



F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra měření**

Bakalářská práce

Řízení BLDC motoru s Hallovými sondami pomocí six-step algoritmu v proudovém režimu

Matouš Kulich
Kybernetika a robotika

Květen 2024

Vedoucí práce: Ing. Jan Stejskal

Poděkování / Prohlášení

TODO

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne xx.xx.2024

.....

Abstrakt / Abstract

Tato bakalářská práce se zabývá popisem, modelováním a realizací řízení BLDC motoru.

Klíčová slova: BLDC, synchronní motor, STEVAL-SPIN3202, STM32

This bachelor thesis deals with the description, modeling, and implementation of BLDC motor control.

Keywords: BLDC, Synchronous motor, STEVAL-SPIN3202, STM32

Title translation: Control of a BLDC motor with Hall sensors using the six-step algorithm in current mode

/ Obsah



Kapitola 1

Úvod

V současném průmyslovém a technologickém prostředí hrají elektromotory klíčovou roli. Poskytují pohon pro širokou škálu zařízení od drobných domácích spotřebičů až po komplexní průmyslové systémy. Na provoz těchto zařízení se spotřebuje více jak 40 % vyrobené elektrické energie na celém světě, což je pro porovnání dvakrát více než spotřeba pro veškeré osvětlení. Elektromotory se tak staly nedílnou součástí moderního světa a jejich význam stále roste. S tímto trendem souvisí i rostoucí důraz na energetickou efektivitu a udržitelnost, což vede k hledání nových technologií a inovací v oblasti elektrických pohonů. Přesně tyto vlastnosti nabízejí bezkartáčové stejnosměrné motory (BLDC) a stávají se tak preferovanou volbou v mnoha odvětvích. Mimo jiné nabízí i vysokou hustotu výkonu, výbornou regulaci otáček a účinnost patřící k nejvyšším mezi elektrickými motory.

S pokračujícím rozvojem technologií řízení a senzoriky bude možné ještě zvýšit jejich spolehlivost a přesnost v rámci složitých automatizovaných systémů. Tyto trendy naznačují, že BLDC motory mají před sebou slibnou budoucnost a budou hrát stále významnější roli v moderním průmyslu a technologickém prostředí.

Hlavním záměrem bakalářské práce je detailně analyzovat konstrukci bezkartáčových stejnosměrných motorů a porozumět jim z fyzikálního hlediska. Následně bude podrobně rozebrána škála možných řídicích algoritmů a jejich charakteristické vlastnosti. Dalším cílem této práce bude vytvořit model BLDC motoru v prostředí MATLAB/Simulink s implementací six-stepového řídicího algoritmu v proudovém režimu. Tento model bude vytvořen s využitím fyzikálních principů a parametrů motoru od firmy LINIX.

V neposlední řadě vytvořený model bude sloužit jako referenční vzor pro vytvoření implementace six-stepového algoritmu pro evaluční desku STEVAL-SPIN3202 od firmy STMicroelectronics a motor 45ZWN24-40 od firmy LINIX. V rámci práce bude vytvořeno i uživatelské rozhraní, které umožní snadné ovládání motoru a nastavení parametrů regulátoru. Vznikne tak praktický nástroj pro využití v konkrétních aplikacích.

Tato práce přináší přínos prostřednictvím hloubkového studia struktury a chování BLDC motoru, a to s důrazem na jejich praktické využití v různých aplikacích. Vytvoření modelu a knihovny pro evaluční desku může sloužit jako praktický nástroj pro vývojáře a studenty, kteří by chtěli navázat na tuto práci, či využít vytvořenou knihovnu pro konkrétní aplikaci.

Kapitola 2

Teoretický přehled o BLDC motorech

Tato kapitola se zaměřuje na popis BLDC motorů z pohledu charakteristiky a vlastností. Bude zde zmíněna i historie jejich vzniku a vysvětlen rozdíl mezi motorem typu BLDC a PMSM.

2.1 Charakteristika

BLDC¹, neboli bezkartáčový stejnosměrný motor, je moderní typ elektrického motoru, který je svými vlastnostmi a konstrukcí podobný klasickým stejnosměrným motorům s kartáči, též označovanými jako DC. Oproti DC motorům se však liší absencí mechanického komutátoru², který je nahrazen komutátorem elektronickým. Odtud pochází jeho název - bezkartáčový.

BLDC motory se řadí do kategorie synchronních motorů. Označení synchronní znamená, že pohyb rotoru motoru je synchronní s pohybem magnetického pole statoru a nedochází tak k tzv. kluzným otáčkám, které jsou typické pro asynchronní motory.

2.1.1 Vznik BLDC motorů

Vznik BLDC motorů je úzce spojen s vývojem polovodičových technologií v 60. letech 20. století, které umožnili výrobu spolehlivých a výkonných elektronických komutátorů. V roce 1962 T.G. Wilson a P.H. Trickey publikovali ve své práci *D-C machine with solid-state commutation* první návrh a realizaci BLDC motoru s elektronickým komutátorem a jsou tak označováni za jeho vynálezce.

2.1.2 Vlastnosti

Mezi charakteristické vlastnosti BLDC motorů patří vysoká účinnost, vysoký točivý moment, dlouhá životnost a výborná regulace otáček.

BLDC motory dosahují účinnosti až 90 % a při vhodné konstrukci dosahují vysokých otáček blížících se až k 100 000 ot/min. Vyznačují se také jednoduchou a lehkou konstrukcí, díky které disponují vysokou hustotou výkonu³.

Dále se vyznačují variabilitou konstrukčních řešení a lze tak nelézt BLDC motory v různých provedeních a rozměrech.

2.1.3 Back-emf

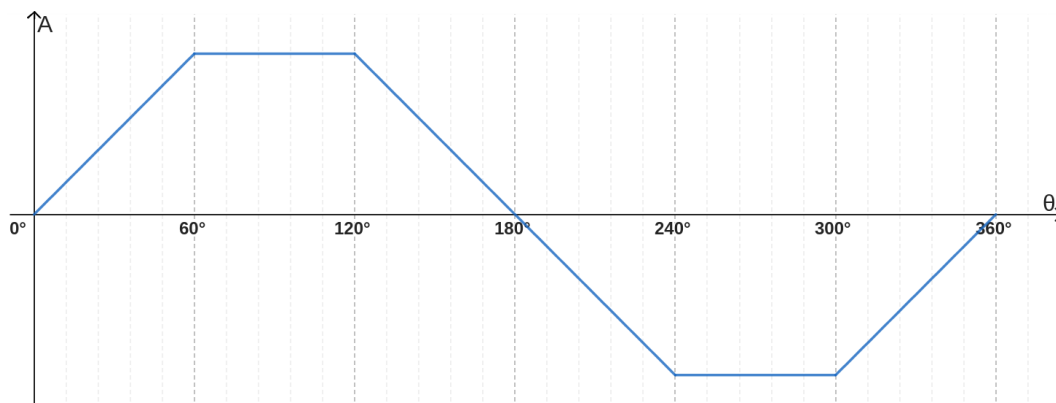
Při pohybu rotoru s permanentními magnety v blízkosti vodivých cívek statoru dochází k indukci napětí na cívkách. Toto napětí bývá označováno jako zpětné indukované napětí, nebo zkráceně back-emf⁴. Tento jev je přítomný u všech synchronních motorů. Typickým znakem BLDC motorů je trapezoidní tvar zpětného indukovaného napětí.

¹ Anglická zkratka pro brushless direct current motor

² Součástka sloužící k přepínání polarit proudů v jednotlivých cívkách motoru. Obsahuje tzv. kartáče, které se třou o lamely. Tímto kontaktem prochází proud do motoru.

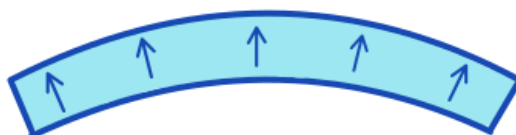
³ Výkon v poměru s hmotností a objemem motoru.

⁴ Zkratka anglického výrazu *Back electromotive force*



Obrázek 2.1. Trapezoidní tvar zpětného indukovaného napětí

Tento tvar je způsoben použitím koncentrovaného vinutí statorových cívek a permanentních magnetů s vnitřním magnetickým tokem kolmým k povrchu rotoru ⁵.



Obrázek 2.2. Magnetický tok uvnitř permanentních magnetů BLDC motoru

2.2 Rozdíl mezi BLDC a PMSM motory

PMSM ⁶ motory jsou dalším typem synchronních motorů. S BLDC motory sdílejí mnoho společných vlastností a konstrukčních podobností. Z tohoto důvodu je často obtížné odlišit tyto dva typy motorů. Rozlišit je lze dle typu vinutí statorových cívek. PMSM motory využívají vinutí distribuované, zatímco BLDC motory využívají vinutí koncentrované. To má za následek rozdílný tvar zpětného indukovaného napětí, které je u PMSM motorů sinusoidní.

2.3 Zařazení mezi AC nebo DC motory?

Zařazení BLDC motorů do kategorie střídavých nebo stejnosměrných motorů není jednoznačné, neboť mohou být napájeny jak stejnosměrným tak i střídavým napětím.

Některé prameny zařazují BLDC motory mezi stejnosměrné z důvodu použití stejnosměrného zdroje napětí nebo konstrukční podobností s DC motory.

Argumentem zařazení BLDC motorů mezi AC motory je velmi podobný princip fungování a charakteristika se synchronními AC motory.

Z tohoto důvodu nelze BLDC motory do této kategorie jednoznačně zařadit, a proto se v pramenech často objevují pod různými označeními.

⁵ Pokud jsou použity magnety s paralelní magnetizací, vzniká sinusoidální zpětné elektromotorické napětí a nejedná se o motor BLDC, ale motor typu BLAC

⁶ Zkratka anglického výrazu *Permanent Magnet Synchronous Motor*

Kapitola 3

Konstrukce BLDC motoru

BLDC motory disponují rozmanitými konstrukčními variantami, díky kterým jsou vhodné pro široké spektrum aplikací. Tato kapitola se zabývá detailním popisem konstrukčních prvků BLDC motorů a jejich variant.

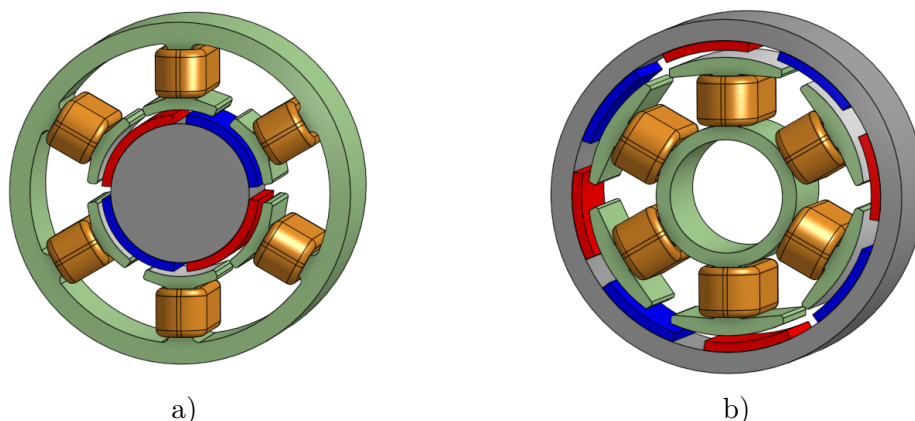
3.1 Stator a rotor

Stator a rotor jsou základním konstrukčním prvkem každého elektromotoru. Stator, často označovaný jako neměnná nebo nepohyblivá část, obsahuje vinuté cívky, kterými prochází elektrický proud generující magnetické pole. Naopak rotor představuje pohyblivou část motoru, která koná rotační pohyb kolem statoru a přenáší tak točivý moment na hřídel či na objekt, s kterým chceme pohybovat. Rotor může být osazen permanentními magnety nebo vinutými cívkami. V takovém případě hovoříme o cize buzeném motoru. V případě BLDC motorů je nejběžnější použití permanentních magnetů a proto se zaměříme právě na tato konstrukční řešení.

BLDC motory se v závislosti na umístění rotoru vůči statoru dělí na radiální a axiální uspořádání. Dle konstrukce statoru se dále dělí na slot a slotless konstrukci.

3.1.1 Radiální uspořádání

Radiální uspořádání je nejběžnější konstrukční variantou BLDC motorů. V tomto uspořádání je rotor umístěn uvnitř, nebo vně statoru. V obou případech je stator a rotor oddělen vzduchovou mezerou, která zajišťuje minimální mechanický kontakt mezi oběma částmi. Takové uspořádání si můžeme představit jako dvě koncentrické trubice, kde jedna trubice představuje stator a druhá rotor. Příklad BLDC motoru s radiálním uspořádáním můžeme vidět na obrázku 3.1 níže.



Obrázek 3.1. Radiální BLDC motor a) se statorem uvnitř rotoru b) s rotorem uvnitř statoru.

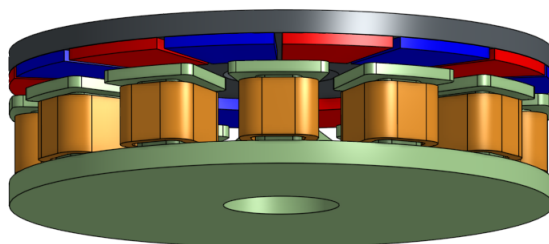
Každý typ má své specifické vlastnosti, které je třeba zvážit při výběru motoru pro konkrétní aplikaci.

V uspořádání s vnějším rotorem působí interakce mezi permanentními magnety a statorovými cívkami ve větší vzdálenosti od osy otáčení a disponují tak vyšším točivým momentem. Vzhledem k této vlastnosti jsou obvykle ve srovnání se svým průměrem kratší. Jsou tak ideální volbou pro aplikace vyžadující vysoký točivý moment s kompaktními rozměry v podélném směru. Nacházejí tak uplatnění například jako pohonné jednotky pro ventilátory, drony či automobily.

Naopak motory s uspořádáním rotoru uvnitř statoru disponují díky menšímu průměru rotoru nižším momentem setrvačnosti a menšími vibracemi. Dosahují tak lepšího dynamického chování a nižší hlučnosti. Dále díky uzavřené konstrukci jsou méně náchylné na vnější vlivy jako je prach, voda a jiné nečistoty. Jsou rovněž preferovány pro aplikace v blízkosti lidí, neboť neobsahují volně rotující součásti představující riziko úrazu. Nacházejí tak uplatnění nejen jako pohony v robotice a průmyslové automatizaci, ale i v běžné spotřební elektronice jako jsou například vysavače a kuchyňské spotřebiče.

■ 3.1.2 Axiální uspořádání

Při axiálním uspořádání jsou plochy rotoru a statoru umístěny rovnoběžně proti sobě. Osa rotace rotoru je pak kolmá k těmto plochám. Příklad jednoduchého BLDC motoru s axiálním uspořádáním je znázorněn na obrázku 3.2 níže.



Obrázek 3.2. Axiální uspořádání BLDC motoru.

Axiální uspořádání poskytuje i možnost implementace složitějších konstrukčních variant, které zahrnují použití více částí rotorů a statorů. Takové konstrukce umožňují zvýšení výkonu motoru při minimálním nárůstu jeho rozměrů.

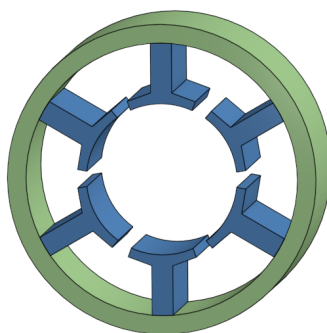
Hlavní předností axiálního uspořádání je vysoký výkon motoru s velmi kompaktními rozměry. Jsou tak hojně využívány v aplikacích, kdy jsou již zabudované do rotujících částí. Typickými příklady takových aplikací jsou pohony pro jízdní kola či automobily, kde jsou umístěny uvnitř kol.

■ 3.1.3 Konstrukční materiály

BLDC motory jsou obvykle vyrobeny z feromagnetických materiálů, jako je například ocel a další kovové slitiny, které poskytují dostatečnou magnetickou propustnost a stabilitu pro správnou funkci motoru.

■ 3.1.4 Slot vs. slotless konstrukce

Pojmem slot se označují drážky statoru, kolem kterých jsou umístěné vinuté cívky. Tyto drážky jsou zvýrazněny modrou barvou na obrázku 3.3 níže.



Obrázek 3.3. Sloty BLDC motoru

Drážky umožňují snadné upevnění cívek a minimalizují riziko jejich pohybu nebo poškození během provozu motoru. Další výhodou drážek je přispění k rovnoměrnému usměrnění magnetického toku generovaný vinutými cívkami. Dále také přispívají k efektivnějšímu odvodu tepla z cívek a zlepšují tak tepelné vlastnosti motoru.

Hlavní nevýhodou slot konstrukce je nežádoucí interakce mezi drážkami a permanentními magnety rotoru. Tato interakce způsobuje tzv. *cogging torque*, což je nežádoucí točivý moment motoru. Ten se negativně projeví v plynulosti chodu motoru. Právě tato negativní vlastnost drážkových satorů je u bezdrážkových satorů eliminována. Cívky slotless motorů jsou umístěny přímo na povrchu satoru a pro jejich fixaci se využívají speciální lepidla.

Slotless motory jsou využívány v lékařských přístrojích vyžadujících vysokou přesnost a plynulost chodu. Pro stejné účely jsou využívány i ve vojenském a kosmickém průmyslu.

3.2 Cívky BLDC motoru

Cívky do elektromotů jsou nejčastěji vyrobeny z mědi nebo hliníku a jsou vždy opatřeny povrchovou izolací, která zabráňuje vzniku zkratu mezi jednotlivými vinutími. Tato izolace je obvykle zajištěná pomocí speciálních izolačních laků a jejich složení je závislé na konkrétní aplikaci motoru. Základní složkou jsou organické pryskyřice, které zajišťují izolační vlastnosti a odolnost proti vysokým teplotám. Další přidané složky mohou zvyšovat mechanickou pružnost, odolnost proti chemickým látkám i ochraně proti UV záření.

Cívky jsou pak navinuté na sator motoru do tzv. koncentrovaného vinutí. Tedy takovým způsobem, že se jednotlivé fáze nepřekrývají a jsou odděleny vzduchovou mezerou.

BLDC motory se vyznačují několika typy vinutí, které se liší počtem fází. Při použití tří a více fází se fáze zapojují do tzv. hvězdy nebo do trojúhelníku.

3.2.1 Počet fází

BLDC motory mohou mít 1-fázové, 2-fázové, 3-fázové a multi-fázové vinutí. S přibýjícím počtem fází se zlepšují jeho vlastnosti, ale také jeho cena a složitost řízení. Proto je důležité zvolit takový počet fází, který bude vyhovovat požadavkům konkrétní aplikace.

Jednofázové motory jsou nejjednodušším typem BLDC motoru jak z pohledu konstrukce tak i z pohledu řízení. Disponují však účinností pouze okolo 50 % a nízkým točivým momentem. Další nevýhodou je velké kolísání točivého momentu a možnost

rotace pouze v jednom směru. Tyto vlastnosti jsou ale dostačující pro aplikace jako pohony pro jednoduché ventilátory a čerpadla.

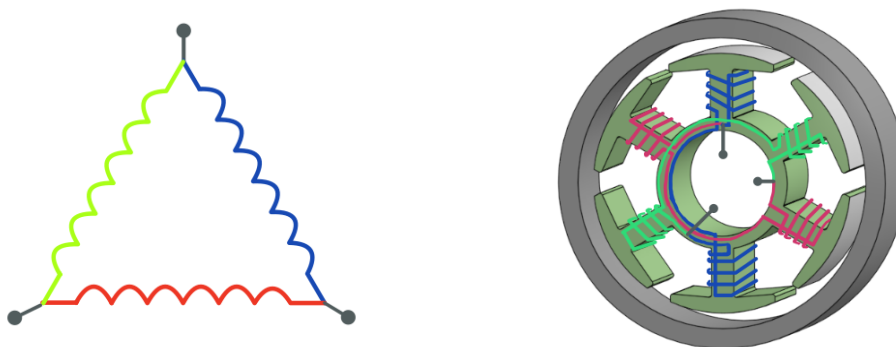
Dvoufázové motory nabízí vyšší točivý moment a možnost rotace v obou směrech. Nabízí i pokročilejší a efektivnější řídicí metody. Při použití jednoduchých řídicích metod však stále trpí značným kolísáním točivého momentu. Své uplatnění nacházejí v kuchyňských spotřebičích, ventilátorech a čerpadlech.

Třífázové motory jsou nejběžnějším typem BLDC motorů. Z tohoto důvodu se tato práce zaměřuje právě na tyto motory. Oproti předchozím typům nabízejí efektivnější řízení a to jak pro jednoduché tak i pokročilejší metody. Třífázové motory se hojně využívají v průmyslové automatizaci, letectví, robotice a v elektromobilních aplikacích.

Multi-fázové motory jsou nejvýkonnější volbou a oproti předchozím typům nabízí vyšší spolehlivost. Právě díky více fázím je schopen pracovat s dostatečnou účinností i při poškození jedné či více fází. Tento typ motoru se využívá v odvětvích jako je například letectví, kosmonautika či ve vojenském průmyslu.

3.2.2 Zapojení vinutí do trojúhelníku

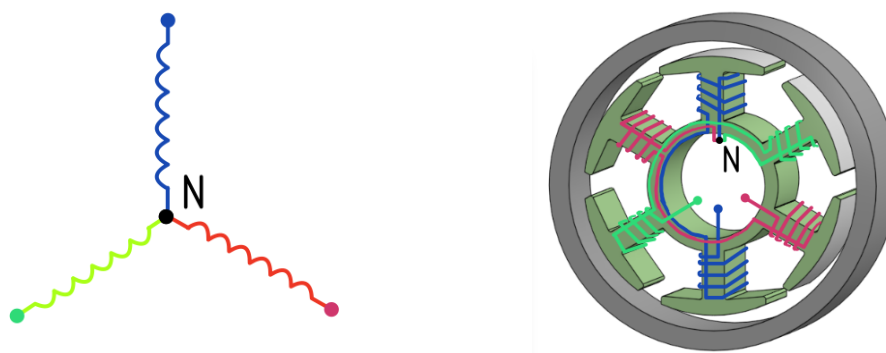
Zapojení vinutí do trojúhelníku se u BLDC motorů využívá jen zřídka. Kvůli uzavřenému obvodu může docházet k tzv. oběhovému proudu. Ten vzniká při změně magnetického toku v cívkách v důsledku pohybu rotoru, což indukuje napětí a způsobuje tak proud mezi fázemi motoru. Tento jev může způsobit zahřívání a ztráty výkonu motoru, což negativně ovlivňuje jeho účinnost a životnost. Pro potlačení tohoto jevu je nutné provést optimalizovaný návrh motoru a řídicího systému. Jedinou výhodou tohoto zapojení je vyšší počáteční proud při rozběhu motoru. Důsledkem toho motor disponuje vyšším počátečním točivým momentem, který může být v některých aplikacích žádoucí.



Obrázek 3.4. Vinutí cívek do trojúhelníku ve schématu a při realizaci

3.2.3 Zapojení vinutí do hvězdy

Zapojení vinutí do hvězdy je realizováno spojením jednotlivých fází do jednoho tzv. neutrálního bodu. V důsledku zapojení jednotlivých fází do série se odpory cívek sčítají a proudy protékající cívkami jsou menší než u trojúhelníkového zapojení. Počáteční proudové špičky jsou tak menší a motor je tak méně zatěžován. Důsledkem je také menší počáteční točivý moment, který je však stále dostatečný pro většinu aplikací.



Obrázek 3.5. Vinutí cívek do hvězdy ve schématu a při realizaci

Obvod je oproti trojúhelníkovému zapojení otevřený a nevzniká tak oběhový proud. Díky tomu jsou řídicí metody přesnější a efektivnější.

Při použití jednoduchých řídicích metod jsou aktivní pouze dvě fáze. Třetí fáze je plavoucí¹ a lze díky ní detekovat polohu rotoru. Tato metoda u zapojení do trojúhelníku nelze použít.

Tyto vlastnosti činí zapojení vinutí do hvězdy preferovanou volbou pro BLDC motory.

3.3 Permanentní magnety

Permanentní magnety jsou umístěny na/v rotoru motoru a generují magnetické pole, které interaguje s magnetickým polem statoru. Dle počtu magnetů v motoru se určí počet tzv. pól-párů. Každý pól-pár je tvořen dvěma permanentními magnety usazenými v rotoru v opačné polaritě.

Pro BLDC motory se využívají především neodymové, feritové a samario-kobaltové magnety. Každý z uvedených typů magnetů disponuje odlišnými vlastnostmi. Proto je důležité zvolit takový typ magnetu, který bude vyhovovat požadavkům konkrétní aplikace.

Pro velmi výkonné a účinné motory se používají neodymové magnety, které disponují nejvyšší energií na jednotku objemu (1,2 - 1,4 T). Jejich nevýhodou je však náchylnost k odmagnetování a ke korozi. Jsou také stabilní pouze při teplotách do 80 - 250 °C v závislosti na třídě. Jsou tak využívány např. v průmyslovém odvětví, kde lze zajistit ideální prostředí pro jejich provoz.

Pro aplikace vyžadující větší odolnost vůči vyšším teplotám, odmagnetování a korozi se používají samario-kobaltové magnety. Tyto magnety dokáží pracovat v teplotách až 350 °C a dosahují magnetické indukce až 0,9 - 1,1 T.

Feritové magnety jsou ekonomicky nejvýhodnější a jsou tak využívány v levných BLDC motorech pro běžné spotřebitelské aplikace. Dokáží pracovat v teplotách až 400 °C a jsou odolné vůči korozi a odmagnetování. Nevýhodou oproti výše zmíněným typům je nižší energie na jednotku objemu (0,4 - 0,5 T).

¹ na fázi není přivedeno kladné napětí ani není uzemněna

Kapitola 4

Princip fungování BLDC motoru

Tato kapitola se zaměřuje na popis fyzikální principu fungování BLDC motoru, popisu řídicího obvodu motoru a základní myšlenky pro řízení BLDC motoru.

4.1 Fyzikální princip fungování BLDC motoru

Vytváření točivého momentu v BLDC motoru je založeno na interakci magnetického pole generovaného statorovými cívkami s magnetickým polem rotoru.

4.1.1 Magnetické pole statoru

Generování magnetického pole statoru je možné na základě Ampérova zákona, dle kterého proud procházejícím vodičem vyvolává magnetické pole, jehož směr je kolmý na směr proudu. Hodnotu magnetického toku¹ tohoto pole lze vyjádřit pomocí Hopkinsona zákona jako:

$$= G_m U_m \quad (4.1)$$

Kde G_m je magnetická vodivost a U_m je magnetomotorické napětí. Magnetická vodivost vyjadřuje schopnost materiálu vést magnetický tok a platí pro ni vztah $G_m = \mu S/l$, kde μ je permeabilita prostředí, S průřez cívky a l je její délka. V případě cívky platí, že magnetomotorické napětí je rovno součinu proudu procházejícího cívkou s počtem závitů dané cívky. Tedy $U_m = NI$. Při vynásobení rovnice počtem závitů cívky se vyjádří vztah pro její celkový spřažený tok se všemi závity.

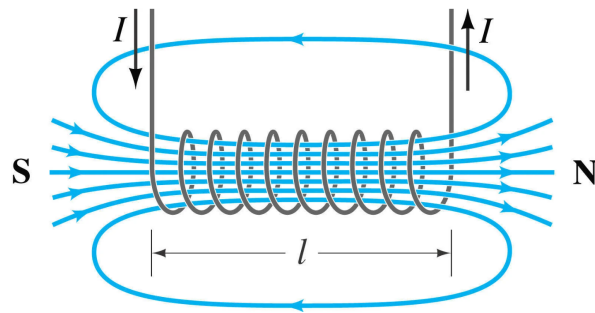
$$= N\phi = G_m N^2 I \quad (4.2)$$

Výraz $N^2 G_m$ vyjadřuje vlastní indukčnost cívky. Tato veličina se značí jako L a vyjadřuje schopnost cívky vytvářet magnetické pole. Celkový magnetický tok cívky tak lze vyjádřit jako:

$$\psi = LI \quad (4.3)$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že magnetický tok ovlivňuje nejen velikost a směr proudu, ale i vlastní indukčnost cívky a prostředí ve kterém se cívka nachází. V případě, že je v prostředí feromagnetické jádro, je magnetické pole vytvářené cívkou výrazně zesíleno a toho se využívá u drážkových BLDC motorů.

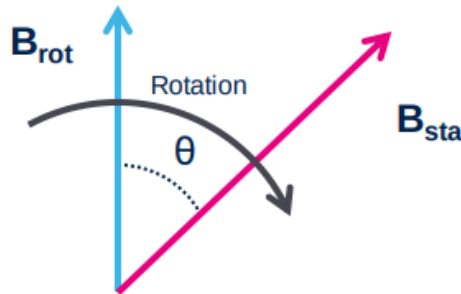
¹ Magnetický tok je vektorová veličina. Vyjadřuje množství magnetického pole procházející danou plochou.



Obrázek 4.1. Znázornění magnetického pole cívky

4.1.2 Interakce magnetického pole

Statorové cívky tak vytvářejí magnetické pole, které následně interaguje s polem permanentních magnetů. V případě rozdílných směrů magnetické indukce² těchto polí dochází k točivého momentu, který se tyto pole snaží srovnat.



Obrázek 4.2. Znázornění magnetického indukce statoru a rotoru BLDC motoru

Hodnotu točivého momentu mezi statorem a rotorem lze v takovém případě vyjádřit jako

$$T_q = | \mathbf{B}_{stat} | | \mathbf{B}_{rot} | \sin \theta \quad (4.4)$$

kde θ je úhel mezi těmito vektory.

Z rovnice 4.3 a 4.4 je zřejmé, že množství a směr procházejícího proudu cívkou ovlivňuje statorové magnetické pole a tím i směr a velikost točivého momentu motoru. Tento směr a velikost je možné regulovat pomocí řídicího obvodu.

4.2 Řídicí obvod

Řídicí obvod se skládá ze dvou částí. Jedna část zajišťuje tok elektrické energie do motoru a druhá část tento tok řídí. Obě tyto části jsou navrženy dle požadavků aplikace a mohou se lišit v závislosti na typu zdroje napětí a použitých metod řízení.

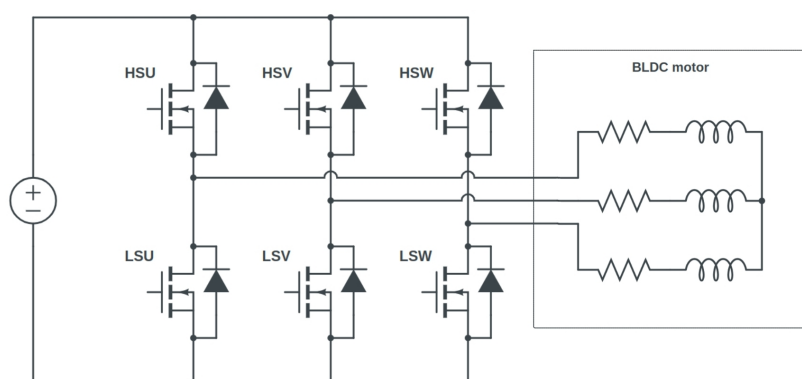
Pro BLDC motory je typické použití stejnosměrného zdroje napětí. Hlavními komponentami řídicího obvodu je elektronický komutátor a mikrokontrolér. Komutátor zajišťuje tok elektrického proudu do motoru a mikrokontrolér toto množství reguluje.

² Magnetická indukce je veličina vyjadřující magnetické pole v daném bodě prostoru a je definována jako $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$.

4.3 Elektronický komutátor

Elektronický komutátor je sestaven z tzv. půlmůsteků, přičemž každý půlmůstek se skládá ze dvou spínačů³. Pro tyto účely spínání se dle potřeb využívají tranzistory typu MOSFET nebo IGBT. Každý půlmůstek je připojen k jedné fázi motoru, což umožňuje buď přivedení napětí zdroje na danou fázi, nebo její uzemnění. Tímto způsobem lze přesně řídit tok proudu a směr otáčení motoru.

Tranzistory spínající napětí zdroje jsou označeny HS (high side) a tranzistory spínající zem jsou označeny jako LS (low side). Jednotlivé fáze motoru jsou označeny U, V a W. Kombinace těchto dvou označení pak tvoří označení pro jednotlivé tranzistory. Toto označení není unifikováno, ale v této práci bude použito i v dalších kapitolách.



Obrázek 4.3. Řídící můstek třífázového BLDC motoru

Pro ochranu tranzistorů před zpětnými proudy z motoru jsou tranzistory osazeny paralelními diodami, které umožňují bezpečné odvádění přebytečné energie z motoru.

Elektronický komutátor bývá nejčastěji integrovaný již v řídicím obvodu společně s ochrannými obvody a mikrokontrolerem generující signály pro spínání jednotlivých tranzistorů. Řídící obvod pak bývá označován jako ESC⁴.

³ V případě použití jednoho spínače jsou řídicí metody i výkonnost motoru výrazně omezeny.

⁴ Electronic Speed Controller

Kapitola 5

Metody řízení BLDC motorů

Tato kapitola se zabývá popisem základních algoritmů pro řízení BLDC motorů. Jsou popsány metody six-step, sinusoidální řízení a FOC (Field Oriented Control).

V kapitole jsou také popsány senzorové a bezsenzorové metody pro určení polohy rotoru motoru, které jsou nezbytné pro správný chod řídicích algoritmů. Popsané metody jsou zvoleny na základě relevantnosti využití v řídicí metodě six-step, které se tato práce zabývá.

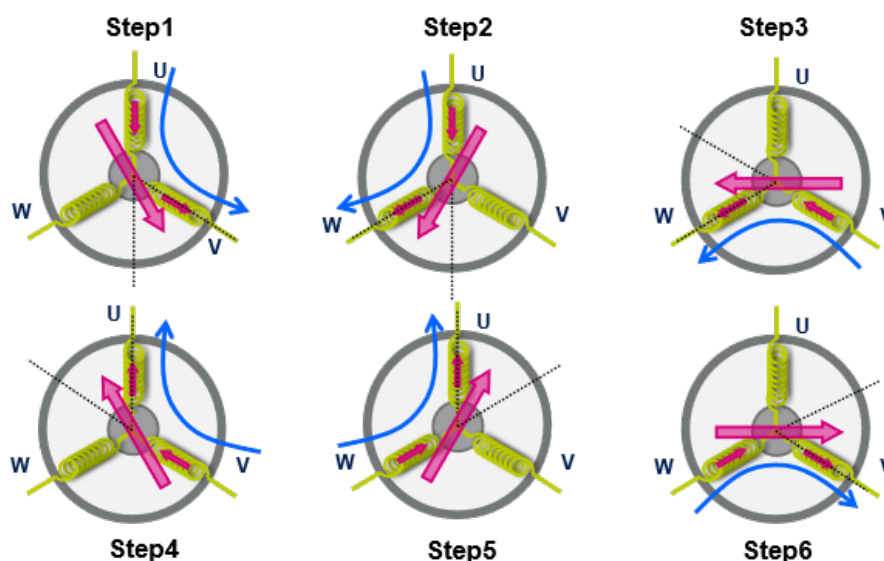
5.1 Základní myšlenka řízení BLDC motoru

Aby BLDC motor dosáhl maximální účinnosti, je klíčové řídit tok proudu do motoru tak, aby magnetické pole statoru bylo vždy kolmé k magnetickému poli rotoru. Tímto způsobem lze dosáhnout nejvyššího možného točivého momentu motoru při minimální vynaložené energii.

Řídicí metody se tak snaží tuto vzájemnou polohu polí udržovat kolmou a regulací proudu následně dosáhnout požadovaného točivého momentu pro dosažení požadovaných otáček motoru.

5.2 Six-step

V rámci algoritmu six-step je na jednu fázi motoru přivedeno kladné napětí zdroje a jedna fáze je uzemněna. Během jedné rotace motoru tak dochází k šesti možným kombinacím spínání, které tvoří šestistupňový cyklus. Pomocí těchto šesti kombinací lze vytvořit šest možných statorových magnetických polí s rozdílnou orientací 60° .



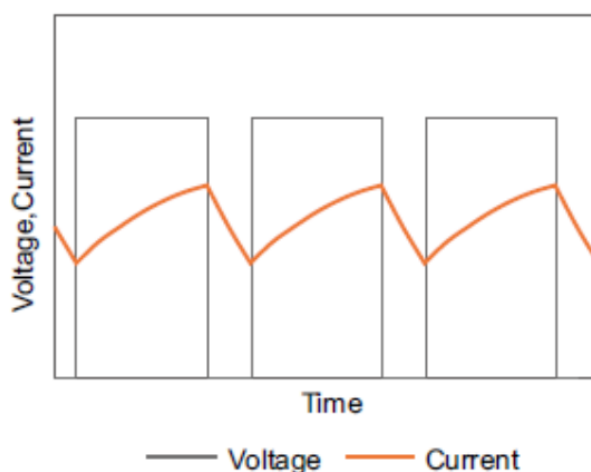
Obrázek 5.1. Jednotlivé kroky six-step řízení

Jednotlivé spínací sekvence jsou voleny tak, aby vytvořené statorové magnetické pole svíralo s magnetickým polem rotoru nejkolmější možný úhel.

Kolmost statorových a rotorových polí nastává pouze v jedné poloze během dané sekvence. Z tohoto důvodu je u six-stepu přítomný tzv. torque ripple, tedy kolísání točivého momentu motoru.

Přepnutí jednotlivých spínacích sekvencí je řízeno na základě informace o poloze rotoru. V momentě, kdy je statorové a magnetické pole vychýleno o méně jak 30° , je ideální provést přepnutí na další spínací sekvenci.

Pro regulaci otáček motoru je nezbytné regulovat množství proudu procházející motorem. Tato regulace se provádí prostým spínáním a rozpínáním přívodu napětí na dané fáze a indukčnost cívky poskytuje postupný útlum proudu procházející motorem. Magnetické pole tak při dostatečně rychlém spínání nabývá proměnné intenzity a lze tak tek regulovat točivý moment motoru.



Obrázek 5.2. Průběh proudu v čase na cívce s dostatečně rychlým spínáním

Metody regulace proudu se dělí na proudový a napěťový režim.

■ 5.2.1 Napěťový režim

Napěťový režim umožňuje nepřímé řízení proudu do motoru pomocí regulace střední hodnoty napětí přivedeného na motor. To lze implementovat pomocí pulzně šířkové modulace (PWM), která spíná napěťové tranzistory komutátoru. Při požadavku na zvýšení otáček se zvýší duty cycle PWM a tím i střední hodnota napětí na motoru. To má poté za následek zvýšení proudu.

■ 5.2.2 Proudový režim

Proudový režim je založen na porovnávání referenční hodnoty proudu s aktuálním proudem procházejícím motorem. Množství proudu procházející motorem se zjišťuje měřením úbytku napětí na známém rezistoru, který je umístěn za low side tranzistory.

Pokud je referenční hodnota nižší než aktuální hodnota proudu, high side tranzistory odpojí motor po dostatečnou dobu od zdroje napětí.

Z důvodu výpočetní náročnosti a zpoždění měření se proudový režim implementuje analogově.

5.3 Sinusoidální řízení

TODO - princip (sinusové napětí na všech fázích -> menší torque ripple, stejné jak u FOC) - výhody (menší hluk) - nevýhody (ztráty v přepínání fází, horší dynamika, menší maximální rychlost)

5.4 FOC

- výhody (největší výkon, nejmenší hluk, best torque ripple, maximum motor efficiency)
- účinnost až 97 % - nevýhody - switching losses, výpočetní náročnost - DTC - SVPWM
- Space Vector Modulation - Direct Torque Control - Field Oriented

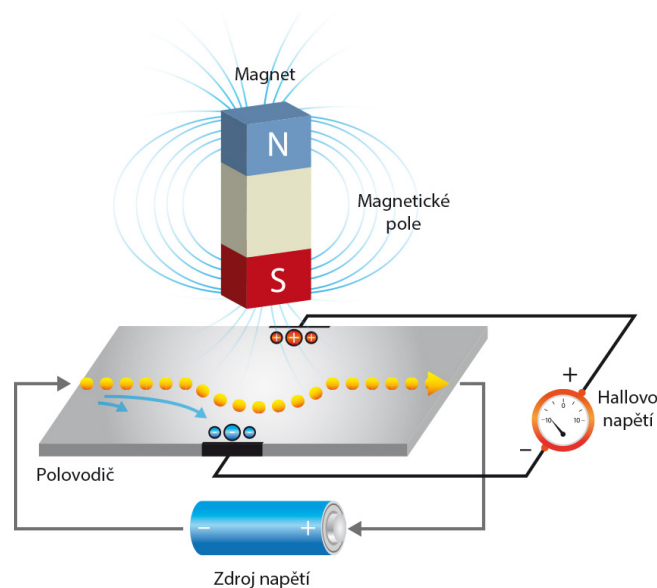
5.5 Porovnání metod

5.6 Senzorové metody určení polohy rotoru

Senzorové metody pro určení polohy rotoru využívají fyzikální jevy k získání informací o poloze. Nejpoužívanějšími senzory jsou hallové sondy, enkodéry a resolvery, z nichž každý má své specifické výhody a oblasti použití. Tyto senzory se vyznačují spolehlivostí a přesností, které si zachovávají i při nízkých nebo nulových otáčkách. Z pohledu řízení motoru algoritmem typu six step je však nejvýhodnější použití hallových sond.

5.6.1 Hallova sonda

Hallova sonda je senzor využívající Hallova jevu k detekci magnetického pole. Základním prvkem hallové sondy je polovodičová destička, kterou prochází proud elektronů. Magnetické pole tyto elektrony vychyluje z přímé trajektorie a lze tak naměřit rozdíl potenciálu na stranách této destičky. Výstupní napětí je však velmi malé a musí být zesíleno zesilovačem.



Obrázek 5.3. Hallova sonda

Pro detekci polohy v BLDC motorech se nejčastěji využívají hallové sondy s digitálním výstupem. Tedy sondy, které mají výstupní hodnotu 0 V, nebo hodnotu Vcc. Za tímto účelem mají hallové sondy zabudovaný schmittův trigger, který zajišťuje přepínání výstupní hodnoty dle magnetického pole působícího na hallovou sondu.

Tyto sondy bývají umístěny na statoru motoru a sledují pohyb rotoru. V závislosti na počtu fází motoru je třeba použít jednu, nebo více hallových sond. Pro třífázový motor se používají tři hallové sondy, které jsou umístěny ve 120° úhlu.

Hallové sondy nedokáží určit přesnou polohu rotoru, ale při použití metody six-step poskytují informaci k přepnutí komutace.

5.7 Bezsenzorové metody určení polohy rotoru

Určení polohy rotoru bez použití senzorů využívá měření zpětného indukovaného napětí na fázích motoru. Pro určení polohy na základě tohoto napětí existuje několik metod, které se liší přesností a náročností na výpočetní výkon.

Nejjednodušším a nejpoužívanějším způsobem pro určení polohy rotoru je metoda zero-crossing detection, která je bezsenzorovou alternativou hallových sond.

Další metody využívají kromě naměřeného zpětného indukovaného napětí i znalosti parametrů motoru. Na základě těchto znalostí je možné určit polohu rotoru s větší přesností. Mezi tyto metody patří analýza fázových proudů, Luenberger Observer, Kalmanův filtr a odhady polohy pomocí strojového učení.

5.7.1 Zero-Crossing Detection

Tato metoda patří mezi nejjednodušší a nejběžnější metody pro určení polohy bez použití senzoru. Dále je také ideální alternativou k hallovým sondám, neboť stejně jako hallové sondy detekuje polohu rotoru pouze při průchodu známým úhlem.

Průběh zpětného indukovaného napětí je děj střídavý a při použití BLDC motoru s vinutím zapojeným do hvězdy a řízením typu six-step je možné na plavoucí fázi motoru toto napětí měřit. Právě průchod nulovou hodnotou tohoto napětí se detekuje a bývá označován jako zero-crossing detection.

K tomuto ději dochází při vzniku kolmosti mezi statorovým a rotorovým magnetickým polem a je tak nutné odhadnout dobu, za kterou se rotor nalezne v bodě pro provedení komutace.

Při nízkých či nulových otáčkách je zpětné indukované napětí velmi slabé a nelze této metody využít.