

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vývoj synchronních strojů

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

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

Jméno a příjmení: **Kryštof BENEŠ**
Osobní číslo: **E10B0194P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Vývoj 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 historický vývoj synchronních strojů.
2. Popište současné dělení synchronních strojů běžně používaných v praxi.
3. Diskutujte předpokládaný vývoj synchronních strojů (materiály, vlastnosti, účinnost ...)

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:

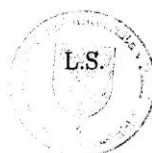
Ing. Michaela Vachtlová


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

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

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


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na historický vývoj synchronních strojů, jejich rozdělení a použití a také na popis nových konstrukcí těchto strojů.

Text je rozdělen do tří částí:

- první se zabývá vývojem točivých strojů,
- druhá jejich současným rozdělením,
- třetí část popisuje konstrukční novinky a předpokládaný konstrukční vývoj synchronních strojů. Dále zahrnuje budoucí využití synchronních strojů.

Klíčová slova

Elektrický stroj, synchronní, turbogenerátor, hydrogenerátor, střídavé, stejnosměrné.

Abstract

Development of synchronous machines

The presented thesis is focused on the historical development of synchronous machines, their classification and description of the present design and future use of synchronous machines.

The text is divided into three parts:

- the first part deals with the development of rotating electrical machines,
- second part describes their present division,
- the third section describes the future use of synchronous machines.

Key words

Electrical machine, synchronous, turbogenerator, hydrogenerator, amplitude, direct.

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 5.6.2013

Kryštof Beneš

.....

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	1
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	2
1 POČÁTKY VÝVOJE ELEKTRICKÝCH STROJŮ	3
1.1 POČÁTKY FYZIKÁLNÍCH PRINCIPŮ ELEKTRICKÝCH STROJŮ	3
1.2 STEJNOSMĚRNÉ ELEKTRICKÉ STROJE	4
1.2.1 První experimenty s proudovodičem a PM	4
1.2.2 První stejnosměrné stroje a dynama	6
1.2.3 Werner von Siemens	8
1.2.4 Přechod z prstencového rotoru na bubnový	10
1.2.5 Použití SS strojů v minulosti	11
1.2.6 Shrnutí historie SS strojů	12
1.3 PRVNÍ STŘÍDAVÉ STROJE	13
1.3.1 Teslův asynchronní elektrický stroj	13
1.3.2 První synchronní generátory	16
1.3.3 Shrnutí historie střídavých strojů	21
1.4 VÝROBA STŘÍDAVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ V MINULOSTI	23
1.4.1 Závody ŠKODA	24
2 SOUČASNÉ DĚLENÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ	27
2.1 VÝZNAM A POUŽITÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ	27
2.1.1 Základní štitkové údaje synchronního stroje	28
2.2 SYNCHRONNÍ GENERÁTORY	29
2.2.1 Turbogenerátory	29
2.2.2 Hydrogenerátory	34
2.3 SYNCHRONNÍ MOTORY	40
2.3.1 Synchronní motor s PM pro trakční pohony	42
2.4 SYNCHRONNÍ KOMPENZÁTORY	44
2.5 SOUČASNÁ SITUACE VÝROBY GENERÁTORŮ U NÁS A VE SVĚTĚ	44
2.5.1 Výroba synchronních generátorů u nás	45
2.5.2 Výroba synchronních generátorů ve světě	47
3 PŘEDPOKLÁDANÝ VÝVOJ MATERIÁLŮ A VLASTNOSTÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ	49
3.1 VÝVOJ VLASTNOSTÍ A MATERIÁLŮ SYNCHRONNÍCH STROJŮ	49
3.1.1 Obecné tendence vývoje elektrických strojů	50
3.1.2 Předpokládaný vývoj synchronních strojů	50
3.2 SYNCHRONNÍ STROJE BUDOUCNOSTI	52
3.2.1 Synchronní stroje s PM magnety	53
3.2.2 Synchronní stroje využívající supravodivé materiály	65
3.2.3 Porovnání HTSG a PMG	69
3.2.4 Trigenerační a kogenerační jednotky	71
ZÁVĚR	78
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	79
PŘÍLOHY	86

Úvod

Synchronní stroje se staly neodmyslitelnou součástí našeho života díky své nezastupitelné roli při výrobě elektrické energie ve většině hydroelektráren, vodních i tepelných elektráren. Počátky synchronních strojů spadají do konce devadesátých let 19. století, kdy roku 1887 vynalezl F. Augus Haselwander první komerčně vyráběný trojfázový synchronní generátor, čímž položil základ výzkumu a vývoji synchronních strojů a jejich využití.

Cílem této bakalářské práce je popsat základní historické etapy vývoje elektrických strojů, zárodky fyzikálních principů jejich fungování a nastínit důležité objevy a milníky v rozvoji stejnosměrných a střídavých elektrických strojů. Z nich pak zejména vývoj strojů synchronních včetně jejich současného dělení. Další kapitola se zabývá konkrétními typy turbogenerátorů, hydrogenerátorů a též jsou v ní uvedeny některé významné elektrotechnické závody, které vznikly na našem území i ve světě.

Synchronní stroje jsou elektrické stroje, které se nejvíce používají v generátorickém režimu tedy na přeměnu mechanické energie na elektrickou. Turbogenerátory se používají tam, kde pohon generátoru dosahuje vysokých otáček – spalovací a jaderné elektrárny, hydrogenerátory tam, kde se očekávají otáčky pohonu nižší – vodní nebo větrné elektrárny.

Významný pokrok v konstrukci synchronních strojů znamenalo zavedení permanentních magnetů do rotoru a nahrazení klasických měděných vinutí vinutím ze supravodivých materiálů. Nahrazením měděných vodičů vysokoteplotními supravodiči, se docílilo snížení hmotnosti stroje až o 50%.

Seznam symbolů a zkratek

<i>AC</i>	.....	Střídavý proud
<i>AM</i>	.....	Asynchronní motor
<i>DC</i>	.....	Stejnoseměrný proud
<i>f</i> [Hz]	.....	Frekvence
<i>HTS</i>	.....	Vysokoteplotní supravodič
<i>JE</i>	.....	Jaderná elektrárna
<i>MG</i>	.....	Motor – generátor
<i>p</i>	.....	Počet pól-párů
<i>PM</i>	.....	Permanentní magnet
<i>SS</i>	.....	Stejnoseměrný
<i>SM</i>	.....	Synchronní motor
$1f, 2f, 3f$	.....	Počet fází

1 POČÁTKY VÝVOJE ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Historický vývoj konstrukce strojů a jejich vlastností lze rozdělit do tří základních etap.

První etapa od začátku letopočtu do poloviny 19. století (do roku 1860), byla etapa, ve které byly prováděny experimenty s modely, které neměly žádný význam pro praxi a měly velmi daleko k dnešním elektrickým strojům. Výkony, které tyto modely vyvíjely, byly velice malé a nebyly v praxi využitelné. Převládala doba páry, parní stroje. V této době byli významnými průkopníky například: Alessandro Volta, Michael Faraday, Werner von Siemens atd.

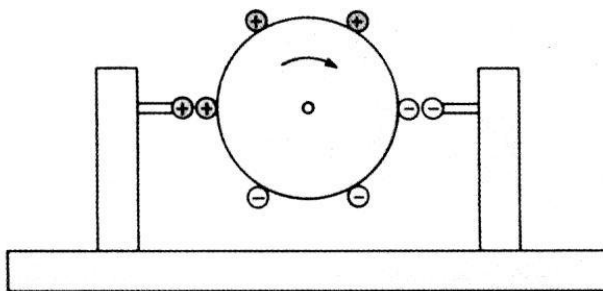
Druhá etapa (r. 1860 - 1910) byla etapa, kdy se elektrické experimenty zdokonalovaly, začínaly se realizovat teoretické modely, účinnost se zvyšovala a výkon také. V teoretické oblasti bylo významným mezníkem sepsání matematických tzv. Maxwellových rovnic. Tyto rovnice sepsal významný fyzik James Clerk Maxwell (1831-1879). Matematickým popsáním elektromagnetického pole vznikla možnost zdokonalovat modely na papíře a poté realizovat. Elektrické stroje začaly být mnohem zajímavější pro veřejnost a vytlačovaly parní stroje. Nejdříve se rozvíjely stejnosměrné stroje, ale roku 1888 vynalezl a nechal si patentovat Nikola Tesla 2f a 3f asynchronní motor, který pracoval s napájením střídavým proudem. Roku 1887 vynalezl F. August Haselwander první, trojfázový synchronní generátor, který se začal komerčně vyrábět.

Třetí etapa (r. 1910 až současnost) je etapou, kdy elektrické stroje začínají nabírat na výkonu a účinnosti. Stávají se nepostradatelnou součástí lidské společnosti. Rozvíjí se přenos elektrické energie, závislost společnosti na elektrické energii. Dochází ke zdokonalování materiálů, které jsou použity k výrobě elektrických strojů, účinnosti se blíží prakticky k dokonalosti. [1]

1.1 Počátky fyzikálních principů elektrických strojů

Za průkopníka principů točivého elektrického pole bychom mohli označit Benjamina Franklina (1706-1790), který v roce 1750 sestrojil model, který převáděl elektrickou energii na mechanickou a naopak. Model byl sestrojen z izolačního kulového tělesa, na kterém byly připevněny vodivé kulové elektrody, kterými byl přenášen elektrický náboj k pevným

elektrodám kulového průřezu (Obr. 1). Tyto pevné elektrody byly připojeny k Leydenské láhvi¹. Model tohoto zařízení byl sestaven v současnosti a měl při napětí 50 kV výkon 2W, otáčky 500 za minutu a velice nízkou účinnost 5%. [1]



Obr. 1 První elektrický motor – Benjamin Franklin, rok 1750, převzato z [1].

¹Leydenská láhev – Skleněná láhev chovající se jako kondenzátor. V roce 1745 ji vynalezl Pieter van Musschenbroek, který působil na univerzitě v Leydenu.[2]

1.2 Stejnosměrné elektrické stroje

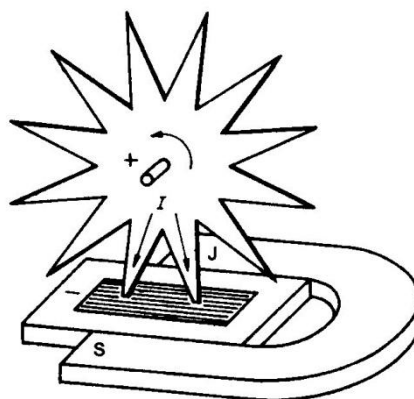
První pokusy o sestavení strojů vycházely tedy ze stejnosměrného proudu. Je tedy zřejmé, že se nejprve vyvíjely stroje stejnosměrné a poté až stroje na proud střídavý.

Alessandro Volta (1745 - 1827) byl italský fyzik, proslulý svými objevy v oboru elektrotechniky. Později po něm byla pojmenována jednotka elektrického napětí - U[Volt]. Vynalezl například kondenzátor, nebo elektrický článek, který byl jeho nejdůležitějším objevem. Volta jej nazval na počest svého krajana Galvaniho galvanickým článkem. Luigi Galvani byl italský lékař, který prováděl pokusy s účinky elektrického proudu na žabí stehna. Proud, kterého byl tento článek zdrojem, byl stejnosměrný. [1]

1.2.1 První experimenty s proudovodičem a PM

Prvním vědcem, jenž využil působení magnetického pole na proudovodič, byl zřejmě Peter Barlow (1780-1962). Model, který sestavil, byla hvězdice, která se otáčela v magnetickém poli permanentního magnetu. Hroty byly ponořeny do nádoby se rtutí, a tato

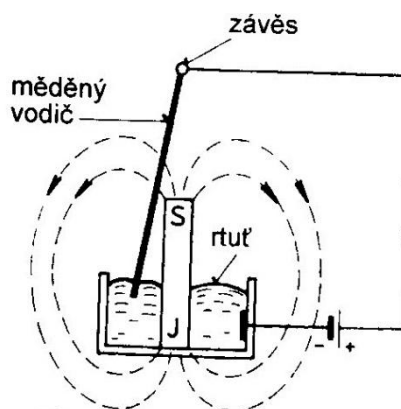
nádobka s hřídelí hvězdice byla vodivě spojena s galvanickým článkem (Obr. 2).



Obr. 2 Princip „Barlowa kolečka“, převzato z [1].

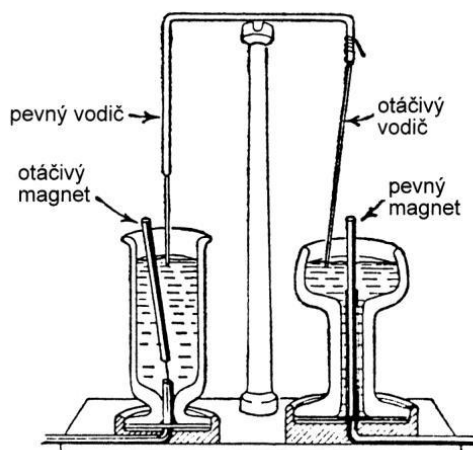
Na hroty, přes které procházel elektrický proud, působila síla. Na kolečko jako celek působil točivý moment a kolečko se tedy začínalo otáčet. Tento model by mohl fungovat i jako dynamo, tedy převádět točivý moment na elektrickou energii. [1]

Další vědcem byl M. Faraday, který provedl pokusy zřejmě inspirované modelem „Barlowova kolečka“. Vymyslel model, ve kterém byl vodič zavěšen na závěsu a koncem ponořen do rtuti. Nádoba se rtutí a závěs byly vodivě spojen s galvanickým článkem. Při průchodu proudu proudovodičem, se měděný vodič otáčel kolem osy PM podle obr. 3. [1]



Obr. 3 Faradayův experiment, převzato z [1].

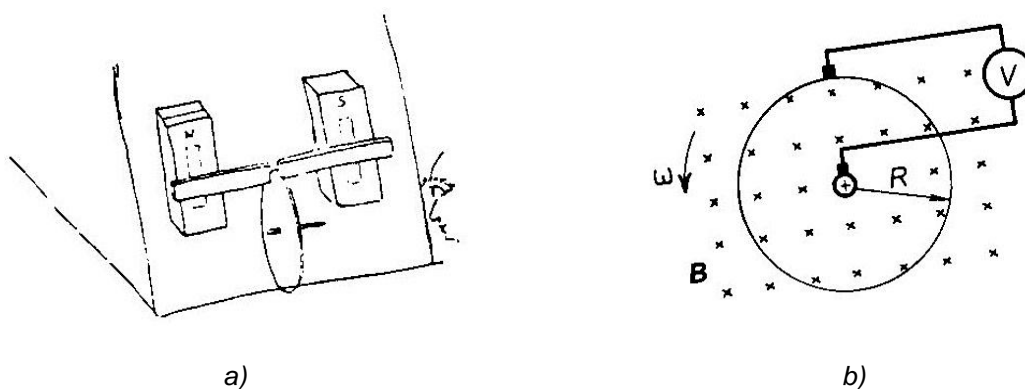
Tento experiment mohl fungovat jako motor i jako dynamo. M. Faradaye napadlo, že by mohl převádět i mechanickou energii na elektrickou. Spojil tyto dva experimenty dohromady a vytvořil prototyp „elektrické hřídele“. Tento princip je znázorněn na obr. 4.



Obr. 4 Faradayův experiment, tzv. „elektrické hřídle“, zařízení vlevo funguje jako generátor a zařízení vpravo jako motor, převzato z [1].

1.2.2 První stejnosměrné stroje a dynamy

Za první plně fungující stejnosměrný stroj bychom mohli považovat tzv. Faradayův „kotouček“. Tento stroj vynalezl M. Faraday roku 1830.

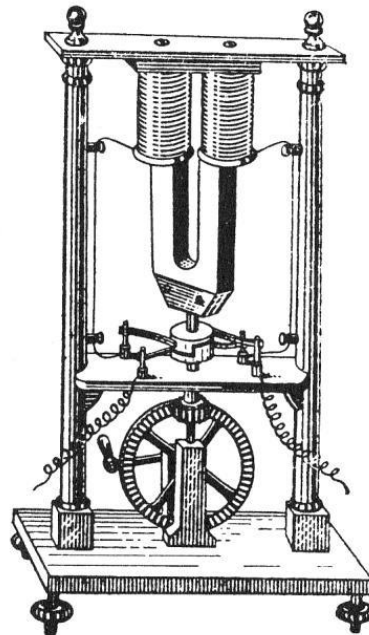


Obr. 5 Faradayův první homopolární stejnosměrný stroj, a) náčrtek z Faradayova deníku, b) princip, převzato z [1].

Zkrátka vznikly další typy elektrických strojů, které měly působit jako zdroje stejnosměrného napětí. Jejich tvůrci navrhovali stroje s mechanickým usměrňovačem střídavého napětí – komutátorem. Tato dynamy se používala nejčastěji k osvětlení. Indukované střídavé napětí o nízké frekvenci způsobovalo, že žárovky problikávaly. Později se ale zjistilo, že není třeba střídavé napětí usměrňovat, ale jen provozovat na vyšší frekvenci.

Jeden z prvních strojů vybavených komutátorem, zkonstruoval roku 1832 francouzský

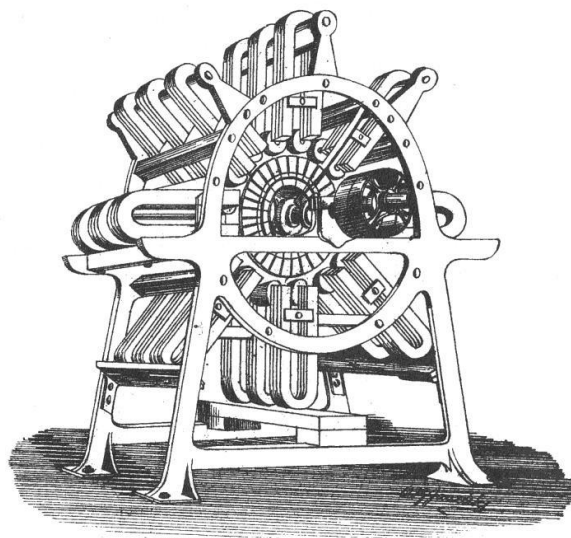
mechanik Hypolit Pixii (Obr. 6). Otáčející se PM tvaru podkovy indukoval ve statických cívkách napětí, které bylo přes mechanický přepínač usměrněno. [1]



Obr. 6 Dynamo Hypolyta Pixiieho s mechanickým přepínačem, převzato z [1].

Pixiieho dynamo bylo dále konstrukčně zdokonalováno. Například Emil Stöhrer, roku 1843 místo jednoho otáčivého permanentního magnetu, použil tři pevné navzájem pootočené podkovité magnety. Nad póly těchto magnetů umístil šest otočných cívek. Změnou magnetického toku spřaženého s cívkami se v cívkách indukovalo napětí. Tím, že Stöhrer použil více cívek a více PM magnetů, se v cívkách indukovalo větší střídavé napětí, než u Pixiieho dynamu. [1]

Další kdo vycházel z modelu Pixiieho dynamu a následně jej zdokonalil, byl profesor Petřina. Profesor Petřina vymyslel, že když zavede pohyb cívky kolmo k rovině magnetů, bude pole v oblasti cívek intenzivnější a bude se tedy indukovat větší střídavé napětí. Petřinovo dynamo bylo v letech 1849-52 dále zdokonaleno francouzskou firmou *Compagnie d'Alliance*. Rotor byl složen z mosazných kulových desek, ve kterých bylo uloženo 16 cívek. Takovýto rotor rotoval mezi póly PM podkovovitých magnetů. Tyto magnety byly rovnoměrně rozmístěny po 45° kolem celého rotoru, obr. 7.



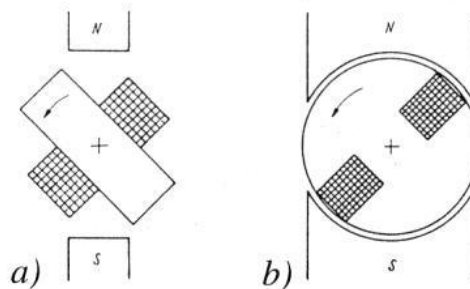
Obr. 7 Elektromotor firmy Compagnie d'Alliance, převzato z [1].

Doposud uváděné elektrické stroje neměly šanci na praktické využití. Disponovaly velkými rozměry, malým elektrickým výkonem a malou účinností. Například tzv. „Jakobiho motor“ r. 1838 měl výkon jen 500W, při napájení z 320 galvanických článků. Tento motor získával moment vzájemným přitahováním a odpuzováním podkovovitých elektromagnetů. Tyto elektromagnety spínal v patřičném sledu speciálním komutátorem. Jakobiho motor byl například využit a předváděn na pohon člunu na řece Něvě v Petrohradu. Experiment však nebyl moc úspěšný a tento motor nebyl dále využíván.

Jako první si nutnost lepšího vyřešení magnetického obvodu celého elektromotoru uvědomil Werner von Siemens. Cílem bylo dosáhnout větších výkonů a účinnosti a zmenšení rozměrů celého stroje. [1]

1.2.3 Werner von Siemens

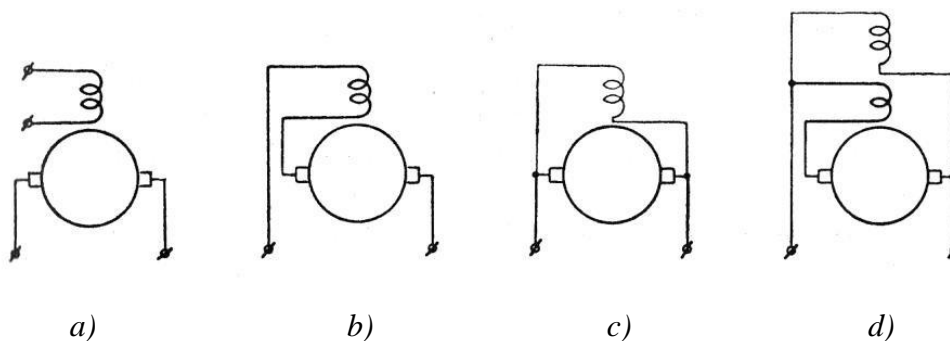
Německý vynálezce a průmyslník Werner von Siemens při zdokonalování magnetického obvodu stroje došel k tomu, že když navine cívku, do níž se bude indukovat napětí, na železné jádro a bude s ní otáčet mezi póly elektromagnetů, tak docílí podstatně větších indukovaných napětí. Hlavně také zmenší ztráty rozptylovými toky. Indukované napětí zvětšil ještě tím, že zvolil vhodný tvar rotujícího jádra – kotva tvaru dvojitého T, obr. 8. b).



Obr. 8 Siemensovo řešení magnetického obvodu. a) princip, b) kotva tvaru dojitého T, W. Siemens r. 1856, převzato z [1].

V roce 1867 přišel Siemens na tzv. dynamoelektrický princip. Díky tomuto vynálezu, bylo možné nahradit PM pomocí elektromagnetů. Elektromagnety byly výhodnější vzhledem k možnosti regulace otáček u motorů a regulace napětí u dynam. Nejprve byly elektromagnety napájeny z baterie (cizí buzení) a postupně, aby se nemusel k buzení používat externí zdroj, využil remanentního magnetismu². V důsledku remanentního magnetismu bylo v kotvě indukováno napětí i v nenabuzeném stavu elektromagnetů. Budící vinutí pak bylo připojeno sériově nebo paralelně ke kotvě. Tímto se dosáhlo toho, že se budící proud postupně zesiluje do té doby, než se v kotvě naindukují jmenovité napětí. Tímto vznikl SS stroj s vlastním buzením a to se sériovým nebo paralelním. Kombinace sériového a paralelního buzení se nazývá kompaundní, obr. 9. [1]

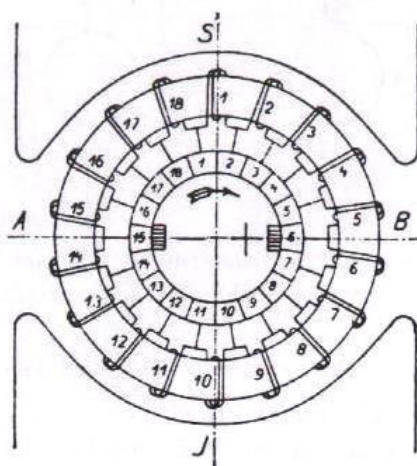
² Remanentní magnetismus - zbytková magnetizace – zbytek magnetismu, který si podrží feromagnetický materiál (feromagnetikum) po vymizení dříve působícího vnějšího magnetického pole.



Obr. 9 Siemensův stroj s cizím buzením a), sériovým b), paralelním buzením c), kompaundantním buzením d), převzato z [1].

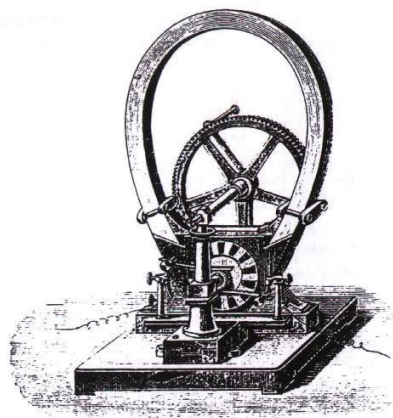
1.2.4 Přejchod z prstencového rotoru na bubnový

Dalším významným mezníkem bylo, když roku 1860 Ital Antonio Pacinotti (1807-1889) sestrojil rotor ve tvaru prstence. Tento prstenec byl zhotoven ze svinutého železného vodiče. Jeho myšlenka zprvu nikoho nezaujala. Až v roce 1873 ji znovu použil Belgičan Zénobe Théophile Gramme (1826-1901). Pro rotor tohoto typu se ujalo označení „Grammova kotva“ nebo „Grammův prstenec“, obr. 10. Tyto stroje s Grammovou kotvou již vykazovaly lepší výkony. [1]



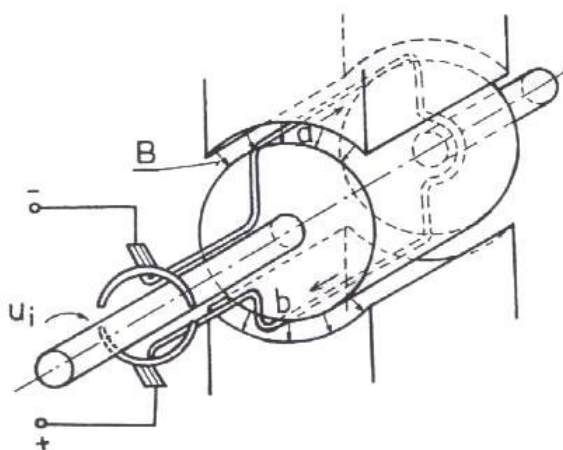
Obr. 10 Rotor na principu Grammova prstence, převzato z [1].

Výhodou stejnosměrného dynama s Grammovou kotvou, ve srovnání se Siemensovým dynamem, bylo nepřilíš zvlněné indukované napětí na svorkách stroje. Naopak nevýhodou tohoto dynama bylo, že vrstva na vnitřní straně prstence, byla magneticky odstíněna a neindukovalo se do ní napětí. To mělo za důsledek menší indukované napětí, ztráty a tím pádem menší účinnost. Výroba Grammova prstence byla velice složitá, prstenec se musel ručně mechanicky uchytit. [1]



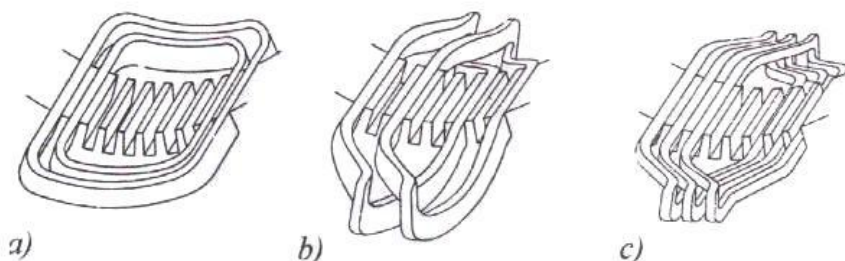
Obr. 11 Grammovo dynamo ruční pohon, r. 1880, převzato z [1].

Nedostatky SS motoru s Grammovým rotorem odstranil inženýr firmy *Siemens*, Fridrich von Hefner - Alteneck (1845 - 1904). Zavedl bubnové vinutí. U bubnových vinutí, jsou aktivní obě strany cívek. Jedna strana cívky leží pod jižním pólem a druhá strana pod pólem severním. Takto složený SS motor (dynamo) se používá dodnes, obr. 12. [1]



Obr. 12 Bubnové provedení rotoru s komutátorem, převzato z [1].

K dalšímu zdokonalení došlo, když firma *Westinghouse* začala vyrábět drážkové kotvy vyrobené z plechů, obr. 13. Takto vyrobený SS motor, již připomíná současný SS motor. [1]



Obr. 13 Statorové vinutí složené v drážkách rotoru: a), b) jednovrstvé vinutí, c) dvouvrstvé vinutí, převzato z [1].

1.2.5 Použití SS strojů v minulosti

Stejnoseměrné motory se začaly ve větší míře používat pro městskou dopravu. Prvním praktickým využitím v dopravě byl elektrický vláček, vyrobený formou *Siemens & Halske*. Lokomotivka měla elektrický výkon 2,2 kW a táhla za sebou 3 vozíky. Výstavu v Berlíně, kde firma v roce 1879 lokomotivu prezentovala (obr. 14), navštívil i František Křížík. Tato ukázka mu byla inspirací pro uskutečnění elektrické dráhy u nás.

Stejnoseměrný stroj měl i praktické využití při městském osvětlování. Speciálně Grammovo dynamo, poháněné např. pojezdou lokomobilou (Lokomobila je mobilní komplet parního kotle a parního stroje), bylo zdrojem proudu pro napájení „Plzeňské obloukovky“, vynalezené přibližně roku 1880 Františkem Křížíkem a využitě pro osvětlení kupř. při výstavě v Paříži v roce 1881. František Křížík byl zastáncem SS rozvodu elektrické energie a i jeho vynálezy tedy směřovaly jen touto cestou.



Obr. 14 Elektrický vláček vyroben firmou Siemens & Halske Electric Railroad, ukázaný na výstavě v Berlíně roku 1879.

1.2.6 Shrnutí historie SS strojů

1750 - Benjamin Franklin sestrojil model, který převáděl elektrickou energii na mechanickou a naopak.

1790 - Peter Burflow sestrojil hvězdicí otáčející se v poli PM.

1800 až 1830 - Michael Faraday a jeho vynálezy.

1832 - Hipolit Pixii sestrojil první SS stroj s komutátorem.

1850 - Petřinovo dynamo.

1856 - Werner Von Siemens byl průkopníkem dvojité „Té“ klece.

1867 - Werner Von Siemens vymyslel použití elektromagnetů v rotoru místo PM, což zlepšilo regulaci otáček. První sériové a paralelní buzení stroje.

1873 - Z. T. Gramme jako první použil vinutou kotvu.

1880 - Fridrich Von Altentech vymyslel bubnový rotor.

1880 - Ve společnosti *Westinghouse*, jako první použili kotvy z plechů a posadili vinutí do drážek

1880 - Prezentace lokomotivy *Siemens & Halske* na výstavě v Berlíně.

1.3 První střídavé stroje

Až do 90. let 19. století se používaly výhradně stejnosměrné stroje a stejnosměrný rozvod elektrické energie. V 90. letech se začínají uplatňovat střídavé elektromotory a generátory. Přenos elektrické energie se začíná provádět střídavými dvoufázovými a později trojfázovými vedeními. V této kapitole z historie elektrotechniky sehráli významnou roli geniální elektrotechnici Nikola Tesla, M. O. Dolivo-Dobrovolskij nebo též F. August Haselwander. U nás se o zvýraznění možností střídavých strojů zasloužil zejména Emil Kolben a z teoretiků pak Karel Domalíp. [1]

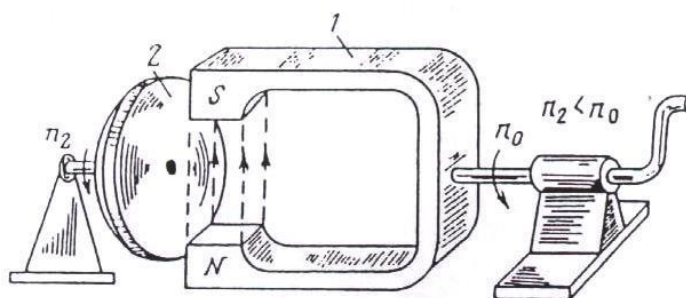
Nikola Tesla, byl považován za nejvýznamnějšího elektrotechnika všech dob. Získal 219 patentů, z nichž některé následně změnily další vývoj elektrotechniky.

1.3.1 Teslův asynchronní elektrický stroj

Vynález asynchronního motoru měl pro vývoj elektrotechniky značný význam. Asynchronní stroj je nejpoužívanějším motorem v průmyslu současnosti. Za vynálezce se považuje Nikola Tesla, který má na tento stroj patent.

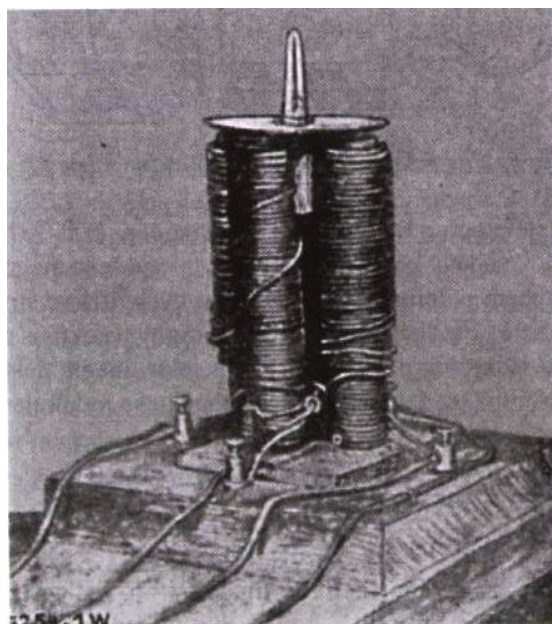
Jeho předchůdce, Walter Baily, roku 1879 otáčel permanentním podkovovitým magnetem kolem jeho osy a tím vytvořil magnetické točivé pole. Umístil do tohoto pole vodivý kotouček, který se začal též otáčet. Jeho rychlost však byla menší než rychlost magnetického pole, které vyvolává PM.

V Bailyho pokusu indukuje točivé pole PM magnetu vířivé proudy v kotoučku, které jsou v iteraci s točivým polem magnetu. Tento jev již dříve popsal Michael Faraday jako *elektromagnetickou indukci*. [1]



Obr. 15 Bailyho pokus s mechanickým točivým polem z r. 1879, převzato z [1].

Další Bailyho experiment byl předzvěstí asynchronního stroje. Dva podkovové elektromagnety, vzájemně pootočené o 90° , byly střídavě magnetovány proudem a tím se měděný kotouček, uložený nad magnety, začal otáčet. Magnetování zde bylo prováděno mechanickým ručním přepínačem.



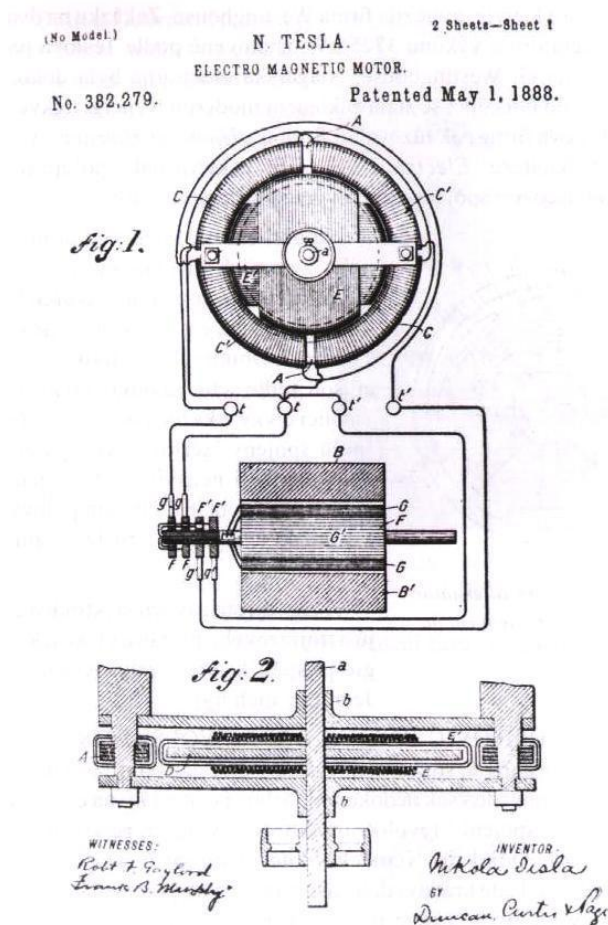
Obr. 16 Pokus, jímž se Baily přiblížil asynchronímu motoru, roku 1879, převzato z [1].

Je známo, že k otáčení asynchronního motoru je potřeba, aby byly posunuty cívky ve statoru prostorově a proud, který je napájí, musí být v každé cívce posunut časově.

První kdo k takové myšlence dospěl, byl Ital Galileo Ferraris již v roce 1885. Točivé pole realizoval pomocí dvěma páry cívek s osami k sobě kolmými a proudem, který je napájel, byl posunut o $\frac{1}{4}$ periody časově. Domníval se, že by při tomto principu docházelo k velkým ztrátám a malé účinnosti, tak tomuto objevu nepřikládal velký význam. [1]

Testlův asynchronní stroj

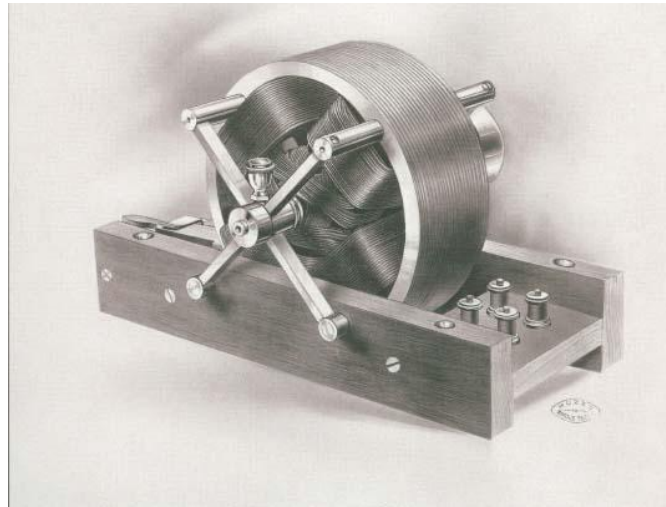
Tesla ve svých spisech uvádí, že k myšlence točivého pole došel již v roce 1882 a o rok později sestrojil první funkční asynchronní stroj. V roce 1888 Tesla získal patent na 2f. a 3f. asynchronní motor. V dalších letech získal mnoho dalších patentů, zejména pak na synchronní motor a na přenos elektrické energie vícefázovým systémem.



Obr. 17 Část patentního spisu N. Tesly z roku 1888, „Electro-magnetic-motor“, převzato z [1].

Tesla nejdříve navrhoval přenosové soustavy dvoufázové se čtyřmi vodiči a také trojfázové se čtyřmi vodiči. Ale již roku 1888 poznal výhody při zapojení vinutí do hvězdy a trojúhelníka. Tato skutečnost rozhodla, že prováděl další výzkum trojfázovému systému. Důležité bylo, jaký zvolí kmitočet střídavého proudu. Tesla zprvu pracoval s kmitočty 125Hz a 133Hz. Proud s těmito kmitočty se používal k napájení osvětlení z toho důvodu, aby světla vlivem frekvence neblíkala. Později Nikola Tesla přišel na to, že vysokými frekvencemi signálu, vznikají vyšší ztráty v železe. Udělal kompromis a přešel na frekvence 25 Hz a 30Hz - tyto frekvence naopak způsobovaly blikání žárovek. Udělal tedy další kompromis a v USA

zavedl kmitočet 60Hz vhodný jak pro osvětlení, tak i pro motory. V Evropě bylo později zavedeno $f = 50\text{Hz}$. [1]

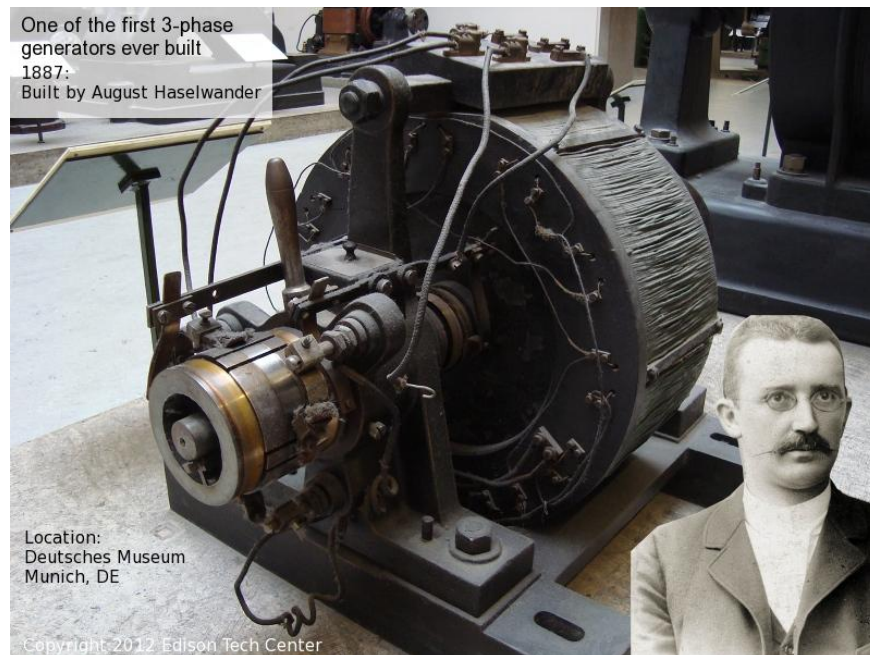


Obr. 18 Teslův první 2f. asynchronní motor roku 1888.

1.3.2 První synchronní generátory

Skutečné počátky synchronních strojů jsou již v počátcích devadesátých let 19. století. Roku 1887 vynalezl F. Augus Haselwander první, trojfázový synchronní generátor (Obr. 19). Tento stroj produkoval elektrický výkon $P = 2,8 \text{ kW}$ při 960 otáčkách/min. Výstupní frekvence $f = 32 \text{ Hz}$. Dodnes je tento stroj vystaven v Německém Muzeu v Mnichově.

První, a pro synchronní generátory velice významný, byl trojfázový vysokonapěťový elektrický přenos proudu z Lauffenu am Neckar na mezinárodní výstavu do Frankfurtu. Tento přenos mohl být zrealizován jen kvůli tomu, že napětí generoval trojfázový hydrogenerátor o výkonu 300 koní. Tento hydrogenerátor byl vyroben v *Maschinenfabrik Oerlikon* v Zurichu. Roku 1891, když se tento elektrický přenos stal skutečností, byl vývoj synchronních strojů teprve ve svém počátku.

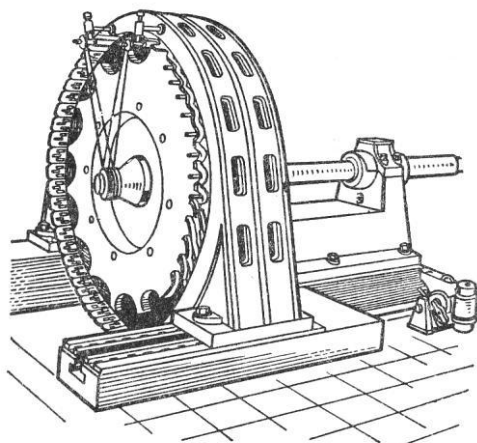


Obr. 19 Vůbec první komerčně vyráběný 3 fázový generátor, převzato z [15].

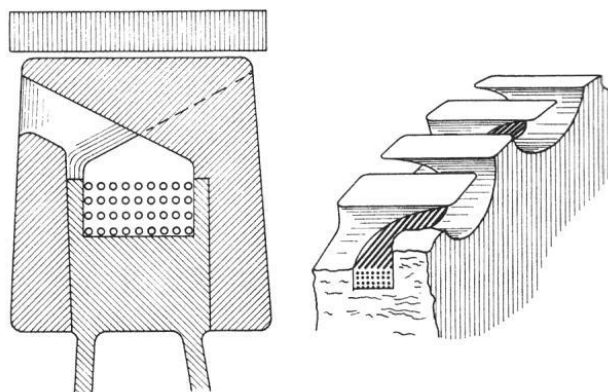
Již zmíněný střídavý přenos proudu z Lauffenu do Frankfurtu, byl tím největším převratem v historii synchronních generátorů. Stroj, zkonstruovaný vynálezcem Mikhail Dolivo-Dobrovsky v Lauffenu, k výrobě elektřiny pro tento pokus, měl tyto parametry:

- výstupní výkon – 210 kW
- sdružené indukované napětí – 95 V
- frekvence – 40 Hz
- výstupní proud – 1400 A
- 32 pólů („drápového“ typu – claw type)
- účinnost 96 %

Výstupní napětí, které bylo 95 V, bylo následně transformováno trojfázovým olejovým transformátorem na konečnou hodnotu 15 kV. Tato hodnota napětí je daleko příznivější pro střídavý přenos proudu.



Obr. 20 První hydrogenerátor, vodní elektrárna v Lauffenu, převzato z [2].

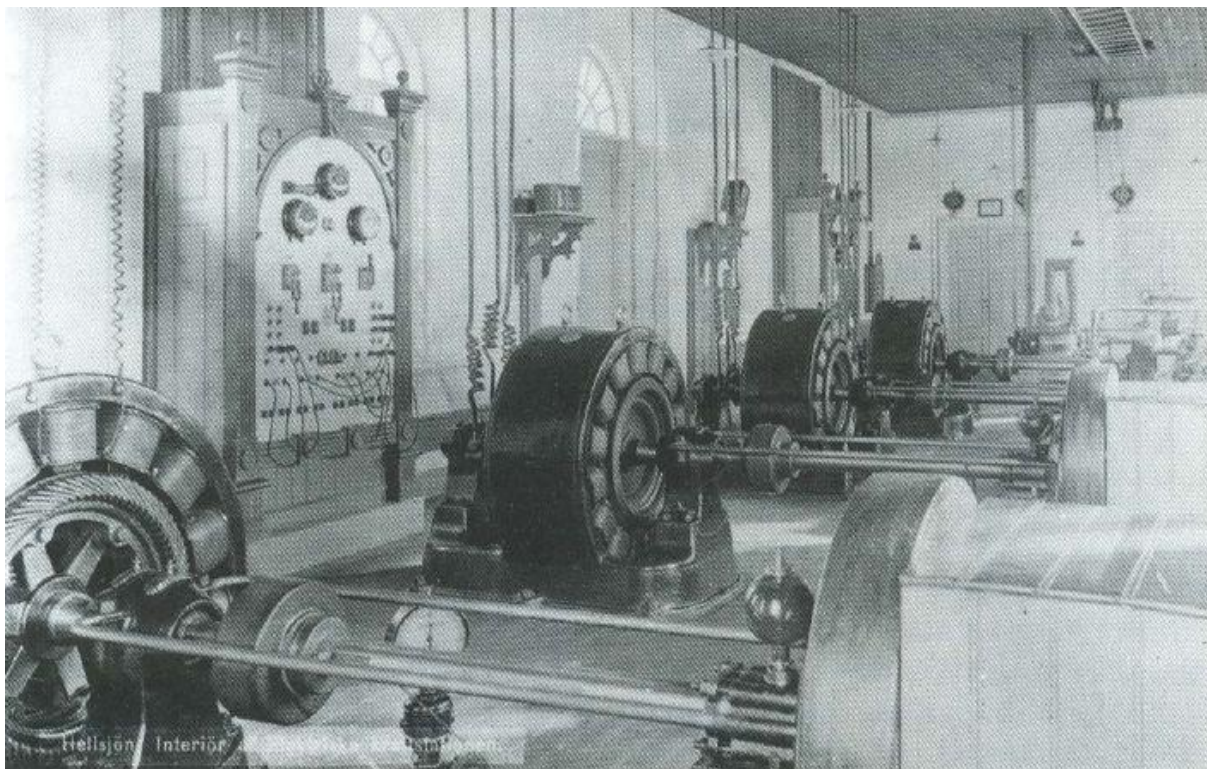


Obr. 21 „Claw“ type rotor synchronního alternátoru pro elektrárnu v Lauffenu, převzato z [2].

Hydrogenerátor, který byl použit v elektrárně v Lauffenu měl typ rotoru - „claw type“. Tento typ rotoru byl postupně opuštěn a byl nahrazen dnes již známým rotorem s vyniklými póly. „Claw type“ rotor byl nejdříve použit i u vysoko otáčkových generátorů – turbogenerátorů. [16]

1.3.2.1 Hydrogenerátory

Nejdůležitější aplikace synchronních hydrogenerátorů bylo a i doposud je ve vodních elektrárnách. Hydrogenerátory se postupem časem musely na pohon vodní turbínou adaptovat. Zmizelo řemenové připojení hřídele stroje s turbínou a bylo nahrazeno přímým šroubovým spojením s hřídelí turbíny. Do dnešní doby, bylo vynalezeno horizontální a vertikální připojení hřídele. Speciální případ vertikálního připojení, je tzv. „Umbrella type“, které zkonstruoval Charles E. Brown v 90. letech 19. století. Tyto typy strojů jsou vzhledově podobné těm, které vznikají i v dnešní době. [16]



Obr. 22 Vodní elektrárna ve městě Hellsjön, Švédsko, 1893, převzato z [17].

Uvnitř vodní elektrárny, která byla postavena ve švédském městě Hellsjön, byly vybudovány synchronní generátory o celkovém zdánlivém elektrickém výkonu 344 kVA. Generovaly střídavé napětí $U_{stř} = 9,5$ kV. Přenos elektrické energie byl veden do 13 km vzdáleného Grängesberg. [17]

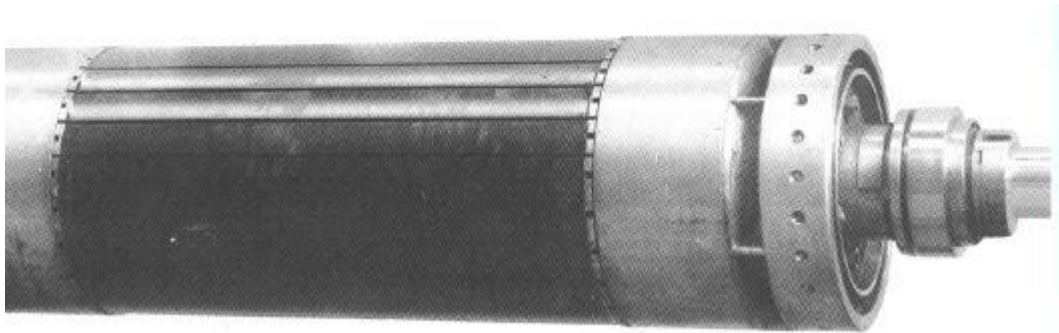
1.3.2.2 Turbogenerátory

Vzhled výkonných parních turbín na přelomu 20. století napověděl, že zanedlouho budou potřeba vysokootáčkové synchronní generátory.

Dva základní druhy synchronních generátorů, turbogenerátor – použití u vysokootáčkových turbín (parní elektrárny) a hydrogenerátor – použití u pomalu běžných turbín (vodní elektrárny), byly zakrátko zkonstruovány a použity v praxi. V následujících letech se vynálezci zaměřili především na výzkum detailů jako chlazení stroje, uložení vinutí, použité materiály a podobně. [16]

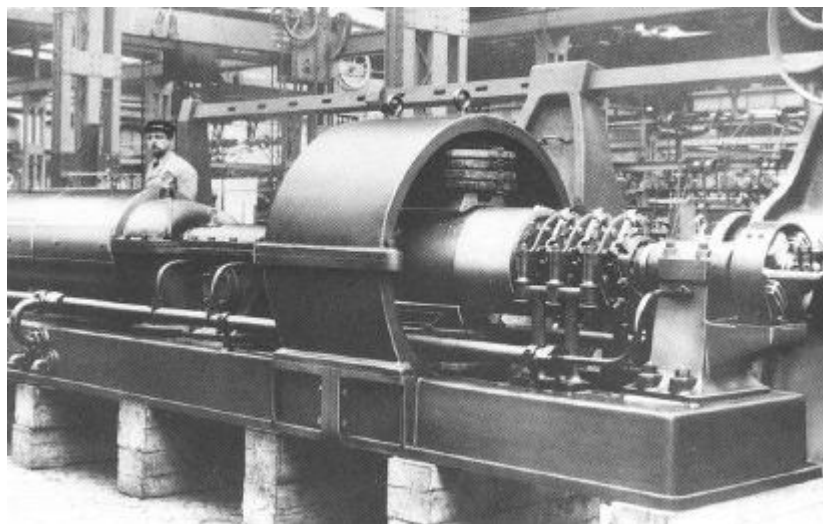
První generace turbogenerátorů byla rozměrově i na pohled podobná strojům s vyniklými póly. Takováto konstrukce stroje však byla pro vyšší otáčky a výkony z hlediska odstředivých sil, působících na rotor, neúnosná.

Jako první navrhl cylindrický tvar stroje, který by odolal odstředivým silám, způsobeným vysokými otáčkami parní turbíny, Charles E. Brown. Roku 1898 navrhl a zkonstruoval první synchronní turbogenerátor. Zdánlivý elektrický výkon tohoto stroje, byl $S = 100 \text{ kVA}$. Rotor tohoto stroje byl složen z 6 pólů. První skutečně použitelný, komerčně vyráběný rotor z litého železa, vytvořil Brown roku 1901. [16]



Obr. 23 První skutečný litý rotor turboalternátoru – 1901, převzato z [17].

Příklad použití synchronního turbogenerátoru je vidět na Obr. 28, tento dvojpólový synchronní generátor s vnějším buzením, měl činný elektrický výkon $P = 250 \text{ kW}$, otáčky 3000 ot./min . Byl postaven společností *Wild and Abegg*.

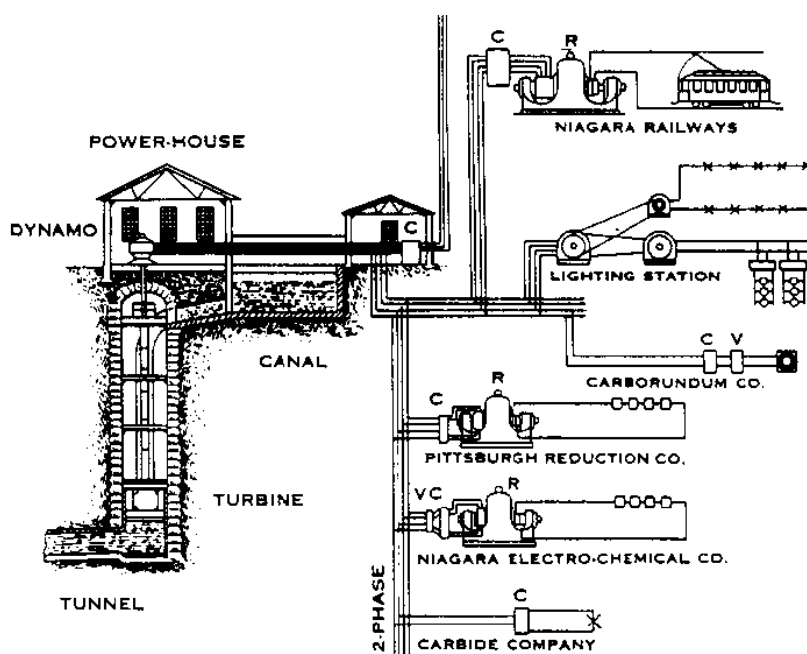


Obr. 24 Parní elektrárna v Turíně, Itálie, 1901, převzato z [17].

1.3.2.3 Vodní elektrárna, Niagarské vodopády

Při výběrovém řízení k stavbě velké vodní elektrárny na Niagarských vodopádech se rozhodovalo mezi firmou *Westinghouse* - zastoupena Nikola Teslou coby průkopníkem

výroby střídavých strojů a střídavých přenosů energie a firmou *Thomas – Houston*, což byl koncern Thomase Edisona, zastávce stejnosměrného proudu. Společnost *Thomas – Houston*, předložila projekt na elektrárnu, ve které by pracoval SS stroj jako dynamo. Rozhodovalo se, kterému způsobu přenosu elektrické energie dát přednost. Nakonec tento „souboj“ vyhrál koncern *Westinghouse*. Rozhodla pravděpodobně skutečnost, že střídavé napětí lze transformovat na vyšší napěťovou hladinu a tím snížit ztráty při přenosu elektrické energie. Společnost *Westinghouse* nakonec dodala dva synchronní hydrogenerátory o elektrickém výkonu $P = 3725 \text{ kW}$. Generátory byly vyrobeny podle patentu N. Tesly a byly dokončeny roku 1895, Obr. 29. První střídavý proud z elektrárny na Niagarských vodopádech, dorazil do města Buffalo v dubnu 1895. Tímto významným mezníkem začala moderní elektrifikace Ameriky. [1]



Obr. 25 Schéma elektrárny vystavěné na Niagarských vodopádech firmou *Westinghouse*.

1.3.3 Shrnutí historie střídavých strojů

1835 - Hippolyte Pixii vyrobil první alternátor. Pixii sestrojil zařízení s rotujícím magnetem.

1855 - Guillaume Duchenne použil střídavý proud na elektroterapii svalů. (Paříž, Francie)

AC energie se v této době nejeví jinak užitečná, než k podobným účelům jako je tento.

1878 - *Ganz Company* začali pracovat s jednofázovým střídavým systémem v Budapešti.

1879 - Walter Baily roztočil měděný disk pomocí střídavého proudu v Londýně.

80. léta 19. století - Tato dekáda je velice významná pro vynálezce střídavých strojů.

- 1882 - Sebastian Ferranti (Angličan s Italskými rodiči) pracoval ve společnosti *Siemens Brothers* v Londýně s Lordem Kelvinem. S jeho pomocí Ferranti začal nahlížet do problematiky střídavého proudu, včetně transformátoru.
- 1884 - Lucien Gaulard vynalezl transformátor a přenos elektrické energie z Lanza do Turína. Předvádění přenosu bylo na 25 km dlouhém vedení, zakončeném snižovacím transformátorem, který napájel žárovky.
- 1885 - Ferraris vymyslel první vícefázový střídavý motor.
- 1885 - Elih Thomson ve společnosti Thomson-Houston začal experimentovat se střídavým proudem (první společnost v Americe začíná experimenty se střídavým proudem).
- 1885 - George Westinghouse si objednal alternátor od Siemense (AC generátor) a od společnosti *Gaulard a Gibbs* transformátor.
- 1886 - Great Barrington, Massachusetts – první střídavý systém představen v Americe. Při představení byly použity transformátory na snižování a na zvyšování napětí. Systém byl postaven Williamem Stanleym a zaplacen firmou *Westinghouse*.
- 1886 - Nikola Tesla se pokusil prodat stroj na střídavý proud investorům v New Yorku, ale nebyl o něj zájem, jelikož již bylo investováno do SS rozvodů elektrického proudu. I další investoři měli stejný problém. Byl to důsledek toho, že doposud nikdo nevynelel účinný střídavý stroj.
- 1887 - C. S. Bradley vyrobil svůj první AC trojfázový generátor. Do této doby, produkovali *Siemens* a *Westinghouse* jednofázové střídavé generátory.
- 1887 - F. Augus Haselwander, vynalezl první střídavý trojfázový generátor v Evropě. Stalo se tak pár měsíců před Bradlym.
- 1887 - Sabastian Ferranti navrhl Depford Power Station (první spalovací, uhelná elektrárna na světě) v Londýně.
- 1888 - Mikhail Dolivo-Dobrovsky v Německu jako první vyrobil vícefázový generátor.
- 1888 - Galileo Ferraris přišel se svým prvním vícefázovým motorem. Pracoval bez komutátoru a konečně se stal konkurence schopný pro SS stroje.
- 1888 – Tesla předvedl svůj vícefázový motor. *Westinghouse* poslal učně k Teslovi
- 1889 - Dobrovolsky postavil svůj první 3 fázový transformátor a motor.
- 1891 - První dálkový přenos elektrické energie na 125 km z Lauffenu do Frankfurtu. Celý systém byl navržen Dobrovským.
- 1893 - *Redlands Power House* – první instalace trojfázového střídavého stroje, 40 Hz.

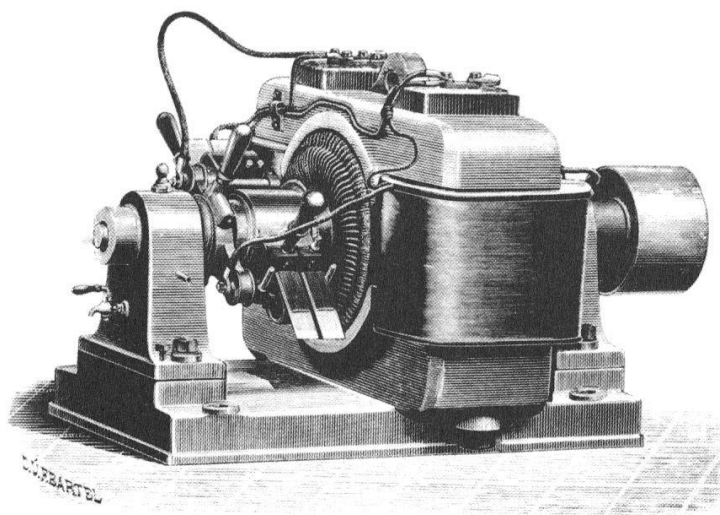
1895 - *Westinghouse* postavil elektrický střídavý systém pro elektrárnu na Niagarských Vodopádech. *General Electric* postavili 25 mil dlouhý střídavý rozvod elektrické energie od Niagarské elektrárny do Buffala.

1900 - Trojfázový střídavý napájecí systém, je od této chvíle brán jako hlavní napájecí rozvod po celém světě. [15]

1.4 Výroba střídavých elektrických strojů v minulosti

Ve světě již v 80. letech 19. století existovaly velké elektrotechnické společnosti, jako například *Siemens & Halske*, který již v té době měl 1200 zaměstnanců. Již v těchto letech vyráběl kromě elektrických měřících přístrojů a telegrafů, hlavně motory a generátory. V Čechách se průkopníkem elektrotechnického průmyslu stal František Křižík. Nejprve začal s prodejem obloukovek, na které měl i svůj patent. Obloukovky napájel dynamy od firmy *Schuckert*, ale později začal vyrábět dynamy vlastní (Obr. 30).

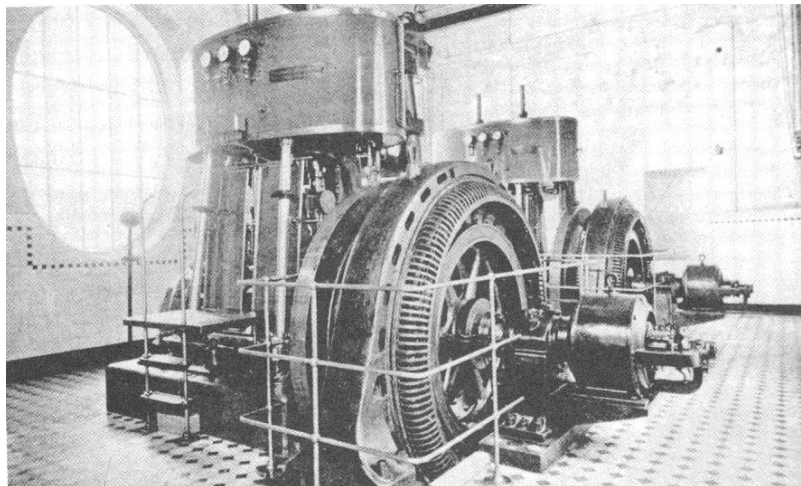
Jeho továrna se postupně rozrůstala a již v roce 1890 měla na 200 zaměstnanců. Výrobním programem, byla stavba městských elektráren, vybavených jeho stejnosměrnými dynamy. První veřejná elektrárna v Čechách byla postavena roku 1887. [1]



Obr. 26 Stejnosměrné dynamo vyrobené firmou „Fr. Křižík“, převzato z [1].

V 90 letech bylo hlavním záměrem postavit v Praze centrální elektrárnu. Řada firem předložila své projekty. Došlo zde opět ke konfrontaci mezi zástupci SS elektrické energie a elektrické energie střídavé. Zástupcem SS proudu byla právě Křižíkova společnost a zástupci střídavé trojfázové soustavy byly například: *Siemens-Halske* nebo *Vysočany Kolben*. Po

složitých jednáních, nakonec zvítězila střídavá soustava. Křížikova společnost se musela přeorientovat převážně na střídavé stroje. Poté dostal Křížík zakázku na synchronní generátor o výkonu 3000 HP, což byl u nás tehdy největší stroj vyrobený u nás tohoto druhu (Obr. 31).

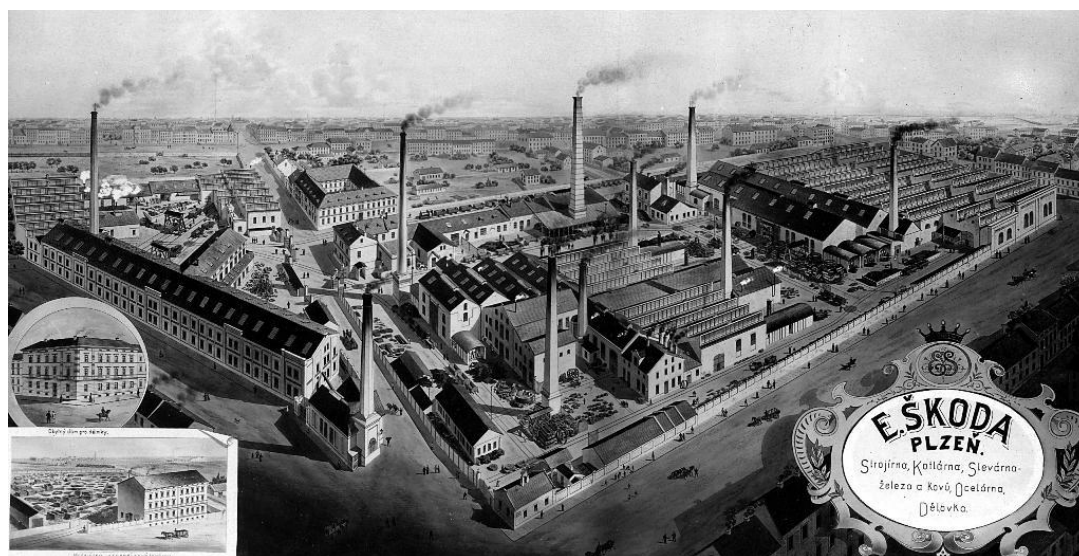


Obr. 27 Synchronní alternátor elektrárny v Hradci Králové, vyrobený firmou „Fr. Křížík“, převzato z [1].

1.4.1 Závody ŠKODA

V roce 1859 založil hrabě Valdštejn - Vartenberk v Plzni pobočku své slévárny a strojírný. Do továrny s více než stem pracovníků v roce 1866 nastoupil na post hlavního inženýra a následně v roce 1869 továrnu koupil ing. Emil Škoda, zdatný strojírenský odborník a dynamický podnikatel. Zakrátko závod rozšířil a v osmdesátých letech založil na svou dobu velmi moderní ocelárnu, která byla schopná dodávat odlitky o hmotnosti desítek tun. Ocelové odlitky a později výkovky pro velké osobní a válečné lodě, se staly vedle cukrovarů významnými exportními obory Škodovy továrny. V roce 1899 vznikla ze stále se rozšiřujícího podniku akciová společnost a ještě před vypuknutím první světové války se staly Škodovy závody největší zbrojovkou Rakouska - Uherska. Dodávaly jak námořnictvu, tak pozemním silám především těžká děla a municí. Exportovaly odlitky, části potrubí pro elektrárnu na Niagarských vodopádech nebo pro zdymadla Suezkého průplavu, ale také strojní zařízení cukrovarů v Turecku, pivovarů v celé Evropě a dělostřeleckého materiálu na Dálný východ a do Jižní Ameriky. Válečné roky 1914 - 1918 znamenaly pokles mírové výroby. Značné prostředky byly věnovány výstavbě dalších výrobních kapacit. V té době již Škodovy závody kontrolovaly akciovou majoritou řadu podniků s jinou než zbrojní výrobou v českých zemích a v zahraničí. V roce 1917 pracovalo v Plzni již 35 tisíc zaměstnanců.

Po vzniku Československé republiky v roce 1918 byl podnik za složitých ekonomických podmínek poválečné Evropy přetransformován z výlučně zbrojního na mnohooborový koncern. Výrobní program zahrnoval vedle tradičních, řadu nových oborů, jako výrobu parních a později elektrických lokomotiv a také výrobu elektrických generátorů.



Obr. 28 Bývalé závody ŠKODA, převzato z [18].

V roce 1923 byla do obchodního rejstříku zapsána dnes světově proslulá ochranná známka - okřídlený šíp v kruhu. Od poloviny třicátých let narůstal vlivem zhoršující se politické situace v Evropě objem výroby zbraní. Konec 2. světové války způsobil podniku značné škody, prakticky bylo při náletech zničeno 70 % areálu. V roce 1945 byl koncern zestátněn. Postupně se od Škodových závodů oddělovaly jeho části, jako např. automobilka v Mladé Boleslavi, BRUSH SEM s.r.o., letecká továrna v Praze, závody na Slovensku a další továrny na potravinářská zařízení. Hlavním úkolem se stala výroba zařízení pro těžké strojírenství, investiční průmyslovou výstavbu, hromadnou dopravu a energetiku. Export směřoval převážně do zemí tehdejšího socialistického bloku.

Po roce 1989 nastalo pro koncern ŠKODA období transformace ze státního podniku do akciové společnosti, spojené s hledáním nejen optimálního výrobního programu, ale i s rozšiřováním obchodních kontaktů a hledáním jiných trhů, než do té doby preferovaných trhů zemí RVHP, které se po roce 1989 zhroutily. Za této situace přistoupila ŠKODA TRANSPORTATION k diverzifikaci svého výrobního programu z kmenového oboru výroby železničních kolejových vozidel, také na pole městské hromadné dopravy. Od konce devadesátých let proběhly rozsáhlé modernizace souprav metra, na které navázala výroba moderních nízkopodlažních tramvají.

Po roce 2000 vznikl z některých závodů ŠKODA koncern BRUSH, který se zaměřuje na výrobu turboalternátorů. Postupem času se stal významným dodavatelem synchronních generátorů. [18]

2 Současné dělení synchronních strojů

2.1 Význam a použití synchronních strojů

Synchronní stroje pracují v praxi buď v režimu motorickém, nebo generátorickém. Jsou tedy užívány jako synchronní motory nebo generátory. Dále se synchronní stroje používají jako kompenzátory nebo jako synchronní konvertory.

Synchronní generátory tvoří základnu pro výrobu elektrické energie. Jejich výkony převyšují hranici 1500 MVA.

Synchronní motory se uplatňují nejvíce tam, kde je třeba stálý a nepřetržitý chod motoru o stálých otáčkách. Synchronní motory se uplatňují až do výkonů 15 MVA.

Synchronní kompenzátory jsou jediným druhem motoru, který může ostatním spotřebičům dodávat jalový proud, čímž odlehčují generátorům od jejich výroby elektrické energie. Uplatňují se v rozvodu elektrické energie. Jejich výkony se pohybují mezi 300 a 400 MVar.

Synchronní konvertory přeměňují trojfázové či vícefázové proudy na stejnosměrné.

Současný výkon synchronních strojů, využívaných v energetice i v průmyslu jde do milionů MVA. [3]

Synchronní stroje můžeme rozdělit do těchto skupin:

- a) turbogenerátory
- b) hydrogenerátory
- c) synchronní kompenzátory
- d) synchronní motory
- e) zvláštní synchronní stroje

2.1.1 Základní štítkové údaje synchronního stroje

Základní údaje pro správný provoz synchronního stroje jsou udávány na štítku každého stroje. Údaje, které mají být na štítku obsaženy, udává norma ČSN 35 0032 „Elektrické stroje točivé - Výkonnostní štítky pro synchronní stroje“.

1. Druh stroje – zkratka na štítku je buď SYNCHR GEN nebo SYNCHR MOT či SYNCHR KOMP a ukazuje, o jaký stroj jde.
2. Druh proudu – trojfázový, jednofázový, je uveden značkou 3 ~, 1 ~.
3. Jmenovitý výkon; pro alternátory a motory je nutno udat činný výkon v kW i zdánlivý výkon v kVA, pro kompenzátory se udává výkon jalový v přebuzeném stavu v kVar.
4. Jmenovité napětí statoru ve V (u vícefázových strojů – síťové napětí).
5. Jmenovitý proud statoru v A (u vícefázových strojů – síťový proud).
6. Jmenovitý účinník.
7. Jmenovitý účinník v Hz.
8. Spojení fází statoru – uvádí se značkou.
9. Budicí proud a budicí napětí pro chod naprázdno a pro jmenovité zatížení v A či V – nebo zda je buzení nahrazeno PM.
10. Jmenovité otáčky v min^{-1} .
11. Průběžné otáčky v min^{-1} .
12. Druh zatížení (trvalé, přerušované atd.) uvádí se značkou.
13. Tvar stroje (s ložiskovými štíty, s ložiskovými stojany atd.).
14. Stupeň krytí stroje před nebezpečným dotykem a před vniknutím cizích těles a vody. Označeno značkou.
15. Druh chlazení. Označuje se značkou, která popisuje způsob chlazení i použité chladicí médium (vzduch, vodík atd.). Pokud jde o vodík, je uveden i tlak chladicího média v Pa.
16. Třída izolace vinutí – B, F, H atd.

Dále jsou na štítku údaje o výrobcí, rok výroby stroje, jeho typ a výrobní číslo, hmotnost stroje apod. [5]

2.2 Synchronní generátory

Základní dělení synchronních generátorů je na generátory s hladkým rotorem – turbogenerátory a na stroj s rotorem, který má vyniklé póly – hydrogenerátory.

Princip těchto strojů je založen na působení střídavého magnetického pole statoru (připojen na 3f. síť) na pole vybuzené stejnosměrnými proudy v rotoru (nebo rotor s PM). Rotor se otáčí synchronní rychlostí $n_s=f_1/p$, tedy stejně rychle – synchronně, jako magnetické napětí statoru. Odtud název stroje synchronní.

Rozdělit synchronní generátory podle jejich parametrů lze takto:

- 1) Podle počtu fází: - jednofázové a v elektroenergetice nejvíce používané – trojfázové.
- 2) Kmitočtu: nejpoužívanější je 50 Hz, některé generátory pracují s 300 Hz nebo vyšším (lodě, letadla, vojenská technika).
- 3) Napětí: jednofázové nebo trojfázové. V distribuční síti NN ČR a většiny EU je hodnota 230 V/400 V.
- 4) Výkonu: největší synchronní generátory v ČR mají výkony 200 - 500 MW, výjimečně i 1 000 MW (JE Temelín). [5]

2.2.1 Turbogenerátory

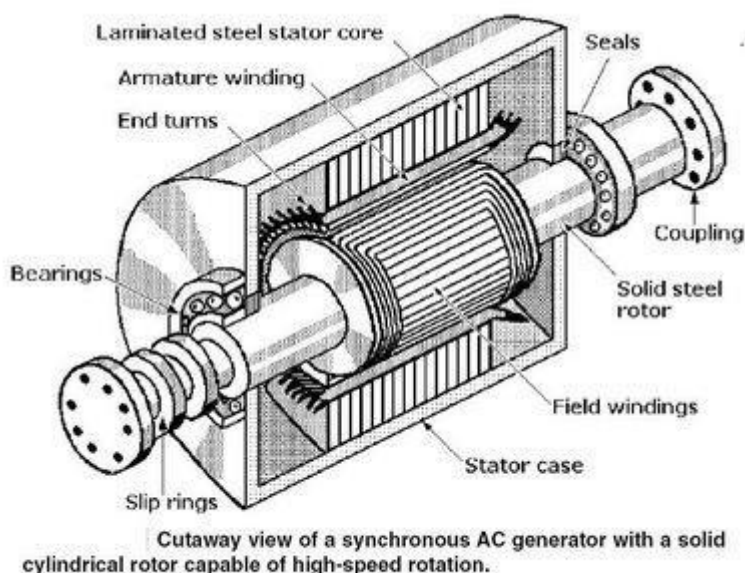
Jejich hlavní využití je v jaderných, nebo v tepelných elektrárnách. Jednoduše tam, kde na turbínu působí pára, která je natlakována na vysoký tlak a vyhřátá na vysokou teplotu. Rotory jsou vysokootáčkové, hladké. Délka rotoru je o mnoho větší než průměr rotoru.

Rychlost otáčení rotoru závisí na frekvenci sítě a počtu pól-párů rotoru. Při frekvenci $f = 50\text{Hz}$ a $p = 1$ bude rychlost otáčení $n = 3000$ ot./min. - dle vztahu $n = 60 \cdot p \cdot f$ [min^{-1} , -, Hz], kde n jsou otáčky rotoru (střídavého statorového pole), p je počet pól-párů a f je frekvence výstupního střídavého napětí.



Obr. 29 Pohled do statoru turbogenerátoru, převzato z [19].

Je tedy zřejmé, že rychlost otáčení rotoru je velmi vysoká. Rotor musí být menšího průměru a větší délky – až několika metrů. V České Republice je turbogenerátor s nejvyšším výkonem instalovaný v jaderné elektrárně Temelín (1000MW).



Obr. 30 Pohled na složení turbogenerátoru, převzato z [18].

2.2.1.1 Jaderná elektrárna Temelín

Historie

O výstavbě jaderné elektrárny v lokalitě Temelín bylo rozhodnuto po expertním výběru staveniště pro 4 bloky VVER 1000 v roce 1980. Investiční záměr stavby byl vydán již v únoru 1979, úvodní projekt 1. a 2. bloku byl generálním projektantem Energoprojektem (EGP) Praha zpracován v roce 1985. V roce 1982 byl uzavřen kontrakt na dodávku sovětského technického projektu. Tento projekt zahrnoval reaktorovnu, budovu aktivních a pomocných provozů a budovy dieselgenerátorových stanic. Stavební povolení bylo vydáno v listopadu 1986. Vlastní stavba provozních objektů byla zahájena v únoru 1987, přičemž přípravné práce byly zahájeny na staveništi již v roce 1983. Již před rokem 1990 byl původní sovětský projekt vylepšován československými odborníky. Generálním dodavatelem byla akciová společnost *Škoda Praha*.

Po listopadu 1989 došlo v nových politických a především ekonomických podmínkách k přehodnocení potřeby výkonu 4000 MW v České republice. Vláda ČR svým usnesením č. 103/93 z března 1993 rozhodla o dostavbě JE Temelín v rozsahu dvou bloků. Původní termíny dokončení jednotlivých bloků vycházely z průběžné doby výstavby unifikovaného bloku 60 měsíců. Vzhledem k dodavatelským problémům a ke změnám v politické a následně i hospodářské oblasti po roce 1989 byly termíny několikrát upraveny. Přes období velkých nejistot byla redukována a v technologii modernizovaná stavba dokončena a v červenci 2000 bylo zavezeno palivo do reaktoru. 21. prosince 2000 vyrobil první blok první elektřinu. [23]

Současný stav

Zkušební provoz prvního bloku byl zahájen 10. června 2002, na druhém bloku začal 18. dubna 2003. Do provozu byla elektrárna uvedena v letech 2002 až 2003.

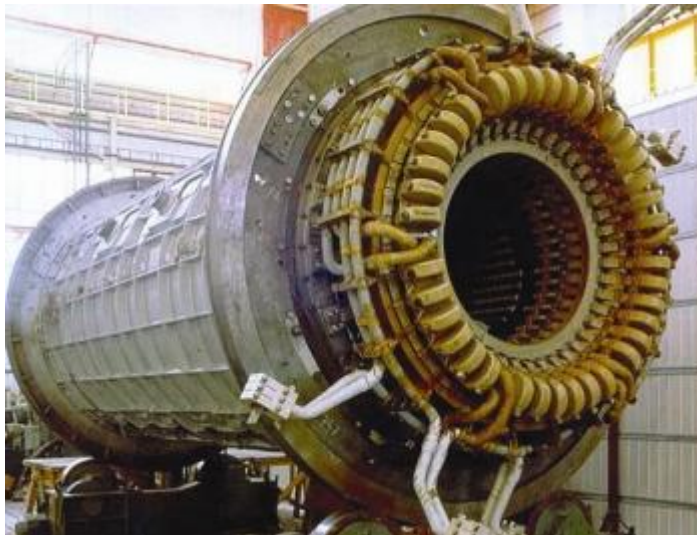
Před uvedením JE Temelín do provozu byly Jižní Čechy odkázány na dodávku elektrické energie z jiných oblastí, a to především z ekologicky zatížených severních Čech. Výstavba významného energetického zdroje umožnila řešit nedostatek elektrické energie i obtížnou ekologickou situaci v severních Čechách, neboť temelínská elektrárna umožnila nahradit již zastaralé a postupně odstavované bloky v uhelných elektrárnách. Zprovozněním dvou temelínských bloků do zkušební provozu se, spolu s Jadernou elektrárnou Dukovany, zvýšil podíl výroby jaderných zdrojů akciové společnosti ČEZ na 42,5 %. [22]

Budoucnost JE Temelín

Budoucnost JE Temelín tkví v dostavbě 3. a 4. bloku. Výstavba 3. a 4. bloku zaručuje spolehlivé pokrytí rostoucí spotřeby elektřiny v ČR po roce 2020 a vytvoření dostatečné rezervy pro bezpečnost a stabilitu energetické soustavy při minimálním vypouštění skleníkových plynů. Lokalita JE Temelín byla projektována pro výstavbu čtyř jaderných bloků a výstavba zbývajících dvou maximálně využije stávající infrastrukturu. Dostavba JE Temelín je významným impulzem pro rozvoj průmyslu, vědy a školství v Jihočeském kraji i v celé ČR. O výstavbu 3. a 4. bloku JE temelín se ucházejí společnosti jako: *Westinghouse General Electric Company, LLC, ŠKODA, Atomstroyexport, Gidropress*. [23]

Soustroje pracující v JE Temelín

Dva největší turbogenerátory, které byly kdy u nás a také ve společnosti *BRUSH SEM s.r.o.* vyrobeny. Tyto generátory byly dodány právě do JE Temelín. První generátor byl dodán roku 1993 a druhý roku 1995. Oba generátory, první roku 2000, druhý roku 2002 byly podrobeny plánovanému servisu. [14]



Obr. 31 Stator turbogenerátoru v JE Temelín, převzato z [14].

Turbogenerátor je vodně a vodíkově chlazen. V roce 2006 elektrárna Temelín vyrobila 12 TWh elektrické energie, což představuje přibližně 14% celkově vyrobené elektřiny u nás.

Jeden instalovaný turbogenerátor má tyto parametry:

Tab. 2.1 Parametry generátoru z jaderné elektrárny Temelín

Nominální zdánlivý výkon	<i>1 111 MVA</i>
EL. Výkon na svorkách	<i>981 MW</i>
Dodávaný výkon do elektrické sítě	<i>912 MW</i>
Vlastní spotřeba bloku	<i>69 MW</i>
Účinnost	<i>0,9</i>
Nominální sdružené napětí	<i>24 kV</i>
Nominální fázový proud	<i>26 726 A</i>
Nominální frekvence	<i>50 Hz</i>
Chlazení	<i>vodík – voda</i>
Hmotnost	<i>564 tun</i>

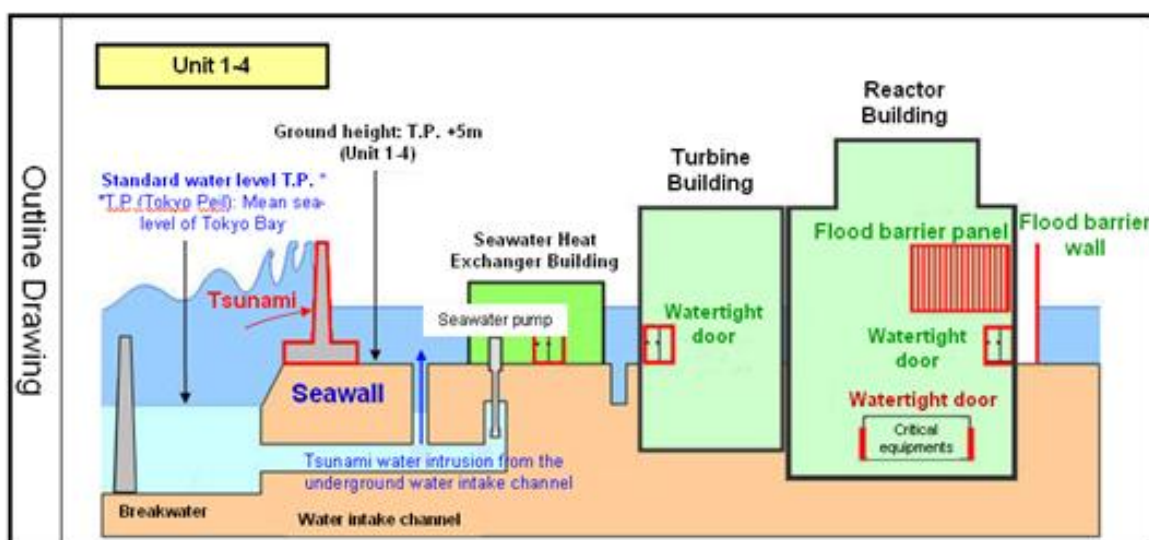
Indukované napětí v turbogenerátoru, je poté transformováno blokovými transformátory z 24 kV na 400 kV a proud je přenášen do rozvodny Kočín.

2.2.1.2 JE Kashiwazaki – Kariwa

Největší JE elektrárna na světě se nachází v Japonsku. Celkový činný instalovaný elektrický výkon je v této elektrárně 8212 MW. Tedy přibližně 4 krát více než v JE Temelín. Výstavba JE Kashiwazaki Kariwa započala roku 1980. Roku 1985 byla uvedena do provozu. V roce 1997 bylo v provozu všech 7 bloků. Tato JE se nachází 220 km severozápadně od Tokia na břehu moře. Elektrárna zaujímá 4,2 km².

Z hlediska bezpečnosti, je samozřejmě v Japonsku místo u moře velice náchylné na zemětřesení a případně na tsunami. JE elektrárny musí být z tohoto hlediska velice dobře zabezpečeny, aby nedošlo k úniku radioaktivity do moře. U nás, ve vnitrozemí, které je bez seizmické činnosti, máme z tohoto hlediska o mnoho přijatelnější podmínky pro provoz JE.

Stačí si vzpomenout na zemětřesení a následné tsunami v roce 2011. Při zemětřesení v roce 2011 zasáhla elektrárnu Fukušima vlna tsunami, následkem čehož selhalo chlazení reaktorů. Ty se sice při jejím úderu automaticky zastavily, ale přesto je selhávajícím záložní generátory nedokázaly všechny dostatečně uchlazení a později tak došlo k několika výbuchům vodíku a požárům. Při havárii uniklo značné množství radiace, z rozsáhlého ochranného pásma bylo evakuováno více než 200 000 osob a záležitost byla celosvětově podnětem k debatám o bezpečnosti jaderné energetiky. [24]

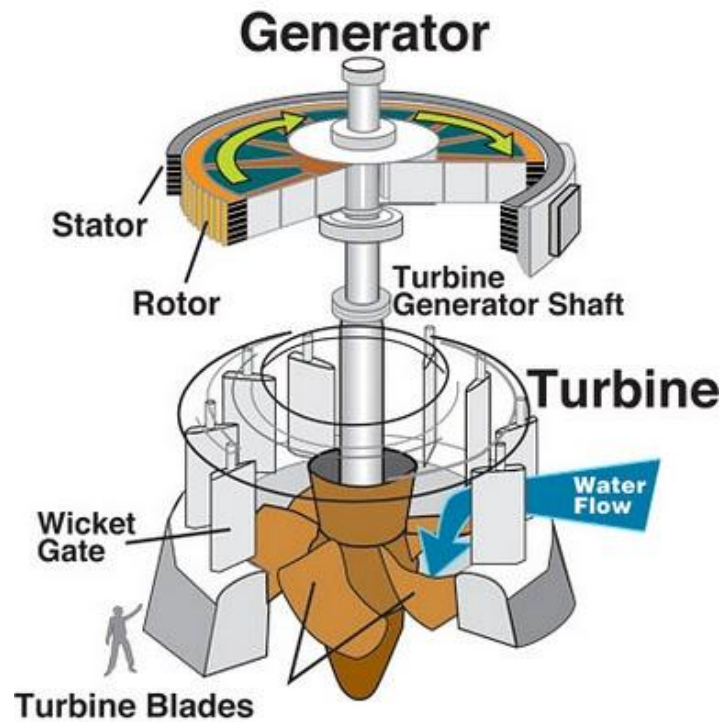


Obr. 32 Zabezpečení JE Kashiwazaki – Kariwa proti vlně Tsunami, převzato z [24].

2.2.2 Hydrogenerátory

Jeich hlavní využití je tam, kde turbína vyvíjí menší rychlosti otáčení hřídele, která je přímo napojená na hydrogenerátor, např. u vodních elektráren nebo u větrných elektráren. Rotor je složen z budícího vinutí, z pólových nástavců a tlumiče. Stator opět složen z 3f. vinutí obdobně jako u asynchronního stroje. Rotory jsou pomalu-běžné s vyniklými póly. Rychlosti otáčení jsou o mnoho menší než u turbogenerátorů. Šířka rotoru je daleko větší než jeho délka.

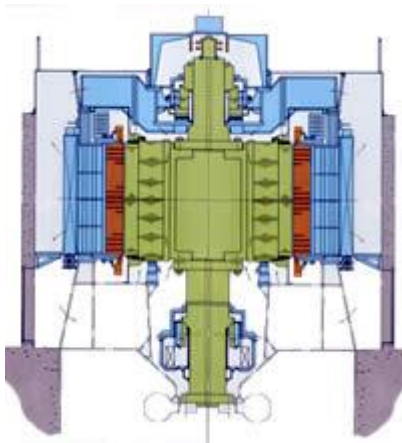
Popis funkce hydrogenerátoru ve spojení s vodní turbínou názorně představuje následující obrázek:



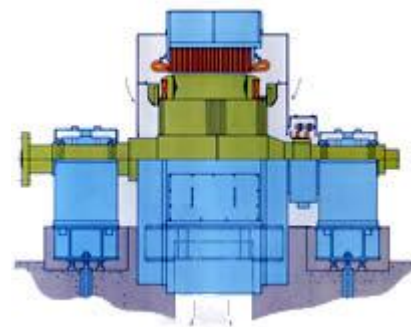
Obr. 33 Princip funkce vertikálního typu hydroalternátoru, převzato z [21].

Dělení hydrogenerátorů - podle položení závěsných ložisek, je možné na tyto dvě skupiny:

- Vertikální typ
- Horizontální typ



Obr. 34 Vertikální typ hydrogenerátoru, převzato z [22].



Obr. 35 Horizontální typ hydrogenerátoru, převzato z [22].

2.2.2.1 Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně

Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně se nachází na říčce Divoká Desná v samém středu chráněné krajinné oblasti Jeseníky. Její výstavba byla zahájena 11. května 1978 a dokončena roku 1996. Při výstavbě PVE byl kladen důraz na minimální negativní dopad na krajinu. Proto jsou hlavní výrobní zařízení umístěny v podzemí. [25]

PVE Dlouhé Stráně obsahuje dvě Francisovy turbíny, které jsou spojeny s motor - generátorem o celkovém instalovaném výkonu 650 MW. Motor – generátor (MG) dodala společnost ČKD Blansko. Transformátory, které zvyšují výstupní napětí z MG na 400 kV, dodala ŠKODA Plzeň.

Tab. 2.2 Základní parametry elektrárny Dlouhé Stráně [5]

Instalovaný výkon	2 x 325 MW
Rok uvedení do provozu	1996
Typ turbíny	Francisova
Spád	510 m
Max. doba turbínového provozu při max. výkonu obou soustrojí	5,23 h
Max. doba čerpadlového provozu při max. výkonu obou soustrojí	7,1 h

Soustrojí motor - generátor

Soustrojí MG, bylo vyrobeno ve společnosti ČKD Blansko. Toto soustrojí je největším reverzačním strojem v Evropě. MG je vertikální, reversní, synchronní, trojfázový stroj s přímým vodním chlazením statorového vinutí. MG slouží v turbínovém režimu pro přeměnu mechanické energie na spojce Francisovy reversní turbíny v elektrickou a pro opačnou přeměnu v režimu čerpadlovém. Další nezbytnou součástí PVE je asynchronní motor, který je určen pro rozběh soustrojí do čerpadlového chodu. Tento asynchronní motor je umístěn na společné hřídeli se synchronním MG. Je to vertikální stroj s kroužkovou kotvou a odklápěčem

kartáčů, jehož rotor je nasazen na hřídeli hydrogenerátoru a stator je kotven k horní hvězdě hydrogenerátoru. [25]

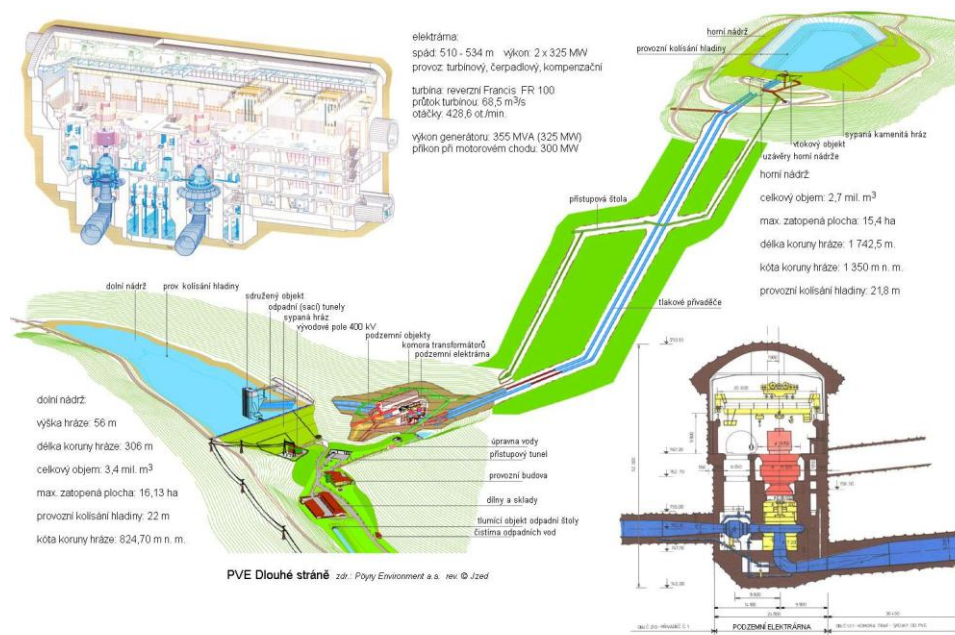
Tab. 2.3 Hlavní technické parametry motor-generátoru. [25]

	<i>Turbínový chod</i>	<i>Čerpadlový chod</i>
Maximální zdánlivý výkon	355,5 MVA	353 MVA
Účinnost	0,9	0,95
Jmenovité napětí	22 kV	22 kV
Jmenovitý proud	9,3 kA	9,25 kA
Jmenovité otáčky	428,6 ot./min.	
Spojení fází	Y	



Obr. 36 Motor - generátor PVE Dlouhé Stráně (ČKD Blansko), převzato z [25].

Pro porovnání, největší instalovaný elektrický výkon na světě je ve vodní elektrárně Tři Soutěsky v Číně a to s celkovým instalovaným výkonem 22 500 MW.



Obr. 37 Dlouhé stráně, převzato z [4].

2.2.2.2 Tři soutěsky v Číně

Přehrada Tři soutěsky je vodní nádrž, která pokrývá Yangtze řeku u města Sandouping, které se nachází v okrese Yiling, Yichang, provincie Hubei, Čína. Stavba nepochybně největšího víceúčelového vodního díla na světě, která probíhá od roku 1994 na řece Jang-tse v Číně, přitahuje značnou pozornost. Nejen proto, že se jedná o největší instalovaný výkon vodní elektrárny – 22 500 MW. Je totiž hned po Čínské zdi nejnáročnější stavbou v Čínské historii. [26]



Obr. 38 Stavba vodní elektrárny Tři soutěsky v Číně, převzato z [47].

Výroba elektrické energie je řízena společností *China Yangtze Power*. S celkovým počtem 34 generátorů, je z hlediska instalovaného výkonu největší vodní elektrárnou na světě. Tyto generátory se dále dělí na 32 hlavních, kde každý má instalovaný výkon 700 MW a dva menší. Každý z těchto dvou menších generátorů má instalovaný výkon 50 MW. Tři soutěsky využívají Francisovy turbíny.

Tab. 2.4 Parametry jednoho instalovaného hlavního generátoru [27]

<i>Instalovaný výkon</i>	<i>700 MW</i>
<i>Váha</i>	<i>6000 tun</i>
<i>Typ turbíny</i>	<i>Francisova</i>
<i>Účinnost</i>	<i>0,9</i>
<i>Účinnost</i>	<i>až 96,5 %</i>
<i>Výstupní jmenovité napětí</i>	<i>20 kV</i>
<i>Vnější průměr statoru</i>	<i>21,5 m</i>
<i>Výška</i>	<i>3 m</i>
<i>Nejvyšší možné zatížení ložisek</i>	<i>až 5500 tun</i>

Stator je největší na celém světě. O výrobu těchto obrovských strojů se postaraly firmy jako: *ABB Group*, *Alstom*, *Kvaerner* atd. Generátory jsou vodou chlazené. Novější z nich jsou chlazené vzduchem, což je jednodušší pro jejich výrobu i provoz elektrárny.



Obr. 39 Jeden z 32 hlavních hydroalternátorů v elektrárně Tři soutěsky v Číně, převzato z [28].

2.3 Synchronní motory

Synchronní stroj přechází hladce z chodu generátorického do chodu motorického, jakmile pohánecí moment přejde na hřídeli v mechanické zatížení. Předpokládá to ovšem trvalé napájení statoru souměrným 3f. napětím s pevným kmitočtem. Rotor musí být také buzen stejnosměrným proudem jako generátorů (nebo s PM). Takto lze získat mechanický výkon z každého synchronního stroje. Je tedy zřejmé, že synchronní motor může být opět s hladkým rotorem nebo s rotorem s vyniklými póly.

Největší problém nastává při rozběhu motoru. U generátorů není rozběh nutný, protože rotorem mechanicky otáčí hřídel turbíny. Rozběh u motorů se musí provádět určitými speciálními způsoby, např. pomocným asynchronním motorem, nebo pomocí kotvy v rotoru obdobně jako u asynchronního motoru. Způsobů na rozběh je samozřejmě více. Synchronní motor (protože se nerozběhne sám) byl v minulosti označován jako „mrtvý stroj“.

Motor pracuje synchronní rychlostí $\omega_s = 2\pi f/p$, což vyhrazuje oblast jeho použití provozům, v nichž se žádá stálá rychlost. Ze synchronních motorů vznikly reluktanční motory. Reluktanční motory lze pokládat za elektrické motory současnosti. Jejich využití je ve všech oblastech našeho života, například ve výpočetní technice, v obráběcích strojích atd. Reluktanční motory byly dokonce využity i na měsíci, poprvé roku 1966, kde natáčely zrcadlo, které bylo umístěné před kamerou na vesmírném průzkumném vozidle.

Dělení synchronních motorů

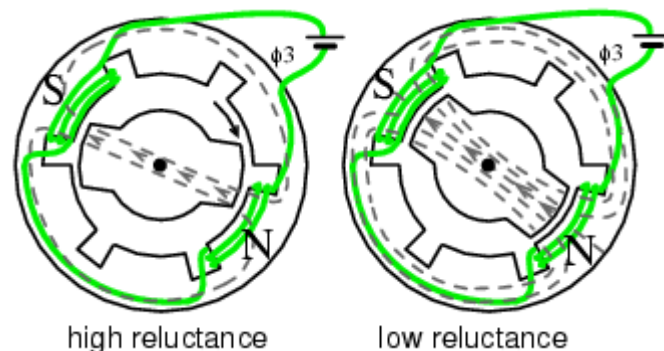
Synchronní motory spadají do kategorie synchronních strojů. Hlavní dva typy synchronních motorů podle magnetizace rotoru.

- Motory nebuzené SS proudem
- Motory buzené SS proudem

Do první skupiny spadají motory, které mají rotor buď jen ze železa, ze slitin železa nebo s PM. Takovéto motory jsou spíše menšího charakteru.

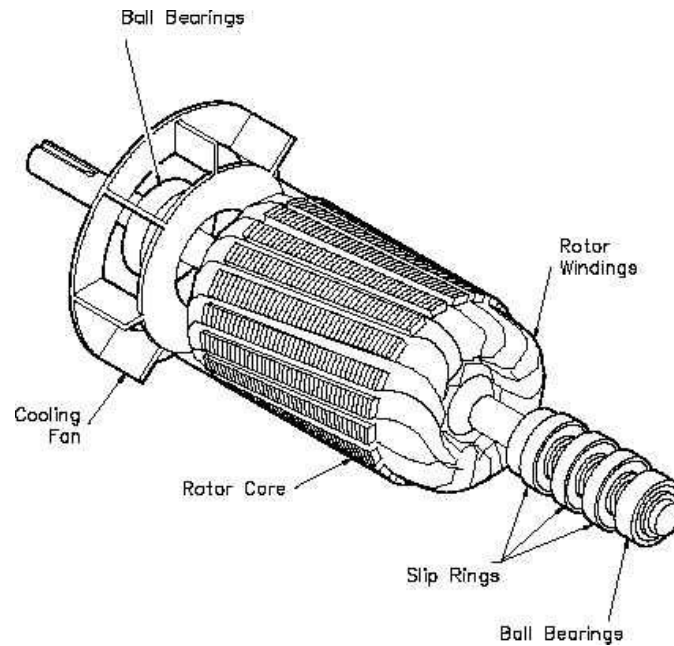
Patří sem:

- Reluktanční motory
- Hysterézní motorky
- Motory s PM



Obr. 40 Reluktanční motor, vlevo stav s vysokým magnetickým odporem, vpravo s malým, převzato z [28].

Druhou skupinou jsou motory větších výkonů. Jsou to motory se jmenovitým výkonem větším, než 735 W. Tyto motory mají rotorové vinutí, které je buzeno SS proudem. Buďto nezávislým zdrojem proudu anebo proudem přímo ze stroje. Budící kroužky (Slip rings) jsou připevněny na hřídeli a pomocí kartáčů je do vinutí přenášen SS proud.



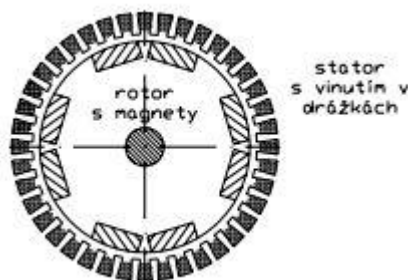
Obr. 41 Rotor synchronního motoru se SS buzením, převzato z [29].

2.3.1 Synchronní motor s PM pro trakční pohony

Dominantní hnací jednotkou v elektrických trakčních pohonech představovaly ještě před 20 lety stejnosměrné motory. S rozvojem techniky výkonových polovodičových měničů na bázi křemíkových součástek se začaly uplatňovat konstrukčně jednodušší a provozně spolehlivější asynchronní motory. Velký obrat ve využití synchronních strojů malých a středních výkonů přinesla aplikace permanentních magnetů ze speciálních slitin s velkou magnetickou indukcí. Synchronní motory s těmito magnety se již více než 13 let využívají v servotechnice, robotice a nahrazují zejména SS motory a krokové motory.

Názorným příkladem synchronního motoru s PM je synchronní motor s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel (PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor).

Konstrukční řešení PMSM pro trakci lze rozdělit do dvou skupin. První klasickou koncepcí představuje stroj, který má klasické trojfázové statorové vinutí uloženo v drážkách magnetického obvodu. Uvnitř statoru je umístěn rotor, který nese permanentní magnety (viz Obr. 44). Magnety se na rotor upevňují lepením a zpevňují se bandáží. [13]



Obr. 42 Konstrukce synchronního motoru s PM, koncepce s rotorem uvnitř statoru, převzato z [13].

Druhou konstrukční variantou je řešení, kdy trojfázové vinutí statoru je obepínáno rotorem s permanentními magnety. Toto uspořádání se využívá při uložení jednotlivých motorů přímo do kol pohonu. Je tedy součástí kola.

Materiály, které se zde používají, jsou ze speciálních slitin na bázi prvků Neodym – Železo – Bór. Výhodou magnetů na bázi těchto materiálů je velká remanentní indukce – do 1,25 T. Pro představu - PM na bázi feritů mají remanentní indukci přibližně 0,3 T. Životnost těchto PM se udává maximálně desítky let. Maximální provozní teplota je přibližně 100°C. Pak ztrácejí magnetické vlastnosti – Curieova teplota.

Výhodou PMSM jsou jejich rozměry a hmotnost. Problémem zpravidla bývá odvod ztrátového tepla u vysokootáčkových motorů malých rozměrů. Řeší se vodním chlazením. Použití těchto trakčních pohonů je zejména u vlaků, tramvají a vozů metra. [13]



Obr. 43 Tramvaj 15 For City s trakčními PMSM, převzato z [13].

Jak uvádějí autoři ve vědeckotechnickém sborníku ČD č. 29/2010 : „Výzkum, který byl zahájen přibližně před pěti lety na Dopravní fakultě Jana Pernera v Pardubicích, věnovaný trakčním pohonům s PMSM, se jevil jako specifické řešení, určené v oboru kolejových vozidel pro úzkou skupinu aplikací, zejména pro pohony nízkopodlažních vozidel MHD. I když pohony s PMSM zřejmě nenahradí v trakci zcela pohony s asynchronními motory,

ukazuje se, že se jejich aplikační oblast významně rozšířila i na výkonná železniční hnací vozidla. Příčinou je ve velké míře zdokonalování konstrukce motorů a pokles ceny permanentních magnetů ze speciálních slitin. Míru, s jakou trakční PMSM nahradí v kolejových vozidlech nyní dominující asynchronní motory, ukáže zřejmě budoucnost.“ [13]

2.4 Synchronní kompenzátory

Roku 1995, první synchronní kompenzátor začal fungovat v Tennessee, USA. Tento kompenzátor reguloval napětí bez nutnosti použití nákladných externích kondenzátorů nebo reaktorů.

V elektroenergetických soustavách se v těžkých odběru instalují tzv. synchronní kompenzátory, což jsou v podstatě synchronní motory pracující naprázdno. Rozběh synchronních kompenzátorů bývá většinou pomocí frekvenčních měničů. Jejich buzením SS proudem do statoru se reguluje jalový výkon tak, aby se udrželo stálé napětí v těžišti odběru. Pomocí synchronních kompenzátorů lze regulovat i účinník v síti. Na rozdíl od statických kondenzátorů se tyto „synchronní kondenzátory“ vyznačují velkou pružností při regulaci jalového výkonu v obou směrech: tj. kapacitním i induktivním [3].

Funkce synchronní kompenzátorů:

- 1) zlepšení účinníku u elektráren – snížení pokuty za nízký účinník,
- 2) napětí v síti při rozběhu velkých elektrických zátěží.

2.5 Současná situace výroby generátorů u nás a ve světě

U nás i ve světě existuje mnoho společností na výrobu synchronních strojů. Většina z nich se specializuje na určitou oblast z celé škály synchronních strojů. Někteří vyrábějí stroje malé, někteří výkonové turbogenerátory, jiné společnosti se zabývají výrobou komponentů pro tyto stroje, jako jsou uhlíkové kartáče, chlazení, hřídele a podobně. Nejznámější světové firmy na výrobu velkých synchronních generátorů jsou: *General Electric Company*, *BRUSH SEM*, *Hitachi*, *Toshiba* a mnoho dalších.

2.5.1 Výroba synchronních generátorů u nás

2.5.1.1 ŠKODA a BRUSH SEM

Turbogenerátory s hladkým rotorem se ve Škodových závodech v Plzni začaly vyrábět v roce 1924. Již předtím se zde vyráběly výkovky rotorů pro turbogenerátory pro zahraniční zákazníky. První stroj této konstrukce měl výkon 17,5 MW. ŠKODA Plzeň postupně rozšířila svůj výrobní program na prakticky všechny druhy elektrických strojů. Se svými výrobky, především turbogenerátory, se dostala mezi světovou špičku, což dokazují stoupající výkony jejích výrobků:

TURBOGENERÁTORY

1924 – 17,5MVA
1951 – 62,5 MVA
1959 - 125 MVA
1966 - 235 MVA
1977 - 588 MVA
1994 - 1111 MVA

HYDROGENERÁTORY

1925 - 230 KVA
1953 - 30 MVA
1958 -100 MVA
1976 - 220 MVA
1996 – 355 MVA

Byl zde vyroben i největší hydrogenerátor o výkonu 355 MVA pro přečerpávací vodní elektrárnu Dlouhé Stráně i turbogenerátor o výkonu 1111 MVA pro jadernou elektrárnu Temelín.

Největším světovým nezávislým výrobcem turbogenerátorů je společnost BRUSH SEM s.r.o. Jde o pozůstatek bývalých závodů ŠKODA, které v dřívějších dobách byly hlavními dodavateli generátorů na východoevropský trh i do Asie, Jižní Ameriky, Austrálie, Afriky. K dnešnímu dni bylo vyrobeno více než 1300 turbogenerátorů a 245 hydrogenerátorů. [14]



Obr. 44 Logo společnosti BRUSH SEM, převzato z [14].

Významné milníky historie společnosti BRUSH s.r.o.:

- 1922 založení Elektrotechnické továrny Doudlevice v rámci koncernu ŠKODA
- 1924 vyrobení prvního turbogenerátoru o výkonu 17,5 MVA pro Městské elektrické podniky Praha
- 1950 výstavba výrobní haly Gigant
- 1959 vyrobení prvního turbogenerátoru chlazeného vodíkem (125 MVA) pro elektrárnu Tisová
- 1966 vyrobení prvního turbogenerátoru chlazeného vodíkem a vodou (235 MVA) pro elektrárnu Ledvice
- 1994 vyrobení turbogenerátoru o výkonu 1 111 MVA pro jadernou elektrárnu Temelín
- 2001 vznik BRUSH SEM s.r.o. akvizicí společností FKI Plc
- 2008 akvizice společností Melrose Plc [14]

Nejzajímavější výrobky společnosti BRUSH SEM z posledních let:

- vodíkem a vodou chlazené turbogenerátory pro jadernou elektrárnu Mochovce na Slovensku, každý o výkonu 300 MVA
- vzduchem chlazených turbogenerátorů pro projekt Gorgon v Austrálii, každý o výkonu 148 MVA
- 10 vzduchem chlazených turbogenerátorů pro elektrárnu v Rijádu v Saúdské Arábii, každý o výkonu 162 MVA [14]



Obr. 45 Rotory turbogenerátorů vyrobené ve společnosti BRUSH SEM s.r.o., převzato z [14].

2.5.2 Výroba synchronních generátorů ve světě

2.5.2.1 General Electric Company

General Electric Company je nadnárodní společnost se sídlem v americkém městě Fairfield ve státě Connecticut. Byla založena v roce 1892 Edisonem, Thomsonem, Houstonem a Coffinem. Coffin byl její první prezident.

GE vyniká zejména v oblasti dopravní technologie. Mezi další obory, na které se orientuje, patří:

- finančnictví – GE Money Bank,
- energetika,
- média a další.



Obr. 46 Logo GE Company, převzato z [34].

S více než 14 000 vyrobenými generátory, je světovou špičkou v technologii generátorů. GE vyrábí širokou škálu generátorů. Chlazení generátorů provádějí pomocí vzduchu, vody, oleje, vodíku.

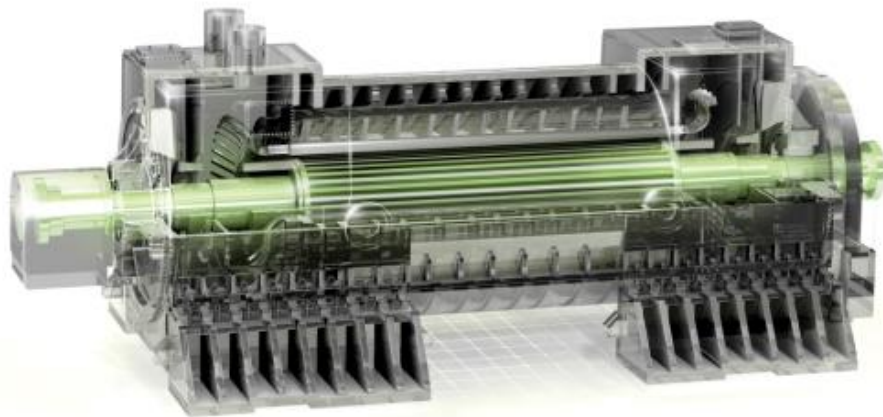
Generátor W28

Jde o úplně nový turbogenerátor, který je zahrnut do Flex Eficiency 50 (Flex Efficiency 50 - patentovaná technologie, která tímto označením zaručuje vyšší efektivitu přeměny mechanické energie na elektrickou). Tento generátor je možné připojit k parním nebo plynovým turbínám. Stator je vodou chlazený, výkon činní 550 MW. Díky vodou chlazenému statoru stroj nabízí větší účinnost a zvýšenou spolehlivost ve srovnání s dřívějšími technologiemi. Stator je sledován online diagnostikou což zajistí větší spolehlivost stroje. Aby se předešlo úniku plynu nebo oleje, je stroj neprodyšně uzavřen a je

vyroben z jednoho kusu materiálu, Účinnost generátoru činí 99% s účíníkem 0,9. Součástí je i statické buzení a statické startovací zařízení, která zajišťují optimální start stroje. Tento generátor je výsledkem 50 - ti leté zkušeností a bylo vyrobeno již 600 kapalinově chlazených generátorů. [34]

Mezi klíčové vlastnosti generátoru W28 patří:

- Stator vyroben z jednoho kusu pro zjednodušenou instalaci.
- Modulární systém utěsnění plynu a oleje poskytují větší flexibilitu a funkčnost stroje.
- Systém chlazení a monitorování statoru, poskytují novou úroveň spolehlivosti.
- Statické buzení a statický startér, zajišťují vysokou úroveň počátečních podmínek generátoru.



Obr. 47 Generátor W28 od společnosti GE, převzato z [34].

3 Předpokládaný vývoj materiálů a vlastností synchronních strojů

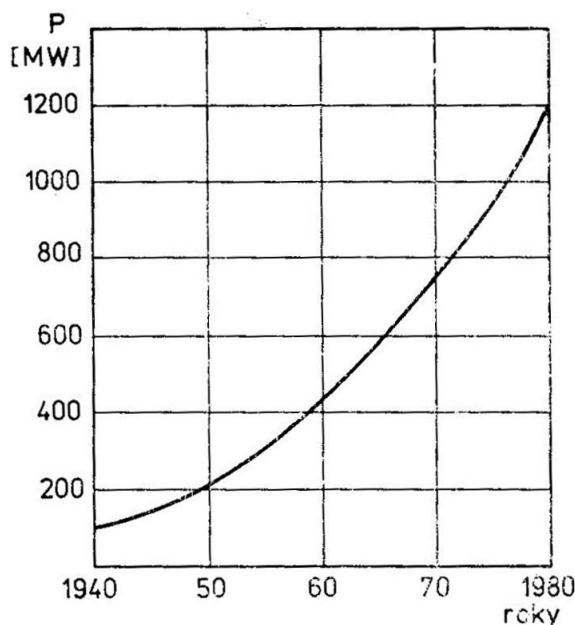
Předpokládaný vývoj synchronních strojů směřuje ke snaze vylepšit různými způsoby jejich účinnost.

Např.:

- materiály, které byly použity na výrobu na počátku vzniku synchronních strojů se liší od těch, které se používají dnes.
- u strojů s PM se používají místo buzení statorového vinutí SS proudem permanentní magnety.

3.1 Vývoj vlastností a materiálů synchronních strojů

Na počátku minulého století, kdy se začaly synchronní stroje vyvíjet, byly možnosti z hlediska použitých materiálů a konstrukčních uspořádání omezené. Z toho plynula menší účinnost strojů, větší hmotnost a rozměry a také nižší výkony dodané strojem. Je tedy zřejmé, že s postupem elektrifikace byly i větší požadavky na elektrický výkon, dodávaný do sítě. S tím byl spojen i požadavek na pokrok ve výzkumu použitých materiálů. Maximální výkon dodaný generátory rostl rok od roku, viz obr. 48. [5]



Obr. 48 Vývoj výkonů dosažených v jednom turbogenerátoru, převzato z [5].

Podobný průběh měl i vývoj výkonů hydrogenerátorů.

3.1.1 Obecné tendence vývoje elektrických strojů

Pro vývoj elektrických strojů jsou rozhodující tyto skutečnosti:

- 1) Počty vyrobených elektrických strojů se neustále zvyšují.
- 2) Provozní účinnost a kvalita elektrických strojů se podstatně zvyšuje.
- 3) Roste snaha o dosažení minimálních pořizovacích a provozních nákladů.

a platí tyto obecné tendence:

- 1) Použití nových dokonalejších materiálů, zejména izolací, umělých hmot, supravodičů, permanentních magnetů.
- 2) Nové technologické postupy výroby strojů, zaměřené na odstranění ruční práce, a tedy odstranění chyb při výrobě, rychlost výroby apod.
- 3) Využití počítačů při výzkumu, vývoji, výrobě, zkoušení i provozu elektrických strojů.
- 4) Zdokonalení elektromagnetických obvodů a tepelně ventilačních návrhů. [5]

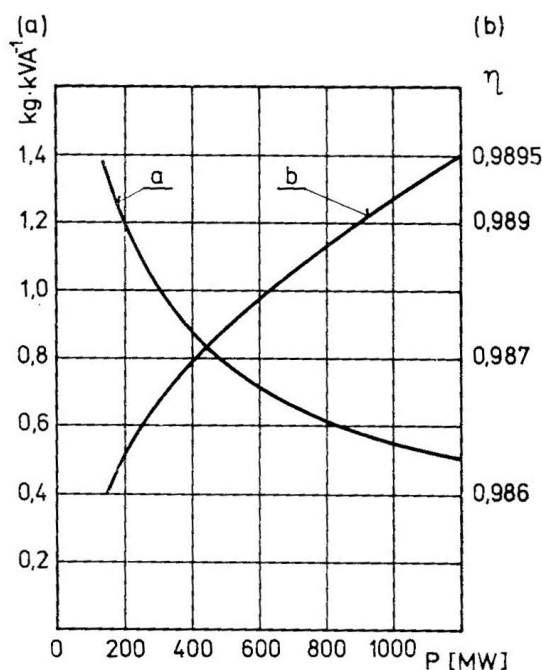
3.1.2 Předpokládaný vývoj synchronních strojů

Obecné tendence vývoje synchronních strojů se budou u synchronních strojů projevovat jinak, než u strojů asynchronních. Vezmeme – li v potaz, že klasickým představitelem asynchronních strojů je stroj o malém výkonu (jednotky či desítky kW), malé hmotnosti a velké sériové výrobě, tak klasickým představitelem synchronních strojů je stroj o velké hmotnosti (stovky až tisíce tun), velkém výkonu (stovky MW) a malé sériové výrobě či kusové výrobě. Zde je tedy zřetelný rozdíl a je zřejmé, že vývojové tendence se budou lišit. Různě projevovat se budou tedy také rozhodující výzkumné a vývojové problémy. Pro další pokrok při výrobě velkých synchronních strojů je nutné řešit řadu výzkumných a vývojových problémů. [5]

U turboalternátorů lze uvést tyto:

- 1) Vývoj nových izolačních materiálů a izolačních systémů pro statorové vinutí pro napětí 30 - 35 kV.

- 2) Nové technologické postupy pro výrobu a konstruování nejdůležitějších a nejnáročnějších prvků a další zvýšení spolehlivosti provozu stroje.
- 3) Vývoj chladicího a ventilačního systému, kvůli možnosti zvýšení elektromagnetického zatížení.
- 4) Vývoj bezkartáčových budících systémů rotoru.
- 5) Řešení konstrukčních problémů, zejména upevnění statoru v kostře, uchycení statoru v drážkách a další problémy zaměřené na zvýšení spolehlivosti stroje při chodu.
- 6) Řešení plné automatizace řízení stroje v provozu včetně sledování stavu nejdůležitějších částí stroje automatizovaným on-line diagnostickým systémem. [5]



Obr. 49 Snižování hmotnosti připadající na jeden kVA (a) a růst účinnosti strojů (b), převzato z [5].

Také pro hydrogenerátory je řešení většiny těchto otázek velmi důležité, ovšem co je velmi důležité pro typy se svislou osou hřídele, je vývoj závěsných ložisek.

Vývojové problémy dalších druhů synchronních strojů (motorů a kompenzátorů) jsou závislé na jejich velikosti. Pro velké synchronní kompenzátory se řeší otázky podobné jako u turbogenerátorů a i jako u horizontálních hydrogenerátorů. Velké synchronní motory mají hodně společného s turbogenerátory. Důležitou otázkou u velkých synchronních motorů a kompenzátorů, je spouštění. Problém se většinou řeší asynchronním rozběhem nebo kmitočtovým rozběhem. Tomuto problému je nutno věnovat dostatečnou pozornost.

3.2 Synchronní stroje budoucnosti

Teorie synchronních strojů se rozvíjela současně s jejich praktickým využitím. Připomeňme si, že záhy po objevení základních principů trojfázového proudu a vzniku trojfázového točivého pole (r. 1889), došlo k prvnímu komerčnímu využití. V Lauffenu byl vodní turbínou poháněn trojfázový alternátor, který generoval napětí. Tento systém začal pracovat již v roce 1890. Roku 1895 byla řešena reakce kotvy synchronních strojů s vyniklými póly na rozklad do dvou os, podélné (d) a příčné (q). Roku 1900 byl řešen fázorový diagram synchronního stroje a záhy na to dalších mnoho poznatků. V prvních desetiletích minulého století, byly tyto poznatky shromážděny do ucelené teorie. Tato teorie již objasňovala konstrukci synchronních strojů a také popis ustáleného a přechodných stavů.

Zdaleka to ale neznamená, že dnes již není na synchronních strojích co objevovat a vyvíjet. S příchodem polovodičových součástek a tedy polovodičových měničů a výpočetní techniky, vstupuje teorie elektrických strojů do své nové etapy. Elektrické stroje je nutno v řadě případů posunovat s připojením polovodičových součástek v souvislosti s regulačním zařízením. Stroje tak získávají nové kvality. Řada teoretických otázek musí být v souvislosti s výše uvedenými aspekty řešena znovu především v souvislosti se supravodivými materiály a s materiály pro permanentní magnety, jejichž složení se oproti minulosti dosti mění. Problematika permanentních magnetů nebo problematika supravodiče, jsou velice perspektivní a neprozkoumané oblasti použití v synchronních strojích.

Tím že při konstrukci použijeme supravodivé materiály, zvýšíme účinnost a spolehlivost synchronních strojů. Výhoda těchto materiálů je v tom, že zchlazením vodiče na velmi nízkou teplotu omezíme ztráty při průchodu proudu vodičem na minimum.

Mimořádný význam pro další vývoj strojů, má výpočetní technika, ať již z hlediska modelů, konstrukce nebo z hlediska moderní on-line diagnostiky. Dříve takováto diagnostika nebyla možná, jelikož výpočetní technika nebyla na dostatečné úrovni.

Z hlediska konstrukce synchronních strojů, bychom mohli diskutovat o tzv. „strojích budoucnosti“, které oproti klasickým strojům používají místo klasického rotorového vinutí, které je buzeno SS proudem, permanentní magnety. Tento vývoj má však své klady i zápory a tuto konstrukci lze využít jen v omezené skupině aplikací. [5]

3.2.1 Synchronní stroje s PM magnety

Magnetický systém s PM má určité přednosti. Není zde použito budící rotorové vinutí, nýbrž rotor je složen z permanentních magnetů, které produkují konstantní magnetické pole. Konstantní magnetické pole vzniká bez nutnosti dodávání SS proudu. Nevznikají tedy ztráty v budícím vinutí a zvyšuje se účinnost stroje. Materiály, ze kterých se PM vyrábějí, prošly dlouhodobým vývojem. Vývoj PM započal slitinami Alnico, vynalezenými roku 1935. Poté byly vynalezeny Ferity. V dnešní době jsou nejaktuálnějšími PM magnety vyrobené ze vzácných zemin. Rotorové permanentní magnety jsou při práci stroje namáhány vysokými teplotami. Je tedy třeba zmínit, že existuje tzv. Curieho teplota. Při této teplotě materiál ztrácí - ať už vratně či nevratně, své magnetické vlastnosti. Tuto vlastnost lze u různých aplikací použít cíleně, avšak může to být také vlastnost nežádoucí. [6]

Oblast použití permanentních magnetů závisí na žádaných vlastnostech, kterými by daný materiál měl disponovat. Například nepoužijeme permanentní magnet NdFeB, který může bez omezení fungovat do 200 °C do rotoru synchronních generátorů.

3.2.1.1 Dělení PM

PM bychom mohli rozdělit dle historického vývoje:

- Magnetické oceli – ocel na bázi chromu a kobaltu
- AlNiCo 2, 5, 9
- Ferity
- Slitiny na bázi vzácných zemin
- SmCo
- NdFeB
- Perspektivní Nano materiály

Hlavní vlastnosti, které jsou u permanentních magnetů žádoucí:

- Funkčnost bez omezení do co nejvyšší teploty, teplotní stálost.
- Produkovat co možná nejvyšší maximální magnetickou energii $(BH)_{\max}$.
- Co možná nejnižší váha, rozměry, nízká cena.

Magnety AlNiCo

Magnety AlNiCo se masově vyrábějí již více jak 50 let. Za svůj název vděčí složení slitiny, ze které se vyrábějí. Obsahují 7-10 % Al, 13-16 % Ni, 20-40 % Co a zbytek je Fe. Navíc se do magnetů AlNiCo přidávají takové přísady jako Cu (3-5 %), Ti (1-8 %) a Nb nebo Ta. Magnety AlNiCo je možné vyrábět metalurgickými metodami (odlévání) nebo práškovou metalurgií (spékání). V současnosti se nejčastěji vyrábějí jako izotropní magnety.

Magnety AlNiCo se vyznačují nejvyšší teplotní stabilitou magnetických parametrů mezi všemi magnety a taktéž vysokou Curieho teplotou T_c a s ní související pracovní teplotou T_{max} . Mají taktéž nejvyšší odolnost proti korozi. Hodnoty maximálního energetického součinu $(BH)_{max}$ těchto magnetů jsou o něco větší nebo se blíží hodnotě $(BH)_{max}$ anizotropních feritových magnetů, zatímco hodnoty jejich remanence B_r jsou podobné hodnotám magnetů Sm-Co a spékaných magnetů Nd-Fe-B. Jejich reverzibilní permeabilita μ_{rev} je 2,7krát vyšší než u jiných magnetů. Nízké hodnoty koercivity jH_c však znemožňují použití magnetů AlNiCo v přítomnosti silných demagnetizačních polí, což omezuje rozsah jejich aplikací. Navíc nízká koercivita má vliv na ustálení se pracovního bodu magnetu AlNiCo. Nízké (ploché) magnety AlNiCo podléhají ihned po vyjmutí z budícího magnetu značné demagnetizaci a jejich pracovní bod bude položený dosti nízko pod hodnotou remanentní indukce. Údery a nárazy do magnetu AlNiCo mají taktéž vliv na jeho demagnetizaci. Proto se v praxi používají hlavně vysoké magnety AlNiCo, které jsou mnohem odolnější proti těmto jevům, nebo se montují do magnetických obvodů a až potom se podrobují magnetování, což umožňuje nastavit jejich pracovní bod blízký hodnotě remanence B_r .

Výhodou magnetů AlNiCo je to, že předčí jiné magnety svou teplotní stabilitou magnetických parametrů, maximální pracovní teplotou T_{max} a odolností proti korozi.

Základní oblasti použití magnetů AlNiCo: měřicí přístroje, kontrolní zařízení, různé typy měničů a snímačů, motory a proudové generátory a mnoho dalších zařízení, ve kterých je potřebné stabilní magnetické pole nezávislé na teplotě a konstrukční prostor je dostatečně velký na umístění magnetu. [36]

Feritové magnety

Feritové magnety jsou ve světě nejčastěji vyráběnými magnety. Vyrábějí se z feritu barya ($BaFe_{12}O_{19}$) nebo z feritu stroncia ($SrFe_{12}O_{19}$) jako izotropní nebo anizotropní materiály. Metody výroby těchto magnetů jsou podobné způsobům výroby jiných keramických materiálů. Při výrobě anizotropních magnetů probíhá operace lisování v

magnetickém poli, které orientuje zrna přednostními osami magnetizace podél siločar pole. V procese výroby izotropních feritových magnetů se vnější magnetické pole během lisování neaplikuje. Proto také dosahují anizotropní magnety značně vyšších hodnot základních magnetických parametrů (asi čtyřnásobně vyšší hodnota maximálního energetického součinu $(BH)_{\max}$, a asi dvojnásobně vyšší remanence Br).

Hodnoty remanence Br feritových magnetů jsou přibližně 2,3krát menší než u jiných magnetů (Nd-Fe-B, Sm-Co a AlNiCo), proto se k dosažení vysoké hustoty magnetického toku používají magnety s velkými příčnými průřezy a obvody soustřeďující magnetické pole. Hodnoty maximálního energetického součinu $(BH)_{\max}$ feritových magnetů jsou podobné hodnotám dosahovaným u magnetů AlNiCo. Feritové magnety však mají několikrát vyšší (cca 3,8krát) hodnoty koercivity jH_c . To umožňuje jejich použití za přítomnosti poměrně silných demagnetizačních polí. Kromě toho, i když je teplotní stabilita magnetických parametrů těchto magnetů nízká, mají vysokou maximální pracovní teplotu T_{\max} (vyšší mají pouze magnety AlNiCo). Při jejich použití při nízkých teplotách je však třeba postupovat opatrně, jelikož jejich koercivita jH_c klesající teplotou rychle klesá. Feritové magnety představují při mnohých aplikacích přijatelný kompromis mezi ekonomickými a technickými požadavky.

Hlavní přednosti feritových magnetů: vysoká koercitivní intenzita magnetického pole jH_c a vysoká rezistivita (umožňující provozování v proměnlivých magnetických polích), vysoká maximální pracovní teplota T_{\max} , vysoká odolnost proti korozi a poměrně nízká cena.

Základní oblasti použití feritových magnetů: motory, proudové generátory, elektronika (reproduktory, mikrofony, alarmy), mechanické hračky a magnetické zámky (nábytkářství), separátory, upínače a celá řada jiných, zejména tam, kde je k dispozici dostatek konstrukčního prostoru a nevyžaduje se miniaturizace ani vysoká teplotní stabilita. [36]

Slitiny na bázi vzácných zemin – SmCo

SmCo permanentní magnety, byly prvními ze skupiny moderních magnetů na bázi prvků skupiny vzácných zemin a kovu (Re-M), které byly zavedeny do masové výroby. Vyrábějí se metodami práškové metalurgie, obvykle jako magnety anizotropní. V současnosti se tyto magnety vyrábějí na bázi dvou intermetalických sloučenin $SmCo_5$ (hmoty: S18, S20) nebo Sm_2Co_{17} (hmoty: S22, S24, S26, S28, S30), přičemž magnety typu Sm_2Co_{17} se vyznačují vyšší hodnotou remanence Br a o něco vyšší teplotní stabilitou.

Maximální energetický součin BH_{max} magnetů Sm-Co je více než pětinašobně vyšší než u feritových magnetů nebo magnetů AlNiCo, zatímco hodnoty koercivity jH_c jsou více než dvakrát vyšší než u feritových magnetů. Prudce rostoucí náchylnost k oxidaci při teplotě nad 250 °C je důvod, proč je jejich maximální pracovní teplota T_{max} značně nižší než Curieho teplota T_c . To je základním důvodem omezeného rozsahu aplikací těchto magnetů.

Mezi přednosti samarium-kobaltových magnetů patří především vysoká teplotní stabilita magnetických parametrů (podobná jako u magnetů typu AlNiCo), které doprovázejí vysoké hodnoty maximálního energetického součinu $(BH)_{max}$, koercivity jH_c a remanence B_r . Současně je třeba si povšimnout, že v rozsahu přípustných pracovních teplot mají magnety Sm-Co velmi vysokou odolnost proti korozi a díky vysokým hodnotám koercivity jH_c mohou pracovat za přítomnosti silných demagnetizačních polí.

Samarium-kobaltové magnety se používají v malých motorech a proudových generátorech, měřicích a kontrolních přístrojích, měničích a snímačích různých typů a v mnohých jiných zařízeních vyžadujících stabilní magnetická pole při proměnlivé teplotě (-60°C -250°C). Použití Sm-Co magnetů s vysokým maximálním energetickým součinem a s vysokou koercivitou umožňuje miniaturizaci zařízení, která byla doposud vyráběna s využitím feritových magnetů a magnetů AlNiCo. [36]

Slitiny na bázi vzácných zemin – NdFeB

Neodymové magnety zaznamenaly ve skupině moderních magnetů na bázi kovů vzácných zemin (Re-M) největší úspěch na trhu. Za svoje vynikající magnetické vlastnosti vděčí sloučenině $Nd_2Fe_{14}B$, objevené v roce 1984.

Vyrábějí se technologií práškové metalurgie a díky lisování v magnetickém poli nebo plastickému zpracování při zvýšené teplotě získávají anizotropní strukturu. Byly u nich dosaženy rekordní hodnoty maximálního energetického součinu $(BH)_{max}$ (cca 400 kJ/m³). Tyto magnety mají také vysoké hodnoty remanentní magnetické indukce B_r podobně jako je tomu u magnetů AlNiCo, avšak jejich koercitivní intenzita magnetického pole jH_c několikrát desítek násobně vyšší, což umožňuje jejich provozování za přítomnosti silných demagnetizačních polí. Ve srovnání se samarium-kobaltovými magnety mají však nižší rozsah pracovních teplot a jejich magnetické vlastnosti jsou ve značné míře závislé na teplotě. Vzhledem na obsah neodymu, který je vysoce náchylný na oxidaci, jsou magnety opatřeny tenkými ochrannými antikorozními vrstvami. Nejčastěji se jedná o vrstvy: Ni, Zn, Ni-Zn nebo

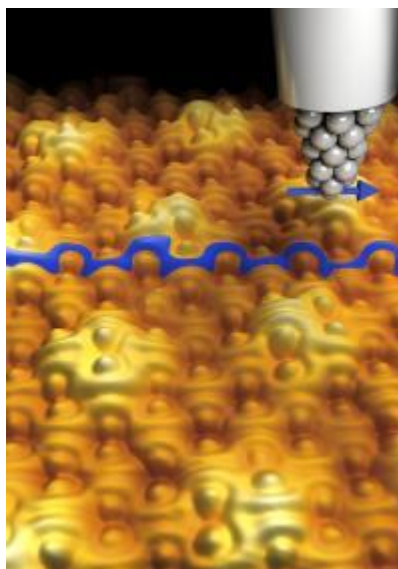
Ni-Cu-Ni. Možné jsou rovněž vrstvy stříbrné, zlaté, zlato-niklové a také ochrana zhotovená fosfátováním nebo epoxidováním.

Nejdůležitější výhody spékaných neodymových magnetů: extrémně vysoké hodnoty maximálního energetického součinu $(BH)_{\max}$, velmi vysoké hodnoty koercivity jH_c , a vysoké hodnoty remanence B_r . Toto je výhodné při aplikaci těchto magnetů všude tam, kde se požaduje vysoký stupeň miniaturizace.

Základní oblasti použití spékaných magnetů Nd-Fe-B: motory, proudové generátory, elektronická zařízení (reproduktory, mikrofony, alarmy apod.), mechanické hračky, separátory, servopohony, upínače a mnoho jiných zařízení, ve kterých se požaduje přítomnost silného magnetického pole v rozsahu ne příliš vysokých teplot. [36]

Perspektivní nanotechnologie

Tým vedený profesorem Andre Geimem, nositelem Nobelovy ceny za rok 2010 za vývoj materiálu graphene ukázal, že elektrický proud může přitahovat graphene. Tento objev znamená pro permanentní magnetismus nový rozměr. Graphene byl vytvořen nanotechnologií a skládá se z šestiúhelných atomů uhlíku. I přes obrovskou snahu se doposud nepodařilo do nanovrstvy graphene potřebné magnetické vlastnosti dodat. [35]



Obr. 50 Počítačová simulace molekul na grafenové vrstvě, když jsou molekuly magnetizovány, převzato z [35].

3.2.1.2 Důležité vlastnosti PM

1) Curieho teplota

Běžné magnety jsou vyráběny z feromagnetických látek. Patří mezi ně především železo, kobalt a nikl. Feromagnetické látky jsou složeny z paramagnetických atomů, ovšem v takovém uspořádání, že výrazně zesilují magnetické pole. Jejich relativní permeabilita je mnohem větší než 1. Slabým magnetickým polem lze u nich vyvolat takové uspořádání atomů, že se magnetické pole zesílí a dojde k magnetování látky. Magnetické pole ve feromagnetické látce zůstává, i když vnější pole zanikne. Příčinou magnetizace látky je působení sil mezi sousedními atomy. Jejich vlivem nastává i bez vnějšího magnetického pole souhlasné uspořádání magnetických polí v malé oblasti látky. Při této samovolné magnetizaci vznikají v látce zmagnetované mikroskopické oblasti (o objemu $0,001 - 10 \text{ mm}^3$) nazývané magnetické domény, které jsou orientovány nahodile. Působením vnějšího magnetického pole se tyto domény orientují souhlasně a látka získává vlastnosti magnetu. Při tomto ději se objem domén postupně zvětšuje, až při jejich souhlasném uspořádání doménová struktura mizí - látka je magneticky nasycena.

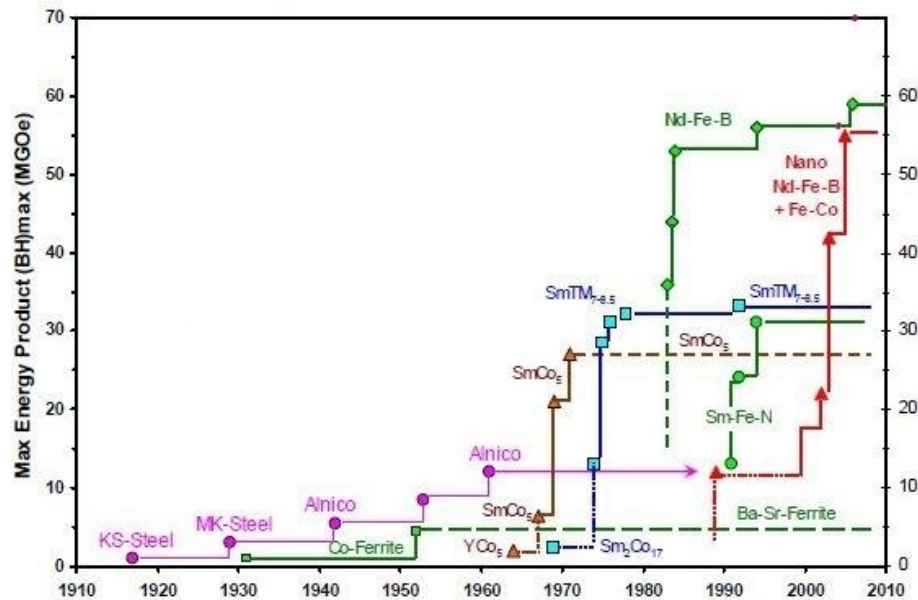
Při teplotě vyšší než Curieova je pravidelnost uspořádání narušena a při chaotickém rozložení magnetických momentů již látka nevykazuje feromagnetické vlastnosti a přestává tedy být magnetem. K této změně dochází skokově, analogicky se změnou skupenství, jde tedy o příklad fázového přechodu. Curieovu teplotu popsal francouzský fyzik Pierre Curie. [30]

Tab. 3.1 Vliv teploty na PM, převzato z [6].

	<i>Metalurgické změny [°C]</i>	<i>Curieho teplota[°C]</i>
<i>Alnico 5</i>	550	890
<i>Keramické</i>	1080	450
<i>SmCo₅</i>	300	700
<i>Sm₂Co₁₇</i>	350	800
<i>NdFeB</i>	200	310

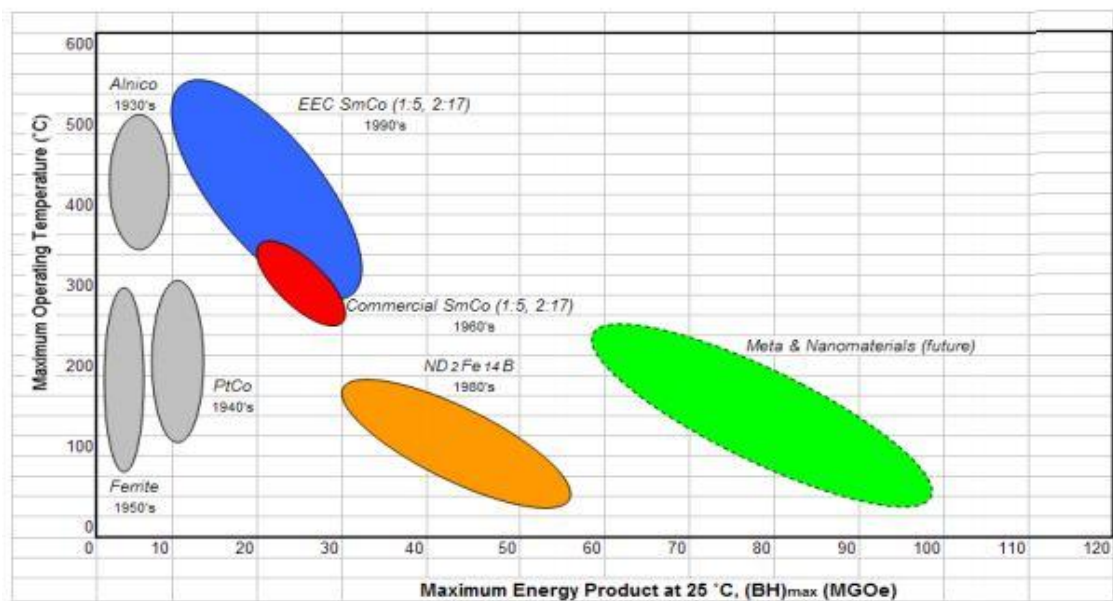
2) Maximální magnetická energie $(BH)_{\max}$

Maximální magnetická energie je energie, kterou maximálně dokáže PM vyprodukovat. Každý materiál má tuto charakteristickou veličinu jinou. Cílem u PM je, aby byla co nejvyšší.



Obr. 51 Vývoj materiálů v závislosti na vyprodukované magnetické energii $(BH)_{\max}$.

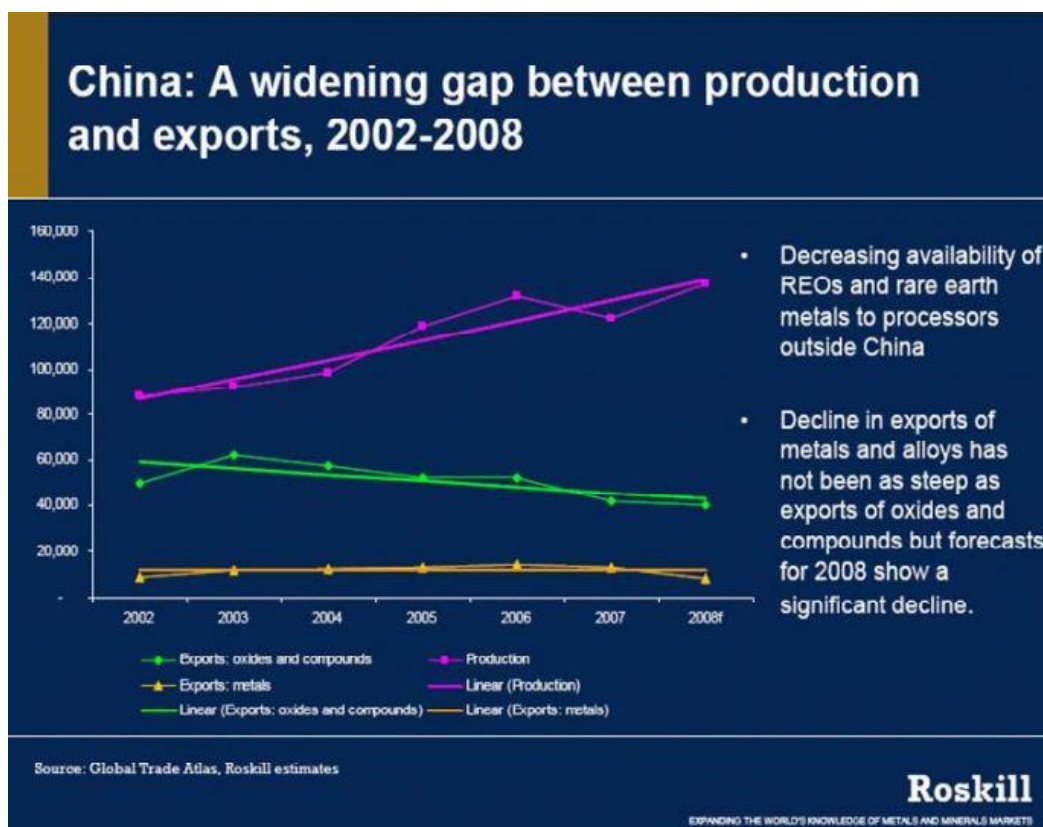
Jakou maximální magnetickou energii dokážou materiály vyprodukovat, samozřejmě také závisí na teplotě.



Obr. 52 Závislost maximální možné provozní teploty na produkované magnetické energii, převzato z [30].

3.2.1.3 Problém s těžbou vzácných zemin

V dnešní době je ekonomický trend jasný – vyrábět za co nejnižší cenu. U výroby permanentních magnetů se vyskytl velký problém. Materiály, ze kterých se PM vyrábějí – vzácné zeminy, se těží v Číně. Tamější trh se tedy řídí heslem – vyrábět za co nejmenší náklady. Proč tedy vzácné zeminy vyvážet do jiných zemí (USA, Evropa.), když mohu PM vyrábět a poté využít na vlastním trhu sám? Tento problém je v poslední době mnohem více znatelný. Vzácné zeminy a PM z nich vyráběné, začínají být nedostatkovým zbožím.



Obr. 53 Produkce a export vzácných zemin v Číně, převzato z [31].

Problém s těžbou a dovozem vzácných zemin se dá řešit více způsoby:

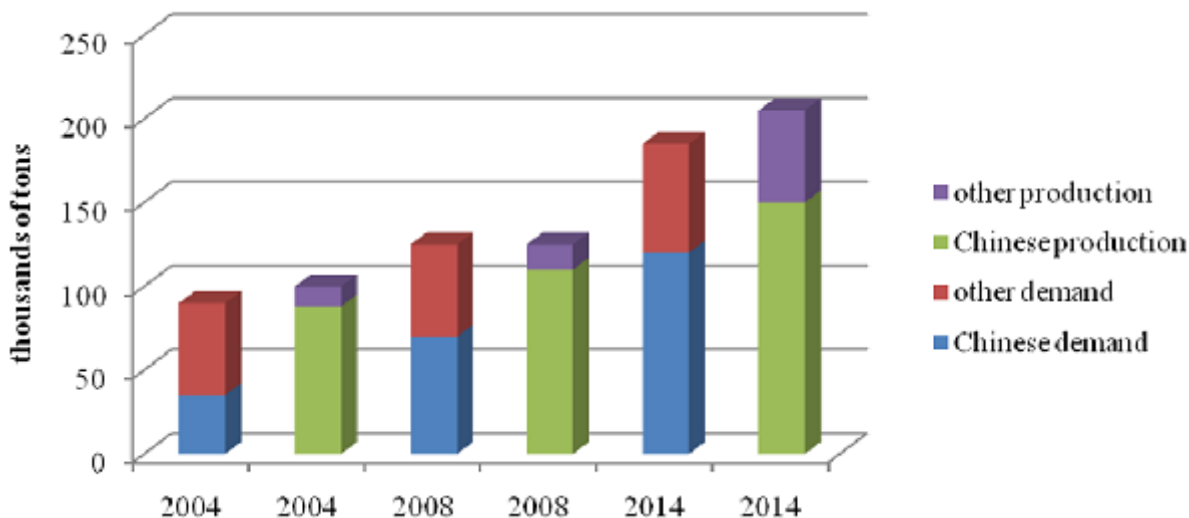
- Přejít zpět na ferity. To je ovšem krok zpět vzhledem k váze feritů, jejich velikosti apod.
- Vyrábět PM ze vzácných zemin nezávisle na Číně – V USA byl zahájen nový program. Společnost *Molycorp* obnovuje těžbu a zpracování vzácných zemin v dolech v Mountain Pass v Kalifornii. Zde by se měla v několika dalších letech produkce obnovit a tím by se měl problém z části vyřešit.
- PM z nano technologií.

Těžbou a využitím vzácných zemin se zabývá mnoho amerických a evropských společností.

Problém s těžbou zasahuje do různých průmyslových odvětví, všude tam, kde se vzácné zeminy (La, Ce, Pr, Lu...) využívají.

Příklady použití vzácných zemin:

- Větrné elektrárny a jejich turbíny – v dnešní době jsou vynalezeny další generace větrných turbín, které jsou složeny z PMG (Permanent Magnet Generator). Tento generátor využívá veliké množství neodymiových magnetů.
- Energeticky úsporné žárovky – potřeba Europia, Terbia a Ytria.
- Spotřebitelská elektronika – Na výrobu LCD displayů je třeba Cerium a Europium, na výrobu pevných disků a reproduktorů je potřeba neodymiové magnety.
- Automobilový průmysl – LCD display, alternátory, aditiva do nafty. [31]



Obr. 54 Nabídka a poptávka po vzácných zeminách, převzato z [33].

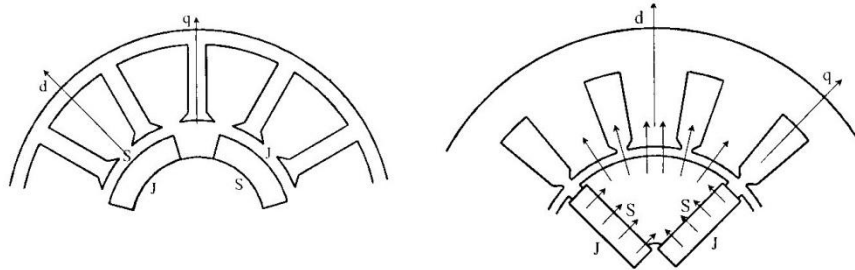
3.2.1.4 Stručné dělení synchronních strojů s PM

Stručné dělení synchronních strojů s permanentními magnety je podobné jako strojů bez PM.

- Podle povrchového uspořádání PM lze z hlediska velikosti vzduchové mezery stroje považovat za stroje s vyniklými póly.
- Podle skrytého uspořádání je lze považovat za synchronní stroje s hladkým rotorem.

- Podle délky axiální osy se dělí synchronní motory s PM na válcové a diskové.

Diskové motory se využívají tam, kde využíváme krátké axiální osy těchto motorů a tedy rychlé odezvy na řídicí impulsy. [6]



Obr. 55 Uspořádání PM na rotoru synchronního stroje, vlevo povrchové, vpravo skryté, převzato z [6].

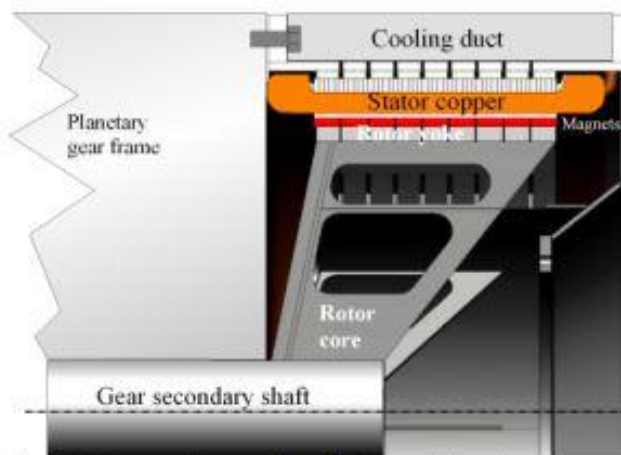
3.2.1.5 PMG – Synchronní generátory s PM

Synchronní generátor s permanentními magnety je generátor, který místo buzení rotoru pomocí SS proudu, používá permanentní magnety. PM magnety produkují konstantní magnetické pole obdobně jako vodič protékaný SS proudem. Tímto nahrazením vylepšíme účinnost stroje. Permanentní magnety, které se v generátoru použijí, musí být teplotně a mechanicky stabilní, nejlépe ze sloučenin ze vzácných zemin.

Synchronní generátory s PM jsou nejvíce použity ve větrných elektrárnách.

Dělení PMG je:

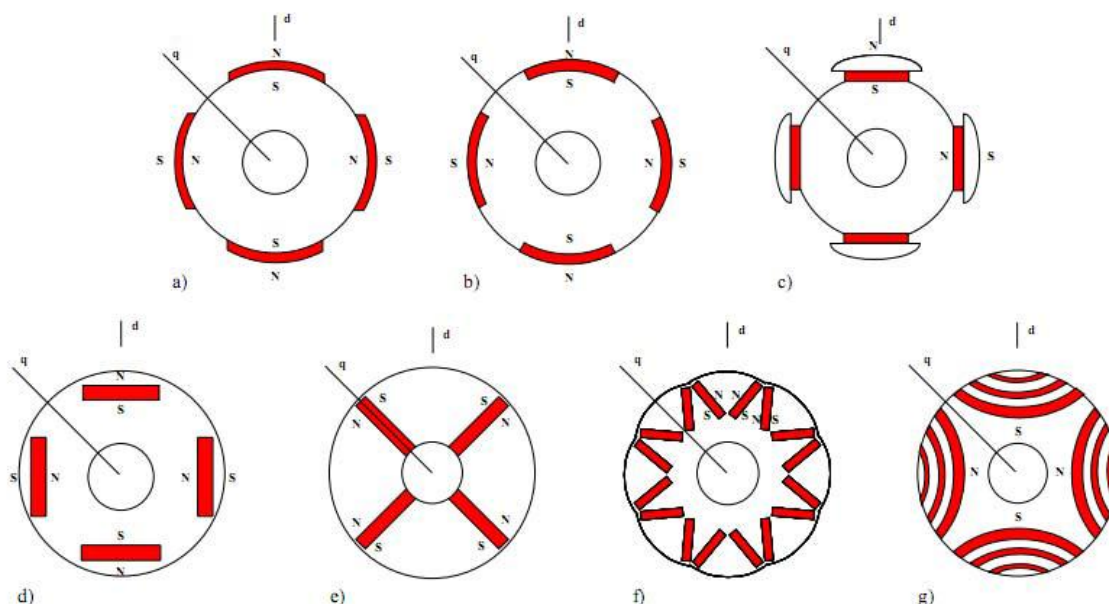
- Vysokorychlostní – otáčky 1000 až 2000 min^{-1}
- Středněrychlostní – otáčky 150 až 300 min^{-1}
- Pomaloběžné – otáčky 12 až 15 min^{-1}



Obr. 56 Řez hydrogenerátorem s PM, převzato z [33].

Dále se generátory s PM dělí na PMG a WFG³:

- PMG – SPM – PM uloženy na povrchu rotoru.
- PMG – IPM - PM uloženy uvnitř rotoru.
- WFG – SP – PM uloženy jako vyniklé póly.
- WFG – CR – PM uloženy jako póly turbogenerátoru.

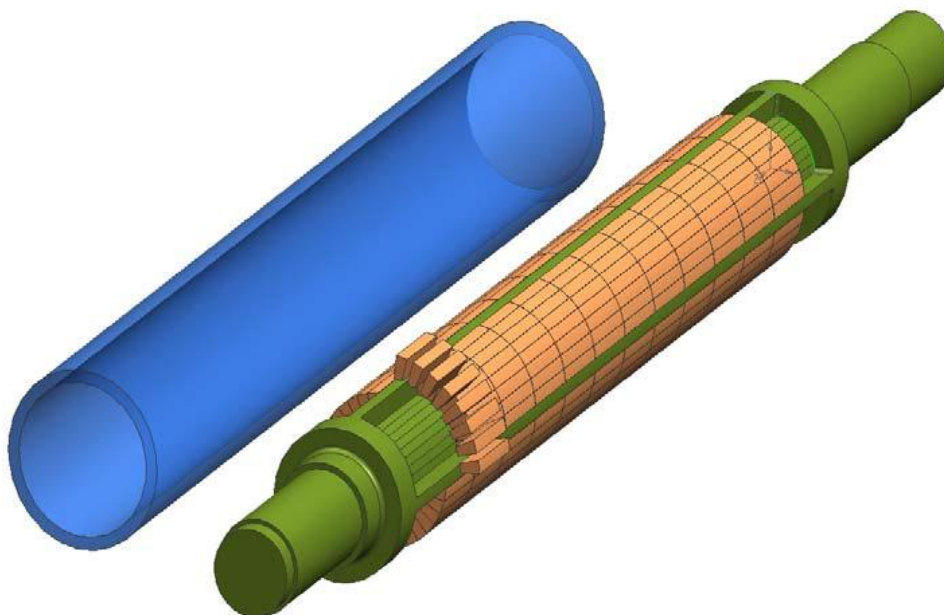


Obr. 57 Rozložení PM v rotoru synchronních strojů, a) Magnety přichycené na povrchu, b) magnety vložené v kostře rotoru, c) magnety umístěné pod pólem, d) tangenciálně vložené magnety, e) radiálně vložené magnety, f) axiálně vložené magnety, převzato z [46].

³ WFG – wound-field generátor – generátor s rázovým polem, PMG – permanent-magnet generátor.

Vysokorychlostní synchronní motory s PM

Vysokorychlostní synchronní motory s PM jsou navrženy tak, aby dosahovaly co nejvyšších rychlostí otáčení. Při výkonu 6 MW lze dosáhnout až 17 000 otáček za minutu. Tyto motory jsou používány v ropném a plynárenském průmyslu. Vysokorychlostní synchronní motory s PM jsou teprve ve fázi výzkumu a zkoušek. Jejich rotor je složen z PM, které jsou vyrobeny ze vzácných zemin. Rotorové PM se magnetují až poté, co byly namontovány. Rotory byly konstruovány tak, aby magnetizace proběhla jen jedním vysoko proudovým impulsem. Magnetizace probíhá po dobu 3 sekund a proudem až 21 kA. Rotor je složen z PM a z pojistného kroužku, který zajistí mechanickou pevnost rotoru. Kdyby zde tento kroužek nebyl, rotor by tak vysoké otáčky nevydržel.



Obr. 58 Vysokorychlostní rotor. Vlevo ochranný kroužek, vpravo tělo rotoru s permanentními magnety, převzato z [32].

Rotor obsahuje místo klasických ložisek aktivní magnetická ložiska. Klasická ložiska by nevydržela 17 000 ot. /min. Stator musí být hermeticky utěsněn. Celý systém je chlazen plynem. Stator pracuje na frekvenci 333 – 666 Hz a napětí 5 kV. Vinutí je klasicky složeno z Cu vodičů, ale musí být specificky přizpůsobeno vysokým otáčkám. [32]



Obr. 59 Stator vysokootáčkového stroje, převzato z [32].

Testy z roku 2009 byly úspěšné i při třech různých teplotách. Tento stroj vykazoval strukturální stabilitu i teplotní a balanční stabilitu. Tyto vysokorychlostní motory mají plánovanou oblast použití v plynárenském a ropném těžebním průmyslu jako pohon pro vysokorychlostní kompresory.

3.2.2 Synchronní stroje využívající supravodivé materiály

Supravodivost je jedním ze základních jevů fyziky. Objevení supravodivosti se datuje do roku 1911, když holandský fyzik H. Kamerlingh – Onnes dokázal zkapalnit helium. Tento převratný krok umožnil holandskému fyzikovi zchlazování látek na 4,2 K (-269 °C) za normálního tlaku. Tím se otevřela nová cesta výzkumu ve fyzice nízkých teplot. Po tomto objevu se holandský fyzik rozhodl, že provede měření elektrického odporu platiny a zlata. Odpor s teplotou klesal. Nejvíce však s teplotou klesnul až na hodnotu zbytkového odporu – tedy odpor neklesl na absolutní nulu. Tuto zbytkovou hodnotu odporu následně přičítal nečistotám. Nakonec si vybral na pokus rtuť, kterou opětovnými destilacemi zbavil všech nečistot. Zjistil náhlý pád odporu k nule. Tento jev byl pojmenován supravodivost. Teplota, při které se látka nachází v supravodivém stavu, se nazývá kritická teplota. Onnes ukázal, že proud tekoucí závitem, přetrvává i bez připojeného externího zdroje. Tato teorie byla nazvána jako teorie LTS (Low temperature superconductor).

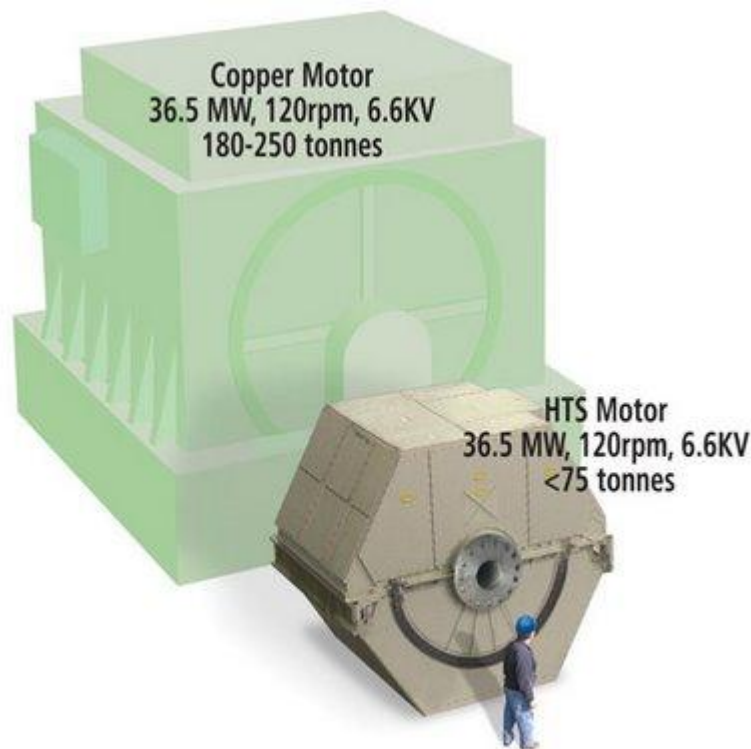
Objev vysokoteplotních supravodičů (HTS – High temperature superconductor) na konci osmdesátých let ve Švýcarsku, dal vývoji supravodivosti nový rozměr. Již nebylo nutné chladiť materiál tekutým héliem. Hranice kritické teploty, byla v počátcích HTS okolo 20 K. Tato hranice se postupem času posunula až k 105 K – 120 K. [8]

První generace vysokoteplotních supravodičů (1st Generation) byla založena na bázi Bismuthu, přesněji Bi – 2212 a Bi - 2223. Tyto materiály byly použity na přenosových kabelech, v transformátorech, motorech a generátorech. Přínosy těchto materiálů v zařízeních byly měřeními prokázány. Problém těchto materiálů je však ten, že jsou výhradně kovy a že ztrácejí supravodivé vlastnosti v silných magnetických polích.

Druhá generace vysokoteplotních supravodičů (2nd Generation) jsou materiály, založené na Samariu, Yttriu a Gadolinu. Nejruznější slitiny těchto ale i dalších kovů, kompozitů, obsahují i měď a nekovové složky. Tyto sloučeniny prokazují supravodivost i v silných magnetických polích a ke ztrátě supravodivosti dochází až při stokrát i vícekrát silnějších magnetických polích než u první generace. [12]

3.2.2.1 Supravodivé motory

Supravodivé motory (HTS motory) jsou nové typy střídavých motorů, které se od klasických strojů s měděným vinutím odlišují vinutím z vysokoteplotních supravodičů. Jelikož supravodivé materiály mohou přenášet mnohem větší proudy, je toto vinutí schopné generovat daleko silnější magnetické pole v daném prostoru. Výhodou těchto motorů je poloviční velikost a hmotnost, což přináší i nižší pořizovací náklady. Díky nižším ztrátám ve vinutí pracují s vyšší účinností, méně vibrují, mají nižší hlučnost a jsou elektricky více stabilní než běžné konvenční motory. Většina HTS motorů pracuje při synchronních otáčkách 1800 nebo 3600 ot. /min. Pro pohony lodí, kde je důležitý krouticí moment, jsou navrženy motory s otáčkami pod 200 ot. /min. [10]



Obr. 60 Porovnání motorů s vinutím ze supravodivého a měděného materiálu, převzato z [9].

Využití HTS motorů je velice rozsáhlé. Jsou vhodné například pro pohony kompresorů, čerpadel, větráků a dalších zařízení určených převážně pro nepřetržitý provoz. Využívají se v mnoha průmyslových odvětvích, jako jsou ocelárny a papírny, na vrtných plošinách apod. Zatím nejrozšířenější oblastí využití těchto motorů je lodní doprava.

V roce 2009 představila americká společnost *American Superconductor* doposud největší vyrobený a při plném výkonu úspěšně testovaný HTS motor. Tento motor, určený pro letadlové lodě amerického námořnictva, má výkon 36,5 MW. Mezi další společnosti, zabývající se výrobou supravodivých motorů, patří například společnosti *Automation Rockwell*, *Reliance Electric*, *Siemens* a *Nordic Superconductor Technologies*. [10]

3.2.2.2 HTS synchronní generátory

V současné době jsou k dispozici supravodivé materiály, jejichž elektrický odpor mizí již při teplotě kapalného vzduchu ($-200\text{ }^{\circ}\text{C}$). V roce 2001 se poprvé v Evropě podařilo uvést do provozu HTS generátor s výkonem 400 kW a otáčkami $1\,500\text{ min}^{-1}$.

Od roku 2001 pracují tři divize firmy *Siemens* na vývoji HTS generátoru s výkonem 4 MVA a otáčkami $3\,600\text{ min}^{-1}$. Cílem je zejména vyvinout hlavní generátory pro velká

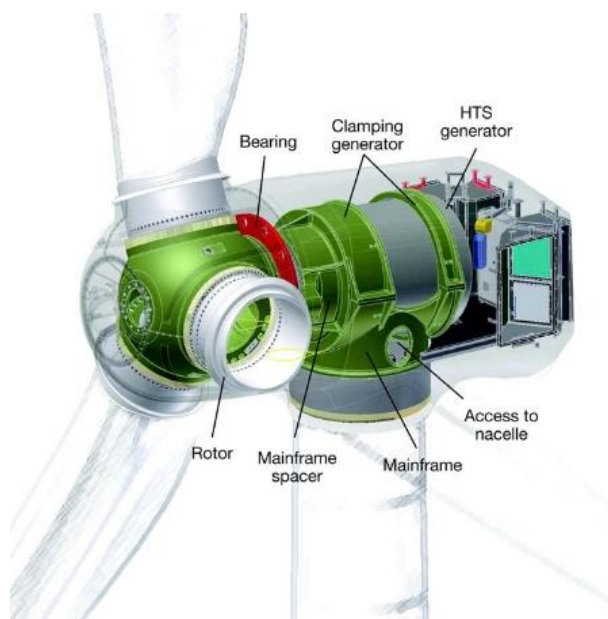
plavidla. Pohon generátoru by byl zajišťován namísto dieslových motorů, vysokootáčkovou plynovou turbínou. Supravodivý generátor má malé rozměry, a zabírá proto malý prostor. HTS generátory znamenají také nové možnosti hospodárnosti provozu a nová koncepční řešení. Prototyp generátoru HTS 4 MVA byl dokončen v roce 2005 a v roce 2006 bylo testováno jeho využití pro generování elektrické energie u velkých plavidel s moderními střídavými regulovanými pohony s měniči kmitočtu. [8; 10]

HTS hydrogenerátory

Hydrogenie

HTS Hydrogenie (Obr. 61) je název pro hydrogenerátor, který byl vynalezen firmou *GE Power Conversion*. Tento hydrogenerátor má místo klasického rotorového vinutí vinutí ze supravodivého materiálu. Díky tomu, že je použitý supravodivý materiál, se markantně sníží váha celého stroje. Stroj pracuje při teplotách -230 °C . Stroj není nutné nijak externě chladit. Klasický rotor s měděným rotorovým vinutím je chlazen vzduchem. Supravodivý materiál je složen z keramické vrstvy uložené na základu z kovu. Jelikož při -230 °C neexistuje žádný elektrický odpor, průřez vodiče může být snížen přibližně na 2% v porovnání s vodičem měděným.

Ve spojení s větrnou turbínou o výkonu 10MW nazývanou *Sea Titan* tvoří soustrojí, které generuje elektrickou energii z větrné energie. [11]



Obr. 61 Soustrojí větrné elektrárny s HTS generátorem, převzato z [11].

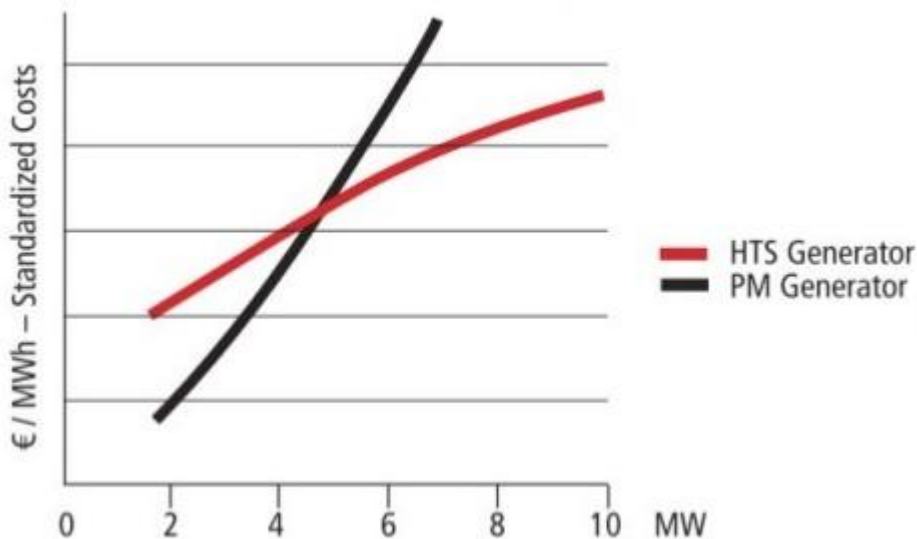
HTS turbogenerátory

U turbogenerátorů je hlavní místem pro použití supravodivých materiálů opět vinutí. Měděné vinutí se nahradí vysokoteplotním supravodivým materiálem druhé generace (HTS 2nd generation). Použitím tohoto materiálu se opět docílí snížení váhy generátoru a zmenšení rozměrů. V současném stavu supravodičů je aplikace omezena jen na stroje menších výkonů. Do budoucna však lze predikovat, že materiály HTS druhé generace umožní použití i u větších strojů.

3.2.3 Porovnání HTSG a PMG

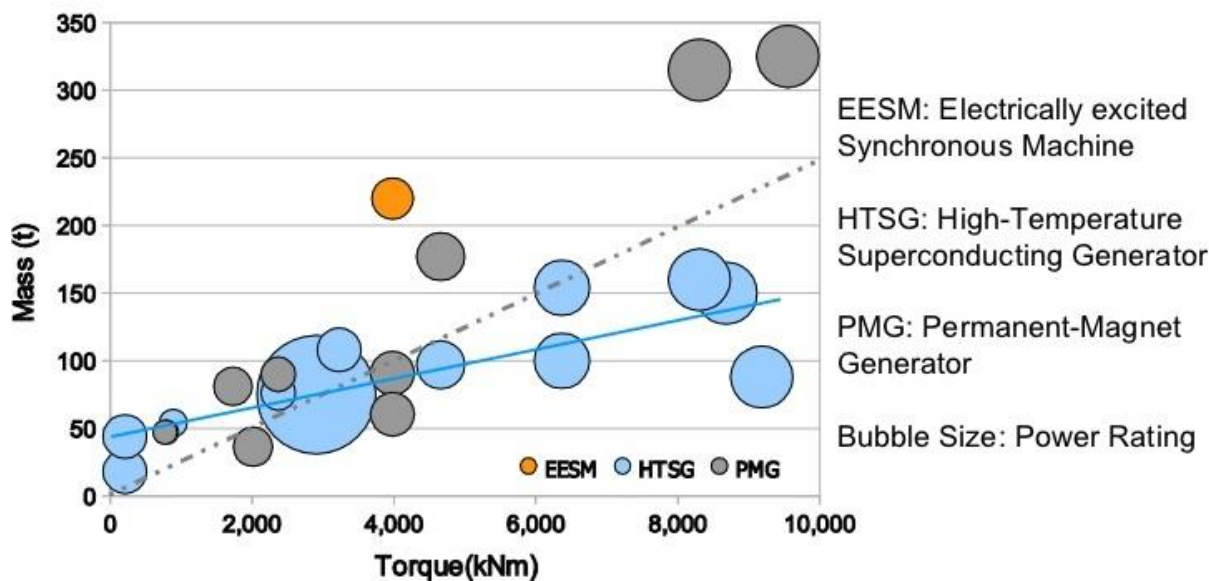
Porovnání strojů s PM (dále - PMG) a strojů, u kterých byly použity supravodiče (dále - HTSG), lze provést jen částečně a to z hlediska váhy, ceny za MW vygenerovaného elektrického výkonu a z hlediska točivého momentu počítaného na tunu váhy stroje.

Porovnání z hlediska ceny za MWh vychází pro menší výkony (do 5MW) lépe pro generátory s PM. Výkon 5MW, je však mezní hodnotou. Od 5MW a výše se již cenově více vyplatí generátory s využitím vysokoteplotních supravodičů.



Obr. 62 Porovnání HTSG a PMG z hlediska ceny za n .MW, kde $n = 0, 1, 2, \dots, 10$, převzato z [37].

Pokud bychom porovnali stroje HTSG a PMG z hlediska točivého momentu (torque – [Nm]) a váhy stroje, které je třeba použít na vygenerování tohoto momentu, dojdeme k závěru, že do 3000 kNm se více vyplatí generátory s PM. Nad tuto hodnotu bychom volili HTS generátory.



Obr. 63 Porovnání HTSG, PMG a klasického elektricky buzeného generátoru z hlediska váhy na jednotku točivého momentu, převzato z [37].

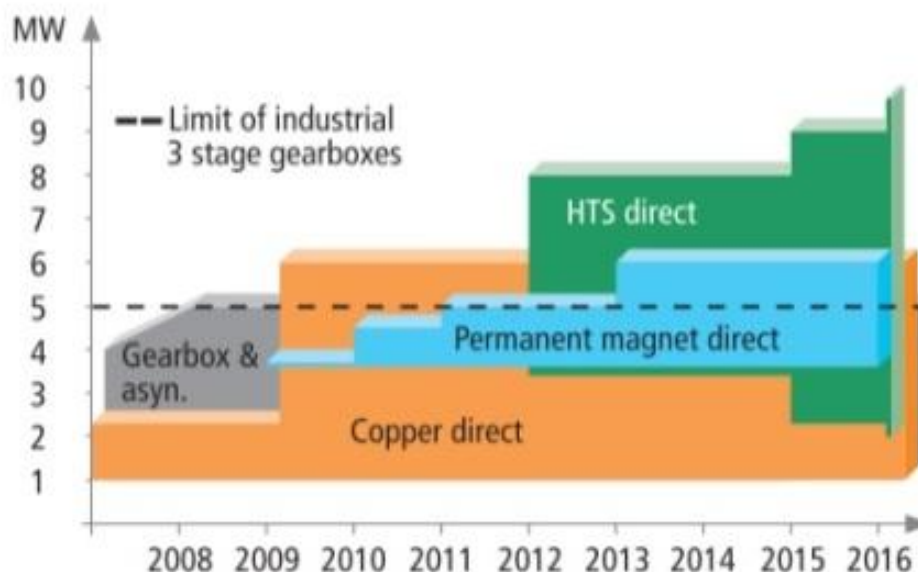
⁴ EESM – elektricky buzený stroj; HTSG – supravodivý generátor; PMG – stroj s permanentními magnety.

Použití strojů ve větrných elektrárnách

Zda použijeme ve větrné elektrárně stroj PMG, EESM, HTSG, nebo klasický asynchronní motor s převodovkou, závisí na již výše zmíněných kriteriích – do jakých maximálních výkonů lze jaký stroj efektivně využít. S postupem času se nejvíce rozvíjí HTSG, jsou tedy nasazovány do elektráren s vysokými výkony. Stroje s PM se zase více využijí u elektráren s menším instalovaným výkonem a i s menším točivým momentem. Asynchronní stroje s převodovkou, lze užít maximálně do hodnoty 4MW. Tyto elektrické stroje se již dále nerozvíjejí, takže postupem času budou vytlačeny ostatními elektrickými stroji. [37]

Nejvíce použití samozřejmě závisí na ceně stroje a místě, na které je chceme nainstalovat. Cena souvisí se všemi již popsanými parametry (váha – kolik použijí materiálu; točivý moment – kvalita materiálu, aby nedošlo k destrukci stroje)

Příklad – generátor o výkonu 10 MW sestavený z PM váží 300 tun, ale generátor o stejném výkonu, vyrobený z vysokoteplotního supravodiče váží tun 160. Problém může nastat při ceně vysokoteplotního vodiče. Cena se pohybuje 10 – 50 dolarů za jeden kAm. Tento problém lze řešit zavedením starší, nízkoteplotní supravodivosti, která však není tak efektivní (nutné chlazení tekutým héliem). [38]



Obr. 64 Možnost výkonového nasazení jednotlivých strojů v závislosti na letopočtu, převzato z [37].

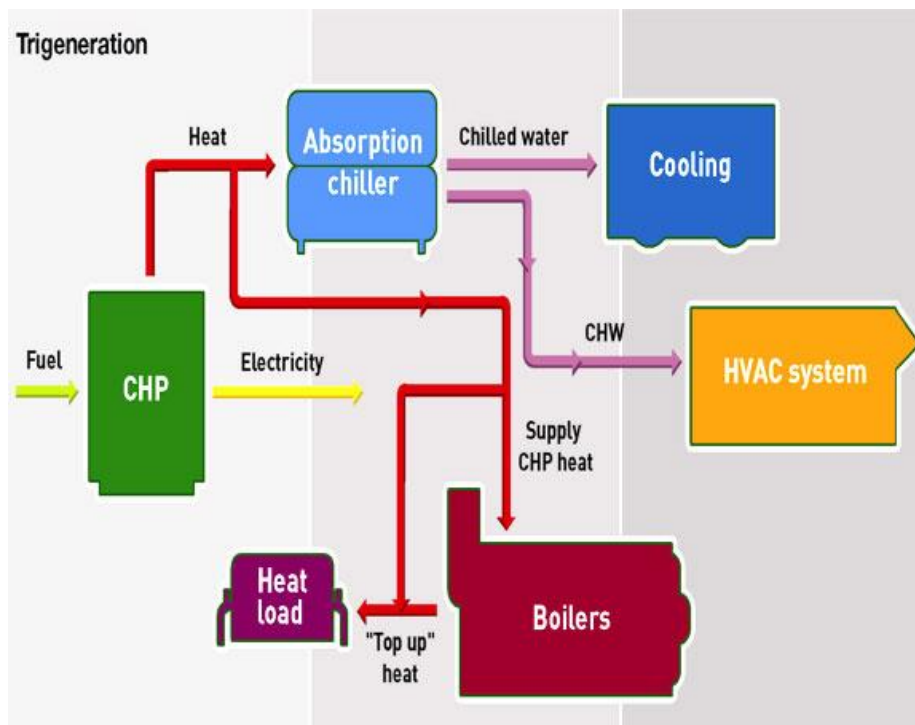
V posledních 15 letech vývoj větrné energie rapidně pokročil. Důvod? Ceny nerostných paliv a hrozba klimatických změn. GWEC (The Global Wind Energy Council) předpovídá, že na konci roku 2016, instalovaný výkon větrných elektráren bude 493,3 GW. Na konci roku 2011 to bylo jen 230 GW. Zde je patrné, jak rapidní růst instalovaného výkonu to bude. V roce 2011 měla Čína největší instalovaný výkon a to 62,4 GW a nyní plánují dalších 10 MW větrných elektráren vystavit nad hladinu moře. Je tedy patrné, jak moc v budoucnu budou větrné elektrárny budovány místo spalovacích elektráren a dalších elektráren, pracujících na bázi spalování nerostných surovin. [38]

3.2.4 Trigenerační a kogenerační jednotky

Elektrárna, produkující elektřinu a užitečné teplo se nazývá Kogenerační (CHP). Elektrárna, která produkuje elektrickou energii, užitečnou tepelnou energii a užitečné chlazení se nazývá Trigenerační elektrárna (CCHP). „Quadgeneration“ je nejnovější typ systému, který zahrnuje trigeneraci a navíc si poradí i s oxidem uhličitým. Oxid uhličitý je odstraněn, a energie může být v průmyslu dále využita. Quadgeneration se využívá u elektráren, které využívají spalovací stroje na výrobu elektrické energie. [39]

Trigenerace je specifický druh kogenerace, kde se společně vyrábějí nejen elektřina teplo – jako u kogenerace, ale i chlad, což umožňuje další zvýšení účinnosti využití energie paliv nebo sluneční energie. Chlazení na absorpčním principu, nevyžaduje elektrickou energii, ale méně ušlechtilou energii tepelnou. Tuto energii lze tímto způsobem využít i v létě,

je k dispozici přebytek tepelné energie. Takto získaná zbytková tepelná energie se využívá např. ke klimatizaci budov. Trigenerace se zatím aplikuje jen zřídka, ale kvůli vzrůstajícím cenám energií, se její potenciál zvyšuje.



Obr. 65 Principiální schéma trigenerace, převzato z [44].

Historie kogenerační jednotky

První, kdo provedl recyklaci energie, byl Thomas Edison již v roce 1882. Jeho Pearl Street Station, byla první elektrárna, která současně s výrobou elektřiny využívala zbytkové teplo pro vytápění vedlejší budovy. Recyklace energie byla v té době prováděna s účinností 50%. V současnosti produkují v USA kogenerační elektrárny již 8% z celkové vyrobené elektrické energie. V Evropě je nejpilnější v kogeneraci energie Dánsko, které 55% elektrické energie získává z kogeneračních elektráren. [40]

Princip kogenerace a trigenerace

Kogenerační výroba zkráceně kogenerace je sdružená výroba elektřiny a tepla. Proces přeměny energie z paliva probíhá tak, že nejprve se využije vysokopotenciální tepelná energie (pracovní látka má vysokou teplotu) k vykonání práce (výrobě elektrické energie), a teprve potom se pracovní látka o nižší teplotě využije pro pokrytí potřeb tepla.

Trigenerace je kombinovaná výroba elektřiny, tepla a chladu. U trigenerace je kogenerační jednotka doplněna o chladicí jednotku absorpčního typu. Toto spojení umožňuje využít teplo kogenerační jednotky i v letním období k výrobě chladu, kdy jinak spotřeba tepla klesá na minimum. Tím se výrazně prodlužuje doba provozu kogenerační jednotky a zlepšují se její ekonomické ukazatele.

Kogenerační jednotku tvoří nejčastěji generátor na výrobu elektřiny poháněný převážně spalovacím motorem na zemní plyn, v méně častých případech plynovou či parní turbínou. Oproti klasickým elektrárnám, ve kterých je teplo vznikající při výrobě energie bez užitku vypouštěno do okolí, využívá kogenerační jednotka teplo k vytápění a šetří tak palivo i finanční prostředky potřebné na jeho nákup. [39]



Obr. 66 Porovnání elektrárny + výtopny (rozdělený způsob výroby tepla a elektřiny) a kogenerační jednotky, převzato z [39].

Doc. Ing. Jaroslav Krbek, CSc. a Doc. Ing. Bohumil Polesný, CSc popisují úsporu pomocí kogenerace takto: „Při rozděleném způsobu výroby se z paliva (tedy z PEZ) spotřebuje 3,5 GJ tepla; při stejné dodávce energií spotřebuje kogenerační zdroj z PEZ jen 1,91 GJ tepla. Úspora tepla z PEZ je tedy 1,59 GJ, což představuje 45% celková spotřeby při rozděleném způsobu výroby. Elektrickou energii považujeme za nejkvalitnější druh energie, kterou můžeme všestranně využívat a v ideálním případě beze ztrát přeměňovat na libovolnou jinou formu energie, např. na energii mechanickou, tepelnou apod. Její výroba se ovšem uskutečňuje převážně transformací tepelné energie uvolněné z primárních energetických zdrojů (PEZ) ve složitých a drahých elektrárenských zařízeních. Tato transformace se může uskutečnit, v důsledku platnosti druhého zákona termodynamiky, jen s jistou účinností, přičemž i v ideálním případě se podstatná část tepelné energie PEZ bez užitku musí odvést do atmosféry. V uhelných parních elektrárnách, tvořících základ naší energetické soustavy, činí průměrná účinnost této přeměny pouze kolem 33%. Z uhlí, vytěžené-ho s vynaložením

značného úsilí a nákladů, se zbývajících 67% uvolněné energie, za doprovodu životnímu prostředí škodících plynů a látek, odvádí do okolí elektráren. V dosud nejdokonalejších paroplynových elektrárnách, spalujících zemní plyn, celková účinnost jen o málo přesahuje 55%. Tepelná energie je energií méně hodnotnou, neboť její použití je omezené a její přeměna na kvalitnější druh energie je technicky obtížná a může být uskutečněna jen částečně. Na druhé straně její získání z PEZ, zejména v teplotně nízkopotenciální podobě horké nebo teplé vody, je technicky poměrně jednoduché a levné. To přirozeně svádí investory k preferenci tohoto způsobu zabezpečení jejich potřeb tepla pro vytápění a výrobu teplé užitkové vody. V mnoha případech je to ekonomicky opodstatněné, mnohdy se však takto zbytečně ztrácí schopnost konat pomocí energie, uvolněné z kvalitních paliv, práci a vyrábět tak všestranně využitelnou elektrickou energii.“ [42]

Základní struktura kogeneračních systémů je tvořena spalovacím motorem (pohonná jednotka), generátorem včetně zařízení pro připojení na spotřebitelskou síť, kotlem nebo výměníkem tepla, včetně zařízení na propojení s tepelnou spotřebitelskou sítí a řídicím systémem. Trigenerační systém má navíc zařízení na zprostředkování chladu.[42]

V současné době se jako pohon v kogeneračních jednotkách nejčastěji používají:

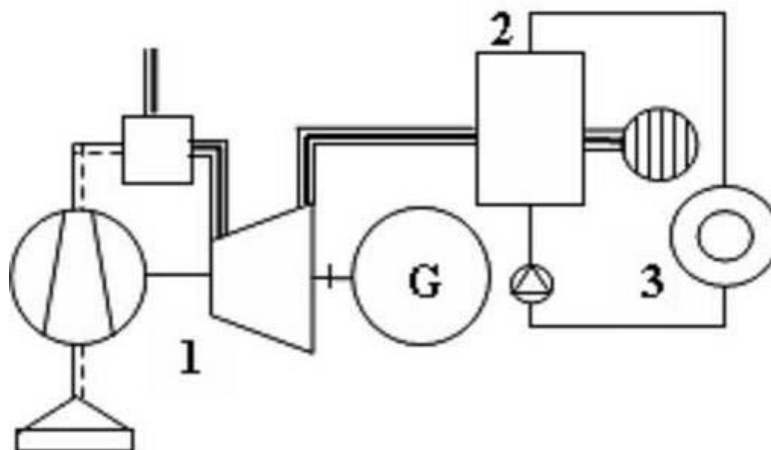
- parní turbíny
- spalovací turbíny (zapojení kogenerační jednotky viz příloha A)
- spalovací motory
- paroplynová (kombinovaná) zařízení

S intenzivním vývojem přicházejí na trh nové druhy pohonných jednotek:

- Stirlingovy motory
- mikroturbíny
- zařízení využívající organický cyklus (ORC)
- systém Talbott
- parní motory
- palivové články

Objevují se zařízení dovolující přípravu nových paliv (obnovitelných) pro kogenerační pohony:

- zplyňovací zařízení
- zařízení pro rychlou pyrolýzu
- zařízení vyrábějící bioplyn [42]



Obr. 67 Schéma kogenerační jednotky, 1 – spalovací turbína, 2 – kotel na odpadní teplo, 3 – spotřebič tepla, převzato z [42].

Stroje použité v kogeneračních jednotkách

Tyto stroje pracují v generátorickém stavu. Převádějí mechanickou energii na energii elektrickou. Přes hřídel bývají připojeny ke spalovacímu motoru nebo turbíně. Elektrické stroje bývají dvojího typu – synchronní (turbogenerátory) a asynchronní stroje. Synchronní stroje mohou být navíc různého druhu – s PM, se supravodivými materiály (spíše budoucnost a pro vyšší výkony) nebo klasické s buzením SS proudem. Zda bude použit asynchronní nebo synchronní stroj rozhoduje výstupní elektrický výkon. Pokud bude menší než 200 kW, více se hodí asynchronní generátory, samozřejmě pokud je výkon větší, použijeme synchronní generátory. Synchronní stroje jsou dražší, protože je třeba další zařízení na spouštění, řízení a podobně. Jsou dražší než asynchronní stroje. Trend do budoucna: použití synchronních strojů i pro menší výstupní elektrické výkony než je 200 kW. I zde při rozhodování který generátor použít rozhoduje cena. [45]

Typy použitých strojů jsou většinou tyto:

- synchronní stroje s klasickým buzením
- synchronní stroje s PM nebo generátory se supravodiči (použití v budoucnost pro vyšší elektrické výkony)
- asynchronní generátor u mikrokogenerace (do 200 kWe)

Přínosy zavedení kogenerační jednotky

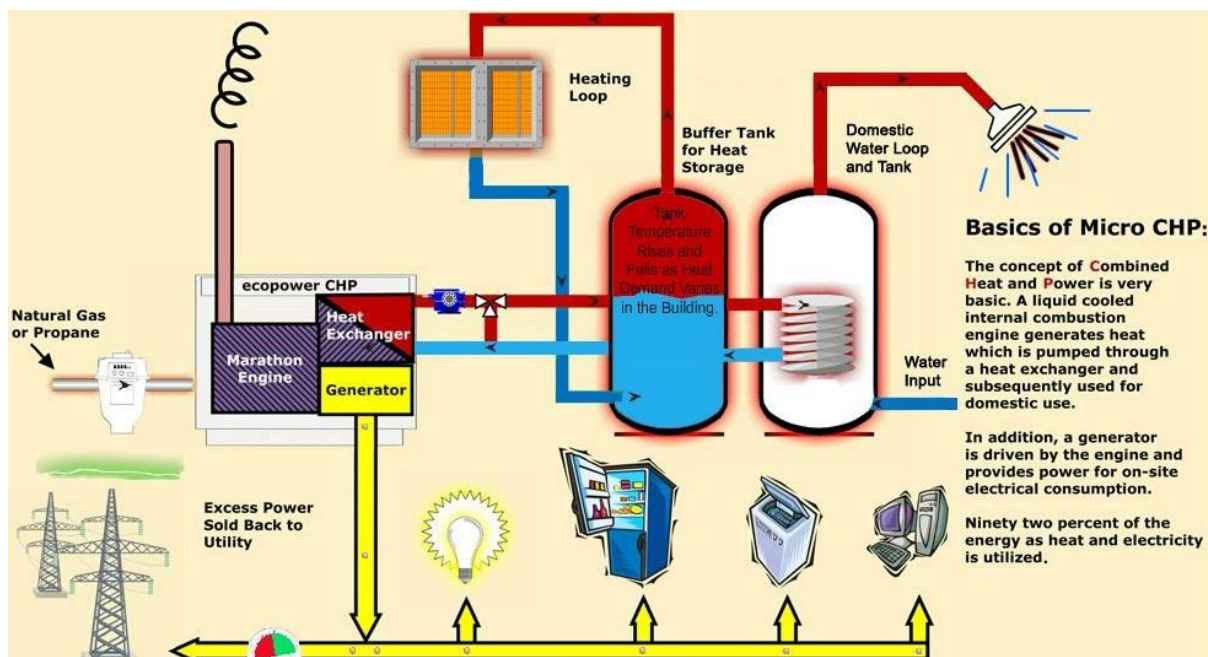
Mezi hlavní přínosy instalace kogenerační jednotky patří:

- Snížení ceny tepla.
- Úspora na ekologické dani ze zemního plynu.
- Snížení nákladů na běžnou údržbu a provoz ostatních energetických zařízení.
- Prodloužení životnosti ostatních energetických zdrojů tím, že nejsou provozovány v letních měsících, kdy je v provozu pouze kogenerační jednotka.
- Snížení ceny silové elektřiny.
- Nová kogenerační jednotka může sloužit jako záložní zdroj (dieselagregát). [39]

Oblasti a místa v ČR použití trigenerace a kogenerace

1) Oblasti použití

- Průmyslové zóny
- Nemocnice
- Administrativní a obchodní centra
- Školy, internáty, koleje
- Hotely a penziony
- Sportovní centra
- Rodinné domy – mikrokogenerace [39]



Obr. 68 Komerční schéma mikrokogeneračního cyklu v rodinném domě, převzato z [43].

Místa v ČR, kde se kogenerace využívá:

- Tepelná elektrárna Mělník napájí 30 km dlouhým teplovodem sever Prahy.
- Jaderná elektrárna Temelín napájí teplem Týn nad Vltavou.
- Holešovická elektrárna. Již při svém vzniku na začátku 20. století dodávala teplo do pražské čtvrti Holešovice-Bubny.

Quadgenerační jednotka

Rok 2008 – poprvé v provozu quadgenerační jednotka. Příklad využití quadgenerace je v elektrárně u Rio de Janeiro, v Brazílii. Quadgenerační jednotka byla dodána společností GE. Jednotka o elektrickém výstupním výkonu 4MW, je instalována tak, že dodává elektřinu, teplo, studenou vodu a navíc dodává oxid uhličitý + dusík místní továrně na operace při lahvování lahví. GE také instalovalo quadgeneraci v Rumunsku v továrně na Coca-Colu a v dalších mnoha zemích v jiných oblastech použití. Quadgenerační jednotka je velice perspektivní záležitost do budoucna. [40]

Závěr

Ve své bakalářské práci popisuji synchronní stroje od nejstarších pokusů vynálezců, přes prvotní jednoduché pomůcky, k dokonalejším strojům a k jejich zavádění do elektrotechnického, strojního i těžkého průmyslu v českých zemích i v zahraničí.

Tyto vynálezy znaly a při výrobě svých produktů používaly největší závody jako *ŠKODA*, *Westinghouse*, *General Electric Company* apod. Historický vývoj v oblasti synchronních strojů včetně životních osudů největších vynálezců mapuje první kapitola.

Druhá část mé bakalářské práce popisuje dělení a s tím související využití synchronních strojů v současnosti. V praxi je používána celá řada synchronních strojů, uvádím hlavní oblasti jejich použití, podle nich jsem synchronní stroje systematicky rozdělil a ke každé oblasti použití jsem našel v praxi příklad daného synchronního stroje. V druhé kapitole jsou také uvedeny tabulky popisující štičkové hodnoty vybraných zajímavých strojů.

Poslední část práce je výhled do budoucnosti praktického využití synchronních strojů a také popis materiálů, které budou v budoucnu spolu u synchronních strojů využívány. Permanentní magnetismus a supravodivé materiály jsou podle mého názoru nejperspektivnějšími oblastmi ve vývoji synchronních strojů. Stejně tak kogenerační jednotky. Tyto jednotky jsou velmi perspektivní. Stačí si jen uvědomit, že ještě před několika lety tyto jednotky v domácím použití prakticky neexistovaly. Jejich výborné vlastnosti ve využití zbytkového tepla ať už k vytápění nebo ke klimatizování zajišťují, že se v budoucnu dočkáme jejich výskytu v každé domácnosti. Historie, princip a použití kogeneračních jednotek jsou popsány v poslední kapitole.

Oblast vývoje synchronních strojů, jejich historie, současné rozdělení a výhled do budoucnosti je velmi rozsáhlé téma. Bylo by zřejmě nemožné vejít se do určeného rozsahu, pokud bych měl popsat celou problematiku. Snažil jsem se tedy vybrat důležité a pro mne zajímavé části a myslím si, že práce ukazuje základní přehled vývoje synchronních strojů. A to od prvních fyzikálních principů, přes zavedení elektrických strojů do průmyslu, až k současnému stavu a využití, který bude pokračovat aplikací perspektivních směrů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MAYER, DANIEL. *Pohledy do minulosti elektrotechniky*. České Budějovice: KOOP, 2004, 427 s.
- [2] BAŠTA, JAN. *Historie vývoje a perspektivy elektrických strojů*. Plzeň: 2011, 54str. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta.
- [3] J. BAŠTA, J. Chládek, I. Mayer. *Teorie elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1968. 582 s.
- [4] Sweb, *Vodní elektrárna Dlouhé stráně* [online]. 2013[cit. 2013-05-23]. Obrázek. Dostupné z WWW: <<http://ok1zed.sweb.cz/img/ev-pveds.jpg>>.
- [5] N. Petrov. *Elektrické stroje 2*. Z ruského originálu přeloženo v Praze: Academica, 1982, 732 s.
- [6] VALÉRIA HRABOVCOVÁ a kolektiv. *Moderné elektrické stroje*. Žilina: 2001, 256 s.
- [7] ODEHNAL, M. *Supravodivost a jiné kvantové jevy*. Praha: Academia, 1992.
- [8] *Elektro, odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. 2010 [cit. 2013-05-23]. Supravodivost – perspektivní technologie blízké budoucnosti. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34841>.
- [9] *Next Big Future* [online]. 2009 [cit. 2013-05-23]. Megawatt superconducting motor successfully tested at full power. Dostupné z WWW: <<http://nextbigfuture.com/2009/01/365-megawatt-superconducting-motor.html>>.
- [10] SCHÖNBAUER, JIŘÍ. *Supravodiče a jejich využití v praxi*. Plzeň : 2011, 63str. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta.
- [11] *Wind Power* [online]. 2013 [cit. 2013-05-23]. GE completes trial of next generation superconductor technology. Dostupné z WWW: <<http://www.windpowermonthly.com/article/1177148/ge-completes-trial-next-generation-superconductor-technology>>.

- [12] *HTS materials technology* [online]. 2013 [cit. 2013-05-23]. LTS and HTS.
Dostupné z WWW: <<http://www.superpower-inc.com/content/hts-materials-technology>>.
- [13] *Vědeckotechnický sborník ČD č.29/2010* [online]. 2010 [cit. 2013-05-23]. Synchronní motory s PM pro trakční pohony.
Dostupné z WWW: <<http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/vts29/2908.pdf>>.
- [14] *Brush SEM s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2013-05-23]. Informace o společnosti BRUSH s.r.o.
Dostupné z WWW: <<http://www.brush-sem.cz/o-nas>>.
- [15] *AC power history and timeline* [online]. 2013 [cit. 2013-05-24]. Časová linie vývoje strojů.
Dostupné z WWW: <<http://edison techcenter.org/AC-PowerHistory.html>>.
- [16] *Vývoj synchronních strojů 2010* [online]. 2012 [cit. 2013-05-24]. The evolution of the synchronous machine.
Dostupné z WWW:
<<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=177464&queryText%3DThe+evolution+of+the+synchronous+machine>>.
- [17] *History of electric machinery* [online]. 2013 [cit. 2013-05-24]. Large Generators and High Power Drivers.
Dostupné z WWW: <http://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/vorlesungen_4/vorlesungsgrogeneratorenundhochleistungsantriebe/folie_gghl_0.pdf>.
- [18] *Turbogenerátor - 4shared* [online]. 2011 [cit. 2013-05-25]. Obrázek složený z částí turboalternátoru.
Dostupné z WWW:
<http://www.4shared.com/photo/fAX0saI5/cutaway_view_of_a_synchronous_.html>.

- [19] *Andritz group* [online]. 2013 [cit. 2013-05-25]. Photogallery.
Dostupné z WWW:
<<http://grz.g.andritz.com/c/com2011/00/01/49/14964/1/1/0/543454749/gr-hydro-turbo-generator.jpg>>.
- [20] *Brazil quality* [online]. 2013 [cit. 2013-05-25]. Photogallery -130 MVA generátor.
Dostupné z WWW:
<http://www.brazilquality.com/images/Hydrogenerator_Rocky_Reach.JPG>.
- [21] *Hydrocity power* [online]. 2013 [cit. 2013-05-25]. Photogallery.
Dostupné z WWW: <<http://hydroelectricitypower.blogspot.cz/2010/02/hydro-generator-turbine-common-parts.html>>.
- [22] *ČEZ – Historie JE Temelín* [online]. 2013 [cit. 2013-05-25]. Historie JE Temelín.
Dostupné z WWW:
<<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/historie-a-soucasnost.html>>.
- [23] *ČEZ – Dostavba JE Temelín* [online]. 2013 [cit. 2013-05-25]. Dostavba JE Temelín.
Dostupné z WWW:
<<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/zvazovana-dostavba-elektrarny-temelin.html>>.
- [24] *JE Kashiwazaki-Kariwa* [online]. 2013 [cit. 2013-05-25]. Bezpečnostní opatření.
Dostupné z WWW: <<http://www.tepco.co.jp/en/nu/kk-np/safety/flood-e.html>>.
- [25] *DP* [online]. 2008 [cit. 2013-05-25]. Regulace příkonu PVE v provozu.
Dostupné z WWW:
<<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/16029/Diplomov%C3%A1%20pr%C3%A1ce1.pdf?sequence=1>>.

- [26] *Časopis stavebnictví*. [online]. 2007 [cit. 2013-05-25]. Tři soutěsky v Číně.
Dostupné z WWW:
<http://www.casopisstavebnictvi.cz/tri-soutesky-cinska-dimenze_A150_I6>.
- [27] *Chinese Government's*. [online]. 2007 [cit. 2013-05-25]. Three Gorges Dam at full capacity as last generator starts operation.
Dostupné z WWW:
<http://english.gov.cn/2012-07/04/content_2176713.htm>.
- [27] *Chinese National Committee on Large Dams*. [online]. 2011 [cit. 2013-05-25]. Three Gorges Dam.
Dostupné z WWW:
<<http://www.chincold.org.cn/dams/NewsEvents/webinfo/2011/04/1302258808206536.htm>>.
- [28] *Reluktanční motor*. [online]. 2011 [cit. 2013-05-25]. All About circuits.
Dostupné z WWW:
<http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_13/4.html>.
- [29] *Synchronní motor*. [online]. 2011 [cit. 2013-05-25]. Synchronous motor.
Dostupné z WWW:
<http://nuclearpowertraining.tpub.com/h1011v4/css/h1011v4_32.htm>.
- [30] *Fizmatik*. [online]. 2010 [cit. 2013-05-25]. Curieho teplota.
Dostupné z WWW:
<<http://fyzmatik.pise.cz/868-curieho-teplota-aneb-jak-zrusit-magnet.html>>.
- [31] *Molycorp minerals*. [online]. 2011 [cit. 2013-05-26]. Problém dovozem vzácných zemin.
Dostupné z WWW:
<http://web.physics.udel.edu/sites/default/files/u4/4_Smith_Molycorp.pdf>.

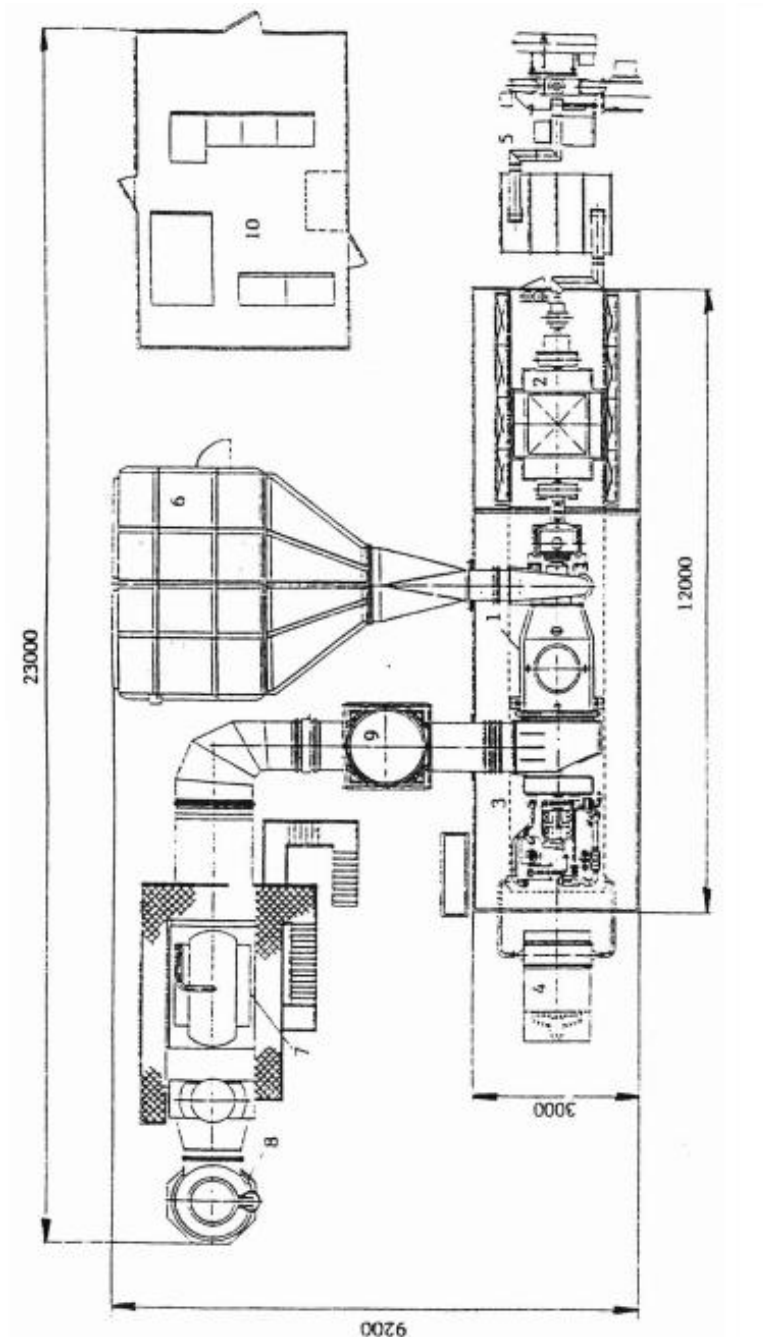
- [32] *Advanced Electric Machines Technology*. [online]. 2009 [cit. 2013-05-26]. Vysokorychlostní motor.
Dostupné z WWW:
<http://www.nist.gov/pml/high_megawatt/upload/7_1_Weeber-Approved.pdf>.
- [33] *Permanentní magnety*. [online]. 2010 [cit. 2013-05-26]. Permanent Magnet Technology in Wind Power Generators.
Dostupné z WWW:
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5608312>>.
- [34] *GE Company*. [online]. 2013 [cit. 2013-05-26]. Informace o GE.
Dostupné z WWW:
<http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/generators/index.jsp>.
- [35] *Graphene*. [online]. 2013 [cit. 2013-05-26]. Informace o nanotechnologii.
Dostupné z WWW:
<<http://www.chemistry2011.org/news/PhysicalChemistry/MaterialsScience/Nanotechnology/NewMagneticGrapheneMayRevolutionizeElectronics>>.
- [36] *Permanentní Magnety*. [online]. 2013 [cit. 2013-05-27]. Informace o vlastnostech PM.
Dostupné z WWW:
<<http://www.magnety-magnety.com/>>.
- [37] *Porovnání HTSG a PMG*. [online]. 2013 [cit. 2013-05-27]. Informace o použití PMG a HTSG ve větrných elektrárnách.
Dostupné z WWW:
<<http://www.slideshare.net/ozikeysan/hightemperature-superconducting-generators>>.
- [38] *Wind plants*. [online]. 2013 [cit. 2013-05-27]. Informace o použití PMG a HTSG ve větrných elektrárnách.
Dostupné z WWW:
<<http://www.ewh.ieee.org/tc/csc/europe/newsforum/pdf/ASC2012-4LPG-09.pdf>>.

- [39] *Trigenerace a kogenerace - ČEZ*. [online]. 2013 [cit. 2013-05-27]. Informace o trigeneraci a kogeneraci.
Dostupné z WWW:
<<http://www.cez.cz/kogenerace/cs/caste-otazky/princip-kogenerace-trigenerace-a-moznosti-instalace.html>>.
- [40] *Quadgeneration v Brazílii*. [online]. 2013 [cit. 2013-05-27]. Informace o quadgeneraci.
Dostupné z WWW:
<<http://www.power-eng.com/articles/2013/04/ge-to-install-gas-engines-in-quadgeneration-plant-in-brazil.html>>.
- [41] *GE quadgeneration*. [online]. 2013 [cit. 2013-05-27]. Informace o quadgeneraci.
Dostupné z WWW:
<http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/gas_engines_power_generation/ge_jenbacher_j624_gs.jsp>.
- [42] *Kogenerační jednotky*. [online]. 2007 [cit. 2013-05-28]. Zřizování kogenerační jednotky.
Dostupné z WWW:
<http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf>.
- [43] *Mikrokogenerační schéma*. [online]. 2013 [cit. 2013-05-28]. Mikrokogenerační schéma rodinného domu.
Dostupné z WWW: <http://www.marathonengine.com/ecopower_principles.html>.
- [44] *Schéma trigenerace*. [online]. 2007 [cit. 2013-05-28]. Kogenerační schéma rodinného domu.
Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Trigeneration_Cycle.jpg>.

- [45] *Druhy elektrických strojů použitých při kogeneraci.* [online]. 2006 [cit. 2013-05-28].
Druhy použitých strojů při kogeneraci.
Dostupné z WWW: <http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/root/pdf/2006/Node754_ANcogeneration.pdf>.
- [46] *Druhy synchronních generátorů s PM.* [online]. 2011 [cit. 2013-05-28]. Permanent magnets generators.
Dostupné z WWW:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5075338&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fexpls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5075338>.
- [47] *Three Gorges Dam, CHINA* [online]. 2012 [cit. 2013-06-02]. Popis vodní elektrárny v Číně.
Dostupné z WWW: <<http://iplacesblog.com/2012/02/03/three-gorges-dam-china/>>.

Přílohy

Příloha A – Kogenerační systém



Obr. Příloha A, Spalovací turbína o výkonu 4,7 MW, parní kotel na odpadní teplo
1 spalovací turbína; 2 elektrický generátor; 3 startovací zařízení; 4 vzduchový chladič oleje; 5 vývody elektrického výkonu; 6 vzduchový trakt se žaluziemi, filtry a tlumičem hluku; 7 kotel na odpadní teplo; 8 komín; 9 komín pro samostatný provoz spalovací turbíny; 10 dozorna a rozvodna, vzdálenosti v cm, převzato z [42].