



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra elektrických pohonů a trakce (K13114)**

**Princip a použití prstencových motorů v průmyslových
aplikacích**

Principle and usage of the ring motors in industrial applications

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Pavel Karlovský

Kryštof Špaček

Praha 2014

Anotace

Cílem této bakalářské práce je seznámit čtenáře s prstencovými motory, jejich modelováním a možnostmi použití. V mnoha moderních aplikacích je pro pohon vhodné použít přímý přenos momentu z elektrického stroje bez použití převodovky. K tomu jsou určeny právě prstencové motory, které vynikají značným krouticím momentem. Práce se zabývá popisem těchto strojů (motorů), jejich elektromechanickými vlastnostmi a konstrukčním uspořádáním. Dále se práce zabývá matematickým popisem prstencového motoru, na jehož základě je vytvořen model pro simulaci vlastností prstencového motoru, a jeho chování při základních režimech chodu. Simulace jsou řešeny v počítačovém programu MATLAB - SIMULINK. Model v tomto programu je realizován pro v současnosti nejrozšířenější typ prstencových motorů, a to synchronní s permanentními magnety (PMSM). V poslední části práce jsou sepsány vhodné aplikace pro použití prstencových motorů a výhody spojené s jejich použitím.

Abstract

The aim of this bachelor's project is to acquaint the reader with ring (torque) motors, their modeling and application possibilities. In many modern applications is suitable use for a drive direct transfer of drive torque of the electric machine without use a gearbox. This is intended just for ring (torque) motors that excel in considerable torque. The project deals with the description of these machines (motors), their electro-technical properties and structural arrangement. Further the project deals with the mathematical description, of which is created a model for simulating the properties of the ring (torque) motor and its behavior in essential modes operation. Simulations are solved in a computer program MATLAB-SIMULINK. Model in this program is executed for currently the most common type of ring (torque) motors which is permanent magnet synchronous motor (PMSM). In the last part of this project are written applications suitable for use ring (torque) motors and benefits associated with their use.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW apod.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Děkuji panu Ing. Pavlu Karlovskému za cenné rady, informace a připomínky, které mi poskytl při tvorbě této práce.

Obsah

Anotace	3
Abstract	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	4
1. Úvod	7
2. Použití prstencových strojů	7
2.1. Průmyslová robotika	7
2.2. Větrné elektrárny	9
2.3. Výtahová technika	11
2.4. Medicína	12
2.5. Automobilový průmysl	13
2.5.1. In wheel motor.....	13
2.5.2. Hybridní pohon vozů	15
2.6. Další možnosti použití prstencových motorů.....	16
3. Konstrukce a princip prstencového motoru	17
3.1. Stator	18
3.2. Rotor.....	20
3.3. Permanentní magnety.....	21
3.4. Princip vzniku momentu	23
4. Transformace souřadnicových systémů	24
4.1. Clarkové transformace	25
4.2. Parkova transformace	26
5. Matematický model prstencového motoru	28
5.1. Parametry motoru.....	29
5.2. Modelování	30
5.2.1. Rovnice pro napětí v d, q systému	30
5.2.2. Spřažené magnetické toky v d, q systému.....	31
5.2.3. Vztah elektrické a mechanické úhlové rychlosti	31
5.2.4. Pohybová rovnice v d, q systému.....	31
5.2.5. Výpočet proudů prstencového motoru PMSM	32

5.2.6.	Výpočet momentu a otáček prstencového motoru PMSM.....	32
5.2.7.	Celkový model prstencového motoru PMSM.....	33
5.2.8.	Simulace zdroje napětí.....	34
5.3.	Výsledky modelování.....	36
6.	Závěr.....	38
	Bibliografie – seznam použitých zdrojů informací.....	40
	Seznam obrázků.....	42
	Seznam tabulek.....	44
	Přílohy.....	44

1. Úvod

Prstencové motory, někdy též označované jako momentové, jsou zvláštním typem synchronních strojů s permanentními magnety (PMSM). Jsou klasifikovány jako přímé pohony. Obvykle jsou konstruovány tak, aby nahradily stávající pohony s převodovkou. Výhodami tohoto řešení je např. vyšší účinnost soustrojí (vzhledem k absenci převodovky), nižší moment setrvačnosti, přesnost, úspora prostoru, atd. Motory jsou běžně konstruovány pro nižší až střední rychlosti otáčení cca do 1 000 ot/min. Konstrukce s velkým počtem pólů umožňuje dosažení značného momentu těchto motorů. Standardně jsou motory dodávány bez prstencových ložisek, a to z důvodu různých konstrukčních uspořádání a mechanického namáhání konstrukce celého zařízení. Ložiska si pak zákazník dle svých konkrétních požadavků zakoupí zvlášť.

V současné době, kdy se cena frekvenčních měničů stále snižuje a jejich kvalitativní parametry se zlepšují, jsou prstencové stroje (motory) stále vyhledávanějším řešením v pohonářských aplikacích. Elektromotory spotřebovávají v současnosti několik desítek procent celosvětové spotřebované energie. Z toho důvodu je snaha vyvíjet pohony s co nejvyšší celkovou účinností. To vede obvykle k použití přímých pohonů – bez převodovky a motorů s permanentními magnety (PMSM). Pro pomaloběžné aplikace jsou pak určeny právě prstencové motory.

Tato práce má čtenáře seznámit se základní konstrukcí těchto strojů, s jejich konkrétními příklady použití v praxi a s jejich matematickým popisem a simulací základních vlastností těchto strojů.

2. Použití prstencových strojů

V mnoha aplikacích je vyžadována nízká rychlost otáčení a vysoký krouticí moment. Konvenční řešení je založeno na použití stroje s 1000 ot/min až 3000 ot/min a převodovky. Prstencové stroje jsou však konstruovány tak, aby toto konvenční řešení plně nahradily, a to bez použití převodovky. Toto řešení se pak označuje jako přímý pohon. Obvykle jsou prstencové stroje používány v motorickém režimu, ale mohou být používány i v generátorickém režimu. Jsou řešeny jako synchronní stroje s permanentním magnetem tedy PMSM. V této kapitole jsou uvedeny typické příklady použití z praxe a jsou popsány výhody pro konkrétní příklad použití spojené s přímým pohonem.

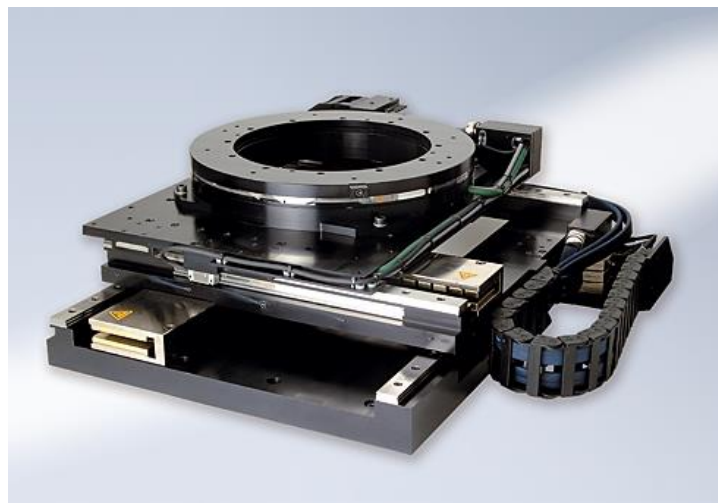
2.1. Průmyslová robotika

Způsob, jak splnit stále se zvyšující požadavky na produktivitu (počet pracovních úkonů za jednotku času) a přesnost obráběcích strojů, je použití prstencových motorů. Tato koncepce vede ke značnému zvýšení výkonu obráběcích strojů a ke zjednodušení

jejich konstrukce, a tím i ke snížení pořizovací ceny, snížení opotřebení a menšímu požadavku na údržbu.

Tyto motory dokáží zvýšit produktivitu obráběcích strojů a robotických rukou díky svému relativně nízkému momentu setrvačnosti, čímž lze snížit velikost času potřebného ke zrychlení pohybu. Vyšší přesnost je zaručena díky upuštění od převodovky se šnekem nebo systému pastorek (ozubený věnec). Navíc se tak zbavíme vůlí a získáme tuhé uspořádání pohyblivého celku s minimem opotřebitelných součástí. Zároveň, použitím tohoto typu pohonu, lze snížit nároky na prostor (pro pohonný mechanismus) díky malé stavební výšce stroje. Při správné regulaci je možné dosáhnout rovnoměrného chodu od jedné otáčky za týden (pro účely natáčení astronomických antén) až po několik set otáček za minutu (pro použití v pohonech elektromobilů, či právě v průmyslové robotice např. pro otočné stoly pro soustružení) [1].

Výrobou otočných strojů pro soustružení se zabývají například firmy: Tecma, L-A-T Suhl AG a další. Na obrázku č. 1 je fotografie otočného stolu pro soustružení L-A-T Suhl AG – INA – převzato z [18]. Jedná se o příklad typického stolu pro soustružení, pro jehož pohon byl zvolen prstencový motor.



Obrázek 1: Otočný stůl pro soustružení s prstencovým motorem (L-A-T Suhl AG - INA)

Pro frézku DMC80/125 FD od výrobce Deckel Maho Gildemeister je též použit prstencový motor u otočného stolu. Pro dvousouřadnicové naklápěcí hlavy tento pohon používají firmy CyTec či francouzská Forest-Liné. Italský výrobce Samputensili používá prstencový motor pro pootáčení obrobku ozubeného kola u precizních brusek na výrobu ozubených kol. Prstencové motory používají též přední výrobci robotických rukou jako je FANUC, KUKA, ABB či YASKAWA. Lze tak řešit každý otočný kloub robotické ruky, přičemž se s výhodou dá využít volného prostoru ve středu motoru pro vedení kabeláže, hydraulických hadic apod. až k samotnému nástroji ovládaného touto rukou, viz obrázek č. 2 – převzato z [19].



Obrázek 2: Robotická ruka FANUC LR Mate 200iC

2.2. Větrné elektrárny

U standardního provedení větrné elektrárny (se synchronním generátorem s permanentními magnety) je pohybová energie pomaloběžného rotoru předávána synchronnímu generátoru pomocí převodovky. Běžný převodový poměr se pohybuje řádově 100:1 u elektráren s výkonem kolem 3 MW. Otáčky rotoru turbíny se pohybují mezi 4 – 20 ot/min. Synchronní generátor je v provedení s hladkým rotorem o několika pólpárech (jedná se tedy o turbostroj). Standardní řešení s převodovkou a generátorem je v anglicky psané literatuře označováno jako DFIG (Doubly Fed Induction Generator), tedy dvojitě napájený asynchronní generátor. Statorové vinutí generátoru je přes transformátor připojeno k distribuční síti a rotor s vinutou kotvou je napájen měničem tak, aby parametry výstupní elektrické energie na statorové straně odpovídaly požadavkům pro dodávku elektrické energie. Řešení s prstencovým synchronním strojem s permanentními magnety je označováno jako PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator). Prstencový synchronní generátor je buzen permanentními magnety. Parametry elektrické energie z generátoru jsou silně závislé na rychlosti větru. Generátor je připojen k měniči, kde se elektrická energie upraví pro distribuci. Jedním z největších výrobců těchto strojů je společnost The Switch Controls & Converters, která ke generátorům dodává i vhodné měniče [10].

Převodovka VTE je vystavována extrémnímu namáhání z hlediska silového působení. Vyžaduje tak častou údržbu a preventivní kontroly, což je určitou finanční zátěží pro provozovatele větrné elektrárny. I při pravidelné údržbě však dochází k poruchám převodového ústrojí, což vede k další finanční zátěži spojené s opravou a dočasnou nečinností elektrárny. Na základě prováděných studií se prokázalo, že co do počtu poruch, je nejproblematictější komponentem větrné elektrárny právě převodovka. Ta způsobuje až 20 % celkových výpadků VTE.

Nežádoucí vlastností stroje VTE je též emise směsi hluků o typické intenzitě 97,4 dBA. Tento hluk je částečně spojen s činností servopohonů (natáčení listů turbíny i celé gondoly), čerpadel a ventilátorů pro chlazení, ale především s činností převodového ústrojí. Převodové ústrojí VTE značnou měrou přispívá k celkové hmotnosti stroje, což je nežádoucí především z hlediska transportu a montáže. V neposlední řadě je nutné zmínit se o energetických ztrátách převodového ústrojí, které tak vyžaduje samostatné chladicí ústrojí.

Řešením výše zmíněných nevýhod spojených s převodovým ústrojím VTE je použití přímého pohonu generátoru, čímž se zmenší počet veškerých pohyblivých částí VTE až na 50 %. Lze tedy předpokládat nižší poruchovost, snazší údržbu a s tím spojenou ekonomickou výhodnost tohoto řešení. Sníží se hladina hluku stroje, její hmotnost (kolem 12 tun u 2,3 MW VTE) a rozměry gondoly – gondola je podstatně kratší.

Použití prstencových synchronních strojů s permanentními magnety vede k lepší účinnosti celého soustrojí. Při jmenovitém výkonu VTE je velikost účinnosti cca 94 % pro převod mechanické energie na elektrickou, přičemž při 25 % výkonu VTE je tato účinnost cca 92,6 %. U konvenčního provedení VTE s převodovkou je účinnost přenosu mechanické energie na elektrickou snížena účinností planetové převodovky, která se pohybuje při optimálních otáčkách kolem hodnoty 93 %.

Prstencové synchronní stroje pro VTE mají 100 i více pólových dvojic. Jsou konstruovány pro výkony cca 1 MW – 8 MW. Buzení je obvykle řešeno pomocí permanentních magnetů ze vzácných zemin, výjimečně se řeší i použitím budícího vinutí. Dle společnosti Siemens je k výrobě 1 MW instalovaného výkonu třeba 650 kg permanentních magnetů s obsahem až 30 % vzácných zemin (neodym, železo, bór, atd.), což je zohledněno v ceně stroje. Chlazení těchto strojů je obvykle řešeno kapalinově.

Mezi hlavní výrobce VTE s přímým pohonem patří německý Enercon, který od počátku své existence vyrábí větrné elektrárny výhradně s přímým pohonem. Dále švédská společnost Göteborg Energi, která své první VTE s přímým pohonem instalovala v přístavu Gothenburg v roce 2011 (elektrárny s označením 4.1-113), mezinárodní koncern se sídlem ve Francii Alstom (též výrobce kolejových vozidel AGV), či v neposlední řadě Siemens.

Na obrázku č. 3 je fotografie největší větrné elektrárny na světě do roku 2011 – převzato z [20]. Jedná se o Enercon E-126, kde byl jako generátor zvolen prstencový stroj. Průměr rotoru je 126 m, jmenovitý výkon je 6 MW, ale je schopna dodávat krátkodobě i přes 7 MW. Dodává do sítě kolem 20 GWh ročně. Je postavena na území Německa – ve městě Emden.



Obrázek 3: VTE s prstencovým strojem – Enercon E-126

2.3. Výtahová technika

Typický výtah pro středně vysoké budovy (tj. do 20 pater) je konstruován na zatížení 500 kg až 2500 kg. Rychlost kabiny je cca 1 m/s. Otáčky hřídele jsou nižší než 300 ot/min a výkon motorů je od 5 kW do 20 kW (největší výtahy vyžadují jmenovitý výkon motoru až 500 kW).

S moderní koncepcí výtahových strojů přišlo několik předních výrobců výtahové techniky na světě. Mimo jiné japonská firma z Tokia Mitsubishi Electric Corporation. Koncepce nových strojů je založena na použití přímého pohonu kladky pro pohon výtahové kabiny. Není zde použit šnekový převod ani jiná převodovka. Jedinečnost koncepce pohonu je však ve volbě prstencového (momentového) mnohápólového synchronního stroje s permanentními magnety – PMSM. Hlavní předností, oproti konvenčním způsobům pohonu výtahů, je značná úspora místa – velmi malé prostorové požadavky na strojovnu. Dále je možné výtah velmi přesně řídit, a snížit tak nároky na spotřebovanou energii. Na obrázku č. 4 je zobrazen příklad výtahového motoru Mitsubishi Electric Corporation – PMSM – převzato z [21].



Obrázek 4: Výtahový motor Mitsubishi Electric Corporation – PMSM

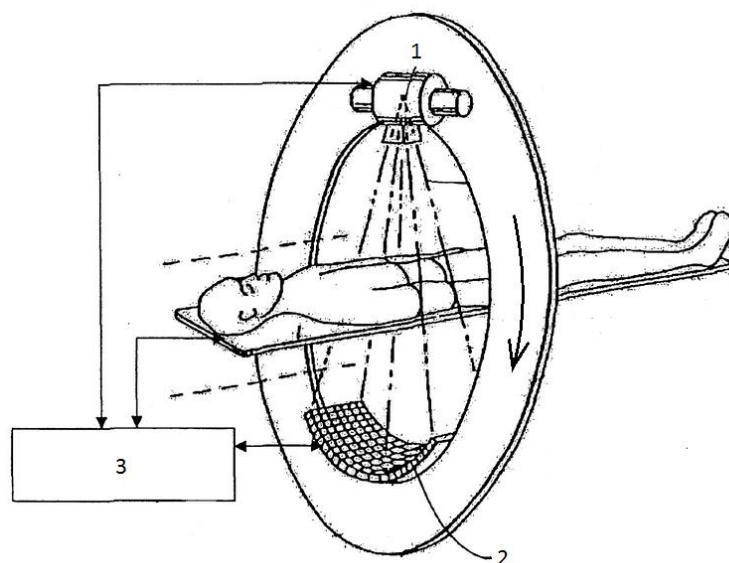
Použitím těchto strojů se snižuje četnost údržeb a samotná údržba je snazší – odpadají problémy s převodovkou. Výhodou je i nižší úroveň hluku. Měníč VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) umožňuje brzdění pomocí generátorického chodu, kdy je kinetická energie kabiny a protizávaží transformována na elektrickou, která je distribuována zpět do sítě. Případné nevyvážení kabiny a protizávaží, způsobující snahu urychlit stroj, dodává potenciální tíhovou energii pro rekuperaci. Což je další značnou výhodou oproti konvenčnímu řešení.

Výtahovými motory s prstencovými stroji se dále zabývá firma Kone, která má již více než 100 leté zkušenosti v oboru. Jde o firmu založenou v roce 1910 ve Finském městě Espoo. Příkladem produktu firmy Kone je přímý bezpřevodový (gearless) motor Kone EcoDisc nebo motor Kone MonoSpace, který je díky svým kompaktním rozměrům určený pro montáž v prostoru pro protizávaží – ve vrchní části šachty nad protizávažím (mezi prostorem pro kabinu a stěnou). Není tak vyžadována žádná strojovna a je ušetřen prostor v budově.

Též Americká firma Otis se zabývá ve svém projektu Gen2 bezpřevodovými výtahy, které nepotřebují strojovnu. Navíc tato firma vyvinula a používá ve svých výtazích pásy podobné drážkovým řemenům, namísto běžně používaných ocelových lan. Tím je dosaženo extrémní tichosti celého zařízení. Mezi další nejvýznamnější výrobce výtahů s přímým pohonem patří ThyssenKrupp AG a Schindler Group. ThyssenKrupp AG je německá nadnárodní konglomerátní společnost se sídlem v Duisburgu a Essenu v Německu. Schindler Group je švýcarská společnost, která se zabývá renovací a výrobou nových zvedacích zařízení (eskalátorů a výtahů).

2.4. Medicína

Mezi velmi vhodné aplikace prstencového motoru jednoznačně patří použití v lékařství v přístrojích pro počítačovou tomografii (CT – computed tomography), nebo dnes již častěji v přístrojích pro magnetickou rezonanci (MRI – magnetic resonance imaging). Obě vyšetřovací metody jsou založeny na zcela rozdílném principu. Spojuje je však potřeba otáčení pohyblivé části, která se otáčí kolem pacienta. U počítačové tomografie je na pohyblivé části umístěna rentgenka se snímači dopadajícího záření a u magnetické rezonance je na pohyblivé části umístěna vysílací a přijímací cívka. Díky přesnému polohování lze získat trojrozměrný snímek pacienta ve vysokém rozlišení.



Obrázek 5: Princip počítačového tomografu

Na obrázku č. 5 je znázorněn princip počítačového tomografu – převzato a upraveno z [22]. Rentgenka 1 ozařuje pacienta, snímače 2 přijímají paprsky prošlé pacientem. Veškerá činnost počítačového tomografu je řízena řídicí jednotkou 3. Pro rotační pohyb rentgenky a snímačů bývá někdy použito prstencového motoru.

2.5. Automobilový průmysl

Prstencové motory se v automobilovém průmyslu používají buď pro přímý pohon vozu, kde jsou umístěny motory přímo v kolech (označováno jako „In wheel motor“), nebo jako sekundární pohon u hybridních automobilů (jsou umístěny mezi spalovacím motorem a převodovkou).

2.5.1. In wheel motor

Pohon elektromobilů i hybridních vozů lze řešit mnoha způsoby. Jedním z možných technických řešení je umístění elektromotoru přímo do kola automobilu. Toto řešení je označováno jako „In wheel motor“ nebo „Wheel hub motor“. Právě pro tyto aplikace jsou prstencové motory ideálním řešením, a to díky značnému momentu a potažmo i výkonu, které jsou schopné vozidlu dodat.

S myšlenkou pohonu automobilu pomocí elektromotorů umístěných v nábojích kol přišel již v letech 1898 – 1899 Ferdinand Porsche. Systém byl vytvořen pro firmu Lohner, a tak se pro toto konstrukční řešení vžil název „systém Lohner-Porsche“.

V současné době je předním světovým výrobcem elektromotorů pro automobily v nábojích kol společnost Protean Electric, se sídlem v USA. Firma představila nejmodernější řešení samostatně poháněných kol na světovém automobilovém kongresu Society of Automotive Engineers. Dále se dle amerického magazínu Car and

Driver firma se svým konceptem zařadila mezi 10 inovativních technologií pro automobilový průmysl. Protean Electric ve spolupráci s firmou Brabus postavila vysokovýkonnou hybridní třídu E Mercedes-Benz nebo také pohání vůz Ford F-150. V současné době pracuje na koncepci pohonu pro vůz FAW-Volkswagen Bora, který je vyráběn v dceřiné automobilce v Číně. Pro tento vůz jsou k dispozici 18 palcová kola, každé s výkonem 75 kW a krouticím momentem 1000 Nm. Vzhledem k tomu, že se jedná o PMSM, je k dispozici maximální krouticí moment již od nulových otáček. Technologie od společnosti Protean Electric je schopna rekuperovat a dodat při brzdění až 90 % kinetické energie přeměněné na elektrickou zpět do akumulátoru. Měnič pro konkrétní motor je umístěn přímo v kolu – je tedy integrován spolu s motorem do jednoho celku. Celková přeměna elektrické energie na mechanickou je provedena s účinností větší než 93 % (celková účinnost motoru včetně měniče). K samotnému kolu je veden pouze elektrický přívod od akumulátorů a datová komunikace s vozem. Prstencové motory pro použití „In wheel“ jsou v zásadě s vnějším rotorem, permanentní magnety pro buzení rotoru jsou vyrobeny z Nd-Fe-B. Počet pólů těchto strojů se pohybuje okolo 80.

Při použití pohonu všech 4 kol lze s výhodou využít snadné regulace výkonu a momentu každého konkrétního kola – tzv. precizní výkonové řízení. Elektronický diferenciál nahrazuje konvenční mechanický. To vede k úspoře prostoru a snížení počtu pohyblivých částí. Lze snadno nastavovat poměr trakce přední a zadní nápravy. Ovládání přetáčivosti respektive nedotáčivosti vozu ve smyku a další. To zvyšuje bezpečnost při průjezdu zatáčkou či náledím. Absence spojky, převodovky, rozvodovky, poloos a dalších dílů vede k úspoře hmotnosti vozidla, úspoře prostoru a zjednodušení karoserie. Obecně lze předpokládat, že značně snížený počet pohyblivých částí zvýší životnost vozu. Současně svou jednoduchostí zvýší účinnost přenosu mechanické energie až o několik desítek procent oproti nepřímému pohonu s převodovkou, tím i dojezdovou vzdálenost elektromobilu [11 – 12].

Protean Electric sklídila úspěch v roce 2006 na autosalonu v Londýně díky představené technologii „In wheel motoru“ s názvem Hi-Pa Drive. Další úspěch sklídila v roce 2007 na autosalonu ve Frankfurtu za obdobnou technologii pro Volvo označovanou Volvo ReCharge. Chlazení těchto strojů je řešeno kapalinově – nuceným oběhem. Další shodně zaměřenou společností jako je Protean Electric je společnost Elaphe. Na obrázku č. 6 je vyobrazen „In wheel motor“ od firmy Protean – převzato z [23].



Obrázek 6: „In wheel motor“ od firmy Protean

Značnou nevýhodou tohoto řešení je neodpružená hmotnost, která je proti konvenčnímu řešení zvětšena cca o 31 kilogramů na jednom kole. To vede ke zhoršení kontaktu pneumatiky s vozovkou při průjezdu nerovnostmi.

Díky finanční podpoře USA a dotační politice čínské vlády se v současné době soustřeďuje vývoj elektromobilů do Číny. USA v roce 2011 podpořily v Číně vývoj elektromotorů do nábojů automobilových kol 84 miliony dolarů. Navíc je každý prodaný elektromobil v Číně dotován v přepočtu půl milionem korun českých.

2.5.2. Hybridní pohon vozů

Často bývá prstencový stroj též využit v automobilech s hybridním pohonem (HEV – Hybrid Electric Vehicle). Jsou tak spojeny výhody pohonu s elektromotorem a se spalovacím motorem. Elektromotor bývá na přítlačném talíři spojky, tedy na ose klikového hřídele spalovacího motoru. Prstencový stroj je využit ke spouštění spalovacího motoru, k uvedení vozidla do pohybu, k velké výkonové rezervě vozidla a k rekuperaci energie při brzdění. V situaci, kdy je přebytek energie, je tato pomocí stroje předávána akumulátoru, který je tak dobíjen. Mezi výrobce takových vozidel patří např. Lexus s modelem LS 600h, Honda CR-Z, Toyota Prius, Porsche Cayenne S Hybrid a další. Toyota Prius je prvním sériově vyráběným hybridním automobilem na světě a získal cenu „Car of the Year 2005“. Na obrázku č. 7 je znázorněno uspořádání prstencového stroje v hybridním voze Porsche Cayenne S Hybrid – převzato z [24].



Obrázek 7: Prstencový PMSM pro hybridní pohon vozu Porsche Cayenne S Hybrid

2.6. Další možnosti použití prstencových motorů

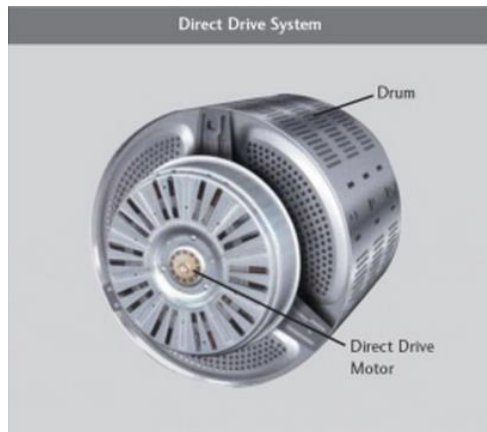
Dalším příkladem použití prstencových motorů může být pohon lodí. Z důvodu většího komfortu pro cestující a lepší ovladatelnosti lodě je mnoho výletních lodí poháněno elektricky. Největší lodě vyžadují výkon motoru přes 10 MW, rychlost lodního šroubu je menší než 200 ot/min. Zcela novou koncepcí pohonu lodí představila norská firma Fjord1 MRF, se sídlem ve městě Molde. Projekt pohonu lodního šroubu pomocí prstencového motoru vedla ve spolupráci s firmami InPower a Brunvoll AS. Na obrázku č. 6 je loď osazená speciálním lodním šroubem poháněným prstencovým motorem (projekt firmy Fjord1 MRF) – převzato z [25]. Toto řešení přináší oproti konvenčnímu řešení nižší spotřebu energie při plavbě a větší ovladatelnost plavidla.



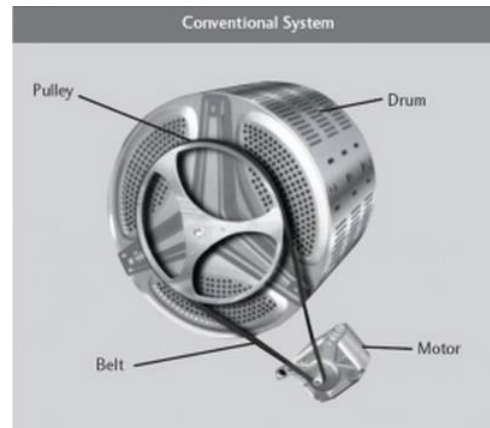
Obrázek 8: Projekt firmy Fjord1 MRF – speciální lodní šroub pohánění prstencovým motorem

Prstencové motory lze též s výhodami použít v tzv. bílé technice – v pračkách. Touto koncepcí pohonu pračky se zabývá především výrobce LG, což je jihokorejský konglomerát sídlící v Soulu. Pračka díky tomuto řešení nemá řemen, ani běžně používaný kartáčový univerzální jednofázový motor. Díky tomu je praní extrémně tiché. Pračka vyžaduje minimální údržbu a její rozměry lze, oproti konvenční technologii, zredukovat.

Rozdíl mezi přímým a konvenčním pohonem pračky je znázorněn na obrázcích č. 9a a 9b – převzato z [26].



Obrázek 9a: Přímý pohon pračky



Obrázek 9b: Konvenční pohon pračky

Dalším příkladem využití těchto motorů je i papírenský průmysl. Pro výrobu papíru je třeba získat buničinu, což znamená určitým procesem získat ze dřeva nepoškozené molekuly celulózy. Pro tento chemický proces je třeba otáčet speciálními bubny rychlostí 200 ot/min až 600 ot/min s výkonem motorů 30 kW až 1800 kW. I pro tyto aplikace lze s výhodami použít prstencové motory PMSM. Tato konstrukce zjednoduší instalaci pohonu a ušetří prostor.

Nelze opomenout, že i v odpadovém hospodářství lze tyto motory využít. V čističkách odpadních vod je potřeba ve speciálních bazénech promíchávat odpadní vodu. I zde lze použít přímý pohon pomocí prstencového motoru. Otáčky se pohybují kolem 50 ot/min. J. Hallberg navrhl pro míchání odpadních vod koncepci s 56 pólovým motorem. Výhodou je přesné řízení otáček dle aktuálních požadavků a nižší provozní náklady. Zásadní nevýhodou tohoto řešení je pořizovací cena, pro kterou jsou v tomto případě i nadále voleny klasické pohony, které vycházejí levněji [11 – 16].

3. Konstrukce a princip prstencového motoru

Prstencové motory jsou řešeny buď jako BLDC – bezkartáčové elektronicky komutované stejnosměrné motory nebo jako synchronní stroje s permanentními magnety (PMSM), což je častější. Prstencové motory PMSM lze považovat za stroje se shodnou příčnou i podélnou indukčností, tedy za stroje s hladkým rotorem. PMSM na rozdíl od BLDC mají pólové nástavce vyrobeny tak, aby při konstantní rychlosti bylo dosaženo harmonické magnetické indukce podél vzduchové mezery. Dále se budu zabývat nejrozšířenějším typem prstencových motorů – PMSM s hladkým rotorem.

3.1. Stator

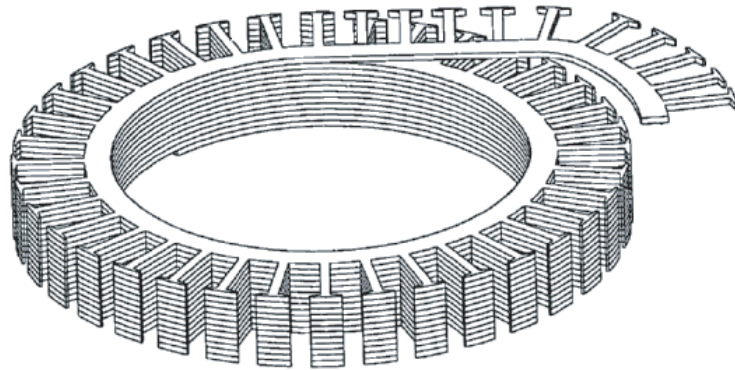
Stator motoru bývá tvořen svařovanou kostrou vyrobené z nerezové oceli nebo ze slitiny hliníku. V této kostře je upevněn (nalisován) vinutý statorový svazek – paket s vinutím. Magnetický obvod bývá celolištěný z izotropních křemíkových plechů. Vinutí bývá trojfázové, zapojené do hvězdy. Motory mají běžně několik desítek pólů. U prstencových strojů je typické, že počet drážek statoru je srovnatelný s počtem pólů na rotoru. V čelech vinutí bývají teplotní čidla, jejichž vývody, tak jako vývody vinutí, jsou vyvedeny stíněnými vodiči. Na povrchu kostry jsou vytvořeny drážky, které po zalisování do zákaznického stroje tvoří kanálky pro vodní chlazení. Bez použití chlazení je v závislosti na konkrétní aplikaci nutné snížit trvalý moment na cca 40% katalogové hodnoty. Při nedodržení této redukce trvalého momentu by ztrátový výkon, který vzniká především ve vinutí statoru, mohl způsobit destrukci vinutí. Jako chladivo se předpokládá upravená (demineralizovaná) a filtrovaná voda do maximální velikosti částic 100 μm . Parametry chladicí vody se upravují např. podle ČSN EN 60034-6 (odpovídá EN 60034-6). Ukázka statoru prstencového stroje PMSM je na obrázku č. 10 – převzato z [27].



Obrázek 10: Stator motoru Icp-TORQUE 3600

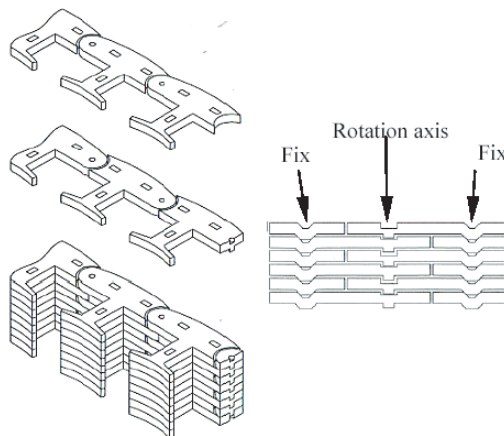
Pro výkony do několika 100 kW se plechy pro výrobu statorového paketu lisují jako celek. To vede ke značnému množství odpadu při lisování (80 % - 90 %) a je nutné použít velmi silné lisy. Proto se i pro menší výkony někdy statorové plechy skládají ze segmentů po 120° nebo po 60°. Např. pro statorový paket o hmotnosti 4 kg, je nutné použít 22 kg izotropních (směrová nezávislost mag. parametrů) plechů při lisování plechů vcelku. Pro lisování segmentů 120° je třeba 12,8 kg materiálu a pro lisování segmentů 60° je třeba 9,2 kg materiálu. I v tomto případě však využijeme pouze 43 % materiálu, navíc vzniká nutnost dílčí pakety ze segmentů spojit v jeden celek. Segmenty se spojují svařováním. Nevýhodou výroby statorového paketu ze segmentů je větší časová náročnost a zhoršené magnetické parametry v místě spojů segmentů, a s tím spojené dodatečné ztráty v železe.

Řešením výše popsaných problémů s výrobou statorových plechů je použití metody Spiral-laminated core, označované též jako „slinky“. Při použití této metody se do dlouhého plechového pásu postupně lisují drážky. Vylisovaný plech se následně sroluje do spirály. Obdobně, jako u známé hračky slinky – odtud název tohoto řešení. Tato metoda umožňuje minimalizovat kovový odpad zhruba na 30 % [31 – 34]. Znárodnění metody Spiral-laminated core (slinky) je na obrázku č. 11 – převzato z [34].



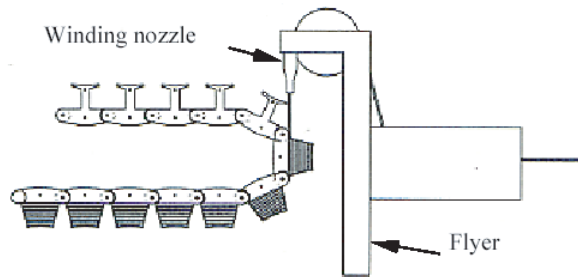
Obrázek 11: Metoda Spiral-laminated core (slinky)

Další možností výroby statorového paketu může být metoda Join-lapped core. Při použití této metody je statorový paket skládán z jednotlivých dílčích segmentů – viz obrázek č. 12 – převzato z [17].



Obrázek 12: Princip výroby jádra pomocí metody Join-lapped core

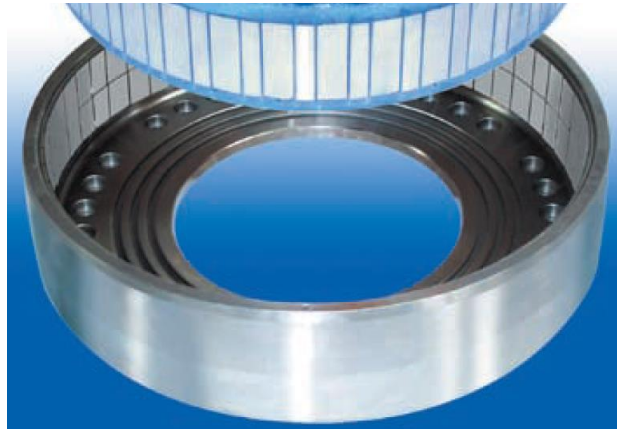
Magnetické vlastnosti takto vyrobeného jádra jsou ze všech předchozích metod výroby nejhorší. Hlavní výhodou této metody je snadné strojové navíjení vinutí, viz obrázek č. 13 – převzato z [17].



Obrázek 13: Strojové navíjení na jádro typu Join-lapped core

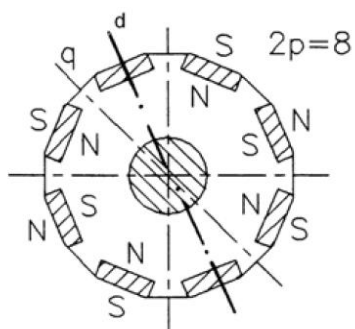
3.2. Rotor

Rotor je tvořen ocelovým prstencem, který se otáčí uvnitř („Inner rotor“) nebo vně („Outer rotor“) statoru. Z tohoto hlediska se návrh rotoru zabývá kompaktností stroje pro dané technické řešení, tepelným designem (ztrátové teplo se tvoří převážně na statoru, odkud je třeba ho odebírat) a magnetickým designem. Stroje s vnějším rotorem mohou mít větší vzduchovou mezeru (krouticí moment je nepřímo úměrný čtverci vzduchové mezery). Stroje s vnějším rotorem mívají o 15 % menší hmotnost, než stroje s vnitřním rotorem při stejném výkonu. Proto se často volí pro dosažení maximálního možného krouticího momentu vnějších rotorů, ale je nutností precizní zpracování a kvalitní prstencová ložiska s ohledem na minimální možnou vzduchovou mezeru. Podélnou i příčnou složku indukce lze prakticky považovat za shodnou, jde o tzv. hladký rotor. Příklad vnějšího rotoru je na obrázku č. 14 – převzato z [28].

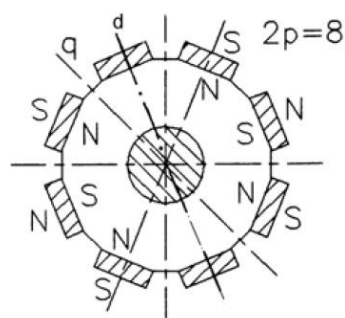


Obrázek 14: Rotor motoru firmy TORQUETEC

Na ocelovém prstenci jsou připevněny permanentní magnety lepením. Permanentní magnety se vyrábějí ze speciálních slitin (Sm-Co, Nd-Fe-B) s magnetickou indukcí kolem 1 T. Pro bezpečnou fixaci magnetů u motorů s vnitřním rotorem se magnety opatřují bandáží z res-i-glasu, což je páska ze skleněné tkaniny, napuštěná epoxidovou pryskyřicí. Po řádném zabandážování se páska vytvrdí a vznikne kompozitní materiál obdobný sklolaminátu [2 – 4]. Magnety bývají na rotoru připevněny dle následujících obrázků č. 15a a 15b – převzato z [3].



Obrázek 15a: PM na rotoru PMSM ($L_d = L_q$)



Obrázek 16b: PM na rotoru PMSM ($L_d \neq L_q$)

Na obrázku č. 15a je rotor osazen permanentními magnety tak, že podélná i příčná složka indukčnosti rotoru je shodná (hladký rotor). Na obrázku č. 15b má rotor rozdílnou podélnou a příčnou indukčnost.

3.3. Permanentní magnety

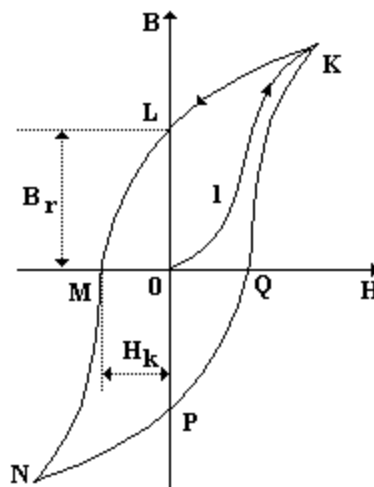
První používané permanentní magnety pro synchronní motory byly vyrobené z oceli. Moderní permanentní magnety jsou vyráběny ze speciálních slitin vzácných zemin a niklu, kobaltu, atd. Též z feritů stroncia a bária. Vznikají tak magnety samarium-kobaltové (Sm-Co-5, Sm-Co-17) nebo neodým-železo-borité (Nd-Fe-B). Díky těmto magnetům lze dosáhnout vysoké hodnoty magnetické indukce, a lze tak zmenšit rozměry stroje při současném zachování jeho výkonu.

Prvků vzácných zemin známe 17 (Skandium, Yttrium, Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium, Lutecium). Pro výrobu permanentních magnetů jsou zejména využívány prvky ze skupiny lanthanoidů – prvků vzácných zemin počínající lanthanem (protonové číslo 57 až 71). Nejdůležitějšími prvky jsou pak Neodym a Dysprosium. Na rozdíl od magnetů ze slitiny neodymu, dysprosiové slitiny odolávají vyšším provozním teplotám (jejich Curieova teplota je vyšší). Základní vlastnosti magnetů jsou uvedeny v následující tabulce č. 1:

Materiál	Remanence	Koercitivní síla	Energetický součin	Pracovní teplota
	B_r [T]	H_k [kA/m]	$(BH)_{max}$ [kJ/m ³]	t_{prac} [°C]
anizotropní ferit	0,395	190,99	27,06	400
sintrované Al-Ni-Co	1,090	49,34	31,04	540
lité Al-Ni-Co	0,820	131,31	42,19	540
Sm-Co 20 (1,5)	0,900	636,64	159,20	260
Sm-Co 28 (2,17)	1,050	756,01	222,88	350
Nd-Fe-B (N45)	1,350	859,46	358,20	80
Nd-Fe-B (33UH)	1,150	851,50	262,68	180

Tabulka 1: Základní vlastnosti permanentních magnetů

Remanentní magnetická indukce, zkráceně remanence, udává velikost indukce permanentního magnetu po zaniknutí působení vnějšího magnetického pole ve směru magnetování magnetu. Koercitivní síla nám udává velikost intenzity magnetického pole, kterou je potřeba působit v opačném směru magnetování, než byl předchozí směr pro snížení remanence na nulovou hodnotu. Koercitivní síla má zásadní vliv na šířku hysterezní smyčky. Materiál pro permanentní magnety by měl být magneticky tvrdý – měl by mít širokou hysterezní smyčku. Energetický součín udává největší hodnotu součinu indukce a intenzity magnetického toku pro daný PM. V tomto bodě má PM svůj optimální pracovní bod (druhý kvadrant hysterezní smyčky). Obecná hysterezní smyčka permanentního magnetu je na obrázku č. 16 – převzato z [29].



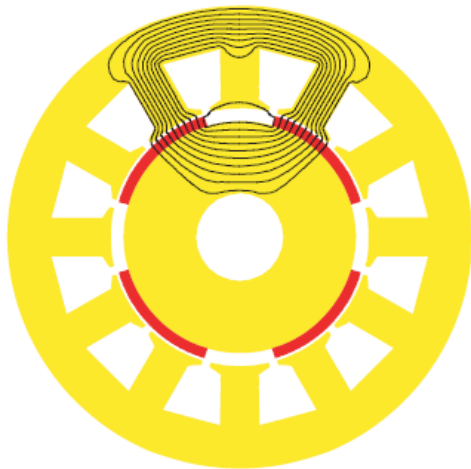
Obrázek 17: Obecná hysterezní smyčka PM

Nejčastěji používanými magnety jsou magnety Nd-Fe-B, a to i přesto, že jejich teplotní pokles remanence je větší, než u magnetů Sm-Co. U Nd-Fe-B je pokles remanence 0,13 %/K, kdežto u Sm-Co je tento pokles pouhých 0,045 %/K. Vzhledem k tomu, že v rotoru nevznikají prakticky žádné ztráty a magnety jsou tak ohřívány pouze konvekcí, lze vinutí provozovat i při 150 °C, umožňuje-li to izolace. Rotor tak nepotřebuje žádné chlazení. Feritové magnety mají nízké hodnoty remanence a energetického součinu, avšak jejich cena je velmi nízká. Použití feritových magnetů pro buzení rotoru prstencového stroje PMSM může být kompromis mezi celkovou hmotností stroje a jeho cenou. Cena feritových magnetů v roce 2008 byla cca 7 Euro/kg, cena magnetů Nd-Fe-B byla v témže roce cca 120 Euro/kg [17]. Další výhodou feritových magnetů je jejich odolnost vůči korozi a jejich nevodivost, díky které nevznikají problémy s vířivými proudy. Pokles remanence je u feritových magnetů celkem výrazný: 0,2 %/K.

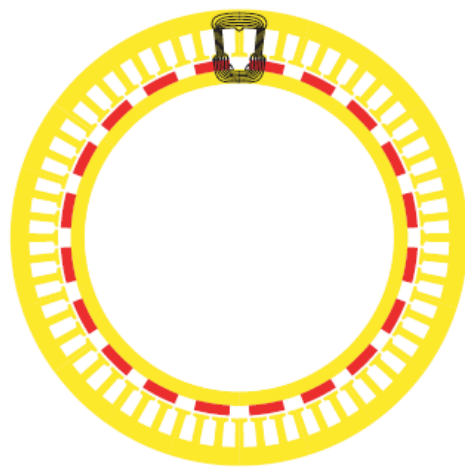
Tendence k absorpci vlhkosti především Nd-Fe-B magnetů vede ke korozi a úbytku hmotnosti materiálu. V korozivní atmosféře byl naměřen úbytek hmotnosti materiálu Nd-Fe-B až 1000 násobný oproti magnetům Sm-Co. To je řešeno novou technologií Nd-Fe-B, kde je většina reaktivního neodymu v mezizrnné oblasti nahrazena stabilními

intermetalickými sloučeninami, nebo vhodnou povrchovou úpravou. Povrchové vrstvy mohou být z kovů odolných korozi, jako je nikl, epoxidové, či ve formě plastového povlaku.

Počet permanentních magnetů na rotoru je vždy sudý a siločáry magnetického toku vstupují do rotoru kolmo. Permanentní magnety na rotoru jsou svou polaritou připevněny „střídavě“. Jestliže je nějaký permanentní magnet připevněn na rotor svým jižním pólem, sousední magnety jsou na rotoru připevněny pólem severním. Příklad rozložení výsledného magnetického toku je pak zobrazen na obrázcích č. 17a a 17b – převzato z [17].



Obrázek 18a: 4 pólový PMSM



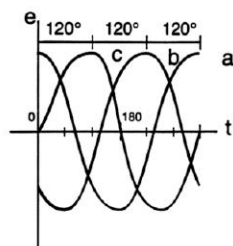
Obrázek 19b: 20 pólový PMSM

3.4. Princip vzniku momentu

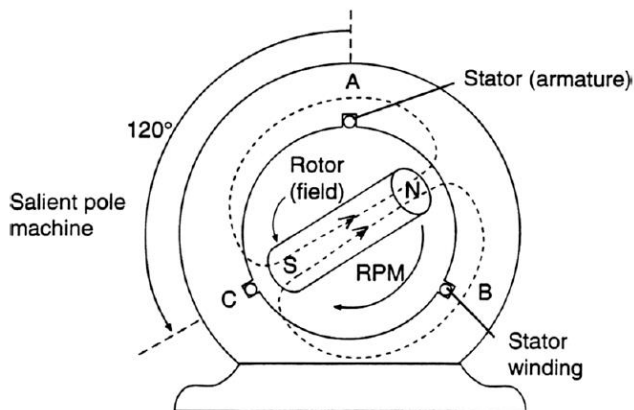
V prstencovém motoru vzniká hnací moment stroje díky vzájemnému působení sil vytvořených proudem protékajícím vinutím na statoru a magnetickým polem vytvářeným permanentním magnetem (na rotoru).

Pokud je třífázové statorové vinutí vzájemně posunutě o 120° a je napájeno třífázovým harmonickým zdrojem (viz obrázek č. 18a – převzato a upraveno z [35]), vznikne uvnitř stroje rotující magnetické pole. Rotor vytváří, díky buzení permanentních magnetů, stejnosměrné magnetické pole. Mag. pole statoru a rotoru vůči sobě působí tak, že se rotor v každém okamžiku snaží zaujmout polohu, při které má magnetický obvod minimální reluktanci (mag. odpor), viz obrázek č. 18b – převzato a upraveno z [35].

Voltage waveforms for phases A, B, C



Obrázek 20a: Napětí na statoru



Obrázek 21b: Působení mag. pole statoru a rotoru

Rotor se tedy otáčí synchronně s úhlovou frekvencí napájení. Působíme-li zátěžným momentem proti směru otáčení, vzniká ve stroji vnitřní moment m_i [Nm]. S velikostí zátěžného momentu se mění pouze zátěžný úhel, obvykle označovaný jako β [°]. Nepřekročí-li se kritická hodnota zátěžného úhlu, rotor se otáčí stále synchronními otáčkami. Na vyrovnání zátěžného momentu odebírá statorové vinutí ze sítě větší proud. Za předpokladu, že podélná i příčná složka indukčnosti rotoru je shodná (hladký rotor), lze pro vnitřní moment m_i [Nm] psát rovnici č. 16 (kapitola 5.2.4). Specifické vlastnosti prstencových motorů potom vycházejí z konstrukčního uspořádání, které je uvedeno výše v kapitole 3.1. – 3.3.

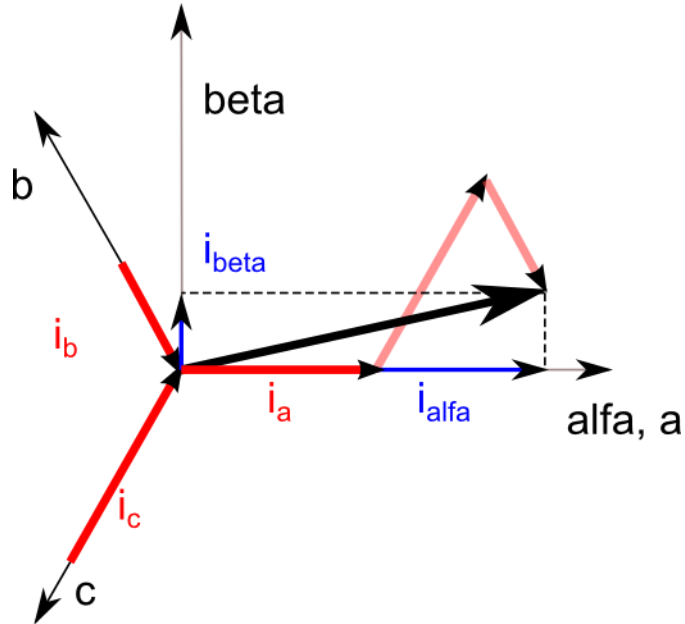
4. Transformace souřadnicových systémů

Pro tvorbu matematických modelů synchronních strojů se využívá transformace z třífázového systému a, b, c do dvoufázového systému d, q , který rotuje spolu s rotorem. Vektory některých veličin (např. statorový proud a napětí) se tak budou otáčet synchronní rychlostí – v d, q systému se budou jevit jako stejnosměrné. Z periodicky proměnných veličin se tak stanou konstanty. Což je z hlediska dynamických vlastností regulačních členů výhodné. Regulace stejnosměrných veličin je snazší. Další výhodou je, že vzájemná indukčnost mezi vinutími je v souřadném systému d, q nulová, protože jsou na sebe jednotlivé složky kolmé. Souřadnicový systém d, q lze též označovat jako rotorový souřadnicový systém. Transformace do souřadného systému d, q a zpět je například využívána při vektorovém řízení synchronních strojů [5 – 7].

Nejdříve rovnice pro popis motoru transformujeme z třífázového systému a, b, c do dvoufázového systému α, β pomocí Clarkovy transformace. Tento systém nerotuje s rotorem, jeví se jako statický vůči původnímu třífázovému systému, je to souřadný statorový systém. Díky Parkově transformaci je možné přejít ze souřadného systému α, β na souřadný systém d, q , který již rotuje s rotorem.

4.1. Clarkové transformace

Clarkové transformace transformuje třífázový souřadný systém a, b, c do dvoufázového souřadného systému α, β , který je spjat se statorem. Postup transformace je zřejmý z fázorového diagramu na obrázku č. 18 – převzato z [8].



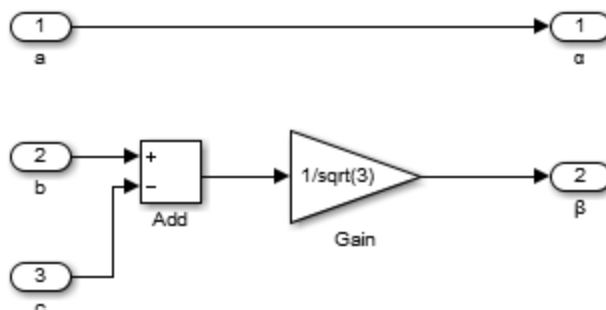
Obrázek 22: Fázorový diagram Clarkové transformace

Rovnice pro proudy pak budou v následujícím tvaru:

$$i_\alpha = i_a \quad (1)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_b - i_c) \quad (2)$$

V programu MATLAB – SIMULINK pak Clarkové transformace vypadá dle obrázku č. 19.



Obrázek 23: Clarkové transformace (MATLAB – SIMULINK)

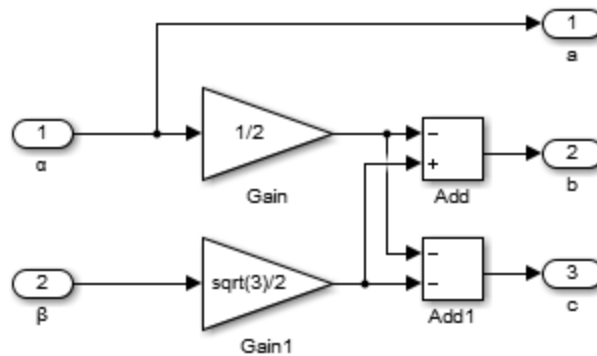
Pro zpětnou transformaci Clarkové platí:

$$i_a = i_\alpha \quad (3)$$

$$i_b = -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta \quad (4)$$

$$i_c = -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta \quad (5)$$

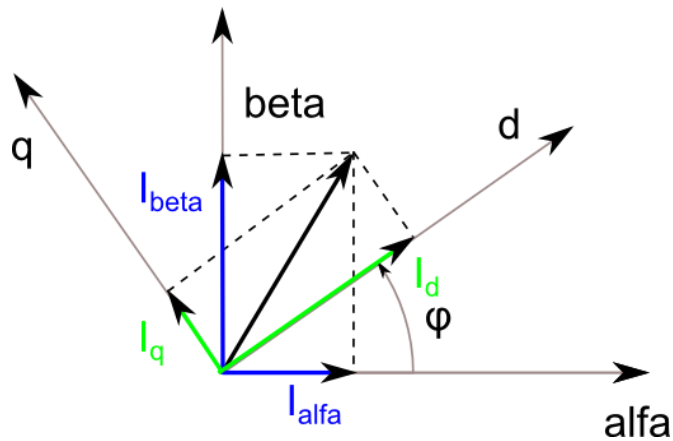
V programu MATLAB – SIMULINK pak zpětná transformace Clarkové vypadá dle obrázku č. 20.



Obrázek 24: Zpětná transformace Clarkové (MATLAB – SIMULINK)

4.2. Parkova transformace

Parkova transformace transformuje dvoufázový souřadný systém α , β do dvoufázového souřadného systému d , q , který je spjat s rotorem. Postup transformace je zřejmý z fázorového diagramu na obrázku č. 21 – převzato z [8].



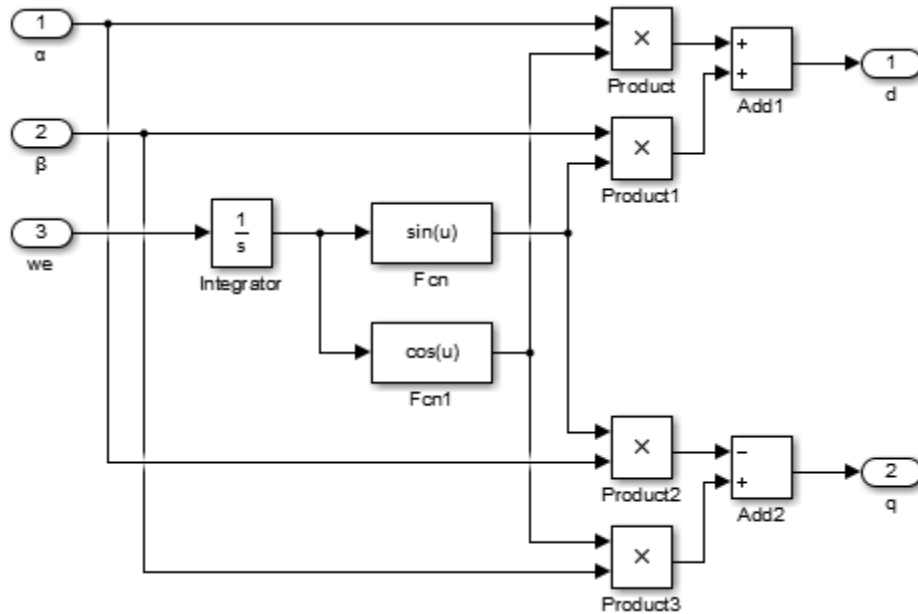
Obrázek 25: Fázorový diagram Parkovi transformace

Rovnice pro proudy pak budou v následujícím tvaru:

$$i_d = i_\alpha \cos\varphi + i_\beta \sin\varphi \quad (6)$$

$$i_q = -i_\alpha \sin\varphi + i_\beta \cos\varphi \quad (7)$$

V programu MATLAB – SIMULINK pak Parkova transformace vypadá dle obrázku č. 22.



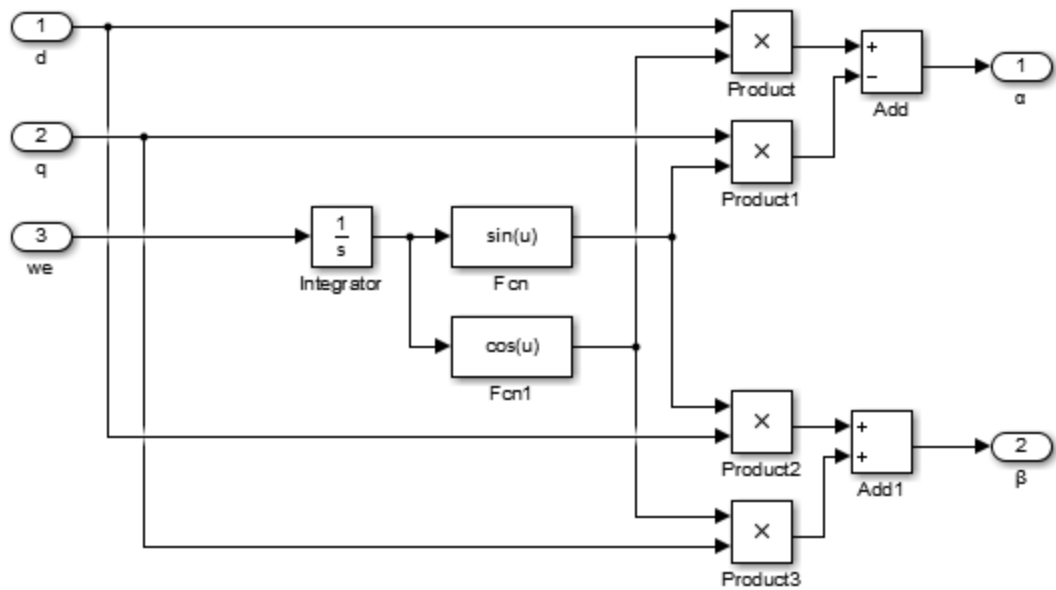
Obrázek 26: Parkova transformace (MATLAB – SIMULINK)

Pro zpětnou Parkovu transformaci platí:

$$i_\alpha = i_d \cos\varphi - i_q \sin\varphi \quad (8)$$

$$i_\beta = i_d \sin\varphi + i_q \cos\varphi \quad (9)$$

V programu MATLAB – SIMULINK pak zpětná Parkova transformace vypadá dle obrázku č. 23.



Obrázek 27: Zpětná Parkova transformace (MATLAB – SIMULINK)

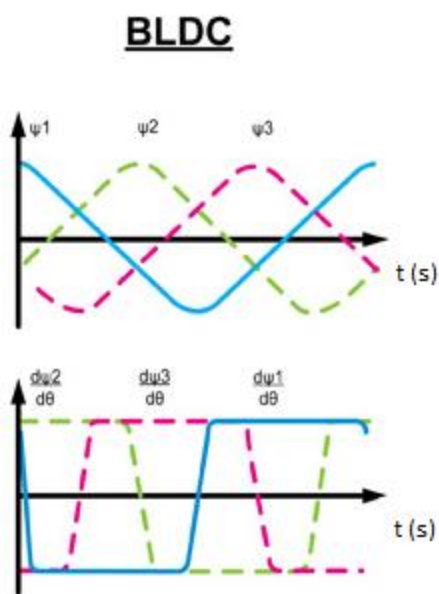
5. Matematický model prstencového motoru

Prstencový motor lze popsat matematickými rovnicemi, na základě kterých lze vytvořit model motoru. Rovnice spojující elektromagnetické a elektromechanické děje vyžadují určité zjednodušení a podmínky. Dopouštíme se tak drobných nepřesností oproti reálným vlastnostem motoru. Je nutné mít veškerá zjednodušení neustále na paměti.

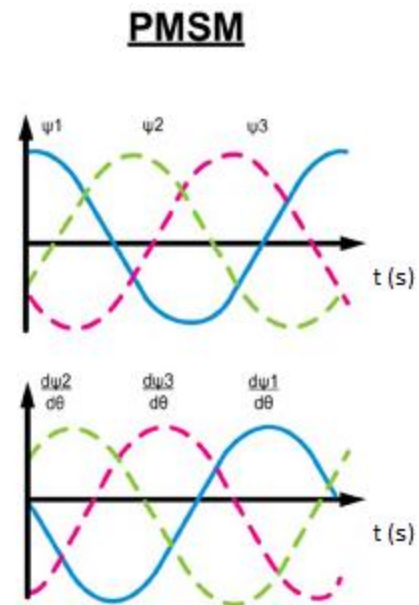
Předpoklady pro tvorbu modelu:

- 1) Motor je napájen souměrným, harmonickým napětím.
- 2) Činný odpor a indukčnost jednotlivých fázových vinutí jsou shodné, nemění se s teplotou, ani s frekvencí.
- 3) Vinutí jsou rozložena symetricky v magnetickém obvodu.
- 4) Neexistují mezizávitové kapacitní vazby ve vinutí.
- 5) Neexistují kapacitní vazby mezi jednotlivými vinutími, ani mezi vinutími a kostrou.
- 6) Ztráty v železe jsou zanedbatelné.
- 7) Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře je harmonické (Neuvažuje se vliv drážkování statorového paketu na rozložení intenzity magnetického pole).
- 8) Vzhledem k tomu, že buzení je řešeno permanentními magnety, nepředpokládá se přítomnost tlumícího ani rozběhového vinutí (za standardních provozních podmínek je rotor vždy v synchronismu s točivým magnetickým polem statoru) a ani nejsou uvažovány tlumící účinky rotoru.

Prstencové třífázové synchronní motory s permanentními magnety jsou řízeny pomocí současného řízení amplitudy a kmitočtu všech tří svorkových harmonických proudů, a to obvykle s pomocí pulzně šířkové modulace napětí, výjimečně ze sítě. Rozdíl mezi BLDC (EC) motory a synchronními motory s permanentními magnety je v geometrickém tvaru pólových nástavců. V případě synchronního motoru je pólový nástavec vyroben tak, aby při konstantní rychlosti bylo dosaženo harmonické magnetické indukce podél vzduchové mezery. Pak je indukované napětí ve vinutích sinusové. Tomu odpovídá i náročnější řízení výkonových tranzistorů, výhodou je však rovnoměrný moment motoru.



Obrázek 28a: Mag. vlastnosti BLDC



Obrázek 29: Mag. vlastnosti PMSM

Statorové vinutí je tvořeno třemi vinutími (a , b , c) vzájemně posunutými o $2\pi/3$ [rad]. V horních částech obrázků č. 25a a 25b je patrný rozdíl magnetických toků ve statoru stroje BLDC a PMSM – převzato a upraveno z [30]. V dolní části je zobrazen rozdíl ve zpětných magnetických polích (Back EMF).

5.1. Parametry motoru

V tabulce č. 2 jsou vypsány veškeré údaje prstencového motoru PMSM od firmy TORQETEC, které uvádí v datasheetu pro model RM 410/100. Bledě modrou barvou jsou zvýrazněny parametry, které byly použity v PC modelu.

TORQUETEC - RM 410/100			
Jmenovitý výkon	P	[kW]	5
Trvalý moment (teplota vinutí 100 °C)	$M_{100^{\circ}\text{C}}$	[Nm]	856
Maximální moment	M_{max}	[Nm]	1846
Počet pólů	2p	[-]	80
Moment setrvačnosti rotoru	J_{rot}	[kg*m ²]	1,103
Elektrický odpor (teplota vinutí 100 °C)	$R_{100^{\circ}\text{C}}$	[Ω]	10,5
Indukčnost	L	[mH]	220,4
Ekvivalentní proud PM	I_m	[A]	5
Trvalý proud (teplota vinutí 100 °C)	$I_{100^{\circ}\text{C}}$	[A]	13,1
Maximální doporučené otáčky	n_{max}	[ot*min ⁻¹]	53
Elektrická časová konstanta	T_e	[ms]	26,7
Mechanická časová konstanta	T_m	[s]	-
Tepelná časová konstanta	T_{thW}	[min]	-
Tepelný odpor (teplota vinutí 130 °C)	R_{th130w}	[K/W]	0,03
Hmotnost motoru	m_{mot}	[kg]	87
Vnější průměr	D	[mm]	442
Délka	L	[mm]	151,5

Tabulka 2: Tabulka parametrů simulovaného motoru TORQUETEC - RM 410/100

5.2. Modelování

V PC programu MATLAB – SIMULINK bude vytvořen model prstencového motoru pro simulaci jeho vlastností. Simulace bude vycházet ze souvislostí daných rovnicemi pro elektromagnetické a elektromechanické děje. Pomocí transformací z třífázového systému provedeme matematický model v systému d, q . Pro popis motoru jsou podstatné rovnice napětí pro jednotlivá vinutí, rovnice spřažených magnetických toků jednotlivých vinutí a momentová rovnice motoru [5 – 8].

5.2.1. Rovnice pro napětí v d, q systému

Pro napětí na statorovém vinutí v d, q systému lze psát:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \quad (10)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \quad (11)$$

kde u_d a u_q [V] jsou transformovaná vstupní napětí na statoru, i_d a i_q [A] jsou statorové proudy v souřadném systému d, q , ψ_d a ψ_q [Wb] jsou spřažené magnetické

toky v souřadném systému d, q , ω_e [rad/s] je elektrická úhlová rychlost a R_s [Ω] je činný odpor statorového vinutí.

5.2.2. Spřažené magnetické toky v d, q systému

Pro spřažené magnetické toky v d, q systému lze psát:

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_m \quad (12)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (13)$$

kde L_d a L_q [H] jsou příčná a podélná indukčnost, ψ_m [Wb] představuje spřažený magnetický tok permanentních magnetů na rotoru.

Permanentní magnety jsou v ose d , k ose q jsou kolmo, proto se neuplatňuje spřažený magnetický tok permanentních magnetů v rovnici č. 13.

Pro spřažený magnetický tok permanentních magnetů na rotoru lze psát:

$$\psi_m = L_d I_m \quad (14)$$

kde I_m [A] je fiktivní proud permanentních magnetů. Tento proud je pouze konstantou úměry mezi spřaženým magnetickým tokem magnetů a indukčností magnetického obvodu. Obvykle je v datasheetu uvedena hodnota přímo spřaženého magnetického toku PM ψ_m [Wb]. Fiktivní proud PM je výhodné znát, pokud při simulaci PMSM předpokládáme odbuzování stroje. V tom případě se ze vzorce č. 14 zpětně dopočítává velikost tohoto proudu.

V programu MATLAB – SIMULINK je vytvořen malý subsystém pro výpočet spřaženého magnetického toku permanentních magnetů, viz obrázek č. 25.



Obrázek 30: Spřažený magnetický tok PM (MATLAB – SIMULINK)

5.2.3. Vztah elektrické a mechanické úhlové rychlosti

Pro elektrickou úhlovou rychlost lze psát:

$$\omega_e = p_p \omega_m \quad (15)$$

kde p_p [-] je počet pólů a ω_m [rad/s] je mechanická úhlová rychlost.

5.2.4. Pohybová rovnice v d, q systému

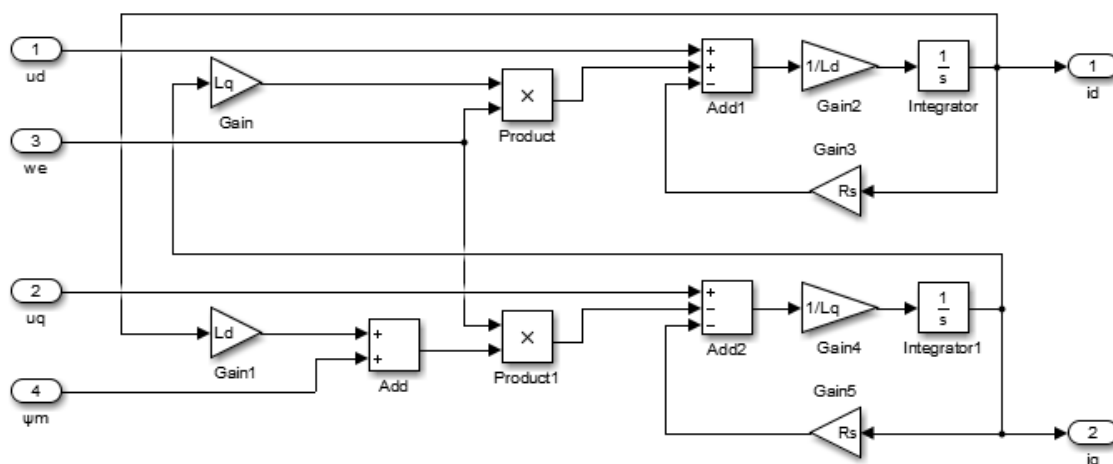
Pro moment motoru lze psát:

$$m_i = p_p \frac{3}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = J \frac{d\omega_m}{dt} + m_z \quad (16)$$

kde J [kg*m²] je moment setrvačnosti rotoru a m_z [Nm] je zátěžný moment.

5.2.5. Výpočet proudů prstencového motoru PMSM

Výpočet proudů modelovaného prstencového motoru PMSM se provádí na základě napěťových rovnic č. 10 a 11. Postup výpočtu v MATLAB – SIMULINK je zobrazen na obrázku č. 26.

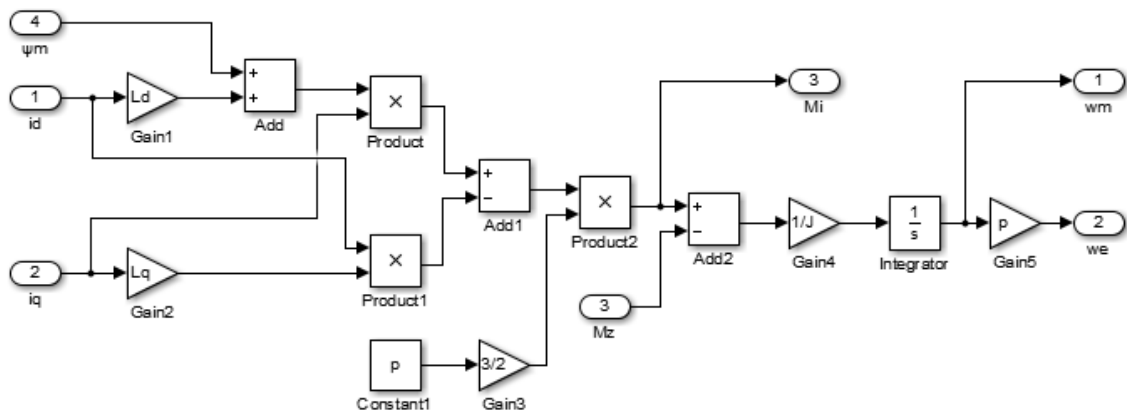


Obrázek 31: Výpočet proudů (MATLAB – SIMULINK)

Řešením rovnice č. 11 (pomocí programu MATLAB – SIMULINK) získáme proud v ose q i_q [A]. Spřažený magnetický tok ψ_d [Wb] se sečte se spřaženým magnetickým tokem permanentních magnetů ψ_m [Wb] a vynásobí elektrickou úhlovou rychlost ω_e [rad/s]. Toto indukované napětí se odečte od vstupního napětí u_q [V], od něž se dále odečte úbytek napětí na statorovém vinutí daný proudem v ose q i_q [A]. Výsledné napětí se podělí indukčností v ose q L_q [H] a zintegruje. Obdobně, řešením rovnice č. 10, se získá proud v ose d i_d [A].

5.2.6. Výpočet momentu a otáček prstencového motoru PMSM

Výpočet vybraných základních parametrů modelovaného prstencového motoru PMSM se provádí na základě rovnic č. 15 a 16. Pro výpočet momentu je využita rovnice č. 16, pro mechanickou a elektrickou úhlovou rychlost je využita rovnice č. 15. Postup výpočtu v MATLAB – SIMULINK je zobrazen na obrázku č. 27.

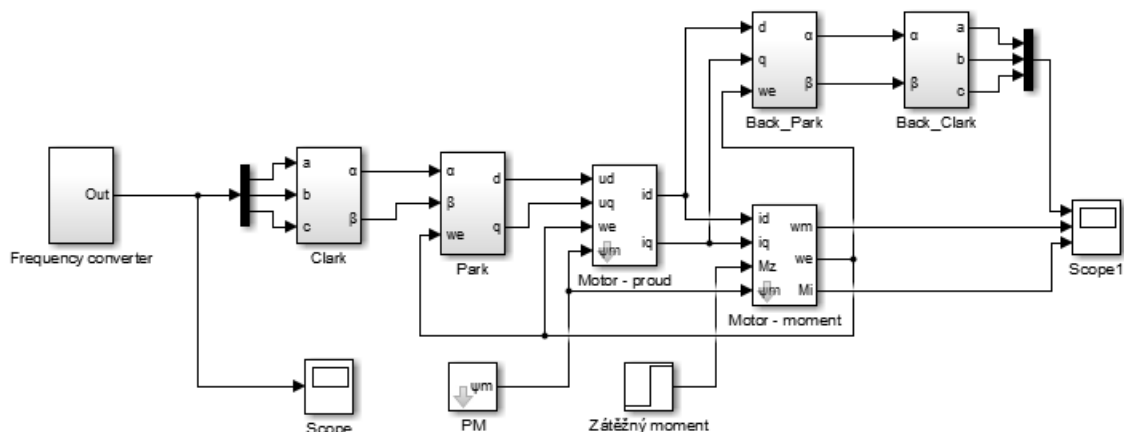


Obrázek 32: Výpočet momentu a otáček (MATLAB – SIMULINK)

Spřažený magnetický tok v ose d ψ_d [Wb] je dán součinem proudu i_d [A] a indukčností L_d [H]. K tomuto spřaženému magnetickému toku se připočte spřažený magnetický tok permanentních magnetů ψ_m [Wb] a vynásobí se proudem i_q [A]. Od tohoto součinu se odečte součin spřaženého magnetického toku v ose q ψ_q [Wb] a proudu i_d [A]. Rozdíl se vynásobí počtem pólpárů p_p [-] a konstantou $3/2$. Viz rovnice č. 16. Vyjde nám tak vnitřní moment stroje m_i [Nm], od kterého odečteme zátěžný moment, abychom určili dynamický moment stroje m_d [Nm]. Ten podělíme momentem setrvačnosti rotoru J [kg*m²] a zintegrujeme pro získání mechanické úhlové rychlosti ω_m [rad/s]. Dle rovnice č. 15 se po vynásobení mechanické úhlové rychlosti ω_m [rad/s] počtem pólpárů p_p [-] získá elektrická úhlová rychlost ω_e [rad/s].

5.2.7. Celkový model prstencového motoru PMSM

Z dílčích namodelovaných rovnic motoru jsem vytvořil subsystemy, které jsem následně propojil dle následujícího obrázku č. 28.



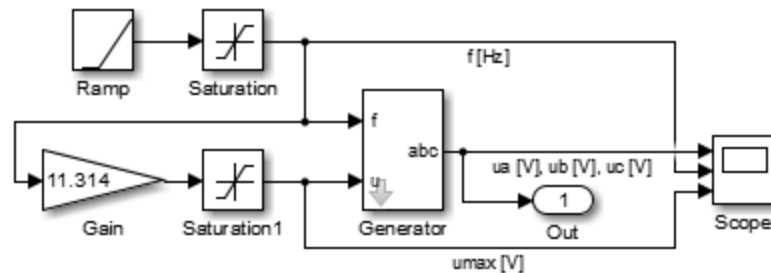
Obrázek 33: Celkový model PMSM (MATLAB – SIMULINK)

Aby bylo možné ověřit funkčnost modelu, je nezbytné namodelovat napájecí zdroj, kterému bude následně věnována samostatná podkapitola. Zdroj napětí na svém výstupu lineárně zvyšuje frekvenci f [Hz] od hodnoty 0 Hz do hodnoty 70 Hz, která odpovídá maximálním provozním otáčkám motoru, jak je uvedeno v datasheetu

od výrobce. V prvním subsystému se pomocí Clarkové transformace vstupní napětí transformuje na napětí v systému α, β . V následujícím subsystému se provede transformace napětí do systému d, q . Napětí v tomto systému napájí subsystém, pro výpočet proudů, tedy subsystém s namodelovanými napěťovými rovnicemi. Výsledné proudy v systému d, q se pomocí zpětné Parkovy a zpětné Clarkové transformace převedou na proudy v systému a, b, c . Dále se s proudem v d, q souřadnicích pracuje v subsystému modelujícím momentovou rovnicí. Výstupem tohoto subsystému je mechanická úhlová rychlost ω_m [rad/s] a vnitřní moment stroje m_i [Nm].

5.2.8. Simulace zdroje napětí

Pro napájení modelu prstencového motoru jsem vytvořil subsystém, který na svém výstupu zvyšuje frekvenci a napětí. Tyto dvě veličiny by měly být ve stejném poměru při různých frekvencích tak, aby byl zachován konstantní magnetický tok statoru (z důvodu optimalizace záběrného momentu motoru). Avšak při nízkých frekvencích toto není možné dodržet (pro nízké frekvence konstantní napětí 50 V). Pro frekvence nad 50 Hz je velikost napětí maximální (saturace zdroje) a pro vyšší frekvence napětí již neroste. Chování tohoto zdroje odpovídá funkci frekvenčního měniče při funkci rozběhu stroje. Na obrázku č. 28 je proto pojmenován jako „Frequency converter“. Funkce zdroje je znázorněna na obrázku č. 29.



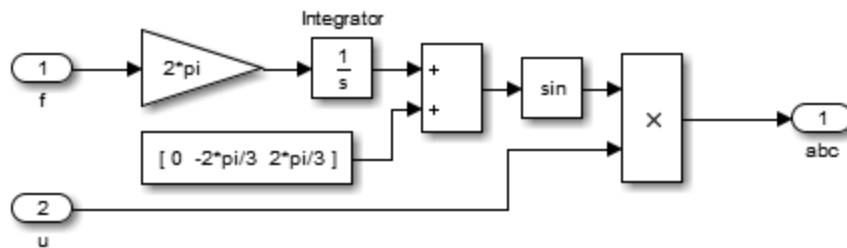
Obrázek 34: Simulace zdroje napětí (MATLAB – SIMULINK)

Blok s názvem „Ramp“ generuje hodnotu lineárně se zvětšující s časem s určitou nastavenou směrnici od počáteční hodnoty 0. Blok s názvem „Saturation“ tuto hodnotu shora omezuje na 70. Tato hodnota představuje maximální frekvenci, kterou lze modelovaný prstencový PMSM motor napájet. Hodnota představující frekvenci je vynásobena konstantou 11,314 a je zdola omezena na hodnotu 50 a shora na hodnotu 565,7. Tato hodnota představuje vstupní napětí pro rozstředání. Zvolená konstanta vychází z následujícího vztahu:

$$u_{max} = u_s \sqrt{2} \quad (17)$$

Maximální hodnota amplitudy napětí by měla být dosažena při 50 Hz, při dalším nárůstu frekvence je již hodnota napětí v saturaci. Amplituda u_{max} [V] sdruženého napětí u_s [V] pro 400 V dosahuje hodnoty 565,7 V. Pro frekvence v řádech jednotek Hz je napětí konstantní nenulové s hodnotou 50 V.

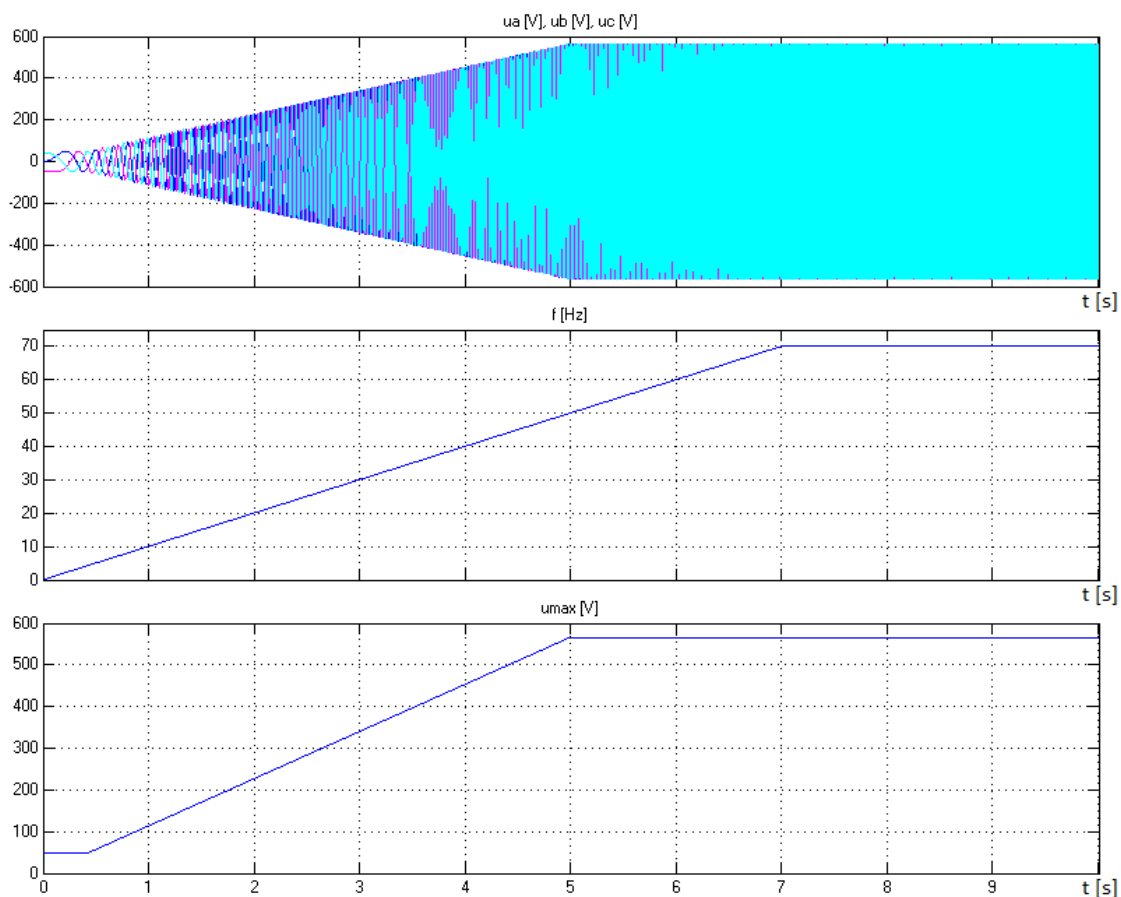
Subsystem pro řešení goniometrických funkcí je na následujícím obrázku č. 30.



Obrázek 35: Výpočet harmonických dle vstupních parametrů (MATLAB – SIMULINK)

Vstupní parametr frekvence f [Hz] je vynásoben konstantou 2π pro získání úhlové frekvence (pulsatance). Ta je zintegrována, čímž získáme úhel natočení. K tomuto úhlu se přičtou jednotlivé posuny (fáze). Výstupem jsou 3, vzájemně posunutě o $2\pi/3$ rad, sinusovky, které jsou vynásobeny vstupní hodnotou představující aktuální velikost amplitudy napětí [9].

Výsledek simulace frekvenčního měniče je na obrázku č. 31. Je zde zobrazen průběh všech výstupních napětí u_a , u_b , u_c [V], průběh frekvence f [Hz] a průběh velikosti amplitudy u_{max} [V]. Tyto výstupy byly sejmuty z bloku „Scope“ na obrázku č. 31.



Obrázek 36: Výstupy ze simulace zdroje napětí

5.3. Výsledky modelování

Výsledkem modelování je simulace rozběhu modelovaného prstencového motoru PMSM a vlivu postupného zatěžování zátěžným momentem m_z [Nm] na vybrané veličiny, jako jsou proudy statoru i_a , i_b , i_c [A] a mechanická úhlová rychlost otáčení rotoru ω_m [rad/s]. Tato je $\omega_m = 5,498$ rad/s, při maximální napájecí frekvenci 70 Hz, dle následujícího vztahu č. 18. To koresponduje s grafickým výstupem na obrázku č. 32 z bloku „Scope1“ z obrázku č. 28.

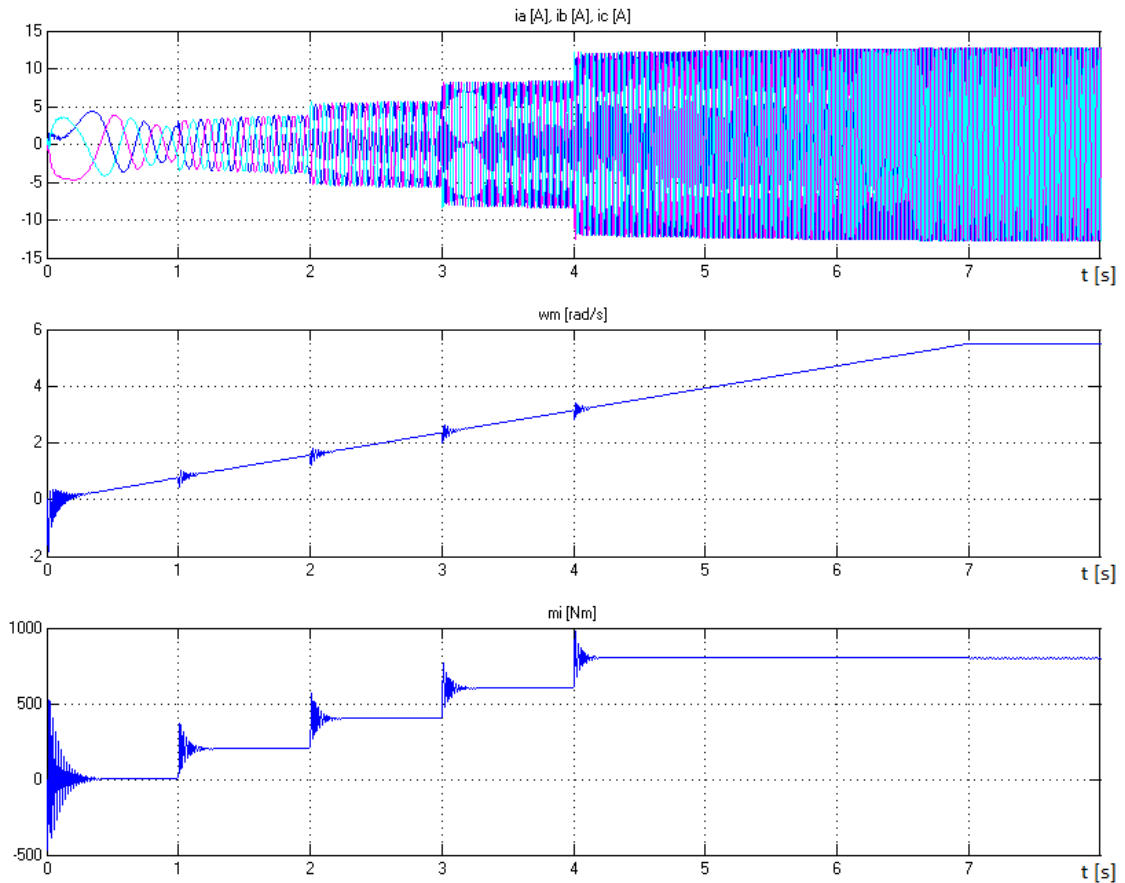
$$\omega_m = \frac{2\pi f}{p_p} \quad (18)$$

Maximální otáčky n_{max} [ot/min] rotoru lze spočítat ze vztahu č. 19, jejich hodnota je 52,5 ot/min.

$$n_{max} = \frac{60f}{p_p} \quad (19)$$

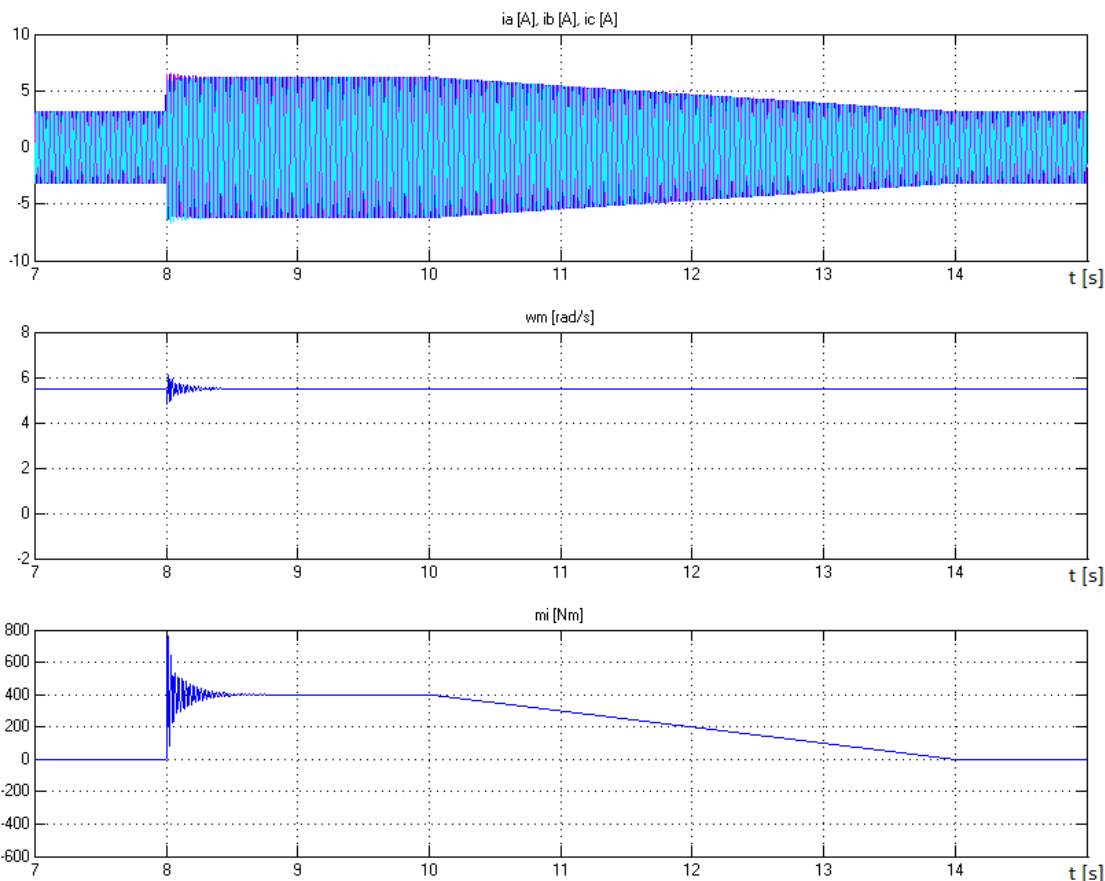
Zátěžný moment m_z [Nm] se v simulaci skokově zvýší po každé sekundě simulace o 200 Nm od nulového zátěžného momentu až po téměř maximální výrobcem povolený.

Vliv skokově se zvětšující zátěže m_z [Nm] na proudy i_a, i_b, i_c [A] a na mechanickou úhlovou rychlost otáčení rotoru ω_m [rad/s] zobrazuje následující obrázek č. 32.



Obrázek 37: Výstupy ze simulace prstencového PMSM (postupné zatěžování při rozběhu)

Na obrázku č. 33 je zobrazena reakce proudů i_a, i_b, i_c [A] a úhlové rychlosti ω_m [rad/s] na skokovém zvětšení zátěžného momentu m_z [Nm]. 8 sekund po rozběhu se zátěžný moment m_z [Nm] skokově zvětší na hodnotu 400 Nm, velikost tohoto momentu je konstantní po dobu následujících dvou sekund, následně zátěžný moment lineárně klesá až na nulovou hodnotu.



Obrázek 38: Reakce na skokový zátěžný moment M_z a na jeho postupné snižování

6. Závěr

Záměrem bakalářské práce bylo seznámení čtenáře s prstencovými motory. Se specifickou konstrukcí nejrozšířenějších typů prstencových motorů, a to synchronních s permanentními magnety - PMSM.

V první části této bakalářské práce jsou popsány jednotlivé typické aplikace prstencového motoru. Především je to průmyslová robotika ve strojírenském průmyslu – použití u obráběcích strojů a robotických rukou pro svařování, lakování apod. Stále více se rozvíjejí a používají prstencové motory i pro pohon elektromobilů – zde je však největší překážkou neodpružená hmotnost těchto strojů, avšak s vývojem a použitím stále kvalitnějších materiálů a nových technologických postupů při výrobě točivých strojů se tuto hmotnost stále daří snižovat. Dalšími rozšířenými aplikacemi prstencových strojů jsou větrné elektrárny s výkony řádově v jednotkách MW. Prstencové motory se používají pro pohon pohyblivé části počítačového tomografu nebo magnetické rezonance pro trojrozměrný snímek pacienta. V neposlední řadě se prstencové motory používají pro výtahovou techniku, kde se využívá přímého pohonu.

V kapitole č. 3 – Konstrukce a princip prstencového motoru jsou popsána specifika statoru, rotoru, používaných permanentních magnetů na rotoru a princip vzniku momentu na základě konstrukčního uspořádání popisovaného stroje. V další kapitole jsou vysvětleny základní matematické vztahy, popisující chování prstencového PMSM. Tyto vztahy jsou pak využity pro vytvoření modelu reálného prstencového motoru TORQUETEC - RM 410/100 v počítačovém programu MATLAB – SIMULINK. Výstupem simulace je rozběh prstencového motoru při postupném zvětšování zátěžného momentu a při současném napájení ze simulovaného zdroje napětí. Dalším výstupem je zobrazení reakce proudů a úhlové rychlosti na skokovém zvětšení zátěžného momentu.

Bibliografie – seznam použitých zdrojů informací

- [1] Souček Pavel: *Servomechanismy ve výrobních strojích*, ČVUT 2004, ISBN 80-01-02902-6
- [2] Pavelka Jiří: *Elektrické pohony*, ČVUT 2006 Praha, ISBN-80-01-01411
- [3] Jacek F. Gieras: *Permanent magnet motor technology*, Third edition, USA 2010
- [4] J. R. Hendershot Jr., TJE Miller: *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*, Oxford 1994
- [5] Michal Vahala, Diplomová práce: *Duální bezsenzorové řízení synchronních elektrických pohonů*, dostupné z:
http://mys.utia.cas.cz:1800/trac/bdm/export/1462/applications/dual/vahala/DP/DP_text.pdf
- [6] Petr Fajkus, Diplomová práce: *Matematický model synchronního motoru s permanentními magnety*, dostupné z:
https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/204/DP_Fajkus_Petr_83812.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [7] Martin Hrnčárek, Diplomová práce: *Moderní struktury řízení servosystémů se střídavými pohony*, dostupné z:
<https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/15713/Diplomov%C3%A1%20pr%C3%A1ce%20-%20Hrn%C4%8D%C3%A1rek.pdf?sequence=2>
- [8] Pavel Karlovský, Diplomová práce: *Vektorové řízení asynchronního motoru pomocí platformy Freescale*
- [9] MATLAB Primer COPYRIGHT 1984-2013 by The MathWorks, Inc., dostupné z:
http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf
- [10] Wenping Cao, Ying Xie and Zheng Tan: *Wind Turbine Generator Technologies*, dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/38933.pdf>
- [11] Gyuláné Vincze and Gergely György Balázs: *Electric Vehicles*, Copyright © 2011, dostupné z:
<https://vet.bme.hu/sites/default/files/tamop/vivem263en/out/html/vivem263en.html>
- [12] Jaroslav Novák, Ondřej Černý a Jiří Šimánek: *Regulace synchronního motoru pro lehkou kolejovou trakci*, dostupné z:
<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37264.pdf>
- [13] Heath Hofmann – University of Michigan, Brad Hieb – MathWorks: *Characterizing and Validating a Permanent Magnet Synchronous Motor Model*, dostupné z:
<http://www.mathworks.com/company/events/conferences/automotive->

[conference-michigan/2012/proceedings/parameterizing-and-verifying-a-permanent-magnet-synchronous-motor-model.pdf](http://www.conference-michigan/2012/proceedings/parameterizing-and-verifying-a-permanent-magnet-synchronous-motor-model.pdf)

- [14] Radovan Doleček, Jaroslav Novák, Ondřej Černý: *Traction Permanent Magnet Synchronous Motor Torque Control with Flux Weakening*, dostupné z: http://www.radioeng.cz/fulltexts/2009/09_04_601_605.pdf
- [15] Dragica Kostic Perovic: *Making the Impossible, Possible – Overcoming the Design Challenges of In Wheel Motors*, dostupné z: <http://www.proteanelectric.com/wp-content/uploads/2012/05/MakingTheImpossiblePossible.pdf>
- [16] R. H. Staunton, S. C. Nelson, P. J. Otaduy, J. W. McKeever, J. M. Bailey, S. Das, R. L. Smith: *PM Motor Parametric Design Analyses for a Hybrid Electric Vehicle Traction Drive Application*, dostupné z: <http://web.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/rpt/121559.pdf>
- [17] Florence Meier: *Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications*, dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:332/FULLTEXT01.pdf>
- [18] obrázek č. 1 dostupný z: http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/shared_media/01_company/01_history/ina_1/211084_aaa_rgb_history.jpg
- [19] obrázek č. 2 dostupný z: <http://img.vogel.com.cn/2011/20110908/1542405678.jpg>
- [20] obrázek č. 3 dostupný z: <http://www.solaripedia.com/images/large/2018.jpg>
- [21] obrázek č. 4 dostupný z: http://www.mitsubishielectric.com/elevator/products/basic/elevators/nexways_ip_v2/images/pokipoki_traction_machine.gif
- [22] originál obrázku č. 5 dostupný z: <http://www.freepatentsonline.com/6879657-0-large.jpg>
- [23] obrázek č. 6 dostupný z: http://images.thecarconnection.com/lrg/protean-in-wheel-electric-motor_100425040_l.jpg
- [24] obrázek č. 7 dostupný z: <http://drivencarreviews.com/wp-content/gallery/porsche-cayenne-s-hybrid-2011/cayenne-s-hybrid-electric-motor.jpg>

- [25] obrázek č. 8 dostupný z:
<http://www.cruiseandferry.net/article/ctl/image/mid/744/itemid/13>
- [26] obrázek č. 9 dostupný z:
<http://www.ukwhitegoods.co.uk/images/articles/lg-direct-drive-vs-belt-and-pulley.jpg>
- [27] obrázek č. 10 dostupný z: http://www.icpe.ro/files/3/AZ_stator.jpg
- [28] obrázek č. 14 dostupný z:
http://www.torquetec.de/englisch/download/torque_english.pdf
- [29] obrázek č. 16 dostupný z:
http://fyzika.jreichl.com/data/E_stac_pole_soubory/image081.png
- [30] originál obrázku č. 24 dostupný z:
<http://www.ecnmag.com/sites/ecnmag.com/files/legacyimages/ECN/Articles/Microchip%20Figure%201-101309.jpg>
- [31] T. Mitsuhiro, A. Hiroshi, D. Noriyuki, and O. Izumi: *Manufacture of spiral lamination core*, patent JP2231943, 1990
- [32] A. Yasuo and F. Toshihiko: *Method and apparatus for rolling up stator core*, patent JP2004159417, 2004
- [33] T. Mitsuhiro: *Manufacturing device for spiral laminated core*, patent JP1148046, 1989
- [34] S. Lee: *Laminated body of motor and manufacturing method thereof*, United States, Patent Application 20050073211, 2005
- [35] Geoff Klempner and Isidor Kerszenbaum: *Operation and Maintenance of Large Turbo Generators*, ISBN 0-471-61447-5, 2004

Seznam obrázků

Obrázek 1: Otočný stůl pro soustružení s prstencovým motorem (L-A-T Suhl AG - INA).	8
Obrázek 2: Robotická ruka FANUC LR Mate 200iC	9
Obrázek 3: VTE s prstencovým strojem – Enercon E-126.....	11
Obrázek 4: Výtahový motor Mitsubishi Electric Corporation – PMSM	11
Obrázek 5: Princip počítačového tomografu	13
Obrázek 6: „In wheel motor" od firmy Protean.....	15
Obrázek 7: Prstencový PMSM pro hybridní pohon vozu Porsche Cayenne S Hybrid.....	16

Obrázek 8: Projekt firmy Fjord1 MRF – speciální lodní šroub pohánění prstencovým motorem	16
Obrázek 9a: Přímý pohon pračky	17
Obrázek 9b: Konvenční pohon pračky	17
Obrázek 10: Stator motoru Icp-TORQUE 3600	18
Obrázek 11: Metoda Spiral-laminated core (slinky)	19
Obrázek 12: Princip výroby jádra pomocí metody Join-lapped core	19
Obrázek 13: Strojové navíjení na jádro typu Join-lapped core	20
Obrázek 14: Rotor motoru firmy TORQUETEC	20
Obrázek 15a: PM na rotoru PMSM ($L_d = L_q$)	21
Obrázek 15b: PM na rotoru PMSM ($L_d \neq L_q$)	21
Obrázek 16: Obecná hysterezní smyčka PM	22
Obrázek 17a: 4 pólový PMSM	23
Obrázek 17b: 20 pólový PMSM	23
Obrázek 18a: Napětí na statoru	24
Obrázek 18b: Působení mag. pole statoru a rotoru	24
Obrázek 19: Fázorový diagram Clarkové transformace	25
Obrázek 20: Clarkové transformace (MATLAB – SIMULINK)	25
Obrázek 21: Zpětná transformace Clarkové (MATLAB – SIMULINK)	26
Obrázek 22: Fázorový diagram Parkovi transformace	26
Obrázek 23: Parkova transformace (MATLAB – SIMULINK)	27
Obrázek 24: Zpětná Parkova transformace (MATLAB – SIMULINK)	28
Obrázek 25a: Mag. vlastnosti BLDC	29
Obrázek 25: Mag. vlastnosti PMSM	29
Obrázek 26: Spřažený magnetický tok PM (MATLAB – SIMULINK)	31
Obrázek 27: Výpočet proudů (MATLAB – SIMULINK)	32
Obrázek 28: Výpočet momentu a otáček (MATLAB – SIMULINK)	33
Obrázek 29: Celkový model PMSM (MATLAB – SIMULINK)	33
Obrázek 30: Simulace zdroje napětí (MATLAB – SIMULINK)	34
Obrázek 31: Výpočet harmonických dle vstupních parametrů (MATLAB – SIMULINK)	35
Obrázek 32: Výstupy ze simulace zdroje napětí	36

Obrázek 33: Výstupy ze simulace prstencového PMSM (postupné zatěžování při rozběhu)	37
Obrázek 34: Reakce na skokový zátěžný moment M_z a na jeho postupné snižování	38

Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní vlastnosti permanentních magnetů	21
Tabulka 2: Tabulka parametrů simulovaného motoru TORQUETEC - RM 410/100.....	30

Přílohy

CD s následujícími soubory:

- model v programu (MATLAB – SIMULINK)
- tato práce ve formátu PDF