SYNCHRONNÍ STROJE

Význam a použití

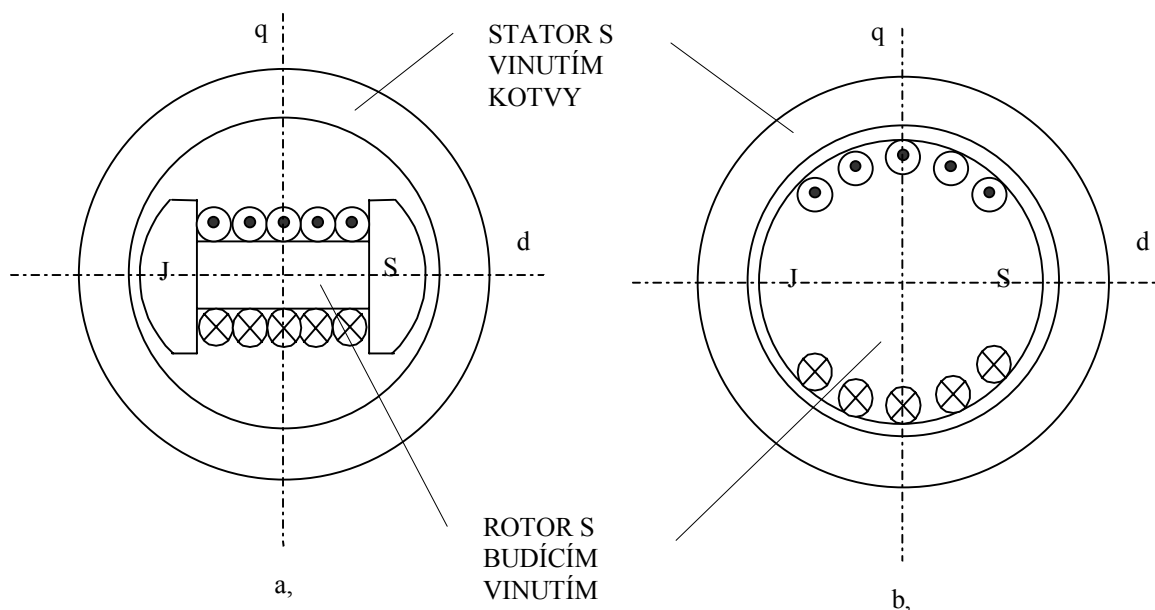
Synchronní stroje se nejprve používaly jako generátory pro výrobu střídavé elektrické energie a jsou dodnes nejdůležitějšími elektrickými stroji právě pro její výrobu. Synchronní generátory nazývané také *alternátory* jsou nejčastěji trojfázové a jsou největšími vyráběnými elektrickými točivými stroji s výkony i více než 1000 MW. Alternátory jsou v elektrárnách poháněny parními nebo plynovými turbínami při rychlosti otáčení 3000 min^{-1} a nazývají se *turboalternátory*, nebo jsou poháněny vodními turbínami při rychlosti obvykle podstatně nižší a nazývají se *hydroalternátory*. Později se synchronní stroje začaly používat také jako motory, jednak jako *synchronní kompenzátory* (pro zlepšování účinnosti v elektrické síti - sníží se tím zejména ztráty v síti a pro regulaci napětí v rozvodných sítích) a jednak pro pohony takových průmyslových zařízení, které nevyžadují časté spouštění a pracují s konstantní rychlostí a s málo proměnným činným zatížením jako jsou pohony velkých čerpadel, ventilátorů a kompresorů. S rozvojem výkonové elektroniky se synchronní motory uplatnily i v oblasti pohonů s regulací rychlosti a to u pohonů zařízení o výkonech řádově megawattů. V posledním období s prudkým rozvojem výkonové elektroniky, který umožnil vznik nových typů elektrických pohonů, našly synchronní motory uplatnění v oblasti průmyslové automatizace a robotiky. Většinou jde o pohony menších výkonů ve kterých se používají tzv. krokové motory, synchronní motory s permanentními magnety a reluktanční motory.

1. Konstrukce synchronních strojů

Jako každý točivý stroj skládá se synchronní stroj ze statoru a rotoru. Stator synchronního stroje se příliš neliší od statoru asynchronního stroje. Trojfázové vinutí statoru (neboli kotvy) je umístěno v drážkách statoru a je vyvedeno na statorovou svorkovnici. Na rotoru je pak umístěno budící vinutí napájené stejnosměrným proudem z tyristorového řízeného usměrňovače a nebo u starších strojů z budiče (stejnosměrného generátoru) přes sběrací kroužky a kartáče. Podle provedení rotoru se rozlišují dva základní typy synchronních strojů, a sice stroje s vyniklými póly (hydrostroje) obr.1a) a stroje s hladkým rotorem (turbostroje) obr.1b). Stroje s vyniklými póly mají cívky budícího vinutí nasazené na pólech, na jejichž koncích jsou připevněny pólové nástavce. Póly jsou zhotovené buď z dynamových plechů a nebo jsou masivní ocelolitinové a pouze pólové nástavce jsou z dynamových plechů. Stroje s hladkým rotorem mají rotor vykován z vhodné jakostní oceli.

Některé speciální synchronní stroje mají odlišnou konstrukci. Synchronní motory s permanentními magnety mají místo klasického budícího vinutí na rotoru permanentní magnety, čímž odpadá potřeba zdroje budícího proudu. Krokové motory mají vyniklé póly na statoru na kterých jsou umístěny cívky vinutí. Reluktanční motory nemají na rotoru žádné vinutí ani permanentní magnety a rotor je složen pouze z vhodně tvarovaných plechů.

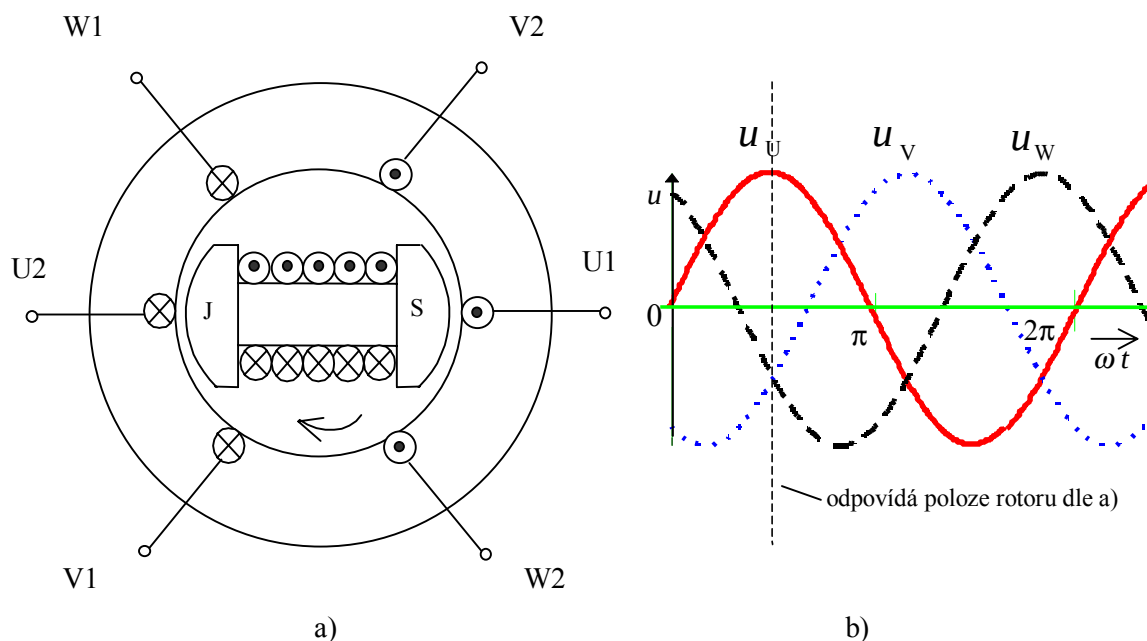
Chlazení synchronních strojů je vzduchové, u strojů vysokých výkonů vodíkové a vodní.



Obr.1 Konstrukční typy synchronních strojů
a) stroj s vyniklými póly, b) stroj s hladkým rotorem

2. Princip činnosti synchronního generátoru

Statorové vinutí dvojpólového alternátoru tvoří tři cívky (fáze U,V,W) vzájemně prostorově natočené o 120^0 (obr.2a). Rotorovým vinutím prochází stejnosměrný proud, který vybudí stejnosměrné magnetické pole. Poháněcí stroj, např.turbína otáčí takto nabuzeným rotorem konstantní rychlostí a do cívek statoru se tak indukují stejnosměrným magnetickým polem rotoru (které se otáčí s rotorem) napětí. Protože otáčením rotoru se mění velikost magnetického toku procházejícího plochami jednotlivých cívek statoru, jsou tato indukovaná napětí střídavá. Při sinusovém prostorovém průběhu magnetického toku procházejícího statorovými cívkami budou indukovaná napětí v cívkách rovněž sinusová a v jednotlivých cívkách vzájemně časově posunutá o 120^0 . Při poloze rotoru podle obr.2a, se do cívky U bude indukovat maximální napětí (plochou vymezenou cívkou U prochází v tomto okamžiku nulový magnetický tok rotoru). V cívkách V a W se indukují napětí o poloviční hodnotě a s opačným znaménkem. Při natočení rotoru o úhel 120^0 bude maximální hodnota indukovaného napětí v cívce V, při natočení o dalších 120^0 v cívce W. Časové průběhy indukovaných napětí v jednotlivých cívkách (fázích) statoru jsou na obr.2b. Jedna perioda střídavého indukovaného napětí odpovídá tedy otáčce rotoru dvojpólového alternátoru o 360^0 .



Obr.2 a) princip činnosti alternátoru, b) průběh indukovaných napětí v cívkách kotvy

Pro dvoj pólový alternátor bude tedy platit :

$$\omega \cdot T = 2 \cdot \pi$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \rightarrow T = \frac{60}{n}$$

$$f_1 = \frac{1}{T} \rightarrow f_1 = \frac{n}{60} \text{ (Hz, min}^{-1}\text{)}$$

n – otáčky rotoru synchronního stroje, tj. poháněcí turbíny

$$\text{obecně pro } p\text{-pólový alternátor: } f_1 = p \cdot \frac{n}{60}$$

f_1 – frekvence indukovaného napětí do statoru (kotvy)

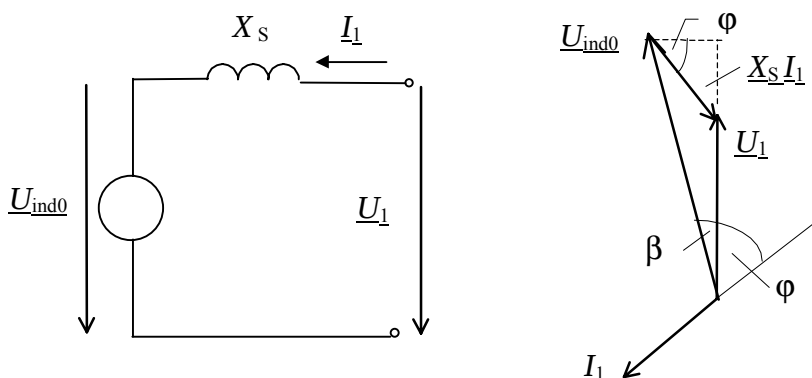
Připojí-li se ke svorkám vinutí statoru (tj.kotvy) trojfázová zátěž (tzn., že se alternátor zatíží), vinutím statoru bude procházet střídavý elektrický proud , jehož směr je dán Lenzovým zákonem (Obr. 2 a)). Tím, že vinutím statoru (kotvy) prochází střídavý trojfázový proud, vzniká stejně jako u asynchronního stroje točivé magnetické pole s otáčkami n_{s1} , které má stejnou rychlost otáčení jako rotor a jeho magnetické pole, skluz stroje je tedy nulový. Proto se stroj nazývá synchronní.

$$n_{s1} = n, s = 0, \quad f_1 = p \cdot \frac{n_{s1}}{60}$$

Pro efektivní hodnotu indukovaného napětí jedné fáze statoru pro nezatížený stroj platí stejný vztah jako u asynchronních strojů, neboť vinutí statoru je stejné :

$$U_{ind0} = 4,44 \cdot k_{v1} \cdot f_1 \cdot \phi \cdot N_1$$

Při zatíženém alternátoru je na svorkách vinutí statoru svorkové napětí U_1 . Na obr.3 je zjednodušené náhradní schéma a fázorový diagram alternátoru s hladkým rotorem., ve kterém X_s je tzv. synchronní reaktance vinutí statoru alternátoru. Činný odpor vinutí statoru se zanedbává, protože u většiny strojů platí, že je mnohem menší než reaktance X_s . Budicí obvod na rotoru stroje není v náhradním schématu uvažován, protože je napájen ze zdroje stejnosměrného napětí nezávislém na obvodu statoru. Úhel β ve fázorovém diagramu na obr.3 je úhel mezi indukovaným napětím naprázdno $\underline{U}_{ind0}$ a svorkovým napětím stroje $\underline{U}_1$ a je to tzv. zátěžný úhel, který určuje velikost zatížení synchronního stroje, protože jeho velikost se mění v závislosti na velikosti zatížení stroje (elektrického u alternátoru a mechanického u motoru). V případě nezatíženého alternátoru (tj. při chodu naprázdno) je zátěžný úhel nulový. Při $\beta = 90^\circ$ je výkon vyráběný alternátorem nejvyšší.



Obr.3 Zjednodušené náhradní schéma a fázorový diagram alternátoru s hladkým rotorem

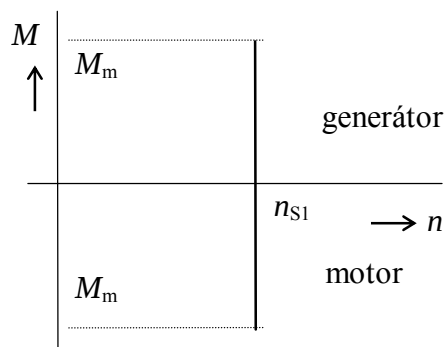
Řízení napětí alternátoru

Alternátory musí pracovat tak, aby jejich svorkové napětí bylo při každém zatížení alternátoru stálé. Se změnou zatížení, tj. se změnou proudu statoru alternátoru se musí měnit budicí proud rotoru a tím i magnetické pole rotoru tak, aby svorkové napětí alternátoru bylo konstantní. To znamená, že při poklesu svorkového napětí alternátoru vlivem většího zatížení je nutno zvýšit budicí proud alternátoru (tj. alternátor přibudit), při nárůstu svorkového napětí naopak budicí proud snížit (tj. alternátor odbudit).

Napětí alternátoru lze také řídit změnou rychlosti otáčení rotoru, tím se ale mění i kmitočet indukovaného napětí. V případě, že alternátor bude pracovat do rozvodné sítě je tento způsob řízení napětí nepřijatelný. Kmitočet napájecí sítě, tzv. průmyslový kmitočet 50 Hz se udržuje, stejně jako svorkové napětí alternátoru na konstantní hodnotě.

3. Výkon a moment synchronního stroje s hladkým rotorem

Z principu činnosti synchronního stroje vyplývá, že může pracovat pouze při synchronních otáčkách. To znamená, že při vzrůstajícím zatížení se moment stroje zvyšuje až do určité maximální hodnoty. Vlivem synchronizačních sil, vznikajících vzájemným působením pole rotoru a statoru, se bude rotor stroje otáčet stále stejnou synchronní rychlostí. Po překročení maximální hodnoty momentu stroje, tj. při překročení určitého zatížení, synchronizační síly již nebudou schopny udržet rotor v synchronním chodu, stroj své synchronní otáčky ztrácí a tzv. vypadne ze synchronizmu. Tento stav je pro stroj nebezpečný, neboť vznikají proudové rázy ve vinutí a mechanické rázy na hřídeli. Momentová charakteristika je tedy přímková a je na obr.4.



Obr.4 Momentová charakteristika synchronního stroje

Při změnách zatížení v mezích do M_m se tedy otáčky nemění, ale mění se zátěžný úhel β , viz předcházející kapitola. Je tedy vhodnější definovat závislost momentu stroje právě na tomto zátěžném úhlu β . Pro odvození této závislosti se vyjde ze základního vztahu pro točivý moment :

$$M = 9,55 \cdot \frac{P}{n_{S1}} \quad (\text{N} \cdot \text{m}, \text{W}, \text{min}^{-1})$$

Pro jednoduchost zanedbáme veškeré ztráty ve stroji, pak je výkon stroje P přímo roven jeho příkonu :

$$P_p = P = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$$

Po dosazení za výkon je moment stroje roven :

$$M = 9,55 \cdot \frac{3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi}{n_{S1}}$$

Z fázorového diagramu alternátoru s hladkým rotorem na obr.3 je zřejmé, že platí:

$$X_s \cdot I_1 \cdot \cos \varphi = U_{\text{ind0}} \cdot \sin \beta$$

$$I_1 \cdot \cos \varphi = \frac{U_{\text{ind0}} \cdot \sin \beta}{X_s}$$

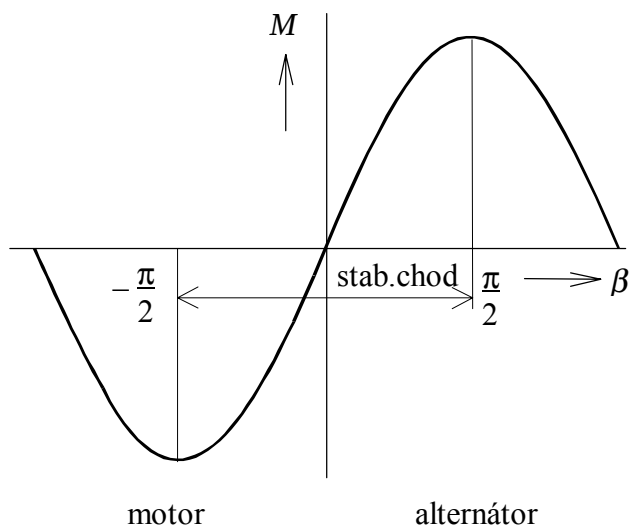
Po dosazení do rovnice pro moment se získá hledaný vztah :

$$M = 9,55 \cdot \frac{3 \cdot U_1 \cdot U_{\text{ind0}} \cdot \sin \beta}{n_{S1} \cdot X_s} = f(\beta)$$

maximální moment stroje :

$$\text{pro } \beta = \frac{\pi}{2} \quad M = M_m = 9,55 \cdot \frac{3 \cdot U_1 \cdot U_{\text{ind0}}}{n_{S1} \cdot X_s}$$

Grafická závislost momentu stroje na zátěžném úhlu je na obr.5.



Obr.5 Průběh momentu synchronního stroje s hladkým rotorem

Ze vztahu pro moment a z obr.5 vyplývá podstatný rozdíl mezi momentem synchronního stroje a asynchronního stroje. Zatímco u asynchronního stroje je moment závislý na rychlosti, tj. na skluzu, je moment synchronního stroje při synchronní rychlosti závislý na zátěžném úhlu β . Stroj bude pracovat ve stabilním chodu při zátěžném úhlu v intervalu :

$$\beta \in < -\pi/2, \pi/2 >$$

$\beta = \pm \pi/2$ je tzv. mez statické stability.

Při překročení meze statické stability vypadá synchronní stroj ze synchronizmu.

U stroje s vyniklými póly vlivem jiné konstrukce rotoru není závislost momentu stroje na zátěžném úhlu sinusová, mez statické stability se poněkud posune k úhlu menšímu než 90° . Odvození momentu stroje s vyniklými póly viz. *Doc.Ing. Jan Smejkal : Elektrotechnika*, str. 94 – 95.

Při odvození vztahu pro moment synchronního stroje byly ztráty ve stroji zanedbány. Ve skutečnosti má stroj ztráty a výkonová bilance je pro alternátor následující :

pro mechanický výkon P na hřídeli alternátoru, který musí vytvářet poháněcí stroj platí :

$$P = \Delta P + P_p$$

$$P = \Delta P_{j1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + P_p, \text{ kde :}$$

$$\Delta P_{j1} = \text{ztráty ve vinutí statoru}$$

$$\Delta P_{Fe} = \text{ztráty v magnetickém obvodu statoru}$$

$$\Delta P_m = \text{ztráty mechanické}$$

$$P_p = \text{elektrický výkon na svorkách alternátoru}$$

Ztráty ve vinutí rotoru se neuvažují, protože jsou hrazeny ze stejnosměrného zdroje, ztráty v magnetickém obvodu rotoru jsou rovny nule.

Obdobně je výkonová bilance pro motor :

$$P_p = \Delta P_{j1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + P$$

Tok výkonu je opačný než u alternátoru, tj. ze zdroje elektrické energie do pracovního mechanismu poháněného motorem.

4. Paralelní chod synchronního generátoru se sítí

Alternátory instalované v elektrárnách pro výrobu elektrické energie pracují paralelně do společné rozvodné sítě, ke které je připojena soustava těchto elektráren společně s transformačními stanicemi, spotřebiči a rozvodnými vedeními. V rozvodné síti je udržován stálý kmitočet a napětí s tolerancemi danými příslušnými normami. Vzhledem k těmto požadavkům a s ohledem na hladké připojení alternátoru bez proudových a mechanických nárazů v okamžiku jeho připojení k síti, lze alternátor připojit k síti po splnění následujících podmínek paralelního chodu:

- stejný sled fází alternátoru a sítě - kontrola 3 fázovým asynchronním motorkem
- stejné efektivní hodnoty napětí alternátoru a sítě - kontrola voltmetry
- stejný kmitočet alternátoru a sítě - kontrola kmitoměry
- v okamžiku připojení k síti stejné okamžité hodnoty napětí - kontrola fázovacími žárovkami

Nesplnění některé z těchto podmínek vede k velkým proudovým a mechanickým rázům, které by mohly zničit alternátor.

Alternátor pracující do společné rozvodné sítě se chová jinak než alternátor pracující samostatně. Jestliže předpokládáme, že alternátor pracuje paralelně s tzv. tvrdou sítí (pro kterou platí $U_1 = \text{konst.}$, $f_1 = \text{konst.}$) a při konstantním výkonu poháněcí turbíny, pak změnou budícího proudu se nemůže měnit napětí na svorkách alternátoru. Změnou buzení alternátoru se mění proud statoru (jeho jalová složka) a účinník alternátoru.

Při zvýšení výkonu poháněcí turbíny nedojde ke zvýšení otáček alternátoru, ale ke zvýšení zátěžného úhlu β a tím ke zvýšení činného výkonu dodávaného alternátorem do napájecí sítě.

5. Synchronní motory

Synchronní motor se svou konstrukcí podobá synchronnímu alternátoru. Na rozdíl od něj se v něm elektrická energie spotřebovává, tj. dodávaná el.energie se mění na mechanickou odebíranou z hřídele motoru. Stator synchronního motoru je připojen ke trojfázové střídavé síti a rotor je napájen stejnosměrným proudem přes kroužky na hřídeli motoru z budiče nebo polovodičového usměrňovače.

Nabuzený synchronní motor se po přímém připojení na střídavou síť sám neroztočí. Trojfázový střídavý proud statoru vytvoří točivé magnetické pole, které se otáčí rychlostí danou frekvencí napájecí sítě a počtem pólů motoru. Rotorem, který stojí, prochází

stejnoseměrný proud a tedy budí stacionární magnetické pole. Vzájemným působením těchto dvou polí dochází k silovému působení pole statoru na pole rotoru. Orientace této síly se však mění s rychlostí otáčení točivého pole statoru. To znamená, že rotor synchronního motoru je vystaven střídavému působení tažné síly v opačných směrech. Rotor se tedy vzhledem ke své hmotě nemůže sám rozběhnout. Roztočí-li se však rotor na synchronní rychlost nebo alespoň na rychlost blízkou synchronní a připojí se následně k síti, bude se motor otáčet synchronní rychlostí i po odpojení rozběhového zařízení.

Způsoby spouštění synchronního motoru:

a) asynchronní rozběh : kromě budicího vinutí je na rotoru umístěno ještě tlumící (rozběhové) klecové vinutí. Motor se tedy rozbíhá jako asynchronní motor nakrátko, po dobu rozběhu je budicí vinutí spojeno přes ochranný rezistor nakrátko, který zabrání vzniku přepětí na budicím vinutí při rozběhu. Jakmile motor dosáhne otáčky blízké synchronní, nabudí se a motor se vtáhne do synchronismu.

b) rozběh pomocným motorem : pro rozběh se použije buď budič, který je umístěn na hřídeli motoru, nebo rozběhový asynchronní motor, který se používá pro rozběhy strojů vysokých výkonů. Tento typ rozběhu se téměř nevyužívá.

Ve srovnání s asynchronním motorem má synchronní motor následující výhody a nevýhody :

1) výhody

- konstantní otáčky v celém rozsahu zatížení
- vyšší účinník $\cos\varphi$. Účinník synchronního stroje lze měnit jeho buzením.
- vyšší účinnost
- možnost výroby jalové energie tím, že synchronní motor poběží přebuzený
- moment závisí lineárně na napětí sítě, tj. při poklesu napětí sítě je menší pokles momentu synchronního motoru než asynchronního.

2) nevýhody

- složitější spouštění
- samostatný zdroj budicího proudu
- vyšší cena ve srovnání se srovnatelnými asynchronními motory

Řízení otáček synchronního motoru

Otáčky lze řídit změnou kmitočtu s využitím výkonových polovodičových měničů. Pro regulované pohony se synchronními motory se používají nepřímé měniče kmitočtu (např. ventilový pohon ve kterém je použit nepřímý proudový měnič kmitočtu) popř.cyklokonvertory. Řízení otáček změnou počtu pólů se využívá velmi málo.

Speciální synchronní motory

Krokové motory

Rotor těchto motorů může zaujímat určitý počet definovaných poloh. Stator motoru je nejčastěji čtyřfázový, osmipólový, rotor má zuby bez vinutí a nebo jsou na rotoru permanentní magnety (tzv. motor s aktivním rotorem).

Přivedeme-li proudový impuls do statorového vinutí první fáze, zaujme rotor takovou polohu, která odpovídá maximální magnetické vodivosti pro statorový magnetický tok, tzn., že zub rotoru prostorově nejbližší ose vinutí první fáze statoru se natočí tak, aby osa tohoto zubu byla v ose vinutí dané fáze. Po přivedení proudového impulsu do vinutí druhé fáze (a jeho následném odpojení od první fáze) se rotor otočí o určitý úhel, daný počtem zubů rotoru a počtem fází statoru, tak, aby opět zaujal polohu splňující podmínku maximální magnetické vodivosti pro magnetický tok statoru. Při daném sledu spínání fází statoru se motor otáčí trvale v jednom směru. Změnou sledu spínání fází se mění i směr otáčení motoru.

Reluktanční (reakční) motory

Využívají pro svou činnost tzv. reluktanční moment. Roztočený synchronní motor s vyniklými póly se udrží v chodu i bez buzení působením reluktančního momentu. (viz. *Doc. Ing. Jan Smejkal : Elektrotechnika*, str. 95.). Vzniká tím, že točivé pole statoru má snahu vtahovat vyniklé póly rotoru do své osy tak, aby indukční čáry magnetického pole procházely cestou nejmenšího odporu tj. osou vyniklých pólů.

Použití synchronních motorů

Využívají se především v aplikacích, kde se nevyžaduje časté spouštění a reverzace otáček. Používají se hlavně pro pohony velkých výkonů (rotační a pístové kompresory, ventilátory, čerpadla, cementářenské pece apod.).

Speciální synchronní motory pak pro pohony v oblasti automatizační techniky, pohonů posuvů obráběcích strojů, robotiky, apod. Používají se do výkonů přibližně 10 kW.