

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ostrovní režim synchronních strojů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin VÁCLAVÍK**
Osobní číslo: **E10B0264P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Ostrovní režim synchronních strojů**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište princip synchronního stroje.
2. Vytvořte přehled používaných konstrukcí synchronních strojů.
3. Specifikujte požadavky na stroj pro práci v ostrovním režimu



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Michaela Vachtlová

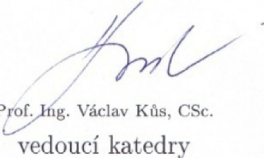
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Hamperbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předložená bakalářská práce se zabývá principem činnosti synchronních strojů a základními pojmy v oblasti teorie synchronních strojů. Specifikovány jsou zde také jejich nejpoužívanějšími druhy, typy konstrukcí a jejich aplikace v konkrétních oblastech. Práce se také věnuje chování synchronního stroje při práci v ostrovním režimu, nároky na konstrukci, jeho stavy a řešení havarijního stavu s následným odpojením stroje.

Klíčová slova

Synchronní stroj, synchronní generátor, turboalternátor, hydroalternátor, stator, rotor, ostrovní režim

Abstract

The submitted work deals with the principle of the operation of a synchronous machines and the basic concepts of the theory of the synchronous machines. There are specified also the most commonly used kinds, types of the structures and their application in the specific areas. The work also deals with the behavior of the synchronous machine, which works in the island mode, demand on construction, condition and solution to the emergency condition following by unplugging the machine.

Key words

Synchronous machine, synchronous generator, turbo-generators, hydro-generator, stator, rotor, standalone mode

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce Ing. Michaele Vachtlové za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM OBRÁZKŮ	12
1 POPIS SYNCHRONNÍCH STROJŮ	13
1.1 ZÁKLADNÍ ŠTÍTKOVÉ HODNOTY SYNCHRONNÍHO STROJE	13
1.2 PRINCIP SYNCHRONNÍHO STROJE	14
1.3 ZÁKLADNÍ POPIS KONSTRUKČNÍHO USPOŘÁDÁNÍ.....	16
1.4 VYBRANÉ POJMY Z OBLASTI SYNCHRONNÍCH STROJŮ	17
1.4.1 <i>Napětová rovnice a fázorový diagram stroje s hladkým rotorem</i>	18
1.4.2 <i>Napětová rovnice a fázorový diagram stroje s vyniklými póly</i>	20
1.5 MOMENT SYNCHRONNÍHO STROJE	21
1.5.1 <i>Moment synchronního stroje s hladkým rotorem</i>	21
1.5.2 <i>Moment synchronního stroje s vyniklými póly</i>	22
1.6 KÝVÁNÍ SYNCHRONNÍHO STROJE	24
1.7 ZPŮSOBY ROZBĚHU SYNCHRONNÍHO MOTORU	26
2 KONSTRUKCE SYNCHRONNÍHO STROJE	27
2.1 SYNCHRONNÍ STROJ S HLADKÝM ROTOREM.....	27
2.2 SYNCHRONNÍ STROJ S VYNIKLÝMI PÓLY	30
2.3 SYNCHRONNÍ STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY	31
2.4 BUDÍCÍ SYSTÉMY SYNCHRONNÍCH STROJŮ	33
3 STROJ PŘI PRÁCI V OSTROVNÍM REŽIMU	34
3.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ PRO PRÁCI V OSTROVNÍM REŽIMU.....	34
3.2 CHOVÁNÍ SYNCHRONNÍHO STROJE PŘI PRÁCI V OSTROVNÍM REŽIMU	35
3.3 NÁHLÉ Odstavení synchronního stroje.....	40
ZÁVĚR	42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	43

Úvod

Synchronní stroje jsou používány zejména k výrobě elektrické energie, méně jako motor a výjimečně jako kompenzátor. V základu jsou synchronní stroje rozděleny na dva konstrukční typy. Prvním typem jsou stroje s hladkým rotorem. Tento typ se používá především v kombinaci s primární pohonnou jednotkou v podobě parní nebo plynové turbíny. Druhým typem jsou synchronní stroje s vyniklými póly, které jsou používány v případech primárního pohonu s nižšími otáčkami, jako jsou vodní turbíny. Synchronní motory jsou používány zejména v případech, kdy se vyžaduje řízení účinnosti sítě. Jejich pořizovací náklady jsou však vyšší než u asynchronních motorů a také mají problematičtější rozběh. V poslední době nacházejí synchronní stroje uplatnění v trakci, díky rozvoji polovodičových součástek a materiálů, hlavně permanentních magnetů. Synchronní stroj bývá využíván při práci v ostrovním režimu a to především na velkých lodích k napájení zařízení a pohonů lodí. Při tomto režimu mohou nastat stavy, jako jsou chody naprázdno, nakrátko a také může dojít k havarijnímu stavu, kdy je potřeba snížit hodnotu statorového napětí co nejrychleji k nule.

Práce je strukturována do třech hlavních částí. První část je věnována teoretickému popisu synchronního stroje. Mimo jiné budou uvedeny základní principy konstrukčního stroje, kývání nebo moment synchronního stroje. Dále nebudou opomenuty základní pojmy z této oblasti. Druhá část práce se zabývá konstrukcí synchronního stroje a poslední část práce popisuje provozní stavy synchronního stroje, pokud pracuje v ostrovním režimu.

Seznam symbolů a zkratek

d	Stupeň nerovnoměrnosti
f_1	frekvence
F_μ	Celkové magnetomotorické napětí
F_b	Magnetomotorické napětí rotoru
F_a	Magnetomotorické napětí statoru
I	Elektrický proud
I_b	Budící proud
I_μ	Magnetizační proud
I_d	Statorový proud ve vodorovné ose
I_{b0N}	Jmenovitý budící proud při chodu naprázdno
I_N	Jmenovitý proud
I_k	Proud nakrátko
$I_{b\mu k}$	Magnetizační proud vztažený na rotor
I_{bk}	Budící proud nakrátko
i_k	Poměrný proud nakrátko
i_2	Přechodový proud v budícím vinutí
i_3	Přechodový proud v tlumícím vinutí
m	Počet fází
M	Točivý moment
M_{\max}	Maximální točivý moment
M_{23}	Vzájemná indukčnost
n_1	Rychlost rotoru
n_{\max}	Maximální otáčky stroje
n_{\min}	Minimální otáčky stroje
$n_{stř}$	Střední otáčky stroje
P	Elektrický výkon
p_p	Počet pólů

p_1	Činitel přepočtu
PMSP	Permanent Magnet Synchronous Motor (Motor s permanentními magnety)
R	Odpor
R_b	Odpor budícího vinutí
R_2	Odpor rotorového vinutí
U, V, W	Označení jednotlivých fází třífázového systému
U_0	Napětí naprázdno
U_N	Jmenovité napětí
U_{ib}	Indukované napětí
U_i	Indukované napětí výsledným magnetickým tokem
U_{ik}	Indukované napětí nakrátko
X_d	Podélná synchronní reaktance
X_q	Příčná synchronní reaktance
X_{ad}	Reaktance vázaná s hlavním magnetickým tokem
X_p	Potierova reaktance
Z_d	Synchronní impedance
$1f, 3f$	Počet fází
β	Zátěžný úhel
Φ_{ad}	Hlavní magnetický tok
$\Phi_{1\sigma}$	Rozptylový magnetický tok
Φ_μ	Celkový magnetický tok
Φ_b	Magnetický tok rotoru
Φ_a	Magnetický tok statoru
ω_m	Úhlová rychlost
φ	Úhel mezi veličinami U a I
δ	Úhel mezi veličinami U a U_{ib}
ψ	Úhel mezi veličinami I a U_{ib}
v	Míra nasycení stroje

Seznam obrázků

<i>Obr. 1.1 Princip 3f alternátoru [5].....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 1.2 3f průběh napětí ve statorových cívkách [6]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 1.3 Vznik synchronního momentu [7].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 1.4 Rotor s vyniklými póly (vlevo) a hladký rotor (vpravo) [12].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 1.5 Hlavní a rozptylový magnetický tok [8].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 1.6 Náhradní schéma stroje s hladkým rotorem [13].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 1.7 Fázorový diagram stroje s hladkým rotorem [8].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 1.8 Fázorový diagram synchronního stroje s vyniklými póly (přebuzený generátor) (vlevo) a jiná varianta fázorového diagramu (vpravo) [8]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 1.9 Zjednodušený fázorový diagram pro odvození momentu [7]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 1.10 Momentová charakteristika synchronního stroje s hladkým rotorem [7].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 1.11 Zjednodušený fázorový diagram pro odvození momentu stroje s vyniklými póly [7].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 1.12 Momentová charakteristika synchronního stroje s vyniklými póly [7].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 1.13 Změna úhlové rychlosti a zátěžného úhlu při skokové změně momentu na hřídeli synchr. stroje [1] ...</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 1.14 Spouštění synchronního stroje pomocí reaktoru [15]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 2.1 Řez statorovou tyčí, vinutí chlazené kapalinou [16].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 2.2 Řez magnetickým obvodem statoru [15].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 2.3 Část statorového svazku s radiálními chladicími kanály [17].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 2.4 Uspořádání drážek hladkého rotoru [16].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 2.5 Chlazení rotoru a) pouze povrchem rotoru, b) zvětšeným povrchem rotoru, c) přímé chlazení mědi plynem, d) přímé chlazení mědi vodou [16]</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 2.6 Částečný řez rotorem s přímým chlazením [16].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 2.7 Konstrukce PMSM s vnitřním rotorem [19].....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 2.8 Konstrukce PMSM s vnějším rotorem [19]</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 3.1 Setrvačnick mezi přírubami alternátoru a dieselového motoru [16]</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3.2 Souměrná oboustranná ventilace (vlevo), jednostranná axiální ventilace (vpravo) [18]</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 3.3 Normální charakteristika naprázdno synchronního stroje [1]</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 3.4 Charakteristika naprázdno a nakrátko a fázorový diagram synchronního stroje nakrátko [8].....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 3.5 Určení zkratového poměru synchronního stroje [10].....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 3.6 Indukční charakteristika synchronního stroje a vysvětlení Potierovy reaktance [7].....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 3.7 Fázorový diagram pro indukční zátěž (vlevo), kapacitní a čistě odporovou (vpravo) [8]</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 3.8 Vnější charakteristiky synchronního stroje pro různé hodnoty účinníku [8].....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 3.9 Schéma odbuzování synchronního stroje s využitím odporu R [1].....</i>	<i>40</i>

1 Popis synchronních strojů

Synchronní stroje se používají zejména pro výrobu elektrické energie, kdy dochází k přeměně mechanické energie na elektrickou. V tomto případě pracuje v režimu generátor. Nejčastějším využívaným strojem je 3f generátor nazývaný alternátor. Alternátory vyráběny ve velkých řadách výkonů, snahou je provozovat alternátory s co největším výkonem z důvodu menších provozních a investičních nákladů na 1kW [1]. V elektrárnách jsou alternátory poháněny zejména parními (v některých případech plynovými) turbínami rychlostí $3000 \frac{\text{ot}}{\text{min}}$ pro síť s frekvencí 50Hz a $3600 \frac{\text{ot}}{\text{min}}$ pro síť s frekvencí 60 Hz a jsou nazývány turboalternátory. Alternátory mohou být také poháněny vodní turbínou, kde jsou otáčky několikanásobně menší (záleží na typu vodní turbíny), ty se nazývají hydroalternátory [2].

Synchronní motory jsou využívány hlavně v kolejové a nekolejové trakci a jako náhrada stejnosměrných motorů. Jejich nevýhodou může být složitější rozběh, protože motor se po připojení na síť sám nerozběhne, musí se využít některý ze systému rozběhu. Jako příklad lze uvést vnější pohon, dále pomocí frekvenčního měniče nebo pokud má stroj tlumič, tak může být využit k rozběhu, kdy funguje jako klec nakrátko u asynchronního motoru [3].

Synchronní stroj lze také využívat v režimu kompenzátor, kdy dodává do sítě jalovou energii pro kompenzaci jalové složky proudu [2].

1.1 Základní štitkové hodnoty synchronního stroje

Všechny potřebné údaje k provozu synchronního stroje jsou uvedeny na štítku stroje

Údaje na štítku stroje:

- Druh stroje – jedná-li se o generátor, motor nebo kompenzátor
- Druh proudu – zda se jedná o 3f nebo 1f alternátor
- Jmenovitý výkon – pro alternátory a motory se udává činný a zdánlivý výkon, u kompenzátorů se udává jalový výkon v přebuzeném stavu
- Jmenovité statorové napětí
- Jmenovitý statorový proud
- Jmenovitý účinník
- Jmenovitý kmitočet
- Zapojení fází statoru
- Budicí proud a napětí v chodu naprázdno a při jmenovitém zatížení
- Jmenovité otáčky
- Průběhové otáčky

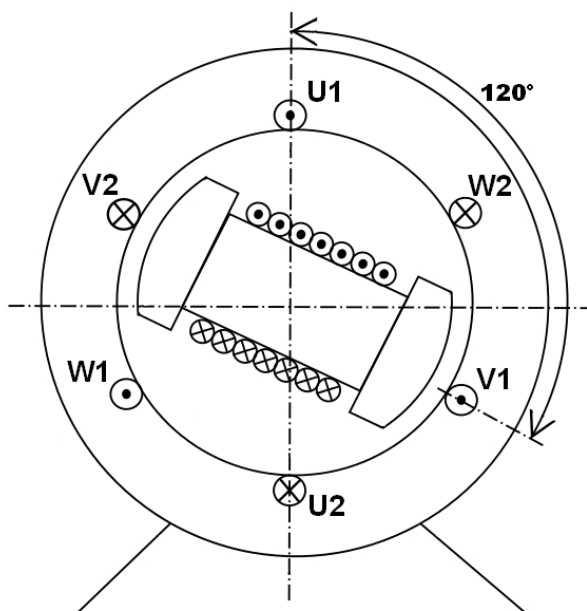
- Typ zatížení – trvalé, přerušované apod.
- Tvar stroje – má-li ložiskové štíty, ložiskové stojany apod.
- Stupeň krytí stroje IP
- Způsob chlazení
- Třída izolace vinutí

Štítek také obsahuje údaje o výrobcí, rok výroby stroje, výrobní číslo a typ, hmotnost a další údaje. Další stroje a přístroje dodávané k synchronnímu stroji jako jsou budič, budící soustava, chladiče a další mají své vlastní štítky [1].

1.2 Princip synchronního stroje

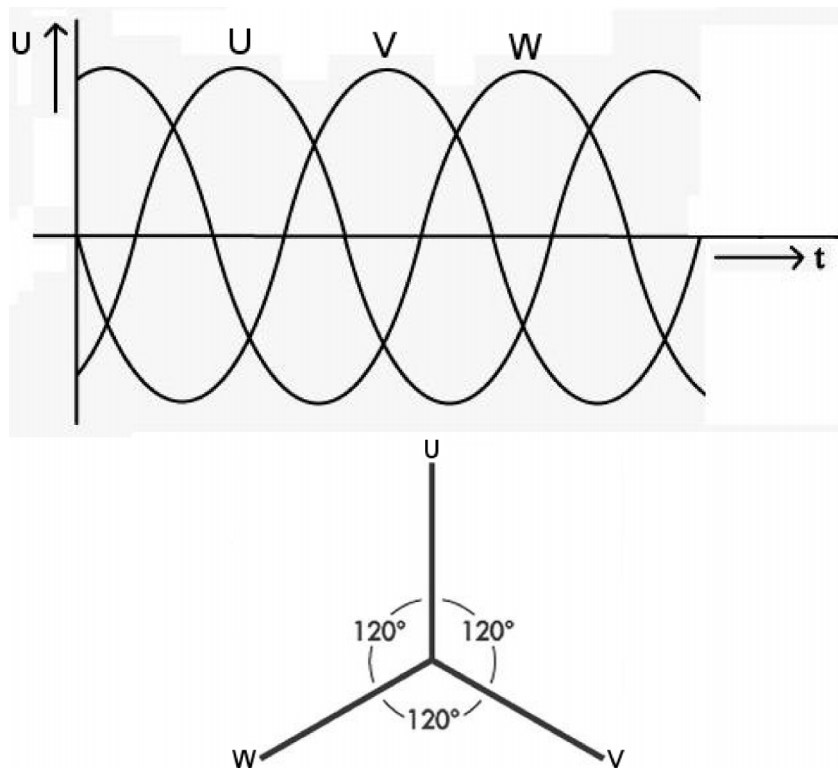
Statorové vinutí je tvořeno třemi fázovými cívkami, které jsou navzájem prostorově pootočené o 120° . Na rotoru je navinuto budící vinutí napájené stejnosměrným proudem ze zdroje stejnosměrného proudu nebo z vlastního budiče umístěného na stejné hřídeli pomocí sběracích kroužků a kartáčů na ně dosedajících. Rozložení jednotlivých vinutí viz obr. 1.1. Při konstantních otáčkách nabuzeného rotoru se indukuje v cívkách statoru střídavé napětí, které je úměrné okamžité hodnotě magnetické indukce. V tomto případě je statorové vinutí kotvou. Frekvence indukovaného napětí je úměrná rychlosti rotoru n_1 a počtu pólů p_p [4].

$$f_1 = \frac{p_p \cdot n_1}{60} \quad (1.1)$$



Obr. 1.1 Princip 3f alternátoru [5]

Při sinusovém prostorovém průběhu magnetického pole bude mít průběh indukované napětí sinusový průběh a v jednotlivých cívkách statorového vinutí budou časově posunutá o 120° [5] viz obr. 1.2.

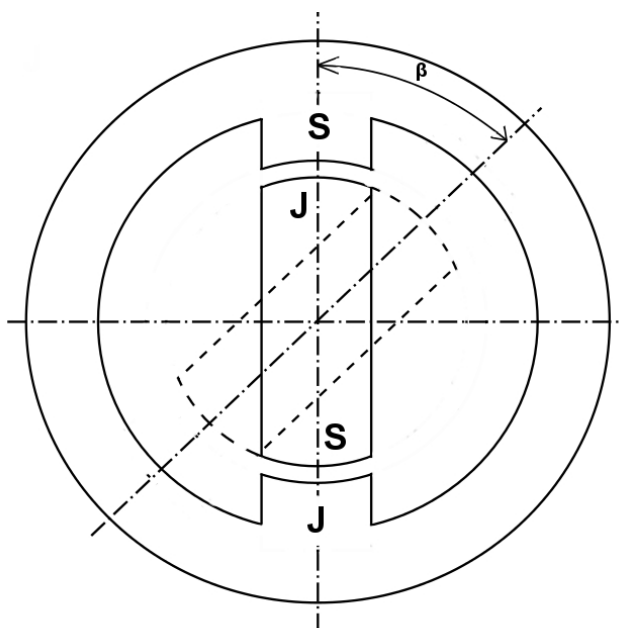


Obr. 1.2 3f průběh napětí ve statorových cívkách [6]

Pokud je stroj symetricky zatížen, vytvoří 3f proudy protékající státorem kruhové točivé pole, které má stejnou rychlost otáčení jako rotor, proto je stroj nazýván synchronním [5].

Stejný stroj může také pracovat v režimu motor. Statorové vinutí napájíme 3f proudem, který vytváří točivé magnetické pole, rotor je roztočen na synchronní rychlost, nesouhlasné polarity pólů vytvořené elektromagnetem rotoru a točivého magnetického pole statoru se přitahují a mají vůči sobě stejnou prostorovou polohu [5]. Rotor se bude otáčet synchronní rychlostí stejně jako pole statoru a může z rotoru odebírat mechanický výkon. Pokud překročí mez mechanického zatížení, nebudou synchronizační síly schopny udržovat rotor v synchronním režimu a stroj vypadne se synchronismu (přeruší se stabilita chodu) [7].

Relativní vztah a přenos mezi točivým polem statoru a rotoru si lze představit pomocí dvou permanentních magnetů viz obr. 1.3 [7].



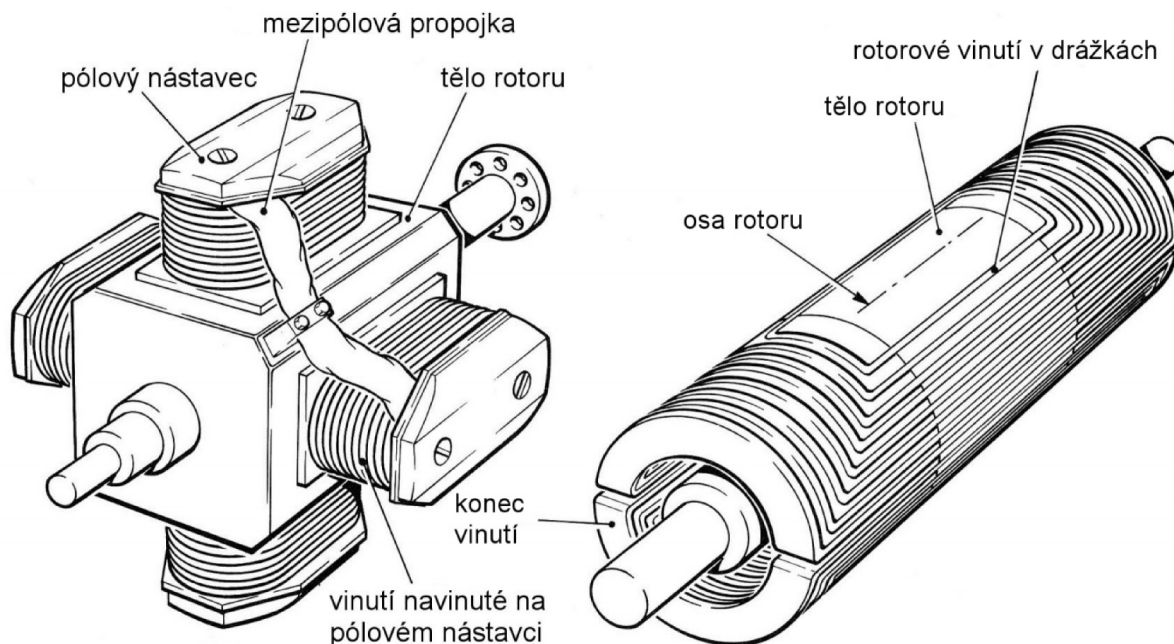
Obr. 1.3 Vznik synchronního momentu [7]

Nebude-li motor přenášet moment, budou se obě osy magnetů překrývat. Bude-li se motor zatěžovat určitým momentem zátěže, bude se rotor zpožďovat o zátěžný úhel β , který se bude zvětšovat se zvyšujícím se zatížením motoru. Při překročení zátěžného úhlu $\beta=90^\circ$ rotor vypadne ze synchronismu, protože při hodnotě zátěžného úhlu $\beta=90^\circ$ je moment maximální. Při generátorovém chodu je naopak moment dodáván (stroj je poháněn), tudíž pole statoru předbíhá o zátěžný úhel [8].

1.3 Základní popis konstrukčního uspořádání

Magnetický obvod statoru je složen ze vzájemně elektricky izolovaných plechů, ve kterém jsou vytvořeny drážky pro vložená $3f$ vinutí. Rotor nemusí být složený z plechů, ale z technologických důvodů bývají listěné i póly. Synchronní stroje se rozdělují na dva základní typy, dle konstrukce rotoru. Prvním je stroj s hladkým rotorem, který má větší délku a menší průměr a druhým je stroj s vyniklými póly, který má větší průměr a menší délku [9].

Konstrukce a jednotlivé typy budou konkrétněji popsány v další kapitole.



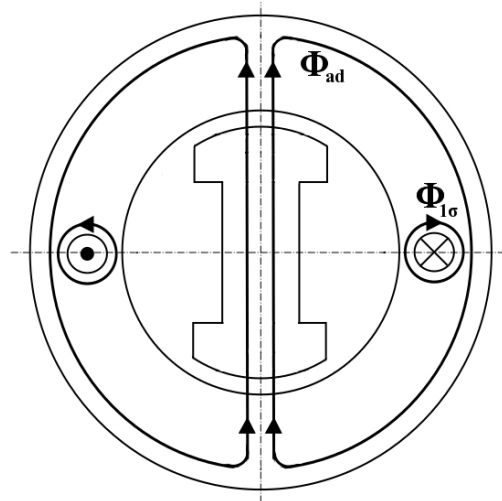
Obr. 1.4 Rotor s vyniklými póly (vlevo) a hladký rotor (vpravo) [12]

1.4 Vybrané pojmy z oblasti synchronních strojů

Celkové magnetické pole vytvářené v synchronním stroji je buzeno magnetomotorickým napětím, na němž se podílí složka vyvolaná střídavým proudem protékajícím statorem stroje, který v něm vytváří točivé pole a složka vyvolaná stejnosměrným budícím proudem I_b protékajícím rotorovým vinutím. Konečný fiktivní magnetizační proud I_μ je výsledkem vektorového součtu těchto proudů, jeden z těchto proudů je nutno přepočítat. Většinou je přepočítáván statorový proud I na stranu rotoru. [8] [10].

$$\hat{I}_\mu = \hat{I}' + \hat{I}_b \quad (1.2)$$

Vinutí uložené ve statorových drážkách je napájeno z 3f sítě a také se v každé fázi indukuje napětí vyvolané budícím proudem I_b [10]. Rozdíl těchto dvou napětí $\hat{U} - \hat{U}_{ib}$ vytvoří proud \hat{I}' , který protéká každou fází statorového vinutí, jehož impedanci tvoří činný odpor R a podélnou synchronní reaktanci X_d . Magnetický tok statorového vinutí, který odpovídá podélné synchronní reaktanci, se skládá ze dvou složek. Z hlavního toku Φ_{ad} ve stroji o hodnotě reaktance X_{ad} , který zabírá s vodiči rotoru (viz obr. 1.4) a z rozptylového toku $\Phi_{1\sigma}$ uzavírajícího se po rozptylových cestách [8] [11].



Obr. 1.5 Hlavní a rozptylový magnetický tok [8]

Protože se hlavní a rozptylový tok statorového vinutí se uzavírají paralelně, řadí se tedy magnetické vodivosti a jim odpovídající reaktance sériově a jsou sčítány podle vztahu (1.3) [8] [10].

$$X_d = X_{ad} + X_{l\sigma} \quad (1.3)$$

Na základě podobnosti je možno odvodit příčnou synchronní reaktanci, jejíž hodnota odpovídá magnetickému toku statorového vinutí Φ_{aq} , který se uzavírá příčně k ose rotorového vinutí a rozptylového toku $\Phi_{l\sigma}$ [8] [10].

$$X_q = X_{aq} + X_{l\sigma} \quad (1.4)$$

1.4.1 Napěťová rovnice a fázorový diagram stroje s hladkým rotorem

Jelikož máme hladký rotor, můžeme brát vzduchovou mezeru mezi státorem a rotorem konstantní ($\delta=\text{konst.}$) a můžeme tedy předpokládat vztah $X_d = X_q$. Dále budeme předpokládat, že magnetomotorické napětí rotoru i statoru jsou prostorově rozložena podle sinusovky, rotor se otáčí synchronní rychlostí a permeabilita je konstantní ($\mu=\text{konst.}$), z toho plyne $\Phi \sim F_m$ [7] [13].

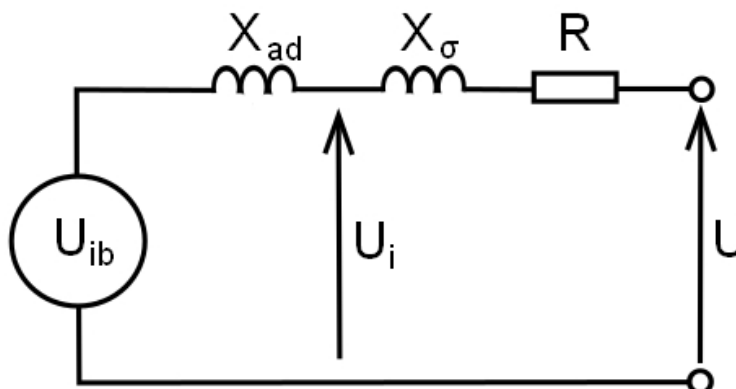
Jelikož předpokládáme, že stator synchronního stroje je obdobný statoru stroje asynchronního, můžeme psát napěťovou rovnici obdobně [8]

$$\hat{U} = R\hat{I} + jX_{l\sigma}\hat{I} + \hat{U}_i \quad (1.5)$$

a pro rotor

$$U_b = R_b I_b \quad (1.6)$$

Pro další rozbor zavedeme náhradní schéma synchronního stroje s hladkým rotorem. Stejně jako u asynchronního motoru a transformátoru je i zde náhradní schéma, jen určitým modelem, který může modelovat chování stroje. V našem případě máme model v ustáleném symetrickém režimu. Pro nesymetrický režim, nebo pro přechodový stav by náhradní schéma mělo jiný tvar [10].



Obr. 1.6 Náhradní schéma stroje s hladkým rotorem [13]

Pokud platí rovnice (1.2), platí také následující rovnice

$$\hat{F}_\mu = \hat{F}_b + \hat{F}_a \quad (1.7)$$

$$\hat{\Phi}_\mu = \hat{\Phi}_b + \hat{\Phi}_a \quad (1.8)$$

$$\hat{U}_i = \hat{U}_{ib} + \hat{U} \quad (1.9)$$

U strojů s hladkým rotorem je někdy písemné označení synchronní reaktance nahrazováno symbolem pro podélnou synchronní reaktanci [8]

$$X_d = X_q = X_s = X_{ad} + X_{l\sigma} \quad (1.10)$$

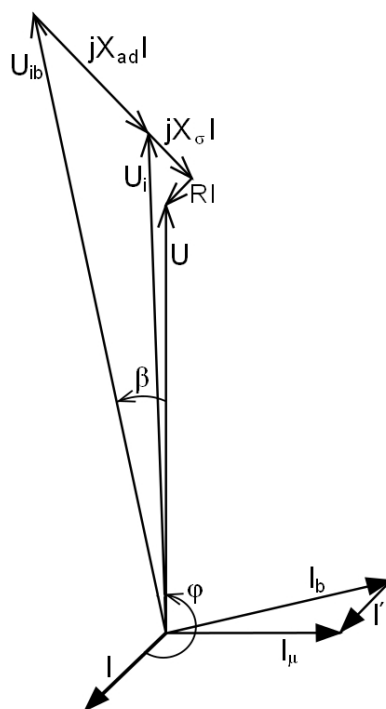
a můžeme definovat napěťovou rovnici ve tvaru

$$\hat{U} = R\hat{I} + jX_d\hat{I} + \hat{U}_{ib} \quad (1.11)$$

nebo ve tvaru popisujícím náhradní schéma synchronního stroje s hladkým rotorem i s napětím U_i , které je indukované výsledným magnetickým tokem [8]

$$\hat{U} = R\hat{I} + jX_{l\sigma}\hat{I} + jX_{ad}\hat{I} + \hat{U}_{ib} \quad (1.12)$$

Pro rovnici (1.12) můžeme sestavit fázorový diagram



Obr. 1.7 Fázorový diagram stroje s hladkým rotorem [8]

1.4.2 Napěťová rovnice a fázorový diagram stroje s vyniklými póly

U synchronního stroje s vyniklými póly nelze uvažovat stejnou podmínku o konstantní vzduchové mezeře po celém obvodu stroje, jako u stroje s hladkým rotorem, neboť je mezi póly rotoru mezera. V podélné ose je vzduchová mezera minimální oproti příčné ose. Proto je magnetická vodivost v podélné ose mnohem větší než v příčné ose.

Fázorový diagram vytvoříme z napěťové rovnice [11]

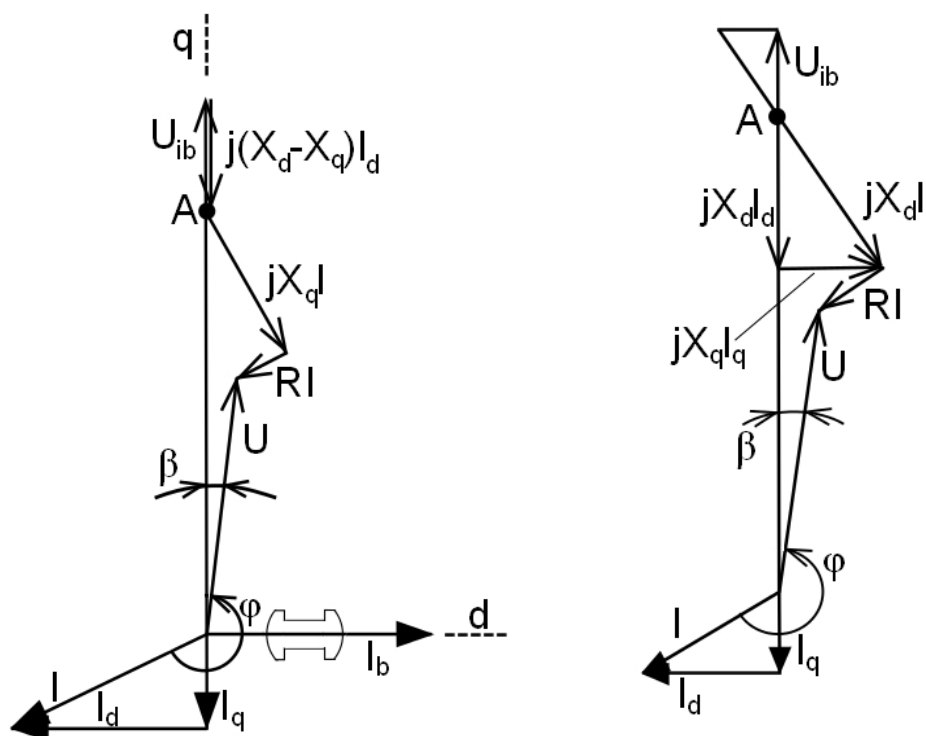
$$\hat{U} = R\hat{I} + jX_d\hat{I}_d + jX_q\hat{I}_q + \hat{U}_{ib} \quad (1.13)$$

kde je proud statoru rozložený na složky v podélné a příčné ose stroje

Fázorový diagram synchronního stroje s vyniklými póly lze sestavit několika způsoby, podle toho, pro jakou upravenou napěťovou rovnici ho budeme sestavovat. Rovnice je možno upravit na tvar následujících dvou rovnic [11]

$$\hat{U} = R\hat{I} + jX_d\hat{I}_d + jX_q(\hat{I} - \hat{I}_d) + \hat{U}_{ib} \quad (1.14)$$

$$\hat{U} - R\hat{I} - jX_d\hat{I} = j(X_d - X_q)\hat{I}_d + \hat{U}_{ib} \quad (1.15)$$



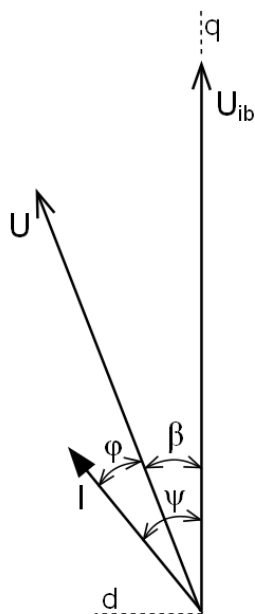
Obr. 1.8 Fázorový diagram synchronního stroje s vyniklými póly (přebuzený generátor) (vlevo) a jiná varianta fázorového diagramu (vpravo) [8]

1.5 Moment synchronního stroje

Při odvozování momentu synchronního stroje budeme vycházet ze vztahu $P = M\omega_m$ [14].

1.5.1 Moment synchronního stroje s hladkým rotorem

Pro zjednodušení výpočtu si zavedeme zjednodušený fázorový diagram



Obr. 1.9 Zjednodušený fázorový diagram pro odvození momentu [7]

Ze satorových fázových veličin U a I můžeme výkon m -fázového vodiče spočítat podle vztahu

$$P = mUI \cos \varphi = mU_{ib} I \cos \psi \quad (1.16)$$

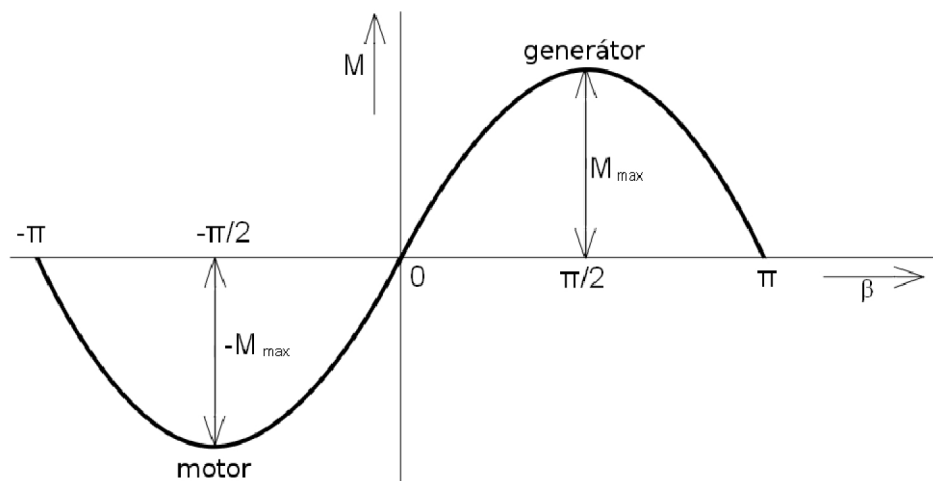
Tento vztah můžeme psát po úpravě ve tvaru

$$P = m \frac{UU_{ib}}{X_d} \sin \beta \quad (1.17)$$

a z těchto vztahů můžeme odvodit výsledný vzorec pro moment stroje

$$M = \frac{m}{\omega_{1m}} \frac{UU_{ib}}{X_d} \sin \beta \quad (1.18)$$

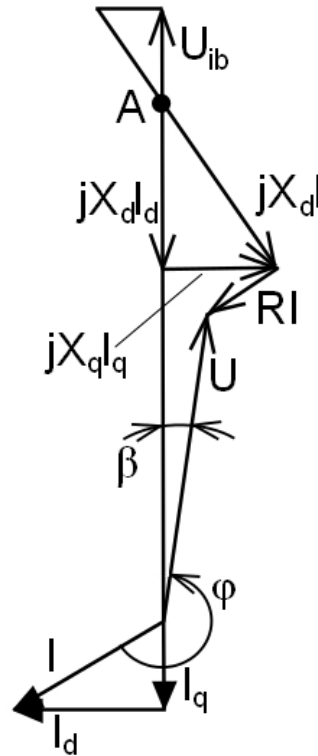
Pro synchronní stroj s hladkým rotorem lze sestavit momentovou charakteristiku jak v motorickém režimu, tak v režim generátor viz obr.1.10



Obr. 1.10 Momentová charakteristika synchronního stroje s hladkým rotorem [7]

1.5.2 Moment synchronního stroje s vyniklými póly

Při odvozování momentu pro stroj s vyniklými póly lze postupovat podobně, jako u stroje s hladkým rotorem. Nejprve je nutné vyjádřit vztah pro výkon ze zjednodušeného fázorového diagramu.



Obr. 1.11 Zjednodušený fázorový diagram pro odvození momentu stroje s vyniklými póly [7]

Ze statorových fázových veličin U a I můžeme pro m -fázový stroj určit výkon

$$\begin{aligned} P &= mUI \cos \varphi = mUI \cos(\psi - \beta) = mUI(\cos \psi \cos \beta + \sin \psi \sin \beta) = \\ &= mU(I_q \cos \beta + I_d \sin \beta) \end{aligned} \quad (1.19)$$

Pro proudy a napětí na pravé straně z předchozí rovnice (1.16) platí z fázorového diagramu

$$\begin{aligned} X_q I_q &= U \sin \beta \\ U_{ib} - X_d I_d &= U \cos \beta \end{aligned} \quad (1.20)$$

odkud plyne

$$\begin{aligned} I_q &= \frac{U \sin \beta}{X_q} \\ I_d &= \frac{U_{ib} - U \cos \beta}{X_d} \end{aligned} \quad (1.21)$$

Po dosazení proudů z rovnice (1.21) do rovnice pro výkon (1.19) a po její úpravě dostáváme výkon m -fázového stroje s vyniklými póly

$$P = m \frac{U U_{ib}}{X_d} \sin \beta + m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\beta \quad (1.22)$$

A podobně jako u stroje s hladkým rotorem odvodíme konečný vztah pro moment

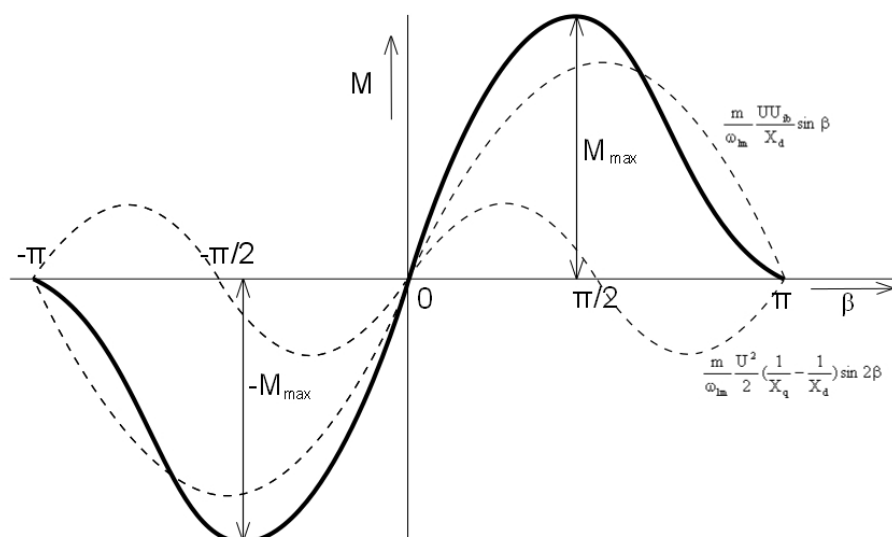
$$M = \frac{m}{\omega_{lm}} \frac{UU_{ib}}{X_d} \sin \beta + \frac{m}{\omega_{lm}} \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\beta \quad (1.23)$$

Z rovnice (1.23) a (1.22) vyplývá, že moment a výkon synchronního stroje s vyniklými póly má dvě složky, které jsou závislé na zátěžném úhlu β .

První složka závisí na zátěžném úhlu $\sin \beta$ je úměrná indukovanému napětí U_{ib} , které je dáno budícím proudem a je nepřímo úměrná podélné synchronní reaktanci X_d .

Druhá složka, která je závislá na zátěžném úhlu $\sin 2\beta$ je úměrná rozdílu magnetických odporů v podélné a příčné ose. Tuto složku momentu nazýváme reluktanční moment, který není závislý na budícím proudu [8].

Pro synchronní stroj s vyniklými póly lze sestavit momentovou charakteristiku



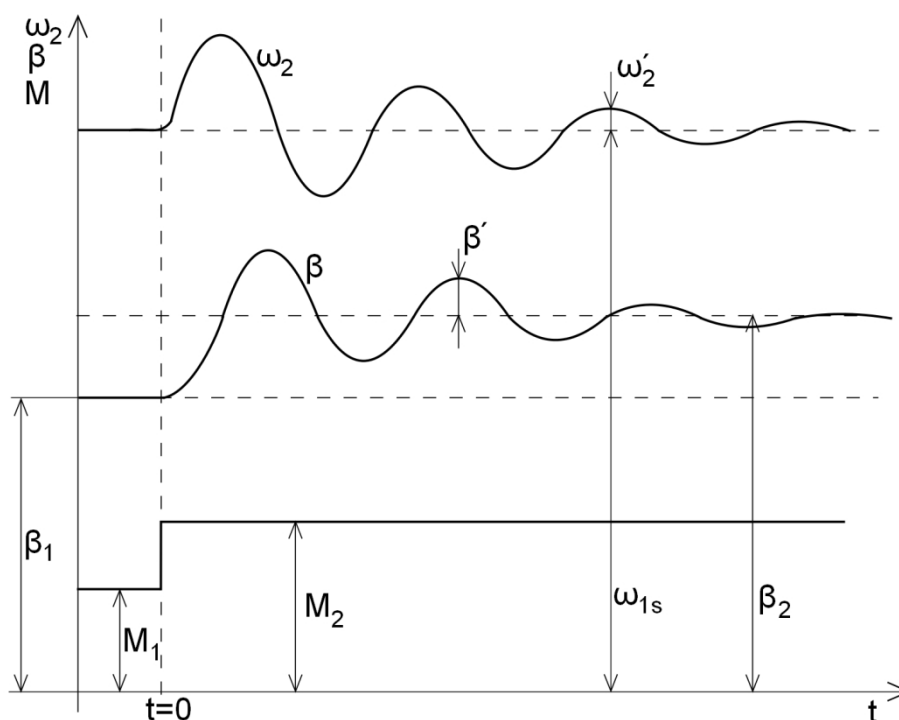
Obr. 1.12 Momentová charakteristika synchronního stroje s vyniklými póly [7]

1.6 Kývání synchronního stroje

Pokud se změní zatížení synchronního stroje, změní se i zátěžný úhel β . Tento úhel je závislý na poloze osy pólů daného stroje vůči ose výsledného magnetického pole, proto je jeho pohyb spojen s mechanickým kýváním celé otáčející se soustavy rotoru. Pokud je stroj připojen na síť nekonečného výkonu, bude se fázor výsledného magnetického pole otáčet konstantní úhlovou rychlostí, která odpovídá kmitočtu sítě. Toto platí jak pro alternátor, tak pro motor [1].

Pokud dojde ke změně zátěžného úhlu β způsobené vnějšími silami na hřídeli stroje, změní se proud v obvodech statoru a dojde ke vzniku synchronizačního momentu, který působí proti zrychlení či zpomalení otáčení rotoru [1].

Budeme předpokládat, že zařízení pohánějící alternátor dodává alternátoru moment, který se v okamžiku $t=0$ náhle zvětší z hodnoty M_1 na hodnotu M_2 a dále zůstává konstantní (viz obr. 1.13). Úhlová rychlost ω_2 i zátěžný úhel β se tedy začnou zvětšovat. Proti tomuto zvětšení budou působit některé vlivy, jako synchronizační moment, setrvačnost otáčejících se částí a další brzdící momenty. Přechod zátěžného úhlu β z původní hodnoty β_1 do nové ustálené hodnoty β_2 má zpravidla charakter postupně se zmenšujících vlastních kmitů. Dojde také k periodické změně úhlové rychlosti ω_2 s tím rozdílem, že původní a ustálená hodnota jsou stejné. Úhlovou rychlost rotoru během kývání si můžeme představit jako součet konstantní synchronní úhlové rychlosti ω_{1s} a proměnné periodické složky ω'_2 [1].



Obr. 1.13 Změna úhlové rychlosti a zátěžného úhlu při skokové změně momentu na hřídeli synchr. stroje [1]

V otáčející se soustavě rotoru mohou kromě těchto vlastních kmitů působit také kmity vnucené. Tyto kmity vznikají tehdy, pokud se periodicky mění působící moment na hřídeli. Tyto podmínky mohou vzniknout například u alternátorů poháněných spalovacími motory nebo u synchronních motorů, které pohánějí pístové kompresory [15].

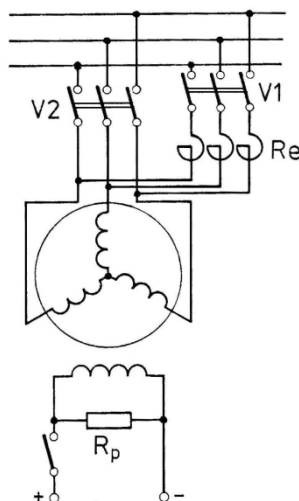
1.7 Způsoby rozběhu synchronního motoru

Jednou z nevýhod synchronního stroje je jeho problematický rozběh. Na statoru je vytvořeno točivé pole a na rotoru stojaté, ale protože je frekvence točivého pole statoru velká, statorové pole rotorovému tzv. uteče. Jeho spouštění je prováděno několika způsoby:

- Asynchronním rozběhem – přímým připojením k síti přes reaktor, autotransformátor
- Rozběhem s řízením frekvence
- Rozběh pomocným motorem

Nejjednodušším způsobem je asynchronní rozběh, motor však musí být vybaven rozběhovým vinutím, které se chová jako klec nakrátko u asynchronního motoru. U strojů s vyniklými póly je vinutí uloženo v pólových nástavcích, na koncích spojených vodivou spojkou, u strojů s hladkým rotorem funkci rozběhového vinutí zastávají mosazné klíny v drážkách vinutí na koncích spojených vodivým prstencem [15].

Asynchronní rozběh má dvě části. V první části se motor rozbíhá s asynchronním momentem do otáček blízkých synchronním. Budící vinutí je zkratováno a do jeho obvodu je vložen odpor obvykle o hodnotě desetinásobku odporu vinutí rotoru. V druhé části se odpojí odpor z rotorového vinutí, motor se nabudí a vtáhne se do synchronismu. Po dosažení synchronní rychlosti se spouštěcí prvek jako reaktor nebo autotransformátor přemostí [1].



Obr. 1.14 Spouštění synchronního stroje pomocí reaktoru [1]

Při rozběhu řízením frekvence je pomalu zvyšována frekvence statorového napětí, motor je nabuzen a pomalu se rozbíhá, po dosažení požadované frekvence a rychlosti otáčení je spouštěcí obvod obvykle přemostěn a stroj pracuje samostatně [1].

Při rozběhu pomocí pomocného motoru se většinou používá asynchronní motor připojený na stejné hřídeli [1].

2 Konstrukce synchronního stroje

Ve většině případů je ve statoru uloženo 3f střídavé vinutí (v některých případech může být ve statoru pouze 1f vinutí), které je vyvedeno na svorkovnici. V rotoru stroje je uloženo budící vinutí napájené stejnosměrným proudem, popřípadě jsou na rotoru umístěny permanentní magnety. U některých strojů je na rotoru také umístěno tlumící či rozběhové vinutí [11].

Synchronní stroje jsou v principu dvojího typu. Dvoupólové a čtyřpólové stroje velkých výkonů jsou navrhovány s hladkým rotorem, kdy budící vinutí tvoří rozložené cívký, které jsou vloženy do drážek po obvodu rotoru a uchycené kovovými klíny v drážkách a na jejich koncích jsou navlečeny stahovací obruče. Čtyřpólové stroje malých výkonů, středních výkonů a stroje šesti a více pólové všech výkonů mají zpravidla rotor s vyniklými póly. Zde jsou cívký budícího vinutí uloženy na jádrech pólů (viz obr. 1.4), na jejichž koncích jsou pólové nástavce a mezi póly jsou pólové rozpěrky. Tyto póly jsou rozmístěny v pravidelných vzdálenostech pólové rozteče po obvodu rotoru [16].

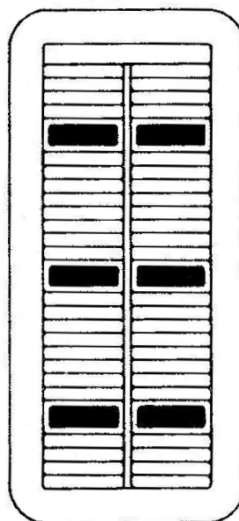
Velikost vzduchové mezery (pokud se jedná o stroj chlazený jiným plynem, jako například vodíkem, mluvíme o plynové mezeře) mezi statorem a rotorem je v první řadě závislá na výkonu stroje, pohybuje se od milimetrů až po jednotky centimetrů [16].

2.1 Synchronní stroj s hladkým rotorem

Synchronní stroje mají největší využití hlavně v oblasti výroby elektrické energie, proto jsou synchronní stroje s hladkým rotorem využívány hlavně k tomuto účelu a jsou nazývány turboalternátory. Někdy jsou využívány i jako synchronní kompenzátory [20].

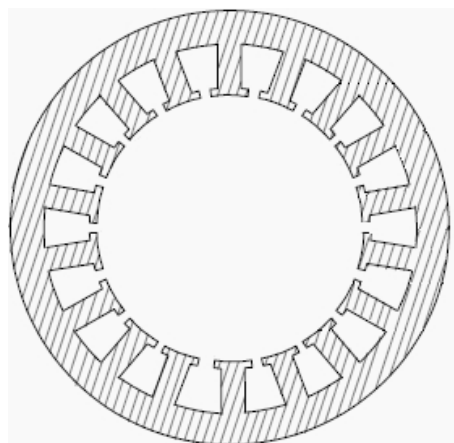
Převážná část elektrické energie je vyráběna v elektrárnách využívajících k pohonu alternátoru parní turbínu, popřípadě turbínu plynovou. Pro tento způsob výroby je nejvhodnější použít právě turboalternátor. Nejčastěji jsou použité dvoupólové stroje, v některých případech i čtyřpólové [2].

Stator je dimenzován podle elektromagnetického využití rotoru. Chlazení statorového vinutí může být provedeno buď nepřímo, kdy je teplo odváděno statorovým železem. U větších strojů se ale používá přímé chlazení kapalinové nebo plynové, kdy chladicí médium prochází přímo kanálky ve statorovém vinutí [18].



Obr. 2.1 Řez statorovou tyčí, vinutí chlazené kapalinou [16]

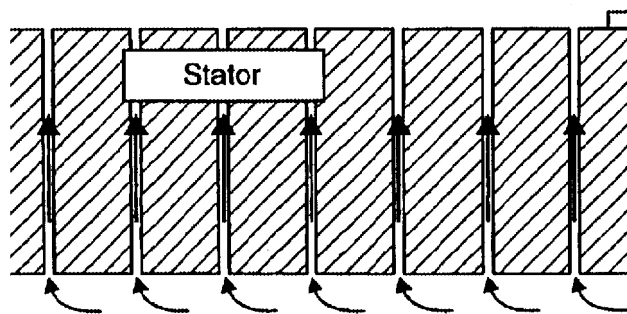
Statorové vinutí je uloženo ve statorových srážkách (viz obr. 2.2) a zajištěno drážkovými klíny. Statorové vinutí se většinou spojuje do hvězdy. Statorové plechy se lisují z plechů o tloušťce 0,35 – 0,5mm, které jsou lakované. Plechy jsou raženy buď na segmenty, které se následně skládají do celku, nebo se razí rovnou celý kruhový plech [11].



Obr. 2.2 Řez magnetickým obvodem statoru [15]

Statorový svazek je chlazen na vnějším a vnitřním povrchu, nebo se chlazení provádí radiálními kanály (viz obr. 2.3), u velkých strojů axiálními kanály [18].

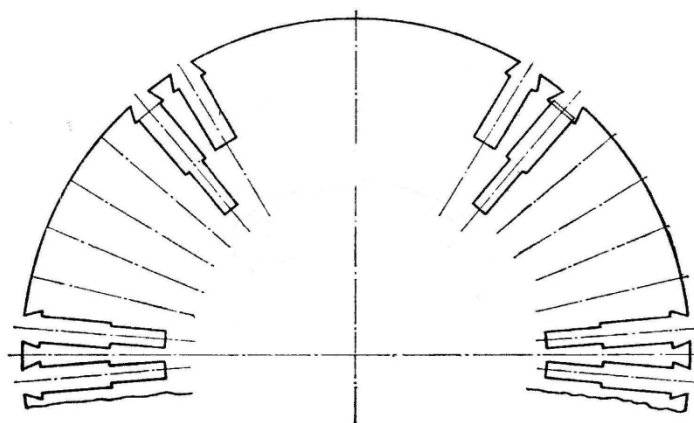
Skrz radiální chladicí kanály prochází chladicí médium, které proudí v části kanálů radiálně od vzduchové mezery směrem k vnějšímu průměru statoru a další části od vnějšího průměru k vnitřnímu [18].



Obr. 2.3 Část statorového svazku s radiálními chladícími kanály [17]

Rotor je uložen ve dvou ložiskách. Aktivní část železa rotoru je vyrobena z jednoho kusu velmi kvalitní oceli, do které jsou vyfrézovány drážky pro uložení budícího vinutí [2]. Drážková rozteč se liší podle výkonu stroje. U menších strojů je obvykle drážková rozteč rotoru $1/28$ obvodu rotoru při dvaceti navinutých drážkách, mají tedy 5 rotorových cívek na pól. U větších strojů je drážková rozteč menší. Určujícím parametrem pro napětí budiče, respektive pro budící proud je počet závitů na jeden pól (počet cívek na pól vynásobený počtem vodičů v drážce). U malých rotorů se volí větší počet vodičů v drážce z důvodu menšího budícího proudu a u velkých rotorů se volí menší počet vodičů, aby nebyla hodnota budícího napětí příliš velká [16].

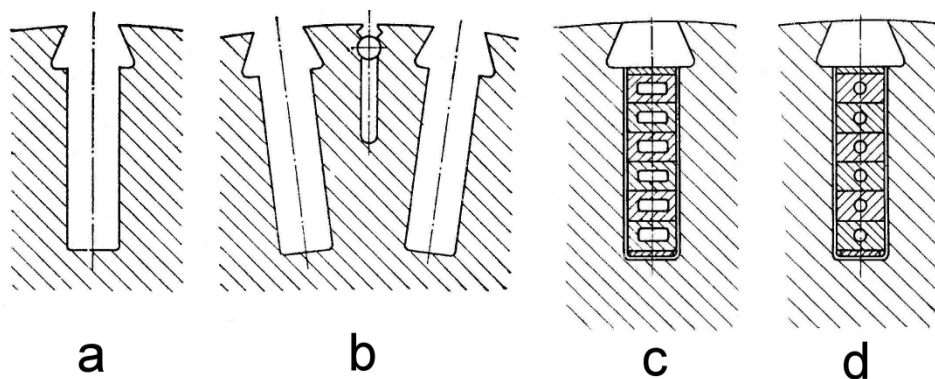
Mnohdy se provádějí dvě drážky v sousedství pólů méně hluboké (tudíž je v drážkách i méně vodičů než v ostatních drážkách), aby bylo dosaženo většího magnetického průřezu pólů [16].



Obr. 2.4 Uspořádání drážek hladkého rotoru [16]

U alternátorů větších výkonů se mnohdy používají jednou až třikrát odstupňované drážky, nebo drážky se sbíhavými stěnami. Tím dostáváme různé průřezy mědi uvnitř každé drážky, neboť proudová hustota se normálně volí u všech vodičů v drážce stejná [16].

Pro dimenzování rotoru je zásadní ventilace. Rozlišují se základní druhy chlazení, mezi které patří nepřímé vzduchové chlazení ventilací válcového povrchu rotoru pro menší výkony, nepřímé vzduchové chlazení ventilací povrchu rotoru zvětšeného drážkami v zubech, vývrty v zubech nebo kanály pod drážkami pro střední výkony a pro velké výkony přímé chlazení mědi vzduchem, vodíkem nebo vodou, kdy dutými vodiči prochází chladicí médium [18].



Obr. 2.5 Chlazení rotoru a) pouze povrchem rotoru, b) zvětšeným povrchem rotoru, c) přímé chlazení mědi plynem, d) přímé chlazení mědi vodou [16]

Do drážek je umístěno tlumící vinutí, na které je na konci natažen prstenec. Tlumící vinutí je používáno u strojů větších výkonů [2].

2.2 Synchronní stroj s vyniklými póly

Největší využití mají stroje s vyniklými póly v oblasti výroby elektrické energie pomocí vodních turbín, kde nevzniká tak velká obvodová rychlost rotoru a proto má rotor jednotky až desítky pólů, z důvodu dosažení síťové frekvence s malou otáčivou rychlostí rotoru. Tento stroj je pak nazýván hydroalternátor. Investiční náklady jsou sice značné, ale výdaje na primární energii jsou minimální [1].

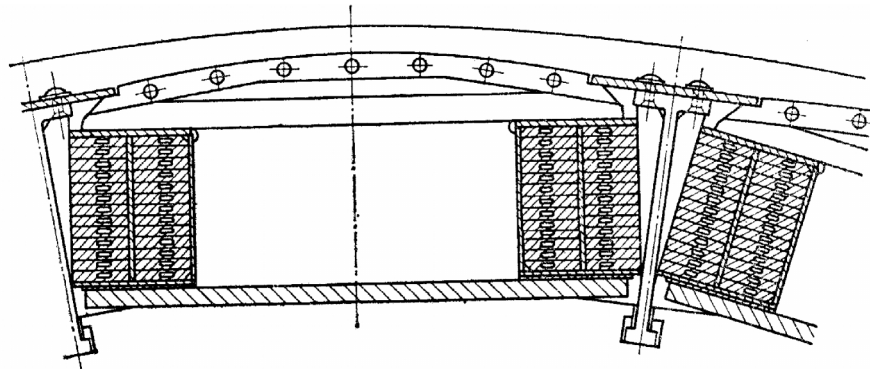
Vodní elektrárny se dělí na tři typy a podle nich se navrhuje turbína a i samotný alternátor. V případě průtočné a akumulární elektrárny je stroj navrhován pouze na chod jedním směrem, ale v případě přečerpávací elektrárny často synchronní stroj plní funkci jak alternátoru, tak čerpadla, proto musí být stroj navržen na oba směry otáčení, zvláště s ohledem na ložiska a ventilaci [16].

Hydroalternátory jsou konstruovány buď jako horizontální, nebo nejčastěji jako vertikální, podle použité turbíny a stavebních poměrů elektrárny. Síly, které vyvolává hmotnost rotoru hydroalternátoru a sním spojené oběžné kolo turbíny a tlak vody, zachycuje nosné (závěsné) ložisko. Radiální síly zachycuje jedno nebo dvě vodící ložiska. Podle umístění nosného ložiska se rozeznávají dva základní typy konstrukcí. První konstrukcí je

stroj s nosným ložiskem nad rotorem (závěsné), který se obvykle používá u rychloběžných strojů středních výkonů. Druhým typem konstrukce je stroj s nosným ložiskem pod rotorem (deštníkové), které se používá obvykle u pomaluběžných strojů vyšších výkonů [1]. Hydroalternátory s vodorovným hřídelem se obvykle používají v elektrárnách s velkým spádem a také se mohou používat v nízkotlakých elektrárnách na řekách (zde se může použít i hydroalternátor se šikmým hřídelem) a pro přílivové elektrárny na pobřeží [16].

Vinutí je uloženo na pólech, na jejichž koncích jsou umístěny pólové nástavce pro lepší magnetické využití rotoru a pro upevnění rotorového vinutí [3].

Stejně jako chlazení u strojů s hladkým rotorem je i u strojů s vyniklými póly řešeno buď nepřímo, kdy se však musí učinit opatření, aby rozpěrky mezi póly nebránily průchodu vzduchu, například konstruovat rozpěrky tak, aby příliš nezvětšovali odpor této mezery. Jinak může být rotorové vinutí chlazeno přímo (viz obr. 2.6) [18].



Obr. 2.6 Částečný řez rotorem s přímým chlazením [16]

Na rotor je obvykle umístěováno tlumící vinutí, jehož tyče procházejí buď celým pólovým nástavcem, nebo jsou zaraženy klíny do určité tloušťky. Na koncích je umístěn zkratovací prstenec, který buď z jednoho kusu, nebo složen ze segmentů, které mají mezery mezi jednotlivými póly [3].

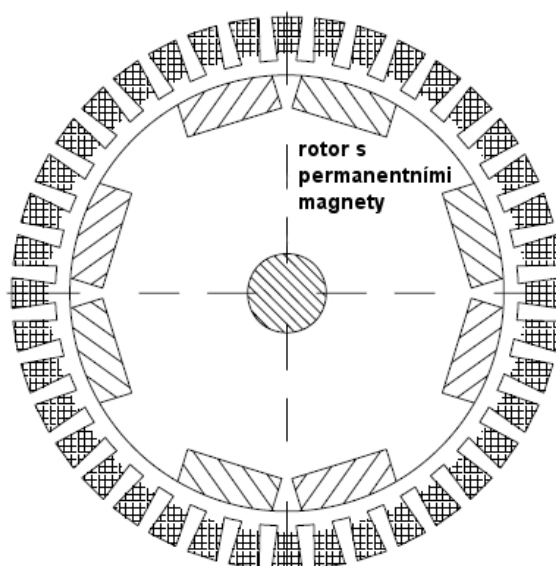
Stator je konstruován obdobně jako stator u stroje s hladkým rotorem, chlazení je také provedeno buď nepřímo, nebo přímo podle výkonu a stavebních možností samotné elektrárny [16].

2.3 Synchronní stroje s permanentními magnety

Největší využití nachází synchronní stroje s permanentními magnety v oblasti elektrické trakce, kde v posledních letech s vývojem polovodičové měničové techniky vystřídaly stejnosměrné motory, díky svým příznivým vlastnostem. Využití permanentních magnetů

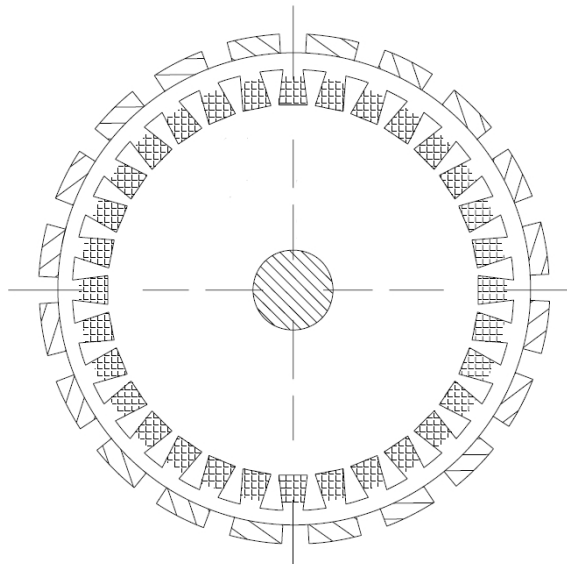
přineslo obrat také v servotechnice, robotice a automatizační technice v pohonech o výkonech stovek W až do desítek kW, kde nahrazují zejména krokové a stejnosměrné motory [19].

Synchronní stroje s permanentními magnety pro využití v elektrické trakci lze rozdělit do dvou základních skupin. První skupinu PMSM představuje stroj, jehož 3f statorové vinutí je uloženo v drážkách magnetického obvodu. Na rotoru jsou umístěny permanentní magnety (viz obr. 2.7). Rotor je často odlehčený dutinami, protože magnetický tok se u těchto motorů uzavírá v povrchové vrstvě. Póly permanentních magnetů jsou tvořeny dílčími segmenty. Magnety jsou upevňovány na rotor lepením a jsou zpevňovány bandáží, kde jednotlivé segmenty mají velikost několika mm až cm [19].



Obr. 2.7 Konstrukce PMSM s vnitřním rotorem [19]

Druhou konstrukční variantou je PMSM s vnějším rotorem (viz obr. 2.8). Tato konstrukce je využívána v aplikacích, kdy je motor integrován přímo do konstrukce kola. V tomto případě je tedy stator spojen s osou kola [2]. Tato konstrukce se využívá zejména u silničních vozidel, počínaje elektrokoly, přes osobní automobily a autobusy s elektrickým nebo hybridním pohonem až po speciální stavební stroje. Princip funkce, napájení a jeho řízení se neliší od strojů s vnitřním rotorem [19].



Obr. 2.8 Konstrukce PMSM s vnějším rotorem [19]

Permanentní magnety jsou vyráběny ze speciálních slitin na bázi dvou skupin prvků

- Materiály na bázi prvků Neodym – železo – bór (např. $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)
- Materiály na bázi prvků Samarium – kobalt (např. Sm_1Co_5)

Výhodou těchto magnetů je velká remanentní indukce. Nevýhodou je ztráta magnetických vlastností při zvýšené teplotě, proto je maximální provozní teplota u magnetů SmCo cca 300°C a u magnetů NdFeB cca 100°C [19].

Z důvodu velké koncentrace výkonu v malém objemu je problematický odvod ztrátového tepla, proto se u motorů s větším výkonem používá vodní chlazení [19].

2.4 Budicí systémy synchronních strojů

Nedílnou součástí synchronních strojů s vinutým rotorem je budič, který přivádí do rotorového vinutí potřebný budicí proud [11].

Budicí soustavy lze dělit na dvě základní skupiny. První skupinu představují statické budiče, které neobsahují žádné rotační komponenty, napájení je provedeno usměrněním proudu a přes sběrací ústrojí (kartáče a kroužky) je přiveden do rotorového vinutí. Druhou skupinou jsou rotační budiče, mezi které patří derivační dynamo a bezkartáčové budicí soustavy (přenos energie je zajištěn bez sběracího ústrojí tak, že řízený, či neřízený usměrňovač se otáčí na společné hřídeli s budícím vinutím hlavního alternátoru a zdrojem energie pro buzení jako je například kotva střídavého budiče) [11].

3 Stroj při práci v ostrovním režimu

V ostrovním režimu je využíván synchronní alternátor k napájení určitého komplexu, či rozsáhlého zařízení bez připojení k tvrdé síti (jako jsou například velké lodě) [15].

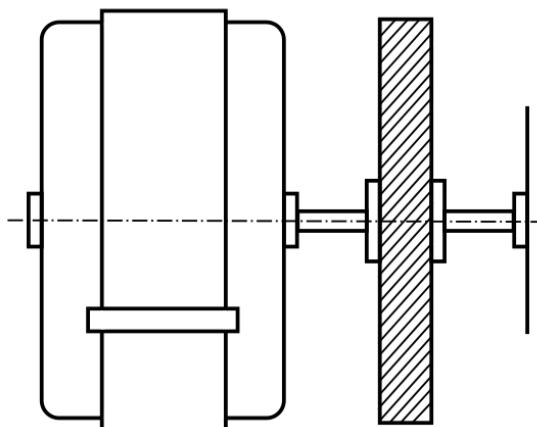
3.1 Konstrukční řešení synchronních strojů pro práci v ostrovním režimu

Nejčastěji používaným pohonem pro synchronní generátor v ostrovním režimu je diesellový motor. Problémem diesellových motorů je, že jejich točivý moment je během jedné otáčky proměnlivý, proto je potřeba pro dosažení klidného chodu a úměrného stupně nerovnoměrnosti (výpočet ze vzorce 3.1), aby soustrojí mělo dostatečné setrvačné hmoty [16].

$$d = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\text{stř}}} \quad (3.1)$$

Tyto setrvačné hmoty musí splňovat následující podmínky:

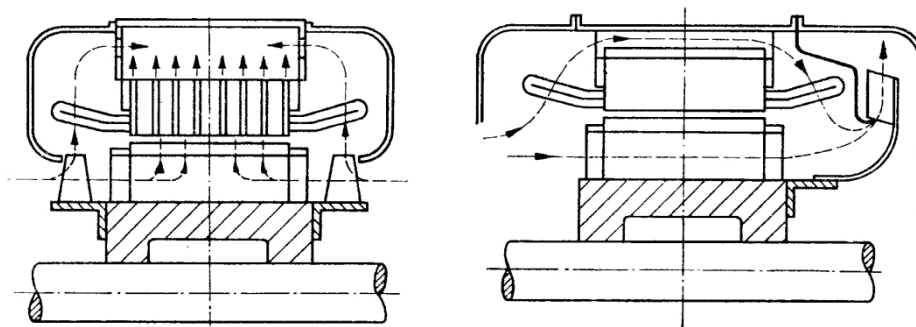
- Regulace může nastavit v určitém čase potřebný hnací moment, pokud při změně otáčivé rychlosti nebo zatížení stroje setrvačnick absorbuje nebo dodá takové množství energie, které je zapotřebí k zajištění momentové rovnováhy pístového stroje [16].
- Pokud stupeň nerovnoměrnosti chodu při nejúspornější volené velikosti setrvačného momentu pístového stroje je tak velký, že kolísání hodnoty elektrického napětí způsobuje blikání světel, je nutné setrvačný moment přiměřeně zvětšit přidáním setrvačnicku [16].



Obr. 3.1 Setrvačnick mezi přírubami alternátoru a diesellového motoru [16]

Ventilace je prováděna buď dvoustranně souměrně obvykle s axiálními ventilátory, nebo axiální s jedním radiálním ventilátorem. V případě prvního způsobu chlazení je magnetický obvod statoru opatřen radiálními chladícími kanály. Ve druhém případě prochází vzduch strojem dvěma axiálními paralelními cestami. Popsané alternátory mají většinou nízký stupeň

krytí bez uzavřeného chladicího okruhu, pokud nejsou v prostorech, kde by odevzdání ztrátového tepla způsobilo značné oteplení okolí (například na lodích) [18].

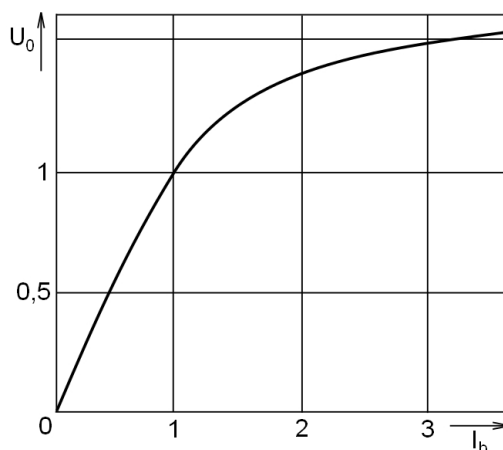


Obr. 3.2 Souměrná oboustranná ventilace (vlevo), jednostranná axiální ventilace (vpravo) [18]

Alternátory jsou obvykle uloženy na základovém rámu diesellového motoru, od kterého je případně odpružen podložkami z pryže a kovu. Jejich ložiska a uložení jsou konstruována na chod v nakloněné rovině [18].

3.2 Chování synchronního stroje při práci v ostrovním režimu

Jedním ze základních stavů, který může nastat, je stav naprázdno. Pokud stroj pracuje samostatně a dojde k náhlému poklesu odběru, zvýší se jeho otáčky, zde musí zapůsobit řídicí obvod s regulátorem otáček a otáčky ustálit. Proto se utváří charakteristiku naprázdno, která vyjadřuje magnetické vlastnosti stroje, podobně jako charakteristiky naprázdno jiných točivých elektrických strojů [1]. Je měřena při rozpojeném obvodu statoru a při synchronní rychlosti. Charakteristika naprázdno vyjádřená v poměrných jednotkách se nazývá normální charakteristika naprázdno, kde se klade $U_0 = U_N = 1$ a $I_b = I_{b0N} = 1$, je znázorněna na obr. 3.3. Slouží k posouzení stavu nasycení a z toho plynoucích dalších vlastností [8].



Obr. 3.3 Normální charakteristika naprázdno synchronního stroje [1]

Dalším stavem je stav nakrátko, při jehož měření rotor roztáčíme na synchronní rychlost a měříme budící proud I_b a jemu odpovídající proudy ve fázích statoru spojených vodivou svorkou nakrátko přibližně do hodnoty $I_k = 1,2I_N$ [8].

Rovnici (1.11) je možno přepsat pro $U=0$ a pro $\hat{Z}_d = R + jX_d$ přepsat jako

$$\hat{Z}_d \hat{I}_k + \hat{U}_{ib} = 0 \quad (3.2)$$

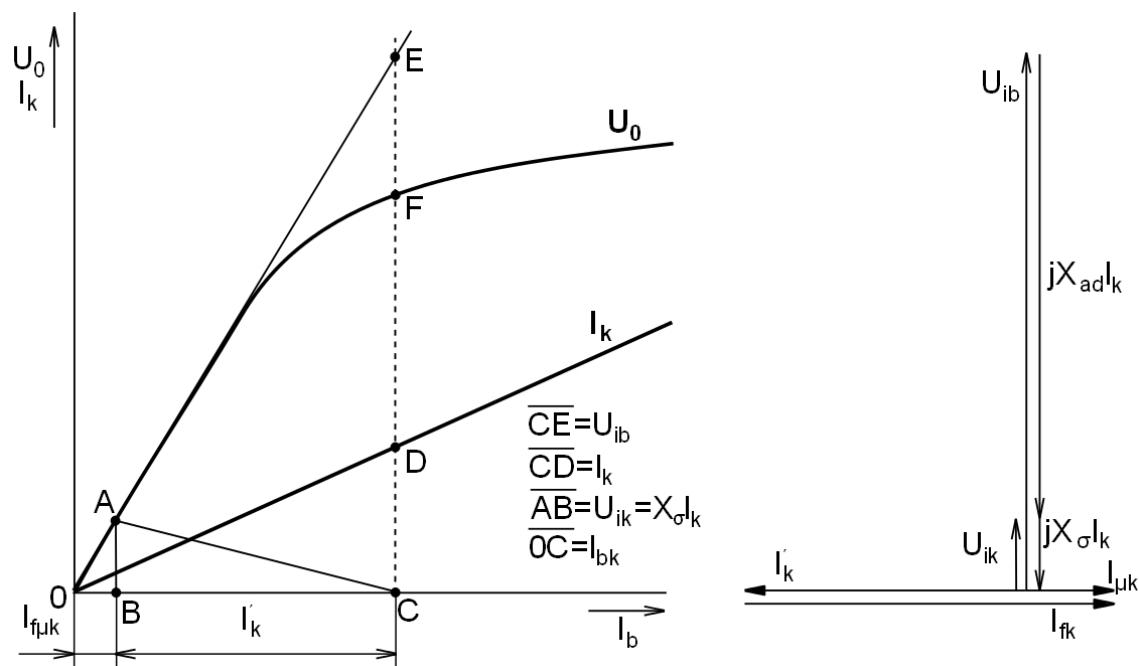
a tedy platí

$$\hat{I}_k = -\frac{\hat{U}_{ib}}{\hat{Z}_d} \quad (3.3)$$

a při zanedbání odporu

$$\hat{I}_k = j\frac{\hat{U}_{ib}}{X_d} \quad (3.4)$$

Celé indukované napětí \hat{U}_{ib} je rozděleno na úbytek na hlavní a rozptylové reaktanci statoru $X_{ad} + X_\sigma$. Proud nakrátko \hat{I}_k je vzhledem k napětí \hat{U}_{ib} podle rovnice (3.4) jalový. Reakce kotvy \hat{I}_k působí proti toku budícího vinutí a při chodu nakrátko tedy podélná reakce kotvy odbuzuje stroj. Výsledný tok stroje, který charakterizuje magnetizační proud vztažený na rotor I_{buk} , je proto velmi malý. Při malém sycení je synchronní reaktance $X_d = X_{ad} + X_\sigma$ konstantní a charakteristika nakrátko má lineární průběh, protože napětí $U_{ib} \sim I_b$ působí na stálou reaktanci X_d . Proud nakrátko a charakteristika nakrátko není v širokém rozsahu závislá na rychlosti otáčení, neboť se úměrně k rychlosti mění indukované napětí \hat{U}_{ib} i synchronní reaktance X_d [1]. Fázorový diagram můžeme analyzovat podle obr. 3.4, který obsahuje charakteristiky nakrátko a naprázdno. Napětí $U_{ik} = X_\sigma I_k$ je indukováno výsledným tokem a jemu odpovídajícím proudem I_{buk} . Celkový budící proud při chodu nakrátko I_{bk} indukuje fiktivní napětí U_{ib} , které je určeno na charakteristice vzduchové mezery (stroj je nenasyčen). Proud reakce statoru přepočten na rotor I'_k je na obr. 3.4 určen úsečkou BC. Trojúhelník ABC je nazýván Potierovým trojúhelníkem [8].



Obr. 3.4 Charakteristika naprázdno a nakrátko a fázorový diagram synchronního stroje nakrátko [8]

Pomocí charakteristik naprázdno a nakrátko je možné určit některé důležité veličiny stroje, kterými jsou:

- Činitel přepočtu rotorového proudu na stranu statoru p_1

$$p_1 = \frac{CD}{BC} \quad (3.5)$$

- Podélnou synchronní reaktanci X_d je možno vypočítat jako

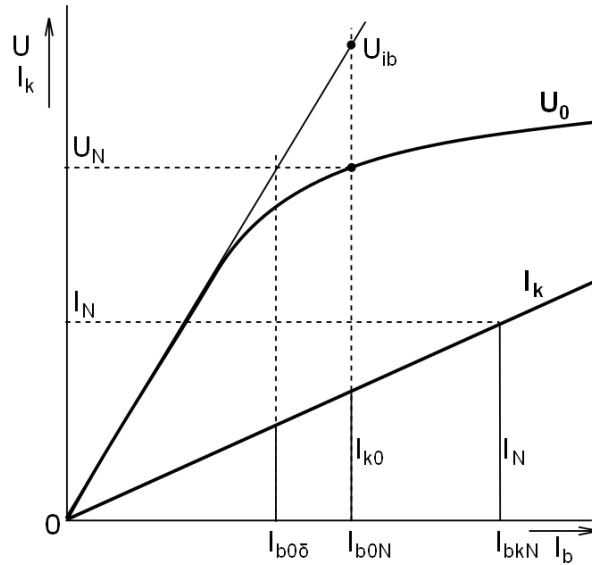
$$X_d = \frac{U_{ib}}{I_k} \quad (3.6)$$

Pro zvolený proud nakrátko I_k (například CD) nalezneme odpovídající napětí U_{ib} při stejném budícím proudu (například CE) [8].

- Poměrný proud nakrátko, (zkratový poměr) i_k je definován jako poměr (viz obr. 3.5)

$$i_k = \frac{I_{k0}}{I_N} = \frac{I_{b0N}}{I_{bkN}} \quad (3.7)$$

kde I_{k0} je ustálený proud nakrátko při budícím proudu I_{b0N} , kterému odpovídá jmenovité napětí při chodu naprázdno a I_{bkN} je budící proud při chodu nakrátko, kterému odpovídá jmenovitý proud statoru I_N [7].



Obr. 3.5 Určení zkratového poměru synchronního stroje [10]

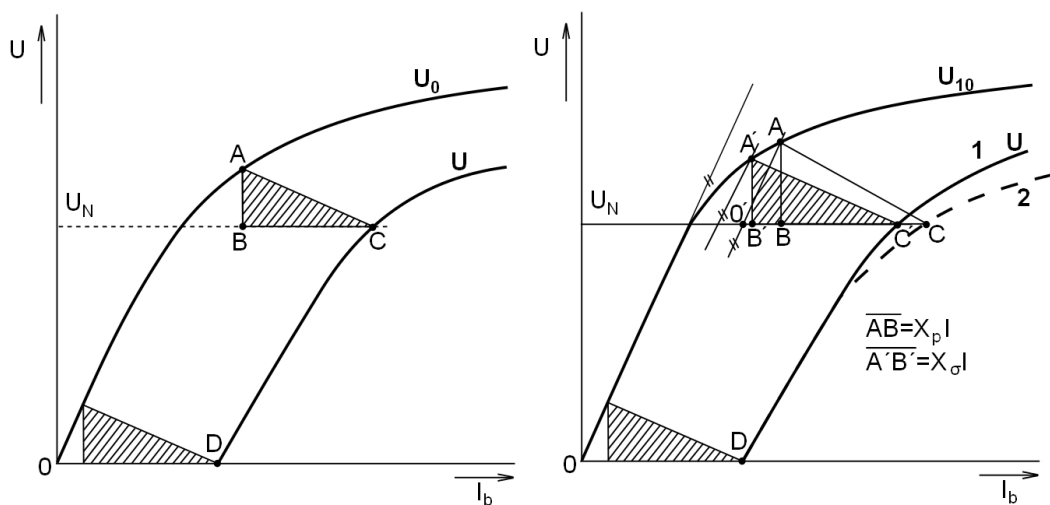
Z rovnice (3.7) je patrné, že zkratový poměr má fyzikálně stejný význam jako poměrný magnetizační proud transformátoru či asynchronního stroje. U synchronních strojů je však jeho hodnota větší, neboť vzduchová mezera je větší. U strojů s vyniklými póly se hodnoty pohybují kolem 0,8 - 0,2, u strojů s hladkým rotorem se pohybují v rozmezí 0,5 - 0,8 [8].

Vztah mezi poměrnou synchronní reaktancí a zkratovým poměrem je dán z rovnice (3.6)

$$x_d = \frac{X_d}{Z_N} = \frac{U_{ib}}{I_{k0}} \frac{I_N}{U_N} = \frac{U_{ib}}{U_N} \frac{I_N}{I_{k0}} = \frac{I_{b0N}}{I_{b0\delta}} \frac{I_N}{I_{k0}} = \frac{v}{i_k} \quad (3.8)$$

kde v vyjadřuje, jak moc je stroj nasycen a respektuje zakřivení charakteristiky naprázdno vlivem nasycení magnetického obvodu stroje. Pokud je zanedbáno sycení, je $v \approx 1$. Na velikosti zkratového poměru je závislá přetížitelnost synchronního stroje [7].

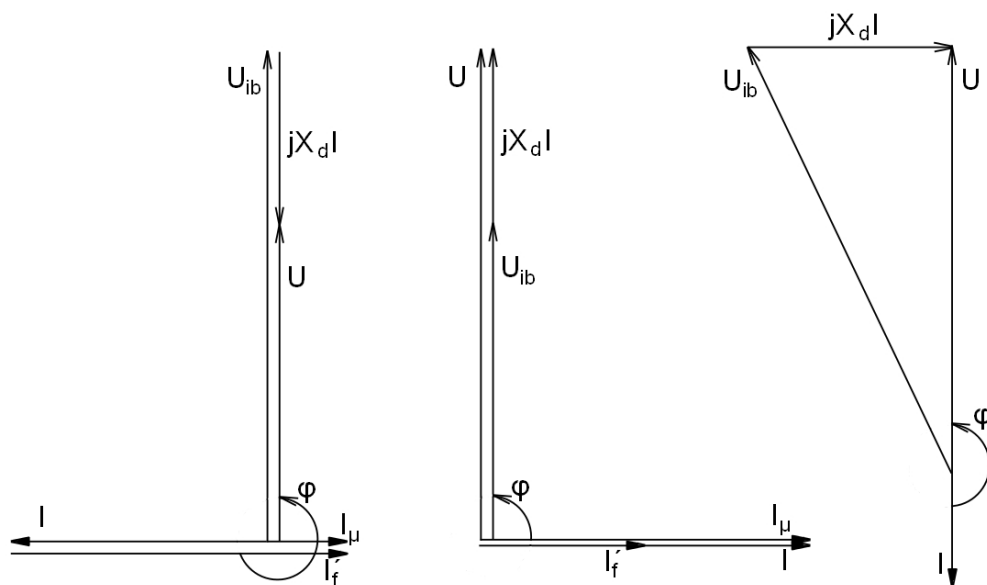
Další charakteristikou, kterou můžeme určit je indukční charakteristika



Obr. 3.6 Indukční charakteristika synchronního stroje a vysvětlení Potierovy reaktance [7]

Z definice této charakteristiky vyplývá, že charakteristika naprázdno je jedna ze sítě indukčních charakteristik. Největší význam má indukční charakteristika, pokud strojem protéká jmenovitý proud a je k němu připojena čistě indukční zátěž [1]. Tato charakteristika může být odvozena z charakteristiky naprázdno, je-li znám bod D, který odpovídá budícímu proudu nakrátko I_{bkN} . Za předpokladu, že sycení rozptylových cest je konstantní, vznikne indukční charakteristika posunem Potierova trojúhelníku v obr. 3.6, pro jehož svislou odvěsnu platí $AB = X_{\sigma} I_N$. Tomuto odpovídá křivka 1 v obr. 3.6. V reálu jsou však póly více syceny vlivem vyššího napětí, jejich magnetický odpor a rozptyl budícího vinutí je větší a z toho vyplývá, že bude větší i budící proud. Proto je Potierova reaktance $X_{\sigma} < X_p$, protože je v ní zahrnut rozptyl vinutí statoru a zvětšení rozptylu budícího vinutí při nasycení pólů. Potierovu reaktanci je možné zjistit i měřením X_p . Zjistí se tak, že na skutečně naměřené indukční charakteristice 2 v obr. 3.6 při jmenovitém napětí je nalezen bod C. Z bodu C je vynesena vzdálenost mezi 0D a získáme bod 0'. Bodem 0' povedeme rovnoběžku s charakteristikou vzduchové mezery a zjistíme bod A. Potierovu reaktanci pak určuje velikost úsečky AB [8].

Pro samostatně pracující alternátor je také důležitá vnější charakteristika, udávající změnu napětí svorkách zatíženého alternátoru v závislosti na proudu, který je do zátěže dodáván. Rozbor provedeme pro alternátor s hladkým rotorem [10].



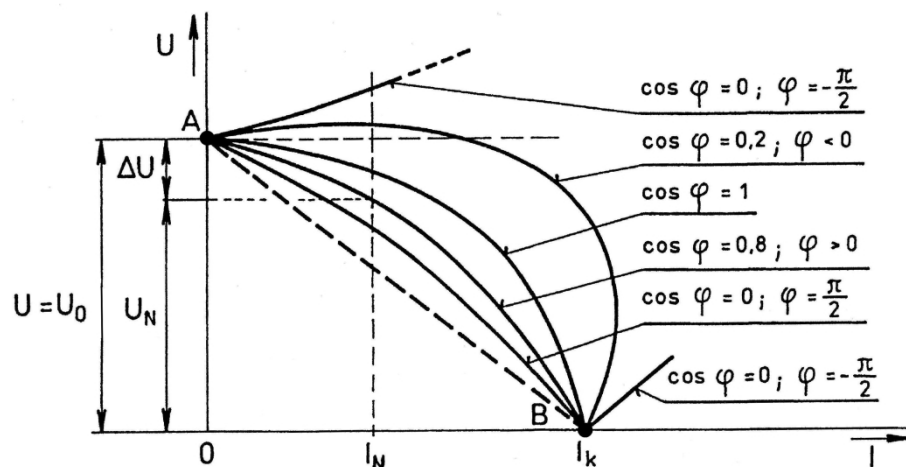
Obr. 3.7 Fázorový diagram pro indukční zátěž (vlevo), kapacitní a čistě odporovou (vpravo) [8]

Pokud by byla připojena na alternátor čistě indukční zátěž, dodával by do indukčnosti jalový výkon (choval by se jako kondenzátor). Podle fázorového diagramu na obr. 3.7 je

úbytek napětí $X_d I$ přímo úměrný zatěžovacímu proudu I , vnější charakteristika má lineárně klesající tendenci. Generátor pracuje v přebuzeném stavu ($I_b > I_\mu$)[8].

Je-li zátěž kapacitního charakteru připojená na alternátor, začne se alternátor chovat jako indukčnost. Podle fázorového diagramu na obr. 3.7 se napětí bude lineárně zvětšovat při narůstajícím zatížení. Generátor pracuje v podbuzeném stavu ($I_b < I_\mu$). Nárůst napětí se zatížením je také nazýván samobuzení generátoru. Tento stav je nebezpečný z hlediska elektrické izolace stroje [10].

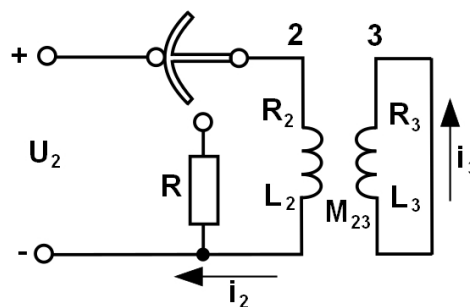
Pokud se alternátor zatěžuje pouze odporovou zátěží, je satorový proud v protifázi s napětím a úbytek $jX_d I$ je k němu kolmý [10].



Obr. 3.8 Vnější charakteristiky synchronního stroje pro různé hodnoty účinníku [8]

3.3 Náhlé odstavení synchronního stroje

Pokud dojde k havarijnímu stavu, je nutné rychle snížit satorové napětí na nulu, proto je do budícího vinutí rotoru zařazuje odpor a je odpojen od zdroje budícího proudu (viz obr. 3.9). Při tomto ději vzniknou v budícím a tlumícím vinutí přechodové proudy i_2 a i_3 , které se budou snažit udržet magnetické pole stroje stále stejné a budou se zmenšovat rychleji, pokud budou menší časové konstanty obvodů, kterými se tyto proudy uzavírají [1].



Obr. 3.9 Schéma odbuzování synchronního stroje s využitím odporu R [1]

Použitý odpor R se zpravidla volí v hodnotách 4 -5ti násobku hodnoty odporu budícího vinutí $R \approx (4 - 5) \cdot R_2$ [1].

V prvním okamžiku při odbuzování vznikne na svorkách přepětí o hodnotě 4 – 5násobku jmenovitého budícího napětí. Pro příznivější průběh odbuzování se může použít nelineární odpor R , jehož hodnota odporu se zmenšuje se vzrůstajícím napětím na svorkách budícího vinutí. Hodnoty odporu R musí být voleny rozumně, pokud bude odpor R příliš malý, bude v budícím vinutí přechodný proud zanikat velmi pomalu a celý proces odbuzování se značně zpomalí. Pokud dojde jen k prostému odpojení budícího vinutí od zdroje proudu, vznikne na kontaktech vypínače oblouk, který je napájen energií z magnetického pole buzení. Tímto může vzniknout značné přepětí, které může poškodit izolaci stroje [1].

Pokud je pro buzení stroje použit plně řízený tyristorový zdroj, je možné provádět odbuzení bez nutnosti přerušovat budící obvod. Tohoto dosáhneme přechodem usměřovače z usměřovačového do invertorového chodu s využitím záporného stropního napětí [1].

Závěr

V první části této bakalářské práce je popsán princip synchronního stroje s hladkým rotorem a vyniklými póly včetně jejich základních parametrů. Zmíněno je i kývání synchronního stroje, při kterém může dojít k vypadnutí stroje ze synchronismu, tudíž k havarijnímu stavu. Práce také obsahuje způsoby rozběhu synchronních motorů, jejichž rozběh je složitější, což je bráno s vyšší pořizovací cenou za zápor. Za kladné lze považovat možnost řízení účinníku, kdy může do sítě dodávat jalový výkon.

V další části jsou popsány používaná chlazení a konstrukce synchronních strojů s hladkým rotorem a strojů s rotorem s vyniklými póly. Stroj s hladkým rotorem se konstrukčně odlišuje od stroje s vyniklými póly na první pohled svou větší osovou délkou a menším průměrem. Chlazení synchronních strojů se liší především podle výkonu stroje, rozlišovány jsou chlazení přímá a nepřímá. Popsány jsou také stroje využívající permanentní magnety, které jsou využívány především k minimalizaci a větší spolehlivosti stroje.

Poslední část práce specifikuje chování synchronního stroje při práci v ostrovním režimu. Zejména jeho jednotlivé stavy, jako chod naprázdno, nakrátko a havarijní stav, kdy je potřeba rychle snížit hodnotu statorového napětí k nule. Zde je však problém s budícím obvodem, kdy při jeho rozepnutí vznikají přechodové stavy, které jsou provázeny zejména přepětím, tyto stavy je nutno regulovat, aby nedošlo k poškození stroje.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje - synchronní stroje*. 2. vyd. Praha: ACADEMIA PRAHA, 1982, 732 s.
- [2] DOLEŽAL, Jaroslav, Jiří ŠTASTNÝ, Jan ŠPETLÍK, Stanislav BOUČEK a Zbyněk BRETTSCHEIDER. *Jaderné a klasické elektrárny*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 259 s. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [3] KOCMAN, Stanislav. *Synchronní stroje* [online]. Ostrava: Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB - TU Ostrava, 2004 [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_synchronni%20stroje_bc%20FS.pdf
- [4] GEOFF KLEMPNER, Isidor Kerszenbaum. *Operation and maintenance of large turbo generators*. New York: IEEE Press, 2004. ISBN 04-716-1447-5.
- [5] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 120 s. ISBN 80-010-2482-2.
- [6] KRATOCHVÍL, Filip. *TROJFÁZOVÉ OBVODY* [online]. Plzeň, 2006 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~karban/teaching/te1/3f/kratochvil_3f.pdf
- [7] JIŘÍ MĚŘIČKA, Václav Hamata. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1993, 311 s. ISBN 80-010-1020-1.
- [8] VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír NOVOTNÝ a Pavel MINDL. *Elektromechanické měniče*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 219 s. ISBN 80-010-3137-3.
- [9] *Synchronous Machines* [online]. Sydney, 2007 [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: http://services.eng.uts.edu.au/cempe/subjects_JGZ/eet/eet_ch6.pdf
- [10] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 1995, 221 s. ISBN 80-708-2221-X.
- [11] HORA, Oldřich et al. *Regulační a budicí systémy synchronních strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985, 208 s.
- [12] CHAPTER 2 A.C. GENERATORS. *Engineering Photos, Videos and Articals (Engineering Search Engine)* [online]. 2013 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://emadrlc.blogspot.cz/2013/01/chapter-2-ac-generators.html>
- [13] Electrical Machines II: 3 Synchronous Generator Operation. In: *National Programme on Technology Enhanced Learning* [online]. Indian Institute of Technology Madras, 2005 [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: http://www.nptel.iitm.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Electrical_Machines_II/pdf/2_3.pdf
- [14] SYNCHRONOUS GENERATORS. *Albadronline books* [online]. 2004 [cit. 2013-04-08]. Dostupné z: <http://www.albadronline.com/oldsite/books/POWER%20GENERATION%20HANDBOOK/Power%20Generation%20Handbook-Part4.pdf>
- [15] Synchronous Machines Notes. In: VISHWANATH, Hegde. [online]. 2007 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://elearning.vtu.ac.in/17/e-Notes/10EE54/Unit%205%20&%208-VH.pdf>
- [16] KELLENBERGER, W. *Konstrukce elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1973, 650 s.
- [17] Forced air stator ventilation system and stator ventilation method for superconducting synchronous machine: United States Patent 6882068. *Freepatentsonline* [online]. 2005 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/6882068.html>
- [18] ONDRUŠKA, Emil a Antonín MALOUŠEK. *Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých*. Praha: SNTL, 1985, 440 s.

- [19] ČERNÝ, Ondřej, Radovan DOLEČEK a Jaroslav NOVÁK. Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel. *Vědeckotechnický sborník ČD* [online]. 2010 [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: <http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/vts29/2908.pdf>
- [20] CHAN, Tze-Fun. SYNCHRONOUS MACHINES. *Hong Kong Polytechnic University* [online]. 2006 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: http://faculty.ksu.edu.sa/Rizk_Hamouda/430EE%20Doc/synchronous%20machine%20%20II.pdf