

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Bakalářská práce

**Bezkartáčový stejnosměrný trakční motor 13 kW
s permanentními magnety**

Jaroslav Plešinger

Vedoucí projektu: Ing. Karel Buhr, CSc. – FEL ČVUT v Praze

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Jaroslav Plešinger

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Bezkartáčový stejnosměrný trakční motor 13 kW s permanentními magnety**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s SW prostředím Maxwell 3D.
2. Pomocí expertního modulu RMXprt navrhnete alternativní provedení stroje.
3. Proveďte simulace funkce stroje v SW prostředí Maxwell 3D.
4. Analyzujte shromážděná data.

Seznam odborné literatury:

- [1] Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcová V., Design of Rotating Electrical Machines, Wiley 2013
- [2] Gieras J., F., Permanent Magnet Motor Technology, CRC Press, 2010
- [3] Manuály ANSYS Academic Research EM, Maxwell 3D

Vedoucí: Ing. Karel Buhr, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 10. 2014

Prohlášení

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

.....
Jméno Příjmení

Poděkování

Děkuji Ing. Karlu Buhrovi, CSc. za vedení mé bakalářské práce a za poskytnutí kanceláře se softwarem potřebným k provádění návrhu a výpočtů.

Klíčová slova

Bezkartáčový stejnosměrný motor s permanentními magnety, asynchronní motor, Maxwell3D, elektromagnetické pole, ČVUT, FEL

Keywords

Brushless DC permanent magnet motor, asynchronous motor, Maxwell3D, electromagnetic field, ČVUT, FEL

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout bezkartáčový stejnosměrný trakční motor 13 kW s permanentními magnety jako alternativu k asynchronnímu motoru stejného výkonu, provést simulaci funkce stroje, analyzovat vypočtená data. K danému účelu měl být použit program Maxwell3D od společnosti Ansoft. Návrh byl proveden úpravou rotoru asynchronního motoru dle skript [4], protože bakalářský studijní plán nezahrnuje problematiku návrhu točivých strojů. Úprava rotoru byla provedena záměnou klecového vinutí za rotor s permanentními magnety. Statorová konstrukce zůstala stejná. Následně byly porovnány parametry navržených motorů a provedeny simulace funkce stroje v programu Maxwell3D.

Abstract

The Objective of this bachelor's degree project was propose the brushless DC traction motor 13 kW with permanent magnets as an alternative to the induction machine same power, simulate behaviour of a machine, analyze calculated data. On purpose should be used program Maxwell3D from the company Ansoft. Design was made as change rotor of the induction machine according to script [4], because bachelor's studying plan doesn't include information about design of rotating machines. Adjustment of the rotor was made as substitution of cage winding for rotor with permanent magnets. The stator structure remains the same. Then the data of design motors were compared and the simulation of function machine was made in program Maxwell3D.

Obsah

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Úvod | 12 |
| 1.1 | Historie a vývoj bezkartáčových motorů..... | 12 |
| 1.2 | Princip činnosti bezkartáčových stejnosměrných motorů | 15 |
| 1.3 | Feromagnetismus..... | 17 |
| 1.4 | Permanentní magnety | 20 |
| 1.5 | Materiály používané na permanentní magnety..... | 21 |
| 1.6 | Vliv teploty na vlastnosti permanentních magnetů..... | 23 |
| 1.7 | Magnetizace permanentních magnetů..... | 23 |
| 2 | Seznámení se softwarem Maxwell3D | 24 |
| 2.1 | Slovo úvodem o Maxwell3D..... | 24 |
| 2.2 | Orientace v programovém prostředí Maxwell3D | 25 |
| 2.3 | Návrhové prostředí RMXprt | 27 |
| 3 | Návrh alternativního provedení stroje pomocí modulu RMXprt | 28 |
| 3.1 | Návrh provedení stroje | 28 |
| 3.2 | Návrh - Machine..... | 29 |
| 3.3 | Návrh - Rotor..... | 30 |
| 3.4 | Návrh - Stator a vinutí | 32 |
| 3.5 | Návrh - Buzení | 33 |
| 3.6 | Návrh - Nastavení analýzy..... | 34 |
| 3.7 | Analýza, výsledky | 34 |
| 4 | Simulace funkce stroje v softwarovém prostředí Maxwell3D | 36 |
| 4.1 | Odvození 3D modelu z RMXprt | 36 |
| 4.2 | Nastavení - Čas výpočtu | 37 |
| 4.3 | Nastavení - Okrajové podmínky | 39 |
| 4.4 | Výsledky | 41 |
| 5 | Analýza shromážděných dat | 43 |
| 5.1 | RMXprt | 43 |

| | | |
|-----|--|----|
| 5.2 | Maxwell3D - modely motorů | 47 |
| 5.3 | Maxwell3D - Magnetické pole motoru | 48 |
| | Závěr..... | 50 |
| | Literatura..... | 51 |
| | Přílohy | 52 |
| | Příloha A - Design sheet (IM) | 52 |
| | Příloha B - Design sheet (BLDC)..... | 58 |
| | Příloha C - Grafy (IM)..... | 63 |
| | Příloha D - Grafy (BLDC) | 69 |
| | Příloha E - External circuit | 73 |
| | Příloha F - Datasheet NdFeB | 74 |

Použité zkratky

| | |
|--------------|---------------------------------------|
| $(BH)_{MAX}$ | Maximální energetický součin |
| μ | Permeabilita |
| μ_0 | Permeabilita vakua |
| μ_r | Relativní permeabilita |
| B | Indukce magnetického pole |
| BLDC | Bezkartáčový stelnosměrný motor |
| B_r | Remanentní magnetická indukce |
| dS | Nekonečně malý průřez |
| D_x | Dioda _x |
| FT | Fototranzistor |
| GTO | Gate Turn Off |
| H | Intenzita magnetického pole |
| H_c | Koercitivní síla/magnetická intenzita |
| I | Elektrický proud |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor |
| IM | Induction Motor/Asynchronní Motor |
| m | Magnetický dipólový moment |
| M | Magnetizace |
| MKP | Metoda Konečných Prvků |
| PM | Permanentní magnet |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| S_x | Spínač _x |
| T_c | Curieova teplota |
| T_x | Tranzistor _x |
| T_z | Teplota metalurgické změny materiálu |
| W_x | Vinutí _x |
| X | Susceptibilita |
| ΔV | Změna objemu |

Poznámka - index "x" označuje číslo určité součástky

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1. 1 Vývoj BLDC - zdroj [4] | 14 |
| Obr. 1. 2 Přechod z komutátoru na spínače / tranzistory - zdroj [4] | 15 |
| Obr. 1. 3 Snímání polohy rotoru pomocí fototranzistorů - zdroj [4]..... | 16 |
| Obr. 1. 4 Princip Hallovy sondy - zdroj [4]..... | 16 |
| Obr. 1. 5 Snímání polohy rotoru pomocí Hallovy sondy - zdroj [4]..... | 17 |
| Obr. 1. 6 Feromag. materiály (BH graf) - zdroj [4] | 19 |
| Obr. 1. 7 Curieova teplota - zdroj [4] | 19 |
| Obr. 1. 8 Hysterezní smyčka - zdroj [4] | 20 |
| Obr. 1. 9 Hysterezní smyčka (I. a II. kvadrant) - zdroj [4]..... | 21 |
| Obr. 1. 10 Srovnání permanentních magnetů z BH hlediska - zdroj [4]..... | 22 |
| Obr. 2. 1 Vývojový diagram výpočtu pole | 24 |
| Obr. 2. 2 GUI Maxwell3D..... | 25 |
| Obr. 3. 2 Seznam strojů RMxprt..... | 28 |
| Obr. 3. 1 Moduly | 28 |
| Obr. 3. 3 Menu projektu | 28 |
| Obr. 3. 4 Machine..... | 29 |
| Obr. 3. 5 Řídící obvod Y3 | 30 |
| Obr. 3. 6 Rotor..... | 30 |
| Obr. 3. 8 Pole..... | 31 |
| Obr. 3. 7 Pole type 5..... | 31 |
| Obr. 3. 9 Stator..... | 32 |
| Obr. 3. 11 Rozměry drážky | 32 |
| Obr. 3. 10 Slot type | 32 |
| Obr. 3. 12 vinutí statoru..... | 33 |
| Obr. 3. 13 Circuit | 33 |
| Obr. 3. 14 Analysis data | 34 |

| | |
|--|----|
| Obr. 3. 16 Úspěšná validace..... | 34 |
| Obr. 3. 15 Panel nástrojů | 34 |
| Obr. 4. 3 2D model BLDC..... | 36 |
| Obr. 4. 2 3D model BLDC..... | 36 |
| Obr. 4. 1 Tvorba 3D/2D modelu..... | 36 |
| Obr. 4. 4 Solve setup | 37 |
| Obr. 4. 6 Úspěšná validace..... | 38 |
| Obr. 4. 5 Save Fields..... | 38 |
| obr. 4. 7 Boundaries..... | 39 |
| Obr. 4. 8 Vytvoření fáze | 39 |
| Obr. 4. 9 Návrh fáze | 40 |
| Obr. 4. 10 Zobrazení pole..... | 41 |
| Obr. 4. 11 Zobrazení pole - objekty..... | 41 |
| Obr. 4. 12 Cesta ke grafu..... | 42 |
| Obr. 5. 3 Vinutí statoru | 43 |
| Obr. 5. 2 BLDC motor | 43 |
| Obr. 5. 1 Asynchronní motor..... | 43 |
| Obr. 5. 4 graf momentu v závislosti na rychlosti..... | 44 |
| Obr. 5. 5 graf výstupního výkonu v závislosti na rychlosti | 45 |
| Obr. 5. 6 graf účinnosti v závislosti na rychlosti..... | 45 |
| Obr. 5. 7 graf vstupního proudu v závislosti na rychlosti..... | 46 |
| Obr. 5. 5 BLDC motor | 47 |
| Obr. 5. 4 Asynchronní motor..... | 47 |
| Obr. 5. 6 Klec Asynchronního motoru; Rotor s hřídelí asynchronního motoru;Rotor BLDC motoru..... | 47 |
| Obr. 5. 8 Vektory magnetické indukce BLDC motoru | 48 |
| Obr. 5. 7 Pole magnetické indukce BLDC motoru | 48 |
| Obr. 5. 9 Siločáry magnetické indukce BLDC motoru | 49 |

1 Úvod

V této kapitole čerpám informace především z uvedené literatury [5].

1.1 Historie a vývoj bezkartáčových motorů

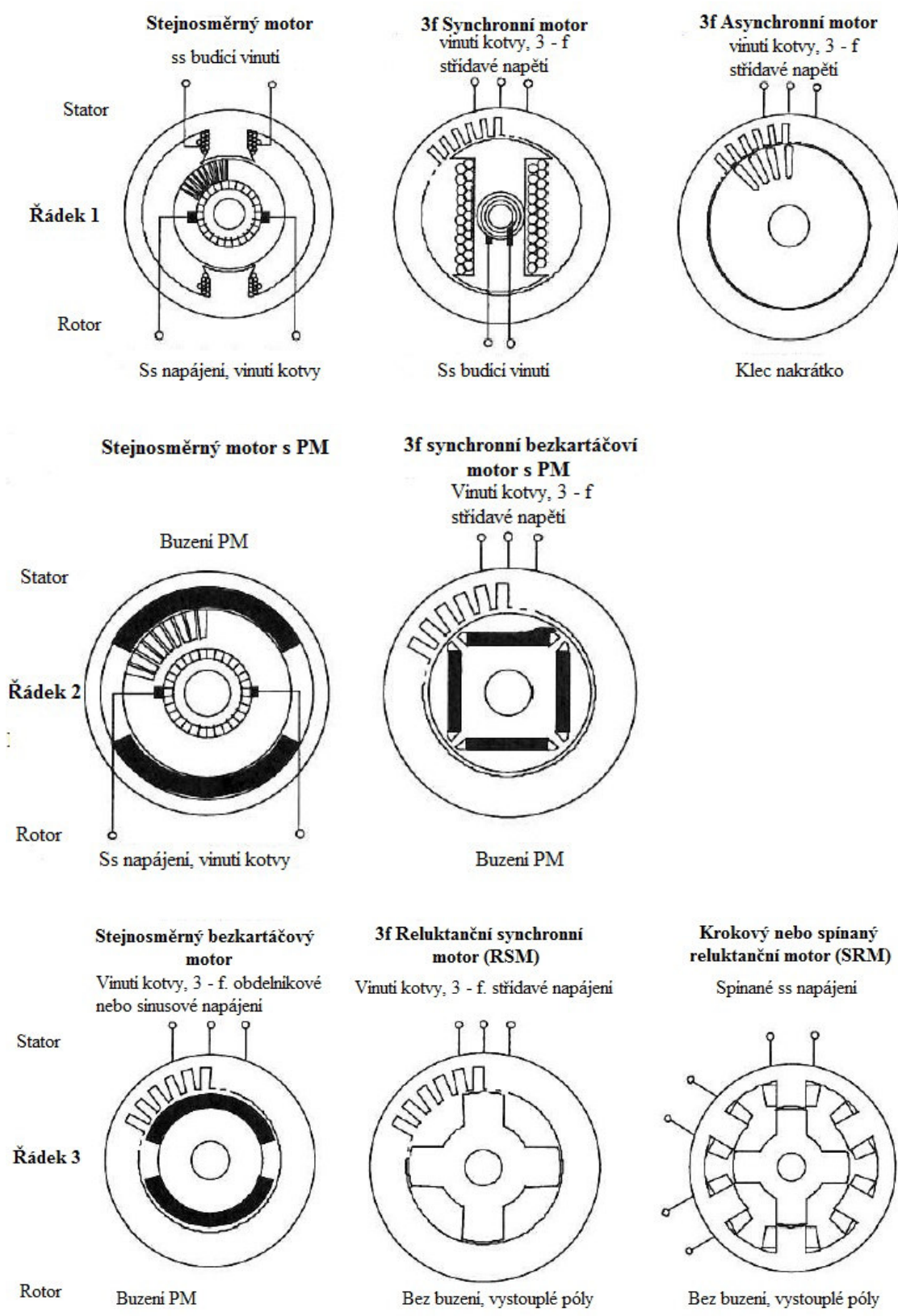
Stejnoseměrné motory jsou poměrně velkou skupinou v pohonařské praxi a díky svým vlastnostem jsou pro určité aplikace daleko lepší než motory střídavé. Nic se ale neobejde bez problémů a hlavní nevýhodou stejnosměrných motorů jsou komutátor a kartáče. Principem komutátoru, jiskřením a podobnými věcmi se zde nebudeme zabývat, ale je jasné, že je komutátor problémovou částí, poněvadž je to nejen nejvíce mechanicky namáhaná část stejnosměrného motoru, ale je také technologicky nejnáročnější a nejdražší na výrobu. Dále kartáče, které doléhají na komutátor, jsou "obrušovány" a je potřeba je čas od času vyměnit. Tyto a řada dalších problémů vedly ke konstrukci nového typu motoru, v němž je buzení nahrazené permanentními magnety a komutace je zajištěna elektronicky, a to bezkartáčový motor.

Pro vysvětlení vývoje bezkartáčových motorů je třeba se podívat na obrázek 1. 1. V prvním řádku jsou zobrazeny tři motory. První je stejnosměrný motor s budícím vinutím na statoru, komutátorem na rotoru a kartáči, které doléhají na lamely komutátoru. Další dva jsou střídavé motory synchronní s budícím vinutím na rotoru, kde stejnosměrné napájení je zajištěno přes kluzné kroužky a kartáče. Poslední motor v prvním řádku je asynchronní (někdy též indukční) s kotvou nakrátko. Z těchto tří motorů se dá v podstatě za bezkartáčový označit pouze asynchronní motor s kotvou nakrátko, i když to má trochu jiný význam slov. V řádku č. 2 vidíme, jak se postupně vyvíjely první dva motory z řádku č. 1. Změna je v systému buzení. Stejnoseměrný motor má nahrazeno statorové buzení permanentními magnety a synchronní motor má permanentní magnety na rotoru. Tato změna přináší menší rozměry motorů, ale na úkor ztráty regulace buzení. Díky permanentním magnetům na rotoru synchronního motoru se dá říct, že tento motor je bezkartáčový. Abychom mohli i o stejnosměrném motoru říci, že je bezkartáčový, musíme změnit konstrukční uspořádání tím způsobem, že prohodíme rotor a stator. Touto záměnou vznikne bezkartáčový stejnosměrný motor s buzením pomocí permanentních magnetů na rotoru a s vinutím kotvy na statoru (první v třetím řádku). Při porovnání se synchronním motorem zjistíme, že jsou si tyto dva motory dosti podobné. Stejnoseměrný motor má také na statoru jen tři fáze tvořeny třemi cívkami. Oproti tomu kotva klasického stejnosměrného motoru má velké množství cívek (fází) a každá z nich je připojena na komutátor. Dále je třeba dodat, že bezkartáčový stejnosměrný motor nemůže pracovat bez

měníče neboli elektrického komutátoru. Ten střídavě připojuje každý ze třech vodičů statorových cívek na kladný a záporný pól zdroje tak, jako to dělaly kartáče.

Jen velmi okrajově se musíme zmínit o tom, že za bezkartáčové motory se mohou považovat i krokové motory a spínané reluktanční motory. Splňují podmínky, že nemají kartáče a jsou napájeny z polovodičového měniče připínáním a odpínáním proudu v jednotlivých fázích. Principem, funkcí se dále není třeba zabývat, protože tato práce je o stejnosměrných motorech s permanentními magnety.

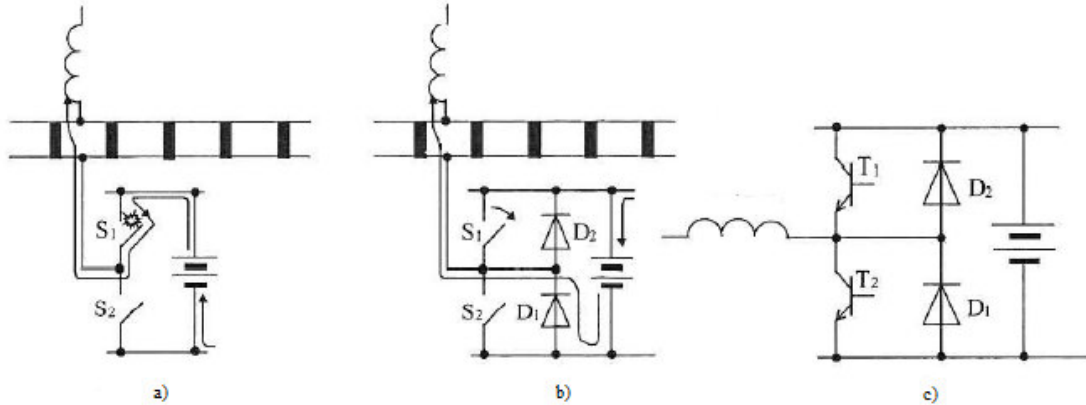
Je tedy zřejmé, že pojmem bezkartáčový motor se dá použít pro více druhů motorů. Zdaleka ne pro všechny, ale tento pojem značí určité charakteristické vlastnosti, jimiž se odlišují od klasických typů. Tuto podmínku splňuje pouze stejnosměrný a synchronní motor. Oba dva mají permanentní magnety na rotoru a trojfázové vinutí na statoru, které je napájené z polovodičového měniče. Ten je ovládán snímači polohy, jež do měniče posílají signály na spínání proudu tím způsobem, aby se nahradila funkce komutátoru a kartáčů, tj. udržet proud přesně kolmo na směr budícího magnetického pole. Toto je společné pro oba motory. Liší se ovšem tvarem magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Stejnosměrný motor má obdélníkový tvar magnetické indukce a synchronní motor má naopak sinusový tvar.



Obr. 1. 1 Vývoj BLDC - zdroj [4]

1.2 Princip činnosti bezkartáčových stejnosměrných motorů

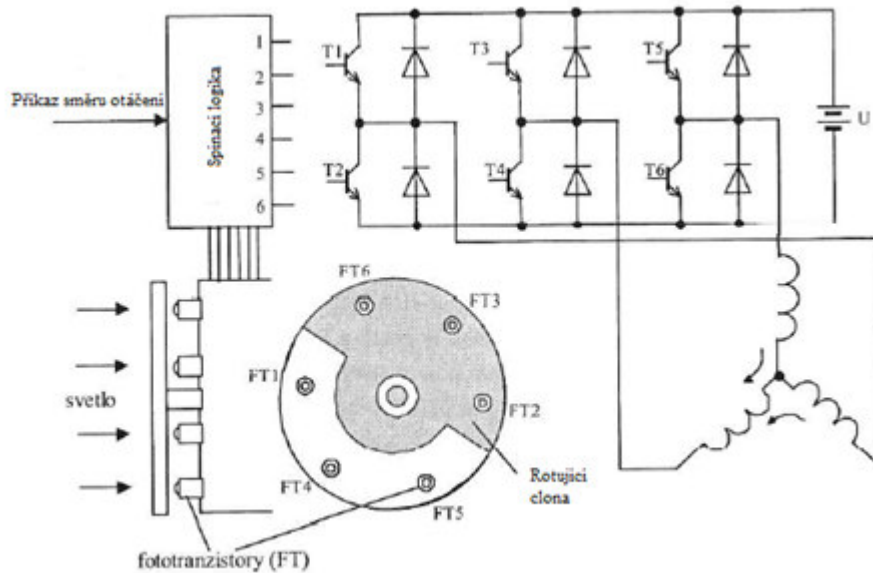
Jak je zmíněno v kapitole 1.1 BLDC, motory nemají kartáče a komutátor, což má své výhody i nevýhody. Nyní se však podíváme, jak se nahrazují kartáče a komutátor elektricky spínaným obvodem. Podívejme se nyní na jednoduchý model, který sestává z jedné lamely a



Obr. 1.2 Přechod z komutátoru na spínače / tranzistory - zdroj [4]

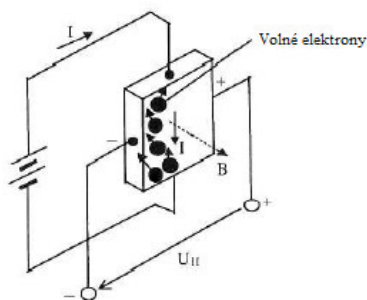
komutátoru s kartáčem. Poslední dvě části nyní nahradíme spínačem S1 a S2 (obrázek 1. 2a). Pokud se kartáč s kladnou polaritou dotýká lamely, na kterou je připojena cívka, musí být spínač S1 sepnutý a spínač S2 rozepnutý. Když se kartáč nebude dotýkat lamely spojené s cívkou, tak oba dva spínače jsou v rozepnutém stavu. Pokud se kartáč se zápornou polaritou dotýká lamely, která je spojena s cívkou, spínač S2 musí být sepnut a spínač S1 rozepnut. Na tomto principu tedy funguje přepínání vodičů, respektive takto se nahrazuje komutátor s kartáči za polovodičové spínací součástky. Vzhledem k tomu, že se zde zapínají a vypínají spínače, tak se může objevit jiskření, jež je v tomto případě nežádoucí. Jiskření by mohlo poškodit spínací součástky. Tento problém odstraníme připojením paralelních diod D1 a D2 (obrázek 1. 2b). Nicméně je jasné, že klasickým spínačem bychom těžko řídili přepínání vodičů. V praxi se pro přepínání vodičů běžně používají tranzistory nebo tyristory (konkrétně IGBT tranzistory nebo GTO tyristory). Nyní tedy nahradíme spínače S1, S2 za tranzistory T1, T2 (obrázek 1. 2c). Co se týče blokování výbojů pomocí diod, tak ty to zůstává i při použití tranzistorů. Z teoretického pohledu tedy potřebujeme na každou lamelu minimálně čtyři polovodičové součástky (dvě diody, dva tranzistory). Skutečnost je ale jiná, protože jednak další tyto prvky musíme zapojit sériově a paralelně, aby byly dobře napěťově a proudově dimenzované, a jednak je potřeba dalších součástek, aby byl zpracován signál od snímačů polohy. V poslední řadě je třeba říct, že skutečný počet lamel motoru je poměrně vysoký, aby měl motor hladký moment. Kdybychom měli dodržet tuto strukturu, tak by při elektrické komutaci bylo potřeba obrovské množství součástek, což by bylo zaprvé velmi nákladné a zadruhé prakticky nerealizovatelné z hlediska rozměrů. Toto je samozřejmě vyřešeno co

nejelegantněji a to zmenšením počtu lamel motoru, respektive počtu cívek na statoru. Nejmenší možný počet, se kterým může stejnosměrný motor fungovat, jsou tři, z čehož plyne, že na statoru jsou tři cívky - tři fáze vinutí.



Obr. 1. 3 Snímání polohy rotoru pomocí fototranzistorů - zdroj [4]

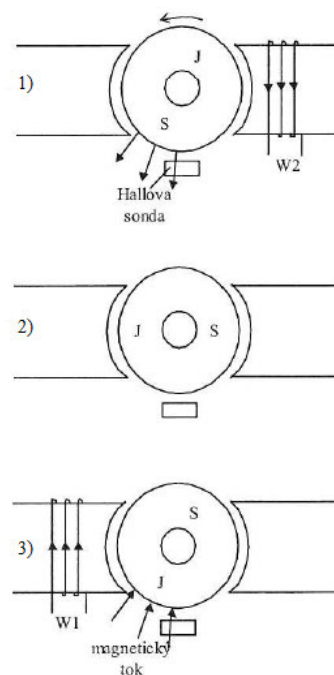
Abychom zajistili správnou funkci stroje, respektive správné spínání tranzistorů ve správnou chvíli (ve správné poloze rotoru), musíme zajistit jisté senzory, jež sledují polohu rotoru. Nejprve si popíšeme snímání pomocí fototranzistorů, které jsou vidět na obrázku 1. 3. Šest fototranzistorů (FT) je umístěno po obvodu rotoru z horního pohledu. Osvětlení příslušných fototranzistorů je zajištěno lampou, jež svítí na pohyblivou clonu. Díky cloně, která se otáčí s hřídelí motoru, je zajištěno, že v každém okamžiku jsou osvětlovány současně právě tři fototranzistory. Když budeme předpokládat, že osvětlené fototranzistory jsou sepnuté a zastíněné rozepnuté, tak ve stavu na obrázku 1. 3 jsou sepnuté tranzistory T1, T4, T5 a vypnuté jsou T2, T3, T6. Při otočení rotoru o 30° se tranzistor T5 vypne a T6 zapne a další otočení způsobí vypnutí T5 a zapnutí T3 a tak dále. Rotor se tedy točí ve směru hodinových ručiček. Pro reverzaci otáčení se nejčastěji používá změna osvětlovací logiky, což znamená, že osvětlené FT způsobí vypnutí tranzistoru T a zastíněné FT zapínají tranzistory T.



Obr. 1. 4 Princip Hallovy sondy - zdroj [4]

Další velmi často používanou metodou snímání polohy rotoru je použití Hallovy sondy. Hallova sonda je polovodičová součástka, jež snímá magnetický tok, pokud jí protéká proud I. Magnetický tok je vytvářen permanentním magnetem rotoru a Hallova sonda je připevněná přímo na rotor. Když sonda detekuje pole, jako je na obrázku 1. 4, tak podle pravidla levé ruky

(siločáry do dlaně, prsty směr proudu, palec směr pohybu) zjistím, že záporná polarita je na levé straně sondy a kladná polarita na pravé straně sondy. Zjištěním polarity výstupního indukovaného napětí na svorkách sondy se určuje severní pól magnetického pole. Magnetické pole se mění (střídá svou polaritu) vlivem otáčení rotoru, mění se i polarita výstupního napětí sondy. Na obrázku 1. 5 vidíme, jak souvisí snímání polohy s generováním spínacího impulsu. Hallova sonda je umístěná blízko rotoru z permanentního magnetu, dvoupólový BLDC má na obou pólech vinutí W1 a W2. V první poloze sonda snímá severní pól rotoru, takže proud protéká vinutím W2 a rotor se otáčí proti směru hodinových ručiček. V druhé poloze se rotor pohybuje pouze setrvačnou silou, protože Hallova sonda nesnímá žádné pole, a tudíž nedává signál k sepnutí tranzistoru, aby protékal proud statorovým vinutím. V poloze číslo 3 je jižní pól snímán sondou a proud teče vinutím W1, aby se přitáhnul severní pól a rotor se točil stejně jako předtím. Tady je jasně vidět nevýhoda použití Hallovy sondy. V tomto případě může nastat situace, že se rotor zastaví v poloze 2, kde je pohyb zajištěn pouze setrvačností. Pokud by se tak stalo, rotor se už neroztočí. Proto při použití Hallovy sondy používáme dvě a více sond nebo tři a více vinutí.



Obr. 1. 5 Snímání polohy rotoru pomocí Hallové sondy - zdroj [4]

BLDC motor má stejné vlastnosti jako normální stejnosměrný motor, to znamená, že moment je přímo úměrný napájecímu proudu, závislost rychlosti a momentu se dá nakreslit pro jednotlivé napětí jako sada paralelních rovných čar s klesajícím sklonem. Velikost napětí ovlivňuje jen polohu čar, nikoliv sklon. Rozdíl je tedy v tom, že komutací se u BLDC motorů myslí posloupnost spínání tranzistorů při určité poloze rotoru, aby protékal proud příslušným vinutím statoru. Při stejných rozměrech motorů jsou BLDC dražší než klasické stejnosměrné motory, mají vyšší výkon a pracují s vyšší účinností. Díky absenci kartáčů jsou spolehlivější a jejich nároky na údržbu jsou menší. Vzhledem k tomu, že při točení BLDC motor nejiskří, tak mohou pracovat i v nebezpečných prostředích.

1.3 Feromagnetismus

Cívka navinutá okolo jádra tvaru prstence vytváří tzv. toroid. Proud, který protéká v závitěch cívky, vytváří intenzitu magnetického pole H . Jádro toroidu je vytvořené z nějakého materiálu, tento materiál může být vzduch, vakuum nebo železo. Intenzita magnetického pole vytváří magnetickou indukci B podle toho, z jakého materiálu je jádro toroidu vytvořeno. Vztah

mezi magnetickou indukcí a intenzitou popisuje vztah (1). Jednotkou magnetické indukce je tesla (T) a magnetické intenzity ampér na metr (A/m). Zatím nezmíněnou veličinou je zde μ_0 , což je permeabilita vakua a její hodnota je rovna $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ H/m}$. Tato hodnota je běžně používaná i pro vzduch nebo neferomagnetické materiály, protože změna hodnoty je hodně malá.

$$B = \mu_0 * H \quad (1)$$

Když neferomagnetické jádro toroidu nahradíme například železem, což je feromagnetický materiál, a podíváme se nyní na velikost magnetického toku, zjistíme, že mnohonásobně narostl. Tento jev se nazývá právě feromagnetismus. Pro popis vlivu materiálu musíme dále zavést veličinu \mathbf{m} , což je dipólový moment, jež popisuje pohyb atomů v materiálu a platí pro něj vztah (2). Tento vztah nám říká, že pokud proud I protéká plochou, kterou reprezentuje vektor dS , vytváří magnetické pole, které je charakterizováno dipólovým momentem m .

$$m = I * dS \quad (2)$$

Jestliže víme, že existuje dipólový moment podle vztahu (2), tak můžeme nyní tvrdit, že tento moment nebudeme uvažovat v ploše dS , ale v objemu ΔV . Zavedeme další veličinu, která se nazývá magnetizace materiálu, označuje se \mathbf{M} a můžeme ji definovat jako objemovou hustotu dipólového momentu. Vypočítáme ji pomocí vztahu (3), který popisuje, že podíl dipólového momentu a hodně malé plochy ΔV je magnetizace. Jednotka magnetizace je stejná jako jednotka magnetické intenzity, a to A/m. Souvislost mezi B, M a H popisuje rovnice (4).

$$M = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{m}{\Delta V} \quad (3)$$

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 (H + M) \quad (4)$$

Magnetická indukce B se tedy skládá ze dvou složek. První složkou je intenzita magnetického pole a druhou složkou je příspěvek magnetizace materiálu M.

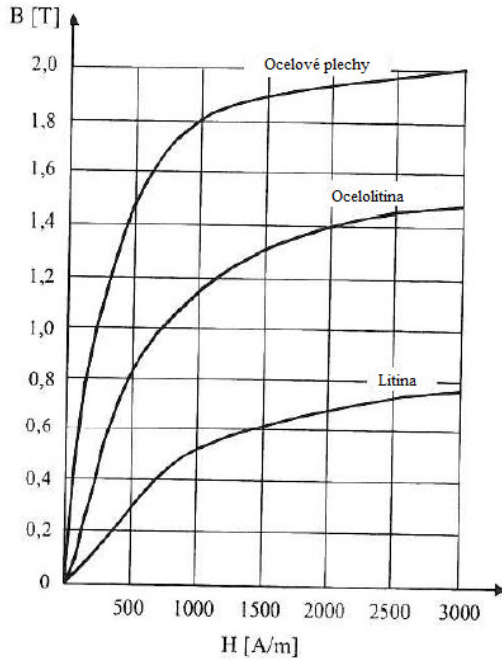
$$M = \chi H \quad (5)$$

Vztah mezi magnetickou intenzitou a magnetizací reprezentuje magnetická susceptibilita χ , kterou stanovíme vztahem (5). Magnetická susceptibilita zastupuje přímou úměrnost mezi M a H a reprezentuje změnu magnetických vlastností materiálu. Když nyní dáme dohromady rovnice (5) a (4), dostaneme vztah pro magnetickou indukci vyjádřenou pomocí relativní permeability (6).

$$B = \mu_0 H + \mu_0 X M = \mu_0 (1 + X) H = \mu_0 \mu_r H \quad (6)$$

Relativní permeabilita je koeficient, jenž popisuje prostředí, ve kterém se vytváří magnetické pole a kterým se znásobuje intenzita pole kvůli přítomnosti feromagnetického materiálu, tj. udává, kolikrát se zvětší permeabilita vlivem feromagnetické látky oproti vakuu.

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad ; \quad \mu_r = 1 + X \quad (7)$$



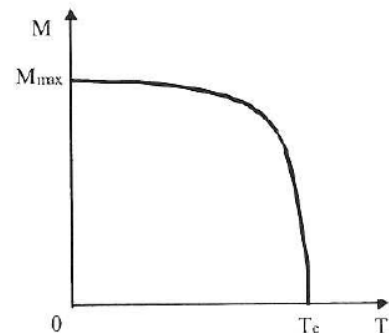
Obr. 1. 6 Feromag. materiály (BH graf) - zdroj [4]

Když se nyní podíváme na BH závislost, kterou vidíme na obrázku 1. 6, vidíme tři typy feromagnetických materiálů dosahující různých hodnot magnetické indukce a intenzity. Nyní porovnáme použití vzduchu, respektive vakua, s použitím například ocelových plechů. Hodnota $H = 1000 \text{ A/m}$, odpovídá hodnota magnetické indukce vakua:

$$B_0 = \mu_0 H = 4\pi * 10^{-7} * 1000 = 0.00125 \text{ T}$$

Pro ocelové plechy vyplývá z obrázku 1. 6, že při $H = 1000 \text{ A/m}$ je hodnota $B = 1.8 \text{ T}$. Z předchozích tvrzení plyne, že při použití feromagnetického materiálu dosahujeme mnohem větších hodnot magnetické indukce než za použití pouze vakua nebo neferomagnetického materiálu. Z tohoto důvodu se používají různé feromagnetické materiály.

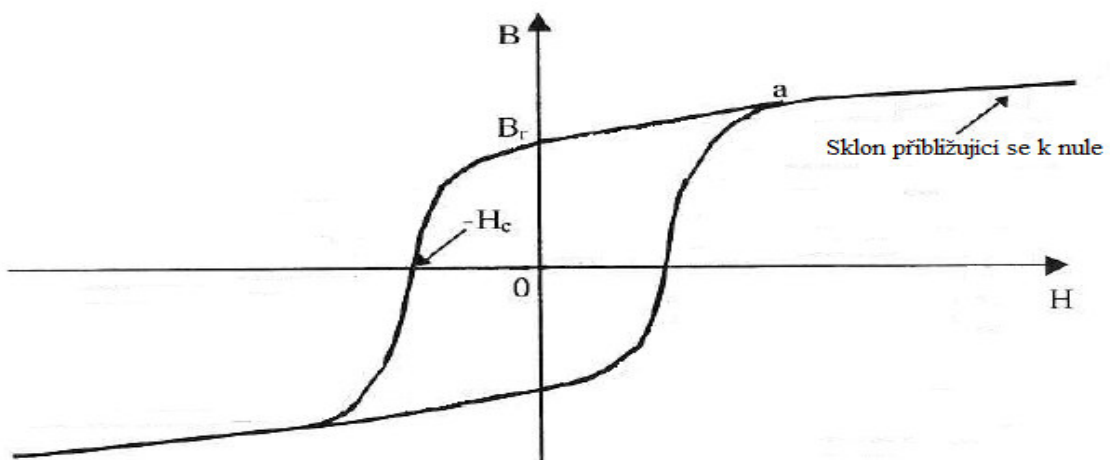
Další faktor, který může ovlivnit magnetické pole, je teplota. Se zvyšující se teplotou feromagnetického materiálu klesá jeho magnetizace podle obrázku 1. 7. Kritickým bodem na vodorovné ose je bod T_c , což je bod Curieovy teploty. Při překročení této teploty ztrácí feromagnetický materiál své vlastnosti. Například u železa je T_c zhruba $770 \text{ }^\circ\text{C}$, což je při pracovní teplotě motoru $150 \text{ }^\circ\text{C}$ zcela bez problému. Problém nastává u některých materiálů, jako jsou vzácné kovy, kde jejich T_c může být nižší, než je pokojová teplota.



Obr. 1. 7 Curieova teplota - zdroj [4]

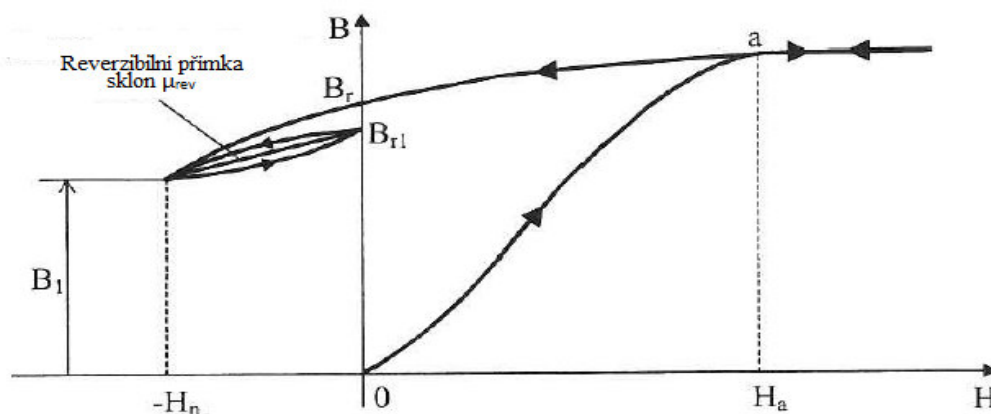
1.4 Permanentní magnety

Elektrické stroje jsou závislé na vytvoření magnetického toku ve vzduchové mezeře. Ten můžeme vytvořit například budícím vinutím, kterým protéká budící proud, což je elektromagnet. Další možností je použití permanentních magnetů, což je svým způsobem v mnoha ohledech lepší. Hlavní předností je, že není třeba budící vinutí a tím se značně omezí ztráty (přeměna elektrické nebo mechanické energie na teplo). Díky dnešním technologiím jsme schopni vyrobit permanentní magnety v dostatečné kvalitě, velikosti a tvarech, aby je bylo možno použít v průmyslových aplikacích. Permanentním magnetem máme na mysli feromagnetický materiál, jenž prošel celým procesem magnetizace od $H+$ do $H-$ a má určitou zbytkovou (remanentní) indukci B_r a koercitivitu H_c , případně energetický součinitel $(BH)_{MAX}$. Každý materiál má jiný permanentní magnetismus. Některé slitiny se různě upravují, a poté vykazují různou mechanickou tvrdost. Díky tomu můžeme magnety rozdělit na tvrdé a měkké. Nyní se podíváme na hysterezní smyčku, respektive první a druhý kvadrant. Typickou hysterezní smyčku vidíme na obrázku 1. 8, která nám udává, jaký vliv má vnější magnetické pole na magnetický materiál, jenž se nachází uvnitř tohoto pole. Nás bude především zajímat zmíněný první a druhý kvadrant, který nám dává informaci o magnetizaci a demagnetizaci, případně reverzibilní přímce.



Obr. 1. 8 Hysterezní smyčka - zdroj [4]

Když toroidní jádro z tvrdého magnetického materiálu ovineme cívkou, první kvadrant obrázku 1. 9 ukazuje křivku, kterou dostaneme při napájení cívky proudem hodnoty od nuly do hodnoty, jež odpovídá $H > H_a$, a potom klesá zpět do nuly. Když nyní na toto toroidní jádro přiložíme magnetické pole opačné intenzity H_n , magnetická indukce klesne na hodnotu B_1 . Když nyní odstraníme opačné pole H_n , magnetická indukce vzroste na hodnotu B_{r1} . Je tedy vidět, že opačné pole snížilo remanenci, respektive permanentní magnetismus jádra. Opětovné přiložení pole H_n sníží indukci do hodnoty B_1 . Tím se smyčka uzavře, tyto změny z B_1 do B_{r1} můžeme při velmi malých změnách B a H nahradit úsečkou, jež se nazývá se reverzibilní (vratná) permeabilita. Pokud je tedy materiál vystaven opačnému magnetickému poli o intenzitě $H < H_n$, můžeme prohlásit, že magnet je permanentní. Pokud ale na magnet působí $H > H_n$, magnetická indukce poklesne na B_1 a po odpojení opačného magnetického pole se hodnota indukce ustálí na hodnotě B_{r1} .



Obr. 1. 9 Hysterezní smyčka (I. a II. kvadrant) - zdroj [4]

1. 5 Materiály používané na permanentní magnety

Důležité veličiny, podle kterých posuzujeme kvalitu PM, jsou H_C , B_r a energetický součin $(BH)_{max}$. Koercitivní síla je intenzita magnetického pole potřebná k odmagnetování. Remanentní intenzita je zbytková hodnota intenzity, jež zůstane v materiálu i po ukončení magnetování. Existuje několik používaných materiálů, ale zde si popíšeme jen pár.

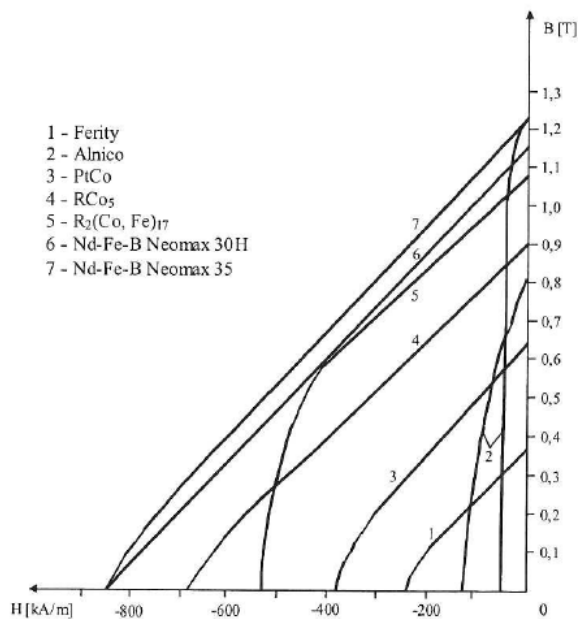
Zkratka Al Ni Co neboli slitina hliníku, niklu a kobaltu. Na začátku používání permanentních magnetů se používaly slitiny o různých množstvích použitých materiálů. Postupem času se přišlo na slitinu Alnico, která se vyznačuje remanentní indukci kolem 1.2 T, nízkou koercitivitou kolem 50kA/m a BH součinem 40 - 80 kJ/m³. Tvar demagnetizační křivky

má sklon $3 \mu_0$, což je velmi málo (ideální PM by měl mít sklon μ_0). Je třeba je stabilizovat a jejich mechanické vlastnosti nejsou ideální.

Feritové (keramické) materiály jsou další skupinou permanentních magnetů. Tyto PM dosahují nižší remanentní indukce, jsou schopné odolávat daleko větším demagnetizačním intenzitám díky vyšším hodnotám H_c (B_r okolo 0.38 T, H_c okolo 150 - 250 kA/m). Sklon demagnetizační křivky je asi $1.05 \mu_0$. Stabilizace feritového materiálu není nutná, protože reverzibilní přímka se téměř shoduje s demagnetizační křivkou.

Samarium - kobalt (Sm - Co) je slitina ze vzácných kovů. Tyto slitiny se vyskytují nejčastěji v poměru 1 : 5 nebo 2 : 17. Tato skupina spojuje výhody Alnico materiálů, což je poměrně vysoká remanentní indukce s feritovými materiály, jež vynikají vysokou koercitivitou ($B_r = 0.965$ T, $H_c = 720$ kA/m). Demagnetizační charakteristika má tvar přímky se sklonem $1.06 \mu_0$. Díky reverzibilní přímce prakticky totožné s demagnetizační křivkou ani tento materiál nepotřebuje stabilizovat. Jejich nevýhodou je značně vysoká cena, poněvadž vzácné kovy jsou drahé.

Neodym - železo - bor (NdFeB) je v poslední době často používaný materiál pro



Obr. 1. 10 Srovnání permanentních magnetů z BH hlediska - zdroj [4]

permanentní magnety. Při pokojové teplotě se tento materiál vyznačuje vysokou remanencí (kolem 1.2 T), vysokou koercitivou (kolem 800 kA/m) a nejvyšším součinem $(BH)_{MAX}$ ze všech komerčně vyráběných magnetů (kolem 250 kJ/m^3). Díky vysoké koercitivě je možné dosáhnout menších rozměrů magnetů oproti feritovým magnetům. Tento materiál je zároveň levnější než Sm - Co. Nevýhodou je teplotní omezení (pracovní teplota je kolem $100 \text{ }^\circ\text{C}$). Na obrázku 1. 10 je srovnání komerčně vyráběných permanentních magnetů z hlediska demagnetizační křivky.

1.6 Vliv teploty na vlastnosti permanentních magnetů

Když vystavíme materiál velmi vysokým teplotám na delší dobu, může se stát, že v materiálu nastanou metalurgické změny, jež zapříčiní horší schopnost zmagnetování materiálu, nebo se stane nemagnetickým. Důležité je vědět, že existuje vztah mezi teplotou, kdy dochází k metalurgickým změnám materiálu - T_z a Curieovou teplotou - T_c . Když bude $T_c < T_z$, poté je materiál, jenž byl vystaven teplotám nad T_c , po snížení teploty opět možné remagnetizovat na původní vlastnosti. Tato vlastnost je žádoucí ve chvíli, kdy je třeba demagnetizovat PM kvůli manipulaci s nimi. Toto platí například pro magnety ze vzácných kovů nebo pro Alnico slitiny. Dnes nejpoužívanějším materiálem je NdFeB, jehož nevýhoda je však nízká pracovní teplota. Jeho pracovní teplota se dá zvýšit přidáním kobaltu, avšak na úkor magnetických vlastností. Ke zlepšení H_c je třeba přidat vzácný kov (například terbium), což ale zvýší jeho cenu. Magnety NdFeB jsou dále choulostivé na korozi a prodávají se obvykle s obalem z niklu. Co se týče ostatních magnetů, z celkového množství vyrobených magnetů jsou asi 55 % ferity, 10 % Alnico slitiny a 35 % vzácné kovy. Je tedy jasné, že Alnico magnety jsou používané velmi málo. Výrobci motorů používají často feritové magnety pro běžné anebo laciné motory, pro nejkvalitnější motory se používají magnety z NdFeB.

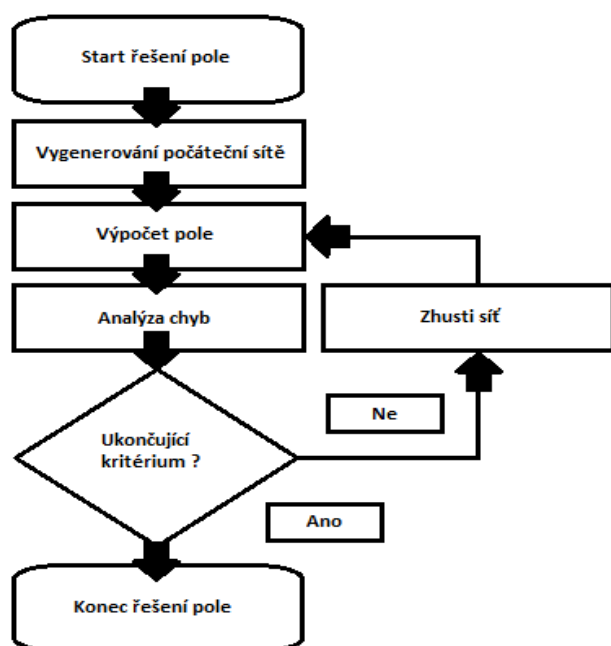
1.7 Magnetizace permanentních magnetů

Po výrobě je permanentní magnet v nezmagnetizovaném stavu. Před používáním se musí vystavit účinkům velmi silného vnějšího magnetického pole. Tento proces se nazývá zmagnetizování permanentního magnetu. Zmagnetování nastane prakticky okamžitě po přiložení dostatečně velkého magnetického pole na PM. Magnet nebo magnetický obvod, jenž je třeba zmagnetovat, se umístí do cívky, kterou proteče velmi silný impulz proudu. Tento proud je získán vybitím kondenzátorů přes cívku.

2 Seznámení se softwarem Maxwell3D

2.1 Slovo úvodem o Maxwell3D

Zdrojem pro tuto kapitolu byla literatura [2]. Maxwell3D je software, jenž pro řešení dané problematiky využívá metodu konečných prvků - MKP. V oblasti elektromagnetismu řeší problematiku elektrostatického a magnetostatického pole, pole vířivých proudů a problematiku časově proměnných magnetických polí. Software řeší problematiku elektromagnetického pole pomocí Maxwellových rovnic v definovaném, konečném prostoru. Uživatel zadá příslušné počáteční podmínky a okrajové podmínky, kterými je zajištěno podrobné a jedinečné řešení. Pomocí Maxwellu3D je možné řešit například elektrostatické pole, pole stejnosměrných proudů, časově proměnné elektrické pole, magnetostatické pole, pole vířivých proudů či časově proměnné magnetické pole. Metodou konečných prvků, kterou Maxwell3D používá k řešení pole, rozumíme v zjednodušení to, že řešení hledáme na základě soustavy algebraických rovnic. Tyto rovnice získáme diskretizováním geometrie řešeného objektu do malých prvků, což je provedeno pomocí "sítě" (mesh). Sestavení objektu je poté nazýváno metodou konečných prvků. Následujícím vývojovým diagramem (obrázek 1.1) si lépe



Obr. 2.1 Vývojový diagram výpočtu pole

a jednoduše popíšeme postup výpočtu pole objektu.

Program vytvoří podle zadaných počátečních a okrajových podmínek výpočetní síť, pomocí které diskretizuje počítaný objekt. Následně provede výpočet a analyzuje chyby. Pokud je výsledek dostatečně přesný, aby se dal objekt zpětně rekonstruovat, výpočet se ukončí. V případě, že výsledek není uspokojivý, program shustí síť pro diskretizaci a provede výpočet znova. Výpočty tedy mohou trvat opravdu dlouhou dobu a i přes relativně nízké

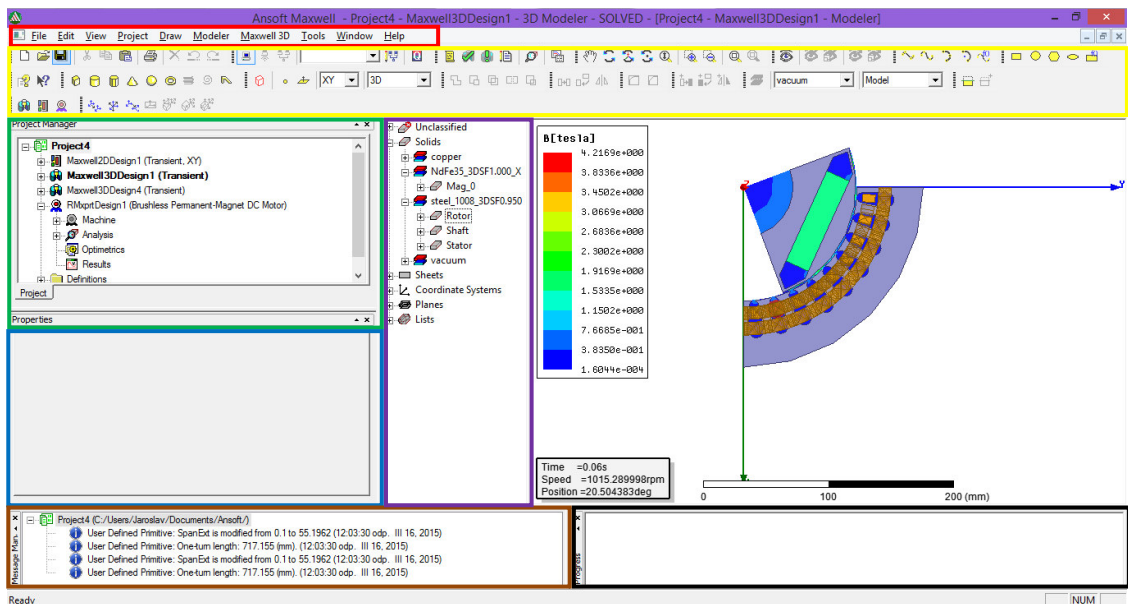
hardwarové nároky na provozování programu je lepší mít pro práci s Maxwellem3D výkonný workshop, kde je dostatečně silný procesor a větší množství operační paměti. Výkonný workshop sníží dobu výpočtu až o několik hodin.

2.2 Orientace v programovém prostředí Maxwell3D

Jak je již výše uvedeno, program Maxwell 3D umožňuje vypočítat pole na daném objektu, kterým se rozumí hodnoty zvolené veličiny v uzlových bodech sítě, jež je vytvořena nejen na vlastním objektu, ale i na definovaném okolí, přičemž lze využít zjednodušení dané symetrií. V této podkapitole se budeme zabývat popisem programového prostředí Maxwell 3D.

Abychom mohli v programu něco simulovat, je nejprve potřeba objekt navrhnout v modulu designer nebo importovat z jiného programu. Ohledně importu je Maxwell3D kompatibilní s řadou různých formátů (.sm2 .gds .sm3 .sat .step .iges .dxf .dwg .sld .geo .stl .prt .asm). Importem jsem se dále nezabýval, mým úkolem bylo navrhnout daný model prostřednictvím modulu RMxpert.

Nejprve si popíšeme grafické uživatelské prostředí (dále jen GUI), jež se může drobně lišit podle verze programu. Já jsem pracoval s verzí 16, která je nainstalovaná v počítačové učebně katedry E1 - 106 a na počítači u vedoucího práce.



Obr. 2. 2 GUI Maxwell3D

Jak vidíme výše na obrázku, GUI programu není úplně jednoduché, ale vývojáři se snažili uživateli zjednodušit orientaci v prostředí vhodnou volbou grafických textur jednotlivých tlačítek a kolonek. Pro lepší orientaci jsem ještě rozdělil důležitá místa prostředí barevnými tvary. Nyní ve stručnosti vysvětlím jednotlivá barevná pole.

První (červený) obdélník jsou menu, která jsou součástí snad všech programů. Menu File, Edit, View jsou klasická menu, jež umožňují zakládat a ukládat projekty, upravovat podle potřeby anebo zobrazovat příslušné osy a otáčet objektem. Projektové menu se stává z

možností výběru návrhového prostředí (3D, 2D RMXprt). Další tři menu (Draw, Modeler, Maxwell3D) jsou specifická pro 3D návrhové prostředí. Draw je menu, jež souží k návrhu pomocí palety 2D a 3D objektů nebo pomocí uživatelsky definovaných primitiv. Modeler slouží k importu/exportu objektu a také ke změně různých měřítek a pohledů objektu. Maxwell3D umožňuje nastavit hodnoty pro výpočet, získat výsledky nebo spustit výpočty.

Druhý (žlutý) obdélník je panel nástrojů, jenž si každý uživatel může sestavit podle sebe. Defaultně je nastaven tak, aby v něm byly důležité možnosti ze všech menu.

Třetí obdélník od vrchu (zelený) je menu celého projektu. Zde je pomocí stromové architektury zaznamenán celý projekt. Jsou zde zobrazena všechna návrhová prostředí a k nim jednotlivé parametry a nastavení. Díky tomu máme tedy možnost rychlé a snadné orientace mezi řešenými objekty.

Obdélník pod zeleným (modrý) je okno vlastností. V tomto okně jsou zobrazeny důležité vlastnosti označeného objektu. Zdůrazňuji důležité, protože zde se objevuje jen zlomek vlastností, které je možno nastavit. Všechny vlastnosti zobrazíme dvojklikem na daný řešený objekt ať už v menu projektu, nebo přímo na objekt.

Poslední levý obdélník (hnědý) je okno, kde se zobrazují zprávy. Program s námi prostřednictvím tohoto okna komunikuje. Píše zde informativní zprávy, ale také varování a chyby, které jsme při návrhu udělali.

Vpravo od hnědého obdélníku (černý) je okno procesů. Zde vidíme průběh testů a výpočtů. Bohužel zde chybí odhadovaný čas dokončení, ale program se stále vyvíjí a je možné, že v některé z dalších verzí tato informace bude.

Poslední (fialový) obdélník je okno, kde jsou různé části navrženého objektu. Jsou zde například materiály, jež jsou použity pro stroj, nebo třeba různé osové řezy. Pokud budeme v pozdější fázi chtít například zobrazit pole v ose XY, označíme si zde příslušný řez, ve kterém chceme pole zobrazit.

Neoznačený zbytek je okno Modeleru, kde vidíme a zároveň navrhujeme objekt. Veškeré úpravy, jež provedeme, se zobrazí v tomto okně. Podrobněji se k práci v tomto prostředí vrátím v některé z dalších kapitol, kde se budu zabývat nastavením parametrů pro výpočet magnetického pole mnou navrženého motoru.

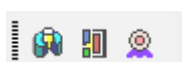
2.3 Návrhové prostředí RMxpert

Rotating machine expert (RMxpert) je návrhový modul programu Maxwell3D, který slouží k návrhu točivých elektrických strojů. Modul umožňuje poměrně slušnou škálu přednastavených šablon pro návrh motoru. Když tedy vybereme příslušný stroj, jež chceme navrhnout, program vytvoří v menu projektu složku s daným strojem. V této složce jsou poté specifické podadresáře podle typu navrhovaného stroje. Celý návrh stroje probíhá ve 2D, model se dá následně přenést i do 3D a provádět nad ním výpočty pole. RMxpert má mírně odlišné GUI od Maxwell3D a to v menu programu a panelu nástrojů. Menu Draw, Modeler, Maxwell3D jsou zde nahrazena dvěma jinými menu, a to Machine a RMxpert. Machine je spjato s vinutím a RMxpert je obdoba menu Maxwell3D. V tomto menu nastavujeme podmínky, spouštíme testy a analýzy, ale také můžeme zobrazit výsledky. Výstupem z RMxpertu může být velké množství grafů, ale i výpis hodnot, jež jsou pro navržený stroj programem vypočítány. Tento modul programu je velice užitečný a ještě se blíže podíváme na návrh motoru v další kapitole, kde popíšeme postup návrhu BLDC motoru. Dále vytvořím 3D model do Maxwellu3D a pomocí téhož programu provedu výpočty magnetického pole.

3 Návrh alternativního provedení stroje pomocí modulu RMxprt

3.1 Návrh provedení stroje

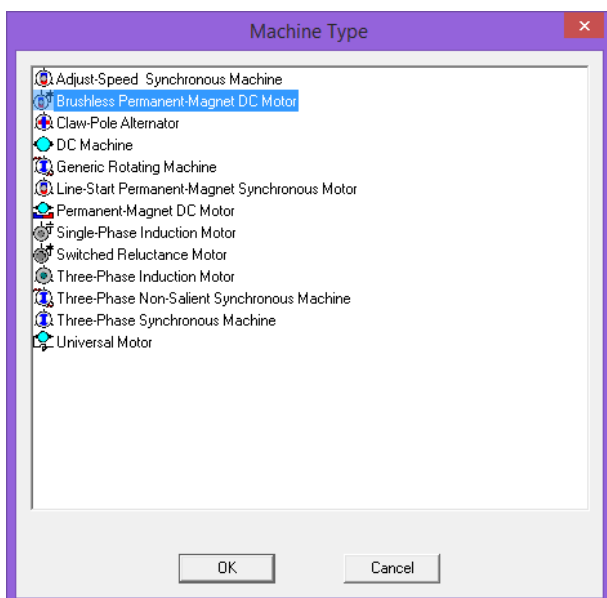
Dle bodu dva zadání BP je cílem práce navrhnout BLDC motor trakční jako alternativu k třífázovému indukčnímu motoru 13 kW. Vzhledem k tomu, že konstrukční návrh elektrických strojů není zařazen do studijního plánu, vycházel jsem z literatury na pokyn vedoucího



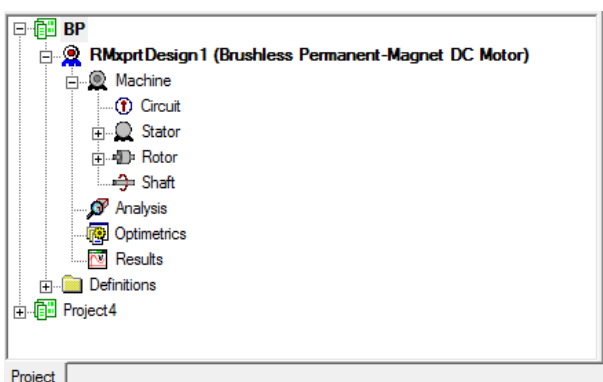
Obr. 3. 1 Moduly

(literatura [5]), kde je návrh indukčního stroje detailně popsán. Jak jsem se již zmínil v kapitole 2. 3, expertní modul pro návrh točivých strojů – RMxprt -

umožňuje návrh všech základních typů elektrických strojů, ale pokud uživatel není vybaven



Obr. 3. 2 Seznam strojů RMxprt



Obr. 3. 3 Menu projektu

nás nyní zajímá panel nástrojů, kde najdeme vlevo dole tři možnosti návrhu. Na obrázku 3.1 jsou vidět přesné ikony, jež reprezentují možnosti návrhu. Zprava návrh 3D, 2D, RMxprt. Zvolíme tedy třetí možnost a dále se nám zobrazí obrázek 3. 2, kde vidíme seznam strojů, které

příslušným know-how, bude výsledkem návrhu sice funkční stroj, ale s velmi špatnými technicko-ekonomickými parametry. Jako technicko-ekonomické parametry zde mám na mysli zejména: poměr výkon - hmota, resp. poměr výkon - účinnost. Proto byl k návrhu BLDC motoru použit jako východisko indukční motor dle literatury [5], která obsahuje příslušné know-how. Záměrem bylo použít shodné provedení statorového obvodu a pokusit se do stejné kubatury umístit bezkartáčové provedení stroje.

Jako postup návrhu zde uvedu jen návrh BLDC, protože oba motory se navrhují téměř stejně. Než se však dostaneme k přesnému navrhování a zadávání všemožných rozměrů, je třeba se prvně dostat do návrhového prostředí RMxprt. V kapitole 2. 2 jsem se krátce zmiňoval o GUI programu Maxwell3D a konkrétněji

je možné pomocí tohoto modulu navrhnout. V mé práci jsem zvolil "Brushless Permanent - Magnet DC motor", což je již několikrát zmiňovaný bezkartáčový stejnosměrný motor s permanentními magnety. Dále na obrázku 3. 2 vidíme například drápkový alternátor, různé typy stejnosměrných motorů, jedno ale i třífázové motory jak asynchronní, tak synchronní. Kdyby nám tento seznam nestačil, můžeme využít import z jiného programu, ale jsme značně omezení příponami, které Maxwell3D akceptuje. Poslední možností je navržení stroje pomocí uživatelsky definovaných primitiv, kde si zvolíme z větší škály možností, jak má vypadat stroj a jak je možné "zkombinovat" dva motory do jednoho a následně provádět další výpočty. Toto je poměrně užitečné ve fázi, kdy máme navržený nějaký motor a chceme zjistit, jestli výměnou například rotoru nezískáme lepší vlastnosti a chování stroje. Volbu stroje máme tedy tímto za sebou a nyní přichází na scénu samotný návrh BLDC motoru. Na obrázku 3. 3 vidíme, jak vypadá menu projektu při otevření RMxpřt části. Postupně projdeme všechny kolonky návrhu a popíšeme si, co a proč se kde nastavuje. Nakonec pomocí modulu RMxpřt zkontrolujeme návrh a výstupem bude tabulka charakteristických hodnot a grafy pro můj návrh BLDC motoru.

3. 2 Návrh - Machine

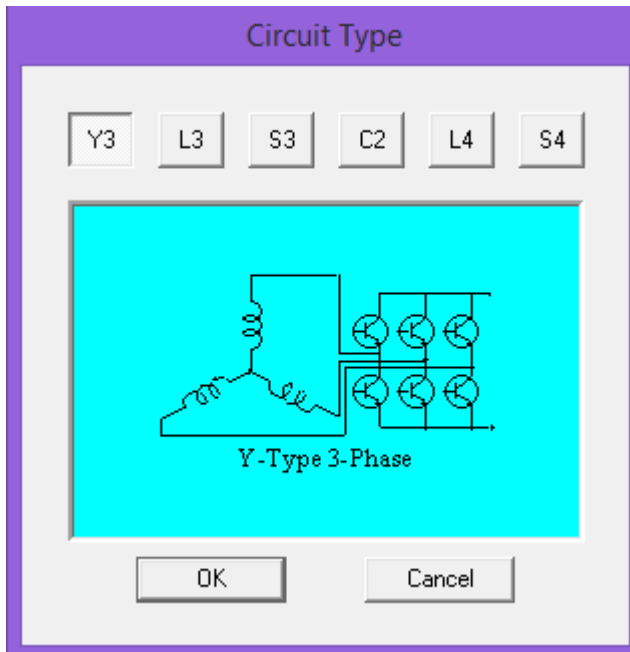
Otevřeme si záložku "Machine" a postupně vyplníme požadovaná pole. Na obrázku 3. 4 vidíme, co vše od nás program vyžaduje. Nyní si celou záložku postupně popíšeme.

| Name | Value | Unit | Eval... | Description |
|-----------------|-------------------------------------|------|---------|--|
| Machine Type | Brushless Permanent-Magnet DC Motor | | | |
| Number of Poles | 4 | | | Number of poles of the machine |
| Rotor Position | Inner Rotor | | | Inner rotor or outer rotor |
| Frictional Loss | 10 | W | 10W | The frictional loss measured at the reference speed |
| Windage Loss | 200 | W | 200W | The windage loss measured at the reference speed |
| Reference Speed | 1500 | rpm | | The reference speed at which the frictional and win... |
| Control Type | DC | | | Control Type: DC, CCC (chopped current control) |
| Circuit Type | Y3 | | | Drive circuit type |

Obr. 3. 4 Machine

První kolonka je typ stroje, což jsme zadali v minulém seznamu (obr. 3. 2). Tuto jedinou kolonku již nejsme schopni měnit. Proto je dobré záložku Machine vyplňovat jako první, poněvadž když zjistíme po celém návrhu možnou chybu ve špatně zvoleném stroji, musíme celý postup opakovat znova. Druhá kolonka je počet pólů, jež bude náš motor mít. Další kolonka je pozice rotoru. Zde je možnost volby mezi vnitřním a vnějším typem rotoru. Vnitřní pozice rotoru je běžné uspořádání rotor ve statoru. Vnější pozice rotoru je jiná z hlediska konstrukce. Rotor má tvar bubnu, na jehož vnitřní straně jsou připevněny v podélném směru permanentní magnety. Rotor obíhá kolem statoru s vinutím. Následující dvě kolonky jsou ztráty, a to konkrétně ztráty v ložiskách a ventilační ztráty. Hodnoty jsem zvolil po dohodě s

vedoucím bakalářské práce. Třetí kolonka od spodu je jmenovitá rychlost motoru. Většinu hodnot jsem bral ze skript, kde je popsán návrh třífázového asynchronního motoru. Jedna z převzatých hodnot je jmenovitá rychlost. Typ řízení je možný buď stejnosměrně nebo řízení přerušovaným proudem, což je řízení pomocí PWM. Typ řídicího obvodu je možné volit z několika různých zapojení. Zapojení Y3 je ukázáno na obrázku 3. 5.



Obr. 3. 5 Řídicí obvod Y3

K návrhu v kolonce machine by toto bylo všechno. Je dobré si všimnout snahy udělat program Maxwell3D více uživatelsky přístupnější pomocí sloupce Description (popis), kde jsou mnohdy uvedené vysvětlivky k jednotlivým kolonkám. Ne vždy nám ale tento sloupec řekne, co daná kolonka představuje, respektive nám zopakuje název s jednotkou, ve které máme zadat číslo. V tomto případě je zde poměrně dobře udělaná nápověda.

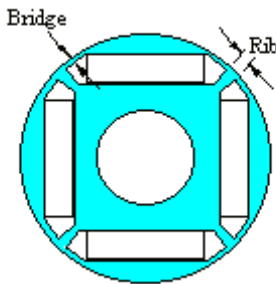
3.3 Návrh - Rotor

V návrhu budeme pokračovat v záložce "Rotor", k níž je připojena záložka "Pole". Na obrázku 3. 6 vidíme tabulku, kterou je třeba vyplnit. První tři kolonky jsou rozměry rotoru, přesněji vnější a vnitřní průměr rotoru a délka rotoru. Tyto hodnoty jsou v milimetrech a bral

| Name | Value | Unit | Evaluate... | Description |
|-----------------|----------|------|-------------|-----------------------------------|
| Outer Diameter | 183 | mm | 183mm | Outer diameter of the rotor core |
| Inner Diameter | 60 | mm | 60mm | Inner diameter of the rotor core |
| Length | 123 | mm | 123mm | Length of the rotor core |
| Steel Type | DW310_35 | | | Steel type of the rotor core |
| Stacking Factor | 0.95 | | | Stacking factor of the rotor core |
| Pole Type | 5 | | | Pole type of the rotor |

Obr. 3. 6 Rotor

jsem je opět ze skript pro návrh asynchronního motoru. Další kolonka představuje typ materiálu, z něhož je rotor vyroben. Zvolený typ DW310_35 je elektronická ocel, která je již



Obr. 3. 7 Pole type 5

předdefinovaná v knihovně RMxprt. Typ materiálu jsem zvolil po dohodě s vedoucím práce. Kolonku činitel plnění nevyplňujeme, protože je již předvyplněná. Typ pólu jsem zvolil vnitřní uložení permanentních magnetů. Tato kolonka se mírně mění podle toho, jaký typ rotoru zvolíme v záložce "Machine". Typ pólu pět je vidět na obrázku 3. 7, kde jsou vidět i dva důležité rozměry pólů. Vzdálenost "Bridge" je vzdálenost mezi koncem pólu a vnějším okrajem rotoru. Druhý rozměr na obrázku je vzdálenost mezi póly "Rib". První kolonku

představuje pólové krytí. Typ magnetu jsem zvolil NdFe35. Poslední dvě kolonky jsou rozměry magnetu, respektive šířka a tloušťka magnetu. Obrázek 3. 8 představuje nastavení záložky "Pole".

| Name | Value | Unit | Eval... | Description |
|------------------|--------|------|---------|--|
| Embrace | 0.7 | | 0.7 | Pole embrace |
| Bridge | 2 | mm | 2mm | Thickness of the bridge across two adjacent poles |
| Rib | 5 | mm | 5mm | Width of the rib at the center of two adjacent poles to support the bridge |
| Magnet Type | NdFe35 | | | Magnet type |
| Magnet Width | 80 | mm | 80mm | Maximum width of magnet |
| Magnet Thickness | 20 | mm | 20mm | Maximum thickness of magnet |

Obr. 3. 8 Pole

Rotorový návrh je jedna z mála částí, již má asynchronní motor jinak, protože u asynchronního motoru navrhujeme kromě rozměrů i drážku a klecové vinutí. Další rozdíl oproti BLDC je, že u asynchronního motoru nenavrhujeme buzení.

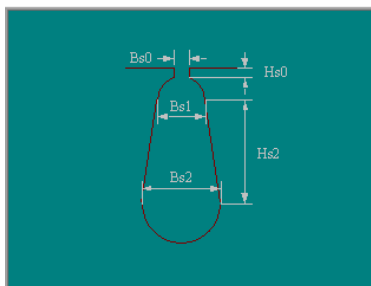
3.4 Návrh - Stator a vinutí

Po vyplnění předchozích dvou záložek máme návrh rotoru hotov. Následuje návrh statoru, který je velice podobný návrhu rotoru. Změna v návrhu je v připojených záložkách. U statoru musíme totiž navrhnout rozměry podle zvolené drážky statoru a dále také vinutí, jež bude uloženo v drážkách. Obrázek 3. 9 nám lépe ukáže, co je potřeba vyplnit v záložce "Stator".

| Name | Value | Unit | Evaluate... | Description |
|-----------------|----------|------|-------------|------------------------------------|
| Outer Diameter | 291 | mm | 291mm | Outer diameter of the stator core |
| Inner Diameter | 184 | mm | 184mm | Inner diameter of the stator core |
| Length | 123 | mm | 123mm | Length of the stator core |
| Stacking Factor | 0.95 | | | Stacking factor of the stator core |
| Steel Type | DW310_35 | | | Steel type of the stator core |
| Number of Slots | 36 | | | Number of slots of the stator core |
| Slot Type | 3 | | | Slot type of the stator core |
| Skew Width | 0 | | 0 | Skew width measured in slot number |

Obr. 3. 9 Stator

Stejně jako u rotoru, i zde jsou první tři kolonky rozměry rotoru. Tyto hodnoty jsou opět vzaty ze skript pro návrh asynchronního motoru. Činitel plnění je rovněž předvyplněn. Materiál statoru zvolíme stejný jako u rotoru. Změna oproti rotoru přichází s následující kolonkou, což je počet drážek. Typ zvolené drážky je zobrazen na obrázku 3. 10 kde jsou i popsány jednotlivé rozměry drážky. Obrázek 3. 11 je další záložka, a to konkrétně "Slot", kde zadáváme přesné rozměry drážky. Tyto hodnoty jsem podle podobnosti zvolil z tabulky uvedené ve skriptech pro návrh asynchronního motoru.



Obr. 3. 10 Slot type

| Name | Va... | Unit | Evalu... | Description |
|----------------|--------------------------|------|----------|---|
| Auto Design | <input type="checkbox"/> | | | Auto design Hs2, Bs1 and Bs2 |
| Parallel Tooth | <input type="checkbox"/> | | | Design Bs1 and Bs2 based on Tooth Width |
| Hs0 | 0.6 | mm | 0.6mm | Slot dimension: Hs0 |
| Hs2 | 20 | mm | 20mm | Slot dimension: Hs2 |
| Bs0 | 3.1 | mm | 3.1mm | Slot dimension: Bs0 |
| Bs1 | 8 | mm | 8mm | Slot dimension: Bs1 |
| Bs2 | 12 | mm | 12mm | Slot dimension: Bs2 |

Obr. 3. 11 Rozměry drážky

Poslední záložkou týkající se statoru je vinutí v drážkách, což je záložka "Winding". Obrázek 3. 12 zobrazuje kolonky, jež charakterizují vinutí statoru. První dvě kolonky popisují, kolik bude mít vinutí vrstev a jaký typ vinutí použijeme. V typu vinutí je možnost volby mezi úplným a polovičním zacívkováním. Pokud by nám tyto dva typy nestačily, je zde ještě možnost editoru, tím jsem se však nezabýval. Třetí kolonka je počet paralelních větví statorového vinutí. Další kolonou je počet vodičů v drážce. Zde se může na první pohled zdát, že nula je chybný návrh, ale jak říká sloupec popisků, při zvolení nulové hodnoty se jedná o "auto - design", což znamená, že program sám spočítá, kolik vodičů se do drážky vejde, a číslo doplní. Následující kolonka je cívkový krok. Počet vláken stejně jako šířku izolace drátu opět necháme automaticky vyplnit programem. Průměr vodiče můžeme nechat na programu, ale vzhledem k předchozím volbám je potřeba jej zadat.

| Name | Value | Unit | E... | Description |
|---------------------|------------------|------|------|--|
| Winding Layers | 2 | | | Number of winding layers |
| Winding Type | Whole-Coiled | | | Stator winding type |
| Parallel Branches | 1 | | | Number of parallel branches of stator winding |
| Conductors per Slot | 0 | | 0 | Number of conductors per slot, 0 for auto-design |
| Coil Pitch | 9 | | | Coil pitch measured in number of slots |
| Number of Strands | 0 | | 0 | Number of strands (number of wires per conductor), 0 for auto-design |
| Wire Wrap | 0 | mm | | Double-side wire wrap thickness, 0 for auto-pickup in the wire library |
| Wire Size | Diameter: 1.45mm | | | Wire size, 0 for auto-design |

Obr. 3. 12 vinutí statoru

3.5 Návrh - Buzení

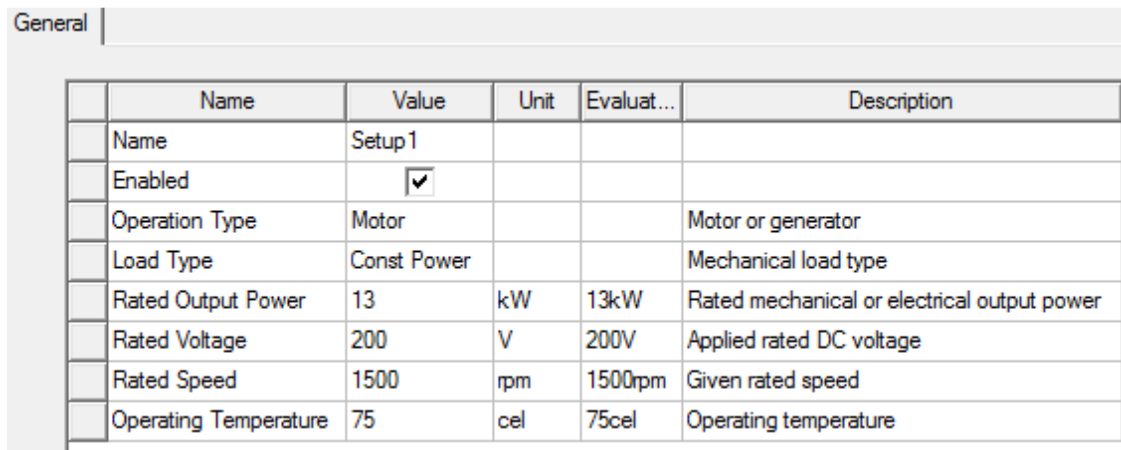
Návrh statoru je tímto u konce a zbývá nám provést návrh buzení motoru. Tato část je poměrně problematická, poněvadž každá, byť jen malá změna v úhlech vede ve výsledku k obrovským ztrátám stroje. Zde jsme konzultovali problém s dalším kolegou a vedoucím práce a po dohadách jsme se dostali k níže uvedeným hodnotám na obrázku 3. 13. Šířka spínacího pulsu je 60° a úhel vedení je 120°. Tyto dvě hodnoty musí dát v součtu 180°.

| Name | Value | Unit | Evaluate... | Description |
|-----------------------|-------|------|-------------|---|
| Lead Angle of Trigger | 60 | deg | 60deg | Lead angle of trigger in electrical degrees |
| Trigger Pulse Width | 120 | deg | 120deg | Trigger pulse width in electrical degrees |
| Transistor Drop | 2.5 | V | | Voltage drop of one transistor |
| Diode Drop | 2.5 | V | | Voltage drop of one diode, or the total voltage for start-type circuit... |

Obr. 3. 13 Circuit

3.6 Návrh - Nastavení analýzy

Posledním krokem je nastavit hodnoty pro analýzu dat, které jsme doposud zadávali. Do záložky "Analysis" přidáme nová data, jak popisuje obrázek 3. 14. Kolonka „Name“ je čistě orientační a je na nás, jak si tato data pojmenujeme. Až po čtvrtou kolonku nic vyplnit nemůžeme, protože program to udělá za nás. Zatěžovací typ sice vyplní také, ale zde už je možnost volby. Jmenovitý výkon, napětí a rychlost vyplníme podle zadání. Poslední kolonka je pracovní teplota, kterou jsem zvolil podle dohody s vedoucím práce.



| Name | Value | Unit | Evaluat... | Description |
|-----------------------|-------------------------------------|------|------------|---|
| Name | Setup1 | | | |
| Enabled | <input checked="" type="checkbox"/> | | | |
| Operation Type | Motor | | | Motor or generator |
| Load Type | Const Power | | | Mechanical load type |
| Rated Output Power | 13 | kW | 13kW | Rated mechanical or electrical output power |
| Rated Voltage | 200 | V | 200V | Applied rated DC voltage |
| Rated Speed | 1500 | rpm | 1500rpm | Given rated speed |
| Operating Temperature | 75 | cel | 75cel | Operating temperature |

Obr. 3. 14 Analysis data

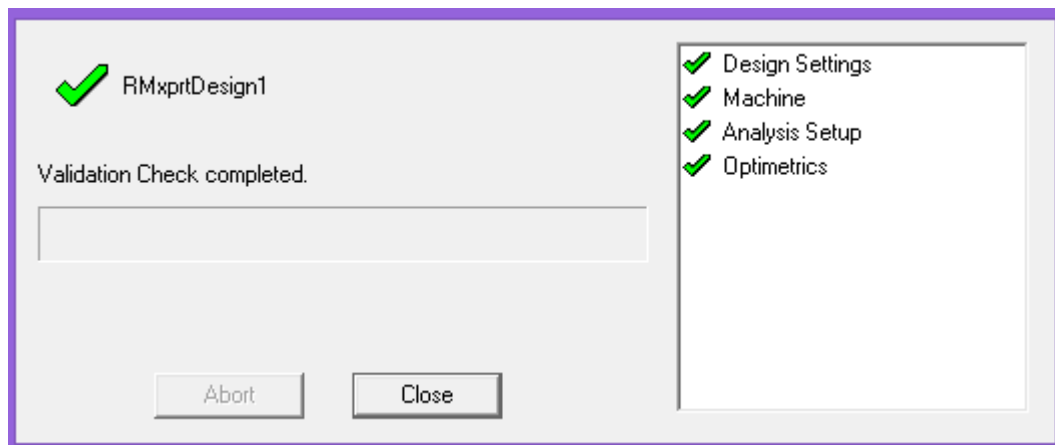
3.7 Analýza, výsledky

Nyní je návrh v RMxprt hotov a můžeme přejít ke kontrole a spuštění analýzy. Před spuštěním analýzy je třeba spustit kontrolu našeho návrhu. Ten spustíme pomocí panelu



Obr. 3. 15 Panel nástrojů

nástrojů, kde je ikona zelené fajfky "Validate" (obrázek 3.15, první černá kružnice). Pokud test projde bez chyb, ukáže se okénko, jako je vidět na obrázku 3. 16. Pokud nastane chyba v návrhu, musíme vyhledat



Obr. 3. 16 Úspěšná validace

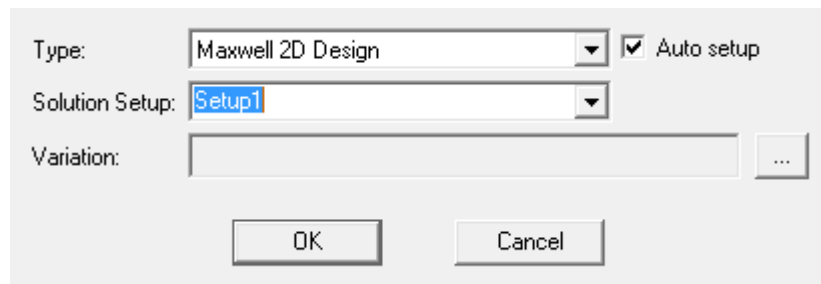
problém a upravit návrh. Naštěstí to není hledání typu pokus-omyl, protože v textovém okně nám program vypíše, kde je chyba a proč náš návrh neprošel. Po opravení případných chyb se vrátíme ke spuštění analýzy dat. To provedeme ve stejném okně na panelu nástrojů, jako je "Validate", ale tentokrát je to ikona zeleného vykřičníku "Analyze all" (obrázek 3. 15, druhá černá kružnice). Výpočet bude trvat několik minut, vše záleží na hardwaru počítače. Když přechkáme dobu nutnou pro výpočty, přichází výsledky. Ke všem výsledkům se dostaneme pomocí panelu nástrojů ikonou označenou "Solution data" (obrázek 3. 15, třetí černá kružnice). Zde je možné zvolit, jaké nastavení analýzy chceme a můžeme si vybrat mezi třemi okny výsledků. První způsob "Performance" je poměrně přehledný, protože zobrazuje podle volby pouze tu část dat, kterou chceme. Druhý způsob "Design sheet" jsou stejná data jako v "Performance", ale všechna v jednom okně. Poslední způsob zobrazení výsledků je pomocí grafů, neboli kolonka "Curves". Zde si můžeme vybrat z několika možných závislostí, nevýhodou však je, že s grafem se v RMXprtů dále nedá zcela pracovat. Pokud nás rovnou zajímají grafy a ostatní výsledky pro nás nejsou důležité, můžeme se na ně rovnou podívat pomocí ikony "Curves" na panelu nástrojů (obrázek 3. 15, čtvrtá černá kružnice).

Na výsledky z RMXprtů se podíváme v poslední kapitole, kde se budeme zabývat analýzou dat. Nyní je třeba odvodit z návrhu v RMXprtů 3D model do Maxwellu3D, provést patřičné nastavení a spustit výpočet magnetického pole.

4 Simulace funkce stroje v softwarovém prostředí Maxwell3D

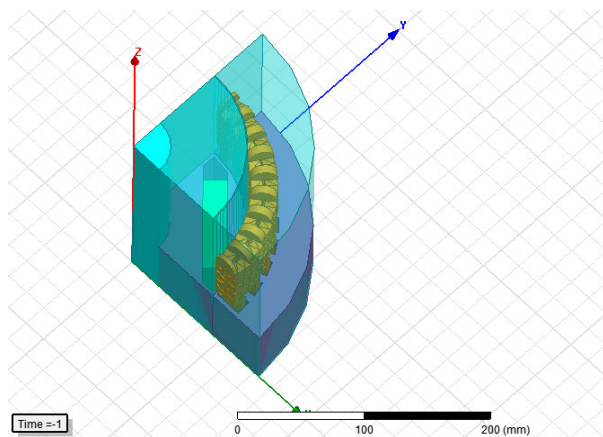
4.1 Odvození 3D modelu z RMXprt

Pro přechod z RMXprt do prostředí Maxwell3D je třeba vytvořit 3D nebo 2D model. Pokud vytváříme model přímo z RMXprt, máme drobnou výhodu. Při modelování stroje se nám totiž automaticky nastaví okrajové podmínky. Pokud bychom například vytvořili nejdříve 2D model a z něj následně 3D model, musíme veškeré podmínky nastavit ručně. Tento způsob je však možný pouze v případě, že na modelu stroje nic nechceme měnit. Pokud bychom například ve vytvořeném 3D modelu změnili rotor, například pomocí uživatelsky definovaných primitiv, je zřejmé, že následný 2D model bude mít jiné vlastnosti než původní model z RMXprt. Pokud je to tedy možné, je lepší vytvářet oba modely z RMXprt.

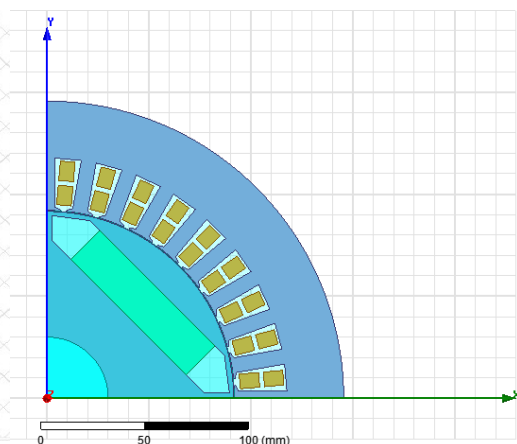


Obr. 4.1 Tvorba 3D/2D modelu

Za předpokladu úspěšně vyřešeného modelu motoru v RMXprt se pomocí menu "RMXprt -> Analysis Setup -> Create Maxwell Design" dostaneme k výběrové tabulce, již zobrazuje obrázek 4.1. V řádku "Type" vybereme, jaký typ chceme vytvořit. Zvolíme si mezi 2D a 3D modelem. Řádek níže nám umožní vybrat si z námi navržených dat pro analýzu. Je tedy zcela na nás, kolik možností zde budeme mít. Poslední kolonku necháme nevyplněnou.



Obr. 4.2 3D model BLDC

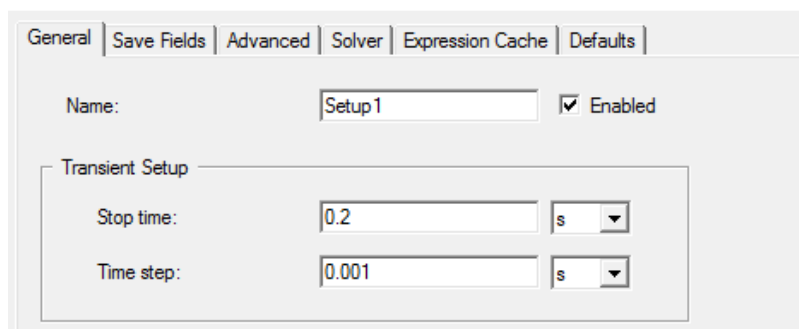


Obr. 4.3 2D model BLDC

Nastavení potvrdíme a nyní budeme čekat. Modelování trvá řádově několik minut. Jako u každého výpočtu nebo návrhu pomocí programu i zde je doba modelování závislá na používaném hardwarovém vybavení, například SSD disk urychlí modelování, protože Maxwell3D ukládá velké množství dat. Po uplynutí několika minut nám program sám namodeluje 3D nebo 2D model motoru. Model ve 3D zobrazuje obrázek 4. 2 a 2D model je na obrázku 4. 3. Vzhledem k tomu, že jsme modely vytvořili pomocí RMXprt, pro spuštění výpočtů stačí pouze nastavit čas výpočtu.

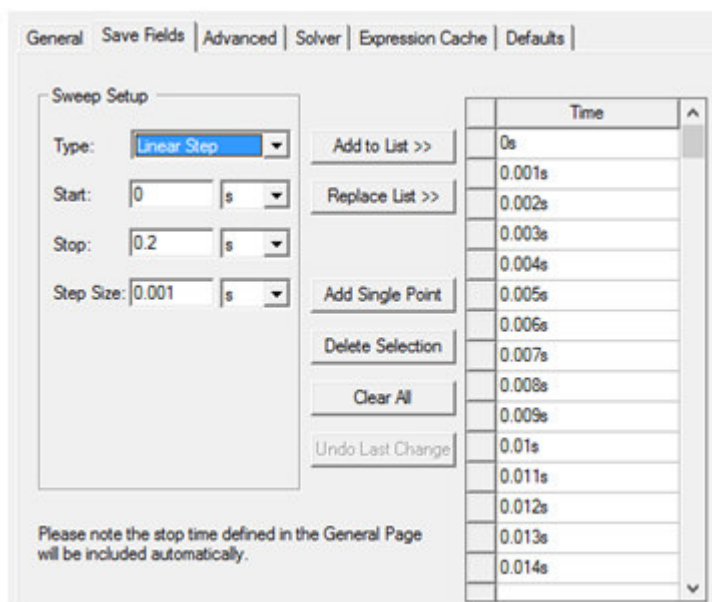
4.2 Nastavení - Čas výpočtu

Spuštění výpočtů magnetického pole je hodně podobné jako výpočty v modulu RMXprt, kterým jsme se zabývali v předchozí podkapitole. Musíme projít validací dat a následně spustit výpočet. Stejnomené ikony "Validate a Analyze All" jsou také umístěny na panelu nástrojů, a dokonce jsou pro 3D model stejné i grafiky. Pro 2D model se velice nepatrně grafická podoba ikon mění, ale každý je hned na první pohled pozná. Zde si tedy popíšeme nastavení časových bodů pro 3D model a pro 2D model je postup úplně stejný. Vzhledem k tomu, že návrh motoru jsme udělali pomocí RMXprt, nemusíme nastavovat žádné okrajové podmínky, protože to za nás program udělal automaticky. Nicméně v další kapitole si o nastavení podmínek povíme více. Časové body výpočtu se nastavují ve složce "Analysis" daného projektu. Buď přidáme nové nastavení řešiče, nebo upravíme stávající. Prvním nebo druhým způsobem se dostaneme do nastavení, jež je na obrázku 4. 4. Zde v záložce "General" zvolíme jméno nastavení. Stejně jako u nastavení v RMXprt, i zde je jméno pouze pro lepší orientaci uživatele. Ovšem další dvě okna už jsou velmi důležitá, poněvadž "Stop time" je čas, do kterého bude program počítat. Okno "Time step" je časový krok, pomocí něhož program vytvoří časové body, ve kterých bude počítat. V kolonce "General" by to bylo vše a dále se přesuneme do kolonky "Save Fields".



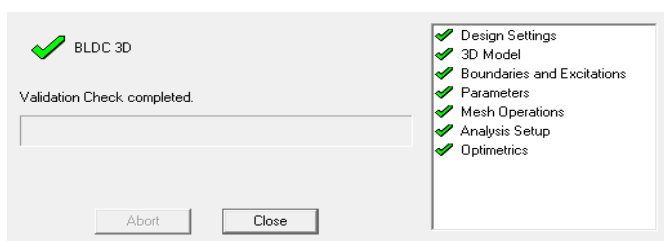
Obr. 4. 4 Solve setup

Podle obrázku 4. 5 vidíme, co nám okno umožňuje nastavit. V kolonce "Type" necháme lineární krok. Jsou zde ještě dvě možnosti, a to lineární počet a logaritmické měřítko. Následující tři kolonky jsou podobné jako v předchozím menu "General". Volíme zde čas, od kdy do kdy se bude pole počítat a s jakým krokem.



Obr. 4. 5 Save Fields

Na obrázku je tedy vidět, že pole se bude počítat od nuly do dvou desetín sekundy, a to v každé tisícíně sekundy. Ostatně po zmáčknutí tlačítka "Add to List >>" program potřebné body pro výpočet vytvoří do tabulky. Nastavení potvrdíme a tímto je vše připraveno pro spuštění výpočtů. Nyní provedeme kontrolu našeho nastavení pomocí tlačítka "Validate", a po stejné tabulce, jako je na obrázku 4. 6, můžeme spustit výpočet. Od výpočtů v RMxpertu je zde rozdíl v tom, že tento proces je daleko náročnější jednak na hardware, a jednak na čas výpočtu. Toto nastavení, jež jsem zde popsal, trvalo cca dvacet pět hodin čistého času na počítači, který má daleko lepší hardwarové vybavení, než je doporučeno od vydavatele tohoto softwaru. Tyto výpočty je tedy vhodné spouštět na nějakém workshopu, jenž má jednak velké množství paměti RAM, a jednak na něm bude běžet pouze tento výpočet. Veškerá okolní práce na počítači při spuštěném výpočtu zvyšuje čas dokončení. Tento postup tedy aplikujeme na

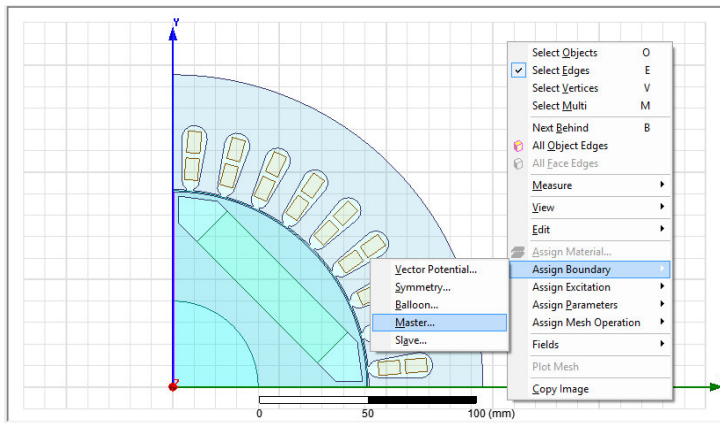


Obr. 4. 6 Úspěšná validace

referenční model motoru i na BLDC motor, abychom mohli tyto dva motory porovnat. V další kapitole se budeme zabývat nastavením okrajových podmínek pro výpočet.

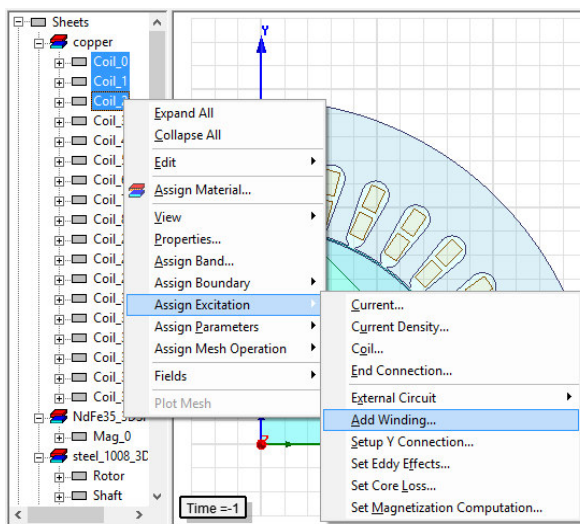
4.3 Nastavení - Okrajové podmínky

Vzhledem k tomu, že 3D případně 2D model jsme odvodili z modulu RMxprt, jsme tyto podmínky pro výpočet vůbec nenastavovali. Nicméně ne vždy můžeme stroj navrhovat v RMxprt, můžeme však například importovat návrh z jiného programu nebo jej přímo vytvářet ve 3D v modulu Maxwell3D. Pokud se tak stane, čeká nás relativně delší nastavení pro výpočet magnetického pole.



obr. 4.7 Boundaries

Jako první se podíváme na nastavení hranic výpočtů, což je v menu projektu označeno jako "Boundaries". Pravým tlačítkem klikneme do okna s návrhem a změníme výběr na hrany (E). Poté vybereme jednu z krajních hran rotoru. Opět pravým tlačítkem klikneme do prostoru s návrhem motoru a podle cesty na obrázku 4. 7 nastavíme hlavní hranici. V tabulce je jediná volba a to inverse směru. Tuto možnost zaškrtneme, protože jinak by šla hranice od nekonečna do nuly. Obdobným způsobem nastavíme vedlejší hranici, ale s hranou na ose X, a připojíme ji k hlavní hranici pomocí kolonky "Master boundaries". Inversní směr u této podmínky zvolíme podle směru vektoru, aby směřoval od nuly do nekonečna.



Obr. 4.8 Vytvoření fáze

Tímto jsou určeny hranice pro výpočet a nyní je třeba nastavit buzení neboli "Excitations". Prvně musíme vytvořit jednotlivé fáze buzení, a poté v každé fázi definovat jednotlivá vinutí. Na obrázku 4. 8 je zobrazen postup, jak vytvořit jednu fázi. Zde je třeba se podívat na vinutí v RMxprt, abychom dobře spojili jednotlivé fáze dohromady a nepřipojili k sobě vodiče ze dvou fází dohromady. V tabulce, jako je na obrázku 4. 9, si zvolíme jméno. To je vhodné volit podle jména příslušné fáze. Typ buzení zvolíme

externí. Externí budící obvod volíme, protože z předchozího návrhu máme tento obvod vytvořen. Kdyby však nebyl vytvořen, musíme jej celý navrhnout. Po vytvoření všech tří fází musíme jednotlivé cívky přidat k příslušným fázím. To provedeme tak, že si označíme jednu cívku, pravým tlačítkem klikneme na příslušnou fázi a zvolíme možnost "Assign Coil". Zadáme počet vodičů a tímto způsobem přidáváme další cívky do příslušných fází. Poslední, co musíme udělat, je importovat budící obvod. Pravým tlačítkem klikneme na menu "Excitations -> External Circuit -> Edit External Circuit". Zde pomocí tlačítka "Import circuit" najdeme v počítači příslušný budící obvod a ten importujeme do projektu. Tento obvod je uveden v příloze (Příloha E). Pokud tento obvod nemáme, musíme jej vytvořit pomocí tlačítka "Edit Circuit...", ale to jsem v mé práci nedělal. Nyní máme nastavené buzení stroje a zbývá nám nastavit síť pro výpočet pole. Nejprve je třeba si promyslet, kde vlastně chceme magnetické pole počítat. Hlavní místa budou rotor, stator, permanentní magnety na rotoru, vinutí statoru

Obr. 4. 9 Návrh fáze

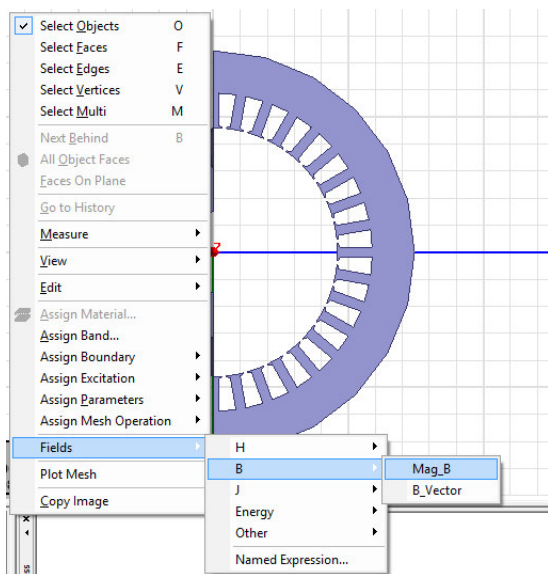
a vzduchová mezera. Postupně tedy volíme jednotlivá místa, kde bude síť vytvořena, a pomocí volby "Assign Mesh Operation" nastavíme právě vybraný objekt jako místo, kde se má vytvořit výpočetní síť. Jako bonus můžeme, ale nemusíme nastavovat kolonku "Parameters". Zde stačí vybrat například celý rotor a přidat parametr "Torque". Jako poslední ještě nastavíme

časové body, ve kterých se bude počítat magnetické pole. Toto nastavení je popsáno v kapitole 4. 2. Tímto jsme provedli veškerá potřebná nastavení k výpočtu. Pokud jsme někde udělali chybu, při spuštění validace nám program v chybovém okně napíše, co je potřeba opravit.

Pokud je tedy možnost vytvořit model motoru v RMxpřtu, tak je lepší to udělat, protože tato nastavení jsou poměrně složitá a důležitá. Například kdybychom již neměli vytvořen z předchozího návrhu externí budící obvod, museli bychom ho celý navrhnout, což by byla prakticky úplně stejná práce z hlediska náročnosti a složitosti, jako celá tato práce. Nyní tedy máme navržené a vypočítané oba dva stroje, můžeme se tedy podívat na výsledky.

4.4 Výsledky

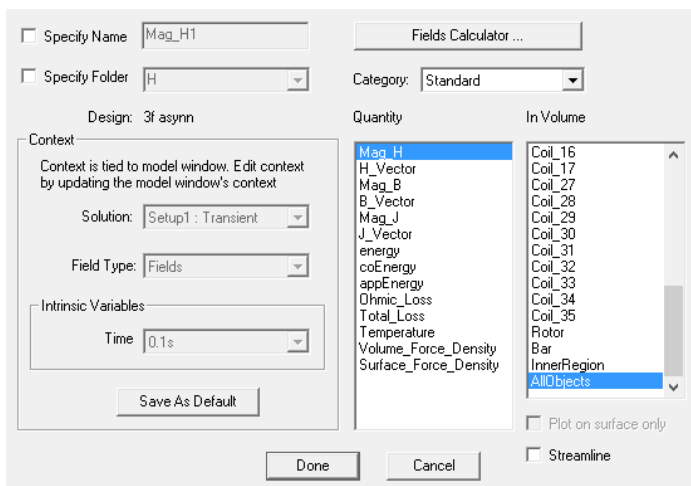
Pokud jsme tedy podle předchozích kapitol správně nastavili všechna potřebná data a



Obr. 4. 10 Zobrazení pole

spustili výpočet magnetického pole obou motorů, zpřístupní se nám možnost podívat se na spoustu grafů, i na magnetické pole. Pohled na pole je možný prostřednictvím několika proměnných, ale také si můžeme vybrat mezi čistým polem nebo polem vektorů dané veličiny. Pro zobrazení pole si nejprve vypneme zobrazení celého modelu, protože jinak bychom nic neviděli. Dále vybereme vrstvu, ve které chceme pole zobrazit, například XY. Podle obrázku 4. 10 vybereme požadovanou proměnnou a typ pole. Program

umožňuje se podívat na průběh intenzity, indukce magnetického pole, proudové hustoty, energie a dále třeba na ohmických ztrát nebo teploty. Obrázek 4. 11 vyobrazuje všechny možnosti průběhů v prvním sloupečku a ve druhém je volba, v čem chceme průběh zobrazit.



Obr. 4. 11 Zobrazení pole - objekty

Pokud chceme vidět celý průběh, zaškrtneme poslední možnost ze sloupečku "All Objects". Tato volba je výhodná v tom, že ne vždy nás zajímá celé pole, ale třeba pouze pole na vinutí stroje. Poté by stačilo vypnout zobrazení vinutí a zde si navolit postupně celé vinutí. Další výhodou je, že pro slabší hardware můžeme

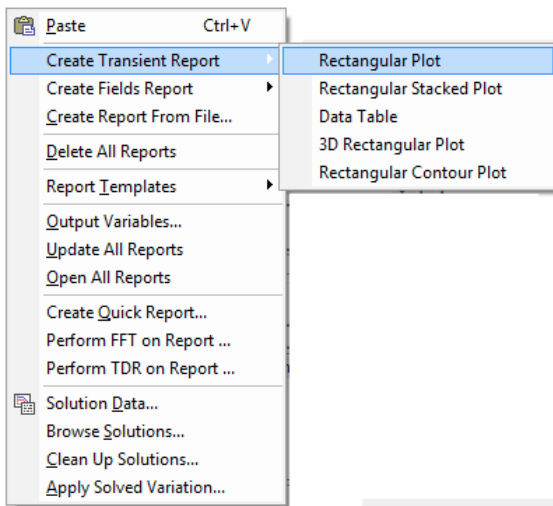
postupně zkoumat průběh pole v jednotlivých částech stroje, a tedy nezatěžovat tolik stroj, na kterém pracujeme. V poslední řadě je také výhodou to, že si můžeme splést proměnnou, již chceme pozorovat, a zde ještě můžeme svou prvotní volbu změnit. Volby vpravo nahoře jsou čistě uživatelské a je na nás, jestli a jak pojmenujeme příslušný graf nebo jestli chceme mít nějakou strukturu v umístění grafu v menu projektu. Co je ale důležité je čas, ve kterém zobrazujeme daný průběh. Tento čas volíme před tím, než začneme vytvářet graf pole. Na

výběr máme tolik časových bodů, kolik jsme jich nastavili před výpočtem. Program dále umožňuje zobrazení siločar dané proměnné pomocí okénka "Streamline".

Co se týče grafů z Maxwellu3D, na obrázek 4. 12 je popsána cesta, jak se dostat ke grafům, když klikneme pravým tlačítkem na složku "Results" v menu projektu. Jak vidíme na obrázku, je zde poměrně dobrá zásoba typů grafů, nicméně hlavní volba přijde až s dalším oknem. Zde si vybíráme, jaký graf chceme zobrazit. Jednak si zde vybereme, co chceme zobrazit (například moment, rychlost, ztráty, atd.), a jednak vybereme ke každému typu grafu různé závislosti (například zátěžný moment, moment naprázdno, proudy v jednotlivých fázích, atd.). Na vytvořeném grafu je možné měření spousty hodnot. Na výběr je hned několik knihoven a k nim příslušné typy funkcí. Můžeme tedy třeba pomocí matematické knihovny

měřit střední hodnotu na grafu. Program umožňuje buď měření na celém grafu, nebo si v něm vytvoříme body, kde chceme měření provést, a ty potom zadáme do nastavení měření.

Je tedy jasné, že Maxwell3D umožňuje získat spousty důležitých a zajímavých dat. Na výsledky se podíváme v poslední kapitole.



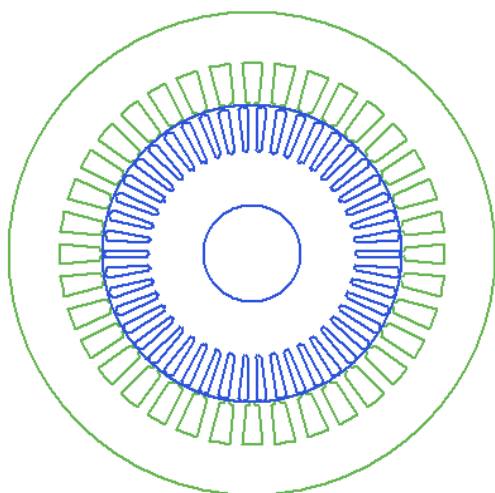
Obr. 4. 12 Cesta ke grafu

5 Analýza shromážděných dat

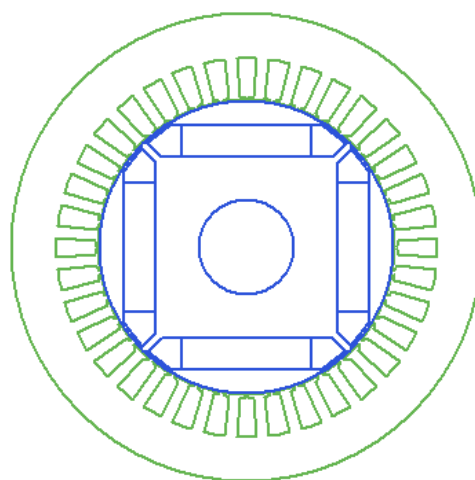
V poslední kapitole této bakalářské práce se podíváme na to, co jsem navrhnul, vytvořil a jaké to má vlastnosti. Vzhledem k tomu, že nejdůležitější části jsou RMxpřt a Maxwell3D, budou tyto výsledky oddělené. Některé informace nebo obrázky budou uvedeny v přílohách.

5.1 RMxpřt

Mezi první výsledky je nutné zařadit navržený asynchronní a bezkartáčový motor v RMxpřtu. Na obrázku 5. 1 je vidět, jak vypadá navržený rotor a stator třífázového

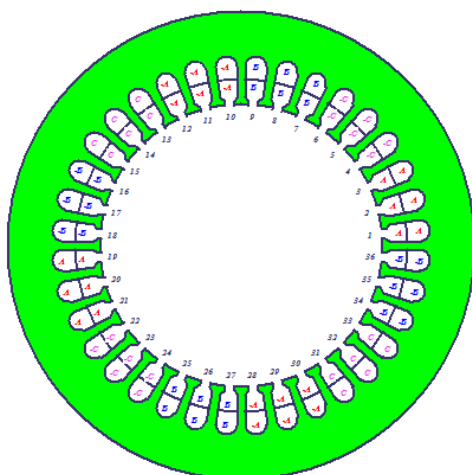


Obr. 5. 1 Asynchronní motor



Obr. 5. 2 BLDC motor

asynchronního motoru. Na obrázku vedle (5. 2) je bezkartáčový motor s permanentními magnety na rotoru. Rozměry obou motorů jsou stejné, protože návrh jsem dělal podle skript [5], kde je popsán postup návrhu asynchronního motoru, tudíž jsem navrhnul asynchronní



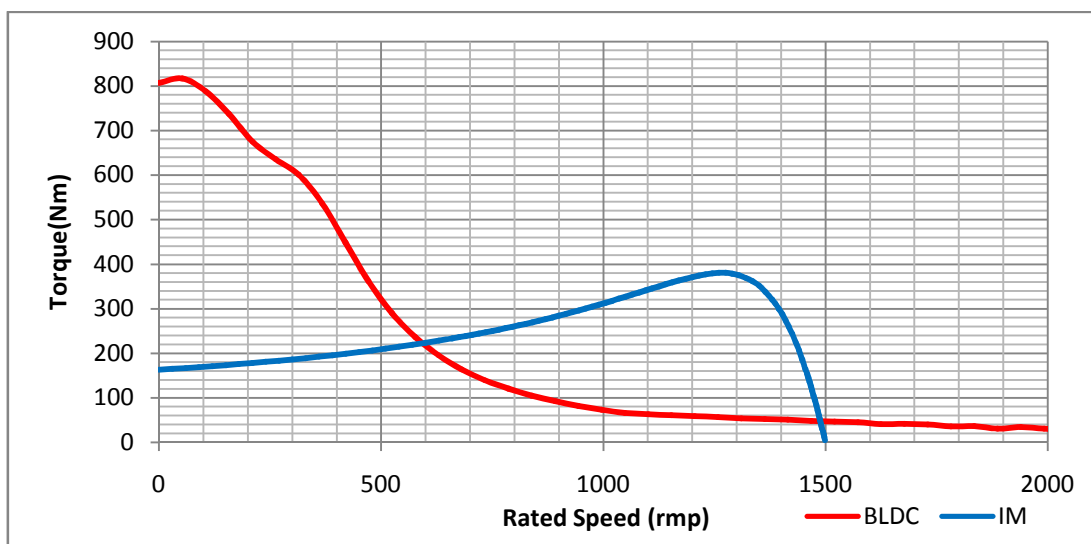
Obr. 5. 3 Vinutí statoru

motor, ten jsem bral jako referenční a podle jeho rozměrů jsem navrhnul bezkartáčový motor. Jak je z obrázků patrné, tyto motory se z hlediska konstrukce liší rotorem. Asynchronní motor je čtyřpólový a má na rotoru klecové vinutí se 46 tyčemi, rotor bezkartáčového stejnosměrného motoru má 4 permanentní magnety. V obou případech se jedná o typ konstrukce s vnitřním rotorem, v terminologii Maxwell3D zadáno "Inrunner". Co se týče statorového vinutí, pro oba motory je stejné. Na obrázku 5. 3 je tedy vidět statorové vinutí obou motorů. Jak bylo popsáno v návrhu, toto vinutí je dvouvrstvé s cívkovým krokem devět.

To znamená, že na každou fázi připadají tři drážky a v každé drážce jsou dva vodiče. Po třech drážkách se střádají fáze včetně polarity. Dalším výstupem z RMxpertu jsou grafy.

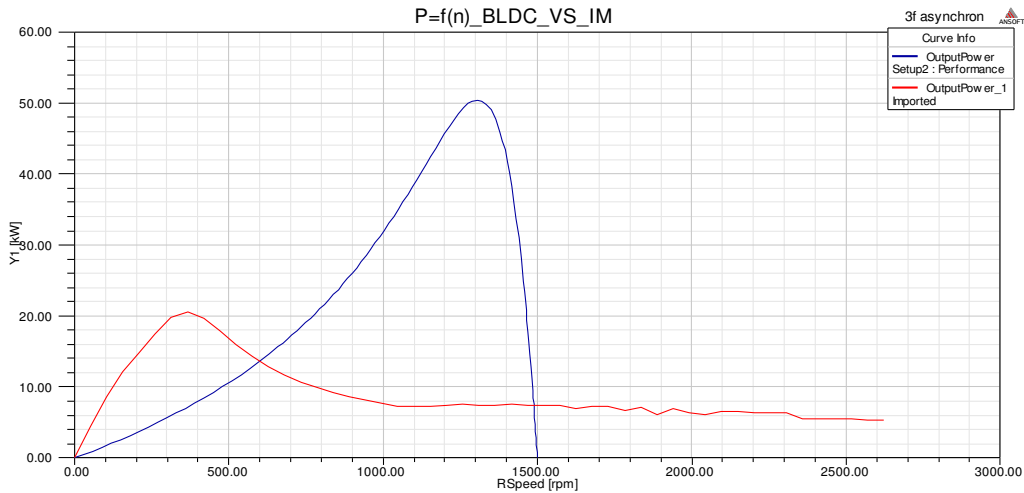
Důležité grafy jsou uvedeny zde a zbylé v příloze (Příloha C - asynchronní motor; Příloha D - bezkartáčový motor). Pro všechny níže uvedené grafy platí, že červená křivka je bezkartáčový stejnosměrný motor a modrá křivka je asynchronní motor.

Na grafu 5. 4 je zobrazena závislost výstupního momentu na jmenovité rychlosti. Z grafu plyne, že při nulových otáčkách má BLDC motor skoro čtyřikrát vyšší moment, než asynchronní při zadaných vstupních hodnotách. Moment BLDC motoru postupně klesá a při hodnotě 1500 otáček za minutu má moment cca 60 Nm, zatímco asynchronní moment postupně stoupá, a pak prudce klesá k nule. Graf je záměrně vytvořen v softwaru Microsoft Office, protože z RMxpertu lze mimo grafické podoby exportovat také tabulka hodnot, která je kompatibilní s programem Excel. Tyto hodnoty jsem poté zanesl do společného grafu.



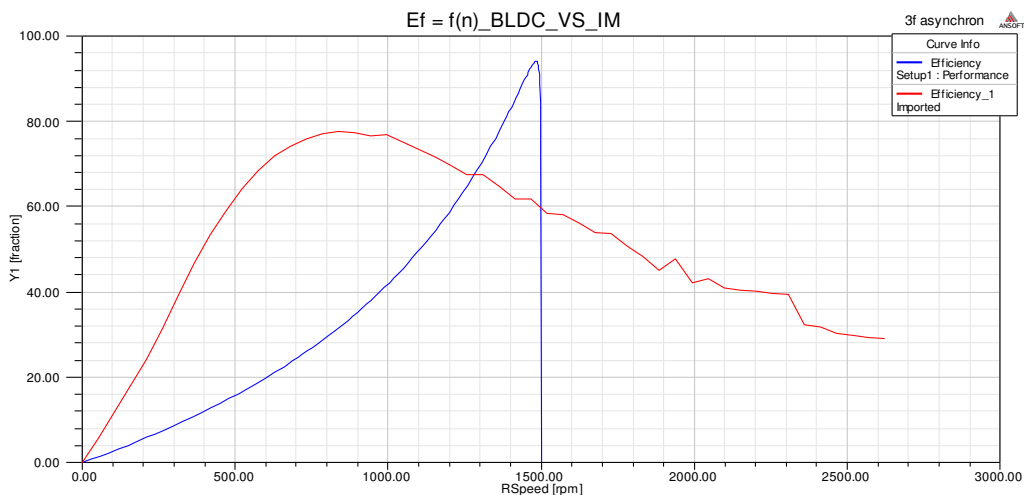
Obr. 5. 4 graf momentu v závislosti na rychlosti

Závislost výkonu na otáčkách (obrázek 5.5) vypovídá o tom, že asynchronní motor při cca 1 450 otáčkách za minutu má výstupní výkon 13 kW, ale bezkartáčový stejnosměrný motor má cca 8 kW při stejných otáčkách, což je způsobeno zachováním statorové části v obou případech motorů.



Obr. 5. 5 graf výstupního výkonu v závislosti na rychlosti

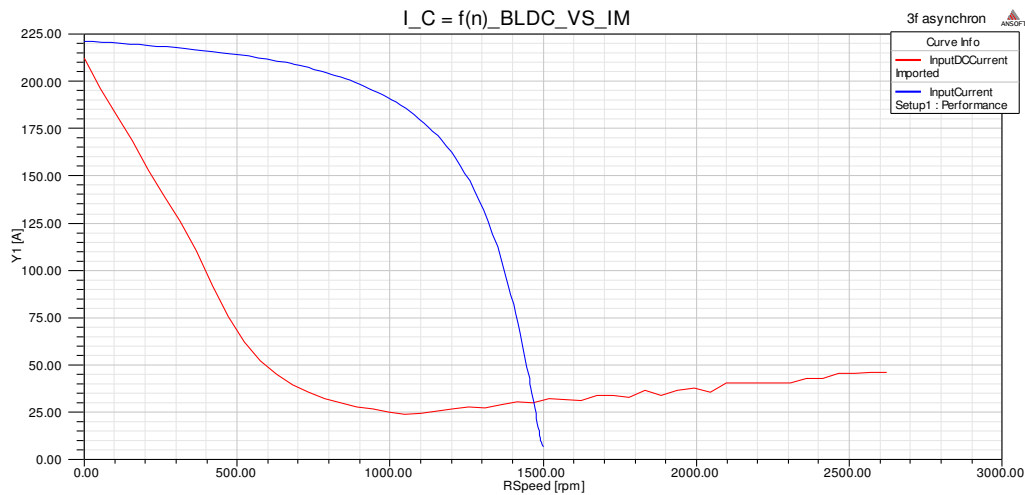
Obrázek 5. 6 představuje srovnání obou motorů z hlediska účinnosti v závislosti na otáčkách. Tento graf nám říká, že asynchronní motor při zadaných parametrech dosahuje účinnosti asi 94 % při rychlosti 1 500 otáček za minutu avšak z hlediska jejího rozložení pouze v úzkém pásmu na rozdíl od BLDC motoru. Při stejné rychlosti má BLDC motor účinnost asi 60 %, což je sice docela málo, ale plocha grafu je oproti asynchronnímu motoru daleko větší.



Obr. 5. 6 graf účinnosti v závislosti na rychlosti

Poslední uvedený graf na obrázku 5. 7 je závislost vstupního proudu na rychlosti. Z grafu je patrné, že oba motory startují se zhruba stejným proudem a postupně klesají, ale každý po jiné křivce. Asynchronní motor klesá pomalu a s blížící se jmenovitou rychlostí začíná

prudce klesat. Bezkartáčový motor naopak klesá od začátku prudce až k hodnotě, jež skoro odpovídá jmenovitému napájecímu proudu. Při jmenovité rychlosti je asynchronní motor napájen cca sedmi ampéry a BLDC motor při stejné rychlosti odebírá cca 31 ampér. Bezkartáčový motor má tedy vyšší odběr, než asynchronní motor při zadaných podmínkách.

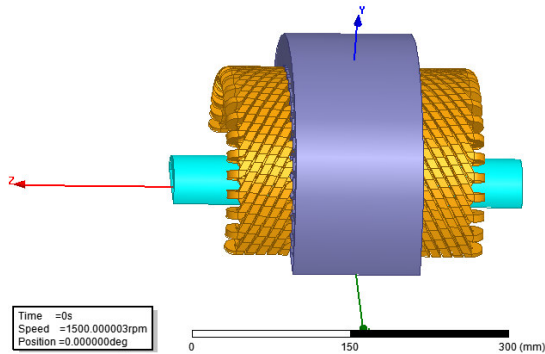


Obr. 5.7 graf vstupního proudu v závislosti na rychlosti

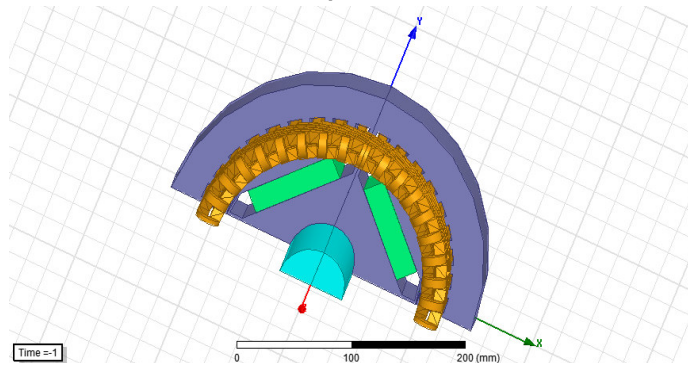
Dalším výstupem z RMxpřtu je "Design sheet" neboli návrhový list. Je to textový výpis kompletních informací o daném motoru. Celý výpis obou motorů je uveden v příloze (Příloha A a B). U asynchronního motoru jsou zde obecné informace, kde je uvedeno například napájecí napětí, daný výstupní výkon, frekvence, ztráty a další. Poté následují informace o statoru a rotoru, kde jsou popsány rozměry, typ a rozměry drážek, počet drážek a další. Následuje sloupec, jenž popisuje spotřebu materiálu na daný motor. Jednak se zde dozvíme informace o hustotě materiálu, a jednak i kolik by daná část vážila v kilogramech. Jako poslední sloupce jsou informace při různých typech zátěže. Jsou zde informace při provozu bez zátěže, jmenovité zátěži a provozu nakrátko. Ve všech sloupcích jsou v podstatě informace o odporech, výkonech, proudech a momentech. Nakonec zde máme ještě pár informací o vinutí a vstupní data do transientu. U bezkartáčového motoru zde najdeme hodně podobné informace, ale oproti asynchronnímu se v některých částech liší. Obecné informace a informace o rotoru a statoru zůstávají. Poté jsou zařazeny informace o permanentních magnetech. Zda najdeme typické hodnoty pro permanentní magnety jako jsou remanentní indukce, koercitivní síla, relativní permeabilita, demagnetizační indukce a další. V příloze (Příloha F) je uveden datasheet reálného permanentního magnetu, který dosahuje přibližně stejných hodnot jako permanentní magnet, který jsme navrhli v této práci. Informace o spotřebě materiálu jsou zde také uvedeny, ale liší se, protože tyto dva motory nejsou stejné. Oproti asynchronnímu motoru zde najdeme méně informací, jež se týkají zátěže. Jsou zde uvedeny informace o ustáleném stavu, stavu bez zátěže a se zátěží.

5.2 Maxwell3D - modely motorů

Po předchozích úvahách máme tedy 3D modely dvou motorů. Třífázový asynchronní motor je na obrázku 5. 4. Pro lepší zobrazení jsou zde vypnuté některé vrstvy, které program vytvoří. Z tohoto pohledu je vidět světle modrá hřídel, tmavě modrý stator a jeho vinutí, které je typu úplného zacívkování. Bezkartáčový stejnosměrný motor s permanentními magnety je



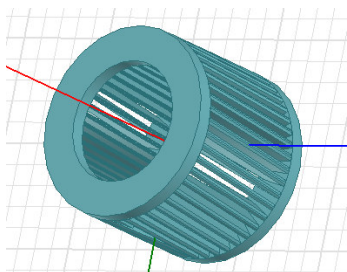
Obr. 5. 4 Asynchronní motor



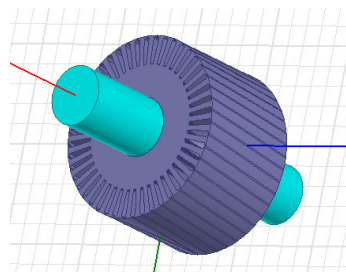
Obr. 5. 5 BLDC motor

vidět na obrázku 5. 5. Co se týká statoru, motory jsou totožné, ale v rotorové části se liší. Tato odlišnost není nijak překvapivá, protože asynchronní motor má na rotoru drážky a klecové vinutí. Oproti tomu bezkartáčový stejnosměrný motor má na rotoru čtyři permanentní magnety. Na obrázku 5. 6 jsou vyobrazeny jednotlivé rotory samostatně. Vlevo je vidět hliníková klec asynchronního motoru, uprostřed je zobrazen rotor asynchronního motoru bez klecového vinutí a

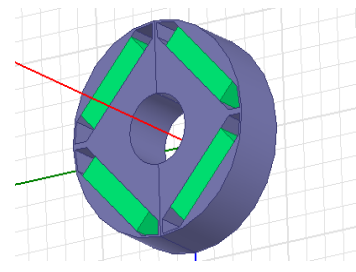
vpravo je rotor bezkartáčového stejnosměrného motoru s permanentními magnety. Je zde jasně vidět, že tyto konstrukce jsou rozdílné a dá se tedy předpokládat, že i magnetické pole se v těchto místech bude lišit. Co se týče zobrazení pole, tak hlavní rozdíl se projeví na zobrazení pole vektorů a siločar magnetické indukce. Na tyto obrázky se nyní podíváme.



Obr. 5. 6 Klec Asynchronního motoru



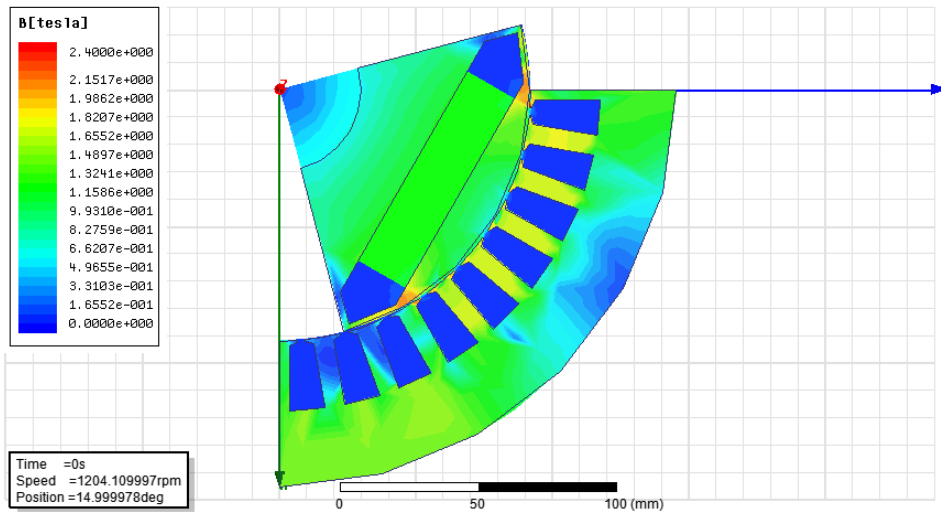
Rotor s hřídelí asynchronního motoru



Rotor BLDC motoru

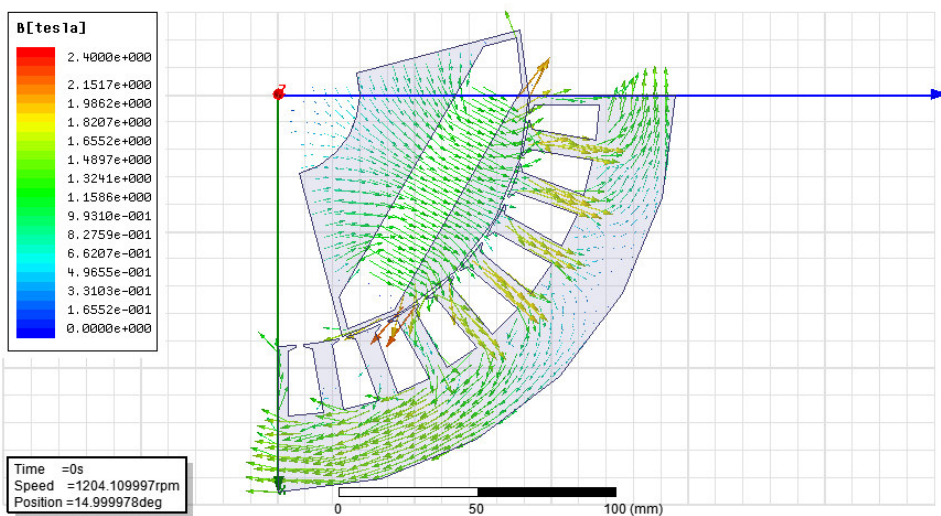
5.3 Maxwell3D - Magnetické pole motoru

Poslední částí analýzy je posouzení magnetického pole BLDC motoru. Jak získat jednotlivá zobrazení magnetického pole jsem již popisoval v kapitole 4. 4, dále se tím zabývat nebudeme. Je čistě na uživateli, jaké pole potřebuje (například podle zadání firmy nebo pro



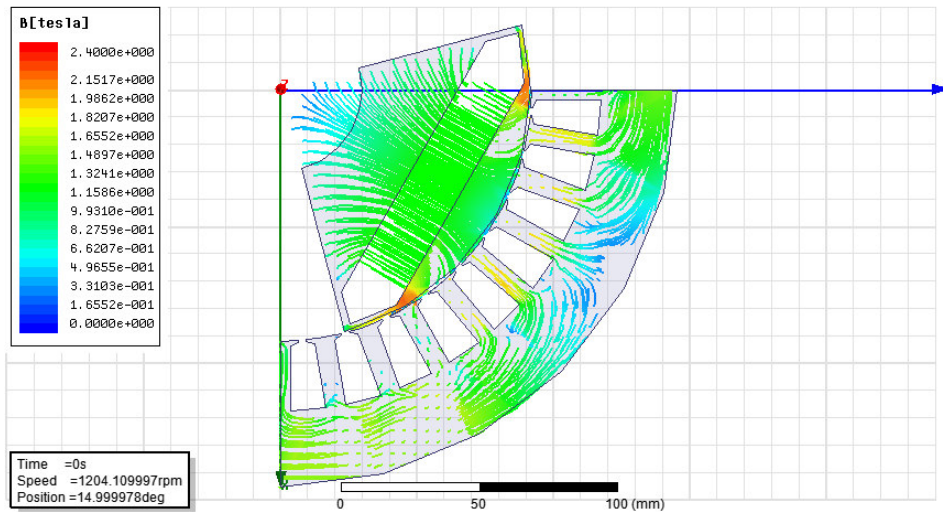
Obr. 5. 7 Pole magnetické indukce BLDC motoru

další výpočty či k určení kritických hodnot kvůli elektromagnetické kompatibilitě motoru a případnému návrhu stínění a podobně). Nejprve se podíváme na obrázek 5. 7, kde je průběh pole magnetické indukce. Stejně jako ostatní obrázky pole je i tento zobrazen v rovině XY, což znamená pohled shora na motor. Na obrázku je vidět, že rotor je pootočen o 15° v čase 0 s. Ve většině motoru se magnetická indukce pohybuje v hodnotách kolem 0, 6 až 1, 3 T. Kritická místa jsou mezi drážkami, když je proti nim permanentní magnet. Dalším kritickým místem je okraj magnetu. V těchto místech dosahuje magnetická indukce hodnot kolem 2 T.



Obr. 5. 8 Vektory magnetické indukce BLDC motoru

Lépe jsou kritické hodnoty vidět na obrázku 5. 8, který také zobrazuje magnetickou indukci, ale oproti předchozímu obrázku jsou zde zobrazeny vektory. Kritická místa zůstávají, zde však vidíme, že magnetická indukce směřuje z rotoru přes permanentní magnet do statoru.



Obr. 5. 9 Siločáry magnetické indukce BLDC motoru

Vzhledem k tomu, že magnetická indukce jde skrz magnet, je jasné, že mezi drážkami statoru bude její hodnota vyšší, protože právě mezi drážky statoru se musí rozmístit velké množství z permanentního magnetu. Ve statoru je již hodnota magnetické indukce menší, protože se pohybuje v daleko větším prostoru, než je mezi drážkami statoru. Posledním zajímavým obrázkem jsou siločáry magnetické indukce. Na obrázku 5. 9 vidíme známá kritická místa BLDC motoru. Tentokrát se jedná opět o pole magnetické indukce, ale zobrazené pomocí siločar. Na tomto obrázku sice nevidíme průběh magnetické indukce tak dobře, jako na obrázku 5. 8, kde jsou vektory, nicméně siločáry potvrzují předchozí tvrzení.

Závěr

V této bakalářské práci jsem se seznámil s programovým prostředím Maxwell3D, jenž slouží k návrhu točivých elektrických strojů a simulaci jejich funkce. Pomocí expertního modulu RMxprt jsem navrhnul alternativní provedení stroje. Vzhledem k tomu, že teorie bezkartáčových motorů s permanentními magnety nejsou zařazeny do bakalářského studijního plánu, jsem po poradě s vedoucím jsem postupoval při návrhu následovně:

1. navrhnul jsem třífázový asynchronní motor podle skript, kde je celý návrh detailně popsán
2. jako alternativu k tomuto návrhu jsem při zachování statorového vinutí a záměnou rotoru na čtyřpólový rotor navrhl bezkartáčový motor permanentními magnety vnitřního typu
3. rozměry motoru se tedy nezměnily, což je zjevně jedna z příčin, proč navržený BLDC motor nedosahuje obdobných parametrů jako asynchronní.

Z analýzy plyne, že BLDC motor má přibližně dvakrát větší maximální moment, respektive při rozběhu z nulových otáček má maximální moment, což je pro trakci výhodné. Oproti tomu asynchronní motor má sice menší moment, ale při frekvenčním řízení ho zle provozovat na momentu zvratu. Co se týče účinnosti, asynchronní motor je na tom lépe (asi 94 % při jmenovitých otáčkách) a BLDC motor má při stejných otáčkách účinnost zhruba 60 %. Nízká účinnost je způsobena vysokými ztrátami, jež způsobuje hned několik aspektů. Problém spočívá v zachování statorové konstrukce a vinutí na statoru. Těmito problémy bych se chtěl dále zabývat v dalších fázích studia. Nabízí se několik možných změn v navrhnutém BLDC motoru. Jednak bych se zaměřil na změnu statoru včetně vinutí a jednak bych se chtěl detailněji věnovat rotoru, resp. přidáním permanentních magnetů nebo změnou typu rotoru na vnější typ.

Literatura

- [1] ANONYM,. Neodymium-Iron-Boron Magnets: NEOREC series [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://product.tdk.com/en/catalog/datasheets/e331.pdf>
- [2] ANSOFT CORPORATION. User's guide – Maxwell 3D. Pittsburgh, USA: Ansoft, 2009.
- [3] GIERAS, Jacek F. Permanent Magnet Motor Technology. Third Edition. London: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4200-6440-7.
- [4] HRABOVCOVÁ, Valéria, Ladislav JONOUŠEK, Pavol RAFAJDUS a Miroslav LIČKO. Moderné Elektrické Stroje. EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2001. ISBN 80-7100-809-5.
- [5] KOTAL, Miroslav, Petr VOŽENÍLEK, Petr NOVOTNÝ. Příklady výpočtu elektrických strojů točivých. 4. vydání. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1988.
- [6] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVA. Design of Rotating Electrical Machines. 2nd Edition. UK: Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-58157-5.

Přílohy

Příloha A - Design sheet (IM)

Three-Phase Induction Motor Design

File: Setup2.res

GENERAL DATA

| | |
|----------------------------|----------|
| Given Output Power (kW): | 13 |
| Rated Voltage (V): | 400 |
| Winding Connection: | Wye |
| Number of Poles: | 4 |
| Given Speed (rpm): | 1450 |
| Frequency (Hz): | 50 |
| Stray Loss (W): | 0 |
| Frictional Loss (W): | 96.6667 |
| Windage Loss (W): | 45.1648 |
| Type of Load: | Fan Load |
| Operating Temperature (C): | 75 |

STATOR DATA

| | |
|---------------------------------|----------|
| Number of Stator Slots: | 36 |
| Outer Diameter of Stator (mm): | 298 |
| Inner Diameter of Stator (mm): | 184 |
| Type of Stator Slot: | 3 |
| Stator Slot | |
| hs0 (mm): | 0.6 |
| hs1 (mm): | 1.08 |
| hs2 (mm): | 23.82 |
| bs0 (mm): | 3.1 |
| bs1 (mm): | 9 |
| bs2 (mm): | 13.15 |
| rs (mm): | 0 |
| Top Tooth Width (mm): | 7.36147 |
| Bottom Tooth Width (mm): | 7.37936 |
| Length of Stator Core (mm): | 123 |
| Stacking Factor of Stator Core: | 0.97 |
| Type of Steel: | DW310_35 |

| | |
|--|---------|
| Number of lamination sectors | 1 |
| Press board thickness (mm): | 0 |
| Magnetic press board | No |
| Number of Parallel Branches: | 1 |
| Type of Coils: | 21 |
| Coil Pitch: | 9 |
| Number of Conductors per Slot: | 20 |
| Number of Wires per Conductor: | 4 |
| Wire Diameter (mm): | 1.45 |
| Wire Wrap Thickness (mm): | 0.11 |
| Wedge Thickness (mm): | 0 |
| Slot Liner Thickness (mm): | 0 |
| Layer Insulation (mm): | 0 |
| Slot Area (mm ²): | 272.2 |
| Net Slot Area (mm ²): | 263.806 |
| Slot Fill Factor (%): | 73.7996 |
| Limited Slot Fill Factor (%): | 75 |
| Wire Resistivity (ohm.mm ² /m): | 0.0217 |
| Top Free Space in Slot (%): | 0 |
| Bottom Free Space in Slot (%): | 0 |
| Conductor Length Adjustment (mm): | 0 |
| End Length Correction Factor | 1 |
| End Leakage Reactance Correction Factor | 1 |
| ROTOR DATA | |
| Number of Rotor Slots: | 46 |
| Air Gap (mm): | 0.45 |
| Inner Diameter of Rotor (mm): | 60 |
| Type of Rotor Slot: | 3 |
| Rotor Slot | |
| hs0 (mm): | 1 |
| hs01 (mm): | 0.4 |
| hs1 (mm): | 1.4 |
| hs2 (mm): | 25.3 |
| bs0 (mm): | 1.5 |
| bs1 (mm): | 6 |
| bs2 (mm): | 3.5 |
| rs (mm): | 1 |
| Cast Rotor: | No |
| Half Slot: | No |
| Length of Rotor (mm): | 123 |
| Stacking Factor of Rotor Core: | 0.97 |

| | |
|---|-----------|
| Type of Steel: | DW310_35 |
| Skew Width: | 0.95 |
| End Length of Bar (mm): | 0 |
| Height of End Ring (mm): | 33 |
| Width of End Ring (mm): | 14 |
| Resistivity of Rotor Bar at 75 Centigrade (ohm.mm ² /m): | 0.0277778 |
| Resistivity of Rotor Ring at 75 Centigrade (ohm.mm ² /m): | 0.0277778 |
| Magnetic Shaft: | Yes |

MATERIAL CONSUMPTION

| | |
|---|---------|
| Armature Copper Density (kg/m ³): | 8900 |
| Rotor Bar Material Density (kg/m ³): | 8900 |
| Rotor Ring Material Density (kg/m ³): | 8900 |
| Armature Core Steel Density (kg/m ³): | 7650 |
| Rotor Core Steel Density (kg/m ³): | 7650 |
| Armature Copper Weight (kg): | 14.2427 |
| Rotor Bar Material Weight (kg): | 6.44035 |
| Rotor Ring Material Weight (kg): | 3.82619 |
| Armature Core Steel Weight (kg): | 30.4455 |
| Rotor Core Steel Weight (kg): | 16.0824 |
| Total Net Weight (kg): | 71.0372 |
| Armature Core Steel Consumption (kg): | 58.4238 |
| Rotor Core Steel Consumption (kg): | 24.2697 |

RATED-LOAD OPERATION

| | |
|--|----------|
| Stator Resistance (ohm): | 0.26532 |
| Stator Resistance at 20C (ohm): | 0.218247 |
| Stator Leakage Reactance (ohm): | 0.784461 |
| Rotor Resistance (ohm): | 0.151244 |
| Rotor Resistance at 20C (ohm): | 0.124411 |
| Rotor Leakage Reactance (ohm): | 0.711195 |
| Resistance Corresponding to Iron-Core Loss (ohm): | 1064.17 |
| Magnetizing Reactance (ohm): | 35.2455 |
| Stator Phase Current (A): | 23.0565 |
| Current Corresponding to Iron-Core Loss (A): | 0.20545 |
| Magnetizing Current (A): | 6.20319 |
| Rotor Phase Current (A): | 21.5744 |

| | |
|--|-------------|
| Copper Loss of Stator Winding (W): | 423.133 |
| Copper Loss of Rotor Winding (W): | 211.191 |
| Iron-Core Loss (W): | 134.755 |
| Frictional and Windage Loss (W): | 146.293 |
| Stray Loss (W): | 0 |
| Total Loss (W): | 915.373 |
| Input Power (kW): | 14.6737 |
| Output Power (kW): | 13.7583 |
| MECHANICAL AND ELECTRICAL PERFORMANCE | |
| Mechanical Shaft Torque (N.m): | 88.9185 |
| Efficiency (%): | 93.7618 |
| Power Factor: | 0.918598 |
| Rated Slip: | 0.0149613 |
| Rated Shaft Speed (rpm): | 1477.56 |
| NO-LOAD OPERATION | |
| No-Load Stator Resistance (ohm): | 0.26532 |
| No-Load Stator Leakage Reactance (ohm): | 0.788895 |
| No-Load Rotor Resistance (ohm): | 0.151237 |
| No-Load Rotor Leakage Reactance (ohm): | -27.6781 |
| No-Load Stator Phase Current (A): | 6.41442 |
| No-Load Iron-Core Loss (W): | 143.696 |
| No-Load Input Power (W): | 331.44 |
| No-Load Power Factor: | 0.0745807 |
| No-Load Slip: | 0.000153412 |
| No-Load Shaft Speed (rpm): | 1499.77 |
| BREAK-DOWN OPERATION | |
| Break-Down Slip: | 0.15 |
| Break-Down Torque (N.m): | 374.002 |
| Break-Down Torque Ratio: | 4.20612 |
| Break-Down Phase Current (A): | 141.182 |
| LOCKED-ROTOR OPERATION | |
| Locked-Rotor Torque (N.m): | 158.212 |
| Locked-Rotor Phase Current (A): | 217.479 |
| Locked-Rotor Torque Ratio: | 1.77929 |
| Locked-Rotor Current Ratio: | 9.43245 |
| Locked-Rotor Stator Resistance (ohm): | 0.26532 |
| Locked-Rotor Stator Leakage Reactance (ohm): | 0.536954 |
| Locked-Rotor Rotor Resistance (ohm): | 0.180267 |

| | |
|---|-----------|
| Locked-Rotor Rotor | |
| Leakage Reactance (ohm): | 0.433385 |
| DETAILED DATA AT RATED OPERATION | |
| Stator Slot Leakage Reactance (ohm): | 0.290991 |
| Stator End-Winding Leakage Reactance (ohm): | 0.186044 |
| Stator Differential Leakage Reactance (ohm): | 0.307423 |
| Rotor Slot Leakage Reactance (ohm): | 0.286126 |
| Rotor End-Winding Leakage Reactance (ohm): | 0.0894721 |
| Rotor Differential Leakage Reactance (ohm): | 0.237453 |
| Skewing Leakage Reactance (ohm): | 0.0981193 |
| Stator Winding Factor: | 0.959795 |
| Stator-Teeth Flux Density (Tesla): | 1.24 |
| Rotor-Teeth Flux Density (Tesla): | 1.58434 |
| Stator-Yoke Flux Density (Tesla): | 1.17696 |
| Rotor-Yoke Flux Density (Tesla): | 0.586773 |
| Air-Gap Flux Density (Tesla): | 0.695649 |
| Stator-Teeth Ampere Turns (A.T): | 63.4593 |
| Rotor-Teeth Ampere Turns (A.T): | 82.5889 |
| Stator-Yoke Ampere Turns (A.T): | 12.4925 |
| Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T): | 1.16267 |
| Air-Gap Ampere Turns (A.T): | 290.871 |
| Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Stator Yoke: | 0.651607 |
| Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Rotor Yoke: | 0.7 |
| Saturation Factor for Teeth: | 1.50211 |
| Saturation Factor for Teeth & Yoke: | 1.54905 |
| Induced-Voltage Factor: | 0.946715 |
| Stator Current Density (A/mm ²): | 3.49066 |
| Specific Electric Loading (A/mm): | 28.7183 |
| Stator Thermal Load (A ² /mm ³): | 100.246 |
| Rotor Bar Current Density (A/mm ²): | 2.54315 |
| Rotor Ring Current Density (A/mm ²): | 2.57602 |
| Half-Turn Length of | |

| | |
|----------------------|---------|
| Stator Winding (mm): | 336.499 |
|----------------------|---------|

WINDING ARRANGEMENT

The 3-phase, 2-layer winding can be arranged in 9 slots as below:

AAZZZBBB

| | |
|------------------------------------|-----|
| Angle per slot (elec. degrees): | 20 |
| Phase-A axis (elec. degrees): | 110 |
| First slot center (elec. degrees): | 0 |

TRANSIENT FEA INPUT DATA

| | |
|---|--------------|
| For one phase of the Stator Winding: | |
| Number of Turns: | 120 |
| Parallel Branches: | 1 |
| Terminal Resistance (ohm): | 0.26532 |
| End Leakage Inductance (H): | 0.000592195 |
| For Rotor End Ring Between Two Bars of One Side: | |
| Equivalent Ring Resistance (ohm): | 6.08139e-007 |
| Equivalent Ring Inductance (H): | 6.40104e-009 |
| 2D Equivalent Value: | |
| Equivalent Model Depth (mm): | 123 |
| Equivalent Stator Stacking Factor: | 0.97 |
| Equivalent Rotor Stacking Factor: | 0.97 |
| Estimated Rotor Inertial Moment (kg m ²): | 0.105865 |

Příloha B - Design sheet (BLDC)

BRUSHLESS PERMANENT MAGNET DC MOTOR DESIGN

File: Setup2.res

GENERAL DATA

| | |
|---|----------|
| Rated Output Power (kW): | 13 |
| Rated Voltage (V): | 400 |
| Number of Poles: | 4 |
| Given Rated Speed (rpm): | 1450 |
| Frictional Loss (W): | 96.6667 |
| Windage Loss (W): | 45.1648 |
| Rotor Position: | Inner |
| Type of Load: | Fan Load |
| Type of Circuit: | Y3 |
| Lead Angle of Trigger in Elec. Degrees: | 60 |
| Trigger Pulse Width in Elec. Degrees: | 120 |
| One-Transistor Voltage Drop (V): | 2.5 |
| One-Diode Voltage Drop (V): | 2.5 |
| Operating Temperature (C): | 75 |
| Maximum Current for CCC (A): | 0 |
| Minimum Current for CCC (A): | 0 |

STATOR DATA

| | |
|--------------------------------|-----|
| Number of Stator Slots: | 36 |
| Outer Diameter of Stator (mm): | 291 |
| Inner Diameter of Stator (mm): | 184 |

| | |
|----------------------|-------|
| Type of Stator Slot: | 3 |
| Stator Slot | |
| hs0 (mm): | 0.6 |
| hs1 (mm): | 1.08 |
| hs2 (mm): | 23.82 |
| bs0 (mm): | 3.1 |
| bs1 (mm): | 9 |
| bs2 (mm): | 13.15 |
| rs (mm): | 0 |

| | |
|--------------------------|---------|
| Top Tooth Width (mm): | 7.36147 |
| Bottom Tooth Width (mm): | 7.37936 |

| | |
|-----------------------------------|----------|
| Skew Width (Number of Slots) | 0 |
| Length of Stator Core (mm): | 123 |
| Stacking Factor of Stator Core: | 0.95 |
| Type of Steel: | DW310_35 |
| Slot Insulation Thickness (mm): | 2 |
| Layer Insulation Thickness (mm): | 2 |
| End Length Adjustment (mm): | 10 |
| Number of Parallel Branches: | 1 |
| Number of Conductors per Slot: | 16 |
| Type of Coils: | 21 |
| Average Coil Pitch: | 9 |
| Number of Wires per Conductor: | 1 |
| Wire Diameter (mm): | 1.45 |
| Wire Wrap Thickness (mm): | 0.11 |
| Slot Area (mm ²): | 272.2 |
| Net Slot Area (mm ²): | 91.7156 |
| Limited Slot Fill Factor (%): | 75 |
| Stator Slot Fill Factor (%): | 42.4547 |
| Coil Half-Turn Length (mm): | 369.027 |

ROTOR DATA

| | |
|--------------------------------|----------|
| Minimum Air Gap (mm): | 0.5 |
| Inner Diameter (mm): | 60 |
| Length of Rotor (mm): | 123 |
| Stacking Factor of Iron Core: | 0.95 |
| Type of Steel: | DW310_35 |
| Bridge (mm): | 2 |
| Rib (mm): | 5 |
| Mechanical Pole Embrace: | 0.7 |
| Electrical Pole Embrace: | 0.719011 |
| Max. Thickness of Magnet (mm): | 20 |
| Width of Magnet (mm): | 80 |
| Type of Magnet: | NdFe35 |
| Type of Rotor: | 5 |
| Magnetic Shaft: | Yes |

PERMANENT MAGNET DATA

| | |
|--|----------|
| Residual Flux Density (Tesla): | 1.23 |
| Coercive Force (kA/m): | 890 |
| Maximum Energy Density (kJ/m ³): | 273.675 |
| Relative Recoil Permeability: | 1.09981 |
| Demagnetized Flux Density (Tesla): | 0.804335 |

| | |
|---------------------------------------|------|
| Recoil Residual Flux Density (Tesla): | 1.23 |
| Recoil Coercive Force (kA/m): | 890 |

MATERIAL CONSUMPTION

| | |
|---|---------|
| Armature Copper Density (kg/m ³): | 8900 |
| Permanent Magnet Density (kg/m ³): | 7400 |
| Armature Core Steel Density (kg/m ³): | 7650 |
| Rotor Core Steel Density (kg/m ³): | 7650 |
| Armature Copper Weight (kg): | 3.1239 |
| Permanent Magnet Weight (kg): | 5.82528 |
| Armature Core Steel Weight (kg): | 26.9231 |
| Rotor Core Steel Weight (kg): | 13.4393 |
| Total Net Weight (kg): | 49.3116 |
| Armature Core Steel Consumption (kg): | 53.4961 |
| Rotor Core Steel Consumption (kg): | 23.7693 |

STEADY STATE PARAMETERS

| | |
|---|------------|
| Stator Winding Factor: | 0.959795 |
| D-Axis Reactive Inductance Lad (H): | 0.00337275 |
| Q-Axis Reactive Inductance Laq (H): | 0.0479167 |
| D-Axis Inductance L1+Lad(H): | 0.00506369 |
| Q-Axis Inductance L1+Laq(H): | 0.0496076 |
| Armature Leakage Inductance L1 (H): | 0.00169094 |
| Zero-Sequence Inductance L0 (H): | 0.00169094 |
| Armature Phase Resistance R1 (ohm): | 0.931094 |
| Armature Phase Resistance at 20C (ohm): | 0.7659 |
| D-Axis Time Constant (s): | 0.00362235 |
| Q-Axis Time Constant (s): | 0.0514627 |
| Ideal Back-EMF Constant KE (Vs/rad): | 1.19 |
| Start Torque Constant KT (Nm/A): | 3.81273 |
| Rated Torque Constant KT (Nm/A): | 2.24255 |

NO-LOAD MAGNETIC DATA

| | |
|------------------------------------|----------|
| Stator-Teeth Flux Density (Tesla): | 2.04071 |
| Stator-Yoke Flux Density (Tesla): | 1.58005 |
| Rotor-Yoke Flux Density (Tesla): | 0.719371 |
| Air-Gap Flux Density (Tesla): | 0.802457 |
| Magnet Flux Density (Tesla): | 1.14877 |

| | |
|------------------------------|--------------|
| Stator-Teeth By-Pass Factor: | 0.0283918 |
| Stator-Yoke By-Pass Factor: | 0.00014029 |
| Rotor-Yoke By-Pass Factor: | 7.00616e-006 |

| | |
|----------------------------------|----------|
| Stator-Teeth Ampere Turns (A.T): | 702.254 |
| Stator-Yoke Ampere Turns (A.T): | 97.415 |
| Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T): | 3.12004 |
| Air-Gap Ampere Turns (A.T): | 370.917 |
| Magnet Ampere Turns (A.T): | -1175.51 |

| | |
|--|----------|
| Armature Reactive Ampere Turns at Start Operation (A.T): | 5895.77 |
| Leakage-Flux Factor: | 1.09331 |
| Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Stator Yoke: | 0.311391 |
| Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Rotor Yoke: | 0.858591 |

| | |
|-----------------------|---------|
| No-Load Speed (rpm): | 2620.91 |
| Cogging Torque (N.m): | 4.88135 |

FULL-LOAD DATA

| | |
|---|---------|
| Average Input Current (A): | 26.7199 |
| Root-Mean-Square Armature Current (A): | 31.3009 |
| Armature Thermal Load (A ² /mm ³): | 591.212 |
| Specific Electric Loading (A/mm): | 31.1898 |
| Armature Current Density (A/mm ²): | 18.9553 |
| Frictional and Windage Loss (W): | 106.137 |
| Iron-Core Loss (W): | 186.408 |
| Armature Copper Loss (W): | 2736.71 |
| Transistor Loss (W): | 171.206 |
| Diode Loss (W): | 37.9962 |
| Total Loss (W): | 3238.46 |
| Output Power (W): | 7449.48 |
| Input Power (W): | 10687.9 |
| Efficiency (%): | 69.6999 |

| | |
|---------------------|---------|
| Rated Speed (rpm): | 1204.11 |
| Rated Torque (N.m): | 59.079 |

| | |
|----------------------------|---------|
| Locked-Rotor Torque (N.m): | 806.75 |
| Locked-Rotor Current (A): | 211.761 |

WINDING ARRANGEMENT

The 3-phase, 2-layer winding can be arranged in 18 slots as below:

AAZZZBBBXXXCCYY

| | |
|------------------------------------|-----|
| Angle per slot (elec. degrees): | 20 |
| Phase-A axis (elec. degrees): | 110 |
| First slot center (elec. degrees): | 0 |

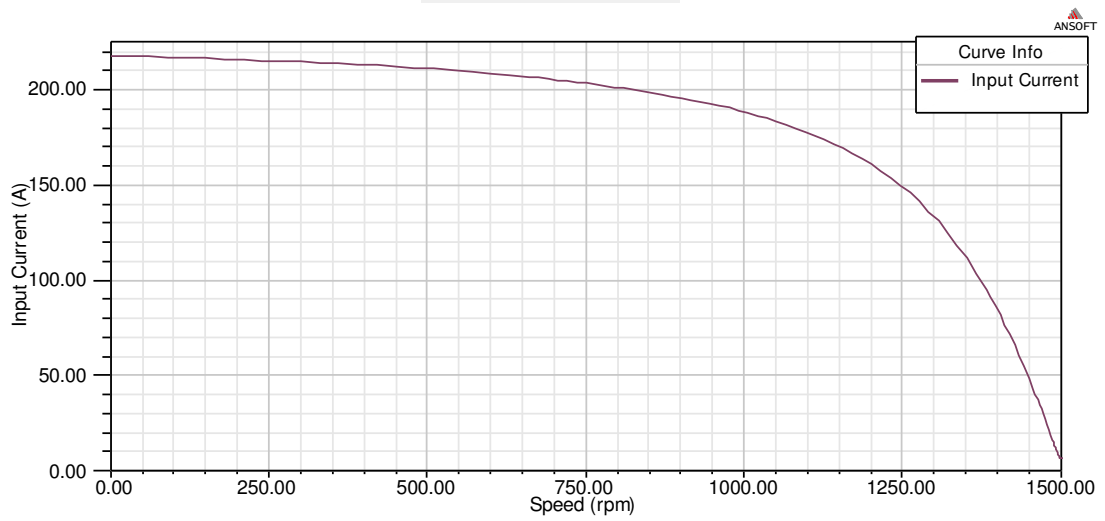
TRANSIENT FEA INPUT DATA

For Armature Winding:

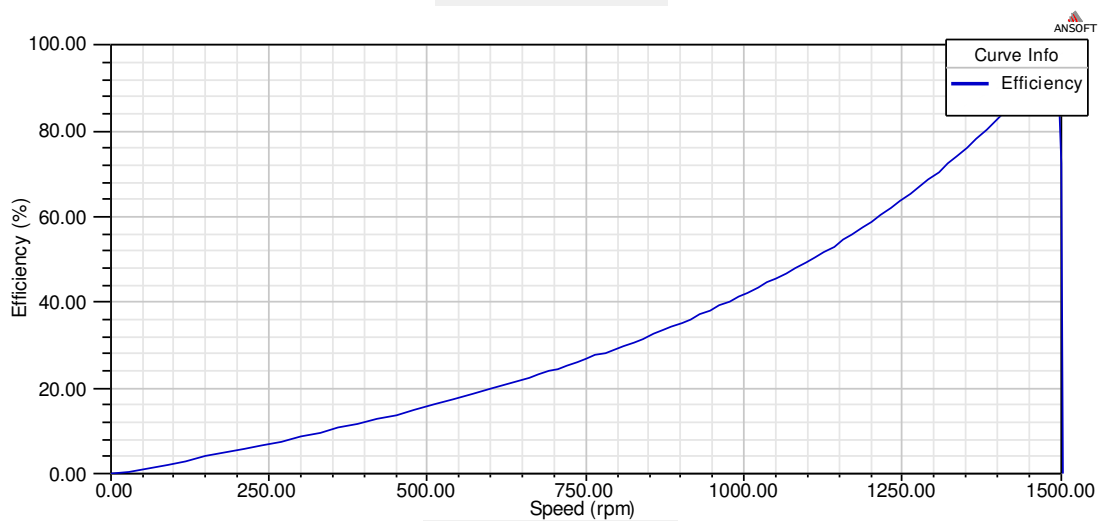
| | |
|---|-------------|
| Number of Turns: | 96 |
| Parallel Branches: | 1 |
| Terminal Resistance (ohm): | 0.931094 |
| End Leakage Inductance (H): | 0.000938418 |
| 2D Equivalent Value: | |
| Equivalent Model Depth (mm): | 123 |
| Equivalent Stator Stacking Factor: | 0.95 |
| Equivalent Rotor Stacking Factor: | 0.95 |
| Equivalent Br (Tesla): | 1.23 |
| Equivalent Hc (kA/m): | 890 |
| Estimated Rotor Moment of Inertia (kg m ²): | 0.105634 |

Příloha C - Grafy (IM)

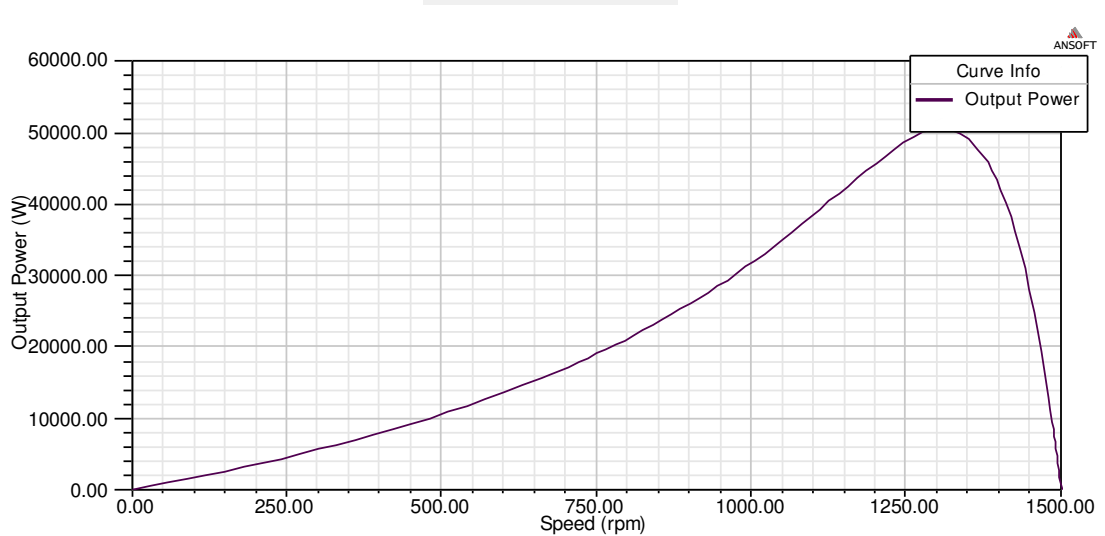
Input Current vs Speed



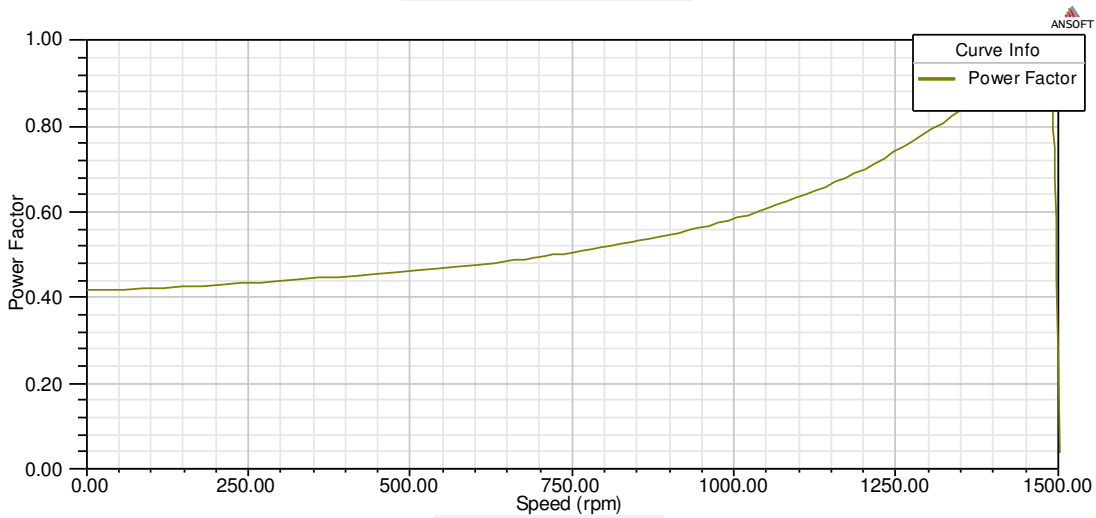
Efficiency vs Speed



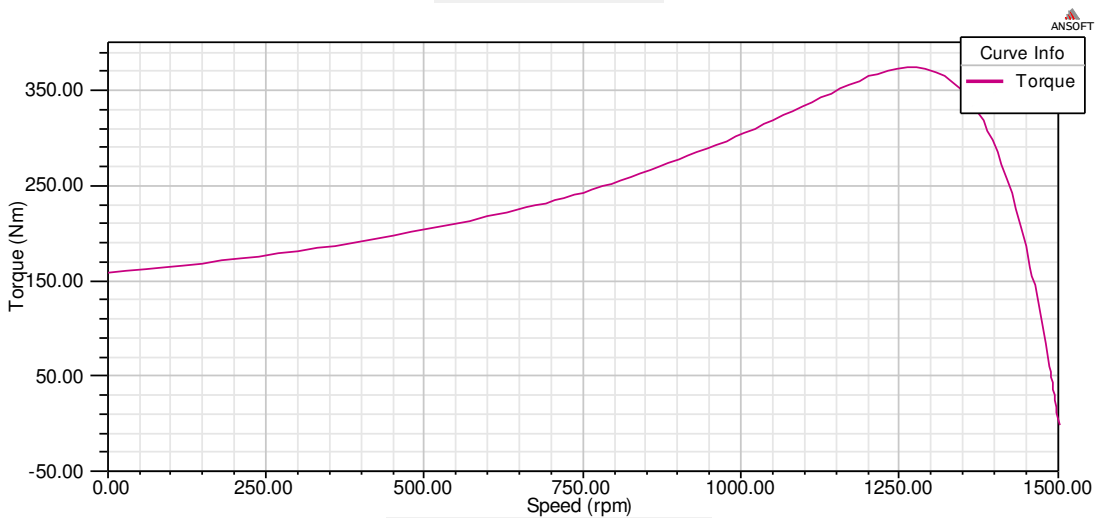
Output Power vs Speed



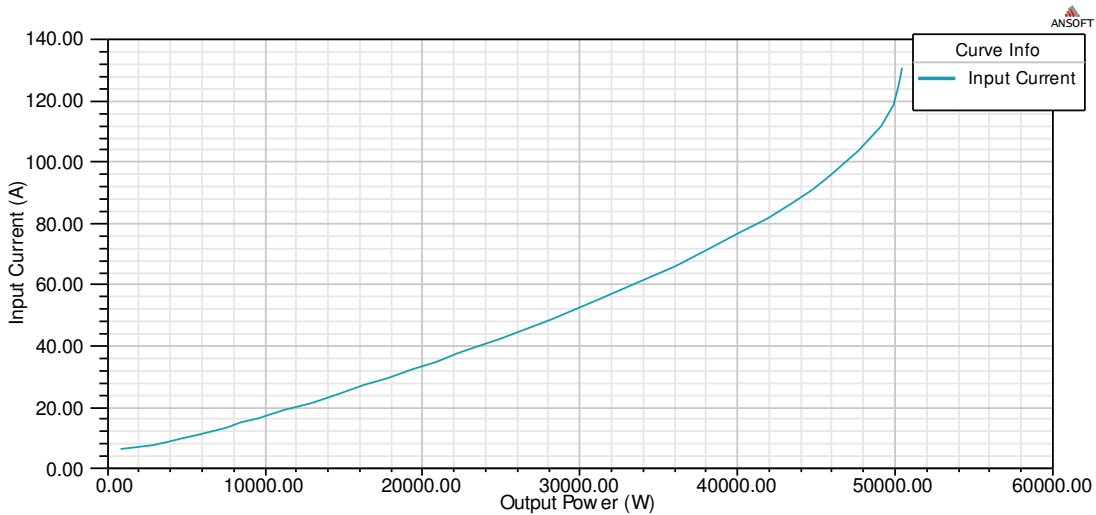
Power Factor vs Speed



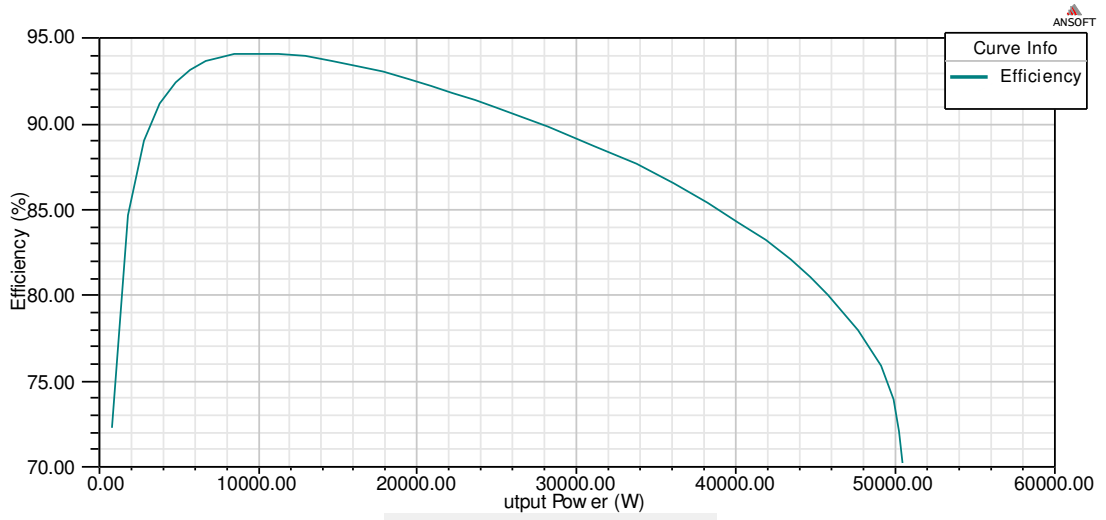
Torque vs Speed



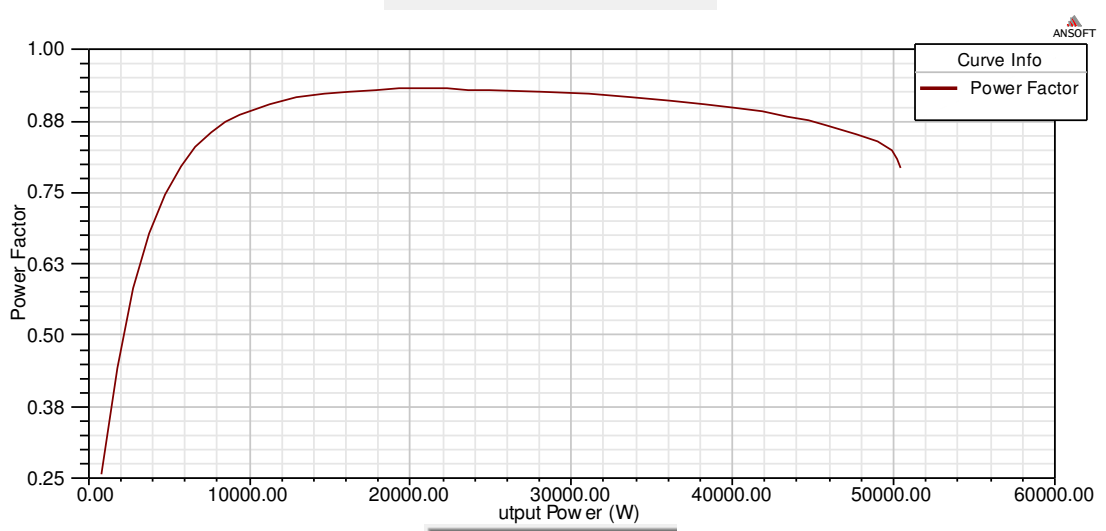
Input Current vs Output Power



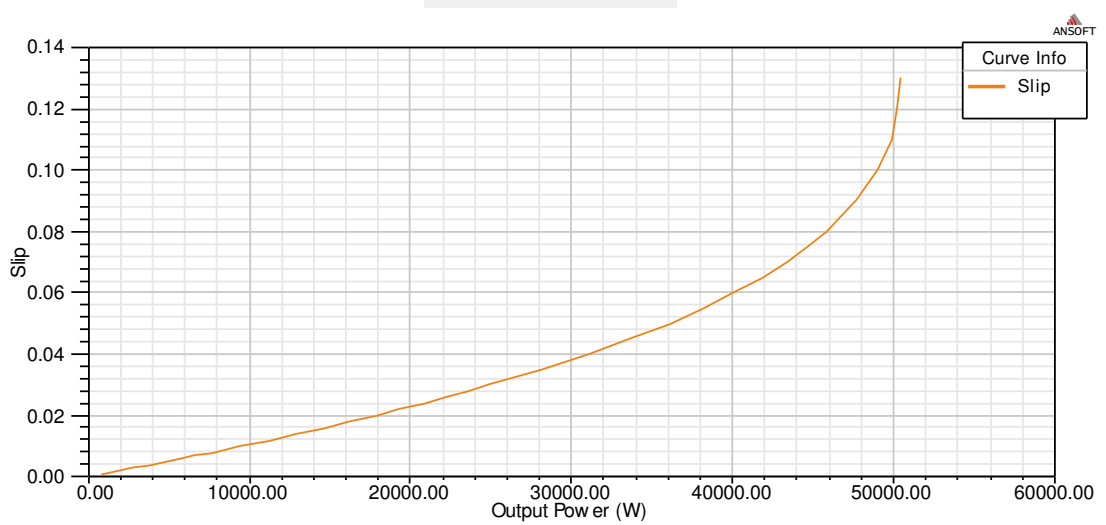
Efficiency vs Output Power



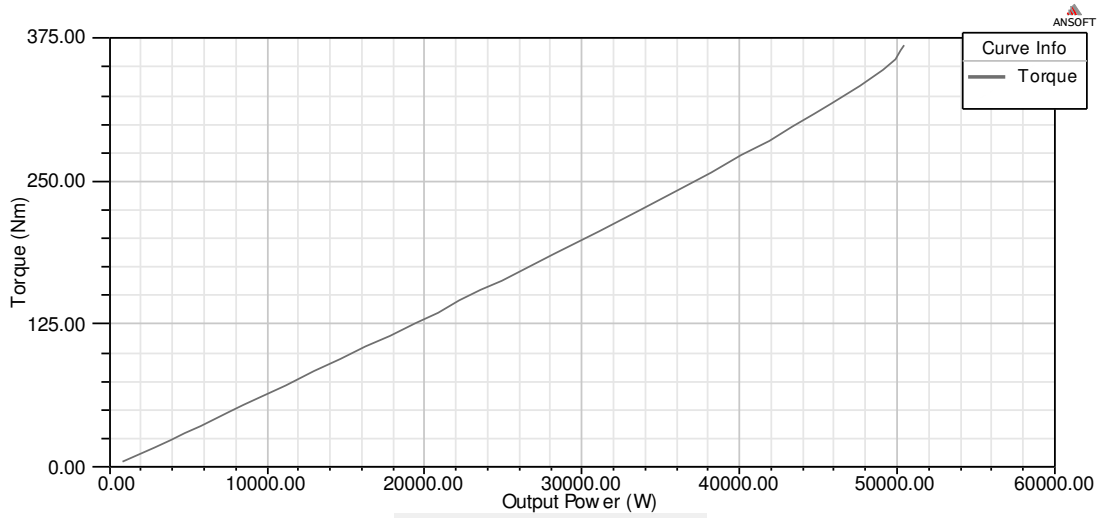
Power Factor vs Output Power



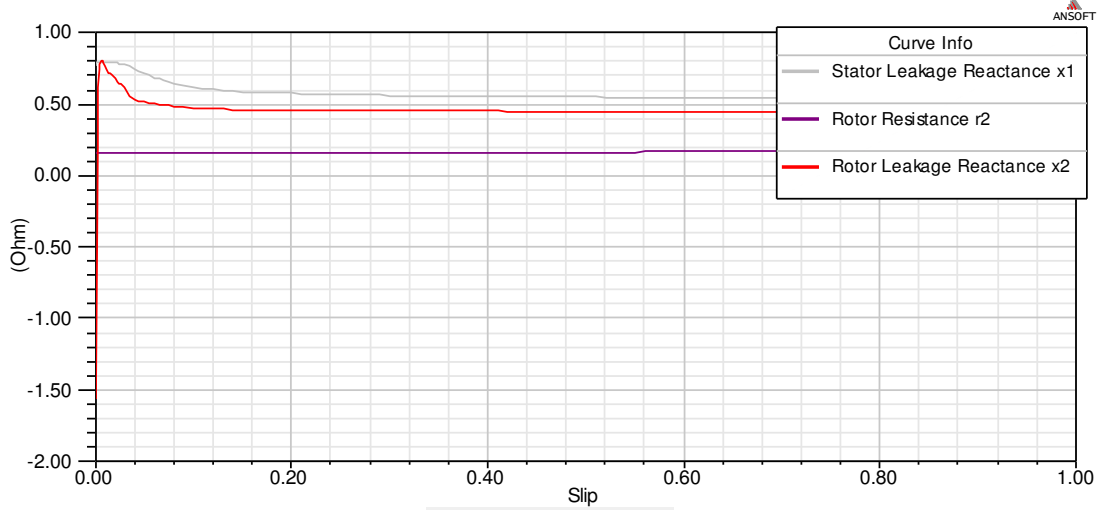
Slip vs Output Power



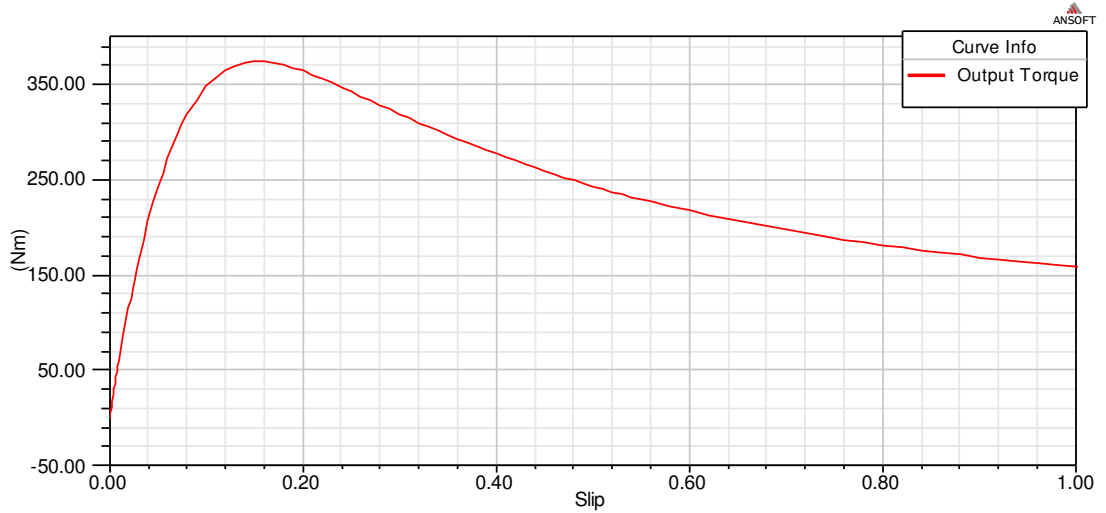
Torque vs Output Power



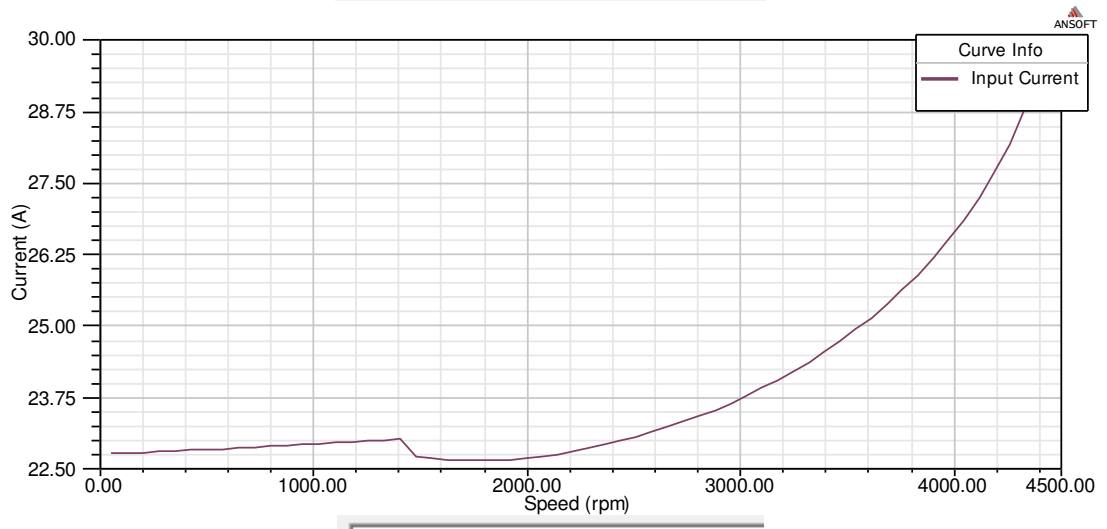
Leakage Impedance vs Slip



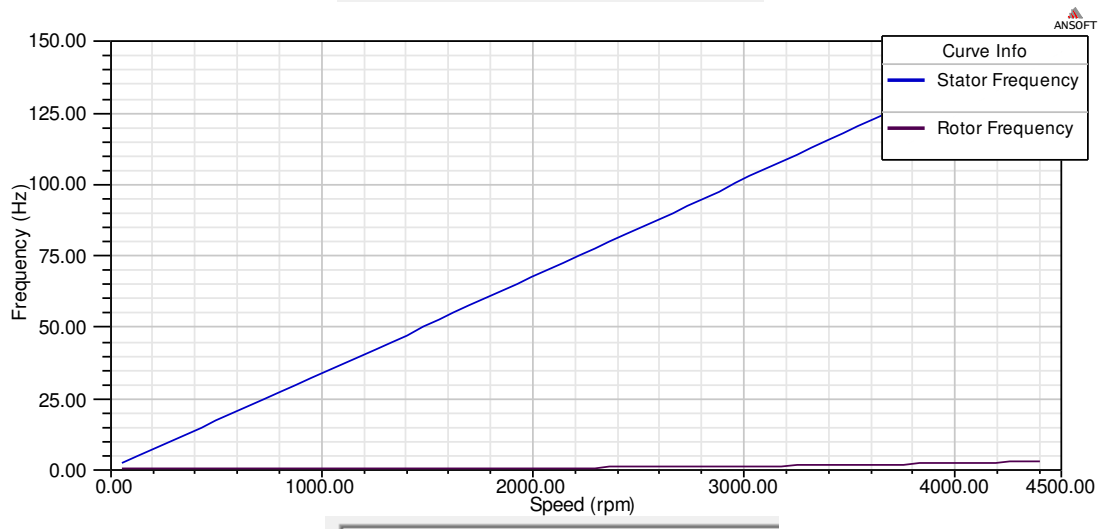
Output Torque vs Slip



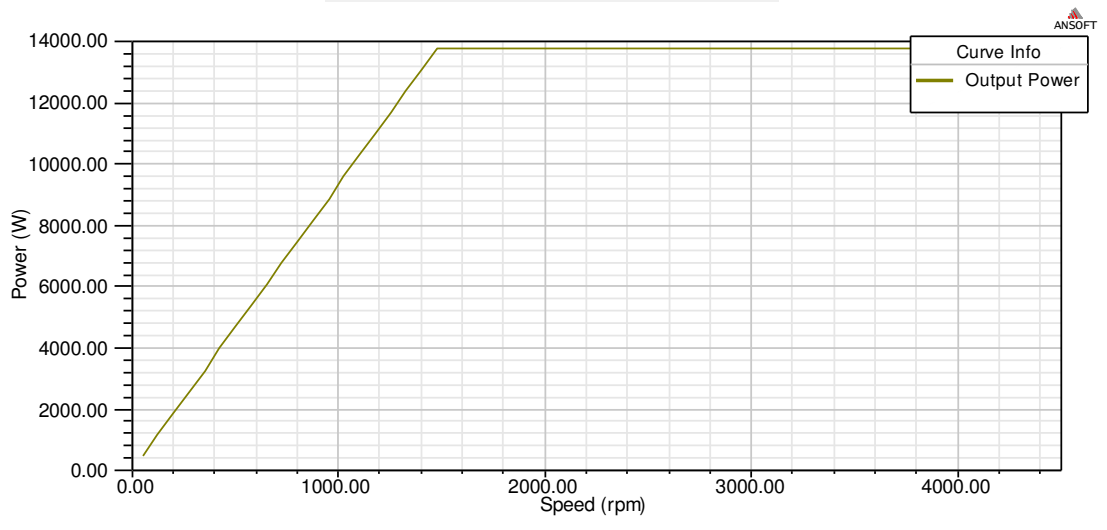
Input Current with Flux-Weakening Control



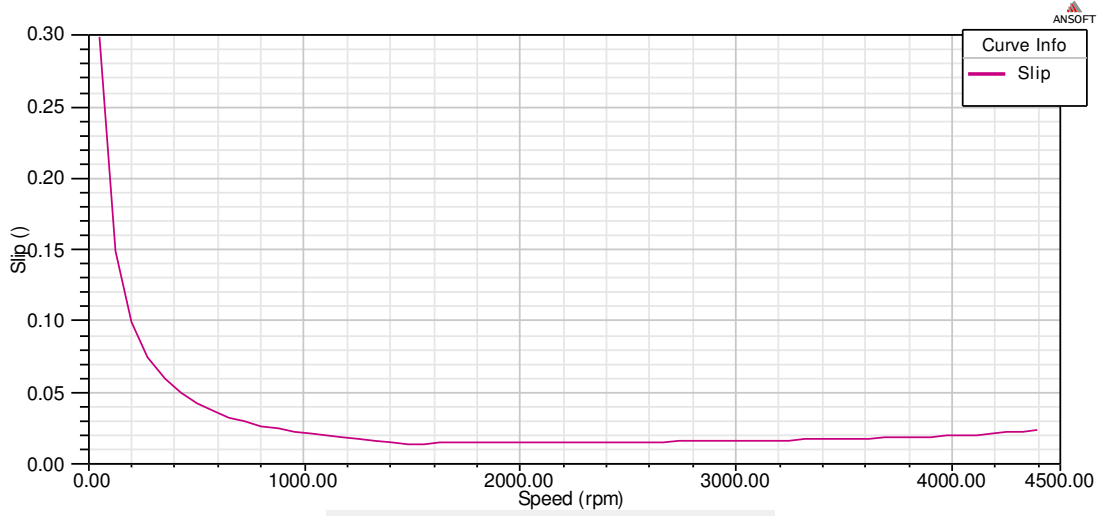
Frequency with Flux-Weakening Control



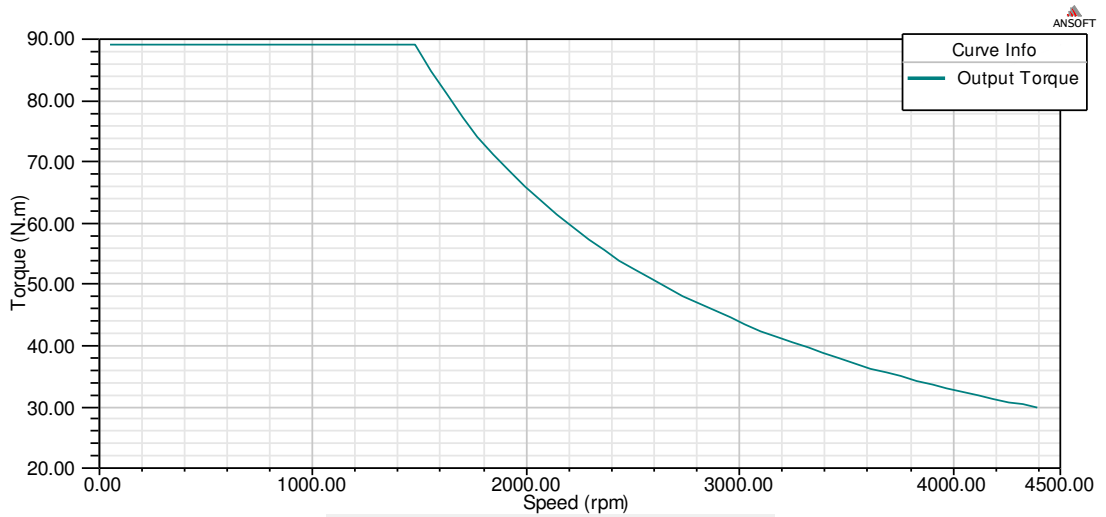
Output Power with Flux-Weakening Control



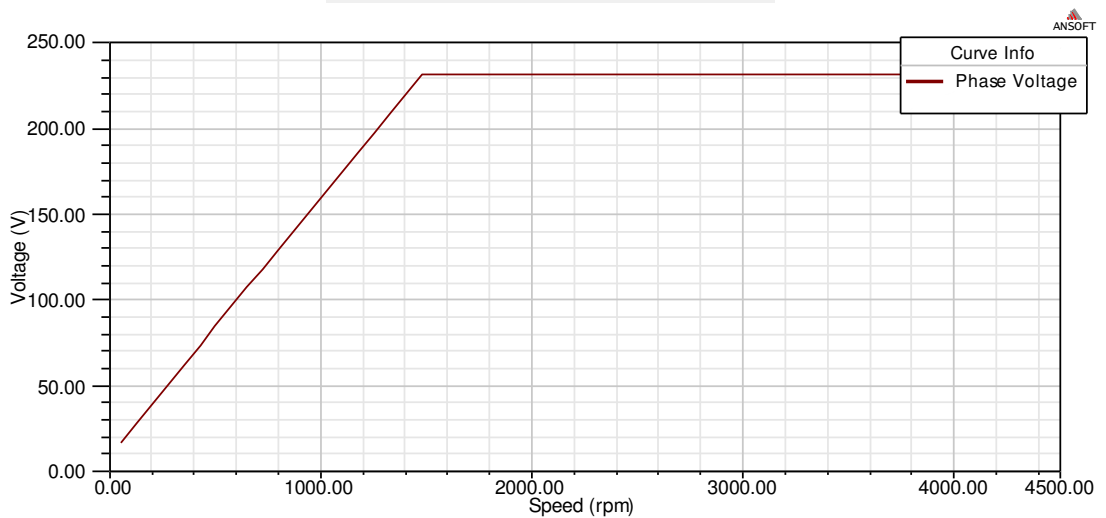
Slip with Flux-Weakening Control



Output Torque with Flux-Weakening Control

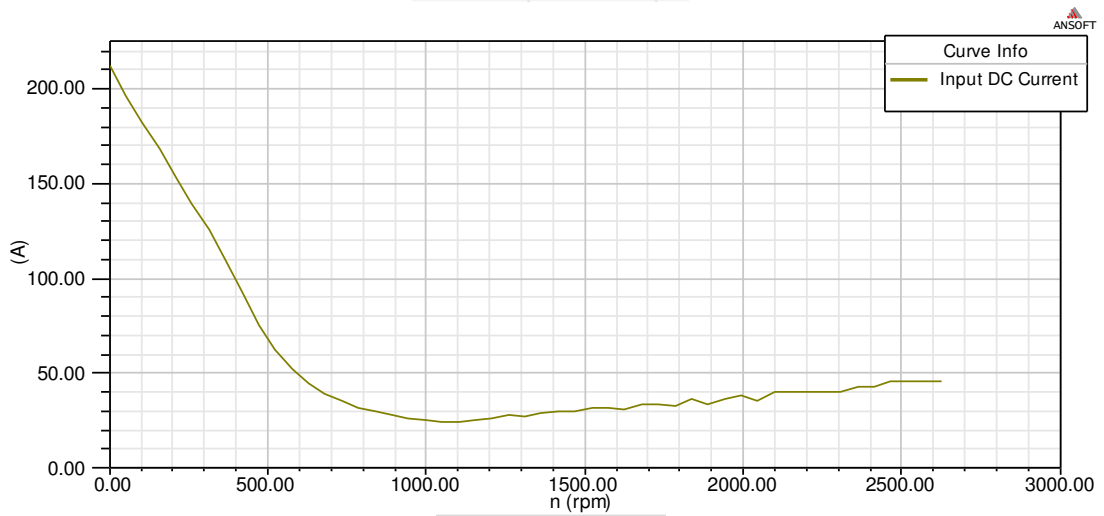


Phase Voltage with Flux-Weakening Control

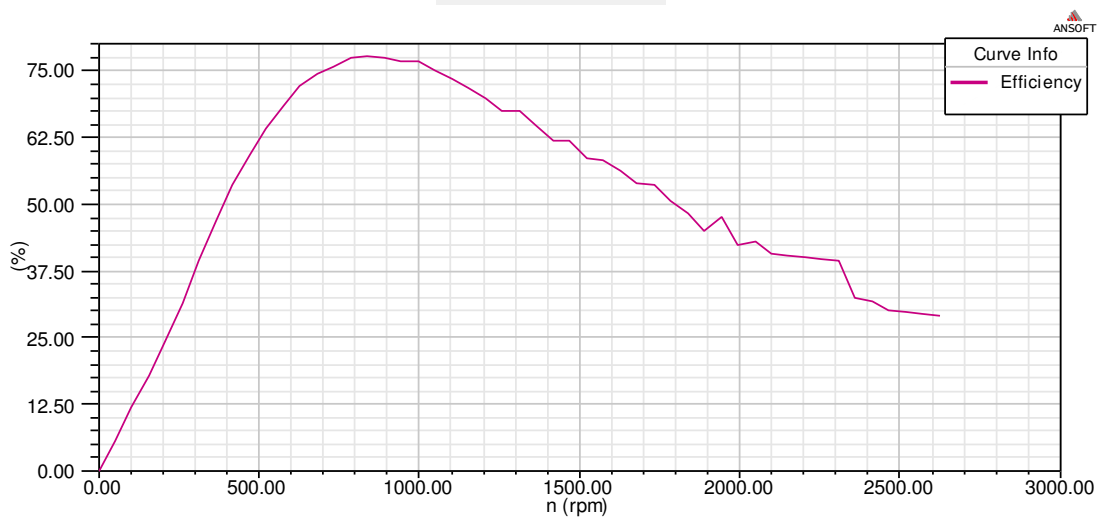


Příloha D - Grafy (BLDC)

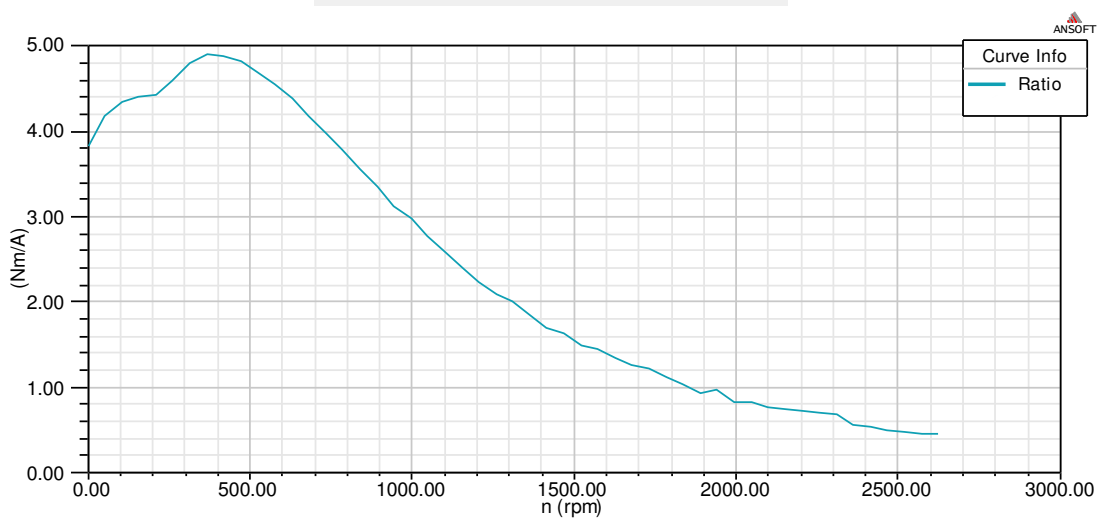
Input DC Current vs Speed



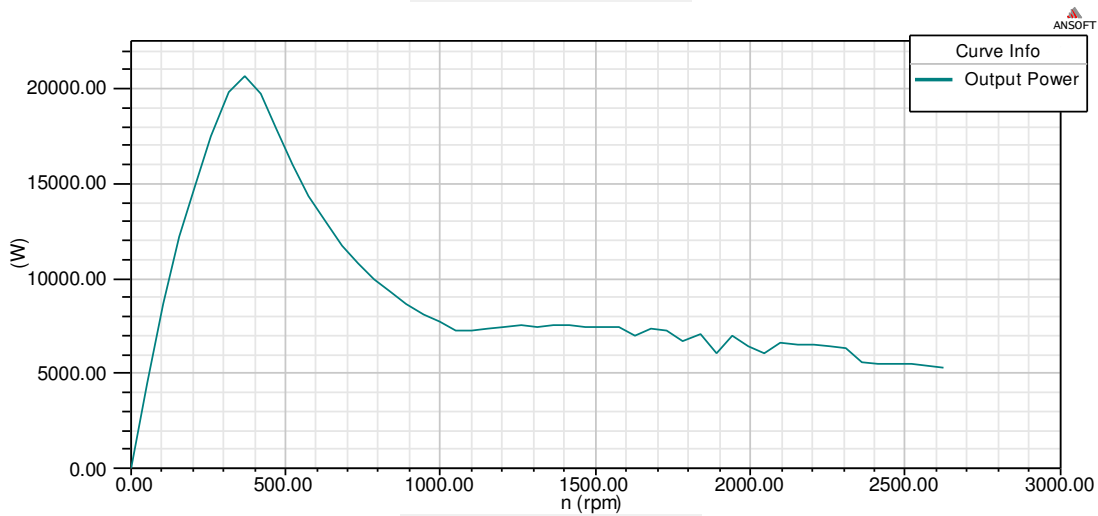
Efficiency vs Speed



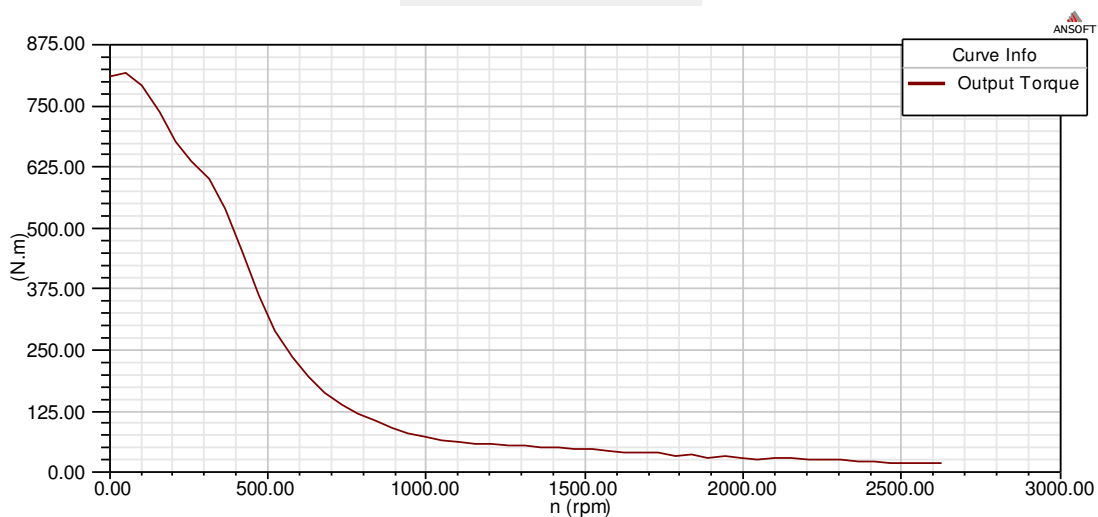
Ratio of air-gap torque to DC current vs Speed



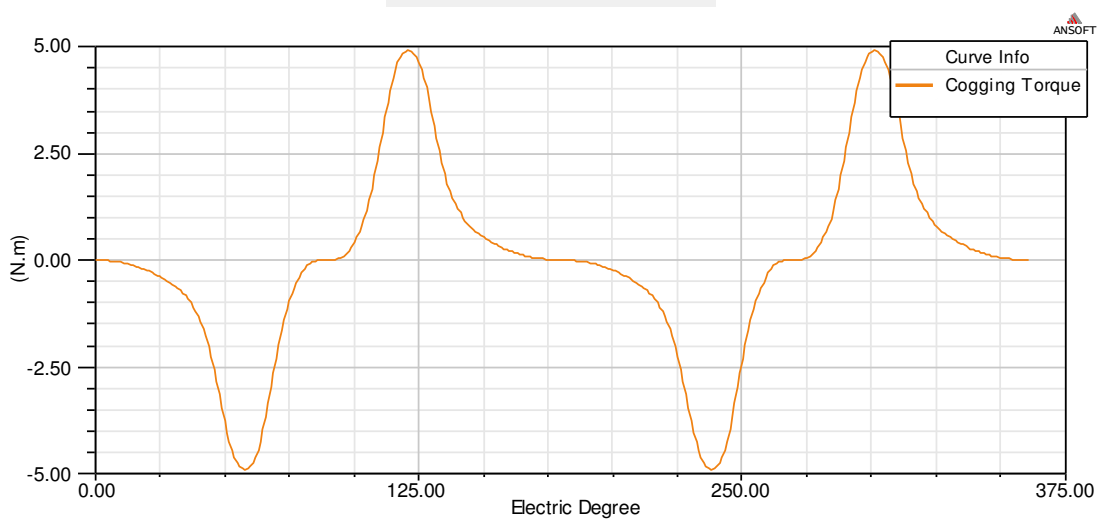
Output Power vs Speed



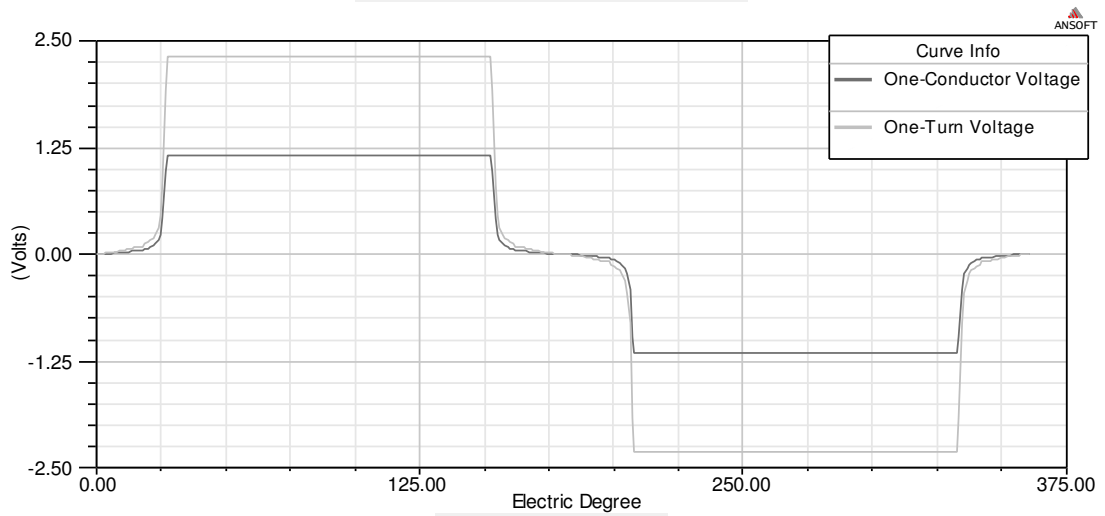
Output Torque vs Speed



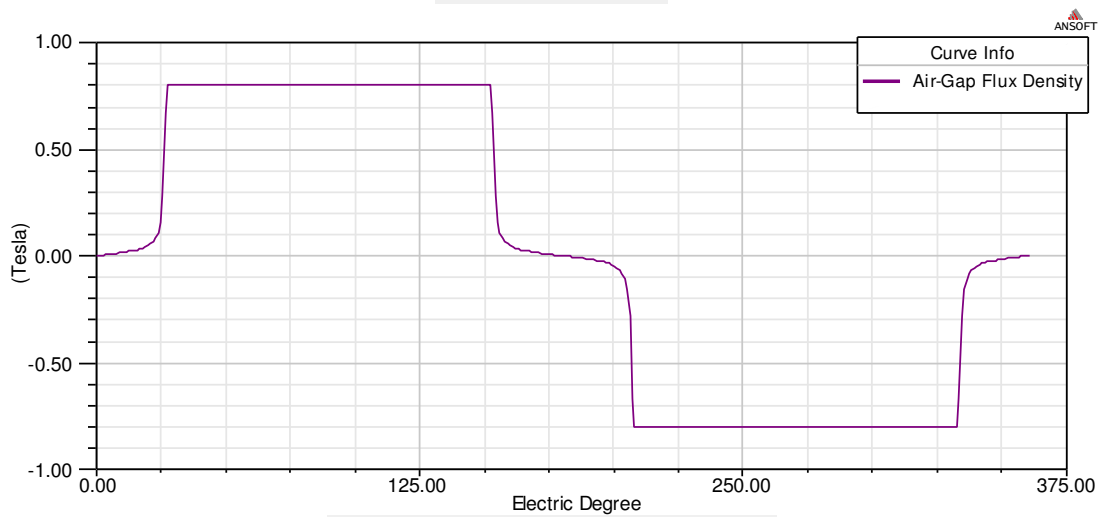
Cogging Torque in Two Teeth



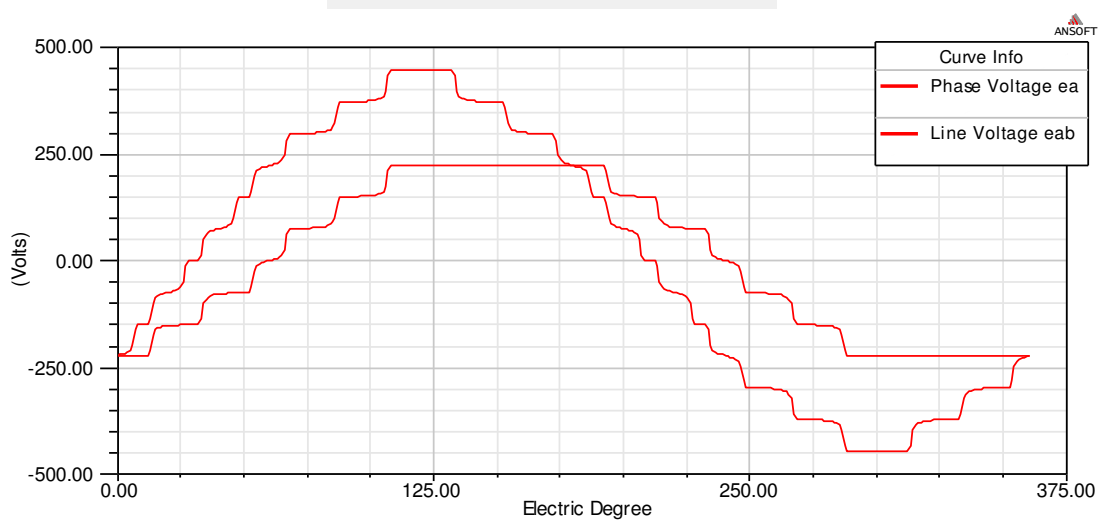
Induced Coil Voltages at Rated Speed



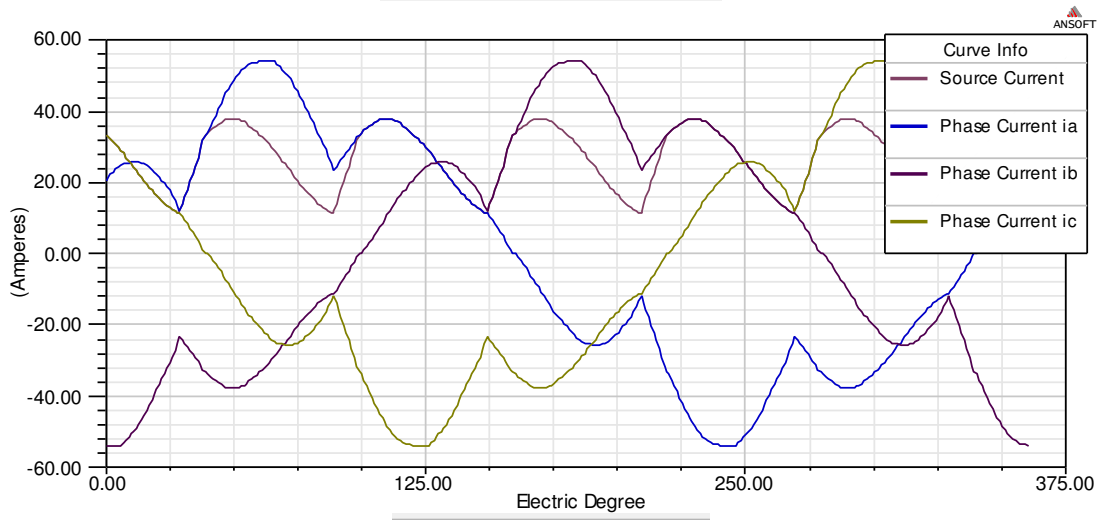
Air-Gap Flux Density



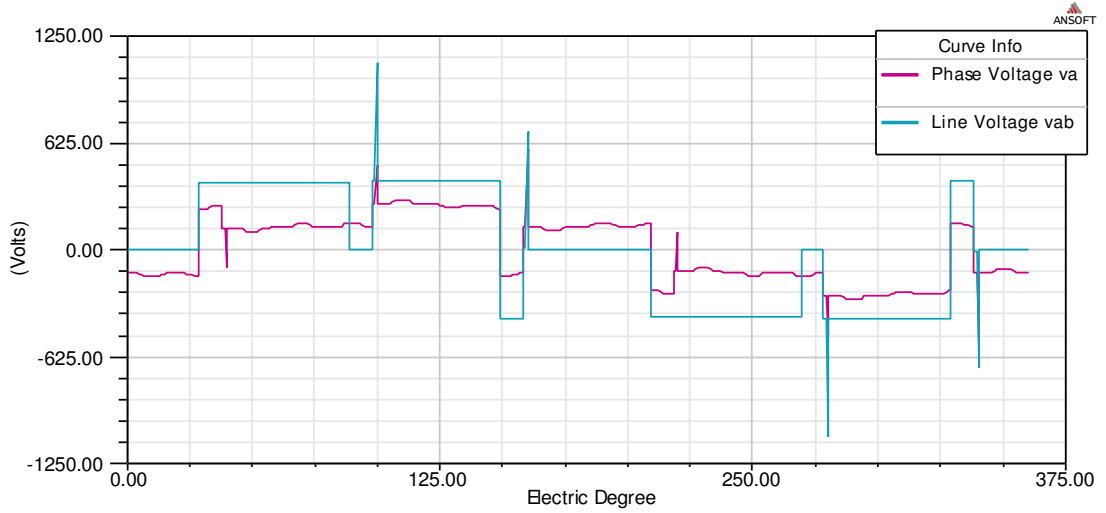
Induced Winding Voltages at Rated Speed



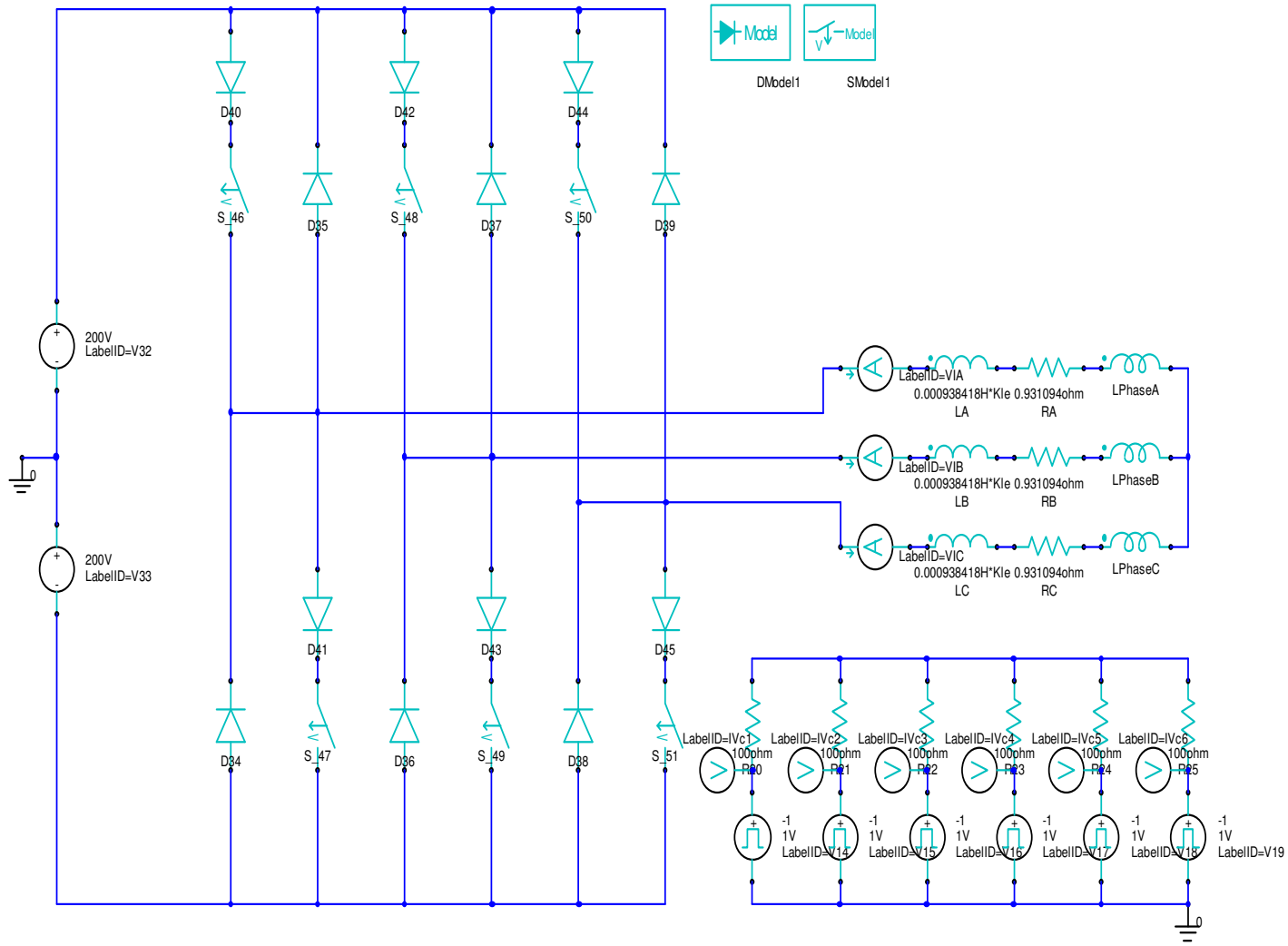
Winding Currents under Load



Winding Voltages under Load

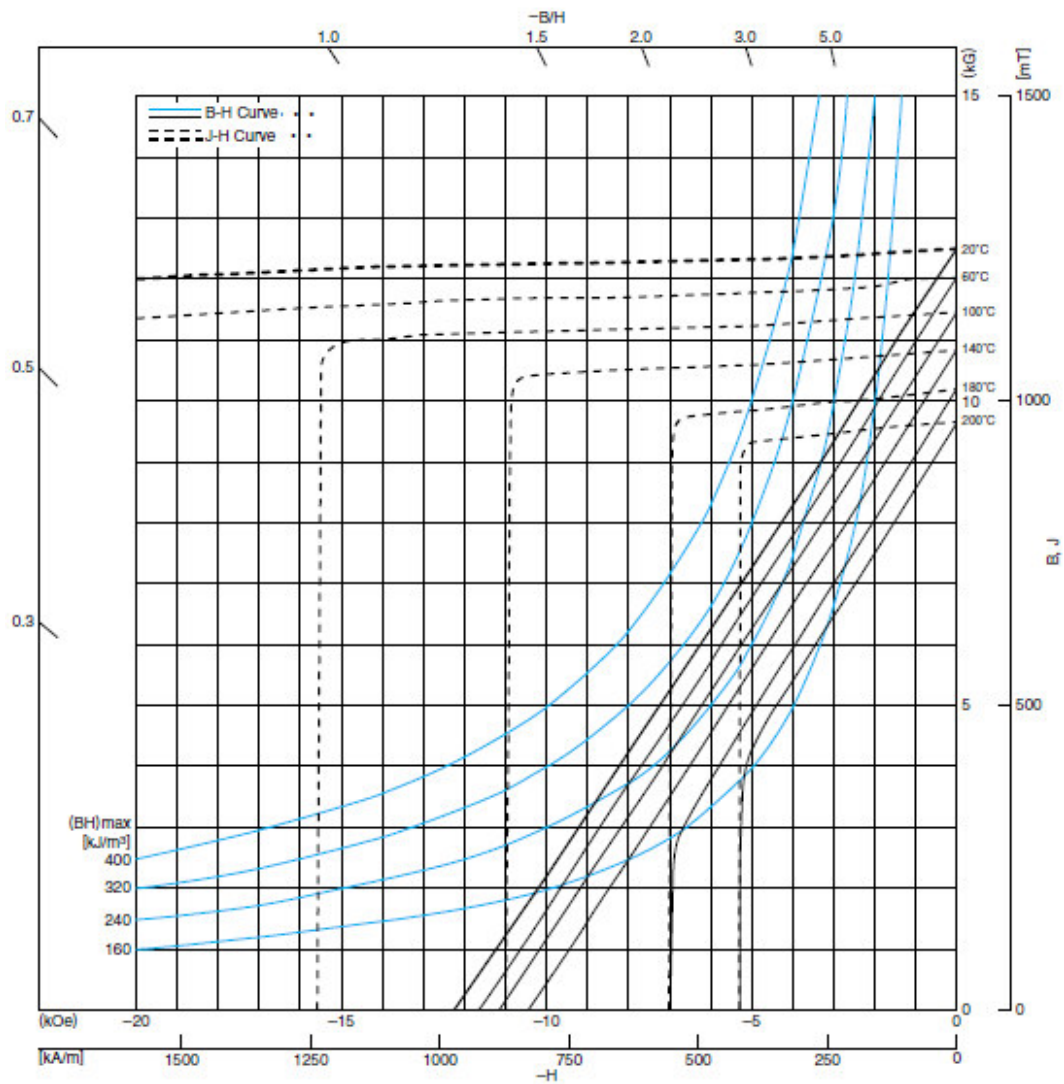


Příloha E - External circuit



Příloha F - Datasheet NdFeB

Neorec38uh Demagnetization curve



MAGNETIC CHARACTERISTICS

| | | |
|--------------------------|---------|----------|
| Residual flux density | [mT] | 1260±30 |
| Br | (kG) | 12.6±0.3 |
| Coercive force | [kA/m] | 963±56 |
| Hca | (kOe) | 12.1±0.7 |
| Intrinsic coercive force | [kA/m] | ≥1990 |
| Hcj | (kOe) | ≥25 |
| Maximum energy product | [kJ/m³] | 294±16 |
| (BH)max | (MGoe) | 37±2 |

• []: in the unit of SI
(): in the unit of CGS

Zdroj [1]