

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vysokootáčkové stroje s PM a jejich aplikace v průmyslu

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David LÁLA**

Osobní číslo: **E13B0195P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Vysokootáčkové stroje s PM a jejich aplikace v průmyslu**

Zadávací 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 :

Předmětem bakalářské práce je zpracovat rešerši o stavu současného nasazení vysokootáčkových strojů s PM a zhodnotit jejich provozní limity

1. Popište různá konstrukční provedení a jejich aplikaci.
2. Zhodnoťte nasazení strojů pro různé aplikace v průmyslu.
3. Zdůvodněte a popište výhody a nevýhody jednotlivých řešení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Elektronické informační zdroje IEEE (dostupné přes knihovnu ZČU - <http://ieeexplore.ieee.org/>).**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lukáš Veg

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá rešerší vysokootáčkových strojů s permanentními magnety, jejich konstrukčním provedením a vlastnostmi. Dále je popsána jejich aplikace v průmyslu a v závěru práce jsou zhodnoceny výhody a nevýhody těchto strojů spolu s nasazením v průmyslu.

Klíčová slova

Permanentní magnet, stroje s PM, synchronní stroje s PM, vysokootáčkové stroje s PM, aplikace v průmyslu

Abstract

The submitted Bachelor thesis presented research of high-speed machines with permanent magnets, their design and characteristics. It is further described their applications in industry and there are assessed the advantages and disadvantages of these machines together with deployment in industry.

Key words

Permanent magnet, machines with PM, synchronous machines with PM, high-speed machines with PM, applications in industry

Prohlášení

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.

.....
podpis

V Plzni dne 5.6. 2017

David Lála

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Lukáši Vegovi za odborné a důležité rady při psaní této práce a v neposlední řadě také své rodině za trpělivost a podporu při mém studiu na této škole.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 ÚVOD DO TEORIE STROJŮ S PM	12
1.1 STROJE S PM.....	12
1.1.1 <i>Permanentní magnety a jejich vlastnosti</i>	13
1.1.2 <i>PM na bázi slitin</i>	14
1.1.3 <i>Feritové PM</i>	15
1.1.4 <i>PM ze vzácných zemin (Samarium - kobalt ; Neodym - železo - bor)</i>	15
1.2 SYNCHRONNÍ STROJE S PM.....	17
2 VYSOKOOTÁČKOVÉ STROJE S PM	20
2.1 DEFINOVÁNÍ POJMU VYSOKOOTÁČKOVÝ STROJ.....	20
2.2 KONSTRUKCE.....	22
2.3 RYCHLOSTNÍ LIMITY.....	27
2.4 LOŽISKA PRO VYSOKOOTÁČKOVÉ STROJE.....	27
2.4.1 <i>Mechanická ložiska (kuličková)</i>	28
2.4.2 <i>Vzduchová ložiska</i>	29
2.4.3 <i>Aktivní magnetická ložiska</i>	30
2.5 UKÁZKA NÁVRHU ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU PRO VYSOKOOTÁČKOVÝ STROJ S PM.....	32
3 APLIKACE VYSOKOOTÁČKOVÝCH STROJŮ S PM V PRŮMYSLU	33
3.1 SYNCHRONNÍ VYSOKOOTÁČKOVÉ SERVOMOTORY S PM.....	33
3.1.1 <i>Základní informace o střídavých synchronních servomotorech s PM</i>	33
3.1.2 <i>Synchronní vysokootáčkové servomotory 2AML406B</i>	36
3.2 VYSOKOOTÁČKOVÝ ELEKTRICKÝ GENERÁTOR HFG 125T.....	37
3.3 EC MOTORY MAXON PRO EXTRÉMNÍ PODMÍNKY.....	41
3.4 DVOUMEGAWATTOVÝ VYSOKOOTÁČKOVÝ ALTERNÁTOR S PM PRO LODNÍ APLIKACI.....	47
4 ZHODNOCENÍ NASAZENÍ STROJŮ V PRŮMYSLU	52
5 SHRUTÍ VÝHOD A NEVÝHOD	53
ZÁVĚR	55
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	56

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá vysokootáčkovými elektrickými stroji využívající pro svoji funkci permanentní magnety. Důvodem vzniku zadání a následné rešerše těchto strojů bylo to, že v posledních desetiletích je o tyto stroje velký zájem a strhávají na sebe značnou pozornost jak v akademickém světě, tak v komerčním průmyslu. Uvádí se, že tyto stroje svými výhodami a vlastnostmi z jisté míry vytlačují doposud používané asynchronní stroje. Následné důvody, proč se tak děje, budou popsány v následujících kapitolách.

Práce je rozdělena do pěti kapitol. V první je stručně nastíněno z jakých elektrických točivých strojů tyto vysokootáčkové stroje s permanentními magnety vycházejí, spolu s charakteristikou jednotlivých materiálů, ze kterých se vyrábějí permanentní magnety do těchto strojů. V druhé kapitole jsou popsány hlavní konstrukční řešení a provedení těchto vysokootáčkových strojů, dále ložiska využívající se v nich a ukázka řídicího systému. Ve třetí kapitole je nastíněna aplikace těchto vysokootáčkových strojů v různých odvětvích průmyslu a jejich konkrétní konstrukční provedení. Ve čtvrté kapitole je zhodnoceno nasazení v průmyslu, a v poslední, tj. páté kapitole je hlavní shrnutí výhod a nevýhod těchto strojů, ke kterým jsem dospěl během vypracování mé práce.

Seznam symbolů a zkratek

A	.....	měrné proudové zatížení
AC/DC	.....	měnič - usměrňovač
ACL-GTA	.....	systém plynové turbíny s alternátorem s nízkou spotřebou energie
Alnico	.....	slitina hliníku niklu a kobaltu pro permanentní magnety
B	.....	magnetická indukce
B_{δ}	.....	magnetická indukce ve vzduchové mezeře
$(BH)_{\max}$	.....	maximální energetický součin
BLDC	.....	bezkartáčové stejnosměrné motory
B_r	.....	remanentní magnetická indukce
d	.....	průměr kotvy
DC/AC	.....	měnič - střídač
DC/DC	.....	stejnosměrný měnič
DG	.....	diesel generátor
DN	.....	dynamické číslo ložiska
EC	.....	elektronicky komutované
EMF	.....	zpětné elektromotorické síly
EU	.....	elektronická jednotka
f	.....	frekvence
GSC	.....	grafit-kompozitní materiál
H_c	.....	koercitivní síla
HSA	.....	vysokootáčkový alternátor
I	.....	střední hodnota proudu
I_b	.....	efektivní hodnota budícího proudu
k_1	.....	koeficient statoru
k_o	.....	ztrátový koeficient na kilogram
l_{Fe}	.....	délka kotvy
l_M	.....	délka magnetu
M_e	.....	elektromagnetický moment
MMF	.....	magnetické hybné síly
$MO \cdot 6(F_2O_3)$	.....	chemický vzorec feritových materiálů pro permanentní magnety
NdFeB	.....	neodymové permanentní magnety
n	.....	otáčky

n_s	synchronní otáčivá rychlost
p	počet pólových dvojic
ΔP_b	budící ztráty
ΔP_{Cu}	ztrátový výkon na činných odporech vinutí
P_{Fe}	ztráty ve statorovém jádře
P_i	vnitřní výkon
PM	permanentní magnet
R	činný odpor statorového vinutí
R_b	činný odpor budícího vinutí
S1	oblast trvalých zatížení
Sm-Co.....	samarium-kobaltové permanentní magnety
S_M	plocha permanentního magnetu
TGU 100B	mikroturbínová jednotka
THD	celkové harmonické zkreslení
U_b	efektivní hodnota budícího napětí
U_{ib}	indukované napětí od buzení
U_s	efektivní hodnota fázového statorového napětí
X_d	reaktance podélné větve
X_q	reaktance příčné větve
\varnothing	průměr
ϑ	zátěžný úhel
μ_o	permeabilita vakua
μ_{rm}	relativní permeabilita magnetu
ω_s	synchronní úhlová rychlost

1 ÚVOD DO TEORIE STROJŮ S PM

V samotném začátku bude charakterizováno několik vlastností z teorie strojů využívajících pro svoji činnost PM, které se staly nedílnou součástí pro vývoj vysokootáčkových strojů s PM.

1.1 Stroje s PM

Jak je známo z obecné teorie elektrických strojů, stroje synchronní, stejnosměrné a např. i krokové motory vyžadují pro svoji práci magnetické pole, které není závislé na proudu procházejícího kotvou. Klasická provedení výše zmíněných strojů využívají pro vytvoření magnetického pole budící vinutí, protékané budícím proudem. A právě průchodem budícího proudu přes toto vinutí vznikají Joulovy ztráty, které mohou mít určité limitující vlivy. Pro podrobnější vysvětlení si uvedeme následující fakta. [1]

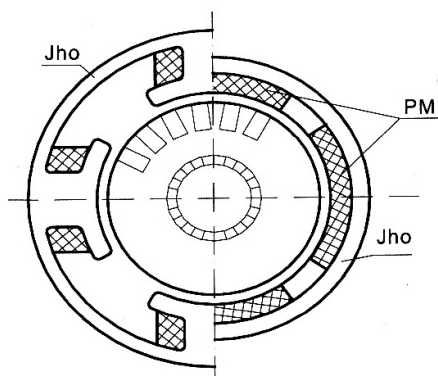
Při elektromagnetickém buzení je spotřebována určitá energie, která vykazuje ztráty charakterizované podle vztahu:

$$\Delta P_b = U_b \cdot I_b = R_b \cdot I_b^2 \quad (1.1)$$

Z toho lze odvodit, že podíl budících ztrát ΔP_b tj. $\Delta P_b/P$ vzrůstá s předpokladem klesajícího výkonu, tedy směrem k malému rozměru daného stroje. Tedy se zmenšováním průměru stroje klesá prostor k dispozici pro budící vinutí, a to kvadraticky. Důležité je také zahrnout vzduchovou mezeru, jejíž šířku nemůžeme libovolně zmenšovat, a pro kterou platí určité technologické minimum, přibližně 0,15 mm nejčastěji 0,3 mm.[1]

A v tuto chvíli přichází na řadu využití PM, které mají za úkol nahradit ono budící vinutí. Využití PM značně vzrostlo až s vývojem materiálů na bázi vzácných zemin, kde tuto problematiku probereme v kapitole PM a jejich vlastnosti. Dále také při volbě PM místo budícího vinutí ztrácíme možnost řídit budící pole, a to se může jevit jako značná nevýhoda, důležité je ale zmínit to, že pokrok ve výkonové elektronice nadále roste a prvky z této oblasti právě u synchronních strojů s PM (kterým se budeme věnovat nejvíce) umožňují demagnetizaci tzn. řešení, jak řídit budící pole. Nutno zde také podotknout, že

použití PM v točivých strojích umožnilo netradiční konstrukce, kterým se budeme věnovat v dalších kapitolách. [1]



1.1 Porovnání rozměrů stejnosměrného stroje s budícím vinutím a PM.
Obrázek převzat v nezměněné formě z [1]

1.1.1 Permanentní magnety a jejich vlastnosti

Jak již víme z předešlé kapitoly, PM nahrazují budící vinutí proto, aby se snížily ztráty, které v tomto vinutí vznikají a zvýšila se tím účinnost stroje.

PM zajímaly člověka už v dávných dobách, přibližně 400 let př. n. l., ale až v posledních desetiletích se jejich výrobní technologie vyvinula takovým způsobem, že jich jsme schopni vyrábět v takových tvarech, velikostech a hlavně kvalitě, které nám dovolují je aplikovat až v těch nejsložitějších průmyslových aplikacích a v jejich širokých mezích. [2]

Pro správné posouzení a výběr vhodného materiálu PM v dané aplikaci nám slouží hodnoty B_r , H_c a $(BH)_{max}$. [2]

B_r je remanentní indukce uváděná v jednotkách Tesla (T), která charakterizuje zbytkovou magnetizaci, kterou si daný feromagnetický materiál uchová po předešlém působení vnějšího magnetického pole.

H_c je koercitivní síla v (A/m). Vyjadřuje určitou odolnost daného feromagnetického

materiálu vůči demagnetizačním polím, které se v jeho okolí mohou vyskytnout (důležitý parametr zejména u elektrických točivých strojů, kde právě kotva stroje může vytvářet tyto demagnetizační pole). [2]

A asi nejdůležitějším z těchto tří hodnot je maximální energetický součin $(BH)_{\max}$, který je kvalitativním ukazatelem a hodnotí užitek vlastnosti PM. Součin (BH) ukazuje vnější energii vytvořenou jednotkovým objemem daného materiálu PM nebo také míru uložené energie. Stejně jako H_c charakterizuje, jak je daný materiál PM odolný vůči demagnetizačním vlivům vnějšího pole. [2]

1.1.2 PM na bázi slitin

Tento typ materiálu PM patří mezi nejstarší. Ze začátku se skládal z jednoduché slitiny železa a 1% uhlíku, u kterých byl uváděn energetický součin $(BH)_{\max}$ okolo $1,6 \text{ kJ/m}^3$ s koercitivní silou $H_c = 0,4 \text{ kA/m}$. Následovaly další slitiny, např. ocel s 35% kobaltu spolu s menším množstvím chromu a wolframu, které měly $(BH)_{\max}$ přibližně $7,5 \text{ kJ/m}^3$ a $H_c = 20 \text{ kA/m}$. Avšak v roce 1931 vynalezl I. Mishima nový druh slitiny, která obsahovala železo, nikl a hliník, jejíž charakteristické vlastnosti byly $H_c = 40 \text{ kA/m}$ a energetický součin 10 kJ/m^3 , což nebylo mnoho, ale později se ukázalo, že přidáním 12% kobaltu a následným ochlazováním odlitků v magnetickém poli se dosáhne většího energetického součinu. [2]

Tato slitina se označuje jako důležitý a první člen ze skupiny slitin Alnico (Al-Ni-Co). Bohužel tento typ slitiny se příliš neosvědčil. Protože slitiny Alnico mají více nevýhod než výhod oproti jiným materiálům, jmenovitě: špatné mech. vlastnosti, malá koercitivní síla ($\div 50 \text{ kA/m}$), malý energetický součin $40\text{-}80 \text{ kJ/m}^3$ a vyžadují stabilizaci po magnetizaci. Jejich jedinou výhodou je vysoká remanentní indukce $\div 1,2 \text{ T}$. [2]

1.1.3 Feritové PM

Feritové nebo-li keramické PM se vyrábějí za pomoci práškové metalurgie. Jejich základní chemický vzorec je $MO \cdot 6(Fe_2O_3)$, kde M může být stroncium, barium nebo olovo. Vyznačují se nižší remanentní indukci a energetickým součinem oproti Alnico materiálům, ale koercitivní síla je mnohem vyšší, tím pádem mohou odolávat omnoho větším demagnetizačním polím navzdory tomu, aby se výrazně snížila remanence. Tyto tvrdé ferity mají nejnižší cenu a velmi často je můžeme vidět v mnoho průmyslových aplikacích, kde jde hlavně o přeměnu z elektrické na mechanickou energii. [2]

Důležitým faktorem je výběr chemického prvku z výše zmíněných tří, kde stroncium tzn. stronciový ferit se využívá nejvíce v elektrických strojích, kde jsou magnety počas provozu stroje vystavené demagnetizačním reakcím kotvy (stroncium vykazuje nejvyšší hodnotu H_c , což je nejdůležitější parametr tohoto PM materiálu). Obecně mají feritové PM tyto charakteristické vlastnosti: $B_r \div 0,38 \text{ T}$, $H_c \div 150-250 \text{ kA/m}$ a nemusejí být stabilizovány (vratná přímka se shoduje s demagnetizační). [2]

Z obecné teorie feromagnetismu víme, že délka magnetů l_M souvisí s H_c tak, že jejich součin vytváří potřebné budící magnetické napětí a B_r souvisí s plochou magnetu S_M tzn., že $B_r \cdot S_M$ má za úkol vytvoření mag. toku v magnetickém obvodu. Z toho plyne, že Alnico magnety, které mají velkou B_r budou magnety realizované o malé ploše, ale dlouhé póly (malá H_c) a feritové přesně naopak. [2]

To znamená, že záleží na dané aplikaci a použití v určitém stroji v závislosti na šířce a délce.

1.1.4 PM ze vzácných zemin (Samarium - kobalt ; Neodym - železo - bor)

Samarium - kobalt - neboli zkratkou Sm-Co. Jedná se o materiál, který byl vyvinut okolo roku 1960 a patří mezi první PM z nového druhu materiálů - vzácných zemin. Základní složení tvoří sloučeniny železa, niklu a kobaltu, ke kterým se přidá jeden nebo více prvků vzácných zemin (nejpoužívanější je právě sloučenina Sm-Co). Charakterizují se tím, že spojují jisté výhody vysoké remanence Alnico materiálů (magnetů) s ještě vyšší koercitivní silou, než jakou mají feritové PM tj.: $B_r = 0,965 \text{ T}$, $H_c = 720 \text{ kA/m}$, $(BH)_{\max} = 160 \text{ kJ/m}^3$. Můžeme si všimnout, že energetický součin je přibližně čtyřikrát

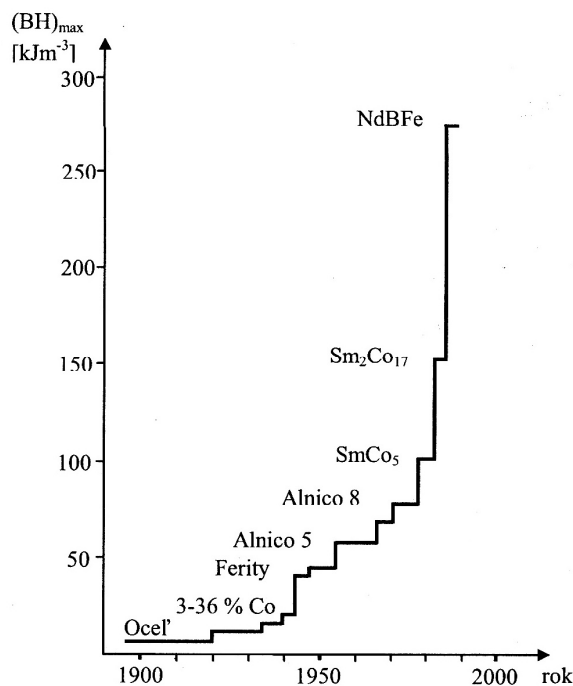
větší oproti Alnico materiálům navíc i tento materiál jako předešlý ferit má vratnou přímku téměř shodnou s demagnetizační charakteristikou, z čehož vyplývá, že ani tento materiál nevyžaduje stabilizaci.[2]

Jak již název definuje, základní sloučeninu doplňuje právě vzácná zemina, což se také projevuje na ceně těchto PM. V dnešní době je uváděno, že se cena těchto magnetů relativně zvětšuje díky zvyšující se poptávce (v důsledku co největšího zisku) a dokonce je i problém s expanzí na trh. A právě cena "zařadila" tyto PM do mag. aplikací, ve kterých se požadují malé rozměry magnetů s těmi nejlepšími vlastnostmi. [2]

Neodym - železo - bor - materiál označován zkratkou NdFeB přibyl k PM okolo roku 1983, složený z prvků: neodym (Nd), železo (Fe), bor (B). Tyto PM se vyrábějí též jako feritové tzn. práškovou metalurgií. Z počátku byla jejich největší nevýhoda závislost na provozní teplotě, ale postupem času se vyrovnaly feritovým magnetům. Nicméně pro aplikace, kde se teplota pohybuje v rozmezích 200 - 250 °C, je vhodnější použít Alnico nebo SmCo magnety.[2]

Energetický součin je přibližně 250 kJ/m³, což je nejvíce ze všech dostupných a vyráběných PM. Nutno ale dodat, že tato hodnota byla zjištěna při pokojové teplotě. Remanence a koercitivní síla se pohybuje ÷ 1,2 T a 800 kA/m. Právě H_c nám umožňuje výrazně zmenšit délku a tudíž velikost magnetu např. v porovnání s feritovými PM (kde H_c je přibližně třikrát menší), čehož můžeme značně využít v elektrických točivých strojích. Další výhodou těchto magnetů je, že jsou houževnatější a tužší a tím pádem více odolné proti velkému mech. zatížení. Cena těchto magnetů je nižší oproti Sm-Co. Přibližně v roce 1995 se pohybovala cena za kilogram ÷ 10 000 Kč, v roce 2005 klesla na polovinu ÷ 5000 Kč/kg. [2] [1]

Na závěr této kapitoly si na obrázku 1.2 ukážeme vývoj PM v závislosti na energetickém součinu (BH)_{max}.

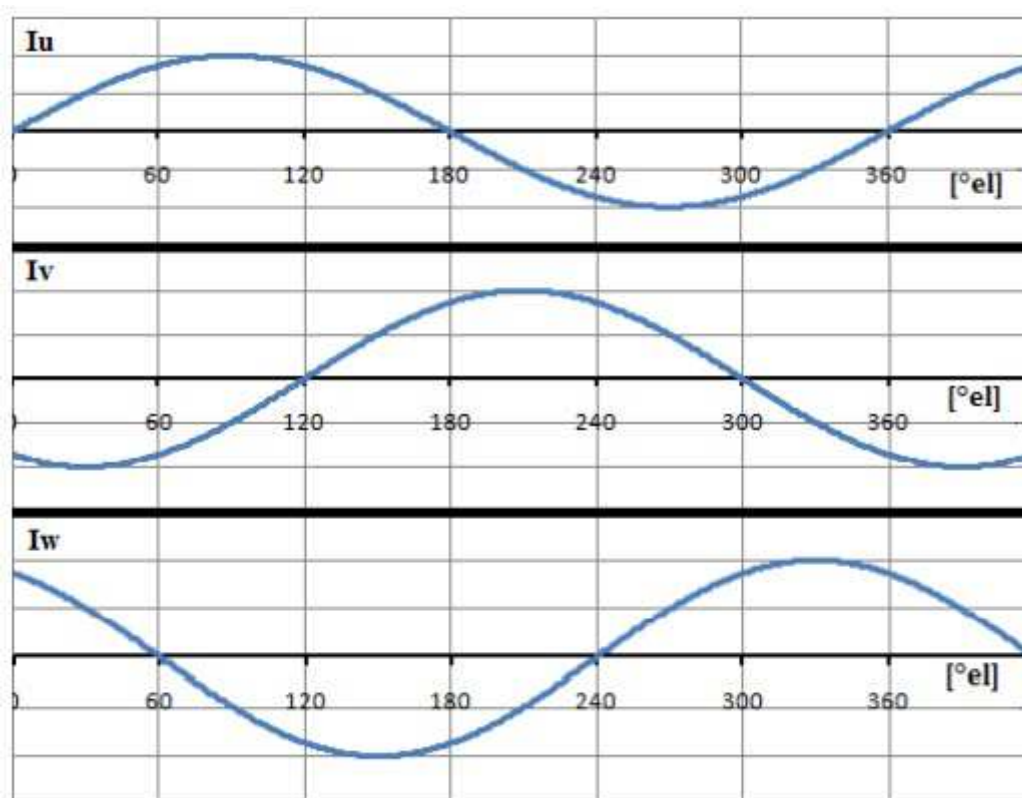


Obr. 1.2 Vývoj PM. Obrázek převzat v nezměněné formě z [2]

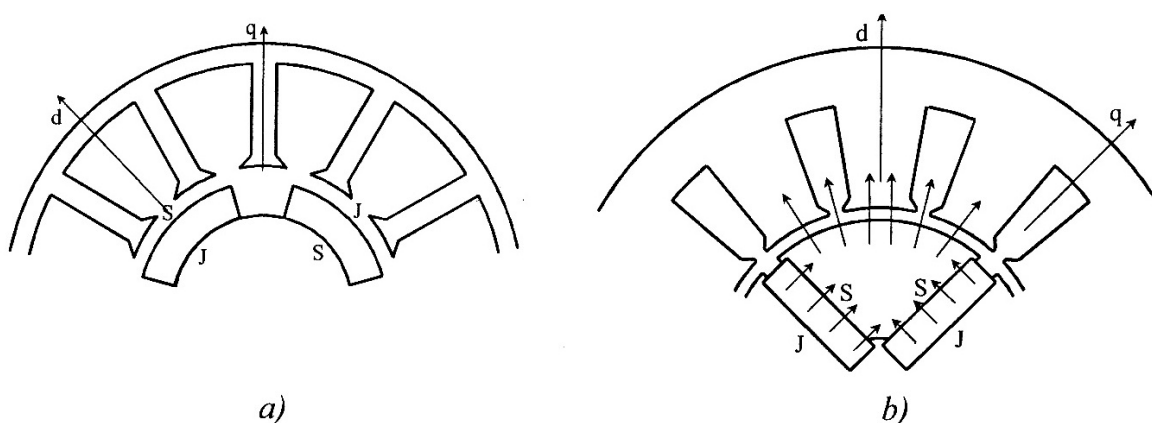
1.2 Synchronní stroje s PM

V této kapitole si charakterizujeme základní vlastnosti a prvky synchronních strojů s PM. V posledních letech jsou tyto stroje nadměrně zmiňovány. Jedním z důvodů je jejich okruh využití, který začíná v pohonech pro nízké výkony (\div stovky wattů) až po střední výkony (\div desítky kilowattů).

Stator těchto strojů tvoří třífázové vinutí klasického střídavého stroje (nejčastěji zapojeno do hvězdy) vzájemně posunuto o 120° , které je napájeno třífázovým sinusovým proudem (obr. 1.3), rotor je tvořen PM, které vytvářejí rotorové magnetické budící pole. Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, budící vinutí je nahrazeno právě PM a tudíž zde nevznikají žádné ztráty při buzení stroje, čímž se zlepšuje jeho účinnost. Dále tyto stroje využívají dvou rotorových uspořádání PM, a to povrchové neboli obvodové a vnitřní neboli skryté, kde tyto varianty uspořádání můžeme vidět na obr. 1.4. [2]



Obr. 1.3 Průběhy jednotlivých fází proudu ve statorovém vinutí synchronního stroje s PM
Obrázek převzat v nezměněné formě z [5]



Obr. 1.4 Rotorové uspořádání PM synchronního stroje: a) povrchové b) vnitřní.
Obrázek převzat v nezměněné formě z [2]

Typ povrchového uspořádání PM na rotoru (hladký rotor) považujeme za typ s nevyjádřenými póly, vychází se ze závislosti permeability vzduchové mezery μ_o a PM μ_{rm} , kde se v tomto případě celá vzduchová mezera včetně PM považuje za homogenní prostor s celkovou permeabilitou μ_o , a proto tento typ stroje považujeme za typ s hladkým rotorem,

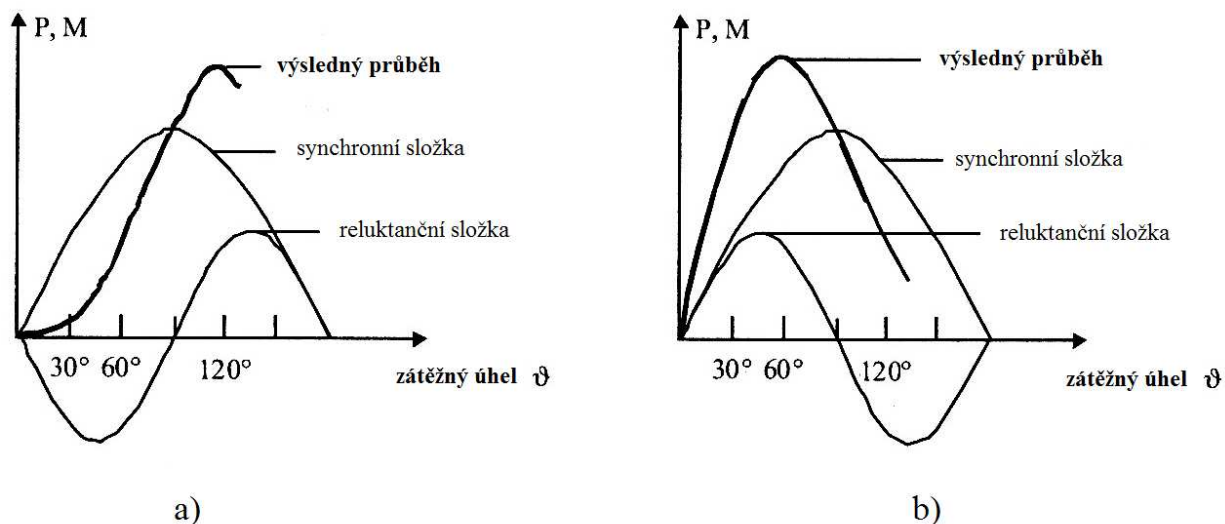
tedy nevyjádřenými póly. Druhé uspořádání rotoru tj. vnitřní neboli skryté PM považujeme za typ s vyjádřenými póly.[2]

Vztah elektromagnetického momentu M_e motoru je shodný s teorií synchronního stroje s vyjádřenými póly a budícím vinutím:

$$M_e = 3 \cdot \frac{1}{\omega_s} \cdot \left(\frac{U_s \cdot U_{ib}}{X_d} \sin \vartheta + U_s^2 \cdot \frac{X_d - X_q}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \sin 2 \cdot \vartheta \right) \quad (1.2)$$

kde ω_s je synchronní rychlost, U_s svorkové napětí, U_{ib} indukované napětí od buzení, X_d reaktance podélné větve, X_q reaktance příčné větve a ϑ zátěžný úhel.

Průběh momentu (či výkonu) v závislosti na zátěžovém úhlu obou typů uspořádání PM na rotoru lze vidět na obr. 1.5.



Obr. 1.5 Průběh momentu (výkonu) v závislosti na zátěžovém úhlu ϑ .
 a) vnitřní uspořádání PM b) povrchové uspořádání PM
 Obrázek převzat z [2]

Jak již víme ze začátku této kapitoly tyto motory s PM disponují větší účinností než motory s budícím vinutím, nicméně záleží na druhu použitých PM např. při volbě klasických feritů dostáváme o mnoho menší magnetickou indukci oproti motorům s budícím vinutím. Následná kompenzace vychází ze vztahu pro vnitřní výkon:

$$P_i = k_1 \cdot B_\delta \cdot A \cdot d^2 \cdot l_{Fe} \cdot n \quad (1.3)$$

kde B_δ je indukce ve vzduchové mezeře, A měrné proudové zatížení povrchu kotvy, d průměr kotvy, l_{Fe} délka kotvy, n otáčky. Lze z tohoto vztahu tedy odvodit, že snížení indukce B_δ (pro stejný výkon) se dá kompenzovat zvýšením objemu kotvy tj. úměrně $d^2 \cdot l_{Fe}$ často realizované prodloužením kotvy, s čímž souvisí samozřejmě hmotnost a objem pozn.: feritové magnety by vyžadovaly o polovinu delší kotvu oproti magnetům ze vzácných zemin. Tím pádem se musí určit jisté priority v závislosti na použití motoru v dané aplikaci: cena vs. hmotnost vs. objem. Tyto typy synchronních motorů se vyrábějí od výkonů několik set wattů (zejména diskové synchronní motory) až po desítky kilowattů. [2]

2 Vysokootáčkové stroje s PM

2.1 Definování pojmu vysokootáčkový stroj

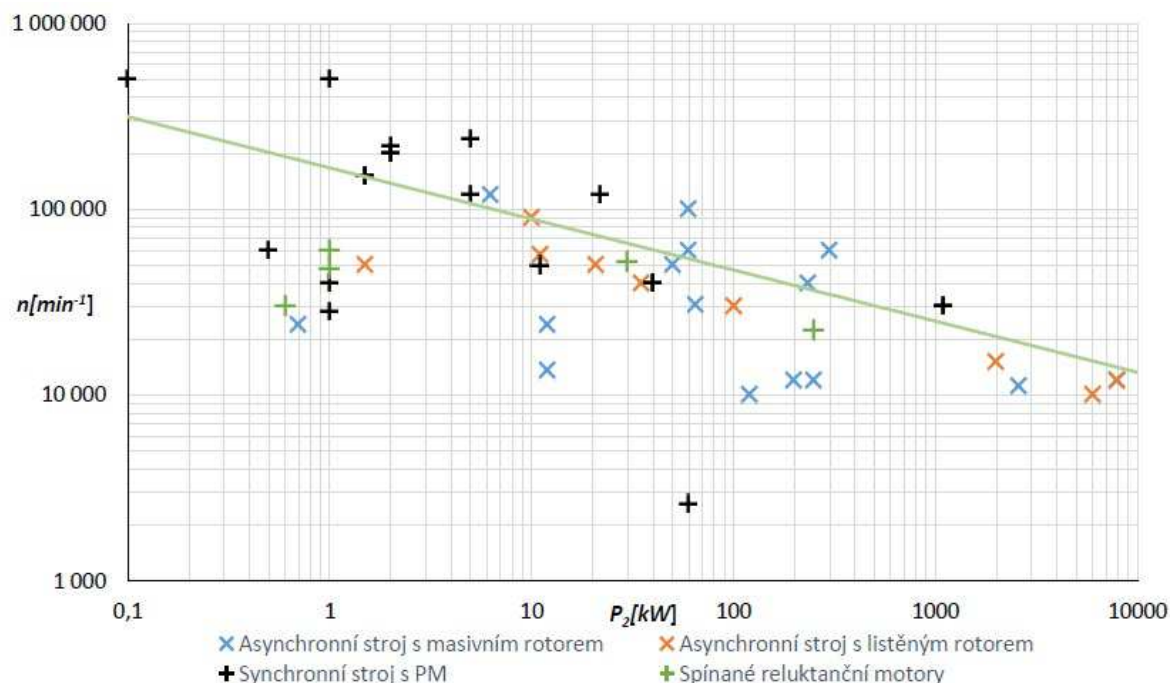
Definice vysokootáčkového stroje není tak úplně jednoduchá a je otázkou zda vůbec nějaká konkrétní existuje. V dostupných zdrojích a akademických pracích se uvádí, že charakterizovat vysokootáčkový stroj podle obvodové rychlosti není vhodné, protože toto kritérium zahrnuje stupeň mech. využití stroje a spadaly by do něj i stroje jako např. velké generátory pracující na 50/60 Hz, a ty jen stěží můžeme považovat za vysokootáčkové. Dále je uváděno, že pouze stroje napájené měničem nebo s regulovatelnou rychlostí lze nazvat vysokootáčkové, což je v dnešní době téměř každý elektrický stroj a tudíž toto kritérium není také zcela vhodné. [3][4]

Proto si v této práci vymežíme vysokootáčkový stroj podle synchronní otáčivé rychlosti n_s , kde budeme považovat za vysokootáčkový takový, který bude mít n_s 6000 ot/min a více.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

Kde f je kmitočet napájecího systému a p počet pólových dvojic.

Na obrázku 2.1 můžeme vidět diagram ze shromážděných údajů o komerčně dostupných vysokootáčkových strojích spolu se stroji, které byly vyvinuty v akademickém světě.



Obr 2.1 Diagram existujících vysokootáčkových strojů
Obrázek v nezměněné formě převzat z [4]

Diagram je v závislosti na jmenovitém výkonu P_2 v kilowattech a jmenovitých otáčkách n . Můžeme si všimnout jisté převahy vysokootáčkových synchronních strojů s PM v oblasti 100 000 až 1 000 000 ot/min oproti indukčním (asynchronním). Podle dostupných informací pouze jeden indukční stroj s masivním rotorem přesáhl hranici 100 000 otáček za minutu. A to ukazuje jakou dominanci mají ve vysokootáčkovém odvětví synchronní stroje s PM. Nejvyšších rychlostí dosahují synchronní stroje s PM s bezdrážkově konstruovaným státorem a s velmi velkou vzduchovou mezerou. Dále je uváděno, že právě stroje s bezdrážkově konstruovaným státorem s PM ukazují trend

nejvyššího nárůstu v oblasti vysokých rychlostí, kde se tato teorie potvrdila jak na trhu tak i v akademickém světě. [3]

2.2 Konstrukce

Stator - volba statorového jádra - při konstrukci statoru vysokootáčkového stroje je jedním z hlavních problémů vysoká frekvence statorového proudu a magnetického toku. Vysoká změna frekvence statorového toku způsobuje značné ztráty ve statorovém jádře.[7] Tyto ztráty na kilogram lze vyjádřit tímto vztahem:

$$P_{Fe} = k_o \cdot \left(\frac{B}{B_o} \right)^2 \cdot \left(\frac{f}{f_o} \right)^{1,3} \quad (2.2)$$

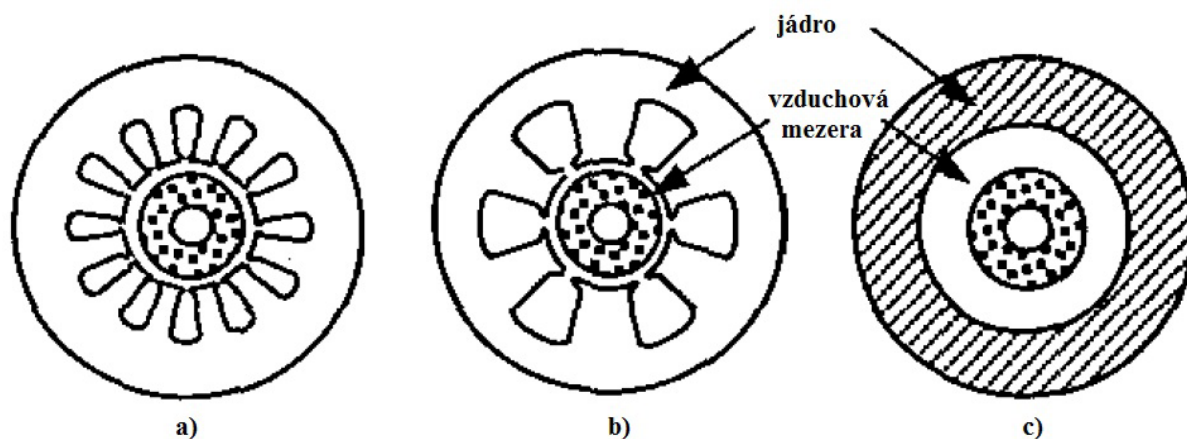
Kde B a f je indukce a frekvence magnetického toku v jádře statoru, k_o je ztrátový koeficient na kilogram statorového materiálu jádra zkušného za podmínek frekvence f_o a indukce B_o. V [7] je uváděno, že poměr ztrát na kilogram stroje o 9500 ot/min proti stroji s 500 ot/min je $\cong 49$ tzn. 49 krát větší. A proto jediný způsob řešení tohoto problému vznikajícího u vysokootáčkových strojů je správný výběr materiálu (jádra statoru) s nízkými ztrátami. Konkrétně se jedná o speciální měkké magnetické slitiny, amorfní ocel a feritová jádra vyráběná práškovou metalurgií. [7]

Struktura statorového jádra -

Obvykle se u vysokootáčkových strojů používají 3 různé typy statorového jádra:

- a) vícedrážkový (multi-slot)
- b) s minimálním počtem drážek (minimal-slot)
- c) bezdrážkový (slotless)

Struktura uspořádání těchto typů je zřejmá z obrázku 2.2.



Obr. 2.2 Jednotlivé uspořádání statorového jádra a) vícedrážkový b) s min. počtem drážek c) bezdrážkový

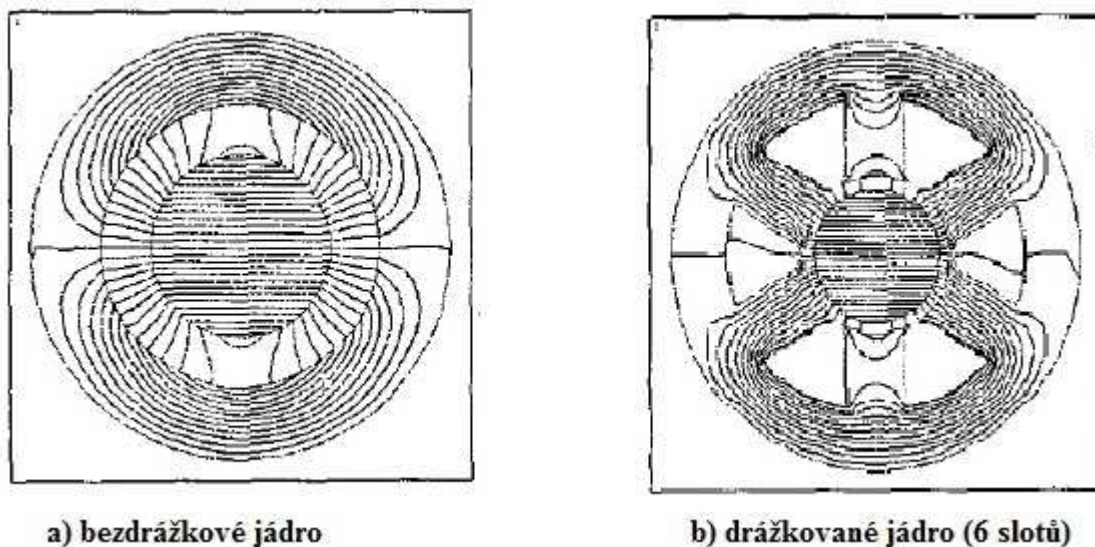
Obrázek převzat a přeložen z [7]

a) Vícedrážkové provedení (multi-slot) - má 12 a více slotů (drážek). Výhodou tohoto provedení jádra je, že statorové vinutí je rozloženo pomocí cívek se zkráceným krokem, což je užitečné pro odstranění některých harmonických složek MMF - magnetické hybné síly. Nevýhodou tohoto uspořádání je, že při zvyšování počtu drážek vznikají větší rotorové ztráty v důsledku větší pulzační frekvence magnetického pole na povrchu rotoru, kterou způsobuje otvor drážky. [7]

b) Provedení s minimálním počtem drážek (minimal-slot) - pro 3f vinutí klasického synchronního stroje s PM je dáno 6 drážek (slotů). Toto provedení je efektivnější z hlediska způsobu navíjení cívek oproti vícedrážkovému (multi-slotu). Další výhodou je, že pulsační frekvence magnetického pole na povrchu rotoru klesá se snižováním počtu drážek tzn., že toto provedení má menší rotorové ztráty. Nevýhodou šestidrážkového provedení je, že nemůže tak účelně odstranit harmonické složky MMF. [7]

c) Bezdrážkové provedení (slotless) - je realizováno ve tvaru prstencovitého jádra s hladkými povrchy. Velká vzduchová mezera mezi rotorem a jádrem statoru slouží k uložení vinutí statoru. Rozložení magnetického pole ve vzduchové mezeře je v tomto provedení více rovnoměrné, jak je vidět z obrázku 2.3 oproti drážkovaným jádrům výše zmíněným. Ovšem vzduchová mezera oslabuje sílu magnetického pole, což i ukázala analýza magnetického pole, kde průměrná magnetická indukce ve vzduch mezeře pro šesti

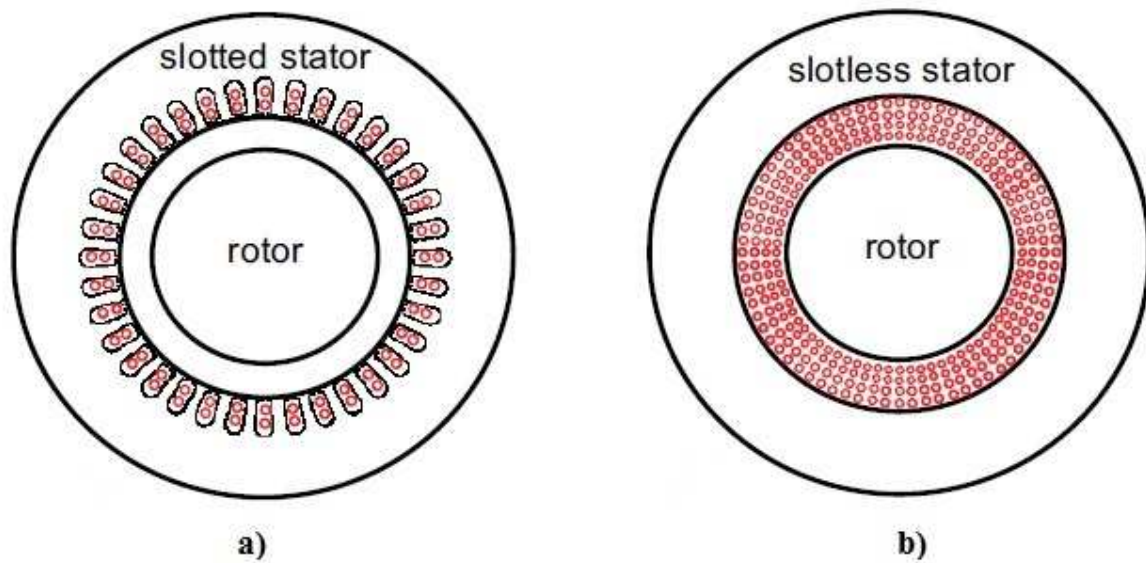
drážkový stator byla 0,8 T a pro bezdrážkový 0,6 T za použití stejného rotoru s PM. Kompenzování této ztráty magnetické indukce se realizuje tak, že se zvětšuje šířka bezdrážkového jádra statoru (snaha zvýšit mag. tok v jádře pomocí plochy přes kterou se uzavírá). Ovšem to se projevuje na velikosti a tudíž toto provedení bývá větší (širší) než provedení drážkované. [7]



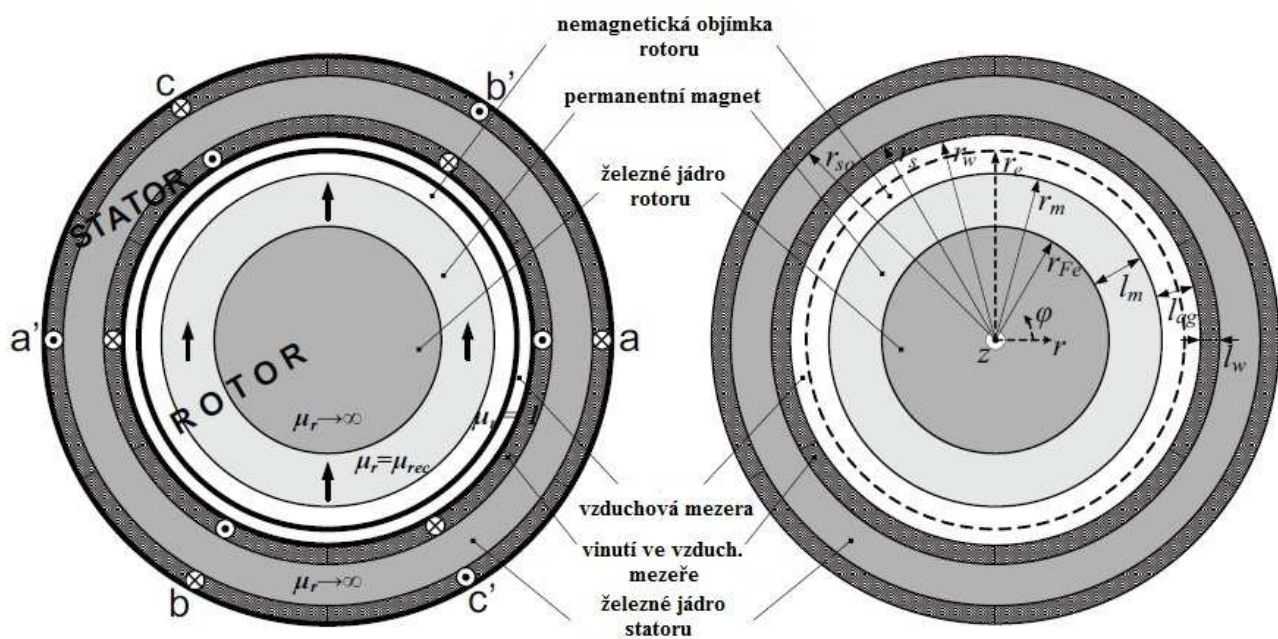
Obr. 2.3 Rozložení magnetické pole a) bezdrážkového jádra statoru b) drážkovaného jádra statoru
Obrázek převzat z [7]

Výhodou tohoto provedení je, že se potlačuje zvlnění momentu od drážkové harmonické složky, méně hrozí odmagnetování PM v důsledku velké vzduchové mezery a má menší rotorové ztráty. [7]

Na závěr je třeba říci, že v dosavadních aplikacích se více používá provedení drážkovaného jádra statoru.



Obr 2.4 Příčný řez stroje s a) drážkovaným statorem a b) bezdrážkovým statorem
Obrázek převzat v nezměněné formě z [3]



Obr. 2.5 Podrobnější příčný řez stroje s bezdrážkovým statorem s PM na rotoru spolu s geometrickými vlastnostmi
Obrázek převzat a přeložen z [3]

Rotor - v analýze strojů s velmi vysokými otáčkami představuje konstrukční řešení rotoru relativně velmi náročný úkol. Při vysokých rychlostech otáčení působí značné odstředivé síly, které způsobují namáhání materiálu, který je použit pro konstrukci rotoru. Další vlastnost, kterou nelze při konstrukci rotoru zanedbat, je působení tepla, které vzniká v oblasti rotoru v důsledku indukce vířivých proudů. Nesmíme také zapomenout na tření, které může produkovat další tepelné namáhání mezi částmi rotoru, a proto musí být vysokorychlostní rotory schopny odolat těmto nepříznivým vlivům, namáháním a být schopny zajistit přenos elektromagnetického točivého momentu v celé své délce. [3]

V těchto vysokootáčkových strojích představuje PM nejvíce mechanicky zranitelnou část, přičemž jejich pevnost v tlaku je v celku dobrá, ale pevnost v ohybu a tahu je poměrně nízká (záleží na konkrétním druhu PM). Právě v důsledku působících sil při velmi vysokých otáčkách, jsou PM uloženy do nemagnetického pouzdra či objímce, která omezuje působení výše zmíněných sil na magnet a zaručuje tak správnou funkci celého rotoru tj. přenos kroutícího momentu z PM na hřídel při vysokých otáčkách.

Přidržovací objímka je nejčastěji lisována na magnet za použití speciální techniky v důsledku mechanických vlastností PM tzn. aby nedocházelo k poškození PM. Zpravidla je rotor tvořen celistvým válcem z PM nebo se skládá z oddělených bloků, které jsou nalepeny na ocelovou hřídel. Takováto konstrukce je preferována pro aplikace s opravdu velmi vysokými požadavky na rychlost otáčení, protože je zde velký sklon k značnému mechanickému namáhání. [3]



Obr. 2.4 Rotor vysokootáčkového synchronního generátoru s PM od firmy ABB
Obrázek převzat v nezměněné formě z [6]

2.3 Rychlostní limity

Omezení rychlosti mohou mít za následek různé fyzikální parametry jako např. mechanické namáhání a teplota resp. nadměrné teplo vznikající uvnitř stroje (pokud je špatně realizováno chlazení), které má špatný vliv na funkci PM. Tyto fyzikální parametry jsou také kromě rychlosti ovlivněny dalšími vlivy jako je velikost stroje či jeho výkon v souvislosti s elektrickým i magnetickým zatížením stroje. [3]

Pouze malá část dokumentů či akademických prací se zabývala limity vysokootáčkových strojů. V dostupných pracích se hodnotily zejména tepelné limity spolu s demagnetizačními vlivy u různých typů strojů, které spadaly pod vysokootáčkové s PM. Uvádí se, že *v extrémně vysokootáčkových strojích budou mechanické faktory, jako je mechanické namáhání a vibrace, omezovat bezporuchový provoz stroje více než vlivy způsobené elektromagnetickým oteplováním uvnitř stroje.* [3]

Obecně však pro všechny el. točivé stroje platí, že limitující vlastností je určitá teplotní mez. Tato mez ovlivňuje výkon stroje tj. po jejím překročení nastávají výkonové ztráty, které souvisejí s magnetickými vlastnostmi, tudíž i proudem a následně i počtem otáček stroje. [3]

Z toho tedy vyplývá, že je vždy vhodné při návrhu vysokootáčkového stroje počítat jak s tepelnými vlivy (limity), tak s výše uvedenými mechanickými faktory, které mají vliv na rychlost otáčení.

2.4 Ložiska pro vysokootáčkové stroje

Vysoké požadavky, které jsou nastaveny při provozování vysokootáčkových strojů, se také odrážejí na použitých ložiskách. Nároky na velkou či nadále se zvětšující rychlost otáčení a často i přesnost polohování nemůžou být dosaženy pomocí standardních čepů nebo kuličkových ložisek. A proto tyto požadavky na speciální konstrukce ložisek způsobily jistý pokrok a zlepšení v ložiskové strojní technice. Určitá vylepšení se hledala ve dvou rámcích, první spočíval ve zdokonalení dosavadních standardních ložisek tzn. mechanických a druhý rámec technologií se zabýval vhodnými alternativami v použití bezkontaktních ložisek. [3]

Rychlostní schopnost ložisek je vyjádřena pomocí čísla DN (dynamic number), kde toto číslo vyjadřuje součin vnitřního průměru ložiska v milimetrech a rychlost otáčení rotoru v ot/min. Pro představu standardní kuličková ložiska mají číslo (řadu) DN níže jak 500 000, v porovnání s pokročilými aplikacemi jako jsou např. turbíny pro letecký průmysl nebo vysokootáčková vřetena, která dosahují řady DN několik milionů, což naznačuje, jak velkému odstředivému zatěžování a vysokým teplotám jsou tato ložiska vystavena a tyto vlastnosti mají bezpochyby dopad na jejich zatížitelnost a životnost. [3]

Je důležité ještě zmínit, že typ ložiska a jeho mechanická pevnost mají velký vliv na přesnost otáčení (nevychylování se z osy), což je velmi důležité u strojů s hřídelí. Někdy ovšem může být přesnost otáčení zlepšena vyvážením rotoru, kde se využívá samostředících vysokorychlostních rotorů spolu s ložisky s malou tuhostí. Z toho plyne, že nejdůležitější role při správném výběru ložisek pro vysokootáčkové stroje jsou schopnosti vydržet požadovanou rychlost otáčení, přesnost a samozřejmě životnost, popř. cena.[3]

Pro vysokootáčkové stroje se uvádějí tři typy využívaných ložisek:

- *mechanická*
- *vzduchová*
- *aktivní magnetická*

2.4.1 Mechanická ložiska (kuličková)

Jsou stále převládajícím typem mezi komerčními vysokootáčkovými stroji díky své robustnosti a nízkým nákladům na výrobu. Jejich použití můžeme vidět u strojů, které dosahují až 100 000 ot/min. Hybridní kuličková ložiska s křemík-nitridovými kuličkami představují nejperspektivnější typ mechanických ložisek, a to z několika hledisek: *spolehlivost, mechanická pevnost, životnost a rychlost otáčení*. Nicméně mají zjevné omezení při extrémně vysokých rychlostech, zahrnující: mech. opotřebení, tepelné omezení, nutnost mazání a proto jsou alternativy hledány u bezkontaktních typů ložisek (vzduchové, magnetické). [3]

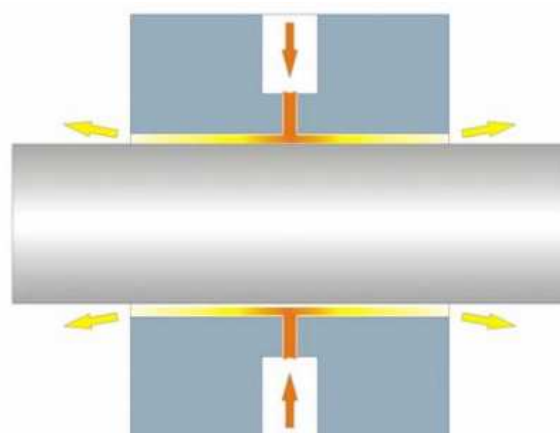


Obr. 2.5 Hybridní keramické kuličkové ložisko SKF
Obrázek převzat v nezměněné formě z [3]

2.4.2 Vzduchová ložiska

Jsou značně využívána v aplikacích a technologiích s požadavkem nulového tření v oblasti rotoru. Nabízejí velkou mechanickou pevnost a přesnost rotace, což je hojně využito u velmi precizních strojů (vysokootáčková vřetena), na které jsou kladeny velké nároky. Jediný zásadní problém těchto vzduchových ložisek je vyskytující se nestabilita, která omezuje rychlost otáčení a komplikuje konstrukci ložisek. Aerostatická ložiska jsou nejvíce využívána v oblasti malých až středních výkonů vysokootáčkových strojů. [3]

Princip vzduchového aerostatického ložiska:
„Po obvodu ložiskového pouzdra je několik přesně rozmístěných kanálků, kterými se do mezery mezi pouzdem a hřídelí vhání stlačený vzduch, který odděluje povrchy tenkým filmem. Vzduch poté odchází volně v axiálním směru pryč.“ [8] Popis principu je zřejmý z obrázku 2.6.



Obr. 2.6 Tok stlačeného vzduchu radiálním aerostatickým ložiskem
Obrázek převzat v nezměněné formě z [8]

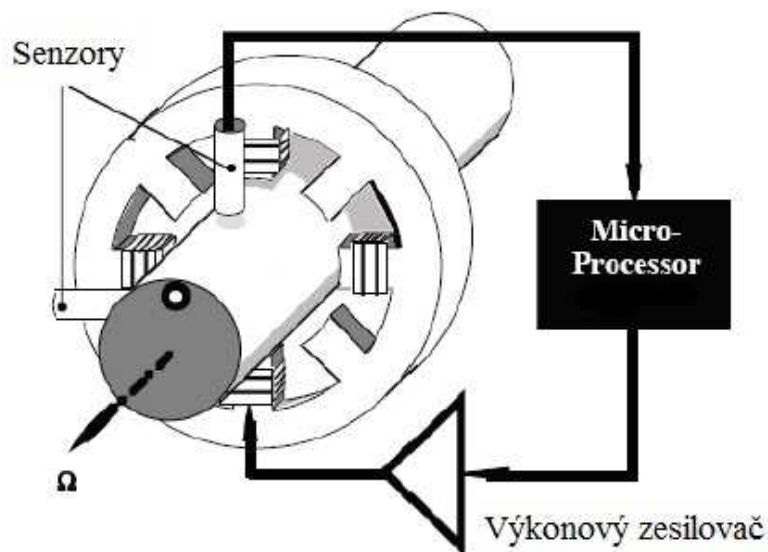
2.4.3 Aktivní magnetická ložiska

Aktivní magnetická ložiska se zdají mít největší potenciál pro vysokootáčkové aplikace, splňují jisté ideální podmínky pro otáčení, jmenovitě: *žádné tření, opotřebení a mazivo*. Mezi jejich další plusy patří *modularita v designu, možnosti regulace tuhosti a tlumení* v důsledku jejich aktivního charakteru. Na druhou stranu jsou dost často považována za příliš složitá, nákladná a nespolehlivá. V současné době se většinou používají ve speciálních aplikacích, náročných pracovních podmínkách nebo v prostředí, kde jsou velmi přísné požadavky na údržbu. Nicméně pokrok této technologie za poslední dvě desetiletí rapidně roste spolu s aplikacemi, kde jsou tato ložiska využívána tzn. i vysokootáčkové stroje. Konstrukce axiálního magnetického ložiska je obdobná radiálnímu. [3] [8]

Princip aktivního magnetického ložiska: „Princip jejich funkce se shoduje s běžnými elektromagnety. Ve statoru ložiska je umístěno pole cívek, ve kterých se při průchodu proudu indukuje magnetické pole, které přitahuje rotor z feromagnetického materiálu.“ [8]



Obr. 2.7 Radiální aktivní magnetické ložisko
Obrázek převzat v nezměněné formě z [8]



Obr. 2.8 Základní uspořádání aktivního magnetického ložiska nesoucí rotor
Obrázek převzat a přeložen z [3]

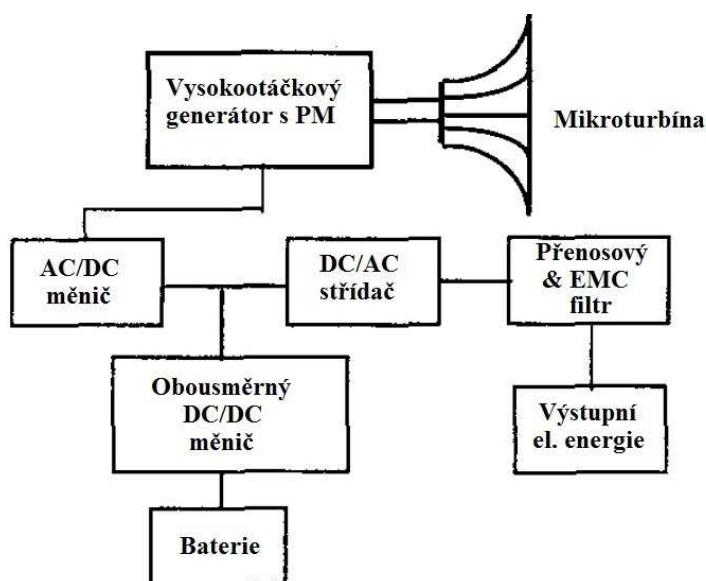
Tabulka 2.1 Shrnutí výhod a nevýhod jednotlivých typů ložisek [3]

Kuličková ložiska	Vzduchová ložiska	Aktivní magnetická ložiska
<ul style="list-style-type: none"> + nízká cena (náklady) + robustnost 	<ul style="list-style-type: none"> + bez tření a opotřebení + ultra přesná + pevná + nízké nároky na údržbu 	<ul style="list-style-type: none"> + bez tření a opotřebení + bez údržby + nastavitelná síla, tlumení + polohování během otáčení + modulový design + možnost práce v drsném prostředí + možnost měření = kontrola
<ul style="list-style-type: none"> - teplotně závislá - vzniká opotřebení - nutnost maziva - vyžadují údržbu 	<ul style="list-style-type: none"> - nestabilní - malá zatížitelnost - vyžadují dokonalou geometrii - náchylná na nečistotu a teplotu - vyžadují předpětí 	<ul style="list-style-type: none"> - složité - drahé - nízká spolehlivost - vyžadují kontrolu - vyžadují konstantní napájení, senzory, elektroniku

2.5 Ukázka návrhu řídicího systému pro vysokootáčkový stroj s PM

Bez kvalitního řídicího systému by vysokootáčkový stroj mohl jen těžko pracovat, proto si v této kapitole ukážeme příklad řídicího systému vysokootáčkového generátoru s PM, který je poháněn mikroturbínou. Jde o spalovací typ turbíny, palivo zde tvoří zemní plyn či bioplyn, kde se otáčky pohybují okolo $100\,000\text{ min}^{-1}$. Jedná se o jedno z typických použití vysokootáčkového stroje v průmyslu. Blokové schéma řídicího systému spolu s vysokootáčkovým strojem pro výrobu elektrické energie je na obrázku 2.9. [7]

Vysokootáčkový generátor je zde koncipován jako motor a generátor zároveň. Při rozběhu stroj pracuje jako motor pro počáteční pohon mikroturbíny, protože mikroturbína se nemůže samočinně rozběhnout. Napájení motoru je zajištěno od baterie přes obousměrný DC/DC měnič (při generátorickém chodu stroje je do baterie přiváděna energie a je nabíjena, tzn. zajištění okamžitého napájení pro motorický chod) a DC/AC střídač. Rychlost motoru se postupně zvětšuje regulováním frekvence a amplitudy napětí až do té doby kdy rychlost dosáhne požadované hodnoty pro chod turbíny. Pokud turbína může produkovat jmenovitý výstupní výkon, ukončí se motorický chod a stroj začne pracovat jako generátor. Vysokofrekvenční výstup střídavého proudu se převede na konstantní frekvenci 50 Hz a konstantní napětí 380 V (mezi fázemi) přes AC/DC měnič a DC/AC střídač. Výstupní celkovou energii ze střídače filtruje přenosový a elektromagneticky kompatibilní filtr, kde je jeho hlavní funkcí filtrování harmonických složek a zajištění výstupní kvality střídavé elektrické energie (proudu / napětí). [7]



Obr. 2.9 Řídicí systém vysokootáčkového generátoru s PM poháněného mikroturbínou
Obrázek převzat a přeložen z [7]

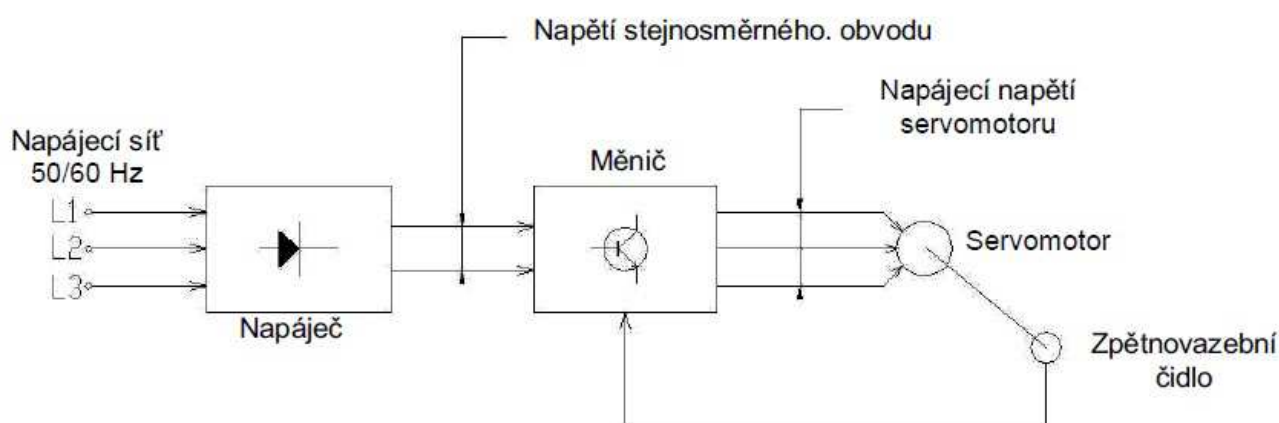
3 Aplikace vysokootáčkových strojů s PM v průmyslu

V dostupných informačních zdrojích se uvádí, že jak klasické synchronní stroje s PM, tak vysokootáčkové synchronní stroje s PM pomalu nahrazují ty indukční (asynchronní). Důvody mohou být následující: *stroje vykazují větší účinnost než stroje indukční, omezily se ztráty v důsledku použití PM, tyto stroje mají menší rozměry = menší hmotnost (v některých aplikacích rozhodující vlastnost), charakterizují se také velkou životností a provozní spolehlivostí a mají malé nároky na údržbu.*

3.1 Synchronní vysokootáčkové servomotory s PM

3.1.1 Základní informace o střídavých synchronních servomotech s PM

Tyto pohony s PM patří do kategorie nejmodernějších elektronicky řízených elektropohonů. Charakterizují se širokým regulačním rozsahem, vysokou dynamikou a přesností, která se uplatňuje v oblasti mechanizace a automatizace výroby. Řadíme je do kategorie třífázových synchronních motorů, které jsou buzené PM na rotoru a pracují obdobně jako bezkartáčové stejnosměrné elektromotory. Funkci pracovat jako bezkartáčové stejnosměrné motory zajišťují tranzistorové měniče se stejnosměrným meziobvodem, zpětnovazebně řízené čidlem polohy, které je z pravidla zabudované v servomotoru. Principiální schéma tohoto pohonu je znázorněno na obrázku 3.1. [9]



Obr 3.1 Principiální schéma řízení servomotoru
Obrázek převzat v nezměněné formě z [9]

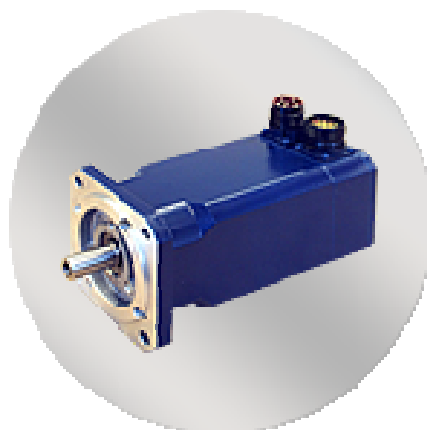
Servomotory je možné konstruovat i s integrovanou elektromagnetickou klidovou brzdou. Princip její činnosti je, že blokuje rotor servomotoru v určité poloze, dokud na cívku brzdy není připojeno malé napětí (firma VUES Brno uvádí 24 V). Důležité je zmínit, že připojení či odpojení brzdy je možné pouze při stojícím rotoru - pohonu. Je uváděno, že životnost uložení rotoru těchto servomotorů je dimenzováno na více jak 20 000 h. Jde o velmi přesné uložení, které je nejvíce náchylné především na axiální síly vyšší než předepsané a o to více na axiální rázy na konci hřídele, které mohou vést k poškození ložisek či snímačů. Aby se zapříčinilo těmto nepříznivým vlivům, je většinou volný konec hřídele opatřen otvorem se závitem, který je možné použít pro montáž spojek, řemenice apod. [9]

Přednosti střídavých servomotorů s PM:

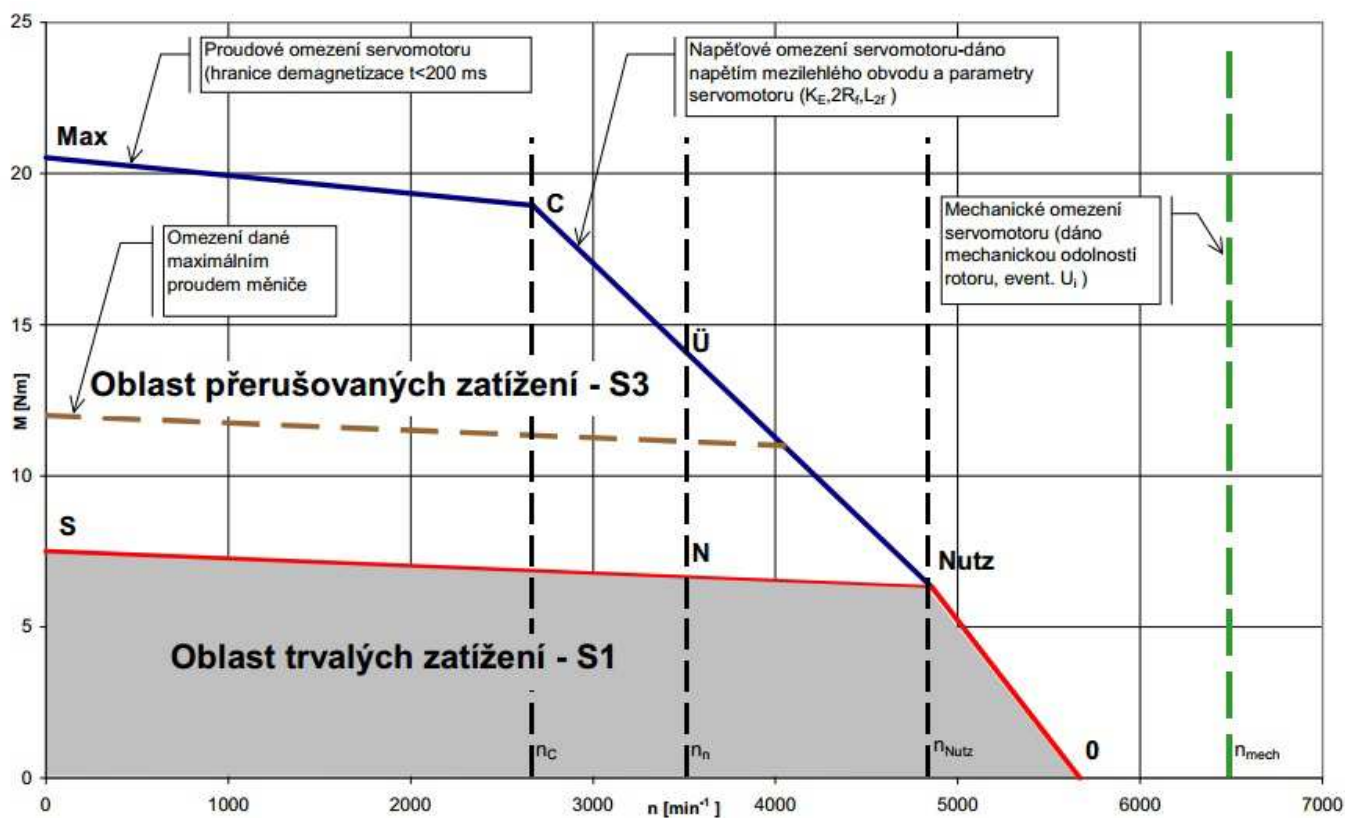
- malé rozměry a hmotnost
- vysoká účinnost
- velké zrychlení v přechodových stavech
- malé vlastní momenty setrvačnosti
- vysoká životnost a provozní spolehlivost
- minimální nároky na údržbu (žádné kluzné kontakty, ložiska s trvalou mazací náplní)

Naopak jisté nevýhody by mohly být:

- náchylnost na axiální rázy na konci hřídele
- teplotní závislost a vliv oteplení na PM při zatížení
- rostoucí cena vzácných zemin pro PM [9]



Obr. 3.2 Synchronní servomotor s PM od firmy VUES Brno řada M
Obrázek převzat v nezměněné formě z [9]



Obr. 3.3 Momentová charakteristika střídavého servomotoru
Obrázek převzat v nezměněné formě z [9]

V [9] je uváděno, že servomotory (zejména řady M a F) jsou projektovány a konstruovány spíše pro dynamické procesy s širokým otáčkovým rozsahem a proměnnou zátěží, než pro trvalá zatížení (v momentové charakteristice značeno S1) s konstantní zátěží a otáčkami. Z toho plyne, že tyto motory mohou být zatěžovány podstatně většími momenty (proudy), než jmenovitými pod podmínkou, že jejich střední efektivní hodnota nepřekročí jmen. hodnoty pro trvalou zátěž S1. Dále se uvádí, že elektromagneticky jsou

motory navrženy tak, aby zvládaly 3,5 až 4 násobnou momentovou přetížitelnost. [9]

3.1.2 Synchronní vysokootáčkové servomotory 2AML406B

Tyto servomotory pro profesionální ruční nářadí či leteckou techniku vyvinula firma VUES Brno. Jedná se o synchronní dvoupólové servomotory zvládající provoz v rozsahu otáček 10 000 až 30 000 min^{-1} a výkonové přiřazení 2,5 kW. Pro provoz servomotoru v takto vysokých otáčkách bylo nutné navrhnout odpovídající konstrukční řešení stroje, které spočívalo hlavně v oblasti rotoru, a proto vývojoví inženýři museli upravit standardní konstrukci rotoru a docílit tím tak pevného uchycení PM, které spočívalo v tom, že rotor musel být vybaven speciální bandáží. Použité magnety pro konstrukci rotoru byly ze vzácných zemin, konkrétně na bázi neodymu (NdFeB). [10]

Při konstrukci servomotoru se také musela věnovat pozornost ložiskovým uzlům, kde jsou použity přesná kosoúhlá ložiska od firmy SKF, která nemají problém v provozu při takto vysokých otáčkách. Navíc je tento typ vysokootáčkového servomotoru osazen speciálně zákaznický vyvinutým snímačem otáček od firmy Micronor, protože standardně používané snímače se dají provozovat pouze do 20 000 ot/min. [10]

Chlazení těchto servomotorů je realizováno vzduchem a standardně jsou dodávány v provedení s cizí ventilací. Dodávání těchto servomotorů na průmyslový trh může být dvojí, buď se jedná o samostatné synchronní stroje, nebo jako kompletní seřízený pohon spolu s měničem od firmy Control Techniques. [10]



Obr. 3.4 Vysokootáčkový synchronní servomotor 2AML406B s PM
Obrázek převzat v nezměněné formě z [10]

3.2 Vysokootáčkový elektrický generátor HFG 125T

Jedná se o vysokootáčkový synchronní generátor buzený PM od firmy PBS Velká Bíteš a.s., která se dlouhodobě zabývá vysokootáčkovými stroji. Jeden z důvodů vývoje byl určitý způsob, jak rozšířit a zefektivnit lokální zdroje elektrické energie využívající biomasu nebo odpadní teplo z technologických procesů. V celkové podstatě se jedná o malé kogenerační jednotky na bázi mikroturbín, kde vstupním médiem je ohřátý a stlačený vzduch a výstup tvoří elektrická energie. [11]

Jelikož mikroturbíny mají vysoké provozní otáčky (30 000 - 100 000 min⁻¹), použití standardního elektrického generátoru s provozními otáčkami 1 500 - 3 000 min⁻¹ bylo v podstatě nemožné. I za předpokladu použití reduktoru by rozměry a hmotnost „třítisícového“ generátoru několikanásobně převyšovaly parametry samostatné mikroturbíny, a proto se hledalo řešení v oblasti vysokootáčkových strojů s PM, které umožňují takovou schopnost a konstrukci umožňující přímé spojení rotoru mikroturbíny s vysokootáčkovým generátorem, který je následně zapojen do měniče frekvence pro zajištění výstupního napětí 3 x 400 V / 50 Hz. [11]

Tabulka 3.1 Základní parametry vysokootáčkového generátoru HFG 125T [11]

Parametr	Hodnota
jmenovitý výkon	100 k VA
jmenovité napětí	3 x 440 V
jmenovitá frekvence	1 867 Hz
jmenovité otáčky	56 000 min ⁻¹
účinník	0,96
chlazení	kapalinové

Konstrukce - **Rotor** - pro topologii rotoru byla zvolena varianta s tvarovanými magnetovými segmenty. Tvar segmentových magnetů je příznivý z hlediska silového působení magnetů na bandáž rotoru, která bezpochyby patří k jedním z klíčových prvků celého generátoru a bude zmíněna později. Tato topologie byla zvolena nejen pro tento důvod, ale také proto, že má velký magnetický výkon, malou hodnotu celkového harmonického zkreslení THD (Total-Harmonic-Distortion) a průběhu vlny zpětné elektromotorické síly EMF (Electro-Motive-Force). [11]

Materiál PM byl vybírán mezi dvojicí SmCo a NdFeB. SmCo magnety mají sice větší teplotní stabilitu oproti NdFeB magnetům, ale z důvodu dosažení co největšího výkonu byly zvoleny magnety NdFeB. [11]

Co se týče bandáže rotoru, která musí mít dostatečnou pevnost a také co nejmenší výšku, aby byla co nejvíce minimalizována vzduchová mezera mezi magnety a samotným statorem, byla navržena z uhlíkových vláken s pevností min. 3 800 MPa. Je tedy z nemagnetického materiálu a její šířka má zásadní vliv na složku ztrát v důsledku vířivých proudů, jelikož je stroj vysokofrekvenční. Výška bandáže je pouze 3,6 mm (ke srovnání odstředivá síla PM dosahuje hodnoty až 162 tun) a souvisí i s chlazením rotoru, kde teplotu zvyšují dva faktory: tření vzduchu a ztráty vířivými proudy. Jelikož se bandáž chová jako tepelný izolant (rotor je více citlivější na vliv vířivých proudů oproti rotorům konvenčních strojů), je z celkového hlediska velmi obtížné zajistit chlazení celého rotoru. [11]

Jediný způsob jak lze docílit účinného odvedení tepla z jádra rotoru je chlazením volných konců hřídele či ložiskových uzlů. [11]



Obr. 3.5 Rotor vysokootáčkového generátoru HFG 125T
Obrázek převzat v nezměněné formě z [11]

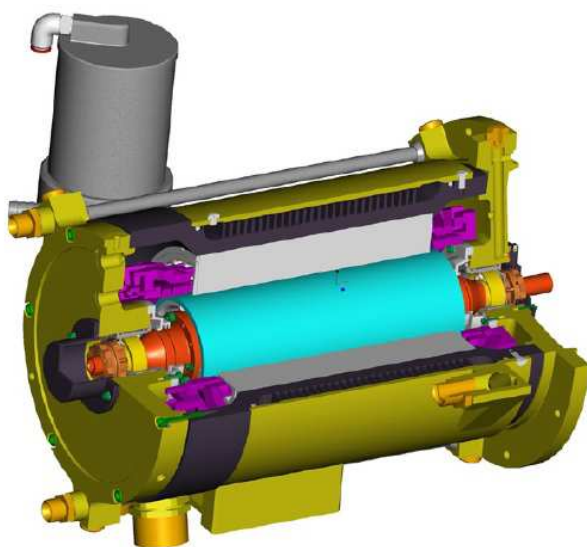
Uložení rotoru - vysokootáčkové rotory nelze ukládat na tuhé ložiskové podpory, jako např. u klasických el. toč. strojů, protože vysokootáčkový rotor nelze považovat za tuhé těleso, ale za pružné - pružný rotor je označován takový, jehož kritické otáčky jsou menší než otáčky provozní tzn., že vyžaduje vyvažování při provozních otáčkách stroje, a to přináší jisté komplikace při navrhování uložení rotoru. [11]

Tyto komplikace řeší ložiskové podpory, které zaručují spolehlivý provoz při přejezdu kritických otáček rotoru a i při zvýšené nevyváženosti tzn. laděním ložiskových podpor, vhodnou kombinací tuhosti a tlumení lze zaručit široký rozsah provozních otáček pružného rotoru. [11]

V tomto případě je použita dvojice velmi přesných bezklecových hybridních ložisek s kosouhlým stykem. Mazání ložisek olejovým systémem spočívá v tom, že vlastní ložiskový prostor je utěsněn labyrintovými ucpávkami, které jsou pro jejich správné fungování zahlcovány vzduchem od kompresoru mikroturbíny a systém zajišťuje jak mazání ložisek, tak odvod ztrátového tepla z rotoru. Navíc je ještě ložiskový prostor odvětráván přes olejový odlučovač. [11]

Stator - jeho konstrukce byla zvolena čtyřpólová s ohledem na rostoucí ztráty, které souvisejí s vysokými frekvencemi. Důvod použití čtyřpólového oproti dvoupólovému (nad kterým se také uvažovalo) statoru bylo snížení reakčního vlivu kotvy na PM. Tudíž magnety (v porovnání s dvou pólovým statorem) mohou mít menší výšku a tedy i hmotnost, což snižuje požadavky na rotorovou bandáž. Statorové plechy jsou vyrobeny ze speciálních materiálů v důsledku minimalizace ztrát vířivými proudy o tloušťce 0,2 mm. Vinutí je třífázové, zapojené do hvězdy. [11]

Otáčkami generátoru, počtem závitů a velikostí mag. toku je dáno výsledné indukované napětí. Velikost výstupního napětí je ovlivněna a může kolísat s ohledem na chlazení, teplotu generátoru (se vzrůstající teplotou PM klesá B_r a H_c), rozptylovou reaktanci, průchod proudu přes činný odpor vinutí a ponejvíce reaktancí reakce kotvy. Důležité je také zmínit, že generátor musí být přizpůsoben použitému výkonovému měniči a naopak. [11]



Obr. 3.6 Počítačový model generátoru HFG 125T
Obrázek převzat v nezměněné formě z [11]

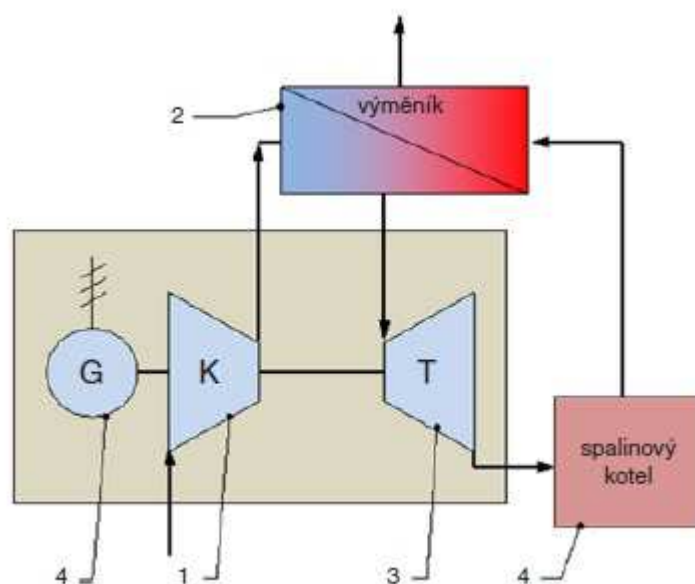


Obrázek 3.7 Generátor HFG 125T
Obrázek převzat v nezměněné formě z [11]

Chlazení - jelikož se jedná o maloobjemový generátor, bylo nutné zajistit velmi kvalitní odvedení ztrátového výkonu - tepla, které se skládalo z: elektromagnetických ztrát ve statoru 70 - 75 %, rotorových ztrát třením o vzduch 15 - 20 % a ztrát v ložiskách 10%. Ztrátové teplo ze statoru a také část tepla vzniklého třením o vzduch se odvádí za pomoci vnějšího pláště, který je chlazen kapalinou. Odvod tepla z ložisek, jak bylo řečeno výše, je realizován prostřednictvím olejového okruhu a zahlcovacím vzduchem labyrintových ucpávek. [11]

Dále také generátor obsahuje snímače teploty, které jsou umístěny ve statorovém vinutí a u ložisek. Data ze snímačů jsou vyhodnocována v řídicím systému mikroturbíny. Jedná se zejména o data: teploty chladicí vody, průtoku vody a teploty v generátoru. Je-li překročena kterákoliv sledovaná hodnota nad stanovenou mez, řídicí systém odstavuje jednotku z provozu. [11]

Použití - tento generátor je prvkem mikroturbínové jednotky TGU 100B, kde tato jednotka pracuje na principu nepřímého ohřevu (spaliny neputují turbínou, ale přes výměník, kde ohřívají pracovní medium) viz. obrázek 3.7. TGU 100B je možno použít v takových provozech, kde se vyskytuje dostatečné množství odpadního tepla zajišťující ohřev pracovního média - vzduchu přibližně na 750 °C při množství 1,15 kg/s tzn. *teplárny, chemické či metalurgické provozy*. [11]



Obr. 3.8 Schéma nepřímého ohřevu
Obrázek převzat v nezměněné formě z [11]

Popis obrázku 3.8: „Kompresor (1) nasává vzduch z atmosféry. Stlačený vzduch od kompresoru (1) jednotky TGU 100B je přiveden do spalínového výměníku (2), kde se jeho teplota zvýší až na asi 800 °C. Ohřátý vzduch je přiveden na turbínu (3), kde expanduje a koná práci. Turbínová hřídel pohání kompresor (1) a prostřednictvím spojky je dále spojena s generátorem HFG 125T (4). Vzduch vystupující z turbíny (3) se vhání do spalínového kotle (5), kde podporuje hoření.“ [11]



Obr. 3.9 Jednotka TGU 100B v praxi
Obrázek převzat v nezměněné formě z [11]

3.3 EC motory Maxon pro extrémní podmínky

Tyto stejnosměrné EC (elektronicky komutované) motory, někdy také nazývané BLDC (bezkartáčové ss. motory) s označením EC 22 HD a výkonem do 240 W jsou určeny pro extrémní pracovní podmínky a také mají rozšířit možnosti použití EC motorů právě v odvětvích, které se vyznačují kritickými úlohami např. v letectví, kosmonautice, lékařství či těžebním průmyslu, kde jsou tato zařízení provozována na samotné mezi jmenovité zatížitelnosti konstrukce a někdy i za ní. [12]

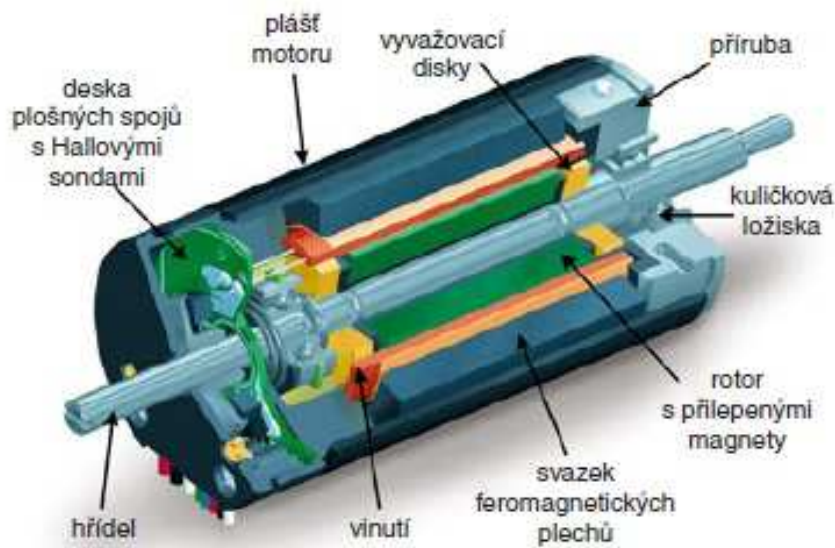
Jednou z extrémních podmínek může být i teplota okolí, ve které tyto motory musí vydržet pracovat bez poruchy či ztráty výkonu. Proto jsou motory EC 22 HD (Heavy Duty - ozn. pro těžké pracovní podmínky) navrženy tak, aby mohly být provozovány při teplotách od -55 až do +200 °C. Tyto hodnoty charakterizují mezní provozní podmínky, ale samotný motor musí být z principu navržen na teploty vyšší resp. nižší než tyto. Uvádí se, že veškeré vnitřní komponenty jsou realizovány tak, aby odolávaly teplotám přinejmenším 240 °C. Protože každý motor je určitým zdrojem tepla, teplotu okolí tudíž ovlivňuje i samotný motor, kde hlavním zdrojem tepla je ztrátový výkon na činných odporech vinutí (rovnice 3.1):

$$\Delta P_{Cu} = R \cdot I^2 \quad (3.1)$$

kde I je střední hodnota proudu a R odpor vinutí dále jsou to ztráty v magnetickém obvodu (vířivými proudy + hysterezní) jelikož je zde časově proměnné mag. pole a v neposlední řadě také ztráty mechanické. [12]

Charakteristika EC motorů - název určuje, že se jedná o stejnosměrné motory, ale konstrukce odpovídá strojům synchronním s PM. Pojem elektronicky komutované znamená, že tyto motory nevyužívají pro komutaci kartáče, ale elektronicky nadřazený obvod (stoupá životnost, téměř lineární moment ve velkém rozsahu otáček oproti klasickým stejnosměrným strojům). Elektronická komutace se provádí na základě dat z Hallových senzorů umístěných v motoru, které sledují polohu rotoru. Motor je napájen obdélníkovým nebo lichoběžníkovým napětím synchronizovaným s danou polohou rotoru pro správnou komutaci.

Konstrukční uspořádání klasických válcových EC motorů Maxon - rotor těchto motorů je realizován osově vyvrtaným prstencovým PM, který se následně lepí na hřídel. Homogenní samonosné vinutí statoru značky Maxon je umístěno uvnitř laminovaného feromagnetického pláště bez pólů. Přínos této koncepce vinutí spočívá v tom, že se *sníží ztráty v železe, stroje jsou o menším průměru a moment je rovnoměrný*. Mezi nedostatky této konstrukce patří: lepidlo ve spoji magnet-hřídel při vyšších teplotách měkne, vrtání magnetů je nákladné a zhoršují se magnetické vlastnosti, opakované oteplování a ochlazování zeslabuje lepený spoj. [12]



Obr. 3.10 Konstrukční uspořádání klasického válcového EC motoru Maxon
Obrázek převzat v nezměněné formě z [12]

Konstrukce motorů EC 22 HD - provedení je téměř podobné jako u klasických válcových EC motorů, ovšem zde se ke hřídeli rotoru PM nelepí (z výše uvedených důvodů). **Rotor** - je realizován tak, že PM jsou uloženy v ocelovém pouzdře k jehož čelům jsou přivařeny čepy hřídele viz. obrázek 3.11. Ocelová bandáž zajišťuje ochranu PM před korozí a zabraňuje jejich poškození či rozlomení při velkých vibracích nebo rázech vzniklých během provozu. [12]

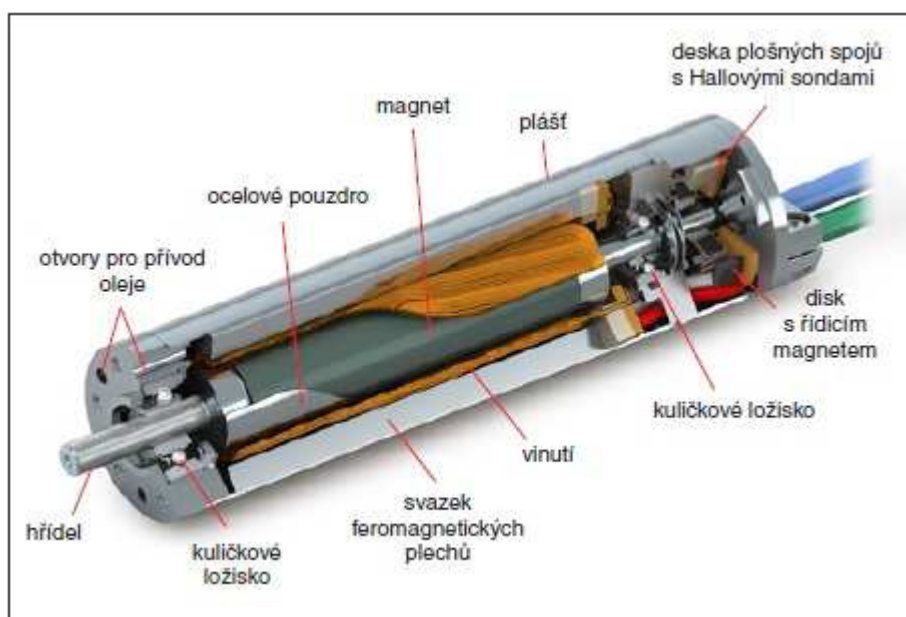


Obr. 3.11 Uspořádání rotoru motoru EC 22 HD
(nahore je možno vidět ocelové pouzdro s čepy hřídele, dole vysokoteplotní magnet)
Obrázek převzat v nezměněné formě z [12]

Materiál PM je ze skupiny vzácných zemin SmCo. Byl zvolen proto, že má podstatně vyšší Curieho bod oproti materiálu NdFeB, který je využíván v klasických motorech Maxon. [12]

Stator - jeho vinutí je k tělesu statoru lepeno pomocí teplotně odolného lepidla, což umožňuje provozovat tyto motory při tak vysokých teplotách okolního prostředí. Dále se uvádí, že jsou vyráběny jako třífázové dvoupólové v provedení dvou variant: a) pro *provoz v oleji* b) pro *klasický provoz, kdy okolním prostředím je vzduch*. Obě varianty mají stejné rozměry \varnothing 22 mm a délku 90 mm. Otvory v přírubě tělesa statoru jsou při využití stroje na vzduchu uzavřeny, pokud motor pracuje v olejové lázni, je přes tyto otvory zajištěn přísun oleje. [12]

Ložiska - EC 22 HD využívají kuličkových ložisek přivařených k hřídeli rotoru, které jsou mazány vysoce kvalitním tukem, pokud je motor provozován na vzduchu, mazací tuk v ložiskách zůstává po celou dobu provozního života motoru a musí samozřejmě vyhovovat požadovaným rozmezím teplot, ve kterých se stroj může pohybovat během provozu tzn. zachovat si dostatečně dobré mazací schopnosti bez ohledu na teplotu. Při olejovém provedení je mazací tuk olejem vyplaven a mazání zajišťuje samotný olej. [12]



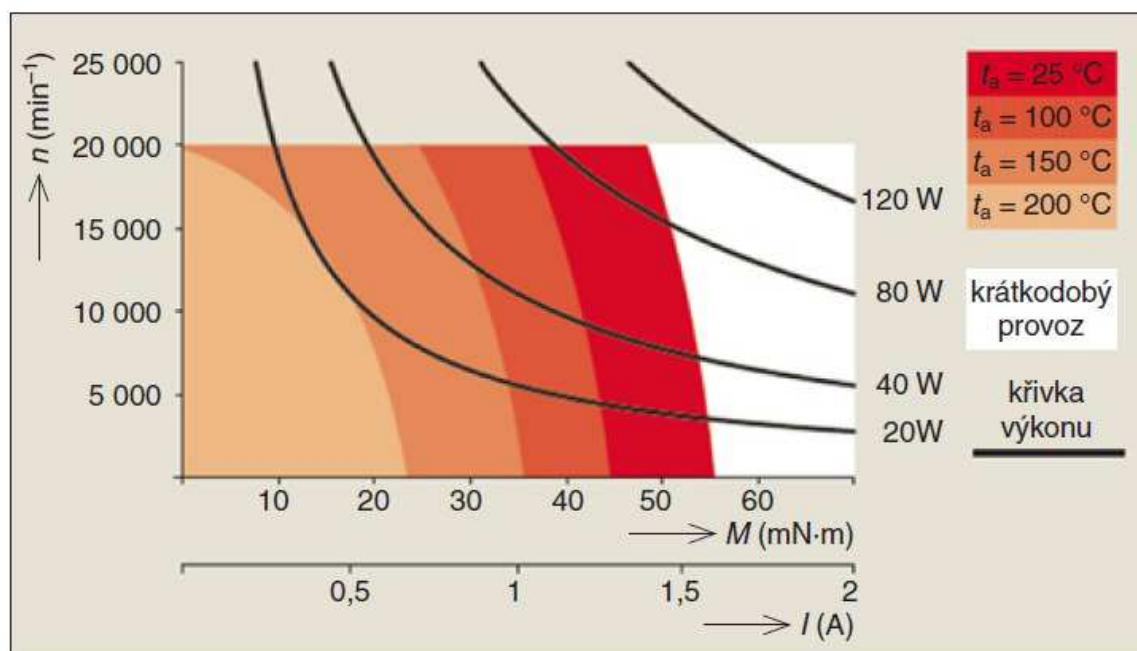
Obr. 3.12 Konstrukční uspořádání motoru EC 22 HD
Obrázek převzat v nezměněné formě z [12]

Vliv teploty na výkon -

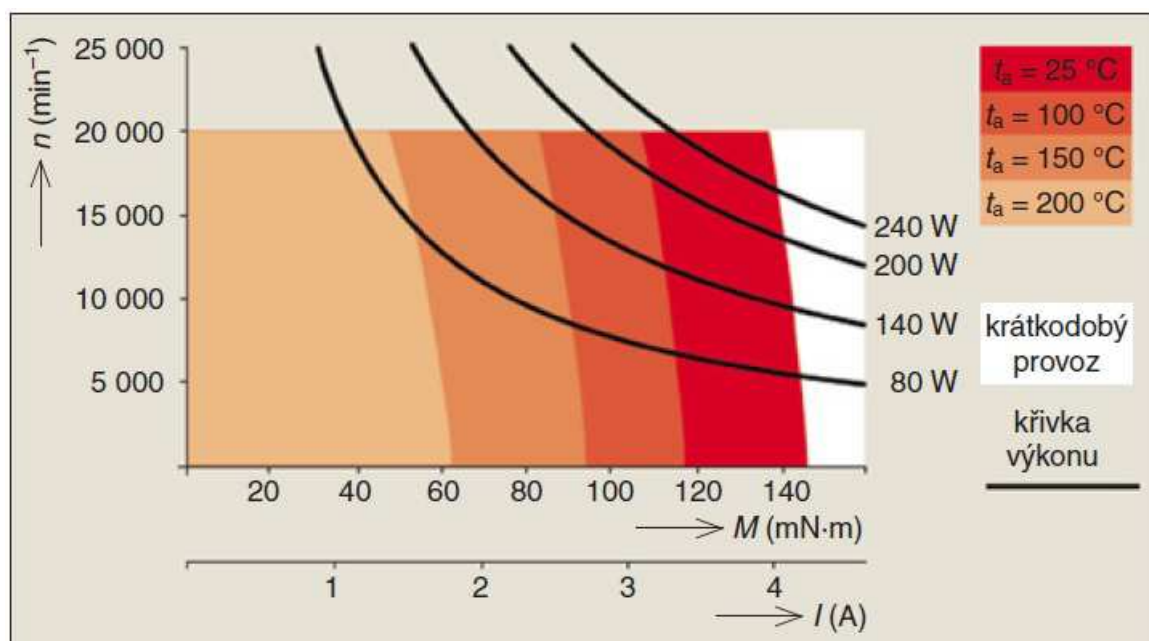
a) Pokud je použito vinutí z mědi, můžeme říci, že měrný odpor mědi s teplotou roste o 0,392 % na stupeň Celsia. Z toho plyne, že odpor vinutí motoru je při 75 °C o 20 % větší než při teplotě 25 °C. A tedy pro dosažení stejného točivého momentu (proudu v motoru)

je třeba zvýšit napájecí napětí. [12]

b) Je známo, že teplota ovlivňuje tvar hysterezní smyčky PM a tudíž i jeho B_r a H_c . S rostoucí teplotou klesá B_r a tudíž i B_δ ve vzduchové mezeře což způsobuje menší točivý moment při stejně velkém proudu ve vinutí statoru. A proto jsou charakteristiky těchto motorů uváděny v závislosti na teplotě (obrázky 3.13 a 3.14). [12]



Obr. 3.13 Provozní rozsahy motoru určeného k použití na vzduchu (n - otáčky, M - točivý moment)
Obrázek převzat v nezměněné formě z [12]



Obr. 3.14 Provozní rozsahy motoru určeného k použití v olejové lázni (n - otáčky, M - točivý moment)
Obrázek převzat v nezměněné formě z [12]

Snadno pak tedy můžeme říci, že motory s olejovou lázní je možné provozovat při větších výkonech a to právě kvůli lepšímu chlazení a odvodu tepla z motoru díky proudícímu oleji. [12]

Provozní vlastnosti - provozování motorů EC 22 HD lze v prostředí s tlakem až 170 MPa a teplotou od -55 do +200 °C. Dále mohou být vystaveny vibracím s efektivní hodnotou zrychlení až 25g, přetížením a rázům o velikosti 100g. Maximální otáčky motoru jsou 20 000 min⁻¹ s maximální přípustnou teplotou vinutí 240 °C (všechny parametry jsou udávány v závislosti na teplotě okolí). [12]

Tabulka 3.2 Provozní parametry motorů EC 22 HD v závislosti na teplotě okolního prostředí t_a [12]

Parametr	Provoz na vzduchu		Provoz v olejové lázni	
	$t_a = 25\text{ °C}$	$t_a = 200\text{ °C}$	$t_a = 25\text{ °C}$	$t_a = 200\text{ °C}$
jmenovité napětí (V)	48	48	48	48
otáčky naprázdno (min ⁻¹)	13 300	14 100	12 900	13 900
jmenovité otáčky (min ⁻¹)	11 600	13 200	8 560	10 700
jmenovitý moment (mN·m)	56,8	15	149	57,2
jmenovitý proud (A)	1,69	0,514	4,53	1,88
účinnost (%)	88	85	71	70

Ve většině úloh provozování těchto motorů (ovládání klapky, ventilů, apod.) se vyžadují velké síly a momenty, kterými motor nemůže disponovat, a tudíž se musí použít převodovky. Uvádí se, že firma Maxon navrhne a vyrobí převodovku přímo na zakázku nebo je možné, aby byla použita jiná - konkurenční. Pro lineární pohyb se používají převodovky s pohybovými šrouby. [12]

Dále mohou být tyto motory dodávány s Hallovými senzory, které sou usazeny na desce plošných spojů (jejich nosná konstrukce otočné části je rovněž přivařena k hřídeli) nebo i bez těchto senzorů. Přívodní kabel, resp. jeho plášť, je z teflonového materiálu s odolností do 240 °C. Z důvodu odolnosti proti vysokým teplotám jsou také desky plošných spojů vyrobeny ze speciálního polymidu, který je schopen vydržet teplotu až 260 °C. [12]

Použití - je známo, že díky své vlastnosti pracovat v těch nejsložitějších a nejnáročnějších aplikacích si najdou tyto motory uplatnění zejména: *ve vrtacích soupravách určených k prozkoumávání zemského podloží v hloubkách 2 500 m a více*, dále také *v letectví* (zejména typ vzduch provedení) *pro pohon palivových čerpadel spalovacích motorů*, *ve spouštěcích soustavách turbínových leteckých motorů*, kde teploty přesahují až

150 °C. V úlohách s ultravysokým vakuem (nepatrný vývin plynů až do 240 °C), v *pohonech kosmonautických robotů* atd. [12]

V běžném průmyslu se pak mohou použít k *pohonu čerpadel, ovládání armatur chladících systémů tekutých kovů, k řízení parametrů paliva či páry, ovládání ventilů turbín v plynových a parních elektrárnách.* [12]

3.4 Dvoumegawattový vysokootáčkový alternátor s PM pro lodní aplikaci

Běžné generátory plynových turbín se skládají z vysokorychlostní turbíny spojené s nízkorychlostním alternátorem přes redukční převodovku, která zajišťuje udržení výstupní frekvence alternátoru na 50/60 Hz, protože výstupní frekvence je přímo úměrná rychlosti. Navíc výstupní výkon je také přímo úměrný rychlosti otáčení, a proto tento typ konvenčního systému je velice objemný a v určitých aplikacích nepraktický. [13]

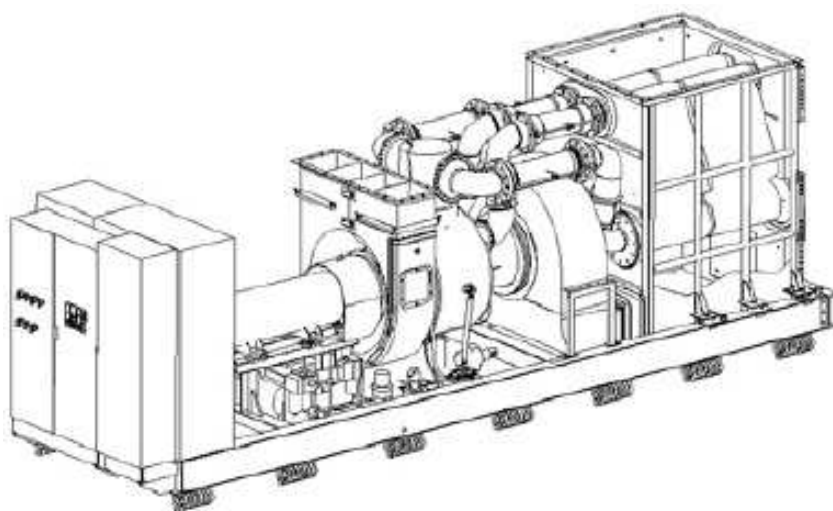
Problém velikosti systému a používání převodovky řeší polovodičové střídače, které umí efektivně měnit výstupní frekvenci alternátoru. Použití těchto měničů v této konkrétní aplikaci nám tedy umožňuje realizovat systém přímého pohonu, kde je připojen vysokootáčkový alternátor přímo k plynové turbíně a tím pádem eliminujeme potřebu převodovky, což výrazně snižuje velikost, složitost a hmotnost celého soustrojí. [13]

Dále je tento systém mnohem kompaktnější, vysoce účinný a vyžaduje mnohem menší údržbu, čehož můžeme využít nejen v lodních, ale i v ostatních průmyslových odvětvích. [13]

Vývojový program a realizaci zahájilo britské královské námořnictvo jako alternativu pro systémy s diesel agregáty používané v dosavadních lodních aplikacích. Celkový systém se nazývá ACL-GTA (advanced cycle low power gas turbine alternator), tedy systém plynové turbíny s alternátorem s nízkou spotřebou energie. Jedná se o systém poskytující lodní servisní sílu jak na moři, tak v přístavu a nezávislou výrobu nouzové energie. [13]

Tato technologie ACL-GTA slibuje řadu výhod ve srovnání s DG (diesel generátory): *menší rozměry, menší ekologické emise, nízké nároky na údržbu a tím pádem snížení počtu osob obstarávající provoz.* [13]

Systém ACL-GTA (obrázek 3.15) je integrovaná jednotka se všemi hlavními součástmi namontovanými na jedné plošině. Plošina je uchycena k montážní ploše (zemi/podlaze) pružinami proto, aby se snížily případné nárazové vlivy, které by mohly mít špatný vliv na funkci celého systému. Hlavní součásti ACL-GTA tvoří: plynová turbína, rekuperátor tepla (zařízení na ohřívání plynu horkými spaliny), vysokootáčkový alternátor (HSA - High speed alternator) a elektronická jednotka (EU - Electronic unit) pro klimatizaci. [13]

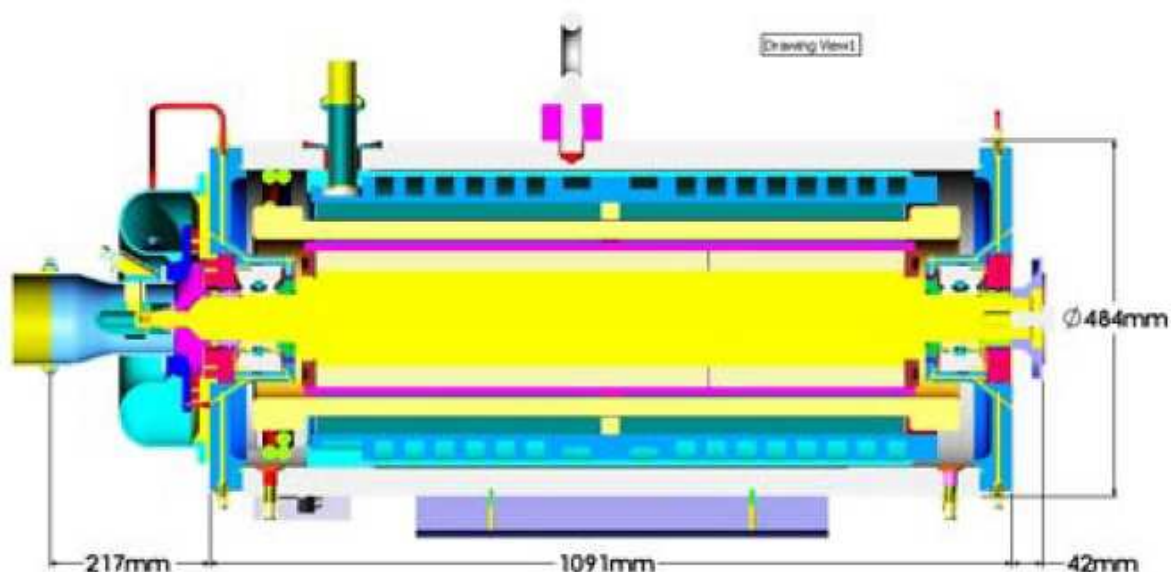


Obr. 3.15 Konfigurace systému ACL-GTA
Obrázek převzat v nezměněné formě z [13]

Charakteristika HSA - tento typ vysokootáčkového alternátoru je čtyřpólový třífázový synchronní stroj s PM na rotoru spojený přímo s plynovou turbínou prostřednictvím pružné mechanické spojky. Obsahuje integrovaný chladicí ventilátor připevněný přímo na hřídeli rotoru pro jeho chlazení. Stator je chlazen chladicí kapalinou proudící smyčky ve skříni statoru. [13]

Nutno je zde zmínit také to, že HSA (obrázek 3.16) poskytuje dvě funkce: motorickou, kde zajišťuje počáteční točivý moment pro plynovou turbínu a druhou funkci tj. generátorickou k produkování výstupní elektrické energie pokud je plynová turbína v provozním stavu - rychlosti. V generátorickém režimu je HSA navržen tak, aby poskytoval elektrický výstupní výkon kompatibilní s mechanickou energií dodávanou z plynové

turbíny při různých rychlostech a okolních podmínkách, až do jmenovitého výkonu 2 MW. [13]



Obr. 3.16 Konfigurace HSA (průměr 484 mm, celková délka 1350 mm)
Obrázek převzat v nezměněné formě z [13]

Tabulka 3.3 Požadavky HSA. Tabulka převzata a přeložena z [13]

maximální výstupní výkon	2030 kW
otáčkový rozsah	19 000 - 22 500 min ⁻¹
maximální přípustná rychlost otáčení	27 000 min ⁻¹
výstupní napětí	800 V dc (@ EU výstup)
pracovní cyklus	kontinuální
klimatické podmínky	-20 až 55 °C
dostupné chlazení	Voda/glykol

Rotorová bandáž - je tvořena vysokohustotním grafit-kompozitním materiálem GCS (uhlíková vlákna, obdobně jako u generátoru HFG 125T). Poskytuje, jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, jisté výkonnostní výhody v porovnání s kovovým provedením tj. její struktura má vyšší poměr pevnosti k hmotnosti a je výrazně tenčí než kovová, což vede k lepším výkonnostním vlastnostem stroje a kompaktnějšímu provedení. Nevýhoda GSC je teplotní závislost z toho vyplývající nízká tepelná vodivost tzn. chování se jako tepelný izolant. Pro tuto konkrétní aplikaci výhody GSC více než vyrovnávají nevýhody, jelikož je zde zabezpečeno kvalitní chlazení rotoru. [13]

Chlazení rotoru - je realizováno integrovaným chladícím ventilátorem umístěným na hlavní hřídeli rotoru. Zajišťuje jak dostatečný chladící vzduch pro rotor, tak vyrovnávací vzduch pro těsnění hřídele. Dále také eliminuje potřebu vzduchu z kompresorového systému turbíny, čímž se optimalizuje účinnost systému a je ve srovnání s externím ventilátorem mnohem kompaktnější (není potřeba samostatná nosná konstrukce a hnací mechanismus). Jistým nedostatkem tohoto ventilátoru je, že částečně zatěžuje samotný rotor stroje. [13]

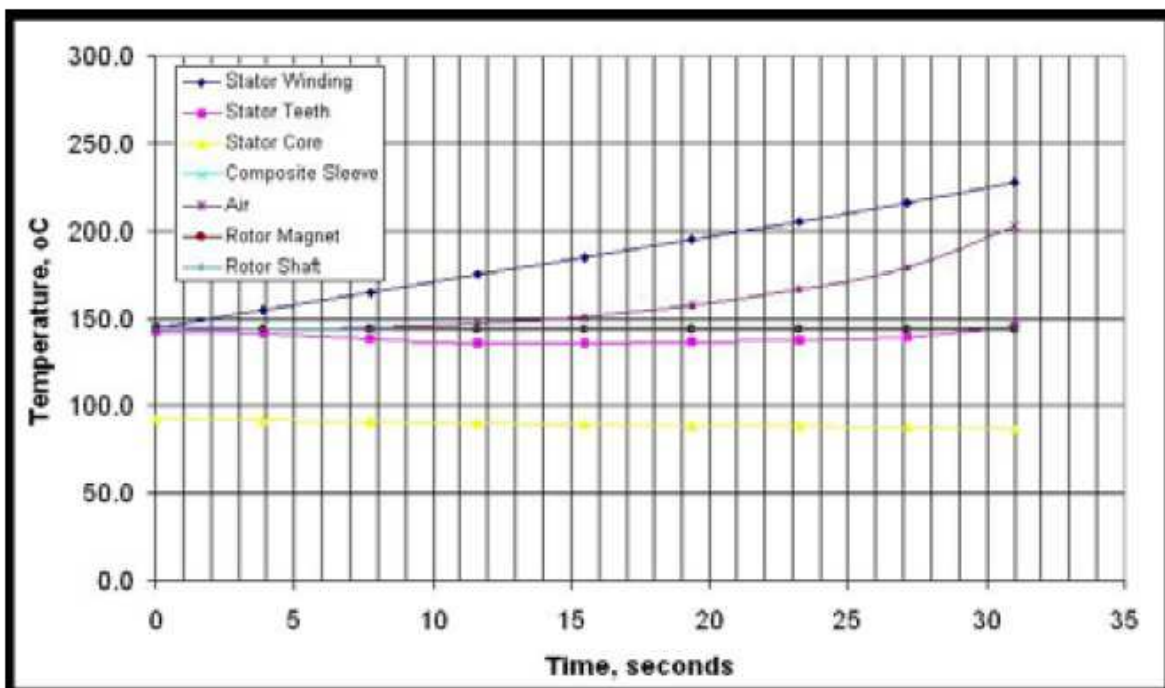
Materiál PM - SmCo materiál byl zvolen pro tuto aplikaci kvůli vyšší teplotní schopnosti, lepší teplotní stabilitě a demag. charakteristikám oproti materiálu NdFeB. [13]

Tabulka 3.4 Tepelný souhrn zatížení jednotlivých prvků HSA. Tabulka převzata a přeložena z [13]

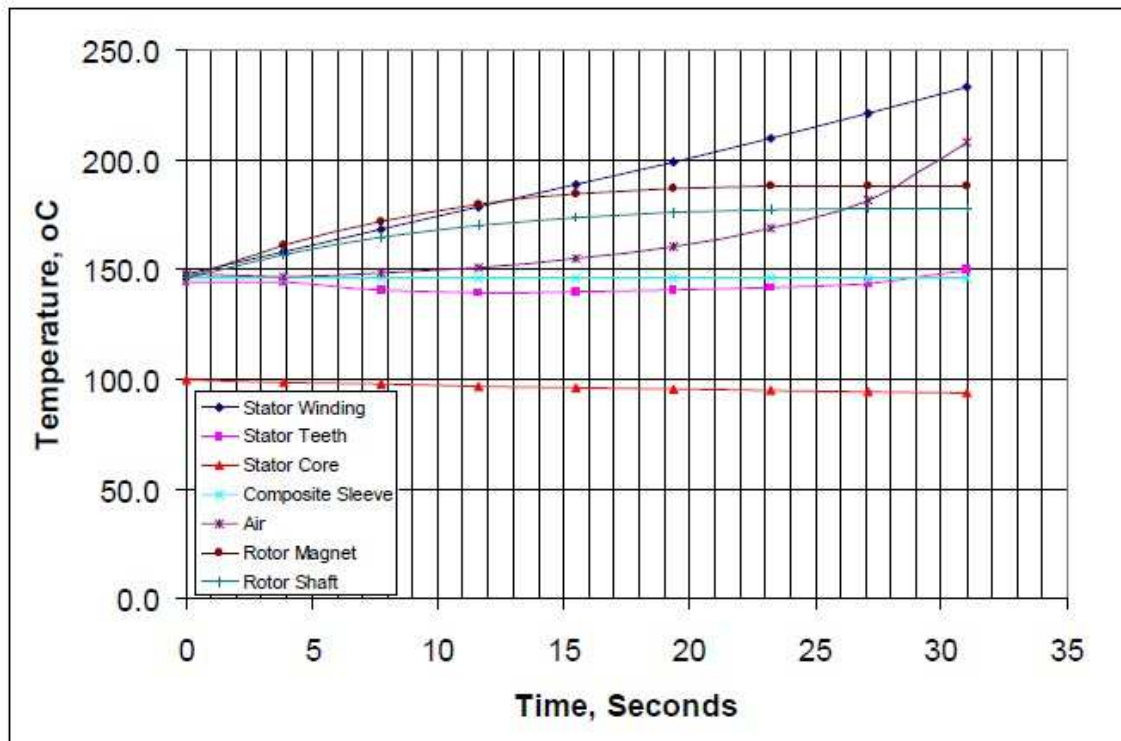
Kritický komponent	Maximální provozní teplota	Konstrukční limit pro nepřetržitý provoz
kompozitní bandáž	158 °C	177 °C
PM	158 °C	230 °C
vinutí	159 °C	200 °C

Interní chyby - analýzy se prováděly při poruše třífázového zkratu s nulovou impedancí a při zkratu mezi přípojnícemi a zbývající fází připojenou k zátěži (line-to-line). Při těchto přechodových analýzách se zohlednila sekvence nouzového vypnutí systému plynové turbíny včetně doby doběhu vlivem setrvačnosti. [13]

Výsledky (obrázek 3.17 a 3.18) u obou typů poruch naznačují, že HSA nezpůsobí žádné bezpečnostní riziko, jelikož provozní teploty jednotlivých dílů jsou stále v přijatelných mezích (určeno na základě údajů od výrobců a provozních zkušeností). [13]



Obr. 3.17 Charakteristiky prvků HSA v závislosti na teplotě (°C) a času (s) při třífázovém zkratu
Obrázek převzat v nezměněné formě z [13]



Obr. 3.18 Charakteristiky prvků HSA v závislosti na teplotě (°C) a času (s) při zkratu line-to-line
Obrázek převzat v nezměněné formě z [13]

Shrnutí a použití - přibližně asi koncem roku 2003 měly být dokončeny všechny výrobní procesy sestav rotorů a všech hlavních součástí statoru HSA. Ve [13] je přesněji uváděno, že integrace, dokončení a testování HSA bylo naplánováno na první čtvrtletí roku 2004. Mezi jeho výhody patří zejména: *vysoká provozní účinnost až 98 % při jmenovitém stavu, menší rozměry* oproti předešlým typům, *vysoká spolehlivost a nízká údržba*, systém přímého pohonu zajišťující *zjednodušenou montáž a integraci*. [13]

Dále je v [13] uváděno, že kromě aplikací na lodích je tato technologie (systém) kladně hodnocena pro další komerční aplikace jako např. *vlaků, turbo kompresory* či *akumulace energie*.

4 Zhodnocení nasazení strojů v průmyslu

Z předchozí kapitoly, kde jsou vypsány u každého konstrukčního provedení daného stroje jednotlivé dílčí použití a aplikace, jmenovitě jsou to např.: kogenerační jednotky s mikroturbínami, pohony pro ovládání ventilů turbín v elektrárnách, čerpadel a palivových čerpadel, pohony kosmonautických robotů, vrtacích souprav, ručního nářadí, spouštěcí pohony turbínových leteckých motorů, dále si své uplatnění najdou také v chemických či metalurgických provozech, vlacích, turbo kompresorech, vyplývá, že tyto stroje si najdou uplatnění v celé škále různých druhů průmyslu a jejich počet se bude s ohledem na jejich velmi dobré vlastnosti nadále zvyšovat, a proto jejich nasazení hodnotím velmi kladně, sám jsem překvapen a rozhodně jsem před začátkem vypracování této práce nečekal, že jejich oblast využití je až takto rozsáhlá.

Důležitá věc, kterou chci v této kapitole ještě zmínit je, že tyto stroje se budou jako každé stroje či technologie nadále inovovat a vylepšovat (počínaje např. pokrokem výkonové elektroniky za poslední desetiletí, chlazením těchto strojů, ložisky, použitím speciálních materiálů ad.), a tudíž se jejich aplikace a nasazení bude zvyšovat, což do jisté míry souvisí i s jejich následným budoucím hodnocením.

5 Shrnutí výhod a nevýhod

Začněme nejdříve u **výhod**. Mezi první hlavní výhodou těchto strojů patří to, že se nekonstruují s budícím vinutím, a tudíž zde nevznikají žádné budící ztráty v důsledku průchodu proudu přes toto vinutí, kde právě toto vinutí nahrazujeme PM, které jsou v dnešní době na velice vysoké úrovni jak z pohledu kvality, jednotlivých vlastností, tak hlavně buzení. Ještě o krok napřed je tak u PM ze vzácných zemin, což jsme se mohli dozvědět v kapitolách dříve. PM nám umožňují výrazně snížit velikost stroje a následnou hmotnost a samozřejmě zvýšit účinnost stroje s ohledem na nižší ztráty oproti konkurenčním typům el. toč. strojů. Po získání jednotlivých dat z příložených zdrojů jsem dospěl k závěru, že konkrétní druh PM ze vzácných zemin od vysokootáčkových motorů až po generátory čistě záleží na konkrétní aplikaci a hlavně pracovních podmínkách. Sm-Co magnety jsou voleny tam, kde hrozí značné působení (vliv) vysokých teplot a následné odmagnetování, NdFeB jsou využívány spíše v aplikacích, kde potřebujeme zajistit maximální magnetický výkon. Další výhodou u těchto strojů je použití rotorové bandáže, ve které jsou PM chráněny proti mechanickému namáhání a ostatním nepříznivým vlivům plynoucím z předešlých kapitol a bez které by tyto stroje nemohly nikdy dosahovat tak vysokých otáček. S tím souvisí samozřejmě i pokrok technologie v oblasti ložiskových podpor a samotných vysokootáčkových ložisek pro tyto stroje určené. Další výhodou, která zvyšuje účinnost celého stroje, je použití kvalitních materiálů s nízkými ztrátami pro jádro statoru. Druh a provedení jádra opět záleží na konkrétní aplikaci. Pokud se zaměříme pouze na vysokootáčkové generátory s PM, tak jejich hlavní výhodou oproti předešlým typům je, že obecně dosahují vyšších výkonů (př. 2 MW alternátoru pro lodní využití), účinností a hlavně jsou o mnoho menší co do celkového objemu v důsledku toho, že nepotřebují složité a objemné reduktory otáček či převodovky (je tím docíleno přímým spojením rotoru turbíny s rotorem příslušného generátoru). K této výhodě samozřejmě přispívá i pokrok v oblasti výkonové elektroniky v důsledku regulace výstupní frekvence či napětí a proudu. Shrnutí výhod je následující: stroje dosahují menších velikostí = hmotností, nároků na údržbu, mají větší účinnost, kompaktnost, dynamiku, přesnost a lineární moment ve velkém rozsahu otáček (zejména servo motory) a životnost.

Z pohledu **nevýhod** těchto vysokootáčkových strojů se může jednat o následující: vysoká cena PM ze vzácných zemin a speciálních materiálů pro konstrukci jádra statoru s nízkými ztrátami, chlazení těchto strojů může být někdy komplikované (pro

vysokootáčkové stroje je chlazení jedním z nejdůležitějších faktorů), rotorová bandáž je nejčastěji konstruována z uhlíkových vláken, které se chovají jako tepelný izolant - další důvod, proč je tak velký důraz kladen na chlazení. Další nevýhodou oproti klasickým el. toč. strojům je, že se vysokootáčkové rotory nemohou ukládat na tuhé ložiskové podpory - vyžaduje se vyvažování při provozních otáčkách s čímž souvisí jisté komplikace při navrhování uložení rotoru. Dále si je třeba uvědomit, že se jedná o stroje pracující při vysokých frekvencích s čímž souvisejí i vznikající ztráty např. vířivými proudy, kde všechny tyto ztráty je potřeba co nejvíce eliminovat.

Z těchto dvou odstavců vyplývá, že výhody značně převyšují nevýhody (není to jen můj subjektivní názor, ale tato fakta se uvádějí i ve zdrojích, ze kterých jsem čerpal), jinak by v jednotlivých odvětvích průmyslu nebyly tyto stroje tak upřednostňovány proti asynchronním či stejnosměrným strojům a jejich hodnocení nebylo tak kladné. S čímž souvisí i jejich aplikace pro různé druhy průmyslu.

Závěr

V této závěrečné práci jsem se snažil nastínit problematiku vysokootáčkových strojů s permanentními magnety a jejich aplikaci v průmyslu. Stručně jsem v úvodu popsal, z jakých elektrických točivých strojů tyto stroje vycházejí, jaké jsou používané materiály permanentních magnetů a jejich vlastnosti. Asi nejdůležitější část této práce je podle mého názoru třetí kapitola, kde popisuji konkrétní konstrukční provedení a aplikaci těchto strojů v průmyslu spolu s jejich vlastnostmi, ze kterých pak vyplývají následující dvě kapitoly (hodnocení jejich nasazení v průmyslu, výhody a nevýhody). Při zpracování jsem se snažil být co nejvíce objektivní a každý důležitý prvek jsem se snažil zařadit tak, aby byla práce co nejvíce srozumitelně pochopena i pro čtenáře mimo elektrotechnický obor. Podle mého názoru tato práce obsahuje všechny důležité prvky, které by měly technické práce zabývající se elektrickými točivými stoji na této úrovni splňovat tzn. od konstrukčního provedení přes výhody a nevýhody jednotlivých řešení po aplikaci.

Závěrem: jsem rád, že jsem mohl aspoň z určité části prostudovat tyto nové technologie v oblasti vysokootáčkových strojů a věřím, že se budou čím dál více inovovat a ubírat správným směrem k usnadnění, ať už naší práce či našeho života.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BARTOŠ, Václav, Josef ČERVENÝ, Josef HRUŠKA, Anna KOTLANOVÁ a Bohumil SKALA. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. ISBN 978-80-7043-444-4.
- [2] HRABOVCOVÁ, Valéria, Ladislav JANOUŠEK, Pavol RAFAJDUS a Miroslav LIČKO. *Moderné elektrické stroje*. Žilina: EDIS, 2001. ISBN 80-7100-809-5.
- [3] BORISAVLJEVIĆ, Aleksandar. *Limits, Modeling and Design of High-Speed Permanent Magnet Machines*. Zutphen, The Netherlands: Wörmann Print Service, 2011. ISBN 978-90-8570-837-7.
- [4] KARÁSEK, L. *Návrh vysokootáčkového motoru 350 kW 40 000 min⁻¹*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 95 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..
- [5] BLAHA, J. *Návrh synchronního stroje s permanentními magnety*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 74 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
- [6] HEINONEN, Timo. High-Speed PMGs Open up Full Converter Technology. In: *Renewable Energy World* [online]. 2010 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.renewableenergyworld.com/articles/print/special-supplement-wind-technology/volume-1/issue-1/wind-power/high-speed-pmgs-open-up-full-converter-technology.html>
- [7] Fengxiang WANG, Ming ZONG, Wenpeng ZHENG and Enlu GUAN, "Design features of high speed PM machines," *Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003.*, Beijing, China, 2003, pp. 66-70 vol.1. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1273812&isnumber=28507>
- [8] PESLAR, Jiří. Aerostatická, aerodynamická a magnetická ložiska. In: *Ústav konstruování* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=647
- [9] Servomotory a lineární motory: Střídavé servomotory s permanentními magnety. In: *VUES* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://www.vues.cz/cs/ke_stazeni/servomotory_a_linearni_motory
- [10] Nová řada synchronních servomotorů 2AML406B. *ELEKTRO* [online]. Praha, 2013, 23(8-9), 74 [cit. 2017-04-22]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/nova-rada-synchronnich-servomotoru-2aml406b--489>

- [11] KOLKA, Roman a Libor NEKLAPIL. Vysokootáčkový elektrický generátor HFG 125T. *ELEKTRO* [online]. Praha, 2011, **21**(3), 50-52 [cit. 2017-04-30]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vysokootackovy-elektricky-generator-hfg-125t--9768>
- [12] TOMAN, Jiří a Vladislav SINGULE. Nová řada EC motorů Maxon určená pro extrémní podmínky. *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha, 2011, **17**(3), 41-43 [cit. 2017-05-03]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/nova-rada-ec-motoru-maxon-urcena-pro-extremni-podminky-2011_03_43198_5687/
- [13] HUYNH, Co, Larry HAWKINS, Ali FARAHANI a Patrick MCMULLEN. Design and Development of a Two-Megawatt, High Speed Permanent Magnet Alternator for Shipboard Application. *Calnetix Technologies* [online]. Cerritos, California [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <https://www.calnetix.com/resource/electric-motor-generators/design-and-development-two-megawatt-high-speed-permanent-magnet>