

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Diplomová práce

Aplikace vývojového prostředí ANSYS
pro návrh spínaného reluktančního motoru 15 kW

Jaroslav Plešinger

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

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrické pohony a trakce

2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Plešinger** Jméno: **Jaroslav** Osobní číslo: **406162**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrické stroje, přístroje a pohony**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Aplikace vývojového prostředí ANSYS pro návrh spínaného reluktančního motoru 15 kW

Název diplomové práce anglicky:

Design of 15 kW Switched Reluctance Motor in ANSYS

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s vývojovým prostředím ANSYS Electronic ver. 17.0 ? campus licence CVUT
- 2) Vypracujte rešerši state of art v oboru konstrukce SRM strojů
- 3) Proveďte elektromagnetický návrh stroje, využijte modul Ansys - RMXprt
- 4) Proveďte simulace funkce stroje v ANSYS Maxwell 3D.
- 5) Analyzujte vypočtená data.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcová V., Design of Rotating Electrical Machines, John Wiley & Sons 2014
- [2] Hrabovcová V., Janoušek L., Rafajdus P., Ličko M., Moderné elektrické stroje, Zilina, 2001
- [3] Kotal M., Novotný P., Voženilek P., Příklady výpočtu elektrických strojů točivých ČVUT Fel, 1974
- [4] Manuály ANSYS RMXprt, Maxwell 3D, Techsoft-engineering 2017

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


Ing. Karel Buhr CSc., katedra elektrických pohonů a trakce FEL


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **17.02.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **30.06.2017**


Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

10. 5. 2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

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 diplomové práce a za cenné rady během konzultací. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Radku Fajtlovi za pomoc s instalací softwaru a za poskytnuté informace o programu. Poděkování patří také firmě TechSoft Engineering za poskytnutí výpočetní stanice pro náročnější simulace.

Klíčová slova

Spínaný reluktanční motor, Ansys Electronics, Maxwell, RMxpert, ČVUT FEL, Přechodné děje, Ustálený stav.

Keywords

Switched reluctance motor, Ansys Electronics, Maxwell, RMxpert, CTU FEL, Transient process, Steady state.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout spínaný reluktanční motor o výkonu 15 kW a jmenovitých otáčkách 3 000 ot/min. K návrhu elektromotoru byl použit program Electronics verze 17.0 od společnosti Ansys. Tento program obsahuje expertní návrhový modul RMXprt, který byl použit k návrhu modelu motoru pro dva způsoby řízení. Následně byly v modulu Maxwell 3D/2D simulovány různé funkce stroje. Cenné poznatky a data byla čerpána od slovenských kolegů ze Žilinské univerzity dle [10], kde podobný motor o dvojnásobném výkonu vyrobili a v současnosti testují. Hlavní rozměry byly odvozeny od indukčního motoru 13 kW dle skript [3].

Abstract

The objective of this thesis was to propose the switched reluctance motor with output power 15 kW and rated speed 3,000 rpm. Program Electronics 17.0, made by company Ansys, was used for the design of the electric motor. This program contains expert module RMXprt, which was used for the design of the model of motor used for two different types of control. Afterwards in the module Maxwell 3D/2D was simulated machine behaviour. Valuable knowledge and data has been taken over from Slovak colleagues from the University of Žilina according to [10], where they have produced similar dual power engine and which is being tested in the present. Main of dimensions were modified from 13 kW induction motor according to the script [3].

Obsah

Úvod	15
1 Ansys Electronics 17.0	16
1.1 Grafické prostředí Maxwell	18
1.2 Objekty a počáteční nastavení.....	20
1.3 Meshing v Maxwell	22
1.4 Výsledky simulací.....	26
2 Spínaný reluktanční motor	27
2.1 Činnost a moment	27
2.2 Konstrukce a typy SRM	30
2.3 Spínací proces	32
2.4 Proudová regulace.....	33
2.5 Mechanická charakteristika.....	33
2.6 Řízení spínaného reluktančního motoru	34
2.7 Ztráty	35
3 Návrh spínaného reluktančního motoru	37
3.1 RMxprt.....	37
3.1.1 Obecný návrh.....	38
3.1.2 Stator a jeho vinutí.....	39
3.1.3 Návrh rotoru	42
3.2 2D/3D model	43
4 Výpočty a simulace.....	46
4.1 Sycení stroje a indukčnost	46
4.2 Proud a moment.....	49
4.3 Rozběh motoru.....	51
4.4 Netypický chod stroje	53
4.5 Magnetické pochody v 3D modelu stroje.....	54
5 Výsledky.....	55
5.1 RMxprt – Výsledky a možné úpravy modelu	55
5.2 Sycení stroje.....	57

5.3	Indukčnost motoru	61
5.4	Vliv velikosti proudu na moment.....	62
5.5	Rozběh a ztráty	64
5.6	Zvýšení otáček nad jmenovité.....	73
5.7	3D model motoru	76
Závěr.....		77
Literatura.....		79
Přílohy		80
Příloha A - Design Sheet – DC		80
Příloha B - Design Sheet – CCC.....		83
Příloha C – RMxpvt_DC		86
Příloha D – RMxpvt_CCC		91
Příloha E – Napájecí obvod DC.....		96
Příloha F – Napájecí obvod CCC.....		97
Příloha G – Nastavení magnetostatické analýzy.....		98
Příloha H – Nastavení transienční analýzy – DC rozběh.....		99
Příloha I – Nastavení transienční analýzy CCC rozběh		100
Příloha J – Nastavení analýzy ustálený stav 3D model		101
Příloha K – Nastavení analýzy různé otáčky v ustáleném stavu.....		102
Příloha L – Zátěžný moment při rozběhu.....		103
Příloha M – Plný model motoru ve 3D.....		104
Příloha N – Magnetická indukce rotor 3D.....		107
Příloha O - Magnetická indukce stator 3D		110
Příloha P - Magnetická indukce 3D model.....		113
Příloha Q – Magnetické indukce při různých otáčkách.....		116

Použité zkratky

GUI	Graphical User Interface
UDP	User Defined Primitive
RSM	Reluktanční Synchronní motor
MKP	Metoda konečných prvků
DC	Direct Control
CCC	Chopped Current Control
PWM	Pulse Width modulation
GTO	Gate turn-off thyristor
PID regulátor	Proporcionálně Integrační a derivační regulátor
SRM	Spínaný reluktanční motor
IM	Indukční motor
PM	Permanentní magnety
BLDC	Brushless DC electric motor
N_r	Počet pólů na rotoru
N_s	Počet pólů na statoru
m	Počet fází motoru
B_s	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře
δ	Vzduchová mezera
i_s	Proud statoru
N_p	Počet závitů
μ_0	Permeabilita vakua
λ	Poměr indukčností
ψ	Magnetický tok
θ	Poloha rotoru
W'	Koenergie motoru
M	Moment motoru
Δx	Rozdíl „x“ veličiny
T_x	Tranzistor s „x“ indexem
D_x	Dioda s „X“ indexem
α	Spínací poměr tranzistorů
t_{ZAP}	Doba vedení tranzistoru
T	Spínací perioda tranzistoru

Θ_0	Komutační úhel nesouosé polohy
Θ_q	Komutační úhel souosé polohy
U_s	Napětí na statoru
ω	Úhlová rychlost
P_{FE}	Ztráty v železe
P_h	Ztráty hysterezní
P_c	Ztráty vířivými proudy
P_e	Ztráty dodatečné
K_h	Koeficient hysterezních ztrát
f	Frekvence
B	Magnetická indukce
K_c	Koeficient ztrát vířivými proudy
K_e	Koeficient dodatečných ztrát
K_1	Koeficient plynoucí z BH křivky materiálu
K_2	Koeficient plynoucí z BH křivky materiálu
π	Ludolfovo číslo
σ	Vodivost materiálu
d	Tloušťka plechu
P_{SR}	Ztráty ve vinutí
J	Proudová hustota
V	Objem materiálu pro ztráty ve vinutí

Seznam obrázků

Obr. 1. 1 Moduly v Electronics 17.0	16
Obr. 1. 2 Ukázka Ansys Workbench.....	17
Obr. 1. 3 GUI Maxwell	18
Obr. 1. 4 Options	18
Obr. 1. 6 UDP modely	20
Obr. 1. 5 Řešiče v Maxwell	20
Obr. 1. 7 Formáty importu.....	21
Obr. 1. 8 Rozdíl mezi automatickou a adaptivní sítí [4].....	23
Obr. 1. 9 On Selection – Length Based operátor [4].....	24
Obr. 1. 10 On Selection – Skin Depth Based operátor [4]	24
Obr. 1. 11 Inside Selection – Length Based operátor [4].....	24
Obr. 1. 12 Příklad Model Resolution operátoru [4].....	25
Obr. 1. 13 Síť na Bandu [4]	25
Obr. 1. 14 Výsledky	26
Obr. 1. 15 Grafické výsledky [2].....	26
Obr. 2. 1 Souosá poloha [2]	28
Obr. 2. 2 Neouosá poloha [2]	28
Obr. 2. 3 Poloha mezi póly [2]	29
Obr. 2. 4 Závislost toku a proudu na poloze rotoru [2]	29
Obr. 2. 5 Zleva – Souměrný stroj, Nesouměrný stroj [2].....	30
Obr. 2. 6 Jeden blok řídicího měniče [2].....	30
Obr. 2. 7 Třífázový stroj 12/8 a 6/4 [2]	31
Obr. 2. 8 Porovnání z pohledu [2].....	31
Obr. 2. 9 Unipolární řízení [2]	32
Obr. 2. 10 Zapojení spínačů [2].....	32

Obr. 2. 11 Bipolární řízení [2]	33
Obr. 2. 12 Mechanická charakteristika SRM [2]	33
Obr. 2. 13 Částečné blokové schéma řízení SRM [2]	34
Obr. 3. 1 Typy strojů v RMxpřt	37
Obr. 3. 2 Projekt Manager SRM v RMxpřt	37
Obr. 3. 3 Machine tabulka	38
Obr. 3. 4 způsoby řízení SRM v RMxpřtu	38
Obr. 3. 5 Circuit tabulka	39
Obr. 3. 6 Tabulka stator	39
Obr. 3. 7 Specifikace rozměrů	40
Obr. 3. 8 Vlastnosti materiálu M27_29	40
Obr. 3. 9 Tabulka Winding	41
Obr. 3. 10 Model statoru v RMxpřtu	41
Obr. 3. 11 Tabulka rotor	42
Obr. 3. 12 Model statoru a rotoru v RMxpřtu	42
Obr. 3. 13 Analysis setup	42
Obr. 3. 14 Solution Data, Curves	43
Obr. 3. 15 Odvození Maxwell modelu	43
Obr. 3. 16 Částečný 3D model	43
Obr. 3. 17 Částečná 2D model	43
Obr. 3. 18 Operátory pochybu objektu	44
Obr. 3. 19 Nastavení – Duplicate Around Axis	44
Obr. 3. 20 Špatně spojený model	45
Obr. 3. 21 Plný 2D model SRM	45
Obr. 4. 1 Orientace buzení SRM	46
Obr. 4. 2 Nastavení výpočtu v Magnetostatic a úspěšná validace	47
Obr. 4. 3 Propojení cesty pro výpočet indukčnosti	48

Obr. 4. 4 Buzení pro výpočet indukčnosti	48
Obr. 4. 5 Optimetrics nastavení.....	49
Obr. 4. 6 Tabulky parametrické analýzy	50
Obr. 4. 7 Nastavení buzení fáze A.....	51
Obr. 4. 8 Motion setup – typ pohybu	52
Obr. 4. 9 Motion setup – nastavení zátěže.....	52
Tabulka 1 – Část Design Sheetu – porovnání dvou modelů	55
Obr. 5. 1 Graf závislosti vstupního proudu a rychlosti pro DC a CCC řízení.....	56
Obr. 5. 2 Graf závislosti výstupního momentu a rychlosti pro DC a CCC řízení.....	56
Obr. 5. 3 Výpočetní síť na 2D modelu - magnetostatic	57
Obr. 5. 5 Mapa pole magnetické indukce_2 - překrytí.....	57
Obr. 5. 4 Mapa pole magnetické indukce_1 - náběh	57
Obr. 5. 6 Mapa pole magnetické indukce_3 – odtažení.....	58
Obr. 5. 7 Mapa pole magnetické indukce_4 – nesouosá poloha	58
Obr. 5. 8 Měřítko B	58
Obr. 5. 9 Měřítko A	58
Obr. 5. 10 Mapa magnetického toku_1.....	59
Obr. 5. 11 Mapa magnetického toku_2.....	59
Obr. 5. 12 Mapa magnetického toku_3.....	59
Obr. 5. 13 Mapa magnetického toku_4.....	59
Obr. 5. 14 BH křivka materiálu M27_29G [4]	60
Obr. 5. 15 Graf závislosti indukčnosti a úhlu natočení	61
Obr. 5. 16 Graf závislosti momentu rotoru a úhlu natočení na velikosti napájecího proudu	62
Obr. 5. 17 Graf závislosti momentu statoru a úhlu natočení na velikosti napájecího proudu.....	62
Obr. 5. 18 Graf závislosti indukovaného napětí na čase (DC řízení) – plný rozsah.....	64
Obr. 5. 19 Graf závislosti indukovaného napětí na čase (DC řízení) – plný rozsah	64
Obr. 5. 20 Graf závislosti vstupního proudu a času (DC řízení)	65

Obr. 5. 21 Graf závislosti momentu a času (DC řízení)	65
Obr. 5. 22 Graf závislosti rychlosti a času (DC řízení)	66
Obr. 5. 23 Graf závislosti vstupního proudu a času (CCC řízení) – plný rozsah	66
Obr. 5. 24 Graf závislosti vstupního proudu a času (CCC řízení) – rozsah 0 - 200 ms	67
Obr. 5. 25 Graf závislosti vstupního proudu a času (CCC řízení) – rozsah 600 - 800 ms	67
Obr. 5. 26 Graf závislosti rychlosti a času (CCC řízení)	68
Obr. 5. 27 Graf závislosti vstupního proudu a času (CCC řízení) – rozsah 990 - 1000 ms	69
Obr. 5. 28 Graf závislosti momentu a času (CCC řízení) – plný rozsah	69
Obr. 5. 29 Graf závislosti momentu a času (CCC řízení) – rozsah 990 – 1000 ms	70
Obr. 5. 30 Graf závislosti ztrát a času (CCC řízení) – plný rozsah	70
Obr. 5. 31 – Core loss špička	71
Obr. 5. 32 Komutace proudu	71
Obr. 5. 33 Graf závislosti ztrát a času (CCC řízení) – rozsah 42 – 43 ms	71
Obr. 5. 34 Graf závislosti ztrát a času (CCC řízení) – rozsah 980 – 990 ms	72
Obr. 5. 35 Graf závislosti rychlosti a času (3 typy otáček)	73
Tabulka 2 – Tři typy otáček – jejich proud a frekvence	73
Obr. 5. 36 Graf závislosti momentu a času (3 typy otáček)	74
Obr. 5. 37 Graf závislosti ztrát a času (3 typy otáček)	74
Obr. 5. 38 Mapa pole magnetické indukce v 3D modelu motoru	76

Úvod

V této práci se budu zabývat programem Electronics verze 17.0, konkrétně prací v jeho modulech RMXprt a Maxwell. V prvních dvou kapitolách provedu teoretický rozbor problematiky kolem programu Electronics a částečně v prostředí programů Ansys. Další část bude věnována teorii okolo spínaných reluktančních motorů, jež budou v této práci softwarově navrhovány. V praktické části se podíváme na návrh SRM v modulu programu RMXprt, kde jsou rozměry odvozeny ze skript [3], případně jsem čerpal informace z literatury [10] od slovenských kolegů ze Žilinské univerzity. Na Slovensku se podobným motorem zabývali, respektive jej navrhнули, vyrobili a v současnosti jej testují. Mým hlavním úkolem je ověřit možnosti návrhu a simulací v prostředí Ansys Electronics. Výpočty budu směřovat na problematiku sycení motoru, poměru indukčností a tvorby momentu. Tyto výpočty provedu pomocí statického řešiče magnetostatic. Přejídné děje budu řešit použitím transientního řešiče a budu zkoumat chování SRM při rozběhu z nulových otáček, ustálený stav a následně chod téhož motoru při různých hodnotách otáček. Nyní se tedy přesuneme k programu Ansys Electronics 17.0 a popíšeme si základní vlastnosti tohoto výpočetního softwaru.

1 Ansys Electronics 17.0

V této práci se budeme zabývat prací v programovém prostředí Electronics verze 17.0 od společnosti Ansys. Většina obrázků je pořízena přímo z programu z mého projektu a některé jsou převzaty z literatury [4]. Firma vydává nepřeborné množství různých programů, z nichž má každý program své specifické použití například proudění vzduchu nebo kapalin, mechanické vlastnosti (pružnost, pevnost) objektů či oteplení vyšetřovaného objektu. Electronics 17.0 byla v době zadání této práce verzí novější, než obsahuje modul Maxwell 3D, který byl stejnou firmou (případně firmou Ansoft) obsažen v programové verzi 16.0 a nižší. V současnosti je nejpoužívanější verze Ansys 18.0 a v dohledné době bude vycházet upgrade na 18.1. Tyto verze se mezi sebou příliš neliší, jde spíše o drobné úpravy a přidání několika možností ve výpočtech. Hlavním přínosem nové verze je tedy spojení několika programů do celistvého celku. Z hlediska použití se dá Electronics rozdělit do tří skupin: nízkofrekvenční (Maxwell, RMXprt, PExpert), vysokofrekvenční (HFSS, Savant, SIwave, Q3D Extractor) a systémový řešič (Simplorer). Tato práce se bude pohybovat v nízkofrekvenční oblasti a v použití řešičů Maxwell a RMXprt, nicméně velmi krátce si popíšeme využití i ostatních řešičů. Maxwell slouží k analýze elektromagnetických dějů metodou konečných prvků. RMXprt a PExpert jsou analytické řešiče pro rychlý návrh točivých, respektive netočivých strojů. HFSS je v oblasti vysokých frekvencí používán k analýze elektromagnetických dějů, především co se týká záření a šíření vln. Savant je určený zpravidla pro analýzu vyzařování antén u rozsáhlých objektů (lodě, letadla, ...). SIwave slouží k analýzám signální integrity desek plošných spojů a ke správnému propojení součástek, konektorů a vodivých cest. Q3D Extractor se využívá k výpočtu parazitních vlastností elektrických komponent. Simplorer je multidoméno, multiúrovňový systémový nástroj, jenž do sebe integruje redukované modely z jiných Ansys programů, případně s nimi pracuje v co-simulaci. Grafické prostředí jednotlivých modulů je dosti podobné a liší se specifickými věcmi pro daný modul. Například HFSS má možnost nastavit vzdálenost vyzařování, což například modul Maxwell nemá. Tímto způsobem bychom mohli v modulech hledat další drobné odlišnosti, hlavní rozdíl je však ten, že každý modul má své oblasti použití a uživatel programu musí být natolik znalý dané problematiky, aby dokázal simulaci nastavit, ale hlavně vyhodnotit výsledek a rozhodnout o správnosti a fyzikální pravdivosti. Naštěstí při zakoupení licence Ansys programu je možné si domluvit i technickou podporu u distributora licence, což poskytuje značnou podporu. Dále je v programu poměrně rozsáhlé PDF s kompletním popisem programu. Všechny řešiče mají svůj kompletní popis v PDF, například Maxwell PDF má cca



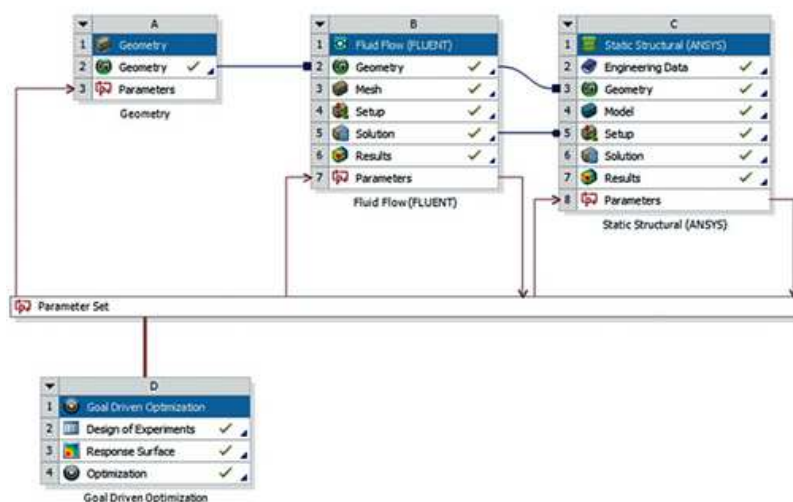
Obr. 1. 1 Moduly v Electronics 17.0

2 700 stran, dále jsou k dispozici tzv. „Open Examples“, které představují některé vyřešené příklady

včetně návodu, jak úlohu nastavit a spustit. Dále je možné na stránkách Ansys stáhnout spoustu dokumentů s popisem různých modulů nebo workshopy, jež jsou většinou rozděleny do třech úrovní (basic, intermediate, advanced) a navíc jsou dostupné pro různé verze programu. Například Maxwell základní lekce obsahuje 8 PDF dokumentů s popisem modulu a každý dokument má cca 50 slajdů + 15 workshopů o cca 20 slajdech na každý dokument. Workshopy jsou vedeny krok po kroku i s vysvětlením, proč se, co děje a k jakým jevům dochází. Jako základní pomoc v nesnázích určitě poslouží nápověda programu, která je velice přehledně nabízena buď strukturovanou záložkovou formou, nebo běžným prohledáváním. Nápověda prohledává kompletní dokument modulu a vypíše danou kapitolu, jež zmiňuje daný problém.

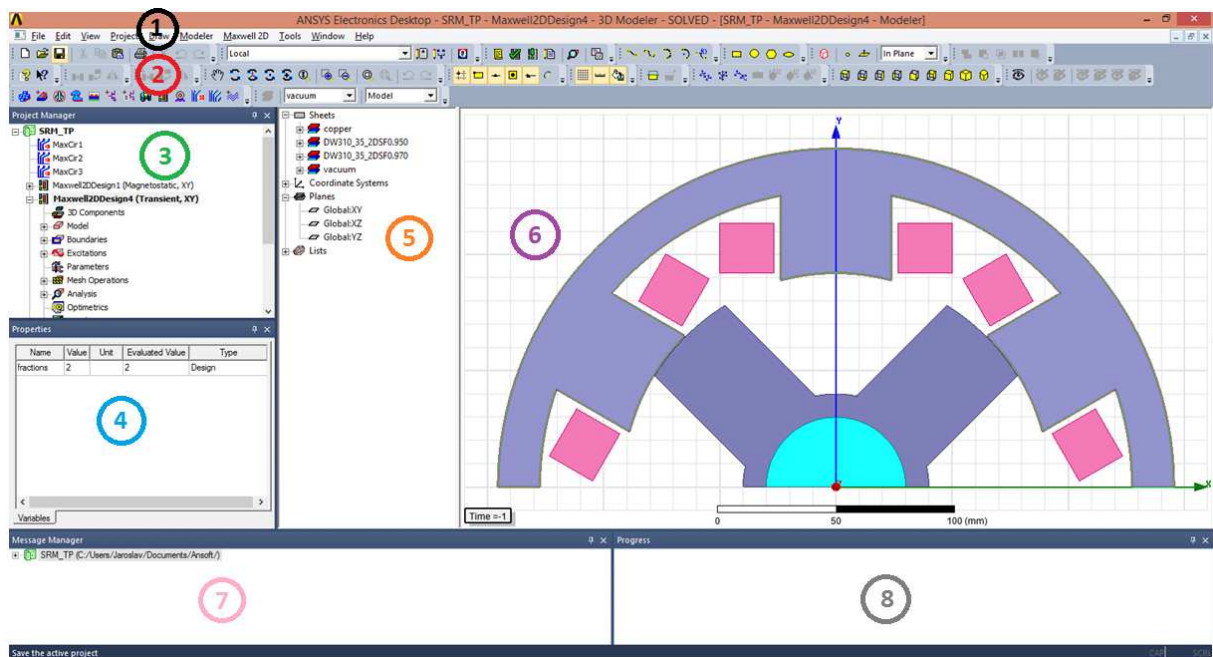
Ačkoliv se může na první pohled z výše uvedeného popisu zdát, že Ansys je jen další z mnoha programů, které souží k výpočtům a simulacím, velikou odlišností od konkurence je program workbench. Tento program je určen k propojení všech programů Ansys, a tudíž umožňuje kooperativní práci ve všech programech. Lze tedy například navrhnout celý točivý stroj a k němu elektronické řízení, optimalizovat chod stroje v různých režimech, vypočítat oteplení stroje vlivem protékajícího proudu, navrhnout k němu optimální chlazení, zjistit mechanické deformace vlivem tepelného namáhání stroje a další. Toto vše lze postupně nastavit v programech Ansys a pomocí workbench řešit problém jako celek. Zjednodušeně řečeno: „*Nasimulovat se dá celé auto od utahování maticek, přes vlnové šíření komponent automobilu, až po aerodynamiku automobilu.*“ V této práci se budeme hlavně

zabývat prací v programu Maxwell. Pro návrh modelu stroje použijeme modul Rmxprt, následně od vytvořeného modelu odvodíme 2D a 3D model stroje a v neposlední řadě provedeme řadu simulací a výpočtů kolem stroje.



Obr. 1. 4 Ukázka Ansys Workbench

1.1 Grafické prostředí Maxwell



Obr. 1.5 GUI Maxwell

Nyní se podíváme na grafické prostředí Ansys Electronics 17.0. Jak je již uvedeno výše, je zde poměrně velké množství modulů pro různé návrhy a simulace. Zkušený uživatel si na první pohled všimne nového grafického prostředí (GUI) oproti starší verzi. Vývojáři se snažili hlavně vytvořit takové grafické prostředí, aby odpovídalo stylu nejnovějších operačních systémů, a opustili již grafiku typickou pro Windows XP. Kontextová menu dodržují již zaběhlý styl, že každý výpočetní modul se liší v jednom nebo ve dvou oknech. Je logické, že v modulu HFSS nebude menu Maxwell 2D a naopak. Panel nástrojů je uživatelsky definovaný, ale novinkou je zde možnost přednastavit si modul, v němž se bude nový projekt otevírat. Tím vychází vývojáři vstříc uživatelům, kteří si licenci koupí jen protože pracovali a budou pracovat s modulem Maxwell. Příjemnou inovací je například integrace kolonky „Options“ pouze do

- + General
- + 2D Extractor
- Circuit Design
- Circuit NetList Design
- + HFSS
- HFSS 3D Layout
- + HFSS-IE
- + Maxwell 2D
- + Maxwell 3D
- + Q3D
- + RMxprt
- + Simplorer
- + 3D Modeler
- + Layout Editor
- + Machines
- + Model Editor
- + Netlist & Script Editor
- + Schematic Editor
- + Reporter

Obr. 1.8 Options

jedné položky. Pokud si chtěl uživatel ve starší verzi „přizpůsobit“ program podle sebe, bylo potřeba v každém modulu nastavit vše samostatně. V nové verzi je vše pod jednou kolonkou a následně je možné vše nastavit globálně či upravit jednotlivé moduly programu. Na obrázku 1.4 vidíme kolonku „Options“ a obrázek 1.3 představuje GUI celého programu, které si popíšeme.

1 – Kontextová menu umožňují klasické řízení programu jako u běžných komerčních programů (ukládání, nastavení, zobrazení atd.).

2 – Panel nástrojů je prostor pro uživatelem předvolené palety pro práci na modelu. Program má nepřeberné množství palet od kreslení modelu, přes různá zobrazení, až po volby materiálů a nastavení výpočtů.

3 – Project manager slouží jako „Explorer“ programu. Intuitivně zobrazuje strukturu projektu a umožňuje jednoduchým dvojklikem přejít k nastavení příslušné problematiky.

4 – Properties jsou **zredukované** vlastnosti buď příslušného nastavení (buzení, hranice výpočtů, výpočetní síť) nebo určité části modelu (rotor, vinutí, hřídel). Často stačí pro drobnou úpravu využít této možnosti, ale pro úplný a podrobný návrh je to nepoužitelné.

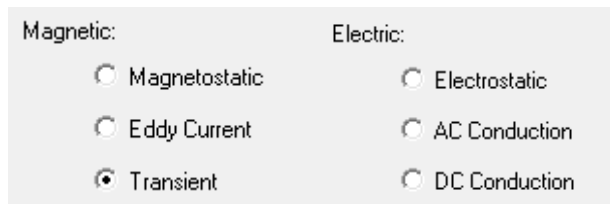
5 – History tree udává strukturovaný přehled o entitách v projektu. Pokud je v modelu něco špatně označitelné, příslušná část se zde nechá dohledat a upravit dle potřeby.

6 – Model je pracovní plocha, kde navrhujeme, kontrolujeme a upravujeme daný model stroje.

7 – Message manager je informační okénko, jež nám ukazuje varování, chyby, ale i úspěšné dokončení simulace, případně informuje o automatických změnách v modelu kvůli přesnosti výpočtu

8 – Progres při výpočtech ukazuje průběh simulace. Vzhledem k tomu, že simulace v programu mohou trvat řádově i několik dní, kladně hodnotím, že vývojáři změnili barvu ukazatele postupu z depresivní červené na pozitivní zelenou.

1.2 Objekty a počáteční nastavení



Obr. 1. 10 Řešiče v Maxwell

problematiky se nacházíme. Maxwell totiž umožňuje simulace v oblasti magnetického i elektrického pole a dále máme možnost vybrat si souřadnicový systém. V magnetické oblasti volíme mezi magnetostatickým, transientním řešičem a řešičem vířivých proudů. Elektrostatické, stejnosměrné a střídavé napájení jsou řešiče v oblasti elektrického pole. Každý z řešičů má svá specifická nastavení a omezení pro 3D i 2D modely. Například pomocí řešiče transient je vhodné řešit přechodové jevy a

Band	PMCore
ClawPoleCore	PMDamperCore
ConCoil	RacetrackSlotCore
DCMCore	SRMCore
DiskCoil	SalientPoleCore
DiskPMCore	ShadedPoleCore2
DiskSlotCore	SlotCore
DoubleCage	SquirrelCage
EndCap	SynRMCore
Housing	TransCoil
IPMCore	TransCore
LapCoil	TransTwist
LinearMCore	UnivMCore
NonSalientPoleCore	VentSlotCore

Obr. 1. 6 UDP modely

objekty jsou určeny spíše k vytvoření výpočetní oblasti nebo oblasti, na níž chceme zobrazit výsledky. Pro návrh velice jednoduchých objektů mohou stačit, ale složitější objekt (jako třeba stator asynchronního motoru) pomocí těchto nástrojů nevytvoříme. V případě, že simulace budeme provádět na točivém stroji, který má klasickou konstrukci, je možné k návrhu použít expertní analytický modul RMxprt. Tento modul slouží k rychlému návrhu předdefinovaných strojů. Program umožňuje výběr ze třinácti točivých strojů, neumožňuje však výrazné změny konstrukce, pokud nejsou v modulu zabudovány. Kupříkladu bezkartáčový motor má běžně vnitřní nebo vnější rotor, což RMxprt zohledňuje. Málo častý vnější rotor se může vyskytovat například u asynchronního motoru nebo synchronního reluktančního motoru, což lze částečně vymodelovat pomocí obecného stroje (RSM až od verze 18.0), ale výsledek bude ten, že RMxprt vytvoří pouze model pro Maxwell, avšak

Dále se podíváme, jakým způsobem je možné dostat určitý objekt, se kterým chceme počítat, do prostředí Maxwell. Nejprve je třeba se zamyslet nad problematikou, již chceme řešit, zejména v jaké části nízkofrekvenční

pomocí řešiče magnetostatic indukčnost motoru. Před vybráním vhodného řešiče je tedy nezbytné vědět, co budeme simulovat. Dále musíme mít objekt, na němž budeme simulace provádět. Jedna z cest k vytvoření objektu je použití předdefinovaných primitiv (UDP), která reprezentují různé části hlavně točivých strojů. K těmto částem se dostaneme cestou **Draw – User Defined Primitive – RMxprt**, kde vidíme všechny předdefinované modely. Jsou zde například: klec indukčního stroje, jádro SRM, jádro s permanentními magnety, drážkované jádro a mnoho dalších. Další možnost je vymodelování jednoduchého objektu přímo v prostředí Maxwellu za použití základních geometrických tvarů. Nicméně tyto

EDB...	bez běžných výsledku v RMXprt. Pokud tedy uživatel chce specifický tvar
ANF...	motoru, jako třeba umístit magnety do rotoru RSM, je třeba použít UPD.
SM2...	Všechny předchozí úvahy se týkaly točivých strojů, ale co když uživatel
AutoCAD...	potřebuje počítat nestandardní provedení například transformátoru,
GDSII...	případně jak působí síly na svazek vodičů? Zkratka RMXprt je „Rotating
ODB++...	Machine Expert“, z čehož plyne oblast použití pro točivé stroje. „Power
Cadence APD/Allegro/SiP...	Electronics Expert“ je celý název druhého analytického modulu a sice
IPC2581...	PExprt, který slouží k rychlému návrhu transformátorů a obecně
AWR Microwave Office ...	výkonové elektroniky. Kdyby však ani tyto moduly nebyly dostatečné,
Leadframe...	maxwell samozřejmě umožňuje import z různých programů, jako jsou
XFL...	například AutoCAD, Cadence OrCAD a mnoho dalších. Jak vyplývá
ANX...	z předchozího textu, možností, jak dostat simulovaný objekt do programu, je poměrně hodně a záleží

Obr. 1. 7 Formáty importu na příklad AutoCAD, Cadence OrCAD a mnoho dalších. Jak vyplývá z předchozího textu, možností, jak dostat simulovaný objekt do programu, je poměrně hodně a záleží na uživateli, která z možností je méně či více výhodná. Když se nám podaří dostat model do programu, můžeme přistoupit k samotému nastavení.

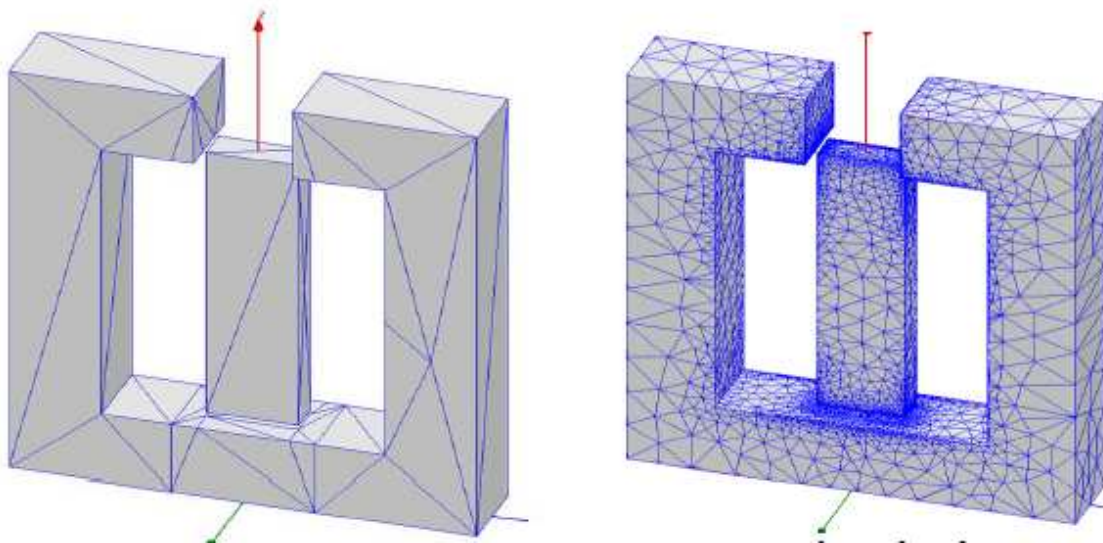
Specifická úloha vyžaduje specifické nastavení, nicméně je třeba si uvědomit, že Maxwell používá k řešení autoadaptivní výpočet metodou konečných prvků (MKP). Na počítaný objekt se vytvoří (ať už automaticky nebo uživatelsky) výpočetní síť, jež je využita na diskretizaci Maxwellových rovnic na rovnice algebraické. Tvorba sítě je autoadaptivní, což znamená, že po výpočtu dojde ke kontrole schopnosti zpětné rekonstrukce. Pokud je výsledek simulace dostatečně přesný, výpočet se ukončí. Jestliže je ale výsledek nepřesný, program sám přejde k vytváření sítě a upraví její velikost tak, aby výpočty vedly k příznivějším výsledkům. Z tohoto typu výpočtu je patrné, že je třeba zadat jisté okrajové podmínky, aby mohl program vytvořit výpočetní síť. Nejjednodušším způsobem, jak tyto okrajové podmínky zadat, je vytvořit kolem objektu dostatečně velký hraniční „obal“. Přímou tento způsob umožňuje software tlačítkem „Create region“, který na základě zvolených jednotek (mm, %) vytvoří kolem objektu výpočetní hranici. Pokud budeme mít kupříkladu poloviční řez motorem, je lepší využít stanovení hranice pomocí vektorů a následně uzavřít region půlkruhem. Dá se říci, že způsob stanovení výpočetní hranice je na uživateli, pokud to program dovolí. Po nastavení hranice výpočtu je dále nezbytné nastavit napájení modelu. V tomto případě se postup liší podle zvoleného řešiče a podle rozměru objektu (2D, 3D). Jako zdroj buzení se zde dá nastavit například proudová hustota, proud, napětí nebo celý vnější obvod. Protože určité stroje vyžadují ke svému chodu napájení z měniče, je potřeba zvolit externí napájení a v programu Circuit editor k nim vytvořit specifický měnič. Jedná se například o bezkartáčové stroje nebo právě spínané reluktanční motory, kterým se zabýváme v této práci. Díky možnosti volby mezi DC a CCC typem napájení v RMXprt je možné vytvořit i vnější obvod, jenž umožňuje částečnou regulaci proudu, respektive napětí.

Částečnou regulaci z toho důvodu, že vytvořený vnější obvod obsahuje navíc tranzistor za hlavními spínacími součástkami, který má přednastavené spínací pásmo. Vytvořený stroj je potom řízen ve zvoleném proudovém nebo napěťovém pásmu. Software umožňuje u určitých typů strojů řízení i pomocí PWM měniče. Pokud navržený stroj vyžaduje měnič, je vhodné k návrhu použít RMXprt, poněvadž po importu modelu do Maxwellu program sám tento řídicí obvod vymodeluje. Nicméně pokud model stroje vyžaduje individuální návrh, je třeba napájecí obvod vytvořit ručně ve zmiňovaném editoru. Dále zbývá nastavit počáteční podmínky výpočtu, což je zde reprezentováno nastavením výpočetního času. Zde je možnost nastavit začátek a konec výpočtu s určitým krokem. V případě použití adaptivního časového kroku jsme ještě schopni nastavit minimální a maximální krok výpočtu. Pokud k napájení používáme vnější obvod, můžeme upravit minimální časový krok v externím obvodu, jenž je nadřazený kroku simulace. Při nastavování časů výpočtu je nutné se zamyslet, jak moc jemný či hrubý krok potřebujeme. Velice jemný krok jednak silně prodlouží čas simulace, a jednak může zanést do výsledků nežádoucí chyby. Může se například stát, že v rámci časové změny některé veličiny se ve výsledku objeví řádově odlišná špička, která se však změní během pikosekund. To může být způsobeno například přechodem vedení fází nebo komutací součástek. Tuto chybu je možné zanedbat, ale program ji uvede do výsledků, jenž jsou následně nepřehledné. Oproti tomu je třeba dbát na dostatečně jemný krok, protože výsledek může být nepřesný. Jako příklad si uveďme sinusové napájení bez posunutí. Pokud nastavíme krok simulace příliš hrubý, může se stát, že na půlperiodu budeme uvažovat pouze dva výpočetní body a výsledek takovéto simulace povede k nulové hodnotě funkce, jelikož sinus funkce bude ve všech bodech roven nule. Optimální nastavení časového kroku výpočtu je tedy hlavně na uživateli a vyžaduje analýzu před spuštěním výpočtu. Samozřejmě i zde platí, že si každá konkrétní úloha žádá specifický přístup a je nutné se zamyslet, co a jak nastavit, aby byl výsledek uspokojivý.

1.3 Meshing v Maxwell

Protože tvorba sítě, respektive její nastavená kritéria, je asi nejdůležitějším faktorem, který ovlivňuje jak rychlost výpočtu, tak kvalitu výsledků, rozhodl jsem se zde popsat možnosti nastavení „síťování“ v Ansys Maxwell. Hned zprvu je potřeba říci, že nastavení, jež si zde popíšeme, platí pouze pro Maxwell modul, protože je zřejmé, že simulace antény v HFSS bude mít sice do jisté míry podobné nastavení, ale určité části budou specifické pro daný výpočetní modul. Jak již bylo krátce zmíněno, Maxwell používá výpočetní síť, aby diskretizoval diferenciální Maxwellovy rovnice na algebraické. Diskretizace se provede tím způsobem, že se celý objekt pokryje sítí z trojúhelníků (2D model) nebo tetrahedronů/čtyřstěnů (3D model). Sestavení všech prvků se pak nazývá síť konečných prvků nebo zkráceně síť. Pro statické řešiče je sestavení sítě auto adaptivní proces, protože program

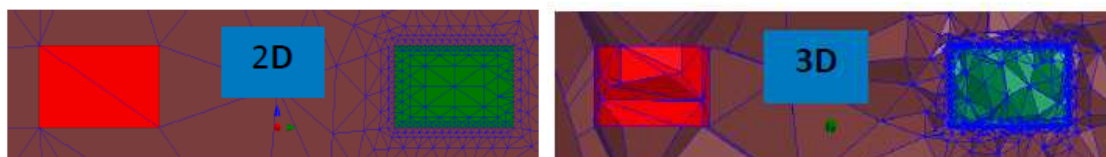
nejprve vytvoří automatickou síť a následně upravuje její hustotu tak, aby byl výsledek co nejlepší. Tvorba sítě je samozřejmě možná hned několika způsoby. Automatická síť je sice (co se týče nastavení) velice výhodná, ale pro relevantní výsledky u točivých strojů poměrně nedostatečná. Tento typ sítě sice využívá povrchové aproximace, ale nemá pevně daný typ, velikost ani úhel sítě. Automatická síť je dvojího typu, a sice „Tau“ síť, která je vhodná pro zakřivené povrchy a analýzy pohybu. Funguje tím způsobem, že se síť tvoří od středu objektu směrem ke kraji. V počátku vytvoří jemnou síť, již udržuje, pokud je daný objekt vyhlazený. Druhý typ automatické sítě s názvem „Classic“ není příliš vhodný pro zakřivené objekty, neboť vyžaduje segmentaci geometrie, je však vhodný pro tenké, ploché předměty. V počátku vytvoří hrubou síť, a pokud je objekt vyhlazený, zjemňuje ji. Problém automatické sítě je ten, že program sám vybere jednu z možností, která se mu jeví nejlépe. Když se poté dostaneme do stavu, že máme dva objekty, každý z nich by potřeboval odlišný typ sítě a program na oba objekty použije stejný typ, výsledky budou nepřesné. Pokud by nebylo použito auto adaptivního sestavení sítě, počáteční síť by byla hrubá a víceméně stejnoměrná v celém výpočetním regionu. Místa, kde je pole důležité, respektive kde má nejvyšší gradient, jsou sledována pomocí „Energie Error“. Tato hodnota by měla konvergovat k nule a postupně se bude zvyšovat počet prvků sítě v každém adaptivním kroku.



Obr. 1. 8 Rozdíl mezi automatickou a adaptivní sítí [4]

Časově závislé řešiče, jako je transient, nemají možnost použít adaptivní úpravu sítě, proto je možné buď použít importovanou síť ze statického řešiče, nebo specifikovat síť jinými síťovými operátory. Síťové operátory jsou k dispozici i ve statických řešičích a je možné je použít ke specifikaci rozměrů oka sítě či počtu prvků sítě. Maxwell má k dispozici tyto síťové operátory: na vybraný objekt (délka/hloubka), uvnitř vybraného objektu (délka), povrchová aproximace, modelové rozlišení, úprava válcové mezery. Nyní se podíváme na výhody zmíněných síťových operátorů.

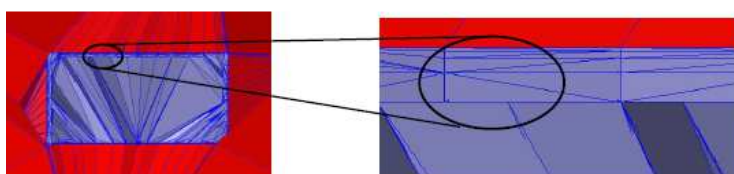
Síťový operátor „On Selection – Length Based“ má definovaný počet prvků sítě na daném objektu, a navíc obsahuje limit délky oka sítě. Tím je možné zhustit síť na místech, kde je to potřeba. Lepší vysvětlení poskytují obrázky 1. 9 pro 2D a 3D objekty.



Obr. 1. 9 On Selection – Length Based operátor [4]

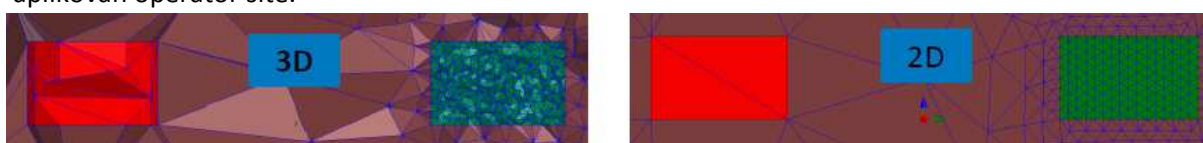
Červený objekt na obrázcích představuje síť na objektu bez síťového operátoru a druhý objekt ukazuje, jak vypadá síť při použití síťového operátoru. Z obrázku je jasně patrné, že specifikováním rozměru oka a definováním počtu prvků sítě se vytvoří mnohem hustější síť než bez použití tohoto operátoru.

Další operátor „On Selection – Skin Depth Based“ je operátor, jehož je vhodné používat v řešiči Eddy current nebo v Transient, kdy výpočet respektuje efekt vířivých proudů. Mimo již známá specifika, jako je omezení délky oka a počet prvků sítě, je zde ještě hloubka vniku (skin depth) a na ní závislá proměnná počet vrstev sítě. Hloubka vniku je zde závislá na relativní permeabilitě, frekvenci a vodivosti materiálu. Díky tomuto operátoru jsme schopni lépe definovat síť na okraji objektu a zlepšit tím výpočet z pohledu vířivých proudů. Na obrázku 1. 10 vidíme, jak vypadá síť, jež má definovanou hloubku vniku 1 mm, a v tomto prostoru jsou vytvořeny 4 vrstvy sítě.



Obr. 1. 10 On Selection – Skin Depth Based operátor [4]

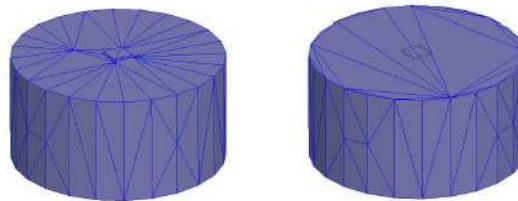
Operátor „Inside Selection – Length Based“ má stejné nastavení jako operátor „On Selection – Length Based“, což znamená rozměr oka sítě a počet prvků sítě. Tento operátor však zajišťuje tvorbu homogenní sítě v objektu, což znamená, že se oka sítě vytvoří stejně velká, jak je vidět na obrázku 1. 11. Červený objekt na obrázku opět představuje síť bez operátoru a na objekty napravo je aplikován operátor sítě.



Obr. 1. 11 Inside Selection – Length Based operátor [4]

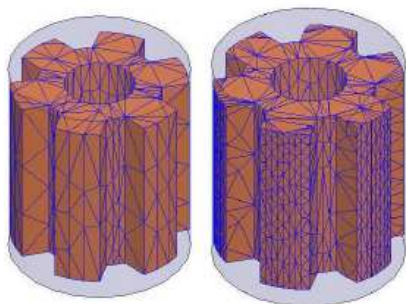
Pokud máme v modelu zakřivené objekty, je vhodné použít operátor „Surface Approximation“, který je specifický tím, že se dá kurzorem buď velice zhuštit, nebo zjemnit. Pokud někomu nevyhovuje tato funkce, je zde možnost manuálního nastavení rozměru a úhlů oka sítě. Mimo síťové operátory je tato funkce použita k tvorbě automatické sítě, avšak nastavení je defaultně na středu rozsahu zahuštění.

Představme si, že máme na povrchu objektu malou drážku, která není předmětem zkoumání. Ať už použitím operátoru, nebo bez nich bychom se dostali do situace, kdy program vytvoří síť na přechodech této drážky. V daném příkladu jde o banalitu, ale kdybychom těchto drážek měli velké množství, výpočet by se značně prodloužil. Proto je zde operátor sítě „Model Resolution“, jenž určí maximální velikost objektů, které nebudou uvažovány pro tvorbu sítě. Tak jsme schopni nastavit síť tím způsobem, že zmiňované drážky budou ignorovány pro tvorbu sítě a bude se k problému přistupovat, jako by na objektu nebyly. Obrázek 1. 12 je ilustrativní případ drážky, kde vidíme na levém válci, jak vypadá síť za předpokladu, že drážku respektujeme. Pravý válec pak uvažuje operátor „Model Resolution“, jenž má nastavenou velikost tak, aby tuto drážku ignoroval při tvorbě sítě. Díky tomuto operátoru se dá výpočet mnohonásobně zrychlit.



Obr. 1. 12 Příklad Model Resolution operátoru [4]

Poslední ze síťových operátorů je dostupný pouze pro 3D modely a používá se hlavně na objekty typu „Band“ nebo na objekty, které se mají pohybovat. Operátor „Cylindrical Gap Treatment“ využívá toho, že jsou dva objekty blízko sebe (jako například stator a rotor) a na nejbližších objektech vytvoří hustou síť. Tak se dosáhne kvalitní sítě ve vzduchové mezeře u točivých strojů. Tento operátor je automaticky zařazen do výpočtu ve chvíli, kdy se nadefinuje „Motion setup“. Je určitě možné



Obr. 1. 13 Síť na Bandu [4]

použít kombinaci výše uvedených operátorů k manuálnímu nastavení sítě ve vzduchové mezeře, ale použití tohoto operátoru je mnohem jednodušší. Na obrázku 1. 13 vidíme, jak se zhuští síť na vnější straně rotoru spínaného reluktančního motoru. Model vlevo je bez použití tohoto operátoru a model vpravo uvažuje použití zmiňovaného operátoru.

Když nastavíme všechny operátory, je třeba aplikovat jejich nastavení na daný model pomocí volby „Maxwell 2D/3D – Analysis Setup – Apply Mesh Operations“. Následně se můžeme podívat buď na tabulku v „Solution Setup“, nebo na obrázek sítě. Když se nám výsledek nebude zdát dostatečný, je potřeba vytvořenou síť přenastavit na automatickou, upravit příslušná místa na modelu a opět aplikovat na model nastavení síťových operátorů. Pokud chceme použít auto adaptivní tvorbu sítě v řešiči transient, je zde možnost na stejném modelu vytvořit síť, následně přejít do transientního řešiče a síť z projektu importovat.

1.4 Výsledky simulací

Program umožňuje jednak zobrazit pole jako mapu, a jednak jako vektory a siločáry. Na výběr jsou zde magnetická indukce, intenzita pole, magnetický tok a proudová hustota. Dále je možné zobrazit například energie nebo určité typy ztrát. Díky těmto výsledkům můžeme analyzovat cesty magnetického toku nebo syčení stroje, a následně upravit konstrukci stoje, buzení nebo počet závitů a jiné. Pokud budeme řešit přechodné děje, je možné z programu vyexportovat animaci, jež nám umožní vidět změny pole během chodu. Sestrojení různých grafů tento program umožňuje hned několika způsoby.

Create Magnetostatic Report
 Create Fields Report
 Create Report From File...
 Obr. 1. 14 Výsledky

magnetického toku nebo syčení stroje, a následně upravit konstrukci stoje, buzení nebo počet závitů a jiné. Pokud budeme řešit přechodné děje, je možné z programu vyexportovat animaci, jež nám umožní vidět

Použitím „Rectangular plot“ zobrazíme například fázové proudy, indukované napětí, moment a jiné. Je samozřejmě možné do jednoho grafu zobrazit více veličin a zkoumat tak vzájemné působení. Dále máme možnost zobrazit několik veličin pod sebou pomocí „Rectangular Stacked Plot“ a sledovat tak například kmitočty signálů nebo přehledně sledovat změny různých veličin

Rectangular Plot
 Rectangular Stacked Plot
 Data Table
 3D Rectangular Plot
 Rectangular Contour Plot
 Obr. 1. 15 Grafické výsledky

najednou. Pokud nás nezajímá grafická podoba výsledku, můžeme využít k zobrazení hodnot datovou tabulku. Tato možnost je vhodná například pro výpočet síly či indukčnosti různých částí stroje. Jestliže optimalizujeme rozměry modelu v závislosti na velikosti budícího proudu, je vhodné pro nalezení optimální konstrukce použít výsledné zobrazení pomocí 3D grafu. Konkrétně v tomto příkladu je třeba ještě před výpočtem správně nastavit parametrickou simulaci, čímž se budeme zabývat v kapitole výpočtu indukčnosti. Jakožto další příklad poslouží problematika stejnosměrného stroje, jenž má definovaný tvar magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Abychom mohli zobrazit velikosti magnetické indukce, potřebujeme nejprve pevný bod, o který se můžeme „opřít“, v čemž spočívá odlišnost tohoto výsledku. Ve vzduchové mezeře je tedy nezbytné vytvořit kružnici, při zobrazení výsledku vybereme možnost zobrazit pole a jako geometrii zvolíme již zmíněnou kružnici. Použitím jedné z výše uvedených možností nebo jejich určité kombinace můžeme dojít k řadě zajímavých a důležitých výsledků. K rychlému seznámení se softwarem to je prozatím vše, k detailnějšímu popisu a nastavení se ještě vrátíme v kapitole o návrhu a simulacích.

2 Spínaný reluktanční motor

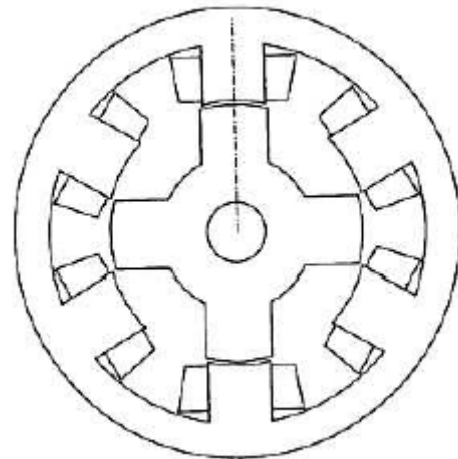
Princip spínaného reluktančního motoru je znám poměrně dlouho (1. polovina 19. století), nicméně v té době se nedal využít v plném rozsahu. Tento typ točivého stroje patří do skupiny tzv. elektricky komutovaných strojů, což vede k problematice řízení pomocí speciálního měniče. Díky rozvoji v oblasti výkonové elektroniky se postupně tento stroj dostával více a více na světlo díky jeho přednostem, které nyní v rychlosti rozebereme. Konstrukce rotoru je velice jednoduchá a technologicky nenáročná, protože na rotoru jsou sice póly, ale není zde žádné vinutí. Vinutí celého stroje je usazeno na póly statoru. Díky tomuto uspořádání se dostáváme k faktu, že většina ztrát vzniká na statoru, jenž se dobře chladí. Další výhodou z pohledu oteplení je, že stroj nemá žádné magnety na rotoru, což umožňuje větší dovolené oteplení rotoru než u motorů s permanentními magnety. Záběrný moment může být vysoký bez problémů spojených s velkým záběrným proudem, jako to bývá u indukčních strojů při vysokém skluzu. Stroje mohou pracovat i při velmi vysokých rychlostech. Díky těmto vlastnostem, ke kterým bezesporu patří i jeho cena, je SRM konkurencí stejnosměrných ale i střídavých točivých strojů. Hlavním zdrojem této kapitoly byla přiložená literatura [2], [6], [7].

Jak již bylo zmíněno, jediné vinutí stroje je na statoru, což znamená, že toto vinutí zastává i roli buzení stroje. Tento fakt je nevýhoda oproti strojům s PM, protože vede k větším ztrátám v mědi. Další nevýhodou je, že vznik momentu je pulzační, což zapříčiní zvlnění momentu a může to vést ke zvětšení akustického hluku. V úzkém rychlostním rozsahu je možné toto zvlnění snížit, ale v širokém rozsahu rychlosti to možné není. Na tento fakt je třeba dbát při konstrukci a je nezbytné přizpůsobit elektrickou a mechanickou přesnost, aby stroj v provozu nepřekročil předepsanou akustickou mez. Pokud se podíváme na porovnání s jinými stroji za stejných podmínek, SRM není menší, než indukční stroj za stejných podmínek a parametrů. Při malých konstrukcích a malých výkonech nedosahuje ani SRM ani IM na vlastnosti BLDC strojů. Spínaný reluktanční stroj navíc nemůže fungovat sám na střídavé síti, a navíc musí mít snímače polohy často na rotoru, aby byla zajištěna přesná komutace stroje.

2.1 Činnost a moment

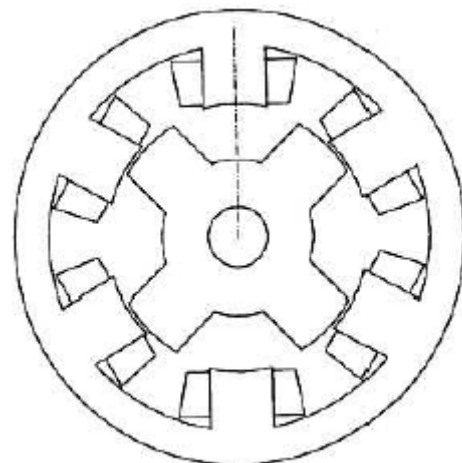
Jak již bylo zmíněno, na statoru i rotoru jsou vyvedené póly, což však znamená, že každý „zub“ na statoru je část pólu, na nichž je vinutí, tato protilehlá vinutí jsou spojena do série nebo paralelně a dohromady tvoří pólovou dvojici sever – jih. Počet pólů na statoru a rotoru je jiný vzhledem k počtu fází. Typické konstrukce jsou 6/4, 8/6 a podobně, protože platí vztah $N_r = N_s - (N_s / m)$, kde N_r značí počet pólů rotoru, N_s počet pólů statoru a m je počet fází.

Během provozu stroje rozlišujeme tři základní stavy, a to sice sousá poloha, nesousá poloha a poloha částečného překrytí. Sousá poloha je stav, kdy se osa statoru a rotoru překrývají (jejich póly jsou pod sebou) Obrázek 2. 1. Pokud v tomto stavu budeme danou fází napájet proudem, rotor nebude vyvíjet žádný moment, protože je ve stavu nejnižší reluktance, a tudíž nejvyšší indukčnosti. Pokud ale rotor vychýlíme na libovolnou stranu, dojde při napájení stejné fáze proudem ke snaze přitáhnout rotor zpět do sousé polohy. V sousé poloze je reluktance nejnižší, poněvadž vzduchová mezera je zde nejmenší, a proto se magnetický tok uzavírá po nejkratší cestě, z čehož plyne maximální indukčnost. V této poloze může nastat jev přesycení ve jhu statoru a rotoru. Proud potřebný k nasycení můžeme odhadnout, pokud bude průřez, kudy se uzavírá tok, stejný. Jinými slovy radiální šířka jha statoru musí být polovinou šířky statorového pólu a zároveň rotorového pólu. Dále na vytvoření potřebné magnetické indukce B_s ve vzduchové mezeře δ budeme potřebovat proud i_s , počet závitů N_p , a to podle vztahu $N_p i_s = B_s / \mu_0 \delta$.



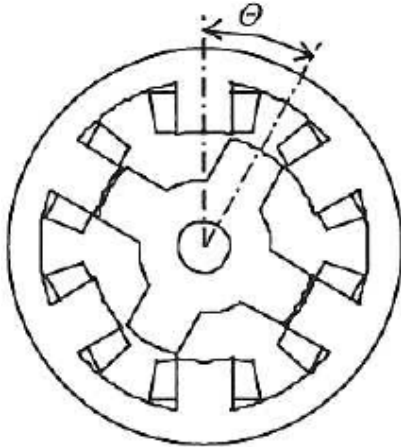
Obr. 2. 1 Sousá poloha [2]

Když se teď bude osa statorového pólu překrývat s osou mezi rotorovými póly jako na obrázku 2.2 (statorový pól je přesně mezi rotorovými póly), nacházíme se v nesousé poloze. Podobně jako v sousé poloze, pokud budeme příslušnou fází napájet proudem, nebude vznikat žádný moment. V případě, že rotor vychýlíme na jednu nebo druhou stranu, dojde k vytvoření momentu, jenž se snaží rotor otočit do nejbližší sousé polohy. Tato poloha je označována jako nestabilní. Díky největší vzduchové mezeře je zřejmé, že v tomto stavu bude reluktance největší (nejdelší cesta uzavření toku), a tudíž zde bude indukčnost nejmenší.

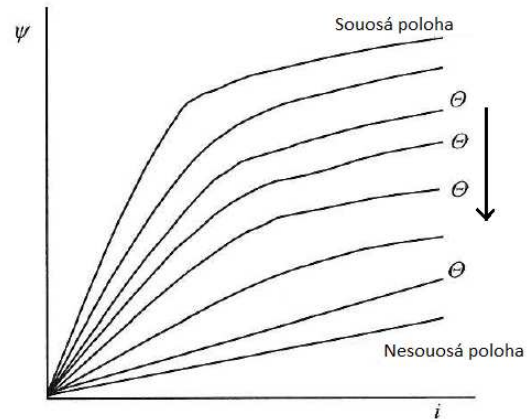


Obr. 2. 2 Nesousedá poloha [2]

Přesycení v této poloze není až tak markantní, jako v poloze sousé. Proud potřebný k nasycení se dá vyjádřit vztahem $\lambda N_p i_s = B_s$, kde λ je poměr maximální indukčnosti v sousé poloze ku minimální indukčnosti v nesousé poloze, a platí zde stejné podmínky jako v předchozím případě.



Obr. 2. 3 Poloha mezi póly [2]



Obr. 2. 4 Závislost toku a proudu na poloze rotoru [2]

Poslední příklad polohy rotoru vůči statoru je částečné překrytí, což znamená, že se rotor nenachází ani v souosé ani v nesouosé poloze (obrázek 2. 3). Těchto poloh může být teoreticky nekonečně mnoho, protože v každé poloze bude jiná velikost vzduchové mezery, a tudíž se bude tok uzavírat delší nebo kratší cestou, proto bude i jiná velikost indukčnosti. Tuto závislost popisuje graf $\psi = f(i)$, kde Θ je určitá poloha rotoru vůči statoru jako je vidět na obrázku 2. 4.

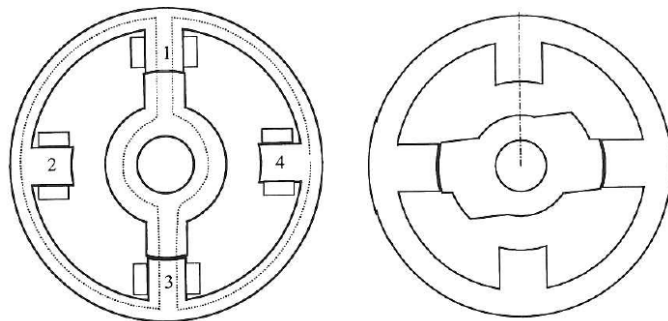
Otáčení stroje se dá tedy popsat tak, že určitou fází statoru protéká proud, vzniká moment ve směru nárůstu indukčnosti a rotor se otáčí ve směru nejmenší reluktance (souosá poloha). Dále spíná další fáze stroje, aby se rotor dále otáčel. Jestliže se šířka statorového a rotorového pólu shoduje, maximální indukčnost bude pouze jedna jediná hodnota. Pokud se však šířky liší, maximální indukčnost bude interval hodnot. Aby se stroj neustále točil, je důležité správně spínat a vypínat vedení příslušných fází, a to sice v závislosti na poloze rotoru, podobně jako u BLDC motorů. Když nyní budeme uvažovat stroj, kde bude jedna rotorová a statorová pólová dvojice, rotor se bude nacházet v určité poloze Θ a vinutí statoru bude napájeno proudem, rotor se bude snažit zaujmout souosou polohu pomocí vzniklého momentu. Vzniklý moment je přímo úměrně závislý na změně koenergie a nepřímo úměrně na změně polohy rotoru, přičemž koenergie je plocha pod čarou v grafu $\psi = f(i)$. Jinými slovy se rotor pootočí o určitou hodnotu $\Delta\Theta$ při $\Delta W'$ koenergie za pomoci momentu $M = \Delta W' / \Delta\Theta$.

Dále je třeba si uvědomit, že spřažený tok je nelineárně závislý na proudu při různém natočení rotoru. Pokud budeme uvažovat vliv sycení a zvýšíme napájecí proud, indukčnost klesne, což je dáno magnetizační charakteristikou plechů statoru a rotoru. Při návrhu chceme docílit co největšího poměru indukčností (minimálně 10), čehož můžeme docílit malou vzduchovou mezerou a použitím optimálního materiálu (například kobalt – železo). Pokud však nebudeme uvažovat sycení,

indukčnost nebude záviset na proudu, nýbrž na poloze rotoru. Moment bude konstantní, pokud bude konstantní proud.

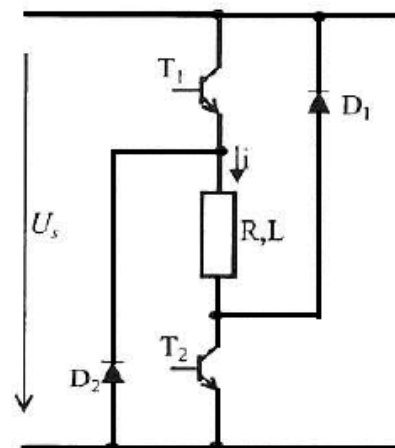
2.2 Konstrukce a typy SRM

Za základní klasifikaci SRM se dá považovat rozdělení na souměrný a nesouměrný stroj. Jako souměrný stroj si představme takový, jenž má statorové i rotorové póly symetrické vůči středu rotoru a rovnoměrně rozložené po obvodu statoru, respektive rotoru. Nesouměrný stroj tyto podmínky



Obr. 2.5 Zleva – Souměrný stroj, Nesouměrný stroj [2]

naopak nesplňuje například kvůli ne zcela dobrým rozběhům motoru nebo celkovému zlepšení vlastností stroje. Příkladem těchto strojů je obrázek 2. 5. Nyní se ve stručnosti podíváme na pár konstrukčních uspořádání motorů z pohledu počtu fází. Ještě, než přistoupíme k jednotlivým typům, je třeba brát na vědomí, že motor má na vstupu modulovaný signál vytvořený nejčastěji pomocí šířkově pulzní modulace (PWM). Za předpokladu, že máme střídavou síť, musíme nejprve použít usměrňovač, dále tranzistorový měnič a pomocí logiky spínání vytvoříme PWM signál. Další možností je napájení ze stejnosměrného zdroje, což eliminuje použití usměrňovače a postačí pouze tranzistorový měnič napětí. Nyní se dostáváme k úvaze o počtu fází, poněvadž ze sítě použijeme buď jedno fázové napájení, nebo třífázové, nicméně SRM konstrukce může být i čtyřfázová. Tento pojem chápeme jako počet jednotlivých napájecích sekcí v motoru, nikoli jako počet fází ze sítě. Teoreticky je možné dosáhnout libovolného počtu fází, pokud to napájecí síť vydrží. Zvýší se ale cena měniče, protože budeme potřebovat více součástek. Na obrázku 2. 6 můžeme vidět, jak vypadá jeden blok měniče napětí pro SRM, kde RL je zátěž, respektive fáze motoru. Toto zapojení je tedy nezbytné pro každou fázi motoru. Nyní se již podíváme na popis jednotlivých typů SRM.



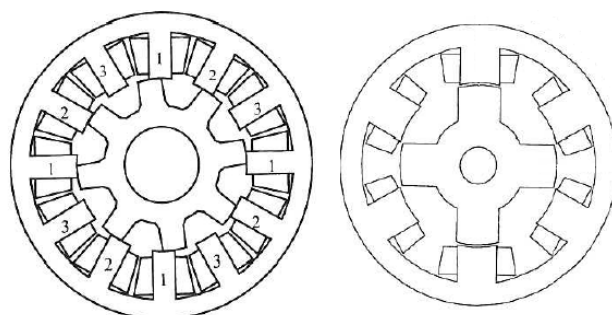
Obr. 2.6 Jeden blok řídicího měniče [2]

Jednofázový SRM je, co se týče konstrukce a ceny, nejlehčí stroj, poněvadž má minimální počet fází (respektive cívek), a díky tomu málo spínacích součástek potřebných k řízení. Představme

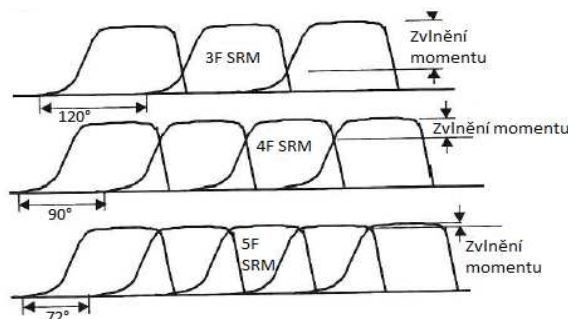
si nyní konstrukci, kde má stator pouze jednu fázi, což znamená jenom dva póly proti sobě. Jestliže se dostaneme do stavu, kde se nebude vytvářet moment, stroj se zastaví a dále se nerozběhne. Pokud by se nám však podařilo stroj nějakým způsobem rozběhnout, stejně nebude schopen vytvářet konstantní moment během jednoho pracovního cyklu stroje (jedna otáčka). Řešení je takové, že se na rotor umístí vodivé vložky (Al nebo Cu), jež jsou asymetrické. Při napájení statorové fáze v nich vznikají vířivé proudy, které způsobí reakční moment vůči poli statoru. Vložky následně zaniknou a zajistíme tím dobrý rozběhový impuls v kterékoliv poloze rotoru. Toto řešení s sebou ale nese jisté problémy, jako jsou například vyšší ztráty nebo nezbytnost vodivých vložek.

Dvoufázový motor vidíme na obrázku 2. 5, kde první fázi tvoří vinutí na pólu jedna a tři, druhou fází je vinutí na pólech dva a čtyři. Vinutí příslušných fází jsou spojena do série nebo paralelně. Aplikací teorie souosé a nesouosé polohy rotoru se dostaneme do situace, kde existují dvě souosé a zároveň dvě nesouosé polohy (podle pohledu na fázi), a tudíž jsou zde polohy, kde se prakticky nevytváří moment. Tento problém se dá vyřešit pomocí nesouměrné konstrukce, jež s sebou nese jistá omezení. Díky jiné konstrukci rotoru odstraníme místa, kde se nevytváří moment, ale snížíme tím poměr indukčností. Nicméně vhodnou konstrukcí rotoru se dá docílit lepšího nasycení stroje, čímž se zlepší indukční poměr. Větší prostor pro statorové vinutí navíc snižuje ztráty v mědi a větší aktivní plochou plechů dosáhneme menších ztrát v železe a menšího akustického hluku.

Trojfázový stroj v souměrném provedení má typické konstrukce 6/4 nebo 12/8, ale i 12/10, což vede k závěru, že rotor má více pólů. Díky tomu dosahuje stroj menšího zvlnění momentu, ale má nižší indukční poměr. Na uspořádání 6/4 proti 12/8 si popíšeme hlavní důvod, proč použít více pólů. Více pólů znamená více pracovních cyklů a menší ztráty ve vinutí. Protože konce vinutí jsou kratší, magnetický tok se uzavírá po kratších cestách a dosáhneme tak lepšího poměru indukčností. Když se u konstrukce 12/8 budeme bavit o čtyřpólovém stroji, je tím myšleno, že na každou fázi připadají čtyři póly, na nichž jsou cívky spojené do série nebo paralelně. Příklad obou strojů vidíme na obrázku 2. 7.



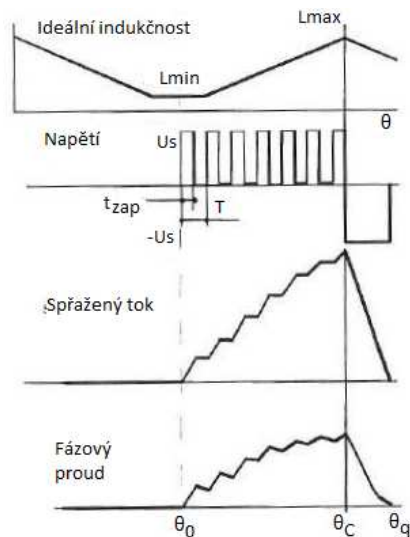
Obr. 2. 7 Třífázový stroj 12/8 a 6/4 [2]



Obr. 2. 8 Porovnání z pohledu [2]

Nyní si obecně shrneme, proč uvažovat vícefázové motory. Jeden z důvodů je, že s větším počtem fází získáme více pracovních cyklů beze změny počtu pólů rotoru. Kdybychom měnili počet pólů rotoru, zvýšíme sice počet pracovních cyklů, ale nepříznivě tím ovlivníme i poměr indukčností. Další výhodou použití více fází motoru je menší zvlnění momentu, a tím nižší hluk motoru, jenž můžeme vidět na obrázku 2. 8. Z obrázku je patrné, že čím více fází, tím lepší průběh momentu (méně zvlněný), ale otázkou samozřejmě zůstává aplikace motoru. Pokud aplikace nevyžaduje naprosto vyhlazený moment, je zcela jistě lepší zvolit jednodušší konstrukci, protože bude levnější z hlediska řízení (menší počet spínacích prvků). Motory s více fázemi navíc mohou pracovat v režimu sepnutí více fází najednou.

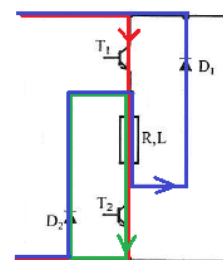
2.3 Spínací proces



Obr. 2. 9 Unipolární řízení [2]

Jak již bylo zmíněno, SRM je napájen z měniče napětí. Nyní se podíváme na princip funkce tohoto měniče. V prvním případě se budeme zabývat řízením napětí pomocí unipolárního spínání tranzistorů. Unipolární z toho důvodu, že se napětí v tomto případě mění mezi hodnotou $+U_s$ a nulou. Uvažujme nyní zapojení 2. 10 které sestává ze dvou tranzistorů T_1 , T_2 a diod D_1 , D_2 , kde jeden tranzistor je trvale sepnutý během nárůstu indukčnosti (přesun z nesouosé polohy do souosé) a druhý je spínán vysokou frekvencí s konstantním poměrem otevření $\alpha = t_{ZAP}/T$, kde t_{ZAP} je doba vedení a T je perioda spínací frekvence. α může nebývat hodnoty mezi nula a jedna. Na obrázku 2. 9 vidíme idealizované průběhy indukčnosti, napětí, spřaženého toku a fázového proudu. Spínání probíhá tím způsobem, že se během intervalu $|\theta_0 - \theta_q|$ střídají tři stavy sepnutí. Nejprve jsou sepnuty oba dva tranzistory, a tudíž je svorkové napětí připojené na příslušnou fázi (Obr. 2. 10 - červená). Tranzistor T_1 se následně vypne a obvod je krátce zkratovaný přes tranzistor T_2 a diodu D_2 , kde T_1 a D_2 jsou „spínací součástky“ a T_2 a D_1 jsou "komutační diody", poněvadž mění svůj stav pouze v úhlech θ_c a θ_0 (Obr. 2. 10 - zelená). V další fázi přebere vedení tranzistoru T_2 dioda D_2 (Obr. 2. 10 - modrá). Podle obrázku 2. 9 vidíme, že θ_0 a θ_c jsou komutační úhly, a to sice pro nesouosou a souosou polohu rotoru. Princip bipolárního spínání je obdobný jako unipolární, ale má větší dynamiku systému, protože umožňuje změnu napětí v intervalu $|+U_s, -U_s|$. Díky využití celé efektivní momentové oblasti je bipolární řízení v nízkých otáčkách efektivnější.

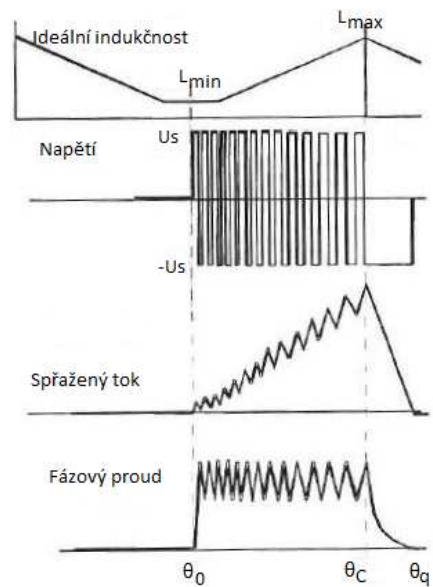
Jak již bylo zmíněno, SRM je napájen z měniče napětí. Nyní se podíváme na princip funkce tohoto měniče. V prvním případě se budeme zabývat řízením napětí pomocí unipolárního spínání tranzistorů. Unipolární z toho důvodu, že se napětí v tomto případě mění mezi hodnotou $+U_s$ a nulou. Uvažujme nyní zapojení 2. 10 které sestává ze dvou tranzistorů T_1 , T_2 a diod D_1 , D_2 , kde jeden tranzistor je trvale sepnutý během nárůstu indukčnosti (přesun z nesouosé polohy do souosé) a druhý je spínán vysokou frekvencí s konstantním poměrem otevření $\alpha = t_{ZAP}/T$, kde t_{ZAP} je doba vedení a T je perioda spínací frekvence. α může nebývat hodnoty mezi nula a jedna. Na obrázku 2. 9 vidíme



Obr. 2. 10 Zapojení spínačů [2]

2.4 Proudová regulace

Principů regulací motoru je dnes celá řada a jednou z možností je použití hysterezního pásma. Funkce regulátoru je poměrně jednoduchá – regulovaná veličina se nachází v určitém regulačním pásmu od kladné hodnoty přes nulu do záporné hodnoty. Přesnost regulace je dána šířkou regulačního pásma, což je určeno kvalitou spínacích součástek. Při použití pro regulaci SRM se užívá regulace fázového proudu na intervalu tvorby momentu. Tranzistory jsou při této regulaci spínané podle skutečné hodnoty proudu. Jestliže je skutečná hodnota větší než žádaná, regulátor sepne tím způsobem, aby se proud snížil, respektive pokud je skutečná hodnota menší než žádaná, regulátor sepne tak, aby se proud zvýšil. Tento

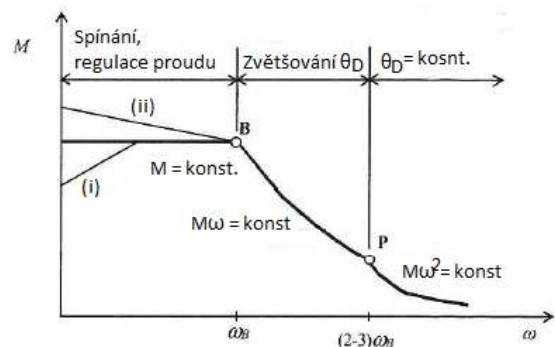


Obr. 2.11 Bipolární řízení [2]

způsob regulace umožňuje jak unipolární, tak bipolární spínání. Když budeme uvažovat konstantní napájecí napětí, frekvence spínání se bude postupně zmenšovat s narůstající indukčností. Podle obrázku 2.11 vidíme mimo jiné, že na začátku momentotvorné oblasti není změna indukčnosti tolik markantní, a tudíž je spřažený tok defacto konstantní. Při dalším nárůstu indukčnosti dochází k nárůstu toku. Obrázek taktéž reprezentuje bipolární spínání, protože napětí je spínáno mezi kladnou a zápornou hodnotou.

2.5 Mechanická charakteristika

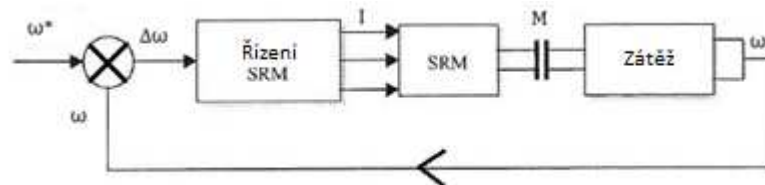
Elektromagnetický moment je funkcí úhlové rychlosti otáčení (respektive otáček) podle obrázku 2.12, kde na intervalu $|0, \omega_B|$ je moment řízený proudem motoru (respektive proudem regulátoru), z čehož vyplývá, že otáčivou rychlost je možné regulovat pomocí regulátoru v celém rozsahu tohoto intervalu. Je jasné, že přesnou hodnotu proudu ovlivňuje několik faktorů, kterými jsou například typ zátěže (charakteristika zátěže), aktuální otáčivá rychlost, samotný regulátor (typ, kvalita) či řídicí strategie. Na obrázku vidíme, že moment klesá při otáčkách větších než ω_B , což umožňuje optimalizaci zvlnění momentu nebo účinnosti za předpokladu nízkého zatížení motoru, nicméně bod *B* charakterizuje maximální rychlost, kdy napájíme SRM maximálním proudem při jmenovitém napětí a konstantním spínacím úhlu



Obr. 2.12 Mechanická charakteristika SRM [2]

tranzistorů θ_0 . Snaha udržet moment konstantní je samozřejmě možná i při vyšších rychlostech, než je ω_B , ale jen za určitých podmínek. Při zvyšování rychlosti nad ω_B bude moment klesat konstantně nejprve s první mocninou rychlosti a následně s kvadrátem rychlosti, což se bude dít při jmenovitém napětí a konstantním úhlu sepnutí tranzistorů. Pokud nyní budeme uvažovat regulaci spínacího úhlu tranzistoru (zvětšení úhlu), je možné v určitém rozsahu udržet maximální proud motoru a pokles momentu udržet podle křivky $M\omega = konst.$ Tento způsob řízení však zvyšuje ztráty v železe a ve vinutí. Problém může nastat při nízkých otáčkách. Když budeme omezeni frekvencí spínání součástek (např. GTO), bude těžké omezit špičky proudu a jsme tak nuceni proud snížit podle (i). Pokud tento problém nenastane a motor pracuje s krátkodobou periodickou zátěží, je možné moment zvýšit dle (ii).

2.6 Řízení spínaného reluktančního motoru



Obr. 2. 13 Částečné blokové schéma řízení SRM [2]

Částečné schéma je analogické stejnosměrným a střídavým strojům, znázorňuje jej obrázek 2. 13, kde vidíme jednoduchou otáčkovou smyčku. Na zátěži je snímaná skutečná rychlost a ta je porovnána s požadovanou rychlostí. Rozdíl rychlostí je vstupem do řízení, jímž je měnič, a pomocí logiky spínání tranzistorů se požadovaná hodnota přenesse ve formě proudu do motoru. Vstupem do motoru jsou tedy proudy a výstupem je moment. O něco podrobnější schéma by popisovalo, že porovnání probíhá například v PID regulátoru, jehož vstupem jsou otáčky a výstupem je žádaná hodnota proudu. Tento proud vstupuje do měniče spolu s informací o poloze rotoru a aktuálními proudy motoru. Měnič na základě vstupu zvolí vhodnou kombinaci sepnutí tranzistorů a vyšle napětí na příslušné fáze do motoru. Díky fázovému napětí teče motorem proud, motor se otáčí úhlovou rychlostí omega a vytváří moment odpovídající proudu a otáčkám. Na výstupu motoru by ještě byl snímač polohy, jenž vysílá signál do měniče. Snímač polohy je důležitý kvůli přesnému řízení a kvůli minimálnímu zvlnění momentu.

Některé aplikace však nepožadují minimální zvlnění, protože se využívá pulzace momentu, například pohony vibračních mlýnů, které drtí kameny. S dalšími aplikacemi SRM se můžeme setkat v lékařství, kde se využívá odstředivých sil při vysokých rychlostech motorů. Uplatnění nachází SRM i v trakci jako pohon lokomotiv, případně jako pohon vysokozdvížných vozidel.

2.7 Ztráty

Ztráty jsou nedílnou součástí v každém elektrickém stroji a lze si je po fyzikální stránce představit asi takto. Když na magnetický materiál přiložíme vnější magnetické pole, začne se po určité cestě uzavírat magnetický tok. Energie vnějšího magnetického pole způsobí změnu doménové struktury uvnitř magnetického materiálu, což znamená změnu orientace a velikosti domén. Při následném oslabení vnějšího pole dochází k natočení do nové polohy, jež odpovídá velikosti magnetického pole. Případné natočení do výchozí polohy nastane při úplném odstranění vnějšího magnetického pole. Protože se jedná o pohyb, je potřeba energie, která je v tomto případě nevratná a v materiálu se přeměňuje na teplo. Vnější magnetické pole se může měnit libovolně rychle, respektive se mění podle změny napájení, což znamená, že rychlost změny má velký vliv na velikost ztrát. Velikost ztrát je tedy úměrná frekvenci vnějšího magnetického pole. Vlastnosti materiálu ovlivňují elektrickou vodivost a mají též veliký vliv na velikost ztrát. Tyto složky ztrát se v oblasti elektrických strojů nazývají ztráty v železe a dají se definovat podle Steinmetzova vztahu dle (1):

$$P_{Fe} = P_h + P_c + P_e = K_h * f * B^2 + K_c * (f * B)^2 + K_e * (f * B)^{1.5} \quad (1)$$

kde K_h je hysterezní koeficient ztrát, K_c je koeficient vířivých proudů a K_e je koeficient dodatečných ztrát. Tyto koeficienty jsou dané pro každý materiál. Dále můžeme říci, že:

$$K_h = \frac{K_1 - K_c * f^2}{f} \quad (2)$$

$$K_c = \pi^2 * \sigma * \frac{d^2}{\delta} \quad (3)$$

$$K_e = \frac{K_2}{f^{1.5}} \quad (4)$$

Je důležité si uvědomit, že vztahy (1–4) platí pro frekvenci vnějšího magnetického pole. Dále koeficienty K_1 , K_2 jsou dány BH křivkou materiálu, σ je vodivost materiálu, d je tloušťka jednoho plechu jádra a δ je hloubka povrchu. Hlavní dva faktory, z nichž se skládají ztráty v železe, jsou tedy ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. Hysterezní ztráty jsou definovány šířkou BH křivky, oproti tomu ztráty vířivými proudy jsou dány rozměry objektu. Nicméně je třeba brát v úvahu, že se vířivé proudy mohou vyvinout pouze u plného materiálu. Na tento fakt je důležité myslet při práci s programem Ansys, protože v případě, že chceme počítat ztráty vířivými proudy, je třeba objekt definovat jako „Solid“ neboli jako plný materiál.

Ztráty ve vinutí definujeme pomocí objemu V , který má vodivost σ a protéká jím proud s určitou proudovou hustotou J . Takto zavedené ztráty vypočítáme dle vztahu:

$$\Delta P_{SR} = \frac{1}{\sigma} \int J^2 * dV \quad (5)$$

Celkové ztráty vypočítáme součtem vztahu (1) a (5):

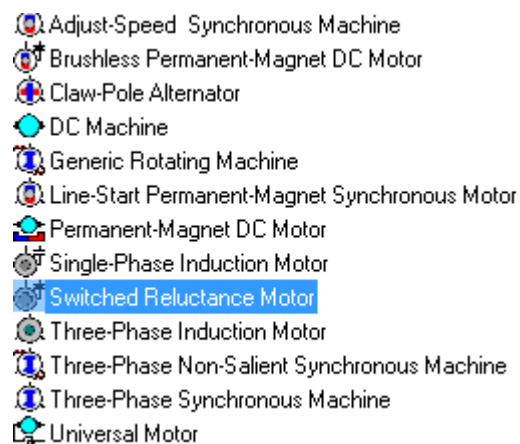
$$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{SR} \quad (6)$$

Obdobné vztahy platí i pro simulační program Ansys 17.0, jenž dále použijeme pro návrh a výpočty. Zdrojem pro teoretickou část byla literatura [9] a část rovnic jsem převzal z literatury [4]. Nyní se podíváme na některá specifika již zmíněného programu.

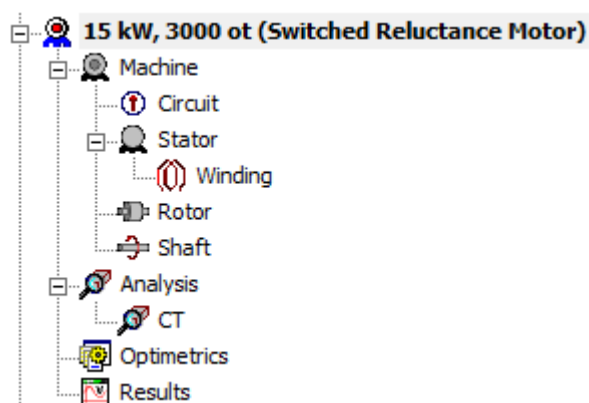
3 Návrh spínaného reluktančního motoru

V této kapitole se budeme pohybovat především v návrhovém modulu RMxprt, jenž slouží k rychlému návrhu elektrických točivých strojů. Jakožto zdroj pro získání rozměrů a informací o motoru sloužila literatura [3], [10], případně jsem rozměry upravil, aby splňovali možnosti nastavení programu.

3.1 RMxprt



Obr. 3.1 Typy strojů v RMxprt



Obr. 3.2 Projekt Manager SRM v RMxprt

Návrh každého točivého stroje začíná výběrem objektu, jež budeme navrhovat. Protože se jedná o software, může se stát, že navržený model stroje bude vypadat velice slibně, ale v reálné aplikaci tomu tak být nemusí. Na toto úskalí je třeba dát pozor, nad každým návrhem se patřičně zamyslet a zdůvodnit výsledky daného problému. Protože SRM je v databázi modulu RMxprt, je vhodné k návrhu použít právě tento modul. Na obrázku vpravo můžeme vidět již z části odkrytou volbu točivého stroje. Tato škála strojů se může zdát poměrně redukováná, nicméně díky možnosti exportu do prostředí Maxwell a následné úpravy pomocí UDP je tato škála zcela dostačující.

Výběrem spínaného reluktančního motoru se dostaneme do samotného srdce návrhového modulu, jenž předpřipraví v okně „Project Manager“ kolonky, které představují určité části motoru. Každý točivý stroj má svá specifická nastavení, a tudíž se kolonky pro různé stroje liší. Například indukční stroj má vinutí na rotoru i statoru, dále však neobsahuje kolonku circuit, poněvadž tato položka je specifická například pro SRM a BLDC stroje. Obecně - všechny točivé stroje, jež nemohou samostatně fungovat na napájecí síti a které ke své činnosti vyžadují vnější napájecí obvod, budou tuto kolonku mít. Složka „Machine“ tedy obsahuje specifické nastavení pro každý stroj. Záložka „Analysis“ je naopak nezbytná u každého stroje a její nastavení jsou pro všechny stejná, protože právě zde se nastavují štitkové hodnoty a typ zátěže. Je možné si v této záložce nastavit více typů analýz a následně vytvořit individuální model do Maxwellu. Záložka „Optimetrics“ slouží

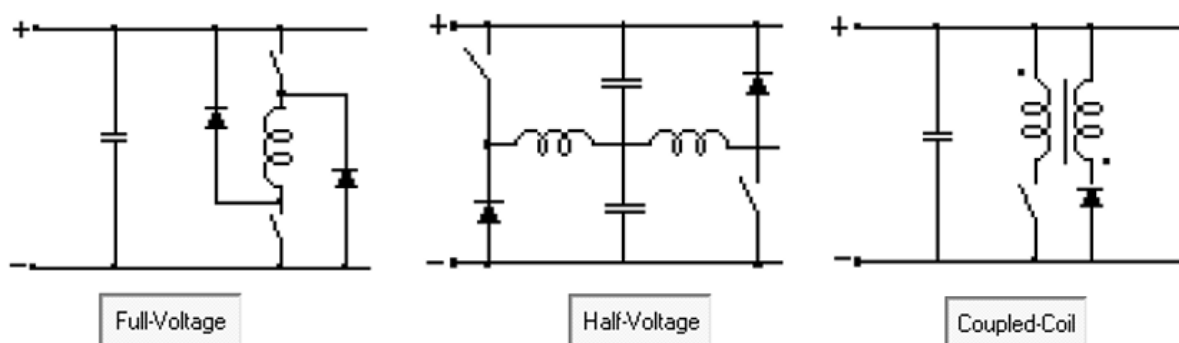
k parametrické analýze, již v RMxpřtu nastavovat nebudeme - této problematice se budeme věnovat v kapitole simulací v Maxwellu. Výsledky se dají zobrazit podobně, jako bylo popsáno v předchozí kapitole, nicméně RMxpřt má již předdefinované určité výsledky ve svém nastavení. Nyní se již podíváme na návrh samotného motoru.

3. 1. 1 Obecný návrh

Machine					
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	
Machine Type	Switched Reluctance Motor				
Frictional Loss	50	W	50W	The frictional loss measured at the reference speed	
Windage Loss	200	W	200W	The windage loss measured at the reference speed	
Reference Speed	3000	rpm		The reference speed at which the frictional and windage losses are measured	
Control Type	CCC			Control Type: DC, CCC (chopped current control)	
Circuit Type	Full-Voltage			Drive circuit type	

Obr. 3. 3 Machine tabulka

Obrázek reprezentuje jak kolonku „Machine“, tak i vzhled tabulek, které je nutné vyplnit v RMxpřtu při návrhu stroje. Jak již bylo zmíněno, tabulky se s každým strojem liší včetně určitých specifických prvků v tabulce. Jakožto kontrolní kolonkou je první řádek, kde vidíme název, respektive typ stroje, jenž navrhujeme. Tato kolonka je určena pouze pro čtení a uživatel jí z této pozice není schopen měnit. Nicméně typ stroje se dá lehce změnit pravým tlačítkem myši na RMxpřt design v project manageru. Další dva řádky reprezentují ztráty třením a ventilační ztráty. Jak již napovídá popisek, tyto ztráty jsou měřeny při referenční rychlosti, která je zadána o řádek níž. Nasledující kolonka představuje strategii řízení, a to sice DC a CCC. Tyto dvě možnosti se liší v napájecím obvodu, protože DC napájecí obvod neobsahuje proudové omezení jako CCC. Je potřeba si uvědomit, že RMxpřt vytvoří po návrhu napájecí vnější obvod, jenž je však značně zjednodušen oproti reálnému obvodu. S touto úvahou je poté možné říci, že logika regulace proudu pomocí CCC v RMxpřtu je provedena pomocí zařazení tranzistoru do série s hlavním spínačem v každé fázi. Navíc tento tranzistor je tzv. proudového typu s omezením na určitou hodnotu I_{max} a I_{min} , což je snaha o jednodušší hysterezní regulaci, která se používá pro spínané reluktanční motory. Poslední řádek určuje způsob napájení, respektive tvar řídicího obvodu. Každý z obrázků reprezentuje pouze jednu fázi.



Obr. 3. 4 způsoby řízení SRM v RMxpřtu

Protože spínaný reluktanční motor budeme napájet z měniče, je potřeba nastavit způsob spínání, k čemuž slouží záložka „Circuit“. Zde je třeba se zamyslet, jak vypadá přepínání fází v daném konstrukčním modelu. Je jasné, že se spínání bude lišit pro model 6/4 a pro 8/4, a to sice v době vedení jednotlivých spínacích součástek. Nicméně po prohledání nápovědy programu se dozvíme, že pokud nastavíme úhel vedení roven nule, problém vymizí, protože program na základě geometrie zvolí nejvhodnější spínací úhel. Nastavíme tedy pouze šířku pulzu na 120°, což znamená, že každá fáze bude vést 1/3 periody a zároveň, že fáze jsou od sebe posunuty od 120°. Protože jako spínací prvky jsou v obvodu použity tranzistory a k nim příslušné zpětné diody, je třeba zadat, jaký na nich bude úbytek napětí, což uvádí třetí a čtvrtý řádek. Poslední dva řádky se liší pro DC a CCC řídicí obvody, protože DC řízení nemá žádné proudové omezení. Zde jsem postupoval tím způsobem, že jsem prvně vyřešil model s DC napájením a zjistil jsem, jaký proud motor odebírá. Podle toho jsem nastavil další model už za použití CCC napájení. Použití regulátoru je nezbytné, poněvadž při rozběhu z nulových otáček může odebíraný proud vystoupat na 2 kA, což by v reálné aplikaci motor velice rychle zničilo. Dále se podíváme na návrh konstrukce rotoru a statoru.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Lead Angle of Trigger	0	deg	0deg	Lead angle of trigger in electrical degrees
Trigger Pulse Width	120	deg	120deg	Trigger pulse width in electrical degrees
Transistor Drop	5	V		Voltage drop of one transistor
Diode Drop	5	V		Voltage drop of one diode, or the total voltage for start-type circuits, in the discharge loop
Maximum Current	150	A	150A	Maximum current for chopped current control
Minimum Current	140	A	140A	Minimum current for chopped current control

Obr. 3. 5 Circuit tabulka

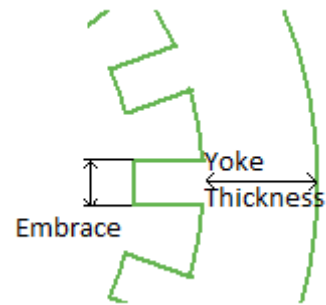
3. 1. 2 Stator a jeho vinutí

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Outer Diameter	250	mm	250mm	Outer diameter of the stator core
Inner Diameter	150	mm	150mm	Inner diameter of the stator core
Length	120	mm	120mm	Length of the stator core
Stacking Factor	0.95			Stacking factor of the stator core
Steel Type	M27_29G			Steel type of the stator core
Number of Poles	18			Number of poles of the stator core
Embrace	0.5		0.5	Pole embrace
Yoke Thickness	31	mm	31mm	Yoke thickness of the stator core

Obr. 3. 6 Tabulka stator

Základními rozměry každého motoru jsou jeho vnější průměr, vnitřní průměr a délka. Jinak tomu není ani u statoru, kde vidíme na obrázku jeho rozměry. Po těchto rozměrech následuje činitel

plnění, který zvolíme mezi hodnotami 0,9 až 0,99. Materiálovou kolonku přeskočíme a probereme ji až na konci, počet statorových pólů zvolíme 18. Nyní se podíváme na obrázek 3. 7, kde je popsáno, co jsou rozměry „Embrace“ – krytí a „Yoke Thickness“ – šířka jha. Pólové krytí je defacto nastavováno v procentech, protože změnou jeho šířky se mění mezera mezi jednotlivými póly statoru. Jak již bylo výše zmíněno, šířka pólu by měla cca odpovídat ½ šířky jha. Nyní se podíváme na materiály v Ansys softwaru. Program má poměrně velkou databázi materiálů zařazených do různých knihoven (RMxpert, maxwell). Databáze obsahuje základní informace o umístění a typu materiálu (vodič, ocel, permanentní magnet), dále relativní permeabilitu, koeficienty ztrát v železe a další. Přičemž do databáze programu je možno importovat další knihovny nebo případně přidat a upravovat nové materiály dle potřeby pro danou aplikaci. Podle zadání jsem zvolil elektrotechnickou ocel o programovém označení M27_29. Označení MXY



Obr. 3. 7 Specifikace rozměrů

Name	Type	Value	Units
Relative Permittivity	Simple	1	
Relative Permeability	Nonlinear	B-H Curve...	
Bulk Conductivity	Simple	2000000	siemens/m
Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
Electric Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector Mag	0	
Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector Mag	0	A_per_meter
Thermal Conductivity	Simple	0	W/m-C
Magnetic Saturation	Simple	0	tesla
Lande G Factor	Simple	2	
Delta H	Simple	0	A_per_meter
- Measured Frequency	Simple	9.4e+009	Hz
Core Loss Model		Electrical Steel	w/m^3
- Kh	Simple	196.8	
- Kc	Simple	0.417	
- Ke	Simple	0	
- Kdc	Simple	0	
Mass Density	Simple	7650	kg/m^3
Composition		Solid	
Specific Heat	Simple	0	J/kg-C
Young's Modulus	Simple	0	N/m^2
Poisson's Ratio	Simple	0	
Thermal Expansion Coefficient	Simple	0	1/C

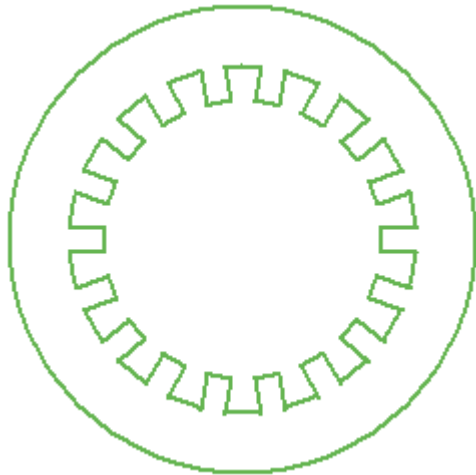
Obr. 3. 8 Vlastnosti materiálu M27_29

případně M27 používá v programu více materiálů, liší se však v parametrech. Hlavní rozdíly nalezneme ve vodivosti, především ve ztrátových koeficientech, protože některé materiály respektují jenom část koeficientu, případně počítají s jinou hodnotou. Relativní permeabilita je zde definována pomocí BH křivky, kterou je možné měnit. Pro další výpočty v Maxwellu jsem následně tento materiál upravil, konkrétně jsem změnil „Composition“ ze „Solid“ na

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Insulation Thickness	0.5	mm		Thickness of the insulation between stator core and field winding.	<input type="checkbox"/>
End Adjustment	5	mm	5mm	One-side end extended length	<input type="checkbox"/>
Parallel Branches	1			Number of parallel branches of stator winding	<input type="checkbox"/>
Turns per Pole	12		12	Number of turns per pole, 0 for auto-design	<input type="checkbox"/>
Number of Strands	1		1	Number of strands (number of wires per conductor), 0 for auto-design	<input type="checkbox"/>
Wire Wrap	0.1	mm		Double-side wire wrap thickness, 0 for auto-pickup in the wire library	<input type="checkbox"/>
Wire Size	Diameter: 2.743mm			Wire size, 0 for auto-design	<input type="checkbox"/>

Obr. 3. 9 Tabulka Winding

„Lamination“, což udává, že ocel není z plného materiálu a respektuje směr skládání plechů. Tento směr je samozřejmě možné zvolit (X, Y, Z v kartézské soustavě). Variabilita změn vlastností materiálu je zde tedy zastoupena v dostatečné míře a je na uživateli, jestli využije předdefinovaných materiálů nebo použije úpravou svůj vlastní. Tím jsme dokončili návrh statoru, co se týče konstrukce a materiálu, a nyní je ještě potřeba navrhnout vinutí. Obrázek 3. 9 ukazuje, jaké položky nabízí návrhová tabulka „Winding“. Čeho je dobré si všimnout, je sloupec „Description“, kde je u mnoha



Obr. 3. 10 Model statoru v RMXprt

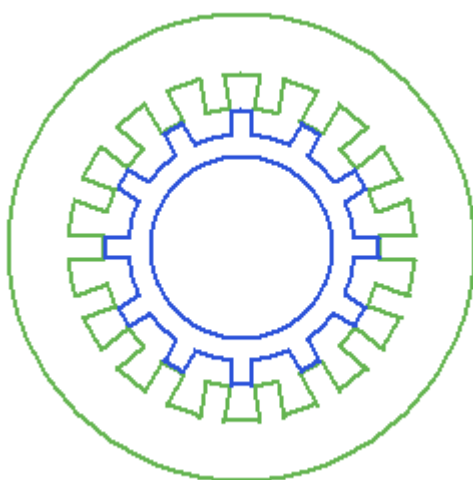
položek napsáno „0 for auto – design“. Tato možnost je poměrně užitečná, protože jako prvotní návrh vinutí stačí zadat pouze první tři řádky – konkrétně šířku izolace vinutí, šířku vinutí na jedné straně pólu a počet paralelních větví. Šířka vinutí na jedné straně pólu je dána konstrukcí statoru, respektive vzduchovou mezerou mezi póly, poněvadž je nutné počítat s tím, že v této mezeře budou dvě části vinutí. Ostatní části při prvním návrhu můžeme ponechat prázdné a program je automaticky vyplní za nás tak, aby byl výsledek co nejlepší. Nicméně při kontrole zjistíme drobné odchylky od ideálního návrhu a tato data je třeba optimalizovat, neboť mírnou úpravou můžeme značně snížit ztráty ve vinutí. Na rozdíly mezi auto-designem a upravenou verzí se podíváme v závěru této kapitoly, nicméně hodnoty na obrázku 3. 9 jsou již optimální pro nejvyšší účinnost. Počet závitů na pól je tedy 12 a je použit jeden drát na vodič. Vodiče jsou na pólech nevinuty tak, že je mezi nimi 0,1 mm mezera a drát vodiče má průměr 2,74 mm. Nyní máme vytvořený stator a jeho vinutí, můžeme se tedy podívat, jak vypadá prvotní náčrt modelu. Dále budeme pokračovat v návrhu obdobným způsobem na rotoru.

3. 1. 3 Návrh rotoru

Tabulka charakterizující rotor je pochopitelně velice podobná té, jež popisuje stator, jejich hodnoty se však odlišují. Vnější průměr rotoru musí být bezpodmínečně menší než vnitřní průměr statoru, protože jinak by se nevytvořila žádná vzduchová mezera a v nejhorším případě by se stator a

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Outer Diameter	149	mm	149mm	Outer diameter of the rotor core
Inner Diameter	100	mm	100mm	Inner diameter of the rotor core
Length	120	mm	120mm	Length of the rotor core
Steel Type	M27_29G			Steel type of the rotor core
Stacking Factor	0.95			Stacking factor of the rotor core
Number of Poles	12			Number of poles of the rotor core
Embrace	0.3		0.3	Pole embrace
Yoke Thickness	11	mm	11mm	Yoke thickness of the rotor core

Obr. 3. 11 Tabulka rotor



Obr. 3. 12 Model statoru a rotoru v RMxpertu

rotor dotýkaly. Dále je nutné brát v potaz, že se jedná o průměry, nikoliv o poloměry, což znamená, že pokud takto vytvoříme vzduchovou mezera o velikosti 1 mm, jedná se ve skutečnosti o půl milimetrovou vzduchovou mezera po celém obvodu. Velikostí vnitřního průměru pak zvolíme i velikost hřídele (zbytek do nuly). Materiál vybereme stejný jako u statoru, stejně jako činitel plnění. Rotor však musí mít menší počet pólů, což vychází z vlastností motoru. Díky odlišné šířce pólů na rotoru od statorových docílíme toho, že maximální indukčnost nebude pouze jeden bod, ale celý interval bodů. Je však potřeba upravit i šířku rotorového jha. Nyní zbývá pouze rozhodnout, zda hřídel motoru bude z magnetického materiálu či nikoliv, ale tato možnost se dá upravit dále v Maxwellu. Potvrzením návrhu se dostaneme do fáze, kdy máme náčrt rotoru a statoru, jako jej vidíme na obrázku 3. 12

Nyní máme vytvořen návrh modelu stroje. Zbývá pouze nastavit parametry motoru v „Analysis setup“ a spustit základní výpočet v RMxpertu. Motor tedy bude zatížen konstantním momentem, bude mít 15



Obr. 3. 13 Analysis setup

kW, napájen bude třífázově na napětí 300 V a bude dosahovat jmenovitých otáček 3 000 ot/min při oteplení stroje 75°C. Toto jsou tabulková data, kterých by měl motor dosáhnout, pokud je navržen správně. Nyní spustíme kontrolní validaci (zelená fajfka) a pokud je vše v pořádku, můžeme spustit

simulaci (zelený vykřičník). Typ zátěže můžeme vybrat z několika možností, a to sice z konstantního momentu, rychlosti, výkonu, lineárního momentu a ventilační zátěže. Tato volba má následně vliv na způsob rozběhu v Maxwellu, protože při nastavování zátěže se vytvoří funkce, jež by měla reprezentovat danou zátěž. Záměrně zmiňuji „měla by“, neboť stejný motor se chová jinak při různých typech zátěže, ale funkce, která je uvedena v nastavení, je (až na odlišnosti v číselných hodnotách) totožná. Tímto problémem se budeme dále zabývat v kapitole o výpočtech v prostředí Maxwellu. V tuto chvíli již máme spočítanou simulaci a můžeme se podívat na výsledky, jež se dají zobrazit buď jako data (Solution data), nebo jako křivky (Curve), ovšem pouze za předpokladu, že máme označený příslušný „solution setup“. Nicméně pokud rozklikneme data, je možné se pohybovat v datové tabulce „Design sheet“ nebo se podívat na již zmíněné grafy. Tyto grafy jsou předvoleny v nastavení RMXprt a jestliže budeme tyto charakteristiky chtít porovnat například s modelem v Maxwellu, danou veličinu musíme nejprve dopočítat



Obr. 3. 14 Solution Data, Curves

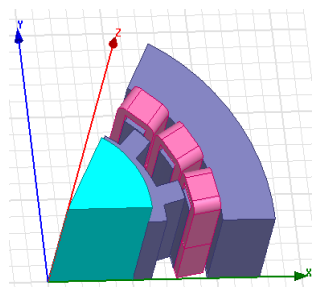
3.2 2D/3D model



Obr. 3. 15 Odvození Maxwell modelu

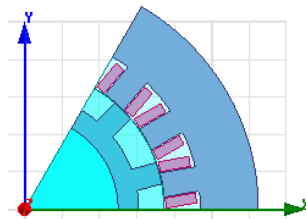
Díky tomu, že jsme model motoru vytvořili v modulu RMXprt, je nyní velice jednoduché odvodit 2D nebo 3D model. Menu *RMxprt* → *Analysis Setup* → *Create Maxwell Design*, vidíme na obrázku 3. 15. Na výběr je zde buď 2D nebo 3D model,

který tvoříme a následně můžeme vybrat mezi různými „Solution Setupy“. Poněvadž na motoru budeme provádět řadu výpočtů a simulací pro různá nastavení, zvolíme 2D geometrii, aby výpočty netrvaly příliš dlouho. Program se při volbě 2D geometrie zeptá na osu, podle které má provést řez modelu. V tomto případě je nejlepší volbou řez osou Z, což znamená defacto pohled shora na motor. Nyní se nám na obrazovce v rychlosti zobrazí postup výroby modelu od vytváření jádra a vinutí, přes výrobu externího napájecího obvodu, k předvoleným grafickým výsledkům. Pokud je geometrie stroje příliš složitá (respektive je zbytečné ji uvažovat celou), program provede ideální řezy strojem, aby co



Obr. 3. 16 Částečný 3D model

nejvíce model zjednodušil, a tím i zkrátit výpočet.



Obr. 3. 17 Částečná 2D model

Vzhledem ke geometrii statoru, rotoru a počtu fází motoru dojdeme k závěru, že každá fáze je obsazena v modelu motoru šestkrát. Program tedy provede řez jednak podle osy Z, aby vytvořil 2D model, a jednak šest řezů kvůli zjednodušení.



Obr. 3. 18 Operátory pochybu objektu

Tento zjednodušený model je pro výsledky dostačující, protože program respektuje, že části, jež na první pohled chybí, v modelu stále jsou, neboť je geometrie symetrická. Nicméně pro výpočet indukčnosti budeme potřebovat minimálně poloviční řez motorem, případně celý řez pro různé další výpočty. Stejný postup platí i pro 3D modely, ale s tím, že program provádí řez příčný a podélný, aby výpočty zjednodušil. To znamená, že motor nejprve podélně rozřízne napůl a následně tuto polovinu

Axis: X Y Z

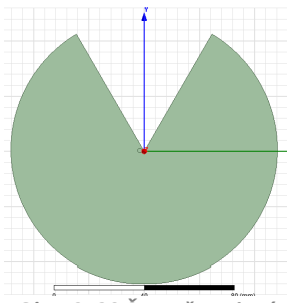
Angle:

Total number:

Attach To Original Object:

Obr. 3. 19 Nastavení – Duplicate Around Axis

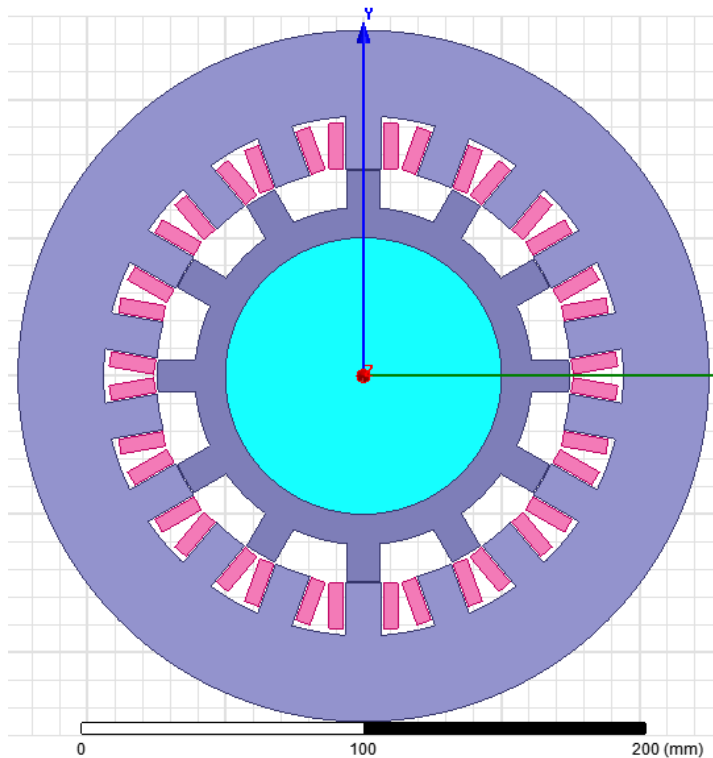
na výše zmíněnou jednu šestinu. Na obrázku 3. 17 vidíme vytvořený částečný 2D model SRM v Maxwellu a na obrázku 3. 16 vidíme tentýž stroj ve 3D. Většinu výpočtů budeme dále provádět ve 2D geometrii, poněvadž program respektuje jakousi fiktivní délku stroje, protože výpočet je nastaven tím způsobem, že je stroj ve skutečnosti dlouhý podle nastavené hodnoty z RMxpřtu. Nyní si představme, že máme 2D model, jako je na obrázku 3. 17, a chceme pro nějaký výpočet použít plný model stroje. Jedna z možností je použití skriptu, který tento řez neprovede, ten jsem však neměl k dispozici. Intuitivní způsob je použití nástrojů Maxwellu na kopírování a následné sloučení objektů modelu. Označíme tedy všechny části zjednodušeného modelu a buď vše zkopírujeme, šestkrát vložíme a následně otáčíme a přesouváme jednotlivé části tak, aby seděly k sobě a tvořily model motoru, nebo použijeme nástroj „Duplicate Around Axis“, jenž je v našem případě ideální, protože si zde zvolíme přesný počet kopií, který potřebujeme, a úhel, o nějž mají být kopie posunuty. Samozřejmostí je volba osy, podle které má kopie objektu rotovat (obrázek 3. 19). Možností je spousta a každá se hodí na jiný typ modelu. Část těchto operací vidíme na obrázku 3. 19, kde jsou zleva zobrazeny operace „Duplicate Along Line, Duplicate Around Axis, Mirror Duplicate“. Podobné operace (jen s drobnou barevnou odlišností) se používají obdobným způsobem k přesunům objektů nebo jejich částí. Nyní se dostáváme k problému sloučení objektů, čehož je možné dosáhnout pomocí zaškrtnutí možnosti „Attach To Original Object“. Pokud bychom se však dostali do situace, kdy je nutné objekty kopírovat, bylo by potřeba využít booleovských operací jako je součet nebo průnik. Tím bychom tedy měli modely pro výpočty připraveny, jak částečné řezy strojem, tak i plný model stroje.



Obr. 3. 20 Špatně spojený model

Plný model jsme vytvářeli z toho důvodu, že kvalita návrhu motoru je posuzována z pohledu poměru indukčností v podélné a příčné ose, což je u SRM reprezentováno souosou a nesouosou polohou rotoru. Na obrázku 3. 21 vidíme plný model stroje ve 2D. Na tomto objektu zjistíme poměr indukčností tím způsobem, že budeme budit pouze jednu fázi stroje protilehlých cívek a následně otáčet rotorem. Pokud stroj funguje správně, indukčnost by se měla měnit tak, že s největší vzduchovou mezerou bude nejmenší, což je nesouosá poloha, a v oblasti překrytí pólů bude indukčnost nejvyšší, protože se jedná o souosou polohu. Zde je třeba si dát pozor, „s čím točíme“, neboť vlivem slučování objektů by mohlo dojít k tomu, že se některé objekty sice sloučily v jeden, ale při použití rotační funkce se budou otáčet různě. Příkladem může být například hřídel, jež byla vytvořena původně jako půlkruh a následně zkopírována, otočena a sloučena s druhým půlkruhem. Na tento kruh aplikujeme operaci „Rotate“, a pokud jsme udělali chybu, může nastat problém jako na obrázku 3. 20. Chybou v doplnění modelu jsme se dostali do situace, že oba objekty mají svou vlastní funkci rotace a každá část rotuje zvlášť. Nyní si představme, jak by asi vypadal stejný problém v rotoru, který je složen ze šesti částí, a následně jak by vypadal výsledek indukčnosti. Nyní se již podíváme na samotné výpočty, jež si probereme podrobněji.

Plný model jsme vytvářeli z toho důvodu, že kvalita návrhu motoru je posuzována z pohledu poměru indukčností v podélné a příčné ose, což je u SRM reprezentováno souosou a nesouosou polohou rotoru. Na obrázku 3. 21 vidíme plný model stroje ve 2D. Na tomto objektu zjistíme poměr indukčností tím způsobem, že budeme budit pouze jednu fázi stroje protilehlých cívek a následně otáčet rotorem. Pokud stroj funguje správně, indukčnost by se měla měnit tak, že s největší vzduchovou mezerou bude nejmenší, což je nesouosá poloha, a v oblasti překrytí pólů bude indukčnost nejvyšší, protože se jedná o souosou polohu. Zde je třeba si dát pozor, „s čím točíme“, neboť vlivem slučování objektů by mohlo dojít k tomu, že se některé objekty sice sloučily v jeden, ale při použití rotační funkce se budou otáčet různě. Příkladem může být například hřídel, jež byla vytvořena původně jako půlkruh a následně zkopírována, otočena a sloučena s druhým půlkruhem. Na tento kruh aplikujeme operaci „Rotate“, a pokud jsme udělali chybu, může nastat problém jako na obrázku 3. 20. Chybou v doplnění modelu jsme se dostali do situace, že oba objekty mají svou vlastní funkci rotace a každá část rotuje zvlášť. Nyní si představme, jak by asi vypadal stejný problém v rotoru, který je složen ze šesti částí, a následně jak by vypadal výsledek indukčnosti. Nyní se již podíváme na samotné výpočty, jež si probereme podrobněji.

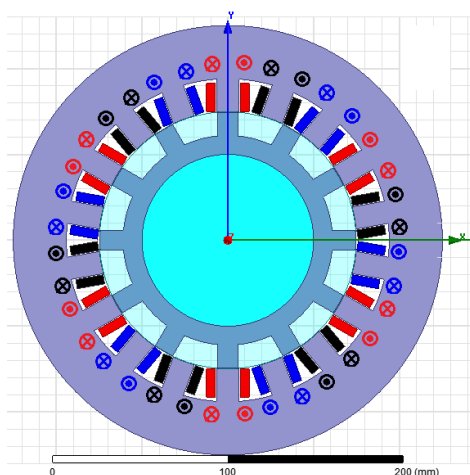


Obr. 3. 21 Plný 2D model SRM

4 Výpočty a simulace

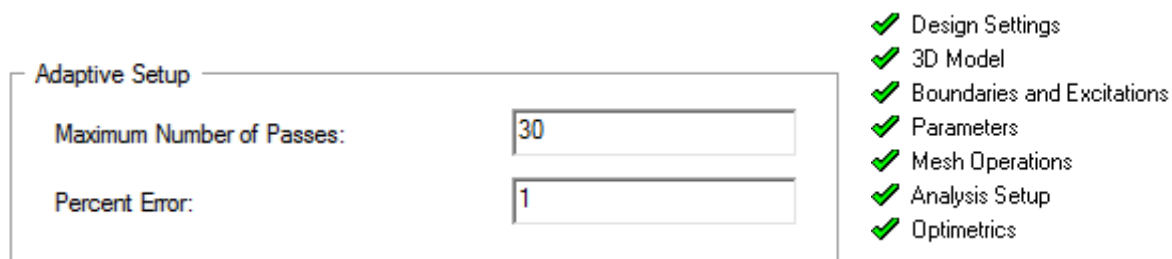
4.1 Sycení stroje a indukčnost

Jelikož jsme již vytvořili plný model stroje, použijeme jej k výpočtu indukčnosti, kterou budeme počítat v závislosti na úhlu natočení rotoru. Nejprve je potřeba použít vhodný řešič, je tudíž lepší vytvořit si kopii prvotního plného modelu a pracovat dále s touto kopií. Prvotní model si zachováme pro případné další výpočty. Následně změníme řešič na magnetostatic, protože nás indukčnost zajímá při ustáleném stavu. Výpočetní hranici upravíme pomocí funkce „Create Region“, kde nastavíme výpočetní oblast na 10 %. Kolem modelu motoru by se měl vytvořit červený čtverec, jenž zde představuje hranici. Nyní je nutné změnit způsob označování z objektů na hrany, protože se pohybujeme ve 2D prostoru. Přidržením klávesy Control postupně označíme všechny hrany červeného čtverce a nastavíme jej jako hranici pomocí „Assign Boundary → Vector Potential“. Nyní přistoupíme k nastavení buzení, respektive napájení cívek statoru. Neboť stále neznáme ideální hodnoty proudu, je třeba zjistit, zdali hodnota z RMxpřtu vyhovuje, respektive jestli je stroj dostatečně nasycen, což zhodnotíme z mapy magnetické indukce. Pro ověření sycení a uzavírání toku nastavíme buzení podle obrázku 4. 1. Aby bylo dodrženo správné buzení, je nutné provádět nastavení tak, aby se sousední trojice fází odpuzovaly. Červená barva představuje fázi A, modrá fázi B, černá fázi C. Jelikož víme, kolik je jmenovitý proud motoru z RMxpřtu, použijeme k buzení stejnou hodnotu, jež ovšem reprezentuje i počet závitů v cívce. Představme si nyní, že máme vodič, který má 1000 závitů a protéká jím proud 1 A. V Maxwellu se ovšem zadává buzení jako ampér závitů, což znamená, že můžeme zadat buzení jako 1000 A o jednom závitě nebo 1 A o 1000 závitech a výsledky budou totožné. Postupně tedy podle obrázku nastavíme buzení jako „Assign Excitation → Current“, kde nastavíme 720 A (60 A, 12 závitů). Buzení však nastavíme pouze pro fázi A, protože všechny cívky nikdy nemohou být buzeny současně. To je dáno principem motoru, protože jednotlivé fáze jsou



Obr. 4.1 Orientace buzení SRM

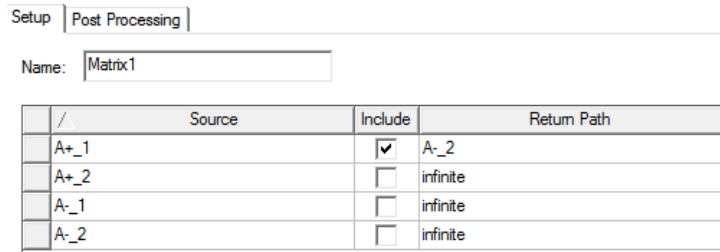
proti sobě posunuty a dostávají pouze impulzy, nikoliv plnou hodnotu napětí. Výpočetní síť v tomto případě není třeba nastavovat, neboť díky vytvoření hranice pomocí „Create Region“ se síť vytvoří sama před výpočtem, nicméně pokud chceme ať už hustější nebo řidší síť, je zde možnost manuálního nastavení v „Mesh Operations“.



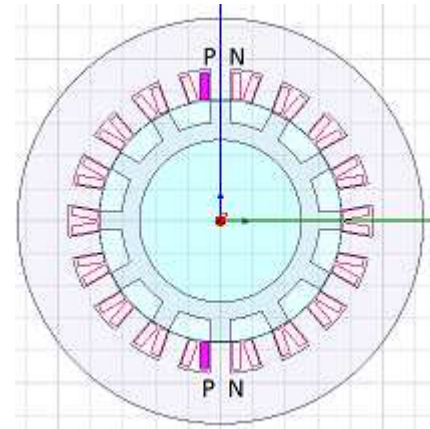
Obr. 4. 2 Nastavení výpočtu v Magnetostatic a úspěšná validace

Přejdeme k nastavení analýzy výpočtu, kde pro tento případ stačí nastavit počet průchodů, jak vidíme na obrázku 4. 2. Tato hodnota je důležitá pro autoadaptivní výpočet, protože v případě, že výsledek nebude dostatečný, program provede sám korekci a výsledek přepočítá. V tomto nastavení bych ještě doporučil podívat se do kolonky „Solver“, kde se dá nastavit přesnost výpočtu, již obvykle volíme cca 1E-6. Tím bychom měli nastavenou první simulaci a můžeme tak přejít ke kontrole nastavení, která se provádí tlačítkem „Validate“ na panelu nástrojů. Tato kontrola provádí hned několik úkonů, což znázorňuje obrázek 4. 2. Nejprve zkontroluje globální proměnné daného projektu, následně přejde ke kontrole 3D modelu, jež v tomto případě znamená, že délka 2D modelu je nastavena jako rozměr za nárysou. Následně je provedena kontrola okrajových podmínek, buzení a parametrů, které zde zatím neuvažujeme, nicméně budeme v této části dále využívat výpočet indukčnosti a momentu. Poté nastaví a zkontroluje výpočetní síť, případně oznámí, že hustota sítě byla změněna, a následně zkontroluje nastavení analýzy, jež jsme procházeli výše. Poslední řádek slouží k nastavení parametrické analýzy, pomocí které budeme následně řešit poměr indukčností a vliv proudu na moment motoru. Tento výpočet trvá řádově pár sekund, protože geometrie je poměrně jednoduchá, nejsou nastaveny žádné parametrické výpočty a především se jedná o konstantní buzení bez přechodných dějů. Zjistíme tedy, jak vypadá pole magnetické indukce a kudy se uzavírá magnetický tok. Pokud validace neproběhne úspěšně, je třeba se vrátit k nastavení a případně model upravit. Například nízké sycení může být způsobeno volbou nevhodného materiálu nebo špatnou konstrukcí stroje, případně nízkou hodnotou napájecího proudu. Pokud se tok uzavírá špatnými cestami, je chyba nejčastěji v orientaci buzení v jednotlivých cívkách. Výsledky všech simulací jsou uvedeny v kapitole 5. 2. Nastavení simulace jsem uvedl do přílohy G, nyní se podíváme na výpočet indukčnosti.

Jak již bylo zmíněno, poměr indukčností v příčné a podélné ose, která u SRM představuje polohu souosou a polohu nesouosou, je jeden z faktorů, jenž ukazuje kvalitu návrhu motoru. Indukčnost budeme počítat na plném 2D modelu v řešiči magnetostatic, protože přechodný děj nás zde nezajímá. Budeme vycházet z předchozího modelu, kde jsme simulovali magnetické pochody v motoru, nepatrně však pozměníme jeho napájení. Nejprve se podíváme, jak se vůbec v programu indukčnost počítá. Je třeba znát objekt, na němž chceme vyřešit výpočet indukčnosti, což v tomto případě bude některá z cívek statoru. Zvolme tedy jako objekt pro řešení cívku ve fázi A, kterou



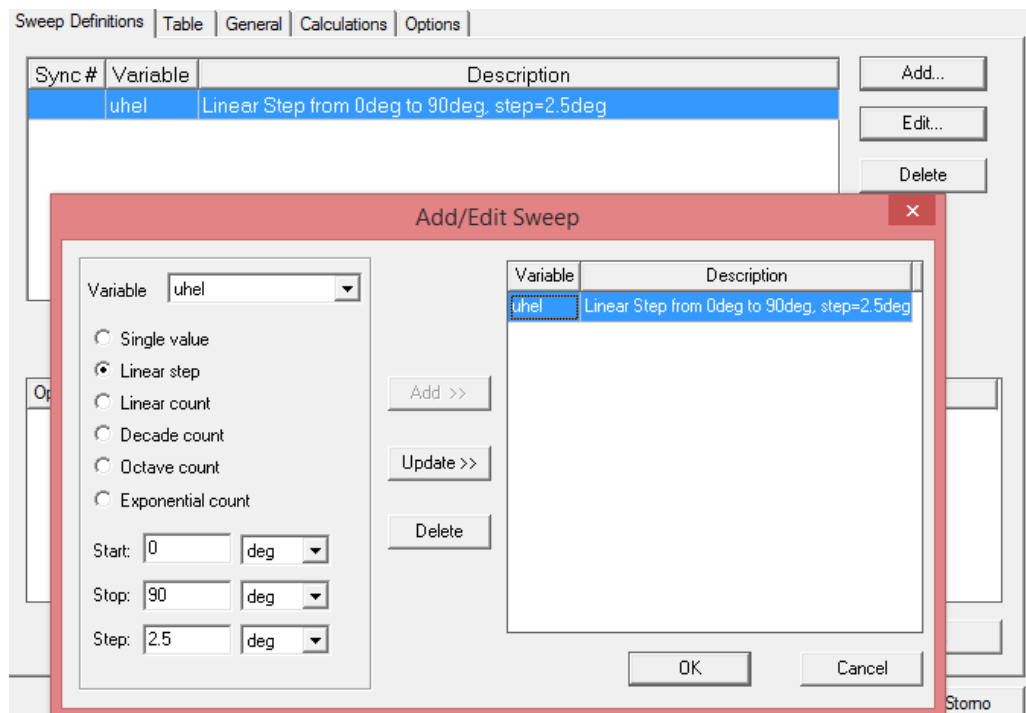
Obr. 4. 3 Propojení cesty pro výpočet indukčnosti



Obr. 4. 4 Buzení pro výpočet indukčnosti

budeme budit jemnovitým proudem tím způsobem, aby bylo respektováno, že cívka má mít 12 závitů. Orientace proudů vidíme na obrázku 4. 4, kde si můžeme povšimnout, že jsou zvoleny dvě protilehlé cívky, aby se mohl tok dobře uzavřít a zároveň aby se pole od obou cívek podporovala. Až doposud se nastavení neliší od simulace pole motoru, nyní však přistoupíme k nastavení parametru „Matrix“, kterým se nastavuje výpočet indukčnosti. Obrázek 4. 3 ukazuje, že v tomto menu nastavíme buzení, respektive buzenou cívku, jíž se má výpočet týkat, a také její návratovou cestu. V záložce „Post Processing“ poté nastavujeme počet závitů na cívce. Následně spustíme simulaci a tlačítkem „Solution data“ nebo přes „Result“ se dostaneme k indukčnosti. Jak již název napovídá, výsledkem je matice, která má rozměr podle počtu prvků zahrnutých do výpočtu. V tomto případě se jedná o matici pouze 1 x 1, ale pokud bychom zahrnuli do výpočtu všech šest cívek fáze A, dostaneme matici 6 x 6, kde budou na hlavní diagonále zobrazeny indukčnosti vlastní a na vedlejších diagonálách indukčnosti vzájemné. Nyní by se pro výpočet poměru indukčností dalo využít defacto dvou výpočtů tak, že bychom rotor natočili do sousé polohy, provedli výpočet a následně rotor natočili do polohy nesousé. Postup bychom opakovali, ale tento způsob není zcela ideální. Na tento výpočet je vhodné použít parametrickou analýzu, kterou si nyní popíšeme.

Abychom se vůbec dostali k parametrické analýze, je třeba si rozmyslet, co budeme uvažovat jako parametr. V tomto případě chceme znát závislost indukčnosti na úhlu natočení rotoru, protože, jak říká teorie SRM, motor má nejvyšší indukčnost v sousé poloze a v nesousé poloze má naopak indukčnost nejmenší. Po označení rotoru tedy použijeme funkci „Rotate“, kde můžeme zvolit osu, podle níž má daný objekt rotovat, a dále úhel, o který se má potočit. My však nebudeme do kolonky „Angle“ zadávat číselnou hodnotu, ale proměnnou, například „úhel“. Jméno proměnné je zcela na uživateli, avšak není dovoleno používat obecně známé označení, jako třeba f, I, U apod. Po zvolení jména se nás program zeptá na hodnotu proměnné, kterou můžeme stanovit jako nulu. Všechny proměnné je možné spravovat cestou „**Maxwell 2D** → **Design Properties**“, kde můžeme navíc



Obr. 4. 5 Optimetrics nastavení

proměnné i zakládat. Nyní již k nastavení „**Optimetrics** → **add** → **Parametric**“, kde musíme vytvořit datovou tabulku, podle níž se bude proměnná *úhel* měnit. Na obrázku 4. 5 vidíme, jak vypadá nastavení záložky „Sweep Definitions“, kterou vyplňujeme jako první, poněvadž zde nastavíme, jakou proměnnou chceme měnit a s jakým krokem. Dále pomocí obdobného nastavení jako v „Analysis Setup“ vytvoříme tabulku pomocí počáteční hodnoty, konečné hodnoty a určitého kroku. V záložce „Table“ pak můžeme zkontrolovat vzhled tabulky, neboť v případě, že počítáme více parametrů, jež na sobě nějak závisí, je třeba správně postupovat, aby se výpočet dobře provázal. Provázanost výpočtu si ukážeme v další simulaci, až budeme řešit závislost proudu a momentu na úhlu natočení. Ostatní nastavení nejsou až tak důležité a obsah tabulek je natolik intuitivní, že nastavení zvládne i úplný začátečník. Pro zajímavost, tento výpočet obsahuje celkem 37 bodů výpočtu, což při výpočtu dvou závislých parametrů dosti prodlouží čas výpočtu. Nyní spustíme výpočet a oproti simulaci elektromagnetického pole motoru již musíme řádově minuty čekat.

4. 2 Proud a moment

Tento výpočet provádíme z toho důvodu, že teorie o SRM předkládá hned několik hypotéz, které je třeba ověřit patřičnou simulací. Podle jedné z těchto hypotéz je moment pulzační, neboť při chodu z nesouosé polohy do souosé je rotor přitahován díky cívce, která je napájena. Při dosažení souosé polohy s polem, na němž je napájena cívka, je napájení této cívky přerušeno a rotor se dále otáčí pomocí zbytkové energie. Z těchto dvou předpokladů plyne, že SRM má defacto dva neustále střídající se režimy, a to sice motorický a generátorický. Aby se příliš neuplatnil generátorický režim,

Sync #	Variable	Description
	Proud	Linear Step from 0A to 800A, step=100A
	uhel	Linear Step from 0deg to 30deg, step=1deg

Obr. 4. 13 Tabulky parametrické analýzy

je třeba přesně nastavit logiku řízení spínání tranzistoru v napájecím obvodu. Když jedna fáze přestane vést a moment klesne k nule, zapíná další fáze, která opět přitáhne rotor a tak dále. Druhá věc, již je třeba ověřit, je, že vytvářený moment je závislý na proudu, proto zde použijeme opět parametrickou analýzu, ale provedeme výpočet tak, že nastavíme postupně 9 hodnot napájecího proudu a pro každou tuto hodnotu vypočteme závislost momentu na úhlu natočení rotoru. Protože využíváme řešič Magnetostatic, budeme uvažovat buzení stejné jako při výpočtu indukčnosti. První změna nastává v nastavení parametru pro výpočet, kterým nebude „Matrix“ na cívce, nýbrž „Torque“ na statoru a rotoru. Nyní je nutné do buzení nastavit místo hodnoty proměnnou, již budeme měnit od 0 do 800 A, což respektuje i počet závitů. V „Optimetrics“ je tedy potřeba nastavit dvě tabulky v pořadí, jako vidíme na obrázku 4. 6. Přidáním proudu jsme se nyní dostali na 279 bodů analýzy. Důvod je jednoduchý – protože se takto nastavená analýza provede tím způsobem, že pro 0 A se bude měnit úhel natočení od 0 do 30°, následně se buzení nastaví na 100 A a výpočet pojedě znovu pro hodnoty úhlu natočení. Stejným způsobem by se zjišťovala i závislost proudu na velikosti indukčnosti. Je nutné dát si pozor na způsob zapsání tabulek, protože obrácené pořadí vede k opačnému propojení, a tudíž i k jiným výsledkům.

Tímto bychom opustili magnetostatický řešič a přesuneme se dále do řešiče transientního, kde se řeší přechodné jevy. Budeme se zabývat rozběhem motoru z nulových otáček na jmenovité, ustáleným stavem a regulací motoru. Výsledky z předchozích simulací jsou uvedeny v poslední kapitole.

4.3 Rozběh motoru

V této části se budeme detailněji zabývat rozběhem spínaného reluktančního motoru. Simulaci provedeme jak pro model bez omezení proudu, tak pro model s omezením. Nejprve je třeba si uvědomit, že rozběh motoru bude trvat řádově desetiny sekund, ale může se stát, že rozběh bude trvat i několik sekund. S jistotou tedy můžeme říct, že se bude jednat o přechodový děj, jenž musíme

simulovat v řešiči Transient. Je vhodné použít pro výpočet první vytvořený model z RMXprt, protože je zde provázaný externí obvod a dále jsou nastaveny i okrajové podmínky. Nejvhodnější nastavení pro tento výpočet je použít ohraničení pomocí vektorů „Master a Slave“, které reprezentují hrany řezu motoru. Pro uzavření hranice následně použijeme regionů, jejichž plocha je stejná jako plocha motoru. Buzení je tedy nastavené pomocí externího obvodu, jenž vypadá jako na obrázku 4. 7. Napájecí obvod se skládá z tranzistorového můstku, kde má každá jeho větev dva tranzistory a dvě zpětné diody. Napájecí napětí je 300 V a na báze tranzistorů jsou přiváděny napěťové pulzy podle polohy rotoru. Je třeba brát v potaz, že program „Circuit Editor“ vytvoří pouze zjednodušený model měniče, ten je však pro účely simulace postačující. Z důvodu velikosti modelu je obrázek zapojení uveden v příloze E a F. Dobu analýzy nastavíme do jedné sekundy s krokem 0,01 s, ale jelikož používáme k napájení externí obvod, časový krok tohoto obvodu je nadřazený analysis setup (Příloha H a I). Pro model bez omezení proudu postačí krok napájecího obvodu 1E-5 s. Napájecí obvod můžeme upravovat pomocí pravého tlačítka myši na „excitations“.

Name:

Parameters

Type: Solid Stranded

Initial Current:

Resistance:

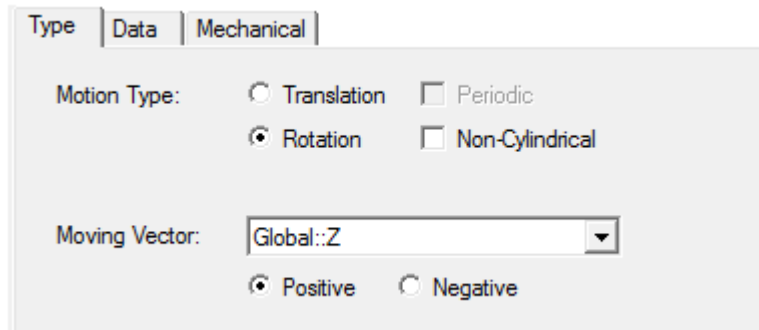
Inductance:

Voltage:

Number of parallel branches:

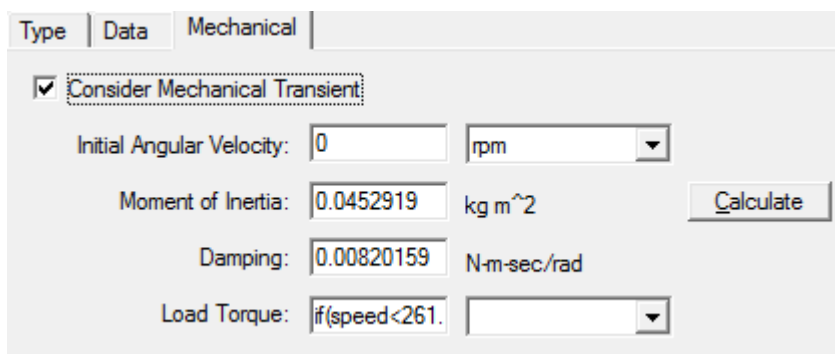
Obr. 4. 7 Nastavení buzení fáze A

Nyní je důležité podívat se na nastavení „Model – Motion Setup“, jež zajišťuje otáčení daným objektem. V případě motoru je třeba vytvořit kruh, který bude mít vnější průměr do poloviny vzduchové mezery. Tento objekt následně označíme jako „Band“. V záložce „Motion Setup“ se dostaneme k nastavení pohybu všech objektů spadajících pod „Band“. Na obrázku 4. 8 vidíme, že zde máme možnost výběru mezi rotačním a posuvným pohybem. Dále je možné nastavit směr otáčení a osu, podle které se bude daný objekt pohybovat. My použijeme rotační pohyb podle osy Z. Translační pohyb se může využít například na zasouvání



Obr. 4. 8 Motion setup – typ pohybu

části jádra do cívký a vyšetřovat velikost sil působících na model. Záložka „Data“ umožňuje zadat počáteční polohu objektu, jenž se má pohybovat, a pohybové meze. Tuto záložku neměníme a pokračujeme k záložce „Mechanical“. Obrázek 4. 9 představuje rozšířenou škálu možností, kterou zobrazíme zaškrtnutím „Consider Mechanical Transient“. Pokud tak neučiníme, naskytne se nám možnost zadat pouze otáčivou rychlost. Nastane tak situace, kdy budeme počítat ustálený stav pro nějaké konstantní otáčky. Po zakliknutí vidíme plnou verzi nastavení, jež zahrnuje moment setrvačnosti, tlumení a zátěžný moment. Tyto hodnoty jsou vypočteny RMxprtem, nicméně program používá k výpočtu těchto hodnot geometrii motoru, což znamená, že pokud máme dobře navržený model, dají se tyto hodnoty dopočítat tlačítkem „Calculate“. Zátěžný moment je definován funkcí „if(speed<261.927, -0.229525*speed, -15746.7/speed)“, která je podobná jako podmínka například



Obr. 4.9 Motion setup – nastavení zátěže

v MS Office. Rychlost je zde udávána v radiánech za sekundu a podmínka funguje tím způsobem, že pokud je rychlost menší než zadaná hodnota, program zatíží motor velkým momentem a pokud již

podmínka neplatí, zátěžný moment je postupně snižován. Důvodem je, že na začátku je nutné tzv. utrhnout rotor, aby se začal otáčet. Tím bychom měli nastavený celý výpočet a můžeme spustit analýzu. Tento výpočet provedeme pro model bez omezení napájecího proudu a pro model s omezením proudu v pásmu 140-150 A.

4.4 Netypický chod stroje

Tato simulace je zaměřena na ustálený stav při různých otáčkách. Představme si situaci, že je motor potřeba krátkodobě přetížit, aby vyvinul vyšší otáčky než jmenovité. Dejme tomu, že bychom tento motor používali jako pohon pásového důlního dopravníku. Přišel požadavek, že nákladní automobil, jenž odváží černé uhlí, má zpoždění a je třeba jej naložit rychleji. Potřebujeme tedy krátkodobě zvýšit otáčky tím způsobem, že zvýšíme spínací frekvenci napájecího měniče. Motor se bude otáčet rychleji, bude odebírat menší proud a za tuto cenu mu poklesne moment. Při takovýchto situacích je důležité nejprve zvážit, zdali je tento moment dostatečný na bezporuchový chod dané aplikace. V této simulaci jsem uvažoval již roztočený motor na jmenovitou hodnotu otáček, což je 3 000, a dále jsem nastavil po 300 ms zvýšení o 1 000 ot/min. Zvýšení otáček zajistíme definováním podle funkce: ***if (time <= 0.3, 314.1593, if (time <= 0.6, 418.873, 523.5988))***, která funguje podobně jako funkce zátěžného momentu, již jsme potřebovali při rozběhu z nulových otáček. Jak vidíme, jedná se o strukturovanou podmínku, která říká, že pokud je čas menší nebo roven 300 ms, rychlost bude 314 rad/s. Protože se jedná o proměnnou ω , je třeba zadat ji co nejpřesněji, aby byly otáčky co nejbližší hodnotám 3 000, 4 000 a 5 000. Simulace probíhala od 0 do 1 sekundy s krokem $1E-5$ s. Výsledky jsou uvedeny v kapitole 5. 6. Příloha K popisuje nastavení analýzy.

4.5 Magnetické pochody v 3D modelu stroje

Navzdory tomu, že jsme sycení motoru řešili v kapitole 4. 1, jsem zvolil popis 3D výpočtu jako poslední, protože se jedná o kombinaci sycení a dále také výpočtu pomocí řešiče „Transient“. Budeme tedy řešit simulaci na 3D modelu motoru v šestnáctinovém řezu. Zde si krátce porovnáme vliv používaného hardwaru na dobu výpočtu. Model na obrázku 3. 16 jsem nastavil pro ustálený chod, což znamená, že Motion setup nerespektuje zátěžný moment a je připnut na konstantní jmenovité otáčky. Napájení je zajištěno pomocí externího obvodu, kterým je CCC obvod, nicméně pro ustálený chod je regulační tranzistor nefunkční, protože proud nikdy nedosáhne regulačního pásma. Výpočetní síť je vytvořena poměrně hrubým způsobem – na cívkách odděleně od ostatních částí. Pohyblivé části jsou taktéž odděleny a vytvořeny pomocí „Cylindrical Gap“ metodiky. Ostatní sítě jsou vytvořeny uvnitř modelu s definovanou maximální velikostí oka. Výpočetní čas jsem nastavil od 0 do 1 sekundy s krokem $1E - 4$ externího obvodu. Hlavním cílem této simulace jsou obrázky pole pro 3D objekty a vyšetření, jak se pole mění v závislosti na otáčení rotoru jmenovitou rychlostí. Drobnou obměnou vůči ostatním transientním úlohám v této práci je ukládání pole každých 10 ms. Výsledek bude tedy poměrně velký, co se týče velikosti na disku, a bude trvat velice dlouhou dobu. Na mém osobním počítači je instalováno 8 GB operační paměti, procesor Intel i5 s architekturou Broadwell o frekvenci 2,2 GHz. Turboboost frekvence dosahuje 2,7 GHz, procesor má 2 jádra a díky technologii „hyperthreading“ je tak možné použít k výpočtu 4 logické procesory. Na tomto počítači jsem vypnul všechny nepotřebné procesy, nastavil jsem HPC analýzu, jež umožňuje rozdělit simulaci do více jader současně, a výpočet jsem spustil. Po 4 dnech nonstop výpočtů jsem simulaci zastavil na čase 0.2 s. Kdyby byl výpočetní čas jednoho kroku konstantní, dokončila by se tato simulace asi za 15 dní, tudíž jsem zvolil jiný počítač. Použil jsem výpočetní stanici, jež je vybavena 16 procesory Intel Xenon E5 – 2650 v2 o frekvenci 2,6 GHz a operační pamětí 128 GB. Tento počítač je majetkem firmy TechSoft – Engineering, která mi poskytla pro tento výpočet svůj hardware. Výpočet jsem spustil na 8 procesorech bez omezení operační paměti. Na stejný výpočetní čas jsem se dostal za 1,5 hodiny a celkový výpočet trval 24 hodin a 8 minut. Na této výpočetní stanici tedy trval výpočet 3D modelu o 1 hodinu méně než 2D model na mém osobním počítači. Při práci s Ansys softwarem je tedy opravdu nezbytné mít k dispozici silnou výpočetní stanici, protože jinak budou výpočty trvat velice dlouho. Na výpočetní dobu má samozřejmě vliv výpočetní síť, respektive její hustota a způsob vytvoření, nicméně tvorbou sítě se zabývá kapitola 1. 3. Další věc, již lze výpočet zjednodušit, je, že nebudeme počítat ztráty. Protože nás zde zajímají pouze 3D obrázky pole, je zbytečné zadávat výpočet ztrát. Další výhodou je, že v ustáleném stavu neuvažujeme chopení proudu, a tudíž není třeba krok simulace tak jemný jako při rozběhu motoru. Nastavení analýzy je v příloze J.

5 Výsledky

Tato kapitola je věnována analýze vypočtených a nashromážděných dat ze všech výpočtů a simulací. Nejprve se podíváme na některá data, jež získáme po návrhu motoru z RMxprt, a následně přejdeme do Maxwellu, kde se od poměru indukčností, momentu motoru a rozběhu dostaneme až k ustálenému chodu.

5.1 RMxprt – Výsledky a možné úpravy modelu

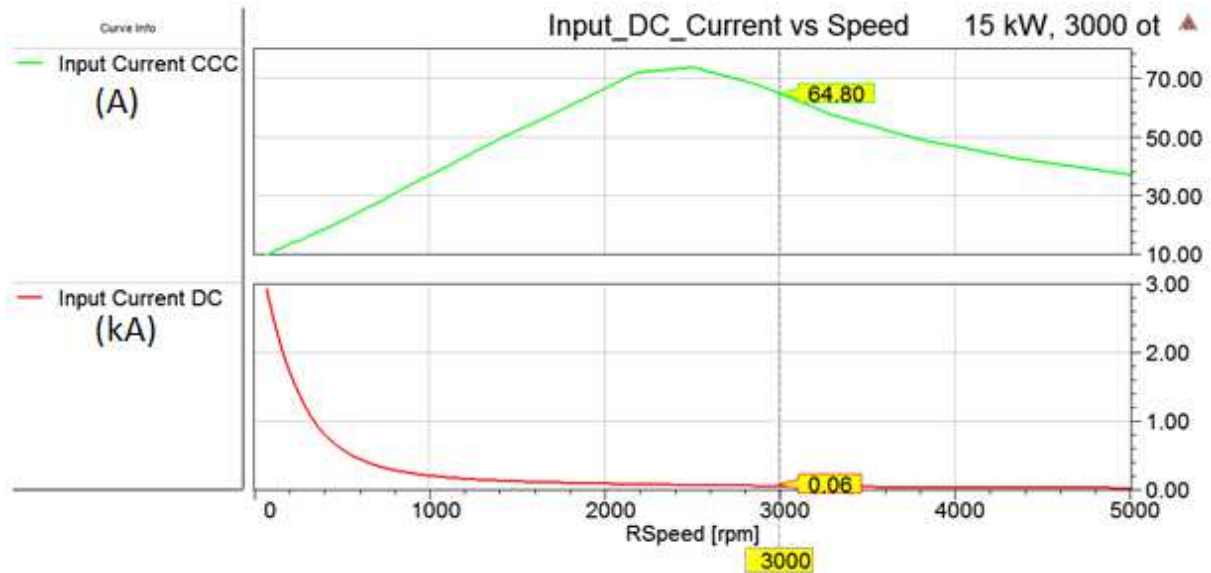
Jak již bylo zmíněno v kapitole, kde jsme probírali návrh motoru v RMxprt, je důležité se podívat na rozdíl mezi „auto-designem“ a ručním zadáním, k čemuž nám poslouží tabulka 1.

STATOR COIL DATA		
Název	Auto design	Upravené hodnoty
Slot Insulation Thickness (mm)	0,5	0,5
End Length Adjustment (mm)	5	5
Number of Parallel Branches	1	1
Number of Turns per Pole	12	12
Number of Wires per Conductor	1	1
Wire Diameter (mm)	2,304	2,743
Wire Wrap Thickness (mm)	0	0,1
Slot Fill Factor (%)	45,041	68,58
FULL-LOAD OPERATION DATA		
Input DC Current (A)	60,34	59,89
Phase RMS Current (A)	56,09	56,11
Iron-Core Loss (W)	613,37	621,78
Winding Copper Loss (W)	1057,18	746,41
Total Loss (W)	2515,35	2221,46
Output Power (W)	15586,7	15746,7
Input Power (W)	18102	17968
Efficiency (%)	86,1	87,64
Rated Speed (rpm)	3161,6	3190
Rated Torque (N.m)	47,08	47,1

Tabulka 1 – Část Design Sheetu – porovnání dvou modelů

Výše uvedená tabulka obsahuje pouze některá data z výsledků, nicméně hlavní problém auto-designu je ten, že kupříkladu neuvažuje mezeru mezi závitů vodiče a volbou slabého vodiče je způsobeno, že činitel plnění drážky je příliš nízký. Úprava je tedy možná několika způsoby, respektive je možné využít slabý vodič s více závitů nebo silnější vodič s méně závitů. Nejlepší účinnosti jsem však dosáhl

zvýšením průměru vodiče, čímž se sníží ztráty ve vinutí o cca 300 W a zlepší se účinnost o zhruba 1,5 %. Další možností úpravy je volba lepšího materiálu, jenž nemá tak vysoký koeficient K_h , který především ovlivňuje ztráty v železe. Podle zadání byl však tento materiál použit jako příznivý střed s respektováním všech ztrátových koeficientů. Nyní se podíváme na hlavní problém DC řízení, a to sice, že proud motoru není nijak omezen a při startu z nulových otáček odebírá řádově kA. Obrázek grafu 5. 1 má sice odlišná měřítka na ose Y, ale poněvadž se jedná o řádově jiné hodnoty, není



Obr. 5. 1 Graf závislosti vstupního proudu a rychlosti pro DC a CCC řízení

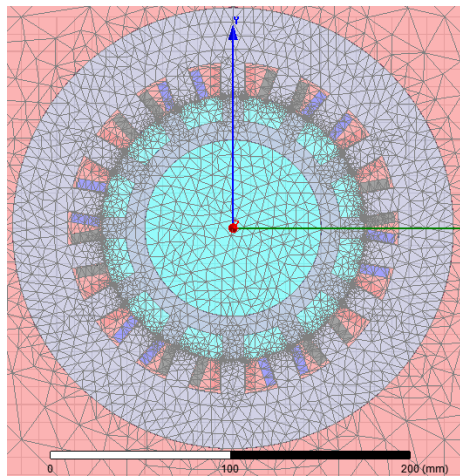
možné zvolit stejné měřítka, aby byl rozdíl na první pohled patrný. Motor při jmenovitých otáčkách sice odebírá zhruba stejný proud, ale problém nastává při rozběhu, kdy špička proudu dosahuje skoro 3 000 A, což reprezentuje dolní graf (červený průběh). Reálný motor by takovéto proudové zatížení rozhodně nevydržel, z toho důvodu je nutné použít regulátor proudu k omezení v pásmu 140-150 A,



Obr. 5. 2 Graf závislosti výstupního momentu a rychlosti pro DC a CCC řízení

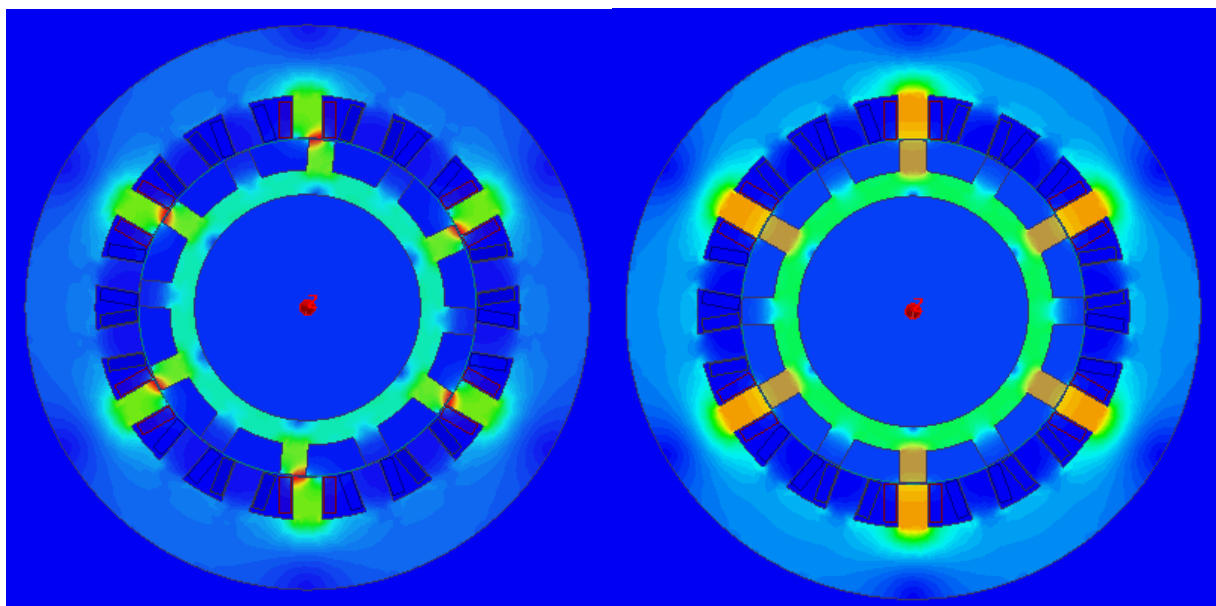
jehož průběh je vidět na horním obrázku (zelený průběh). I kdyby motor tento proud vydržel, což je nepravděpodobné, měnič použitý pro napájení by musel být pro tento chod silně předimenzován, což by neefektivní a příliš drahé. Podobný problém je vidět i na průběhu momentu motoru, kterým je obrázek 5. 2. Protože proud motoru není nijak omezen, odebírá tudíž při startu cca 3 000 A. Z předpokladu, že je moment úměrný proudu, vyplývá, že motor bude vyvíjet obrovský moment. Při použití regulace CCC je počáteční proud omezen, je proto omezen i moment vytvářený motorem. Jak je vidět na přiložených markerech, při jmenovitých otáčkách 3 000 dosahují oba typy řízení stejných hodnot. Bližší vyšetření rozběhu a regulace bude zmíněna níže. Všechna ostatní data jsou uvedena v příloze A, C pro DC napájení; B, D pro CCC napájení.

5.2 Sycení stroje



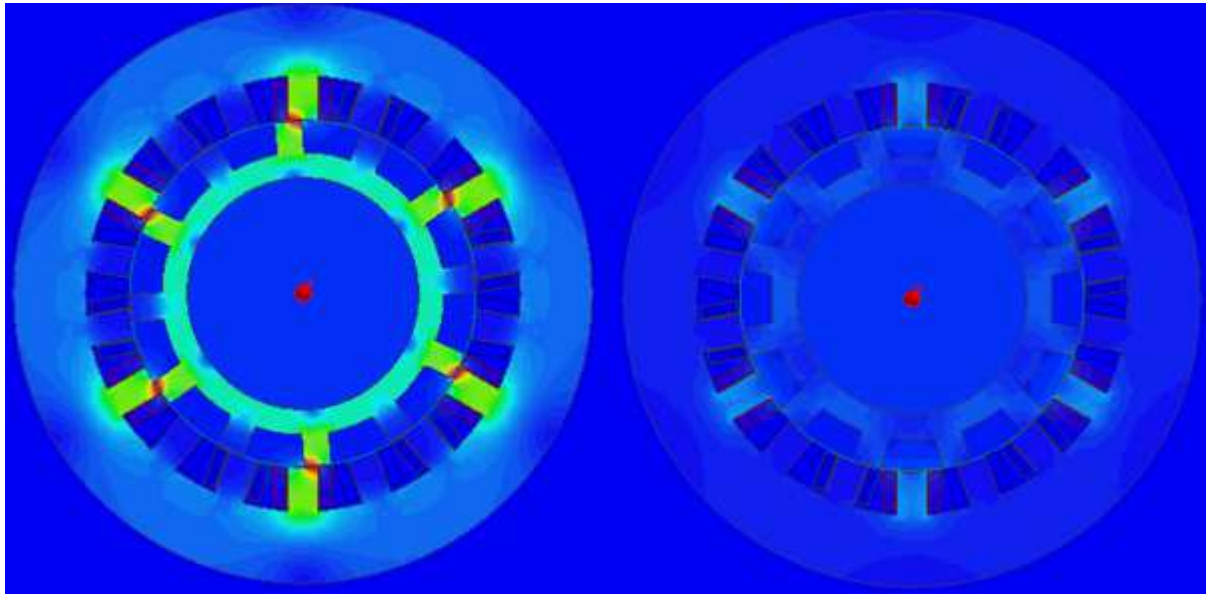
Obr. 5.3 Výpočetní síť na 2D modelu - magnetostatic

Před započítím všech ostatních výpočtů jsme chtěli zjistit, jestli máme dost nasycený stroj, případně upravit hodnotu napájecího proudu, kterou jsme nastavili jako 720 A s jedním závitem. Jednoduchým výpočtem dostaneme hodnotu $I = 720 / 12 = 60$ A. Podle RMxpertu je napájecí proud 59,89 A, z čehož plyne teoreticky dostatečné napájení. Na obrázku 5. 3 vidíme, jak vypadá automaticky vytvořená výpočetní síť. Červená oblast okolo motoru je část výpočetní hranice (boundaries), jež je o 10 % větší než motor. Můžeme si všimnout, že celý region je vakuum, a tudíž není třeba použít malé prvky k výpočtu. Naopak ve vzduchové mezeře je menší a důležitější prostor, a proto program použije více menších prvků, aby výsledky byly co nejpřesnější.



Obr. 5.4 Mapa pole magnetické indukce_1 - náběh

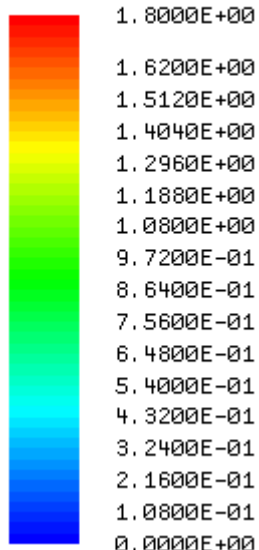
Obr. 5.5 Mapa pole magnetické indukce_2 - překrytí



Obr. 5. 6 Mapa pole magnetické indukce_3 – odtažení Obr. 5. 7 Mapa pole magnetické indukce_4 – nesousedí poloha

Nyní si na obrázkách 5. 4 – 5. 7 ilustrujeme buzení stroje a rozdíly mezi sousou a nesousoou polohou rotoru. Nejprve se podíváme na mapy pole magnetické indukce. První obrázek reprezentuje

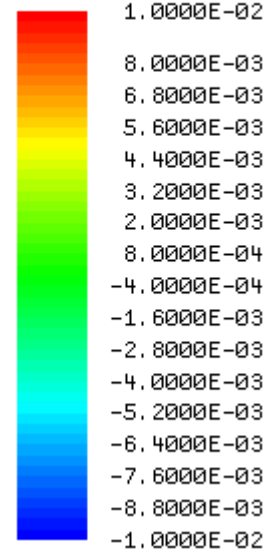
B [tesla]



Obr. 5. 8 Měřítko B

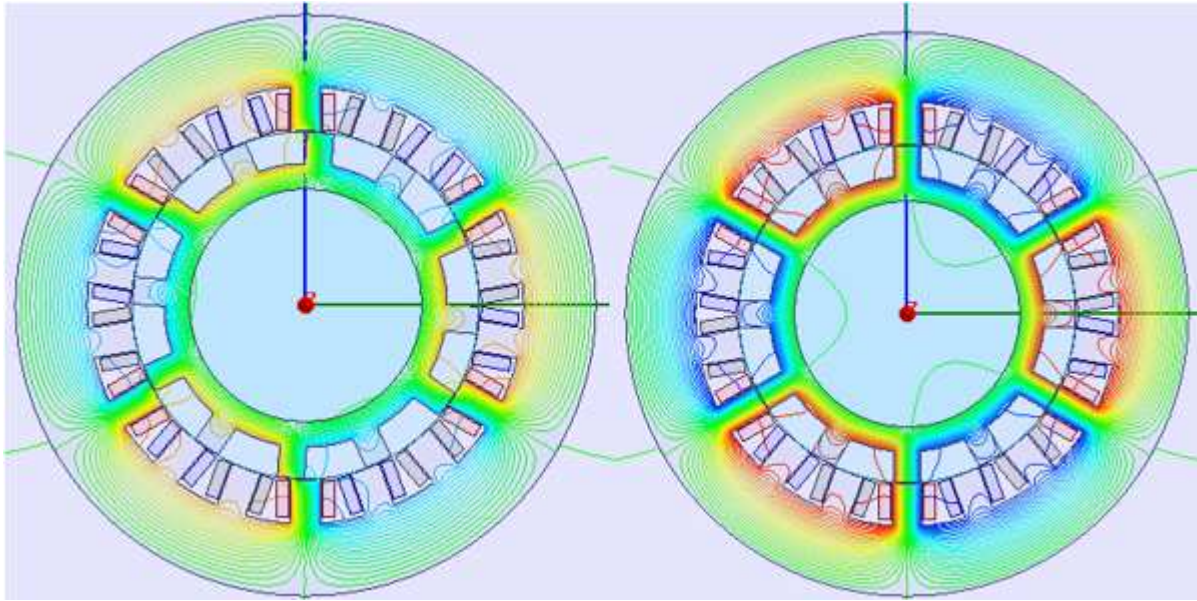
náběh do takzvané sousé polohy, kde je rotor a stator překrytý (jejich póly). Sousoou polohu ukazuje následující obrázek, kde vidíme, že maximální hodnota magnetické indukce dosahuje cca 1.5 T. Na následujícím obrázku 5. 6 vidíme další posun rotoru ze sousé polohy do nesousoé, která je zřejmá na vedlejším obrázku 5. 7. V ústupové poloze si můžeme povšimnout, že magnetická indukce postupně od rohu narůstá a následně se rozdělí na plochu pólů stroje. Dále se tato hodnota

A [Wb/m]



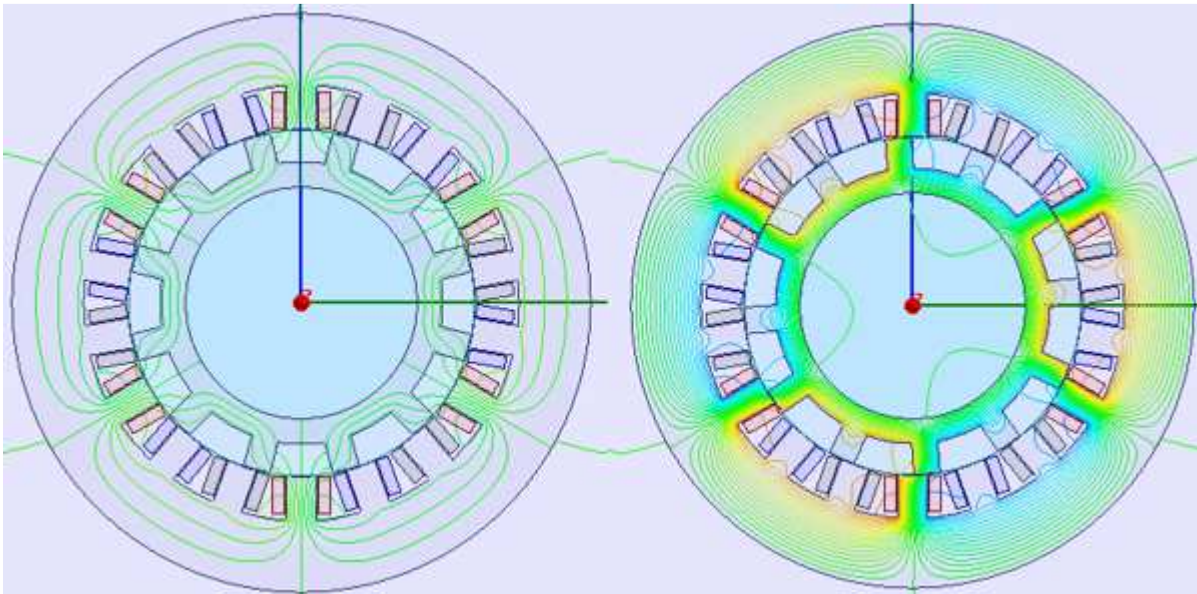
Obr. 5. 9 Měřítko A

usadí na opačném rohu a zcela vymizí, až dokud nenastane další náběh do sousé polohy. Všechny tyto obrázky jsou zobrazeny ve stejném měřítku, aby byl výsledek srovnatelný. Měřítko můžeme vidět na obrázku 5. 8. Všechny možné úpravy grafu jsou možné poklepáním na tuto škálu. Můžeme například měnit hustotu mapy, velikost siločar, grafické zobrazení nebo měřítko. Na obrázku 5. 9 vidíme další měřítko, a to sice magnetického toku, který nám bude sloužit jako ukazatel, kudy se uzavírá tok. Jak je patrné z obrázků 5. 10 a 5. 11 – posun rotoru do sousé polohy je doprovázen se zvyšováním toku prakticky o jeden řád. Následně je na obrázku 5. 13 vidět, jak stator tlačí rotor do polohy nesousoé, jež je na obrázku 5. 12.



Obr. 5.10 Mapa magnetického toku_1

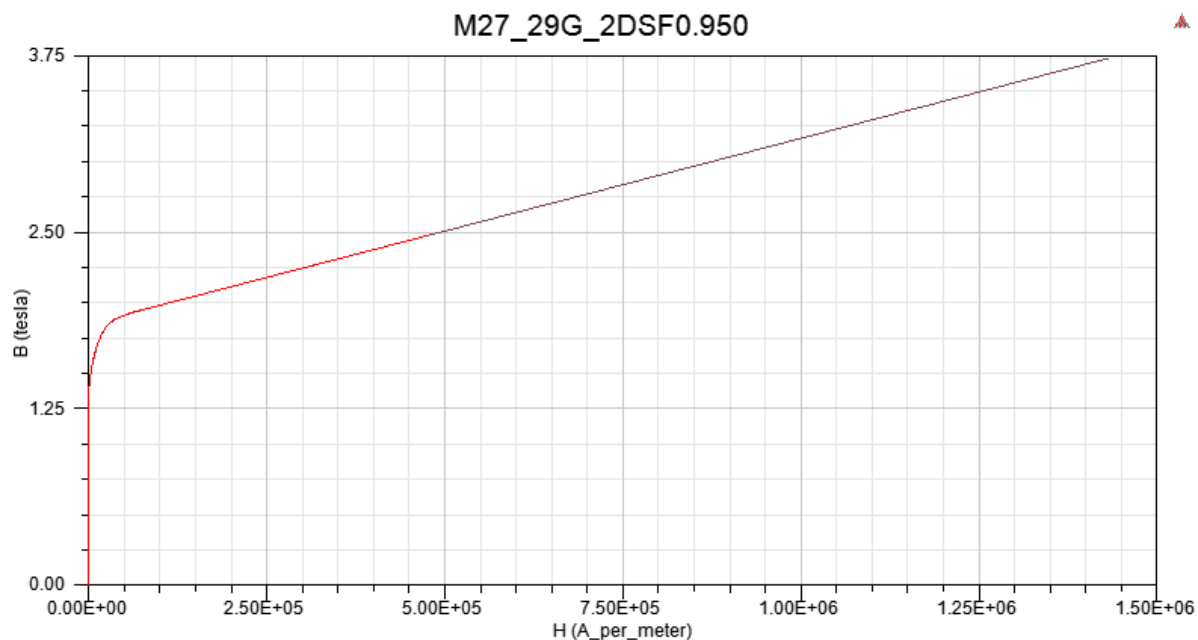
Obr. 5.11 Mapa magnetického toku_2



Obr. 5.12 Mapa magnetického toku_3

Obr. 5.13 Mapa magnetického toku_4

Nyní je třeba se podívat na magnetizační křivku použitého materiálu. V materiálové knihovně je tento materiál buď charakterizován hodnotou nebo BH křivkou. Při použití M27_29 máme

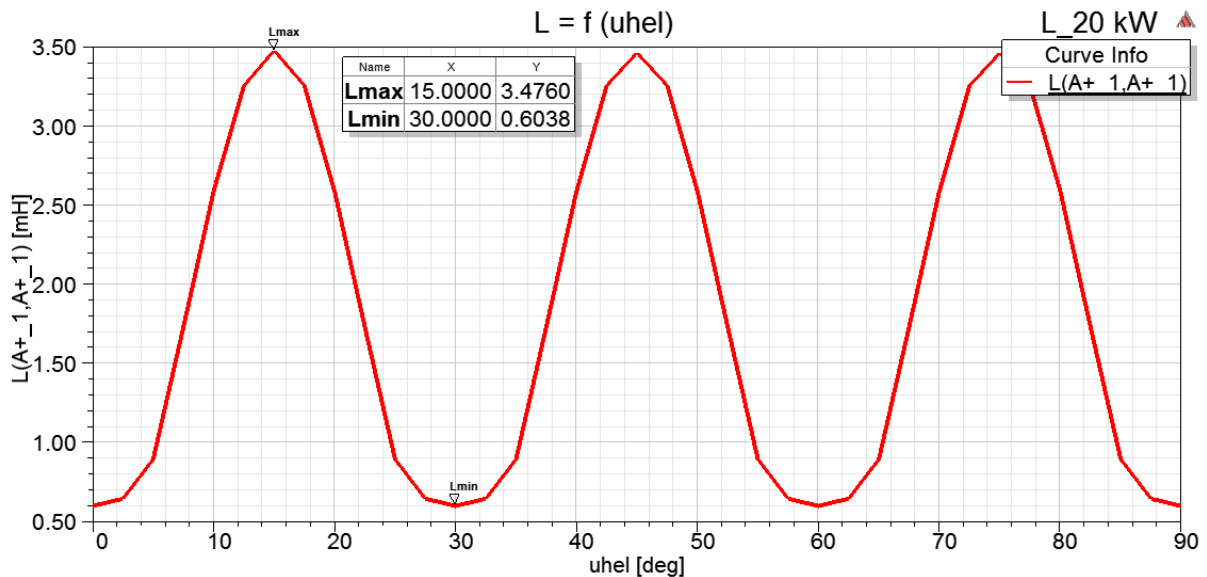


Obr. 5. 14 BH křivka materiálu M27_29G [4]

k dispozici BH křivku, jež odpovídá reálnému plechu, ale v programu je materiál označen tímto názvem. Magnetizační charakteristiku vidíme na obrázku 5. 14. Jelikož kritická hodnota magnetické indukce je cca 1,7 T, můžeme prohlásit, že je stroj plně nabuzen a zároveň není přebuzen. Za přebuzený stroj bychom považovali hodnotu přibližně 2,5 T a více. Nyní přistoupíme k dalším výpočtům.

5.3 Indukčnost motoru

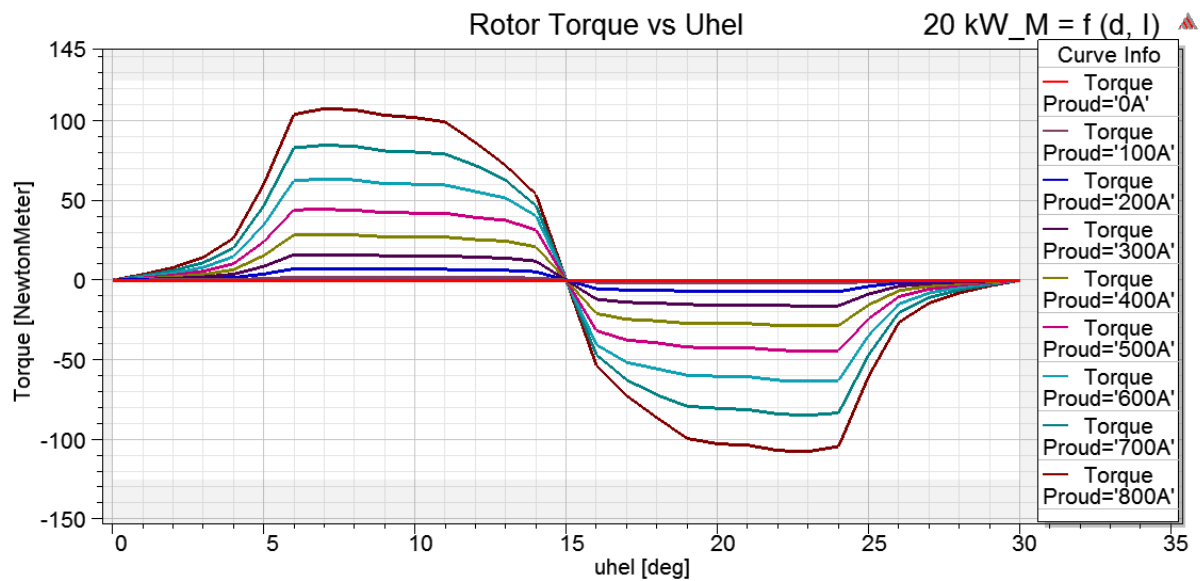
Výpočet jsme prováděli kvůli posouzení kvality návrhu motoru. Jak je vidět z obrázku 5. 15, kde je zobrazen průběh indukčnosti napájené fáze v závislosti na úhlu natočení, v nesouosé poloze je indukčnost nejmenší, protože je zde největší vzduchová mezera. Tím pádem je zde nejdelší cesta



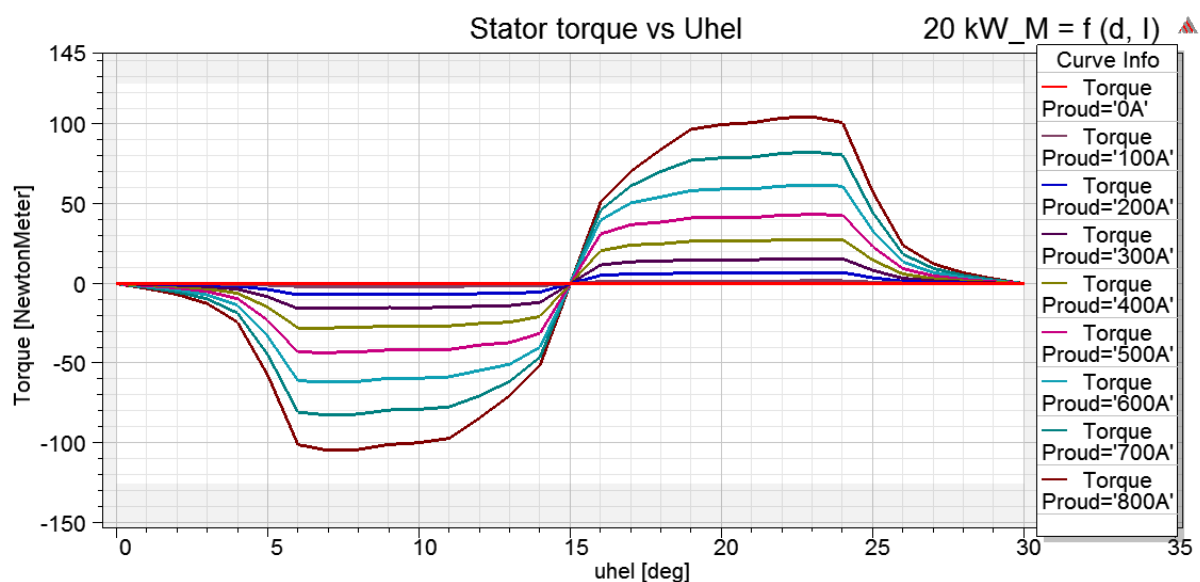
Obr. 5. 15 Graf závislosti indukčnosti a úhlu natočení

magnetického toku a nejvyšší reluktance motoru. S dalším zvyšováním úhlu natočení rotoru, respektive s otáčením rotoru se vzduchová mezera zmenšuje, tudíž se zmenšuje i reluktance a tok se uzavírá po kratší cestě. Když se dostaneme do souosé polohy, kde jsou rotor a stator v zákrytu, tak indukčnost této cívky je nejvyšší. Přiložené markery v grafu udávají nejvyšší a nejnižší hodnoty indukčnosti a podílem dostaneme hodnotu 5,8. Ideální poměr indukčností by měl dosahovat hodnoty cca 10. Zlepšení poměru by se mohlo dosáhnout úpravou rozměrů motoru, případně volbou lepšího materiálu, což ale nebyl účel této práce.

5.4 Vliv velikosti proudu na moment



Obr. 5. 16 Graf závislosti momentu rotoru a úhlu natočení na velikosti napájecího proudu

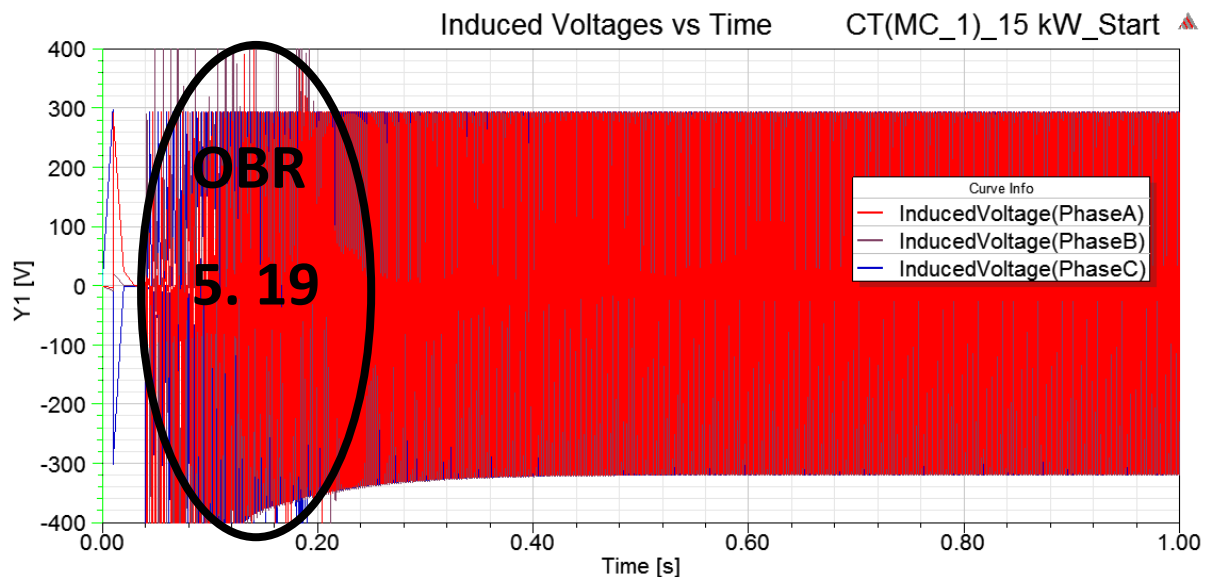


Obr. 5. 17 Graf závislosti momentu statoru a úhlu natočení na velikosti napájecího proudu

V této simulaci jsme vyšetřovali změnu momentu na úhlu natočení při různém napájecím proudu. Úvaha je taková, že z nuly se rotor začne postupně otáčet a moment bude narůstat, což znamená, že se nacházíme v motorickém chodu. Moment bude kladný až do okamžiku překrytí rotoru a statoru, kdy klesne na nulu. Následně nastane přechod z motorického režimu do generátorického, moment bude záporný a bude dále klesat do záporu až do doby, než se další pól rotoru dostane do fáze, kdy bude přitahován statorovým pólem, dojde tak ke změně chodu z generátorického do motorického režimu. Tyto změny vždy probíhají za konstantního napájení určitou hodnotou proudu. Následně po zvýšení proudu na další hodnotu se úměrně zvýší moment. Výsledek simulace je vidět na obrázku 5. 16. Je třeba si uvědomit, že napájecí proud je brán pro jeden

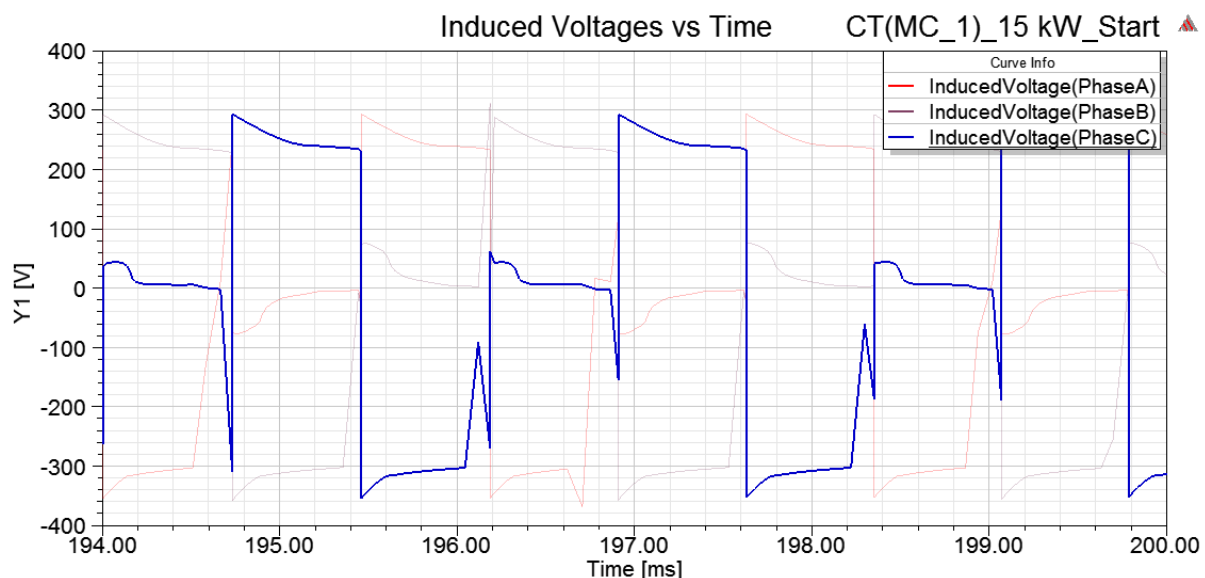
závit, což znamená, že skutečnou hodnotu proudu je třeba podělit 12. Jmenovité napájení je 60 A při 12 závitěch na pólu. Na obrázku 5. 17 vidíme podobný průběh s tím, že se jedná o moment na statoru. Z průběhu vidíme druhou stránku věci, protože, aby mohl stator přitáhnout rotor do souosé polohy, musí vyvíjet záporný moment, jinak by se rotor nepootočil. Při změně do generátorického režimu naopak začne rotor vytlačovat dále po směru otáčení, působí tedy momentem kladným. Závěrem je třeba říci, že průběhy se mírně liší od ideálního průběhu díky hustotě výpočetní sítě. Výpočet by šel sice zpřesnit, ale výsledek by byl neúměrně kvalitnější časové náročnosti výpočtu. Dále je třeba vzít v potaz, že tento průběh momentu je pouze pro jednu fázi. Pokud bychom uvažovali napájení všech fází a k tomu příslušné řízení, průběh momentu by vypadal jinak.

5.5 Rozběh a ztráty



Obr. 5.18 Graf závislosti indukovaného napětí na čase (DC řízení) – plný rozsah

Nejprve se podíváme na výsledky rozběhu motoru za použití DC řízení, jež nemá žádné omezení proudu. Všechny tyto výpočty jsme prováděli na šestinovém modelu motoru ve 2D. Nejprve se podíváme na průběh indukovaného napětí. Dle teorie by indukované napětí mělo mít obdélkový průběh a mělo by se pohybovat v intervalu (-300, 300) V. Jak vidíme na obrázku 5.18, simulace proběhla do jedné sekundy. Tento obrázek kvůli rozlišení moc informací nepodává, proto se podíváme na detailnější průběh na začátku rozběhu.

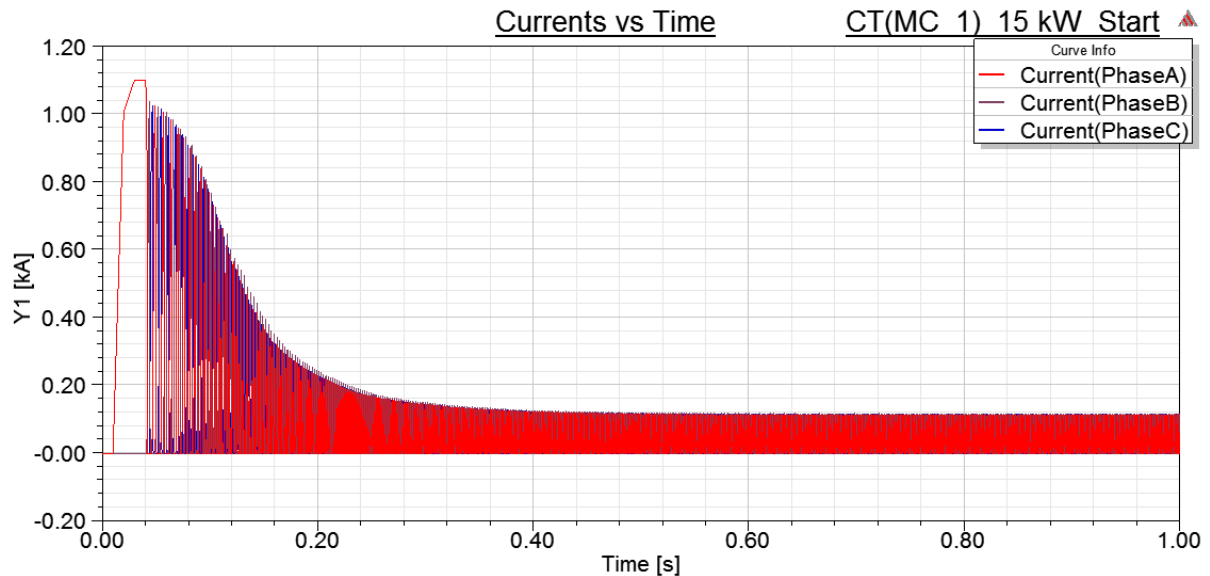


Obr. 5.19 Graf závislosti indukovaného napětí na čase (DC řízení) – plný rozsah

Obrázek 5.19 má upravenou zobrazovací oblast na ose X na hodnoty 194–200 ms. Dále si všimněme, že je zvýrazněna fáze C, aby byl lépe vidět průběh napětí v jednotlivých fázích. Průběh vypadá tak, že je vždy jedna fáze kladná, druhá nulová a třetí záporná. Při komutaci se kladná fáze

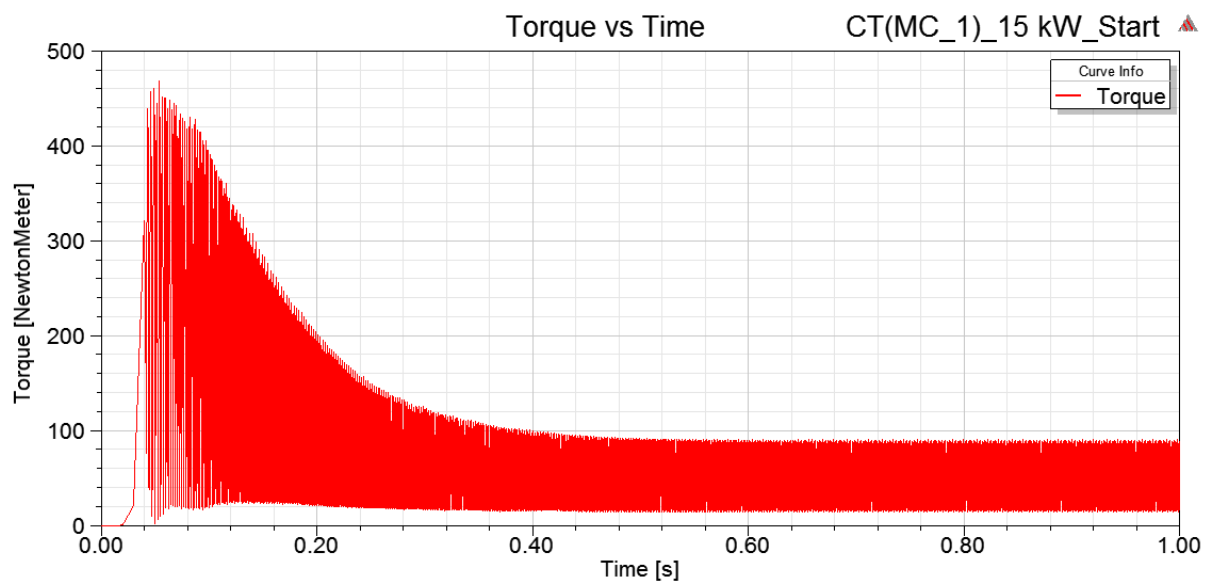
překomutuje na zápornou, záporná fáze vzroste na nulu a nulová fáze přejde na kladnou hodnotu napětí. Tento cyklus se opakuje s frekvencí 500 Hz.

Obrázek 5. 20 zobrazuje průběh fázového proudu motoru od rozběhu do ustáleného stavu. Zde vidíme zásadní problém, který jsme zmínili již v RMxprt výsledcích. Motor startuje s obrovským proudem oproti jmenovitému, protože jmenovitá hodnota je cca 60 A, ale motor startuje s proudem



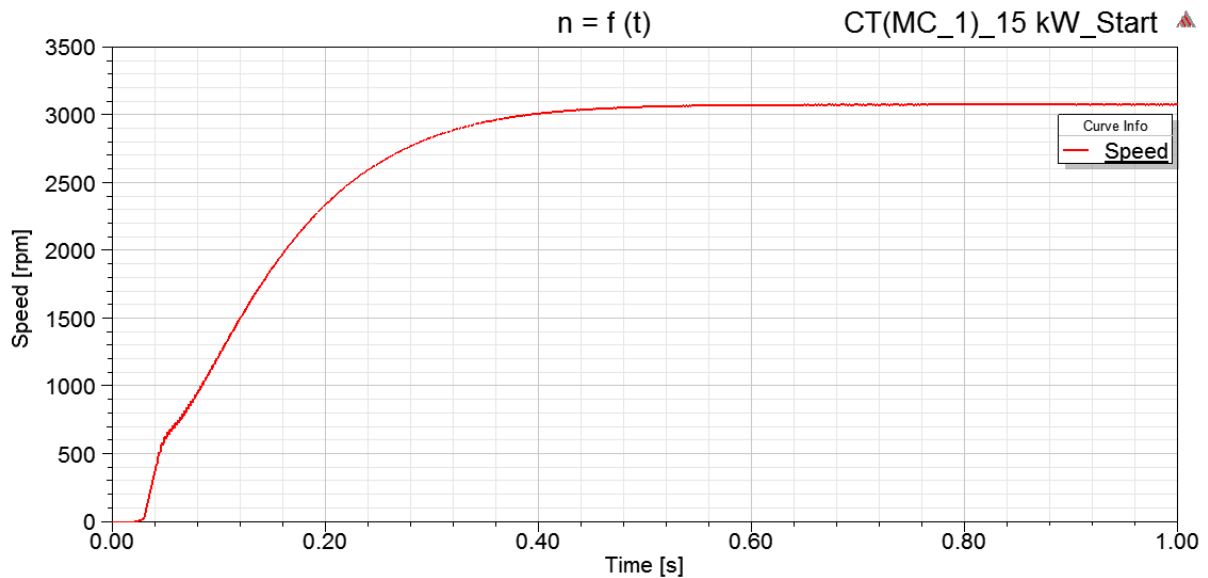
Obr. 5. 20 Graf závislosti vstupního proudu a času (DC řízení)

řádově kA. V ustáleném stavu je maximální hodnota cca 120 A, což je užitečná informace pro nastavení proudového omezení v případě CCC řízení. Tento režim startu by v reálném případě nebyl příliš efektivní, protože jednak by napájecí obvod musel být silně předimenzován na rozběh motoru, a jednak by proud takové velikosti motor zcela jistě nevydržel a zničil by se. Vzhledem k tomu, že motor odebírá takto velký proud, dá se očekávat, že i moment stroje bude značně větší.



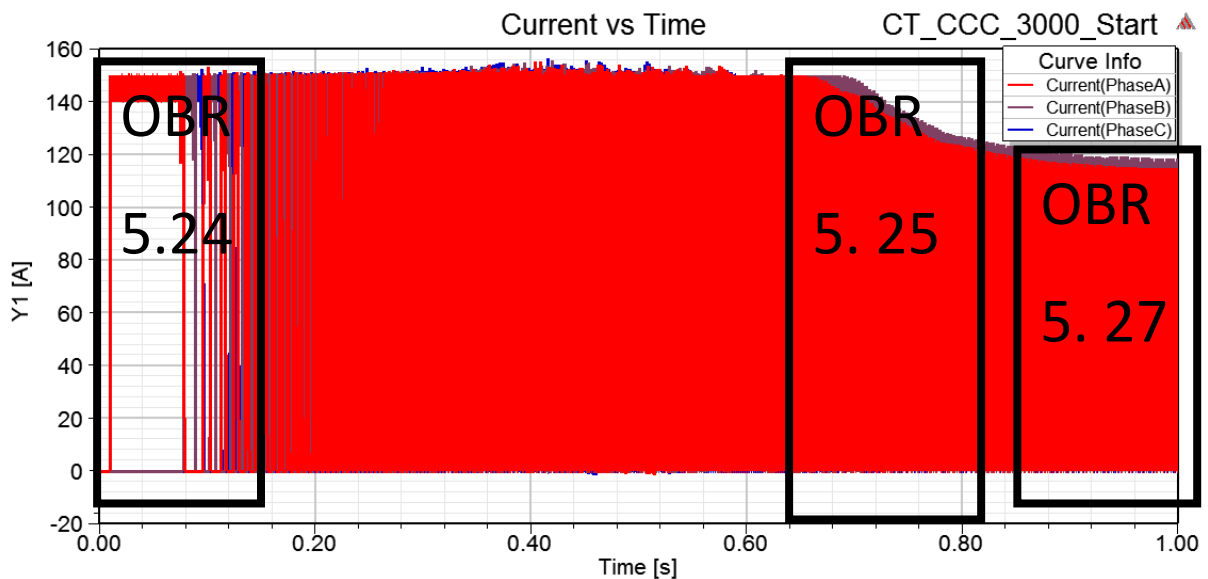
Obr. 5. 21 Graf závislosti momentu a času (DC řízení)

Obrázek 5. 21 reprezentuje pulzační průběh momentu. Tento průběh momentu je opět značně nepříznivý, protože napájecí proud není omezen. Jak u proudu, tak i u momentu je dobré si povšimnout, že jeho hodnoty klesají exponenciálně až do času cca 0.4 s. To je způsobeno tím, že motor v čase 0.4 s dosáhne jmenovitých otáček a následně se drží v okolí těchto otáček.



Obr. 5. 22 Graf závislosti rychlosti a času (DC řízení)

Obrázek 5. 22 ukazuje průběh rychlosti otáčení v závislosti na čase. Jak již bylo zmíněno, motor dosáhne jmenovitých otáček v čase 0.4 s. V této simulaci jsem se nezaměřoval na ztráty, protože jsem očekával, že motor bude v nízkých otáčkách odebírat velký proud, a tudíž budou i ztráty značně velké. V této simulaci je dobré si všimnout ustálené hodnoty proudu, kterou použijeme pro nastavení regulace při řízení CCC. Dá se předpokládat, že pokud omezíme rozběhový proud z hodnoty

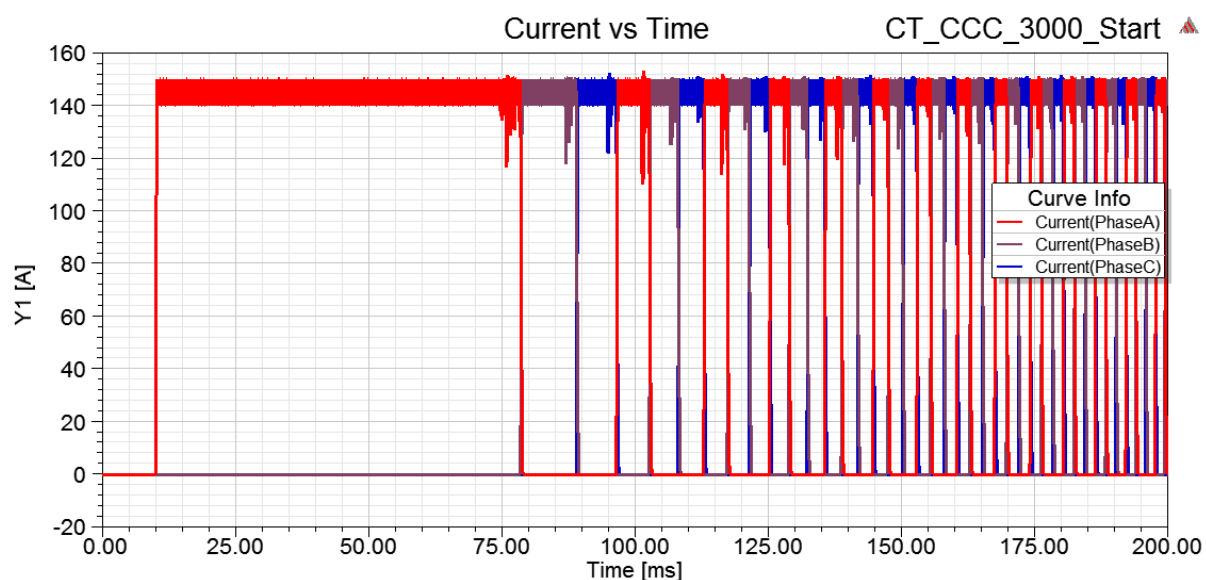


Obr. 5. 23 Graf závislosti vstupního proudu a času (CCC řízení) – plný rozsah

řádu kA na hodnotu 140–150 A, rozběh bude značně delší. Nyní se podíváme, jak se změni průběhy,

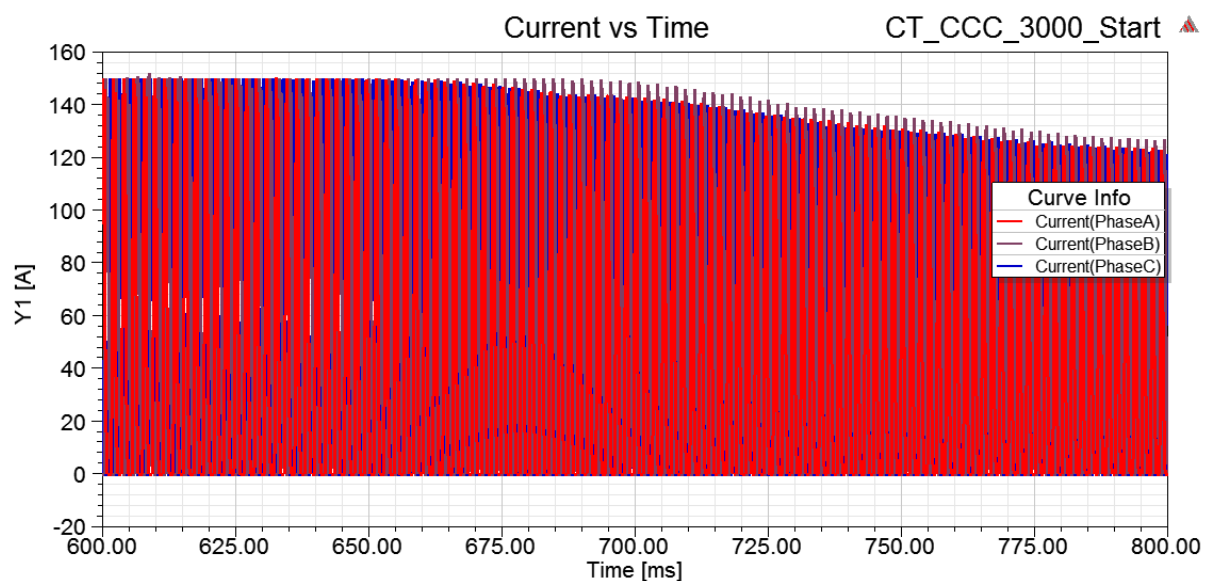
když použijeme CCC řízení, jež má omezovací tranzistor na určité proudové pásmo v napájecím obvodu. Je třeba brát v potaz, že tento editor obvodů je pouze pro účely simulace, protože reálný napájecí obvod je mírně složitější. Regulační pásmo proudu je zvoleno tak, že ustálená hodnota proudu ve špičkách je asi 120 A.

Na obrázku 5. 23 vidíme průběh proudu jednotlivými fázemi motoru. Povšimněme si zásadní změny, již je, že proud nedosahuje do hodnot kA, ale na celém rozsahu je maximální hodnota cca



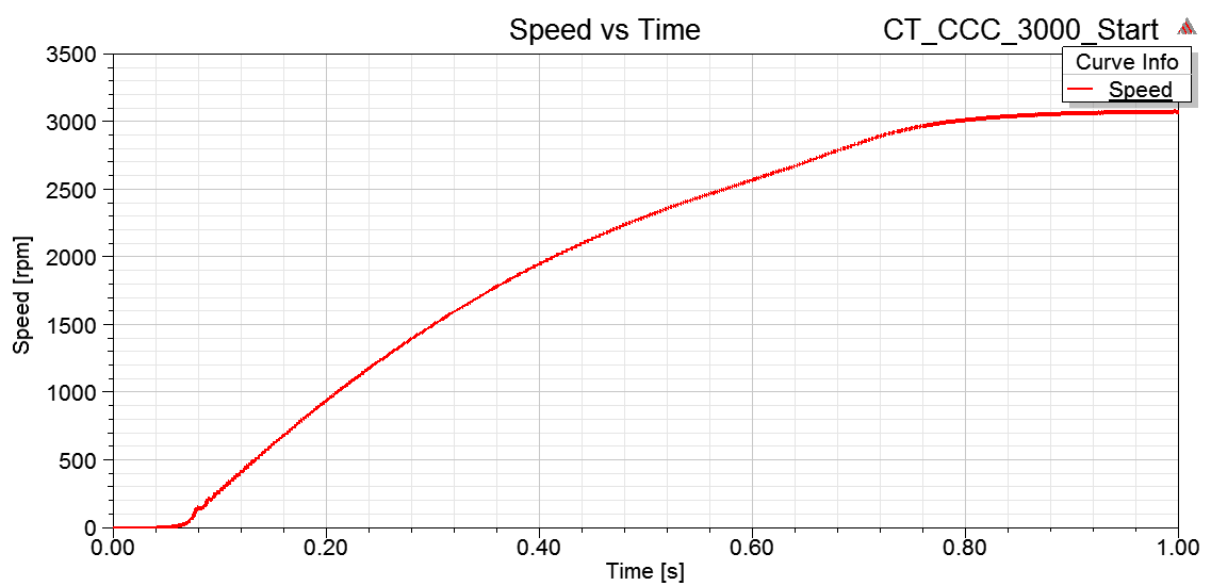
Obr. 5. 24 Graf závislosti vstupního proudu a času (CCC řízení) – rozsah 0 - 200 ms

150 A. Tento průběh je třeba podrobit detailnější analýze, protože díky měřítku osy X není průběh proudu dostatečně „čitelný“. Rozdělme si tedy průběh na tři části, které budou reprezentovat stav na začátku rozběhu, tzn. nízké otáčky; dobu, kdy motor dosahuje jmenovitých otáček; a nakonec stav, kdy je motor již plně roztočen – ustálený stav. Nyní se podíváme na počátek přechodného děje, jež zobrazíme na časovém intervalu (0, 200) ms.



Obr. 5. 25 Graf závislosti vstupního proudu a času (CCC řízení) – rozsah 600 - 800 ms

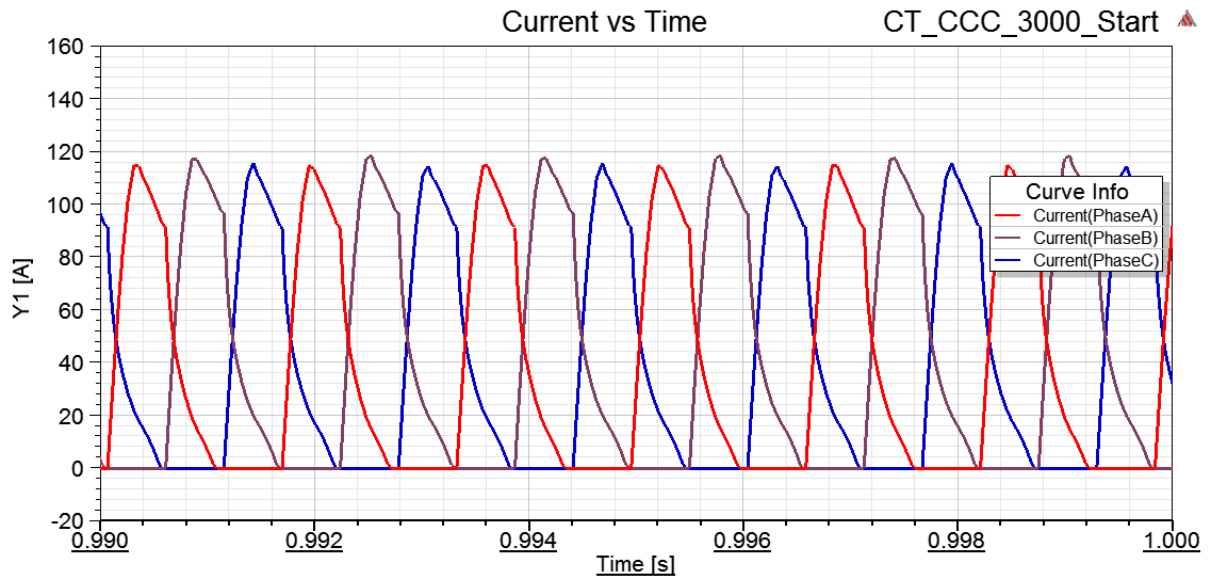
Jak je patrné z obrázku 5. 24, komutační frekvence v nízkých otáčkách je nízká a postupně se frekvence spínání tranzistorů zvyšuje. Hned první průběh ukazuje stav, kdy motor stojí a otáčí se opravdu velice malou rychlostí. První komutace nastane až ve chvíli, kdy rotor přejde do specifické polohy, kde má sepnout další větev tranzistorů. S postupně zvyšující se rychlostí se zvyšuje i frekvence spínání tranzistorů, a tím i komutace proudu. V oblasti komutace proudu dochází ke špičkám, ať už nahoru nebo dolů. Tyto komutační špičky jsou způsobeny hustotou sítě a výpočetním krokem simulace. Nicméně je třeba si uvědomit, že tento výpočet běžel s krokem 1E-7 s a trval zhruba 30 hodin čistého výpočetního času. Zhuštěním sítě bychom sice tyto špičky odstranili, ale čas výpočtu by se zvýšil neúměrně kvalitě výsledků. Je pravděpodobné, že tyto špičky jistě způsobí špičky ve výpočtu ztrát jak ve vinutí, tak v železe. Tomu se budeme věnovat dále v této práci. Nyní zpět k proudovému průběhu v čase a konkrétněji k době, kdy dochází k odstavení omezovacího tranzistoru, jak je zřejmé z obrázku 5. 25. Protože nemůže dojít ke skokové změně napájecího proudu, pokles proudu nastává již okolo hodnoty 700 ms. Zároveň je dobré porovnat tento průběh s průběhem rychlosti (obrázek 5. 26), jenž říká, že při 800 ms motor dosahuje jmenovitých otáček, což



Obr. 5. 26 Graf závislosti rychlosti a času (CCC řízení)

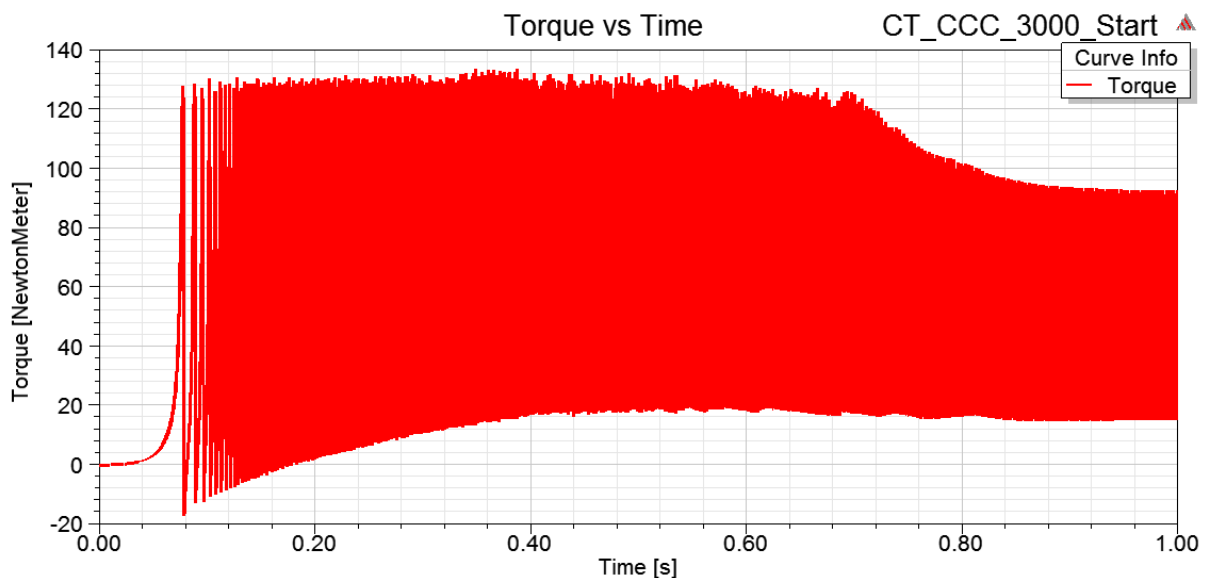
znamená, že v tento okamžik již motor bude odebírat jmenovitý proud. Proud má tedy cca 100 ms na pokles z regulačního pásma na jmenovitou hodnotu. Je zřejmé, že pokud bychom nastavili regulační pásmo na nižší hodnotu, rozběh bude ještě delší. Uvědomme si však, že rozběh bez omezení proudu trval 400 ms a to s obrovským rozběhovým proudem. Nyní jsme na proudu 150 A ve špičkové hodnotě a rozběh trvá dvojnásobně dlouho. V tomto případě se dá považovat doba rozběhu 800 ms za uspokojivou hodnotu.

Dále se zbývá podívat na průběh proudu v ustáleném stavu na obrázku 5. 27. Zde vidíme, že proud už není nijak omezen, protože kmitá mezi 0 a 120 A. Efektivní hodnota proudu je přitom mezi 55 a 60 A, což je jmenovitá hodnota z RMxpřtu, a tudíž můžeme říci, že rozběhový přechodný děj je ukončen. Frekvence proudu je v tomto čase 625 Hz, což znamená, že proud by se ještě ustaloval až



Obr. 5. 27 Graf závislosti vstupního proudu a času (CCC řízení) – rozsah 990 - 1000 ms

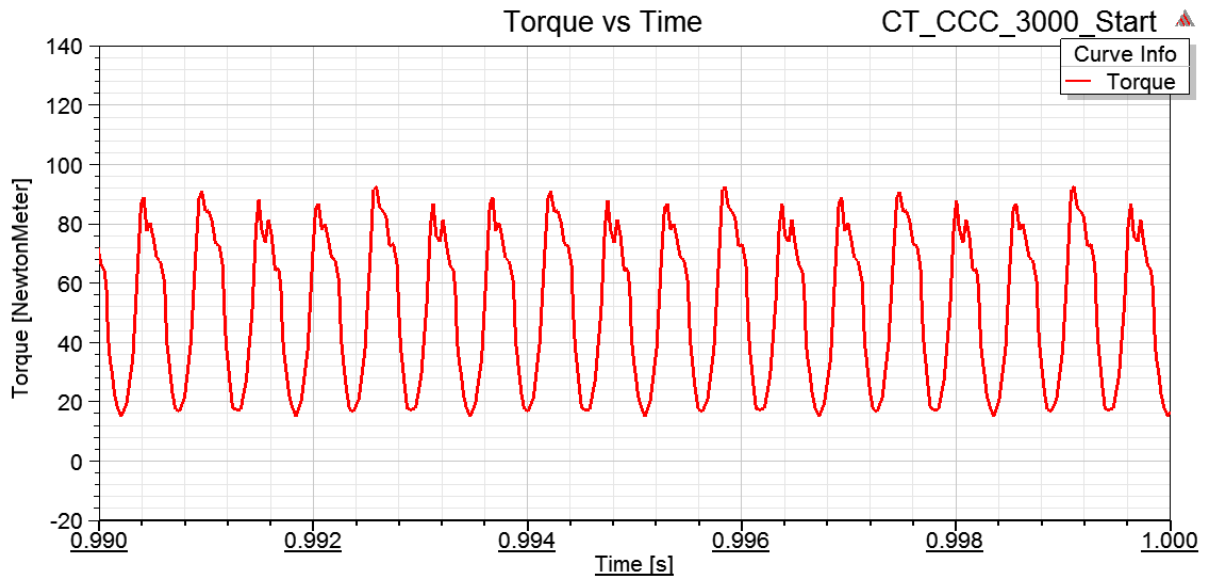
do hodnoty 500 Hz, která odpovídá DC řízení. Nicméně čas výpočtu, jenž by odpovídal tomuto ustálení, by byl značně dlouhý. Amplituda proudu přitom zůstane stejná, ale odpovídajícího výsledku bychom dosáhli až po velice dlouhé simulaci, což není třeba. Nyní se podíváme na průběh momentu a popíšeme jej podobně jako průběhy proudu. Tento průběh však vyšetříme pouze na dvou



Obr. 5. 28 Graf závislosti momentu a času (CCC řízení) – plný rozsah

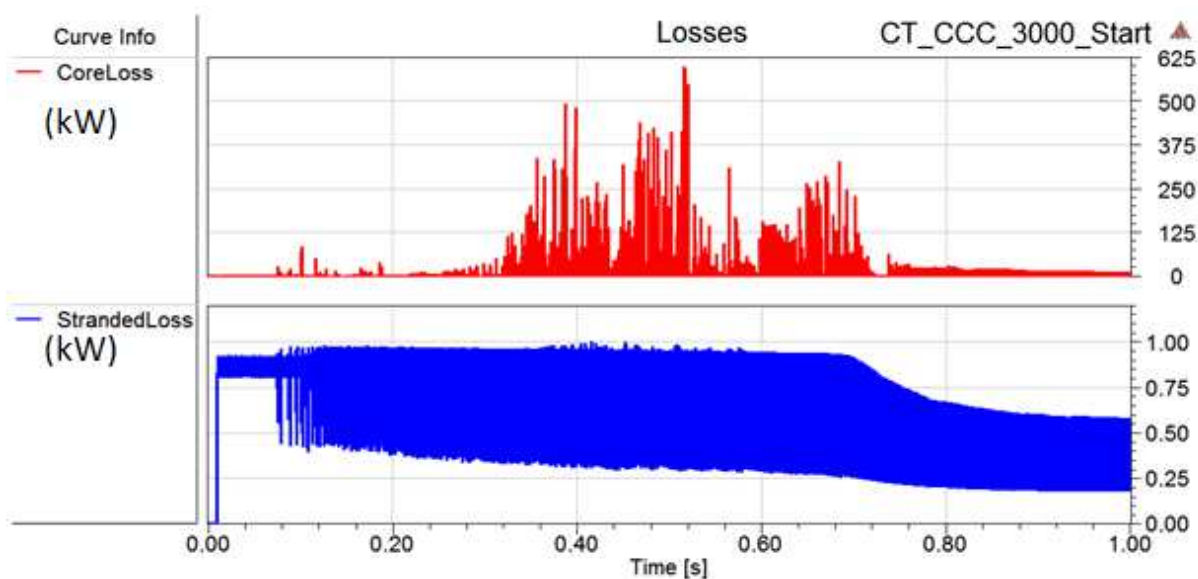
místech, a to sice na začátku rozběhu a na konci, neboli v ustáleném stavu.

Z obrázku 5. 28 je patrné, že špičková hodnota momentu klesla díky omezení skoro 4x. Počáteční nulová hodnota je dána nulovou otáčivou rychlostí, respektive době, než se motor dostane do první sousé polohy a začne komutace proudu. Úvaha o frekvenci platí jak pro proud, tak pro moment, a to z toho důvodu, že závislost proudu a momentu je lineární. Je jasné, že ve stejné době,

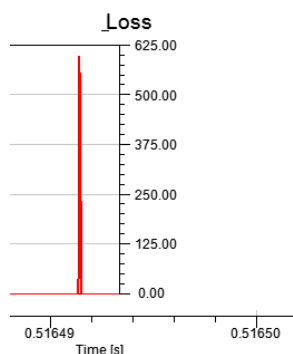


Obr. 5. 29 Graf závislosti momentu a času (CCC řízení) – rozsah 990 – 1000 ms

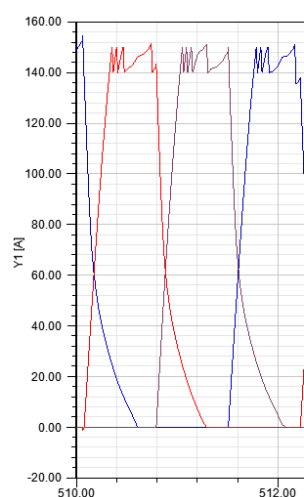
jako začne klesat proud, začne klesat i moment motoru. Jak již bylo zmíněno, moment motoru je pulzačního typu, což vidíme na obrázku 5. 28 i na obrázku 5. 29, který zobrazuje průběh momentu v ustáleném stavu. Efektivní hodnota je sice 60 Nm, což znamená asi o 10 Nm více než udává RMxprt, ale je třeba si povšimnout, že moment pulzuje v intervalu (20, 110) Nm.



Obr. 5. 30 Graf závislosti ztrát a času (CCC řízení) – plný rozsah



Obr. 5. 31 – Core loss špička

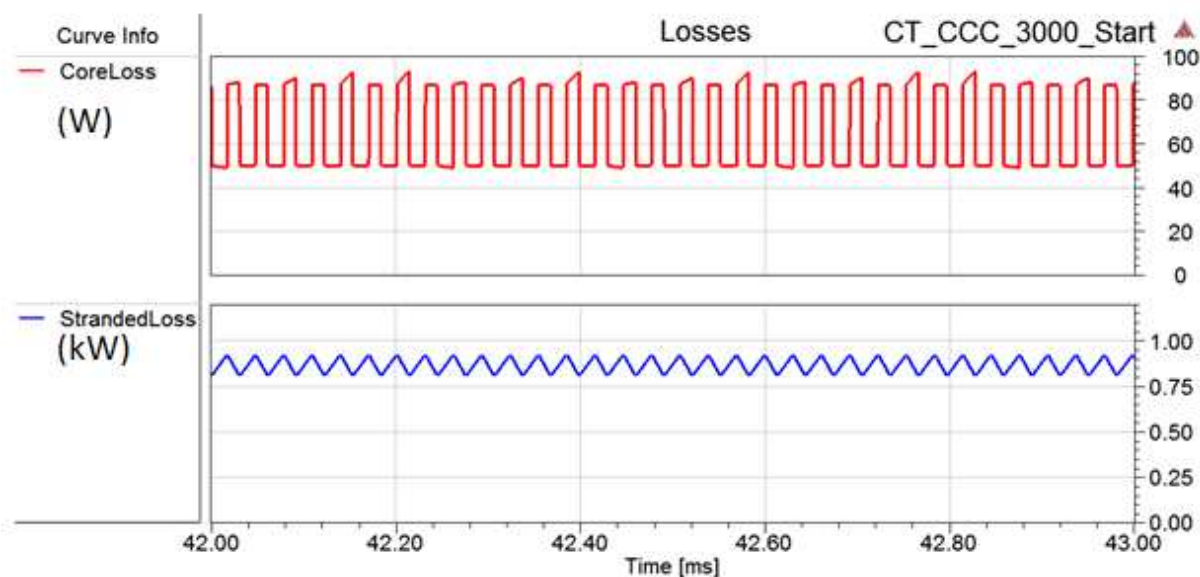


Obr. 5. 32 Komutace proudu

Nyní se podíváme na průběh ztrát během výpočtu. Podívejme se na obrázek 5. 30, který znázorňuje graf ztrát v železe a ztrát ve vinutí. Na první pohled je zřejmé, že výsledek vypadá pochybně. Ztráty v železe mají nepravidelný tvar a jsou značně velké, protože osa Y má měřítko v kilowatech. Pojdme se i přesto podívat na detailnější analýzu tohoto výpočtu. Prvotní analýza spočívá v tom, že se podíváme, jak dlouho trvá některá ze špiček ztrát.

Při největším přiblížení, jež program umožňuje, se dostaneme k průběhu jako na obrázku 5. 31. Špička ztrát, která dosahuje nejvyšší hodnoty, se mění v řádu maximálně jednotek microsekund. Protože průběh proudu vykazoval podobné, avšak ne tolik výrazné špičky, podíváme se nyní na průběh proudu při komutaci součástek. Jak vidíme na obrázku 5. 32, frekvence proudu se těsně před komutací sníží, poněvadž se změní frekvence spínání omezovacího tranzistoru, který zajišťuje pohyb proudu v hysterezním pásmu 140 – 150 A. Při detailní analýze jsem zjistil, že špičky, jež jsou zobrazeny v průběhu ztrát, jsou způsobeny nejspíše touto nepravidelností v napájecím proudu. Tato nepřesnost se dá odstranit hrubším krokem výpočtu, ale při použití hrubého výpočtu

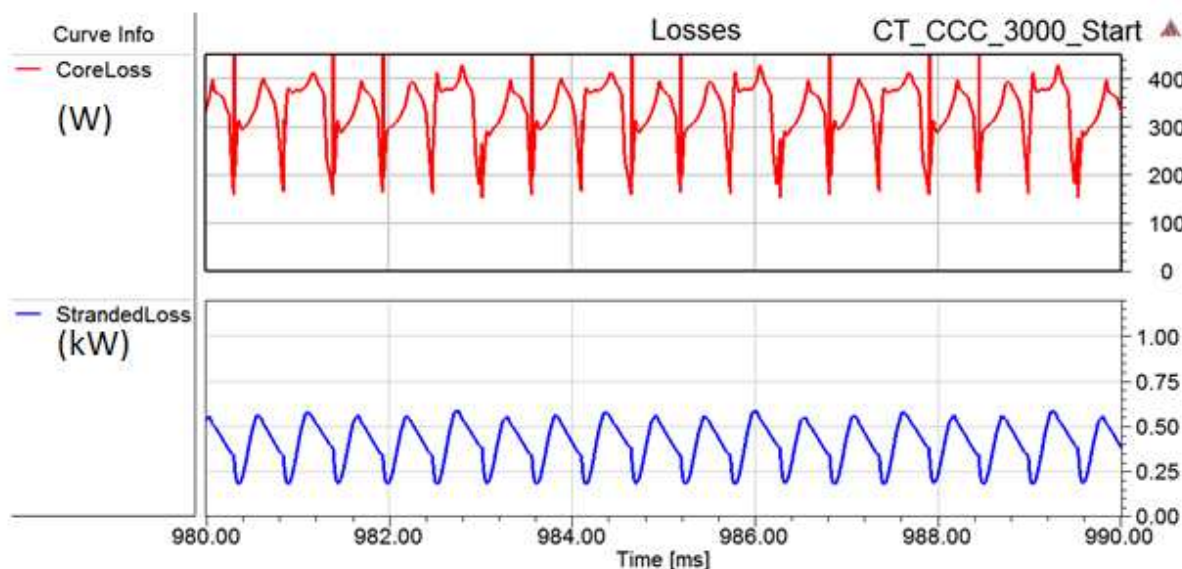
bychom snížili přesnost spínání regulačního tranzistoru a proud by se neudržel v předepsaném pásmu. Tento výpočet byl proveden s časovým krokem $1E-7$ s, ale při navýšení kroku o řád se proud pohyboval v pásmu 160 – 130 A. Když se podíváme do průběhu ztrát v železe v ustáleném stavu, dostaneme se do úplně jiného měřítka, protože ztráty v železe jsou řádově stovky watů.



Obr. 5. 33 Graf závislosti ztrát a času (CCC řízení) – rozsah 42 – 43 ms

Při značném přiblížení se dostaneme na průběh, jenž je zobrazen na obrázku 5. 33. Průběh ztrát v železe má tedy spíše obdelníkový průběh, ale když dochází ke komutaci součástek, průběh ztrát připomíná spíše pilu nebo pulzy. Obrázek 5. 33 dále ukazuje, že na začátku rozběhu není stroj plně magneticky využit, respektive nasycen. S postupně se zvyšující rychlostí se stroj více a více nasycuje, až dojde k plnému nasycení a v ustáleném stavu jsou ztráty v železe vyšší než při nízkých otáčkách. (viz. Rovnice 1) Nyní se podívejme na průběh ztrát ve vinutí, což v programu reprezentuje „Stranded Loss“ veličina. V programu je ale možné tyto ztráty zobrazit při napájení z externího obvodu nebo pro vnitřní napájení funkcí, pak se jedná o veličinu „Stranded LossR“. Výpočet těchto veličin je prakticky stejný, ale vývojáři programu se snažili oddělit výpočty z pohledu rozdílného typu buzení.

Obrázek 5. 34 ukazuje velikost ztrát při jmenovitých otáčkách. Protože na začátku rozběhu motor odebírá proud cca 150 A, je jasné, že ztráty tomu odpovídající budou vyšší než při jmenovitých otáčkách, kdy motor odebírá cca 120 A ve špičce. Tvar průběhu ztrát při jmenovitých otáčkách se výrazně změní, protože se motor otáčí rychleji oproti startu. Na začátku rozběhu dochází



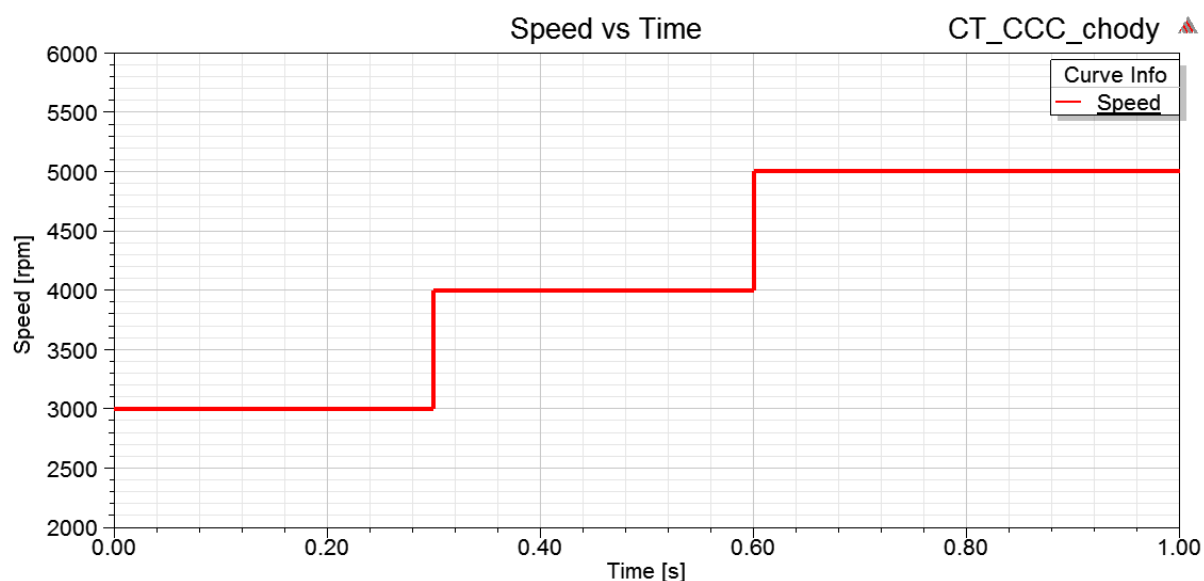
Obr. 5. 34 Graf závislosti ztrát a času (CCC řízení) – rozsah 980 – 990 ms

k pomalejšímu spínání tranzistorů, ale pokud je již motor na jmenovitých otáčkách, spínání součástek je daleko intenzivnější. Je důležité poznamenat, že ztráty v železe jsou v programu definované jako součet ztrát hysterezních a ztrát výřivými proudy, ale v této simulaci jsem uvažoval pouze ztráty hysterezní. Efekt výřivých proudů je sice možné zadat, ale jelikož je vinutí definováno jako „Stranded“, program toto nastavení ignoruje. Můžeme tedy závěrem prohlásit, že použitím CCM řízení se zásadně omezí proud při startu motoru, a tudíž i moment. Vlivem komutace součástek však může docházet k obrovským, ale krátkým špičkám ve ztrátách v železe. Díky omezení proudu dojde ke zpomalení rozběhu o 100 %, což je v čase z 0,4 s na 0,8 s. Oba napájecí obvody jsou uvedeny

v příloze E a F. Graf zátěžného momentu je uveden v příloze L Dále se podíváme, jak se bude motor chovat, když budeme postupně zvyšovat jeho pracovní otáčky.

5.6 Zvýšení otáček nad jmenovité

Tuto simulaci jsme probírali v kapitole 4. 4, kde bylo řečeno, že motor bude postupně zvyšovat otáčky v intervalu <3 000,5 000> ot/min. K této změně jsme použili funkci v „Motion Setup“, jenž je nastaven pro ustálený chod (Consider Mechanical Transient nezaškrtnuté). Dále jsme do kolonky s otáčivou rychlostí zadali funkci, kterou je vnořený if. Výsledek otáčení motoru je vidět na obrázku 5. 35, jenž zobrazuje rychlost otáčení v závislosti na čase.



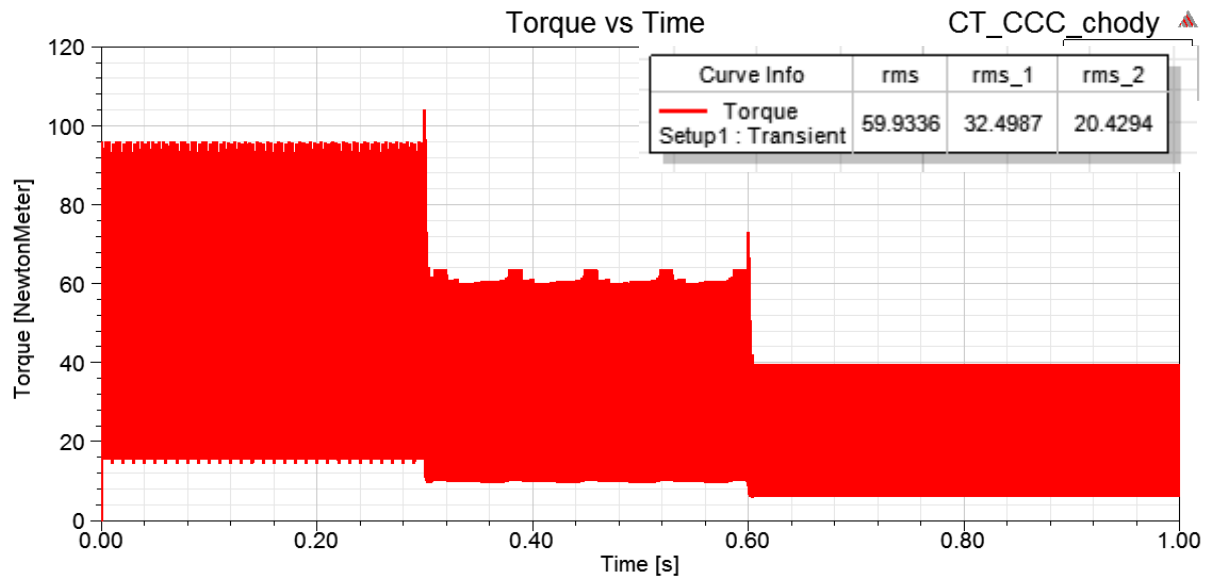
Obr. 5. 35 Graf závislosti rychlosti a času (3 typy otáček)

Z obrázku je patrné, že motor podle podmínky dosahuje jmenovitých otáček po 300 ms, následně se zvýší otáčky na 4 000, kde pracuje dalších 300 ms (teda od 300 do 600 ms) a nakonec zvýší otáčky na 5 000, kde již zůstává do konce simulace. Skoková změna je pouze simulační prostředek, protože otáčky jsou zde zadány funkcí a program v tomto režimu připne motor „natvrdo“ na předepsané otáčky. V reálné aplikaci by se nastavily příslušné otáčky a pomocí regulátoru by se přenastavil měnič napětí, jenž by zvýšil spínací frekvenci, a tím i otáčky motoru. Nárůst otáček by probíhal po exponenciálně. Proud motoru má obdobný průběh jako v ustáleném stavu, ale na každém intervalu se snižuje jeho hodnota.

3000 ot/ min <0,300>			4000 ot/min <300,600>			5000 ot/min <600,1000>		
MAX (A)	RMS (A)	f (Hz)	MAX (A)	RMS (A)	f (Hz)	MAX (A)	RMS (A)	f (Hz)
120	57	598	92	41	798	72	32	1000

Tabulka 2 – Tři typy otáček – jejich proud a frekvence

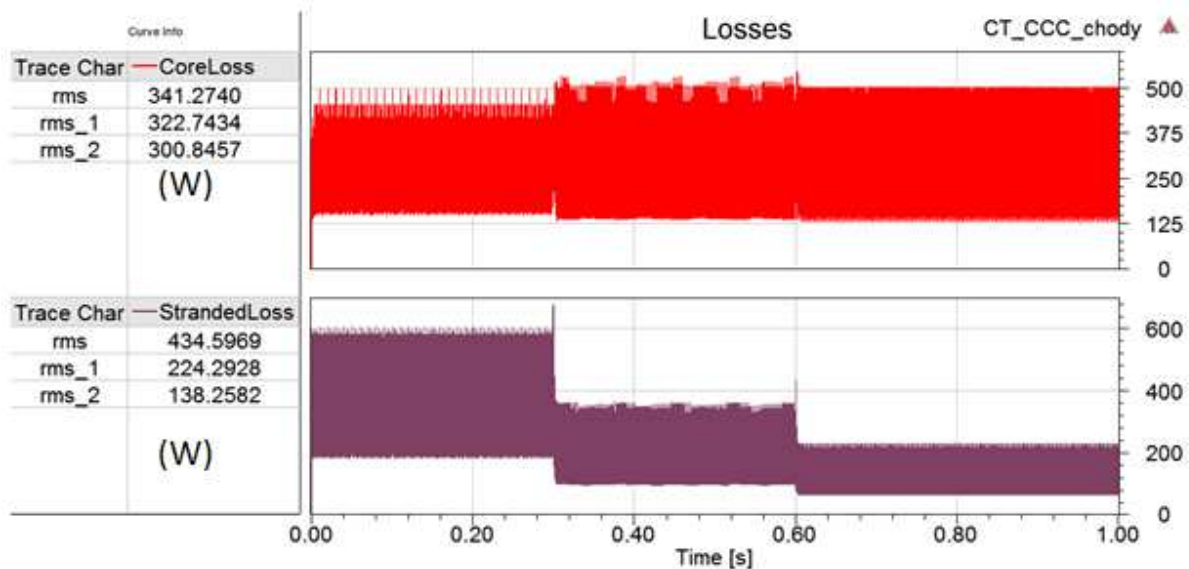
K lepší představě o velikostech proudu se podíváme do tabulky 2, která ukazuje, jak se mění hodnoty proudu v maximální hodnotě, ale také v hodnotě efektivní, a dále, jak se mění frekvence proudu při zvýšení otáček. V prvním intervalu se pohybujeme na jmenovitých otáčkách, a tudíž dosahujeme prakticky shodných hodnot, jako jsme řešili v kapitole rozběhu. Zvýšením otáček na



Obr. 5. 36 Graf závislosti momentu a času (3 typy otáček)

hodnotu 4 000 se zvýšila frekvence o 200 Hz a poklesl proud o cca 30 A v maximální hodnotě a o cca 15 A v efektivní hodnotě. Dle předpokladů vidíme, že při otáčkách 5 000 má proud nejvyšší frekvenci. Dále se podíváme, jak se projeví pokles proudu na průběhu momentu.

Na obrázku 5. 36 vidíme průběh momentu v čase včetně jeho efektivních hodnot. První interval je obdobný jako v ustáleném stavu při rozběhu, protože se jedná o jmenovité hodnoty, dále



Obr. 5. 37 Graf závislosti ztrát a času (3 typy otáček)

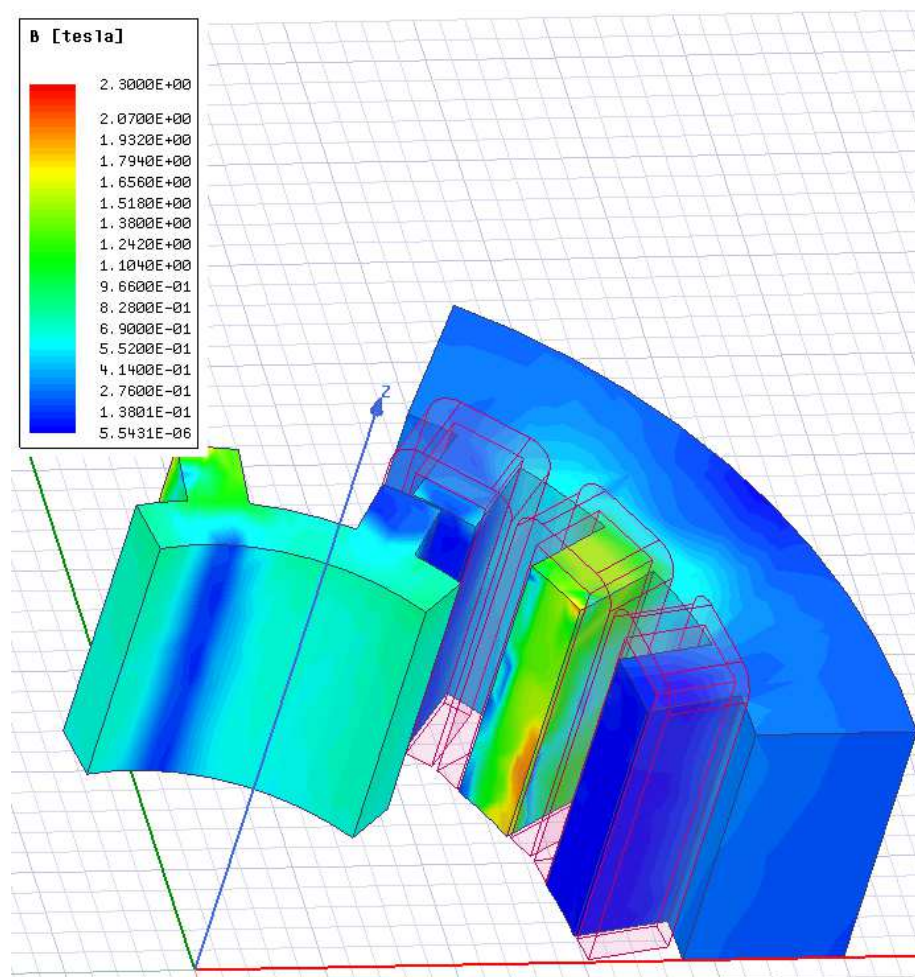
však vidíme, že moment poklesl o téměř 50 % v maximální hodnotě. Nyní se podíváme na interval

času $<0,300>$ ms, kde moment kmitá mezi hodnotami 16 a 96 Nm. Na otáčkách 4 000 ot/min moment klesnul a kmitá mezi hodnotami 12 a 64 Nm. Další zvýšení otáček zapříčiní pokles momentu na interval $<8, 40>$ Nm. Je tedy zřejmé, že zvýšení otáček značně snižuje hodnotu momentu, ale příznivě ovlivňuje jeho zvlnění.

Dále se podívejme na obrázek 5. 37 a proberme si, jak se mění ztráty v železe a ve vinutí při zvyšování otáček. Červený průběh reprezentuje ztráty v železe a fialový průběh představuje ztráty ve vinutí. Oba průběhy postupně klesají, ačkoliv ztráty v železe neklesají až tak výrazně, jako ztráty ve vinutí. Je celkem očekávané, že při nižším odběru proudu budou ztráty ve vinutí menší, neboť tyto ztráty jsou úměrné proudové hustotě zintegrované přes objem. Objem materiálu zůstává stejný, snižuje se pouze hodnota proudu, respektive proudové hustoty, a tudíž klesají i ztráty vinutím. Ztráty v železe zde nerespektují vířivé proudy, protože vinutí není definováno jako plný materiál. Z toho vyplývá, že „Core Loss“ představují pouze hysterezní ztráty. Vyšší otáčky jsou způsobeny vyšší frekvencí, což by mělo ztráty zvýšit, ale s vyššími otáčkami se sníží proud, tudíž dojde ke snížení sycení motoru. Nižší sycení, respektive nižší magnetická indukce, vede ke snížení ztrát v železe i přes zvýšení frekvence, protože magnetická indukce je ve vztahu (1) v kvadrátu, kdežto frekvence pouze v první mocnině. Pokud však porovnáme jednotlivé číselné hodnoty ztrát, prakticky se neliší. Obrázky magnetické indukce jsou uvedeny v příloze Q, a to pro všechny tři intervaly. Pro jednotlivé intervaly jsou kritické hodnoty 2 T; 1,6 T; 1,3 T.

5.7 3D model motoru

Cílem této simulace bylo prověřit magnetické pochody v motoru, respektive v jeho 3D modelu, a ověřit, zda se 2D řešič shoduje s 3D řešičem. Abychom mohli porovnat tyto dva modely, je třeba dodržet stejné podmínky výpočtu. Simulace jsou identické až na třetí rozměr v prostoru 3D modelu. Simulace přinesla spoustu obrázků, z nichž je většina uvedena v příloze N - P. Obrázek 5. 38 ukazuje hned několik stavů a vlastností programu i motoru. Důležité je povšimnout si vlastnosti programu, že model je sice 1/6, ale ve výpočtu uvažuje i ostatní části, které nejsou vidět. To je respektováno globální proměnnou „Fractions = 6“. Dále se podívejme na rotor, kde vidíme, že pravý pól právě přestal vést (respektive příslušná fáze statoru) a naopak levý pól rotoru slouží k uzavírání cest magnetického toku, protože dle symetrie se v daný moment nachází v poloze náběhu do sousého stavu. Díky tomu by zde měla být nejkritičtější hodnota magnetické indukce, která dosahuje cca 1,8 T jako ve 2D modelu (kapitola 5. 2, obrázek 5. 5). Tím se tedy potvrzují předpoklady z 2D simulace a můžeme prohlásit, že 2D model je pro značné množství výpočtů postačující, protože výsledky jsou identické a výpočet trvá značně kratší dobu.



Obr. 5. 38 Mapa pole magnetické indukce v 3D modelu motoru

Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval prací v programu Electronics 17.0 od společnosti Ansys. Studium odborné literatury jsem se seznámil se základní problematikou a současným stavem ve stavbě spínaných reluktančních strojů. Za použití modulu RMxprt v programu Electronics jsem navrhnul model spínaného reluktančního motoru o výkonu 15 kW a jmenovitých otáčkách 3 000 ot/min. Dále jsem simuloval chod motoru ve stejném programu za použití výpočetního modulu Maxwell, jenž slouží k analýze magnetického pole.

Nejprve jsem ověřil správnost výsledků návrhu stroje v RMxpřtu pomocí simulace ustáleného stavu na jmenovitých otáčkách. Dále jsem se zabýval výpočtem poměru indukčnosti tím způsobem, že jsem nejprve ověřil dostatečné sycení motoru v řešiči magnetostatic. Při jmenovitém napájení 720 A na 1 závit (60 A na 12 závitů) jsem zjistil, že kritická hodnota magnetické indukce v poloze částečného překrytí je cca 1,8 T. Z magnetizační charakteristiky použitého materiálu je patrné, že je motor plně nasycen. Nastavil jsem tedy výpočet indukčnosti pro fázi A v plném modelu motoru a pomocí parametrické analýzy jsem otáčel rotorem s krokem 5° elektrických. Výsledný poměr indukčností v sousé a nesousé poloze je roven 5,8, což je poměrně nízká hodnota (ideálně cca 10) a může být způsobena méně vhodnou geometrií rotoru.

Další simulaci v magnetostatickém řešiči jsem zaměřil na ověření střídaní režimu motor – generátor v závislosti na natáčení rotoru. Parametrickou analýzou jsem měnil velikost napájecího proudu v rozsahu 0 – 800 A při jednom závitě v cívce napájené fáze a pozoroval jsem moment stroje. Teoretické předpoklady byly potvrzeny, poněvadž ve chvíli, kdy rotor nabíhá do sousé polohy je moment kladný, když se natáčí dále je moment záporný. Je tedy potvrzen teoretický předpoklad, že, když se rotor otáčí do sousé polohy, jedná se o motorický režim. Fáze otáčení rotoru ze sousé polohy do nesousé je stroj v generátorickém režimu.

Dále jsem se zabýval rozběhem motoru z nulových otáček na jmenovité. K první simulaci jsem využil model motoru s DC řízením, respektive bez omezení proudu. Z výsledků jsem zjistil, že motor v tomto režimu odebírá asi 9x vyšší proud, než je jeho jmenovitá hodnota (120 A špičkových). Vytvořil jsem tedy identický model motoru, ale do návrhu jsem zařadil řízení přerušováním proudu (CCC), jenž udržuje maximální proud motoru v pásmu 140 – 150 A. Toto pásmo jsem zvolil podle jmenovité hodnoty proudu v simulaci s DC řízením, kde motor dosahuje v ustáleném stavu špičkové hodnoty proudu cca 120 A. Start motoru se podle očekávání prodloužil, a to konkrétně z 0,4 s na 0,8 s. Motor však odebírá během startu maximální proud 150 A. Je zřejmé, že omezením proudu motoru se úměrně zmenšil i vytvářený moment. Navržený spínaný reluktanční motor vytváří moment, který

vykazuje v ustáleném stavu až cca 100 % pulzace, resp. zvlnění. Tento problém je způsoben nevhodnou konstrukcí. V daném případě se jedná o třífázový motor, který má velké pulzace momentu ve srovnání s vícefázovými motory. Úpravou geometrie na čtyř nebo pětifázový motor by se dal moment motoru částečně vyhladit, a tak snížit jeho zvlnění. Při vyšetřování ztrát v motoru jsem zjistil, že časový krok simulace má značný vliv na správnost výsledků. Při příliš hrubém kroku se ve výsledcích ztrát nevyvinou špičky řádově kW, avšak regulační tranzistor proudu nespíná přesně a neudrží nastavené regulační pásmo. Zjemněním výpočetního kroku jsem dokázal optimalizovat regulační pásmo proudu. V tomto případě se ve výsledných ztrátách projeví o několik řádů vyšší špičkové hodnoty. Hlubší analýzou jsem zjistil, že tyto špičky jsou způsobeny jednak rozdílnou frekvencí při komutaci součástek a jednak vysokou časovou konstantou, podle níž musí v dané fázi zaniknout proud.

Netypický chod motoru jsem simuloval tím způsobem, že jsem nastavil tři hodnoty otáček motoru a sledoval jsem, jak se mění odebíraný proud, respektive vytvářený moment stroje. Dále jsem zjistil, že odběrem menšího proudu dochází k menšímu nasycení stroje, ale zároveň má průběh proudu vyšší frekvenci, a tudíž se ztráty v železe sice sníží, ale ne o výraznou hodnotu (řádově jednotky až desítky wattů). Ztráty ve vinutí se naopak sníží markantně, protože odebíraný proud je značně snížen při vyšších otáčkách.

Poslední simulace byla zaměřena především na ověření shody výsledků 2D modelu oproti modelu ve 3D. V řešiči transient jsem tedy simuloval sycení motoru v částečném 3D modelu. K simulaci jsem využil výpočetní stanici ve firmě TechSoft Engineering, poněvadž velkou nevýhodou 3D modelu je časová náročnost simulace. Porovnání výpočetního času je uvedeno v kapitole 4. 5. Výsledkem jsou však shodné hodnoty magnetické indukce s hodnotami 2D modelu, z čehož plyne, že 2D model je pro simulace vhodnější, protože časová náročnost simulace není tak velká, jako u 3D.

Většina relevantních grafů a obrázků je zmíněna výše v této práci. Ostatní obrázky jsou uvedeny v příslušných přílohách. Nastavení všech simulací jsou zobrazena v přílohách G -K. Výsledky provedených simulací ukazují že navržený stroj by bylo možné dále optimalizovat, to však nebylo předmětem mé práce.

Literatura

- [1] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. 2nd Edition. UK: Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-58157-5.
- [2] HRABOVCOVÁ, Valéria, Ladislav JONOUŠEK, Pavol RAFAJDUS a Miroslav LIČKO. *Moderné Elektrické Stroje*. EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2001. ISBN 80-7100-809- 5
- [3] KOTAL, Miroslav, Petr VOŽENÍLEK, Petr NOVOTNÝ. *Příklady výpočtu elektrických strojů točivých*. 4. vydání. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1988.
- [4] ANSYS, Inc. *Maxwell Online Help*. Release 17.2. Canonsburg, USA: Ansys 2016
- [5] ANSYS, Inc. *RMxprt Online Help*. Release 17.2. Canonsburg, USA: Ansys 2016
- [6] SONGYAN, Kuai, Xulong ZHANG. *Current Control Strategy and Power Losses of High Power Switched Reluctance Motor*. Piscataway, N.J.: IEEE, 2010. ISBN 9781424471591.
- [7] MORÓN, Carlos, Enrique TREMPES, RAMIREZ Puerto, GARCIA Alfonso, SOMOLINOS Jose Andrés. *Performance Optimization in Switched Reluctance Motor Drives*. Key Engineering Materials, Vol. 495, pp. 67-70, 2012
- [8] PARSAPOUR, Amir, Behzad Mirzaeian DEHKORDI, MOALLEM Mehdi. *Predicting core losses and efficiency of SRM in continuous current mode of operation using improved analytical technique*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 378, p. 118-127.
- [9] PAVLUK, Jan. *Experimentální ověření výpočtu oteplení suchého transformátoru*. Praha: ČVUT FEL, 2014
- [10] MAKYŠ, P, Vavrůš, V, Lehocký, P. *Traction parameter investigation of the first Slovak electric car using DC drive*, ELECTROMOTION 2013, An international journal devoted to research, development, design and application of electromechanical energy converters, actuators and transducers, Vol. 20, No. 1-4, Cluj-Napoca, Romania, 2013, 10, 21.-22., p.: 79-83, ISSN 1223-057X

Přílohy

Příloha A - Design Sheet – DC

SWITCHED RELUCTANCE MOTOR DESIGN

GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	15
Rated Voltage (V):	300
Given Rated Speed (rpm):	3000
Frictional Loss (W):	50
Windage Loss (W):	200
Type of Load:	Constant Torque
Type of Circuit:	Full-Voltage
Lead Angle of Trigger in Elec. Degrees:	0
Trigger Pulse Width in Elec. Degrees:	120
Total Transistor Voltage Drop (V):	5
Total Diode Voltage Drop (V):	5
Operating Temperature (C):	75

STATOR CORE DATA

Number of Stator Poles:	18
Outer Diameter of Stator (mm):	250
Inner Diameter of Stator (mm):	150
Yoke Thickness (mm):	31
Pole Embrace:	0.5
Length of Stator Core (mm):	120
Stacking Factor of Stator Core:	0.95
Type of Steel:	M27_29G

STATOR COIL DATA

Slot Insulation Thickness (mm):	0.5
End Length Adjustment (mm):	5
Number of Parallel Branches:	1
Number of Turns per Pole:	12
Number of Wires per Conductor:	1
Wire Diameter (mm):	2.743
Wire Wrap Thickness (mm):	0.1
Slot Fill Factor (%):	68.58

**ROTOR CORE
DATA**

Number of Rotor Poles:	12
Length of Air Gap (mm):	0.5
Inner Diameter of Rotor (mm):	100
Yoke Thickness (mm):	11
Pole Embrace:	0.3
Length of Rotor Core (mm):	120
Stacking Factor of Rotor Core:	0.95
Type of Steel:	M27_29G
Magnetic Shaft:	No

MATERIAL CONSUMPTION

Stator Copper Density (kg/m ³):	8900
Stator Core Steel Density (kg/m ³):	7650
Rotor Core Steel Density (kg/m ³):	7650
Stator Copper Weight (kg):	6.79
Stator Core Steel Weight (kg):	22.5
Rotor Core Steel Weight (kg):	5
Total Net Weight (kg):	34.29
Stator Core Steel Consumption (kg):	39.37
Rotor Core Steel Consumption (kg):	15.27

**FULL-LOAD OPERATION
DATA**

Input DC Current (A):	59.894
Phase RMS Current (A):	56.11
Phase Current Density (A/mm ²):	9.5
Frictional and Windage Loss (W):	293.74
Iron-Core Loss (W):	621.8
Winding Copper Loss (W):	746.41
Diode Loss (W):	130
Transistor Loss (W):	429.53
Total Loss (W):	2221.5
Output Power (kW):	15.746
Input Power (kW):	17.968
Efficiency (%):	87.64
Rated Speed (rpm):	3190

Rated Torque (N.m):	47.1
Flux Linkage (Wb):	0.14
Stator-Pole Flux Density (Tesla):	1.32
Stator-Yoke Flux Density (Tesla):	0.282
Rotor-Pole Flux Density (Tesla):	1.47
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla):	0.78
Coil Length per Turn (mm):	298.85
Winding Resistance in Phase (ohm):	0.079
Winding Resistance at 20C (ohm):	0.065
Winding Leakage Inductance (mH):	0.114
Iron-Core-Loss Resistance (ohm):	241.7
Frequency of Phase Current (Hz):	638.1
Maximum Output Power (kW):	36.5

NO-LOAD OPERATION DATA

No-Load Speed (rpm):	8982
No-Load DC Current (A):	21.6
No-Load Input Power (W):	6473

START OPERATION DATA

Estimated Start Torque (N.m):	2298
Estimated Start DC Current (A):	3018
Maximum Start Current (A):	3734

TRANSIENT FEA INPUT DATA

For Armature Winding:	
Number of Turns:	72
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	0.079
End Leakage Inductance (H):	8.57E-06
2D Equivalent Value:	
Equivalent Model Depth (mm):	120
Equivalent Stator Stacking Factor:	0.95
Equivalent Rotor Stacking Factor:	0.95
Estimated Rotor Inertial Moment (kg m ²):	0.046

Příloha B - Design Sheet – CCC

SWITCHED RELUCTANCE MOTOR DESIGN

GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	15
Rated Voltage (V):	300
Given Rated Speed (rpm):	3000
Frictional Loss (W):	50
Windage Loss (W):	200
Type of Load:	Constant Torque
Type of Circuit:	Full-Voltage
Lead Angle of Trigger in Elec. Degrees:	0
Trigger Pulse Width in Elec. Degrees:	120
Total Transistor Voltage Drop (V):	5
Total Diode Voltage Drop (V):	5
Maximum Current for Chopped Current Control (A):	150
Minimum Current for Chopped Current Control (A):	140
Operating Temperature (C):	75

STATOR CORE DATA

Number of Stator Poles:	18
Outer Diameter of Stator (mm):	250
Inner Diameter of Stator (mm):	150
Yoke Thickness (mm):	31
Pole Embrace:	0.5
Length of Stator Core (mm):	120
Stacking Factor of Stator Core:	0.95
Type of Steel:	M27_29G

STATOR COIL DATA

Slot Insulation Thickness (mm):	0.5
End Length Adjustment (mm):	5
Number of Parallel Branches:	1
Number of Turns per Pole:	12

Number of Wires per Conductor:	1
Wire Diameter (mm):	2.743
Wire Wrap Thickness (mm):	0.1
Slot Fill Factor (%):	68.5799

ROTOR CORE DATA

Number of Rotor Poles:	12
Length of Air Gap (mm):	0.5
Inner Diameter of Rotor (mm):	100
Yoke Thickness (mm):	11
Pole Embrace:	0.3
Length of Rotor Core (mm):	120
Stacking Factor of Rotor Core:	0.95
Type of Steel:	M27_29G
Magnetic Shaft:	No

MATERIAL CONSUMPTION

Stator Copper Density (kg/m ³):	8900
Stator Core Steel Density (kg/m ³):	7650
Rotor Core Steel Density (kg/m ³):	7650
Stator Copper Weight (kg):	6.78995
Stator Core Steel Weight (kg):	22.5036
Rotor Core Steel Weight (kg):	4.99897
Total Net Weight (kg):	34.2925
Stator Core Steel Consumption (kg):	39.3694
Rotor Core Steel Consumption (kg):	15.2678

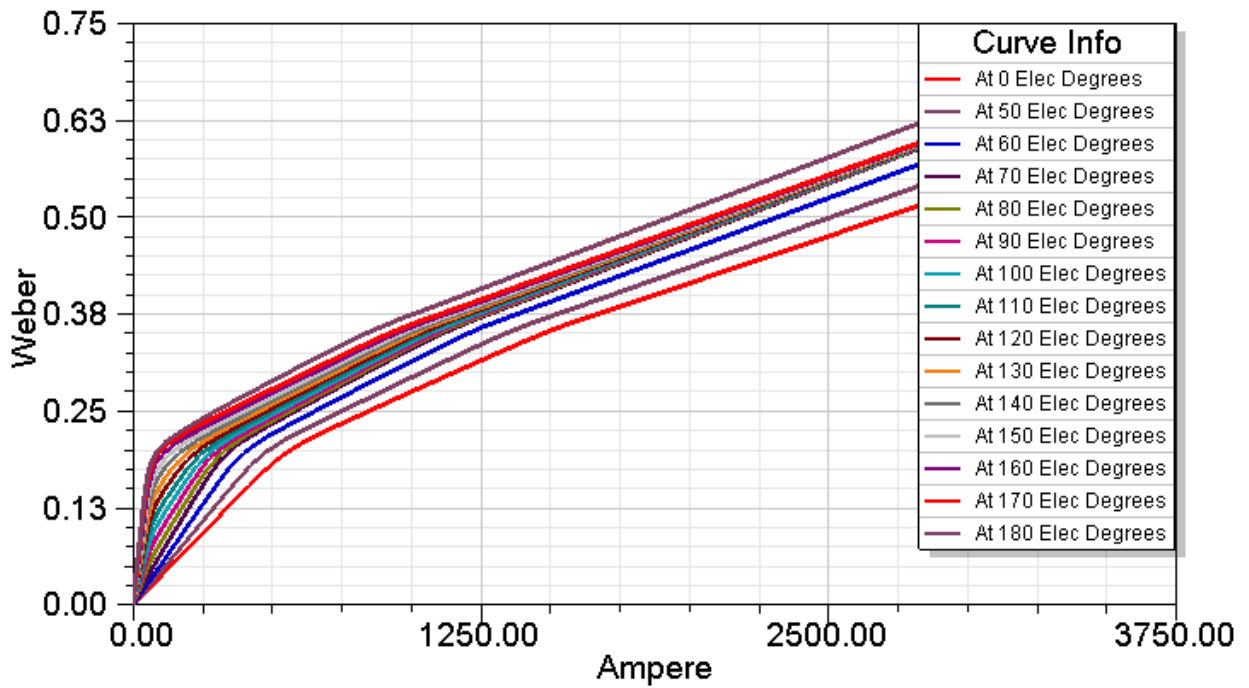
FULL-LOAD OPERATION DATA

Input DC Current (A):	59.894
Phase RMS Current (A):	56.1147
Phase Current Density (A/mm ²):	9.49588
Frictional and Windage Loss (W):	293.74
Iron-Core Loss (W):	621.777
Winding Copper Loss (W):	746.408
Diode Loss (W):	130.005
Transistor Loss (W):	429.532
Total Loss (W):	2221.46
Output Power (W):	15746.7
Input Power (W):	17968.2

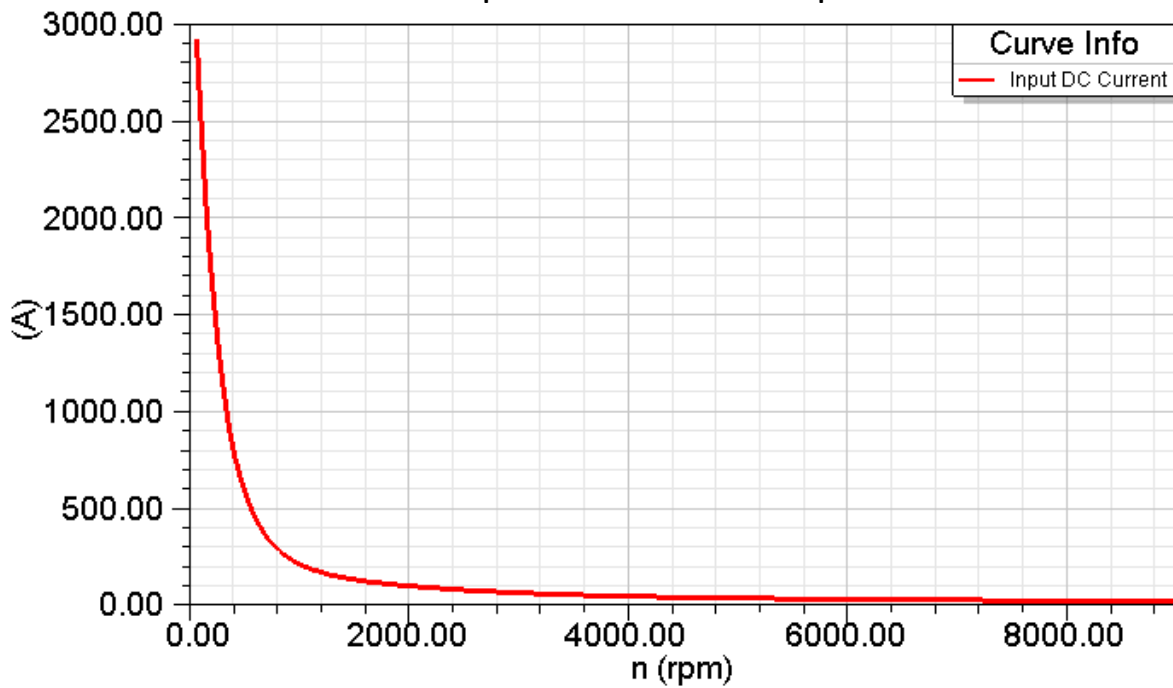
Efficiency (%):	87.6367
Rated Speed (rpm):	3190.48
Rated Torque (N.m):	47.1309
Flux Linkage (Wb):	0.141113
Stator-Pole Flux Density (Tesla):	1.31505
Stator-Yoke Flux Density (Tesla):	0.277292
Rotor-Pole Flux Density (Tesla):	1.47062
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla):	0.781458
Coil Length per Turn (mm):	298.849
Winding Resistance in Phase (ohm):	0.079014
Winding Resistance at 20C (ohm):	0.064995
Winding Leakage Inductance (mH):	0.114393
Iron-Core-Loss Resistance (ohm):	241.711
Frequency of Phase Current (Hz):	638.096
Maximum Output Power (W):	19439.6
NO-LOAD OPERATION DATA	
No-Load Speed (rpm):	8982.08
No-Load DC Current (A):	21.5788
No-Load Input Power (W):	6473.64
START OPERATION DATA	
Estimated Start Torque (N.m):	97.3826
Estimated Start DC Current (A):	10.0643
Maximum Start Current (A):	150
TRANSIENT FEA INPUT DATA	
For Armature Winding:	
Number of Turns:	72
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	0.079014
End Leakage Inductance (H):	8.57E-06
2D Equivalent Value:	
Equivalent Model Depth (mm):	120
Equivalent Stator Stacking Factor:	0.95
Equivalent Rotor Stacking Factor:	0.95
Estimated Rotor Inertial Moment (kg m ²):	0.045292

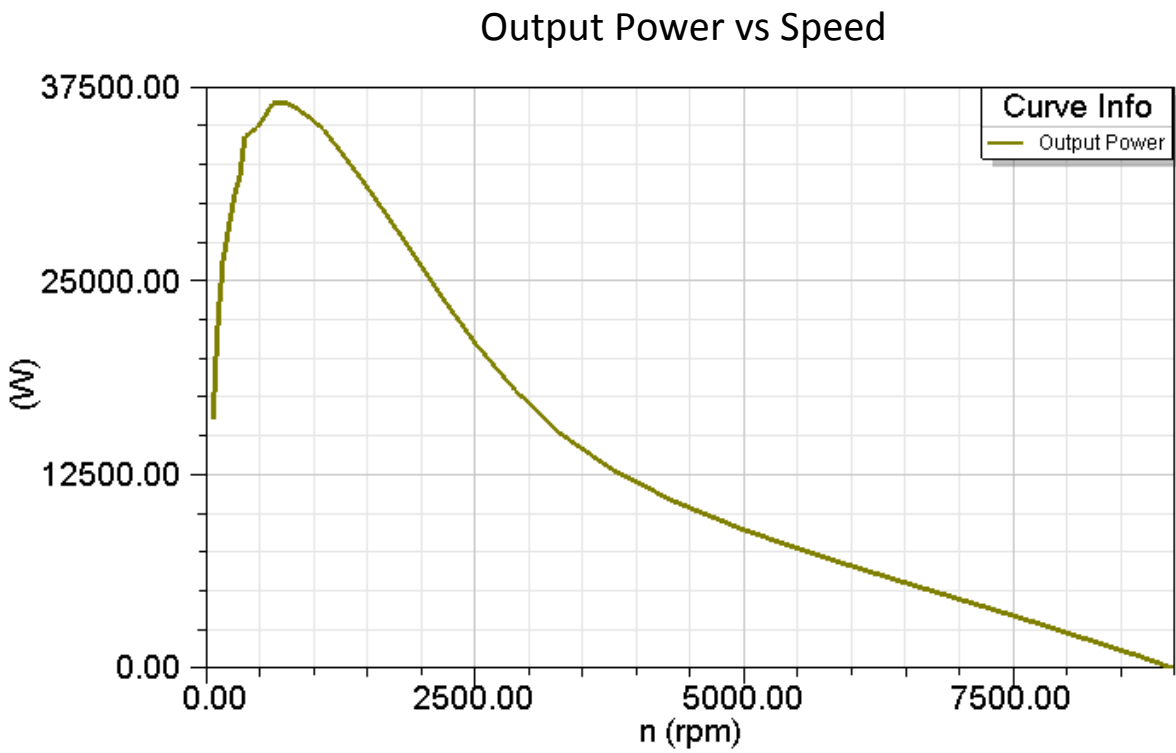
Příloha C - RMxpřt_DC

Flux Linkage vs Current at Various Position

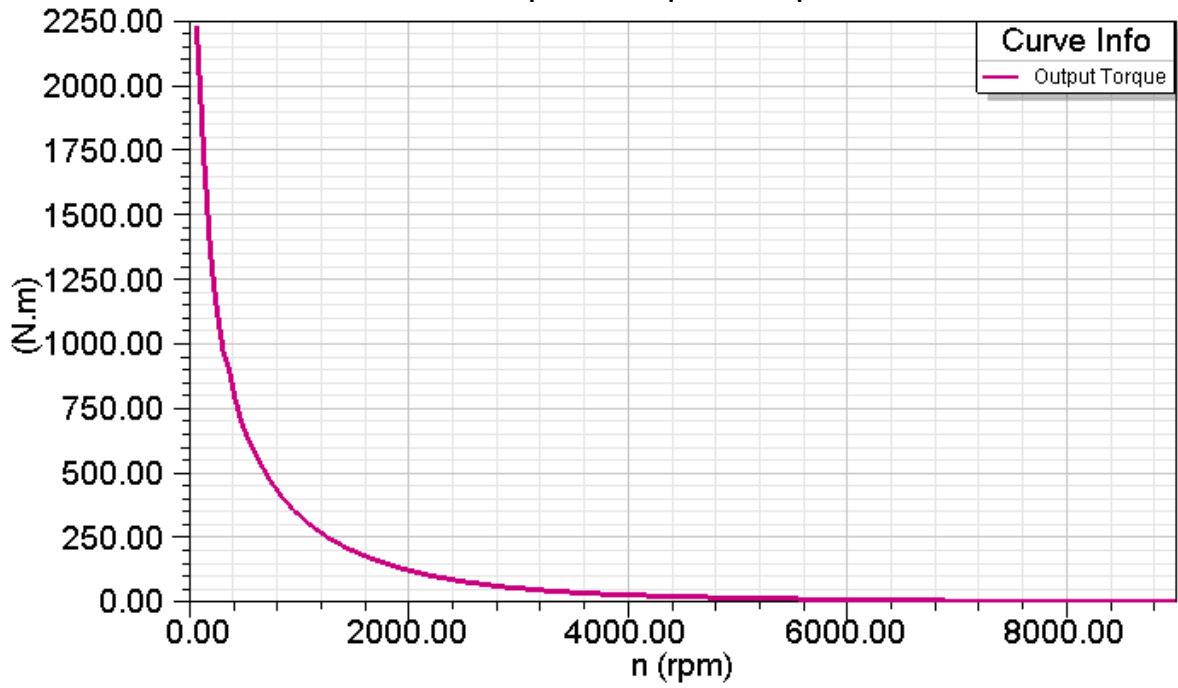


Input DC Current vs Speed

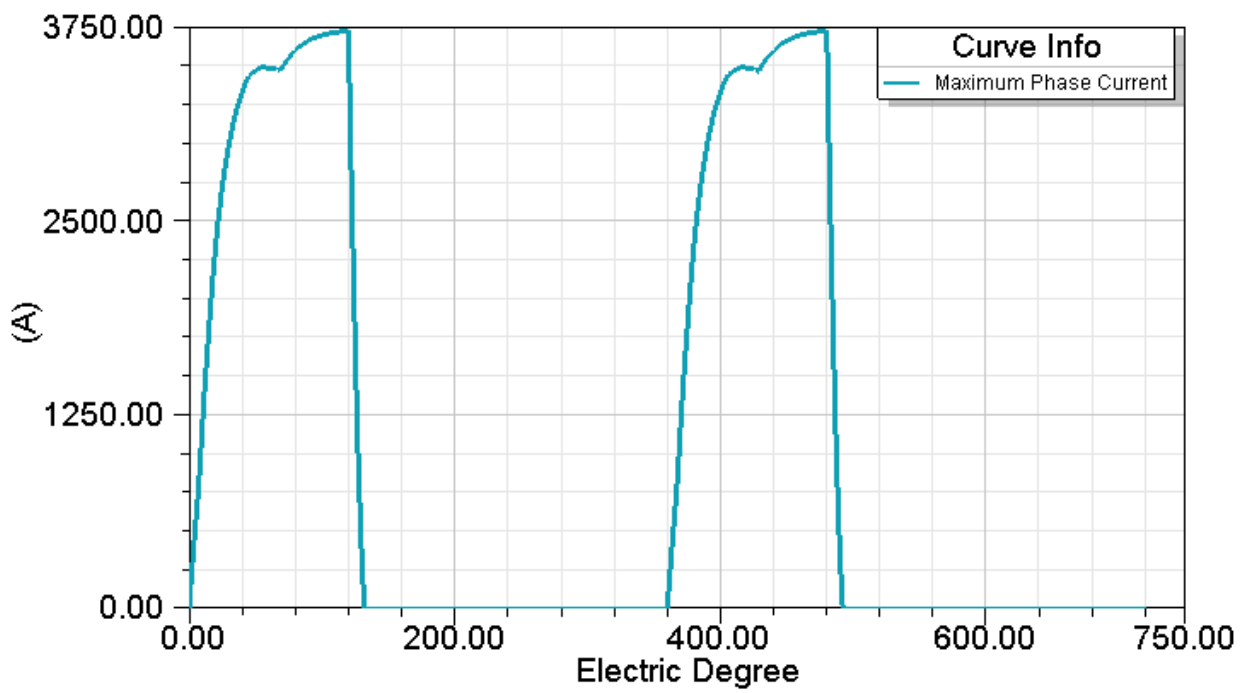




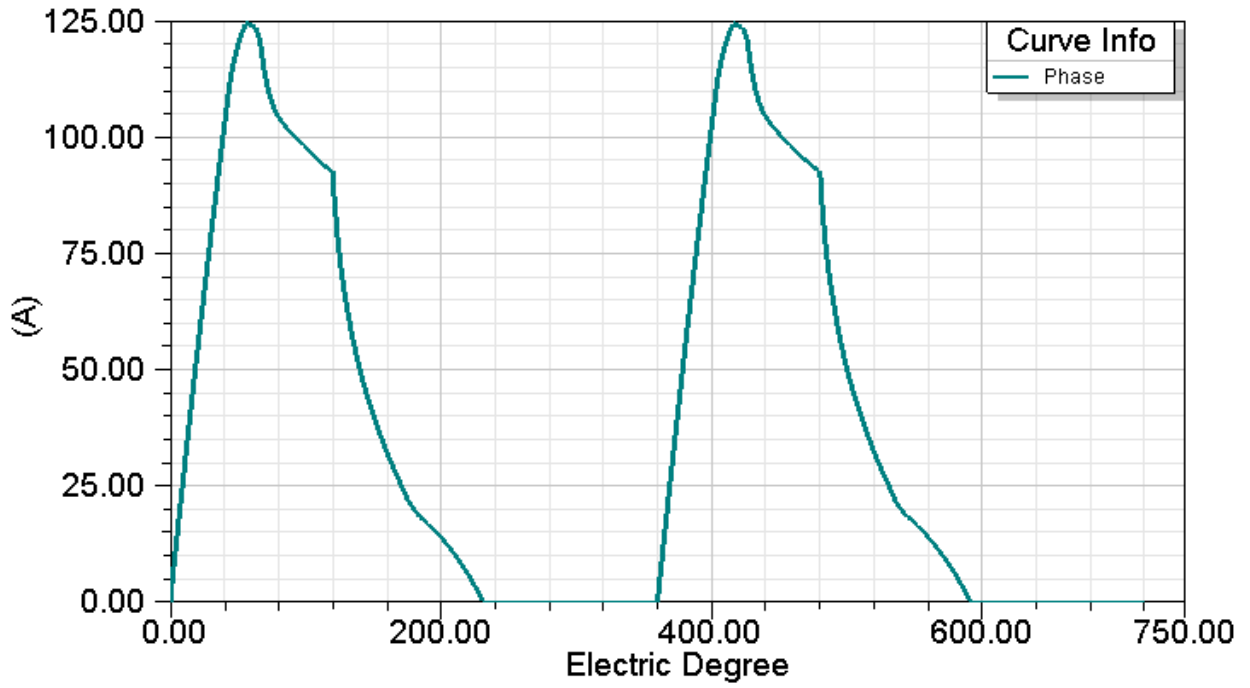
Output Torque vs Speed



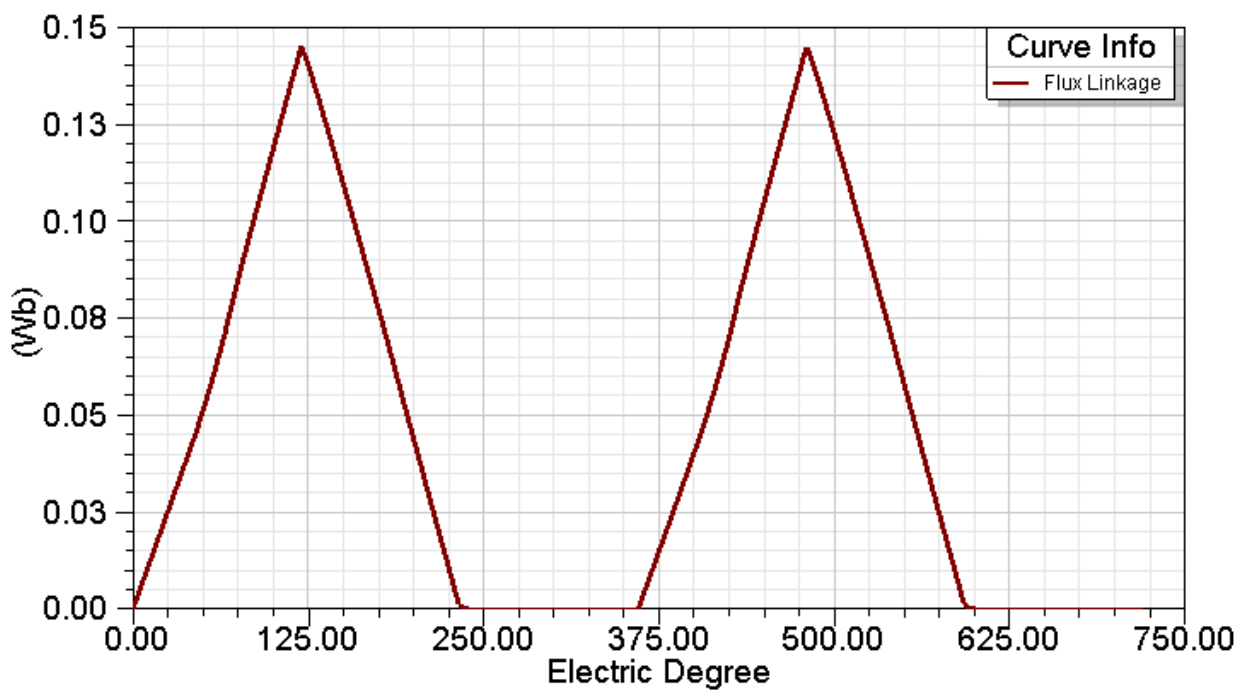
Maximum Phase Current



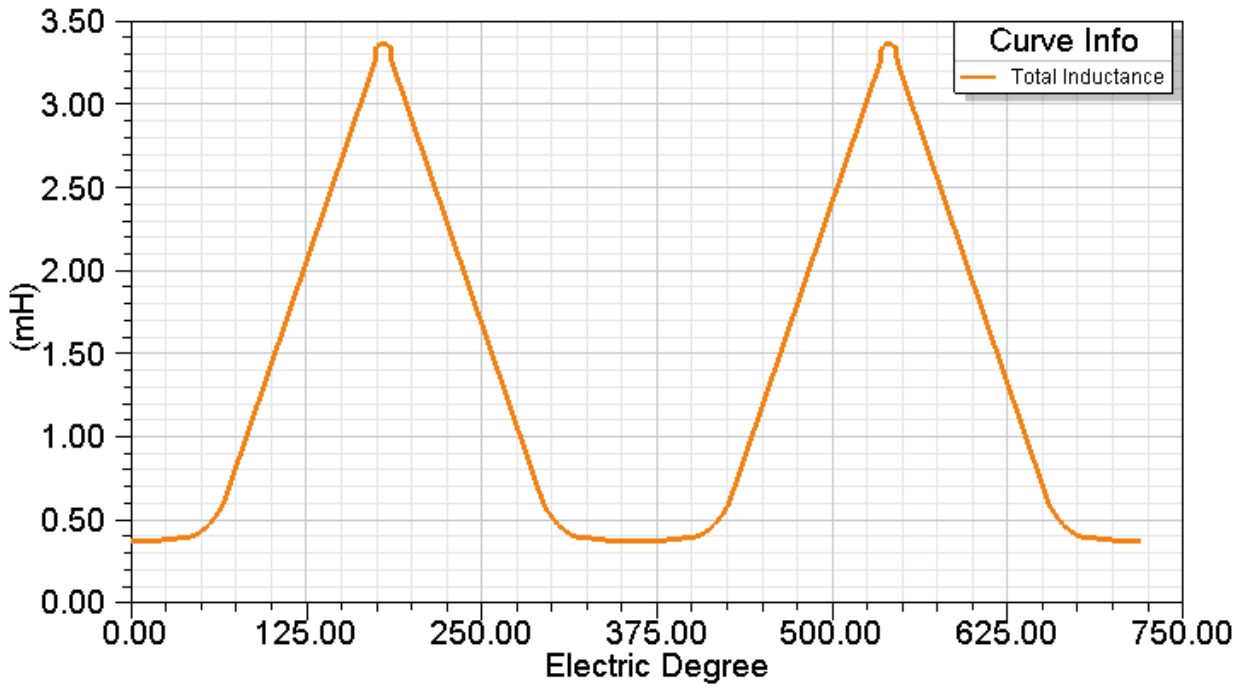
Rated Phase Current



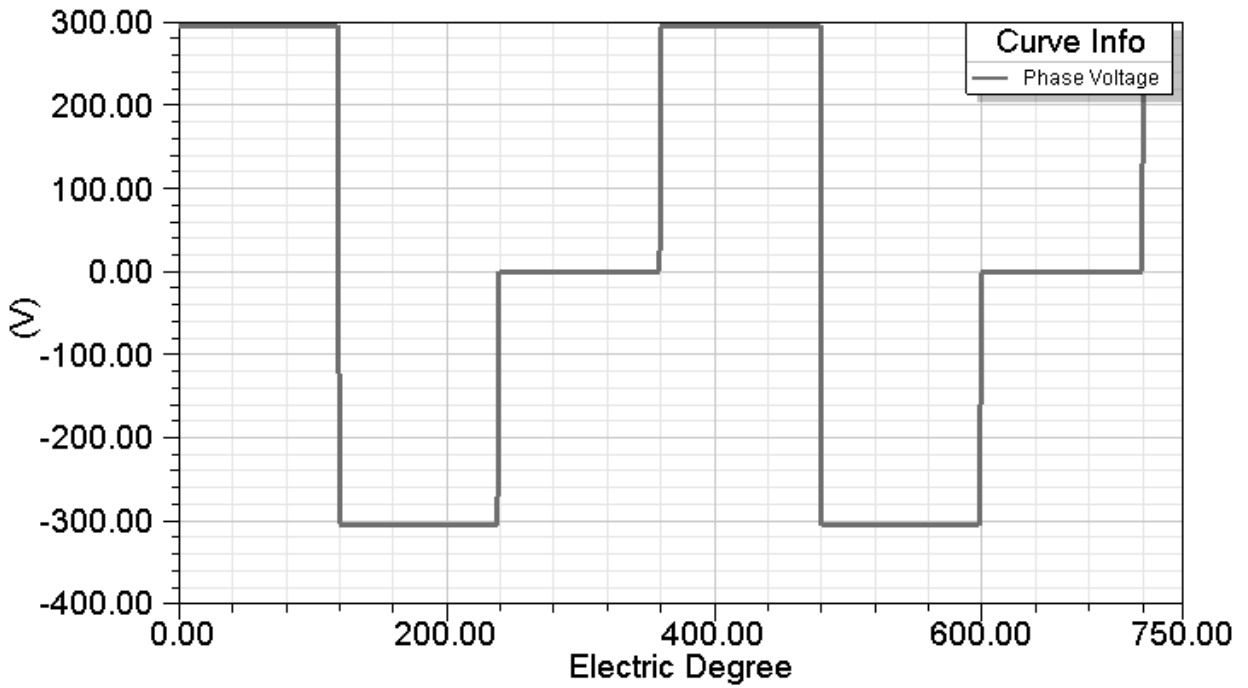
Flux Linkage



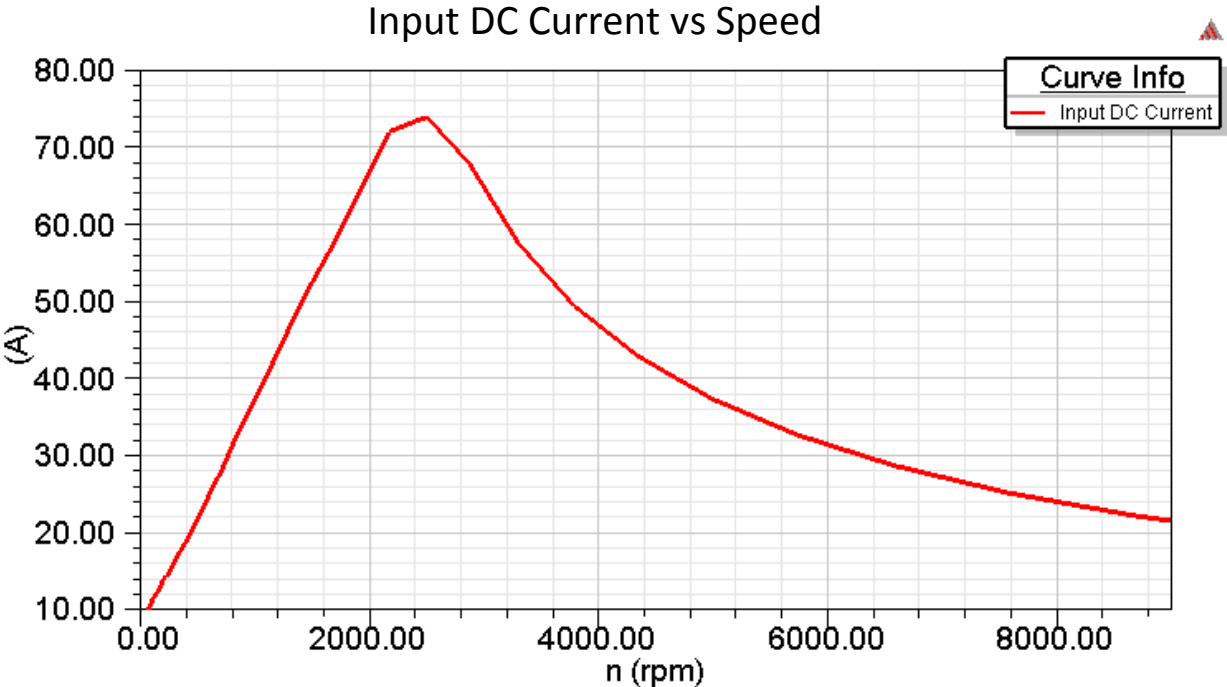
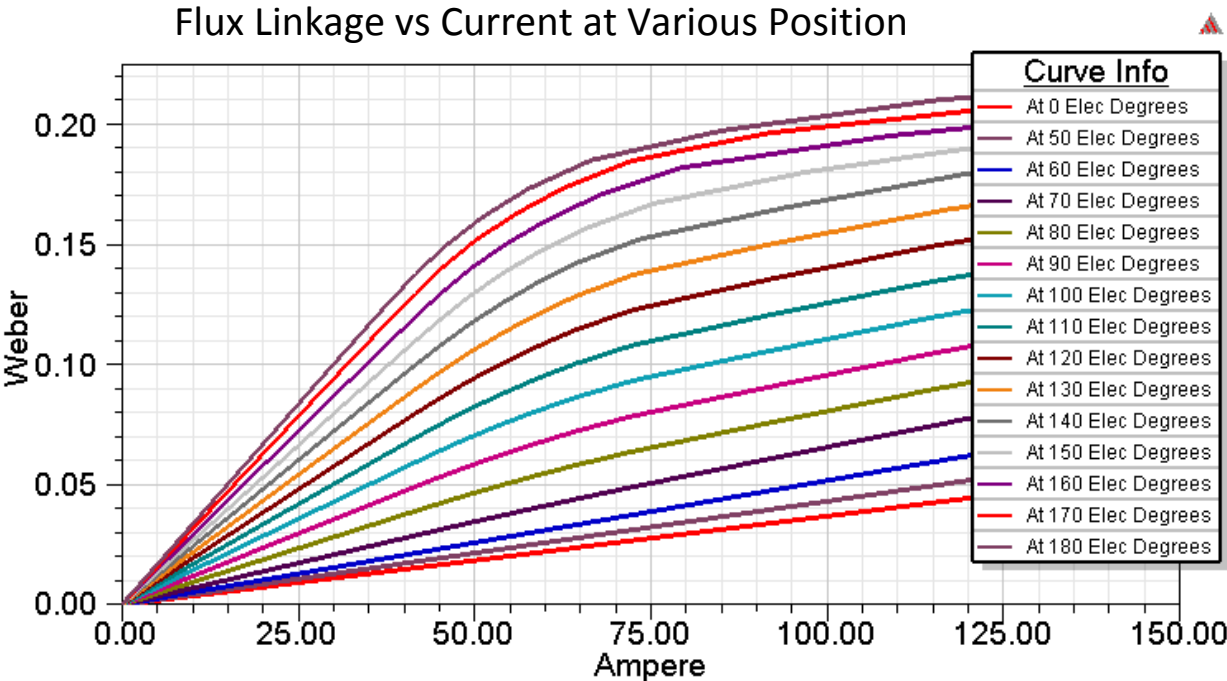
Air-Gap Induktance

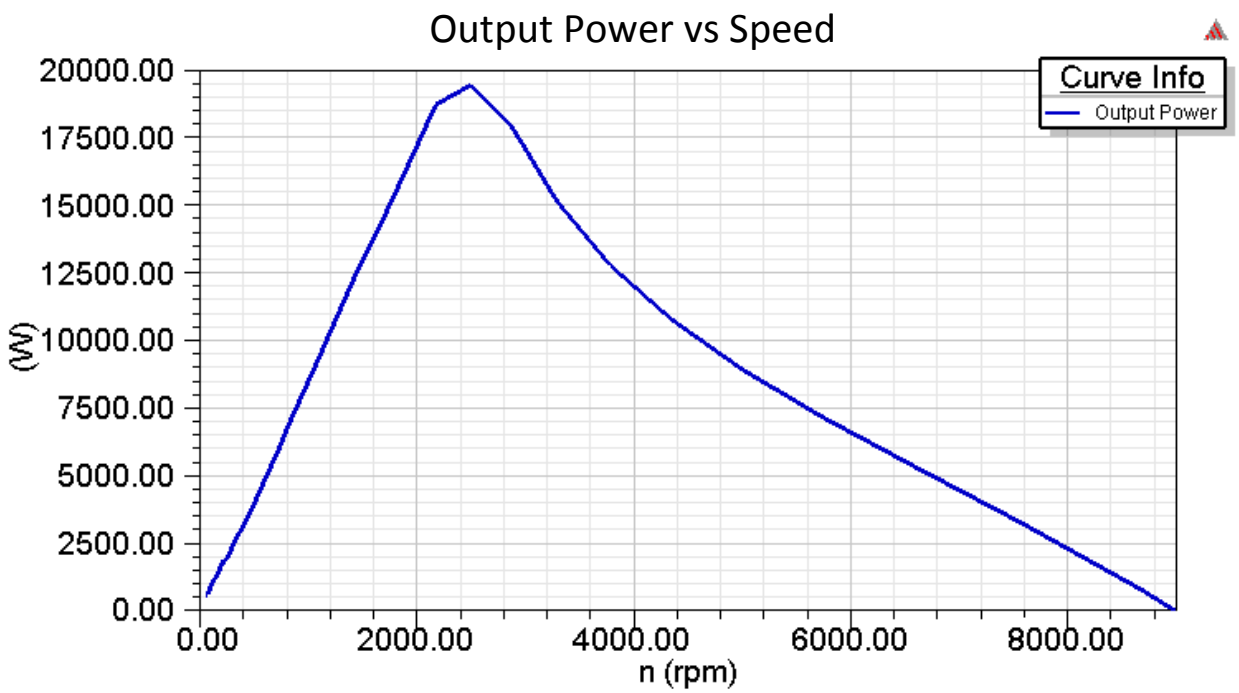


Phase Voltage

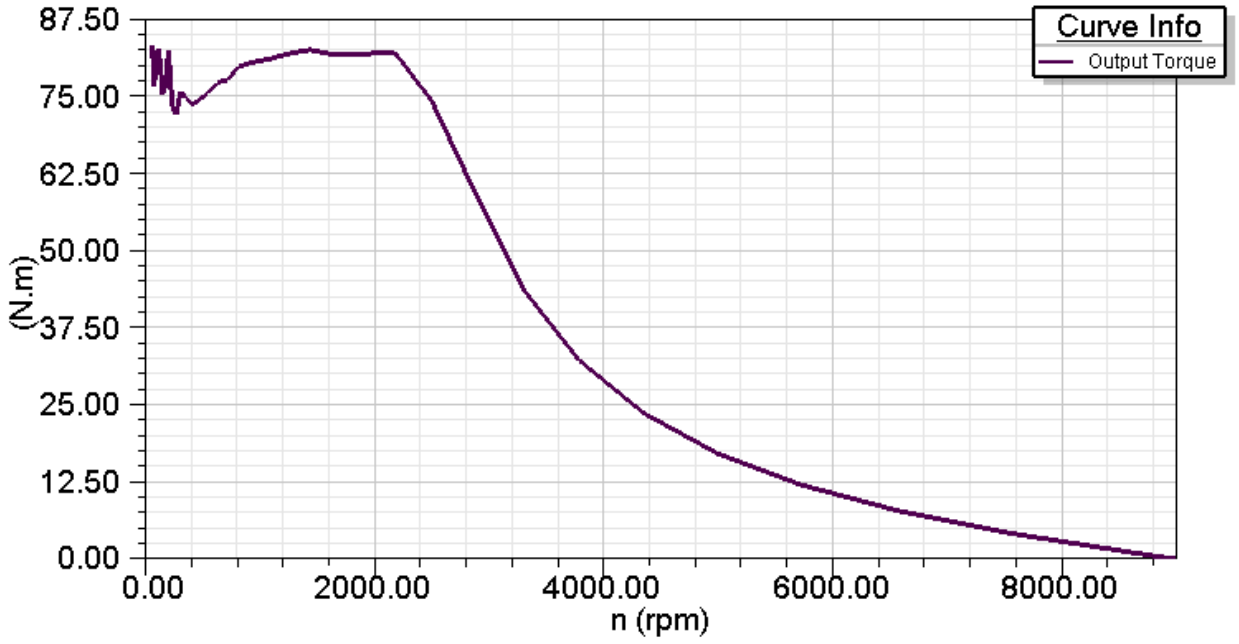


Příloha D – RMxpřt_CCC

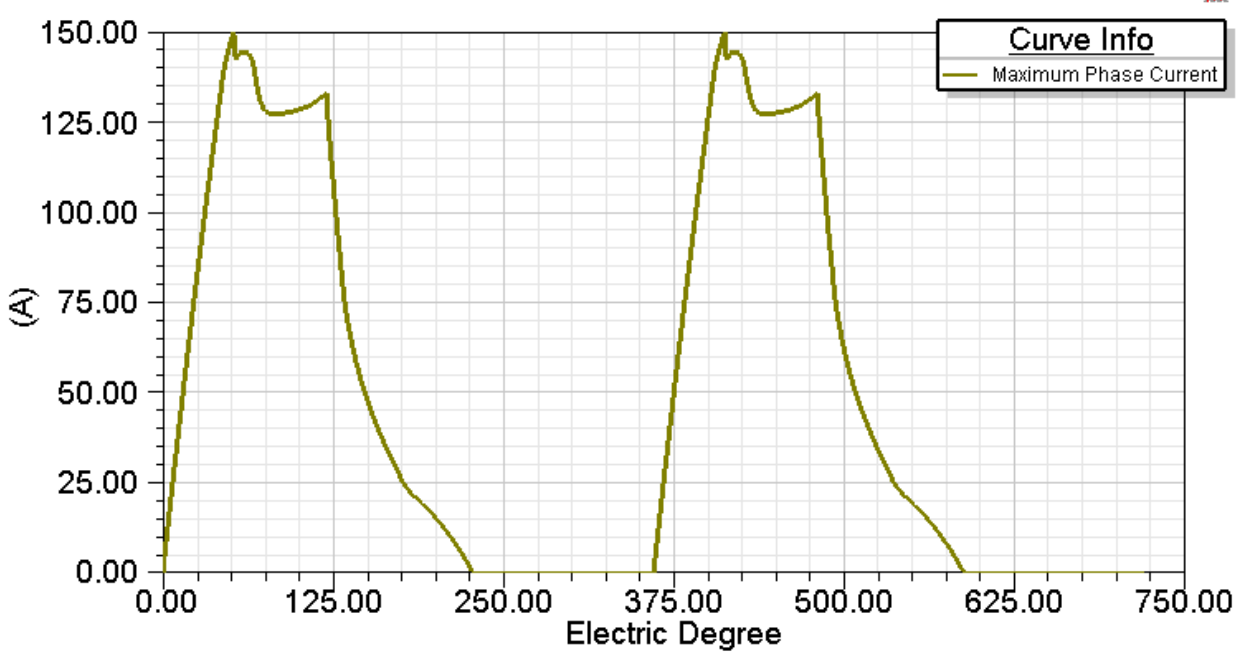


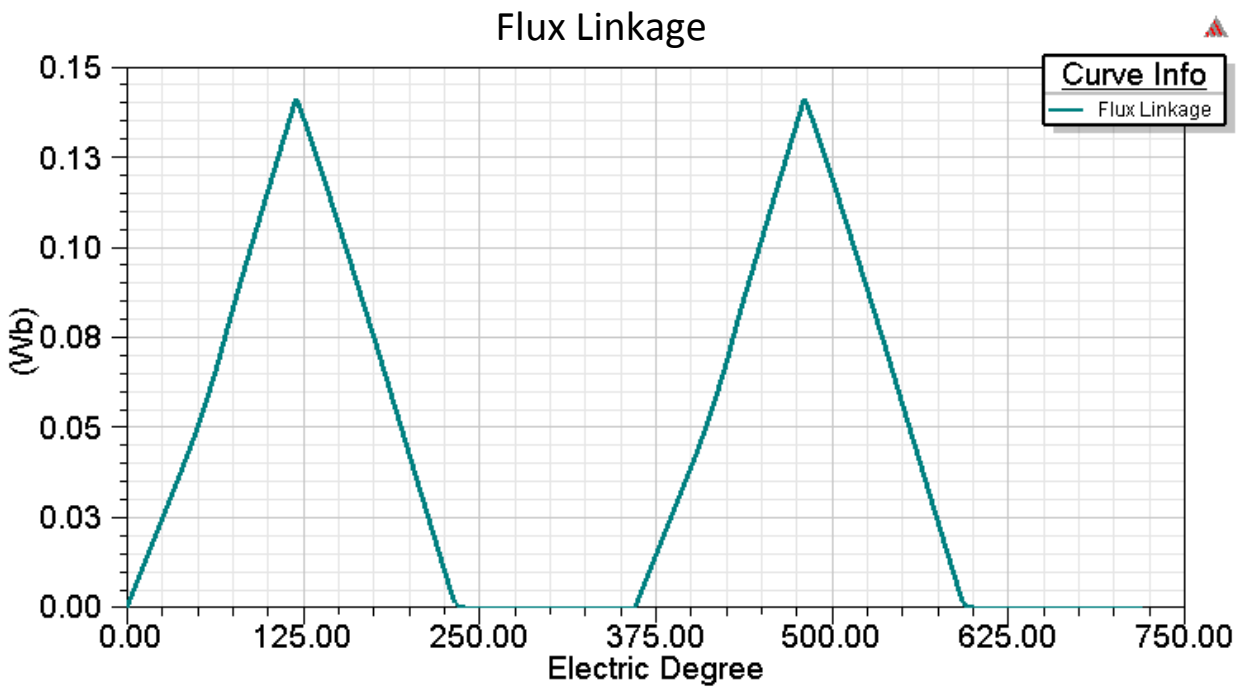
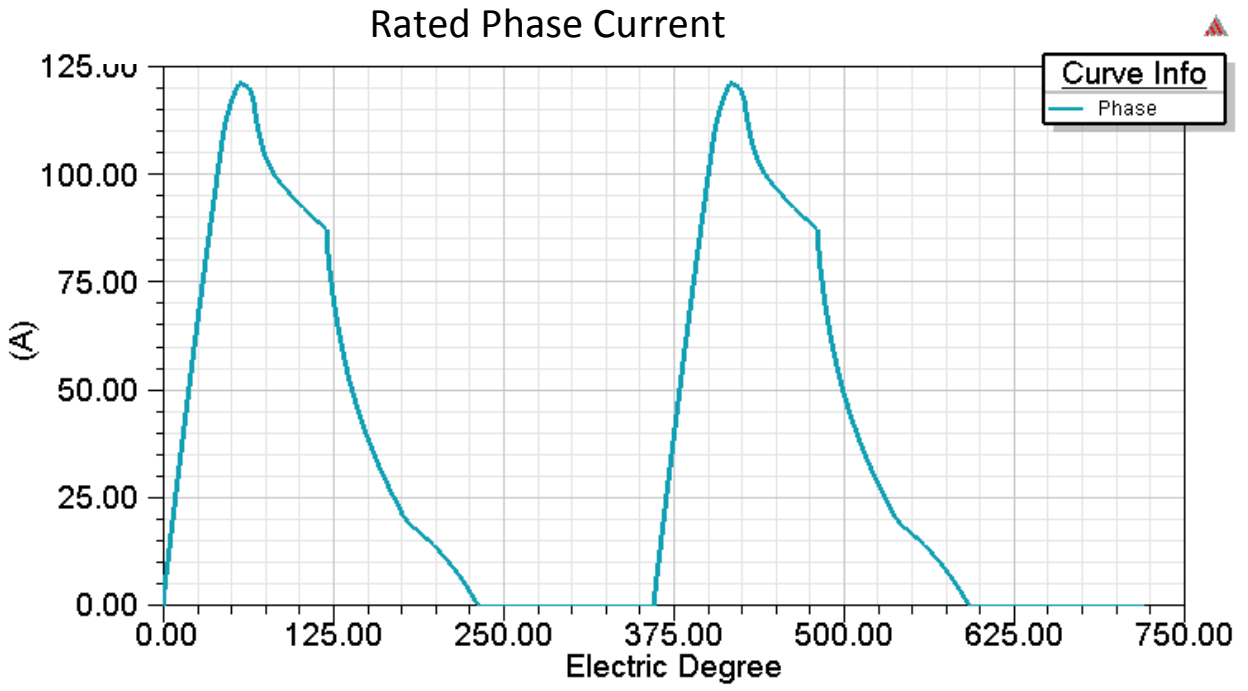


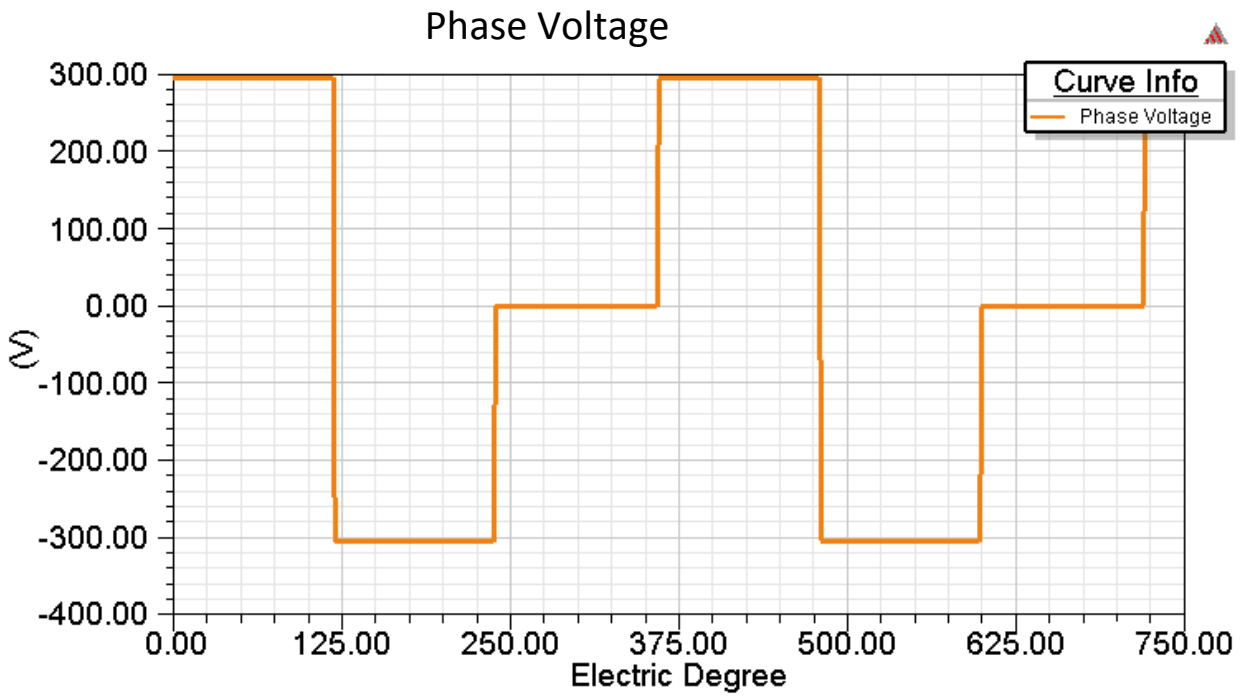
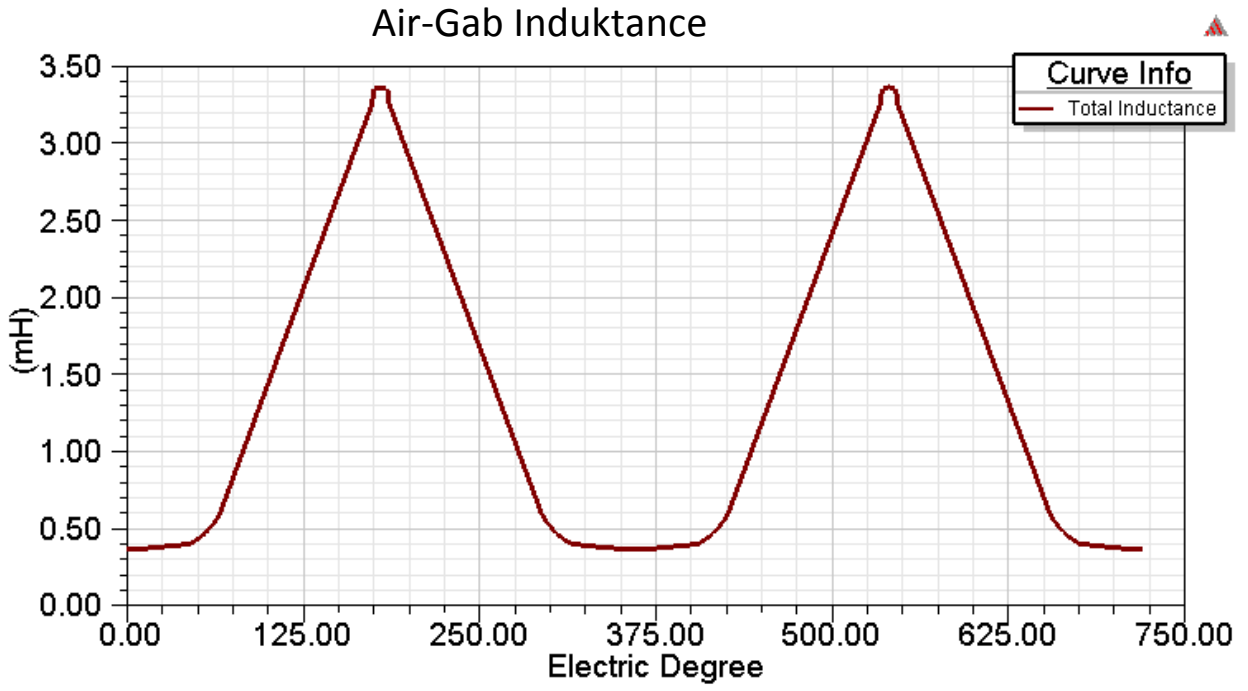
Output Torque vs Speed



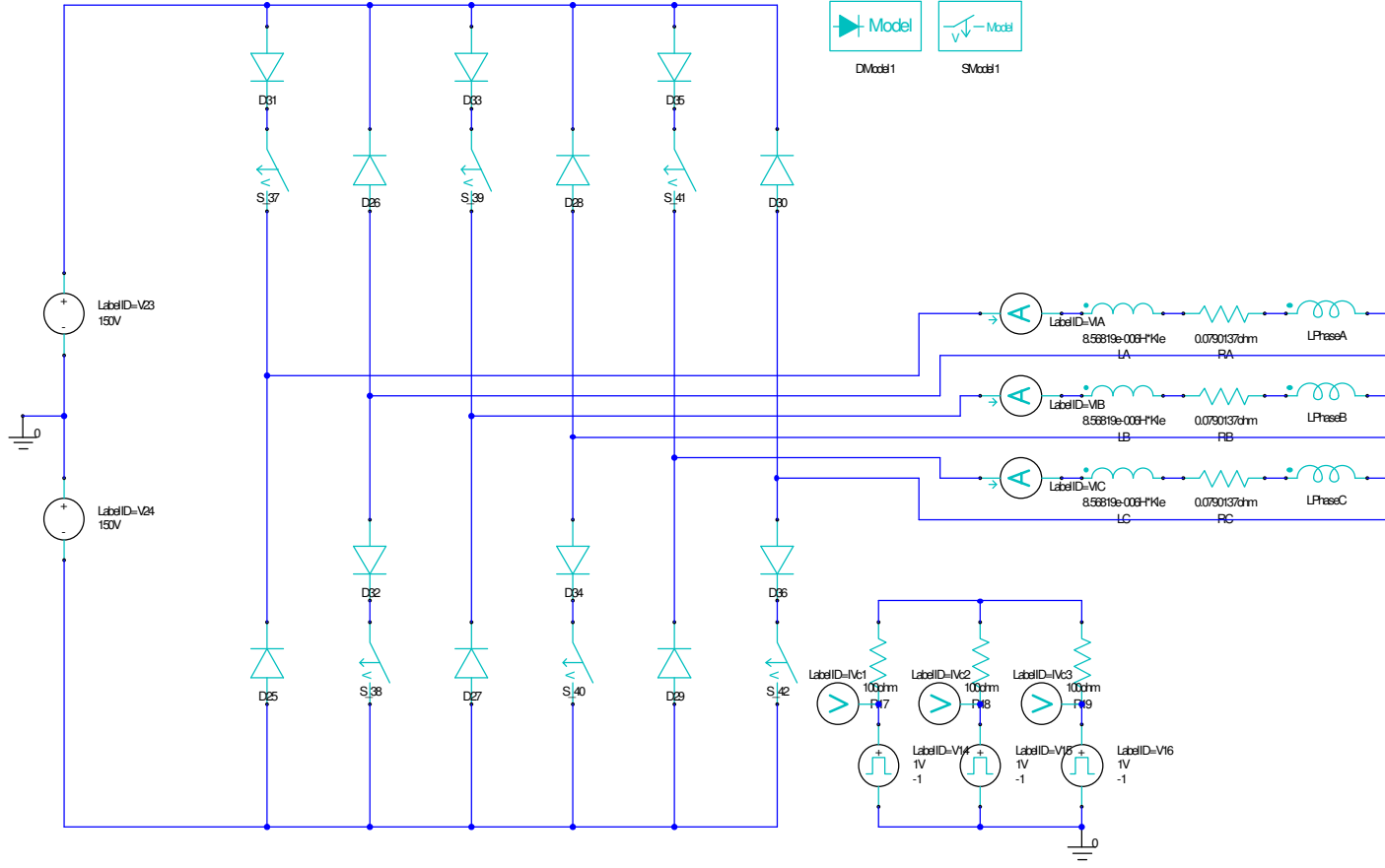
Maximum Phase Current



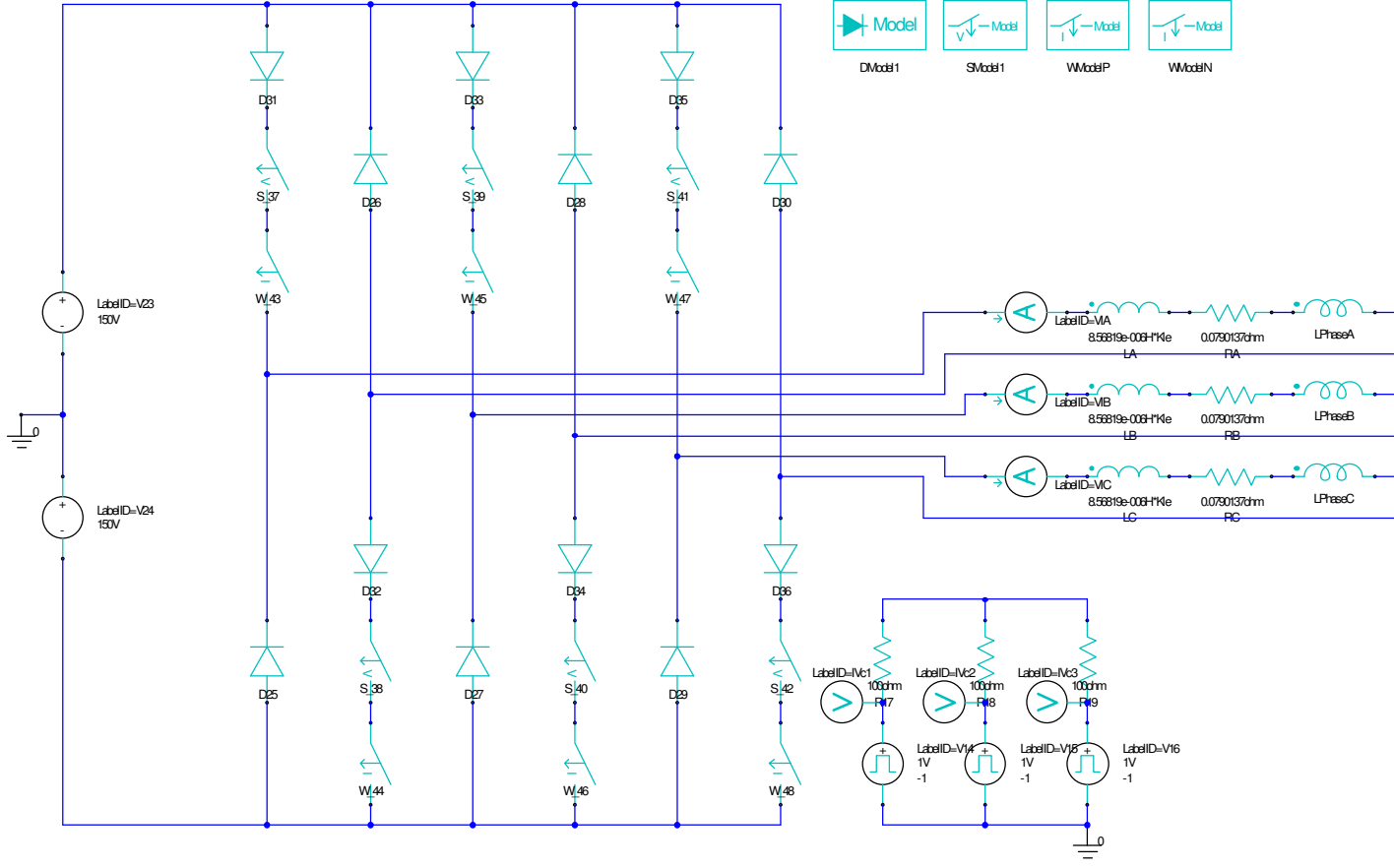




Příloha E – Napájecí obvod DC



Příloha F – Napájecí obvod CCC



Příloha G – Nastavení magnetostatické analýzy

General | Convergence | Expression Cache | Solver | Defaults

Name: Enabled

Adaptive Setup

Maximum Number of Passes:

Percent Error:

Parameters

Solve Fields Only

Solve Matrix: After last pass
 Only after converging

General | Convergence | Expression Cache | Solver | Defaults

Nonlinear Residual:

Příloha H – Nastavení transientní analýzy – DC rozběh

General | Save Fields | Advanced | Solver | Expression Cache | Defaults

Name: Enabled

Transient Setup

Adaptive Time Step

Stop time: s

Time step: s

General | Save Fields | Advanced | Solver | Expression Cache | Defaults

Nonlinear Residual:

Output error

Time Integration Method:

Fast Reach Steady State

Frequency of Added Voltage Source: GHz

Time Decomposition Method Option

General Transient

Periodic

Minimum Time Step: ms

Příloha I – Nastavení transientní analýzy CCC rozběh

General | Save Fields | Advanced | Solver | Expression Cache | Defaults

Name: Enabled

Transient Setup

Adaptive Time Step

Stop time: s

Time step: s

General | Save Fields | Advanced | Solver | Expression Cache | Defaults

Nonlinear Residual:

Output error

Time Integration Method:

Fast Reach Steady State

Frequency of Added Voltage Source: GHz

Time Decomposition Method Option

General Transient

Periodic

Minimum Time Step: s

Příloha J – Nastavení analýzy ustálený stav 3D model

General | Save Fields | Advanced | Solver | Expression Cache | Defaults

Name: Enabled

Transient Setup

Adaptive Time Step

Stop time: s

Time step: s

General | Save Fields | Advanced | Solver | Expression Cache | Defaults

Nonlinear Residual:

Output error

Time Integration Method:

Fast Reach Steady State

Frequency of Added Voltage Source: GHz

Time Decomposition Method Option

General Transient

Periodic

Minimum Time Step: s

Příloha K – Nastavení analýzy různé otáčky v ustáleném stavu

General | Save Fields | Advanced | Solver | Expression Cache | Defaults

Name: Enabled

Transient Setup

Adaptive Time Step

Stop time: s

Time step: s

General | Save Fields | Advanced | Solver | Expression Cache | Defaults

Nonlinear Residual:

Output error

Time Integration Method:

Fast Reach Steady State

Frequency of Added Voltage Source: GHz

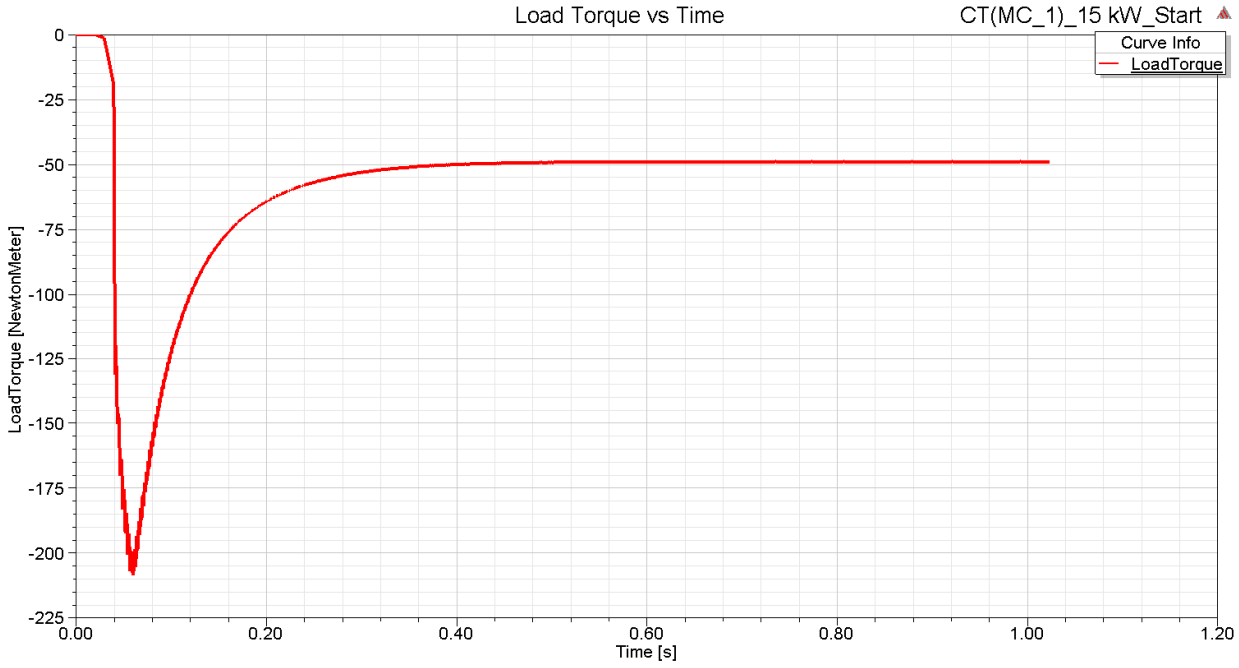
Time Decomposition Method Option

General Transient

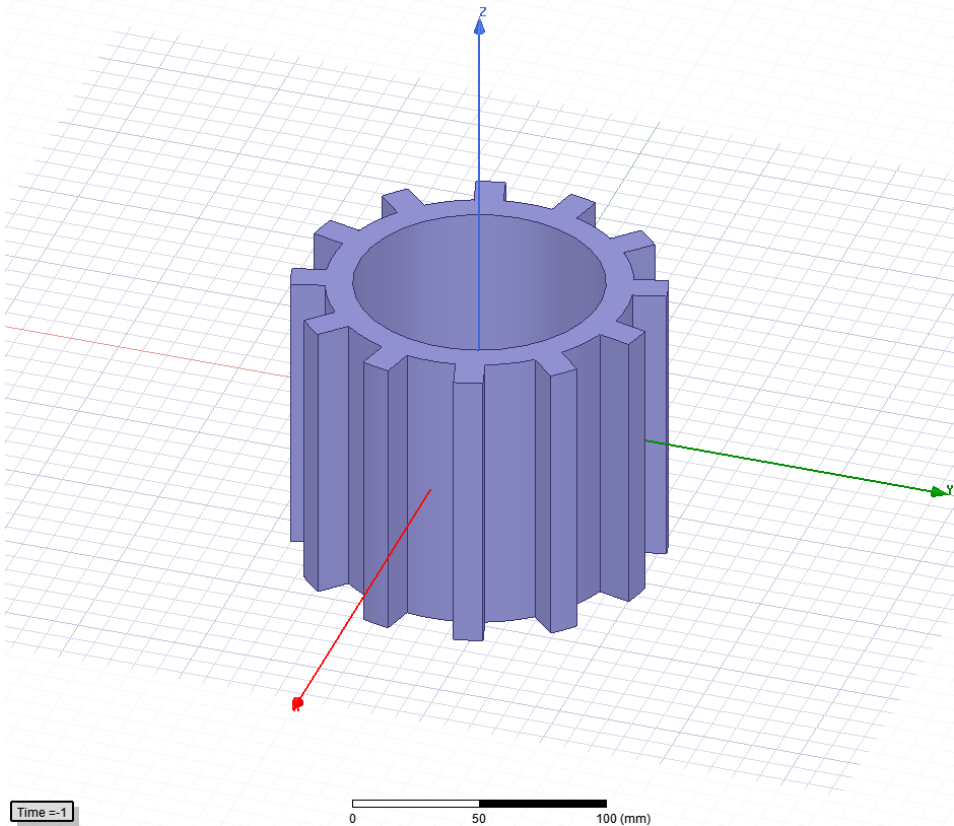
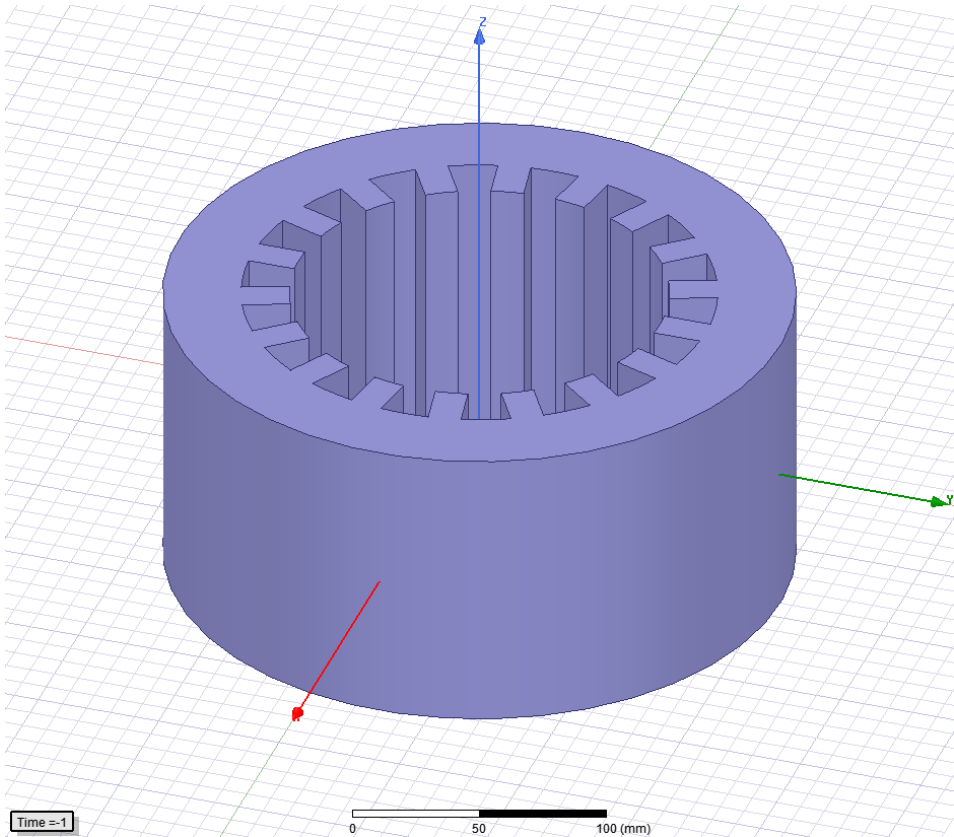
Periodic

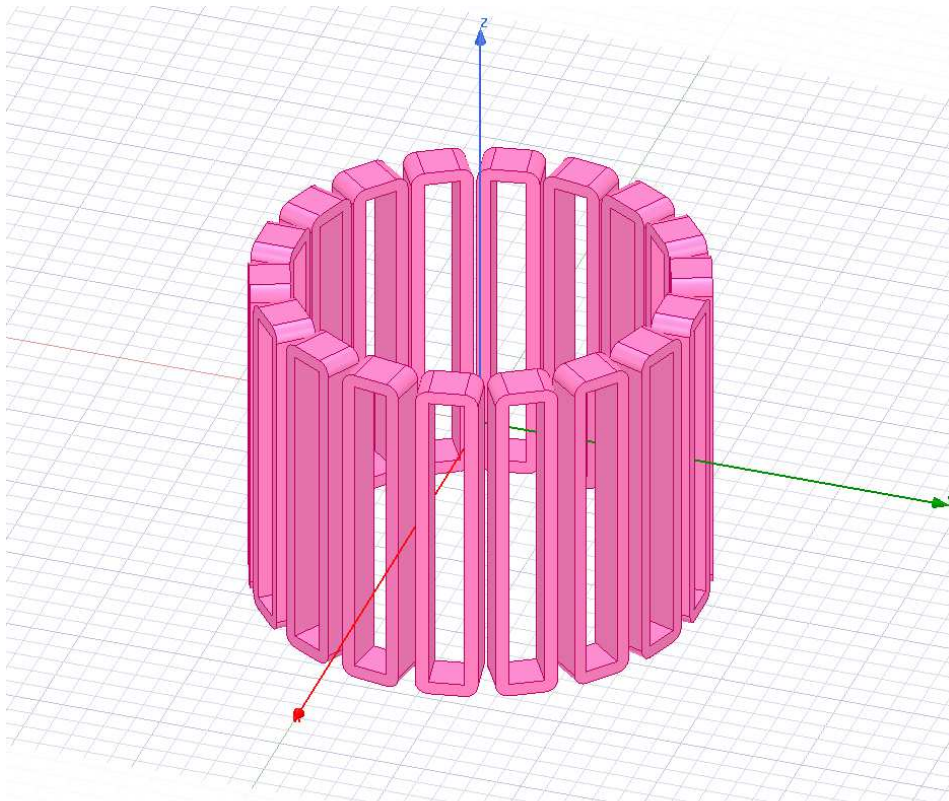
Minimum Time Step: s

Příloha L - Zátěžný moment při rozběhu



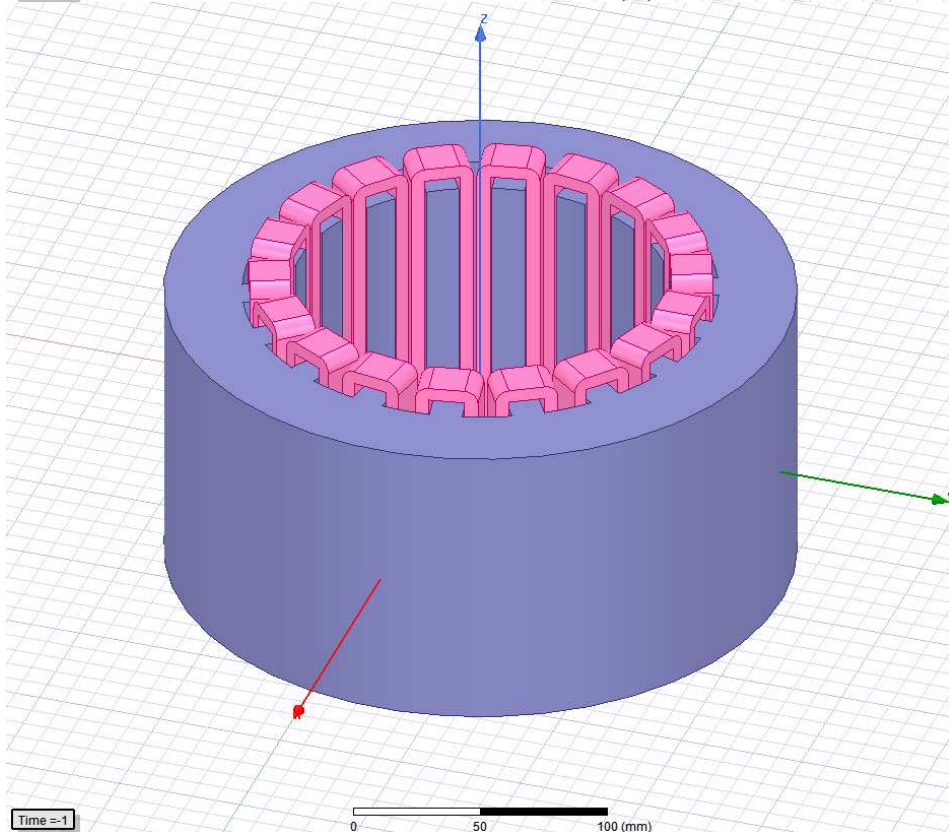
Příloha M - Plný model motoru ve 3D





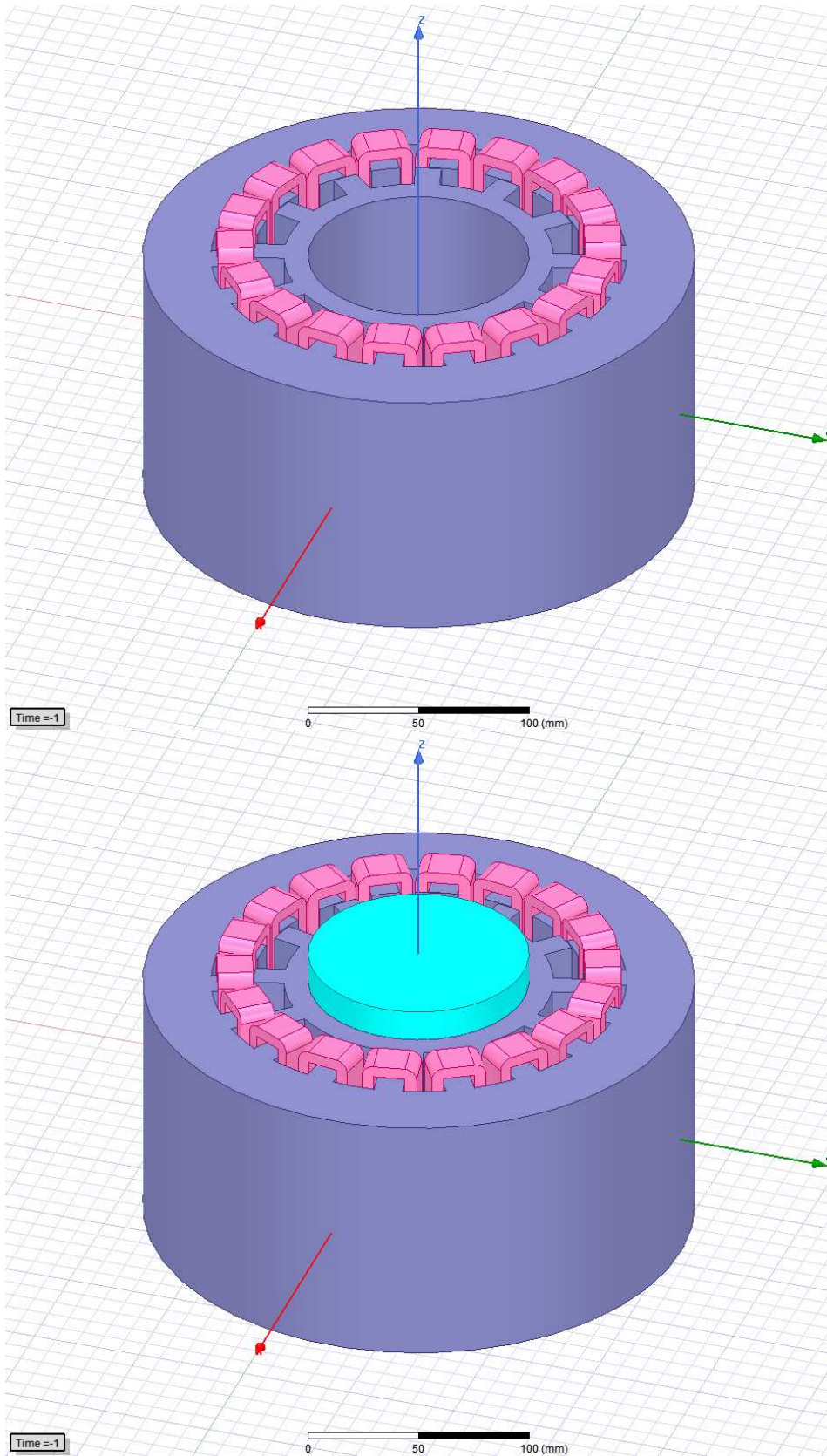
Time = -1

0 50 100 (mm)

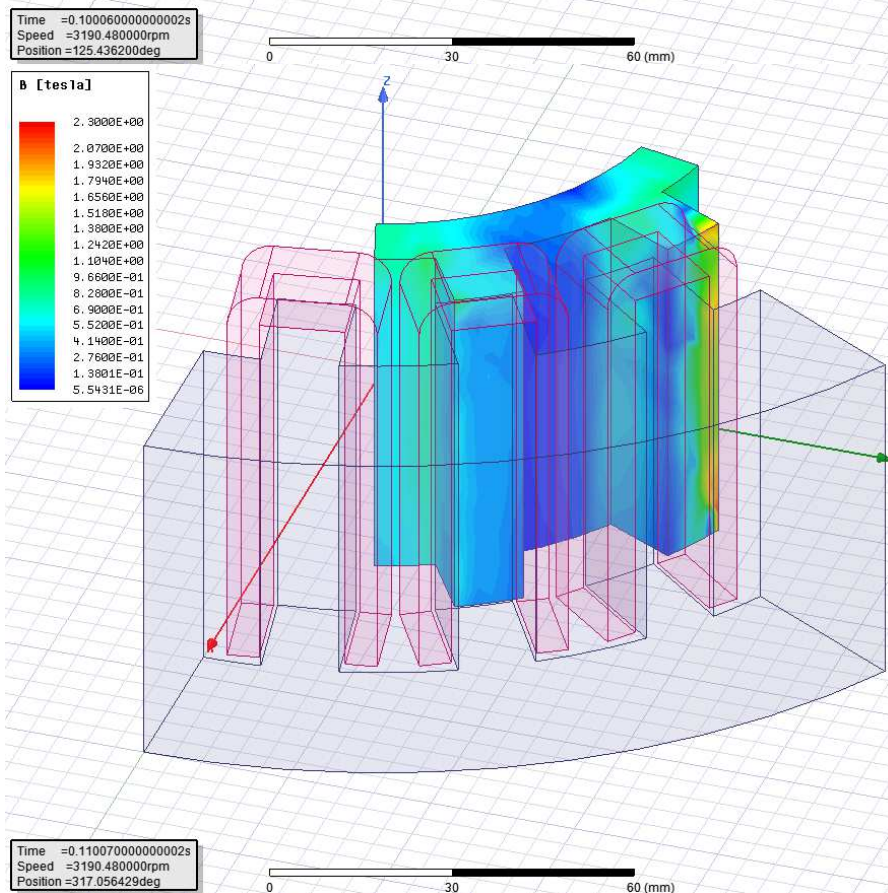
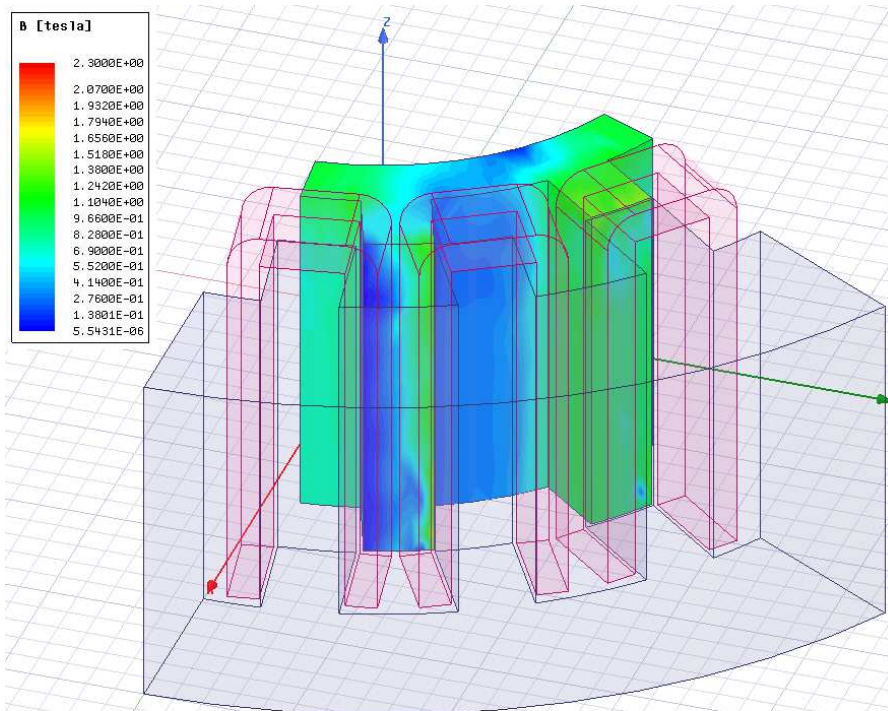


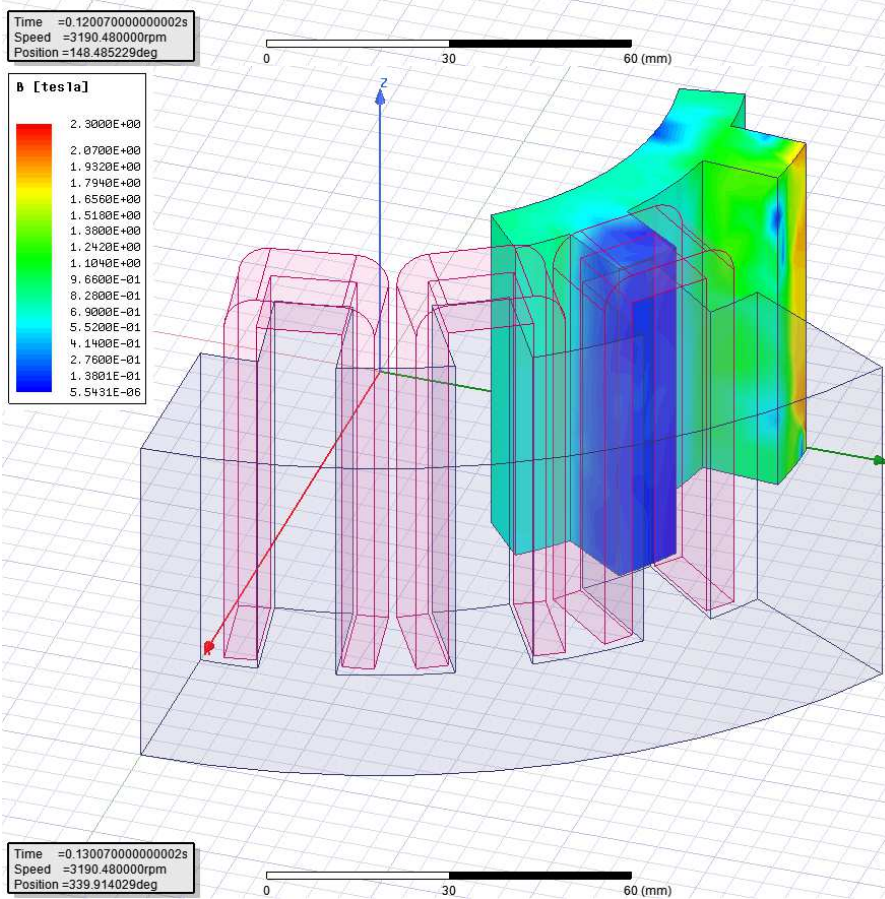
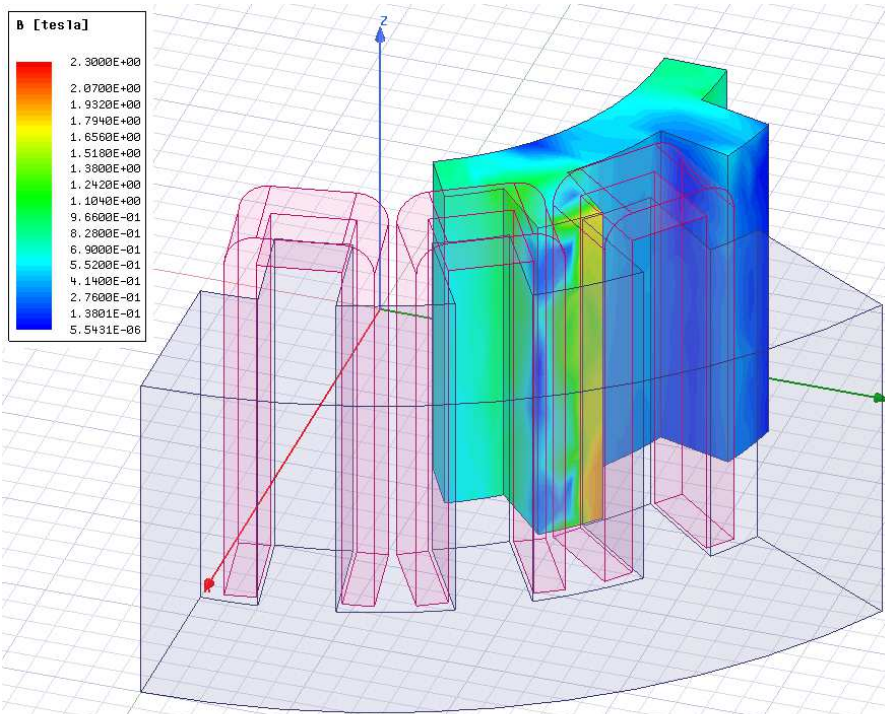
Time = -1

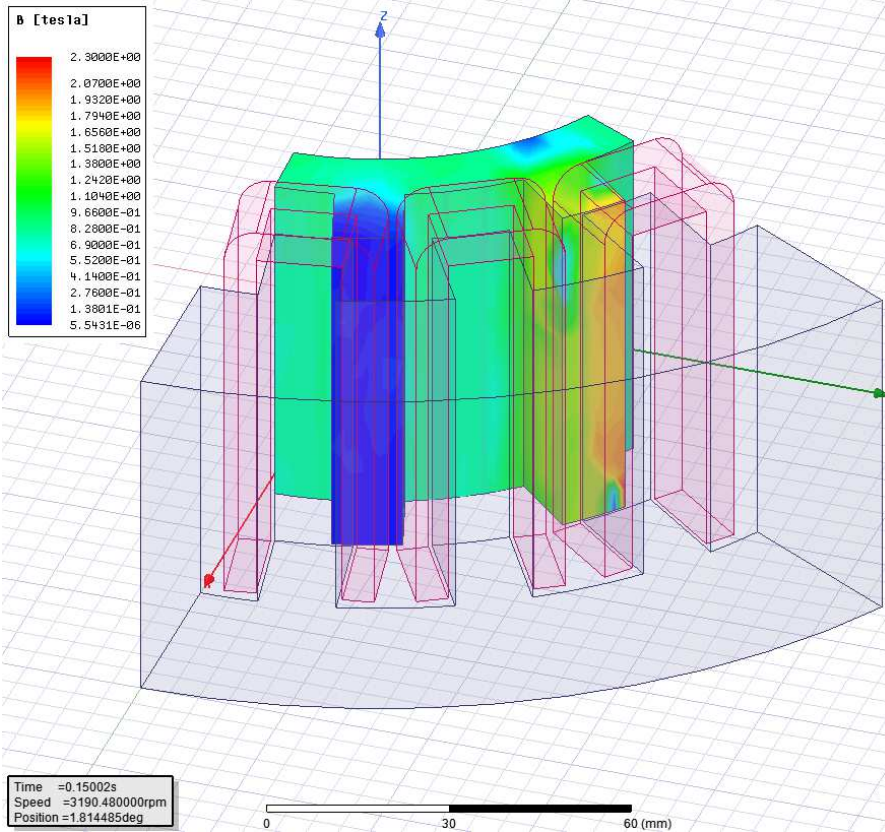
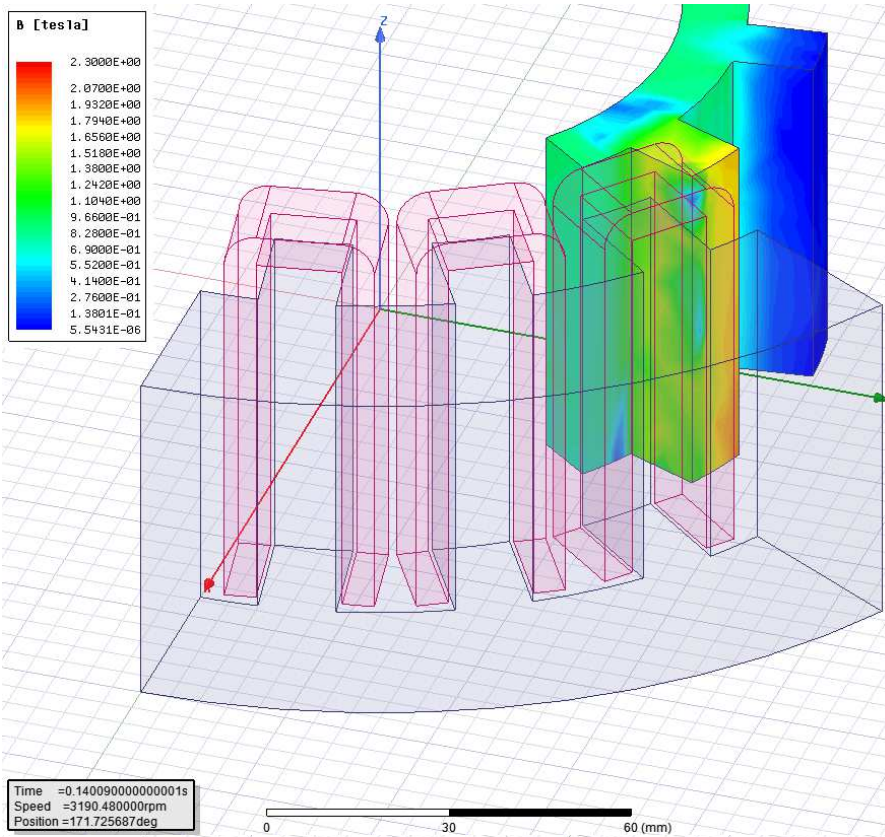
0 50 100 (mm)



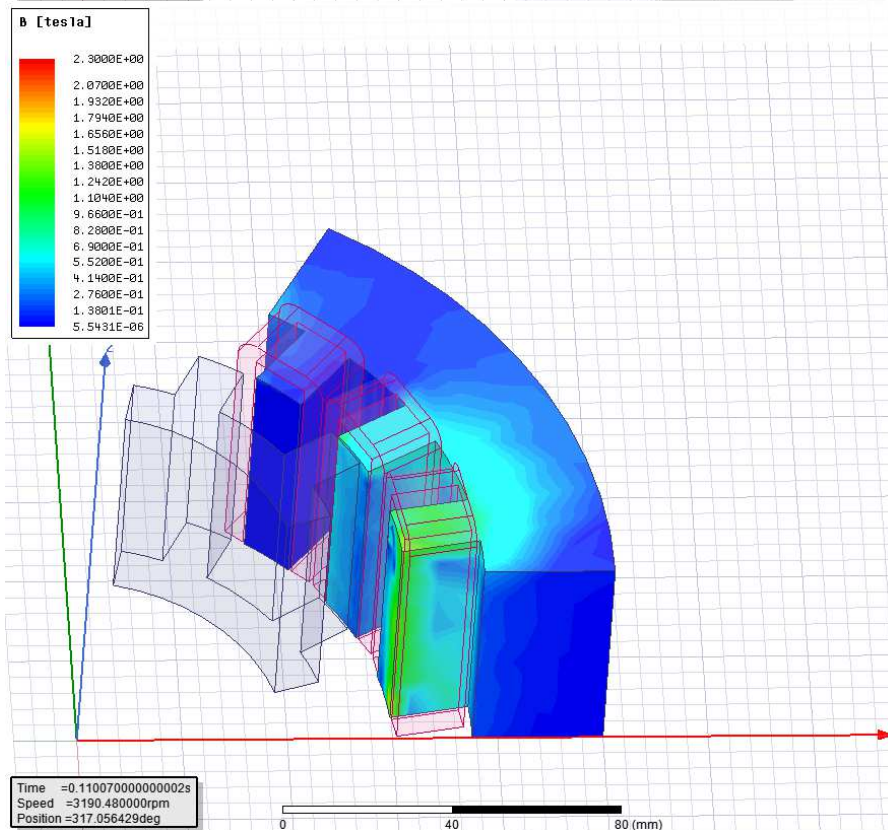
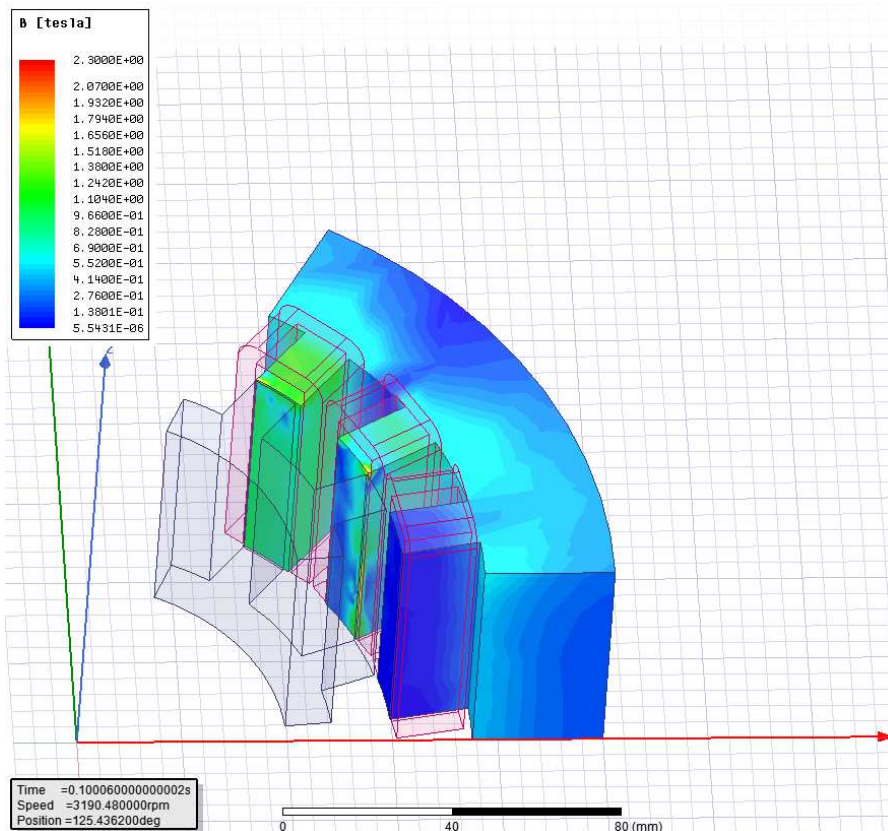
Příloha N – Magnetická indukce rotor 3D

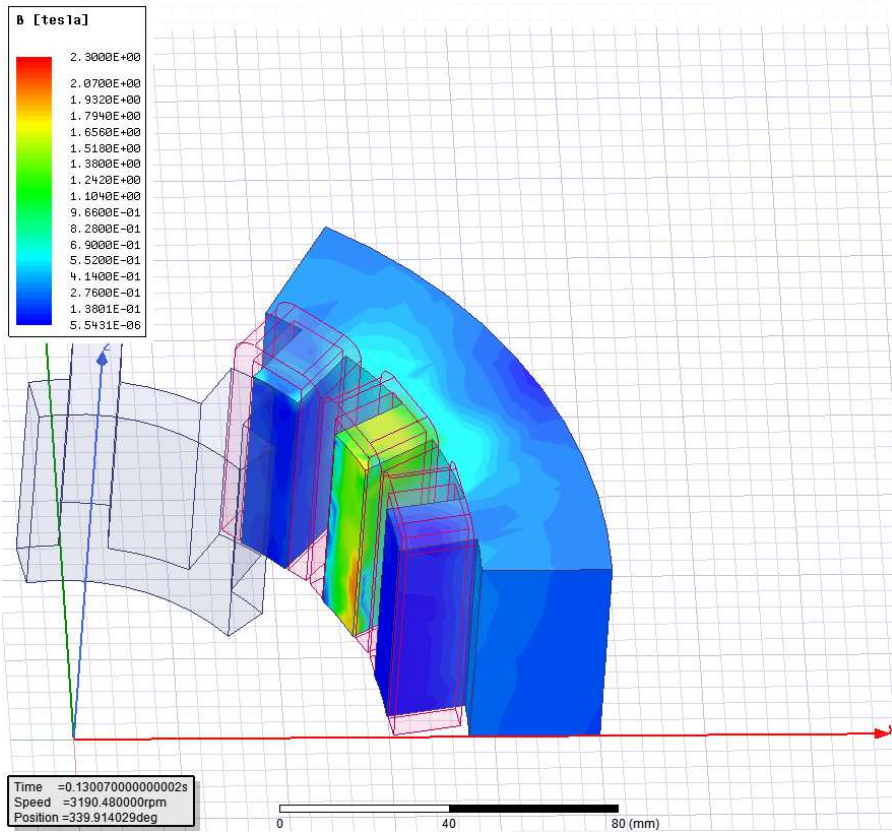
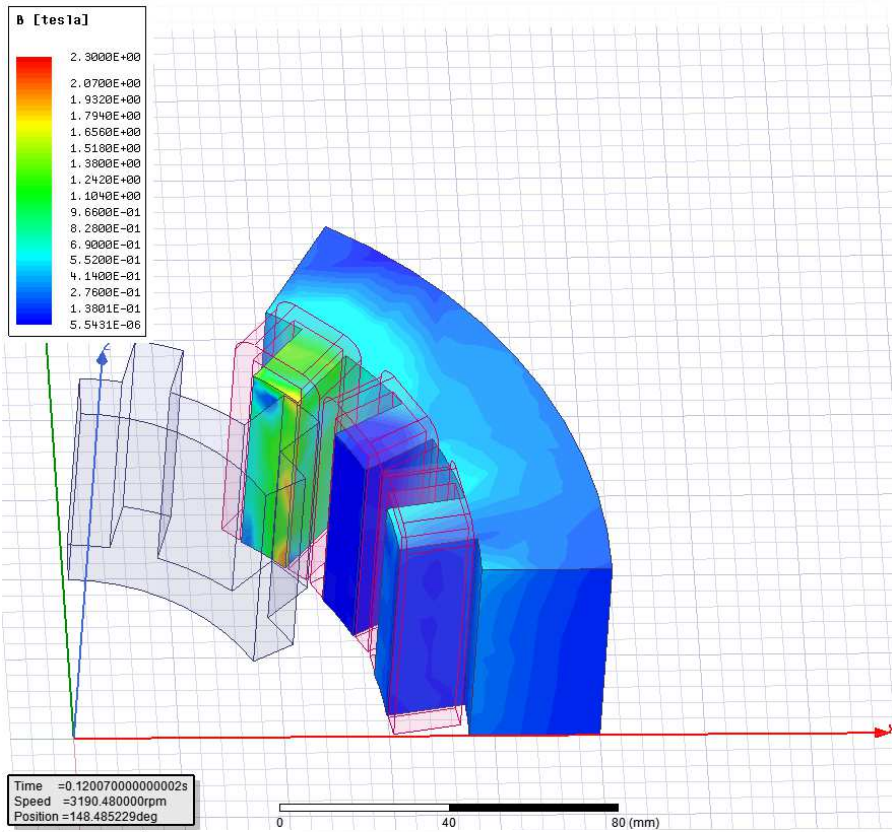


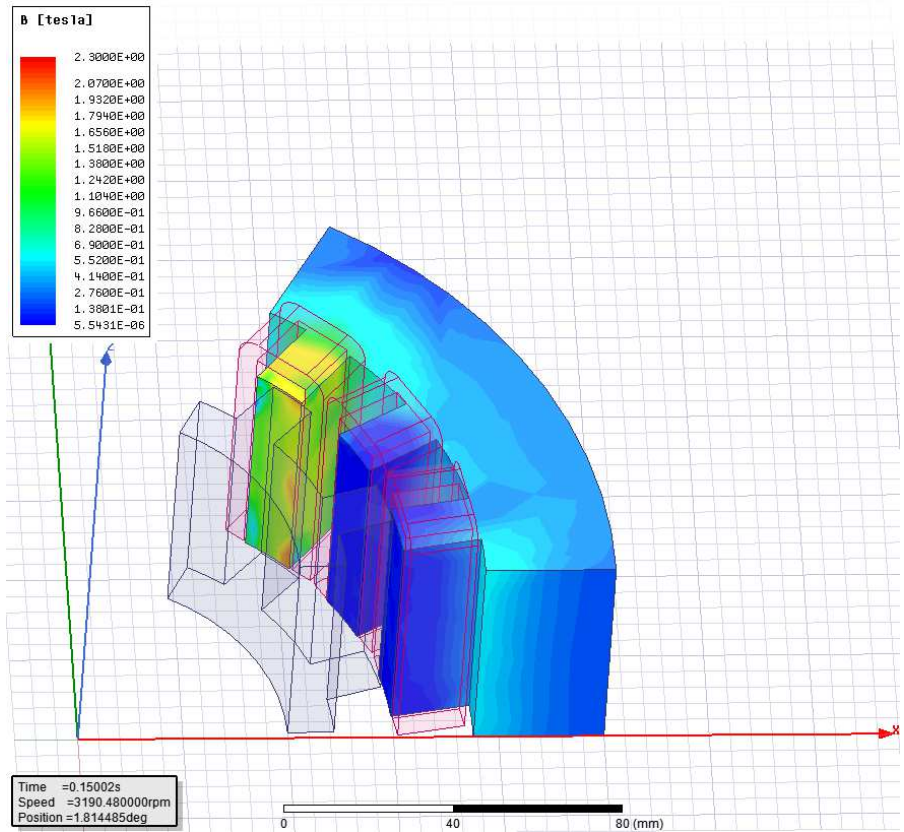
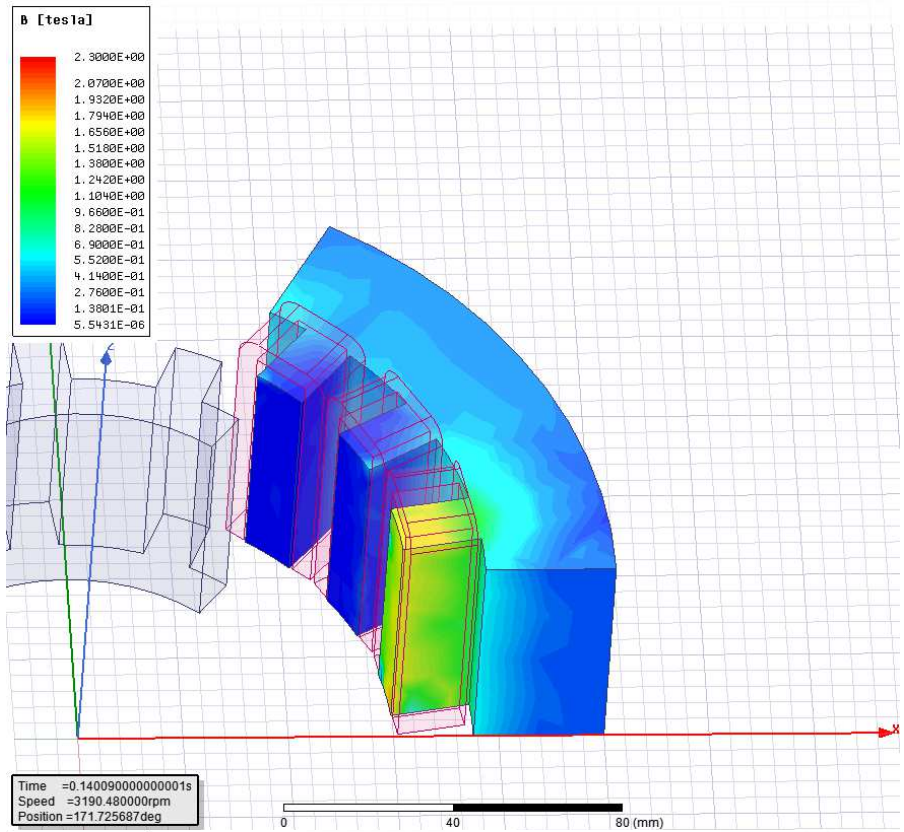




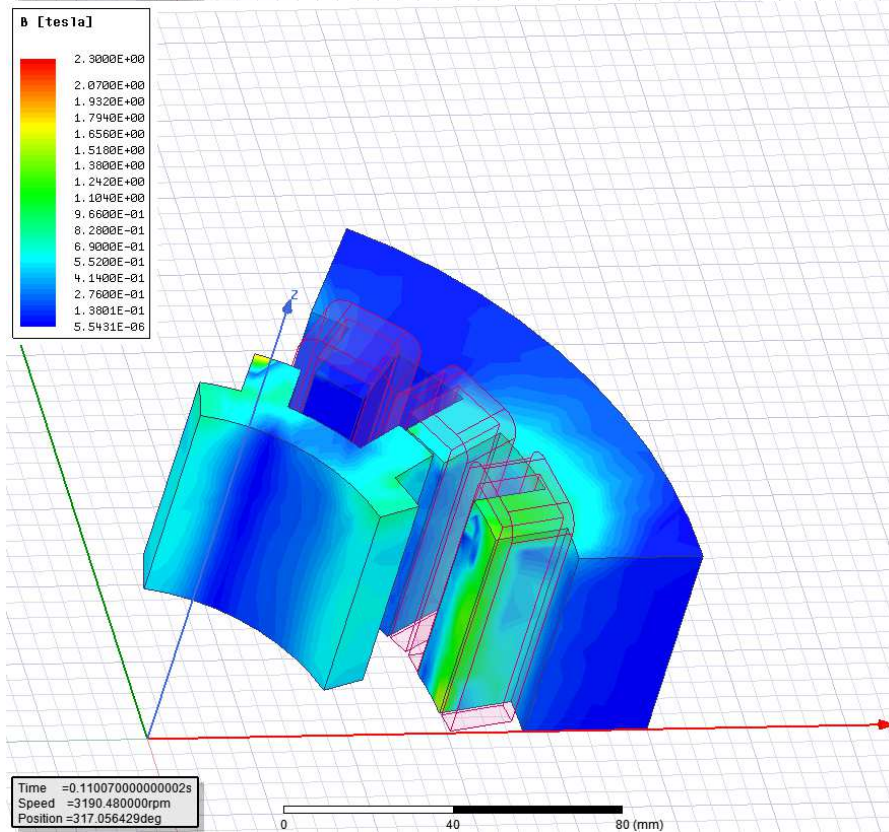
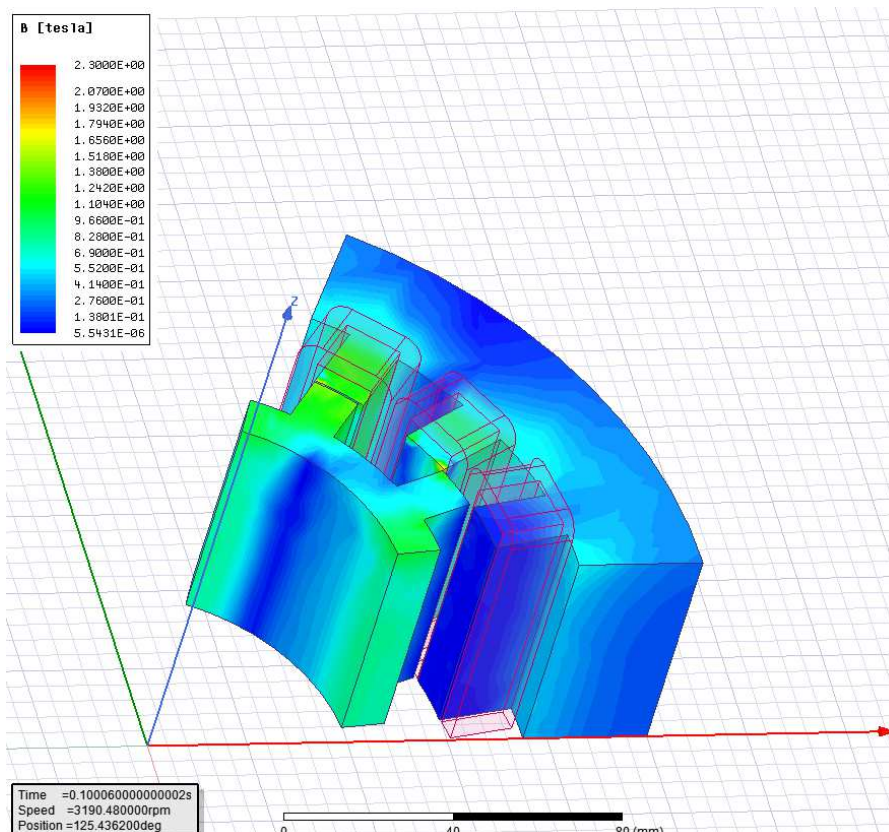
Příloha O - Magnetická indukce stator 3D

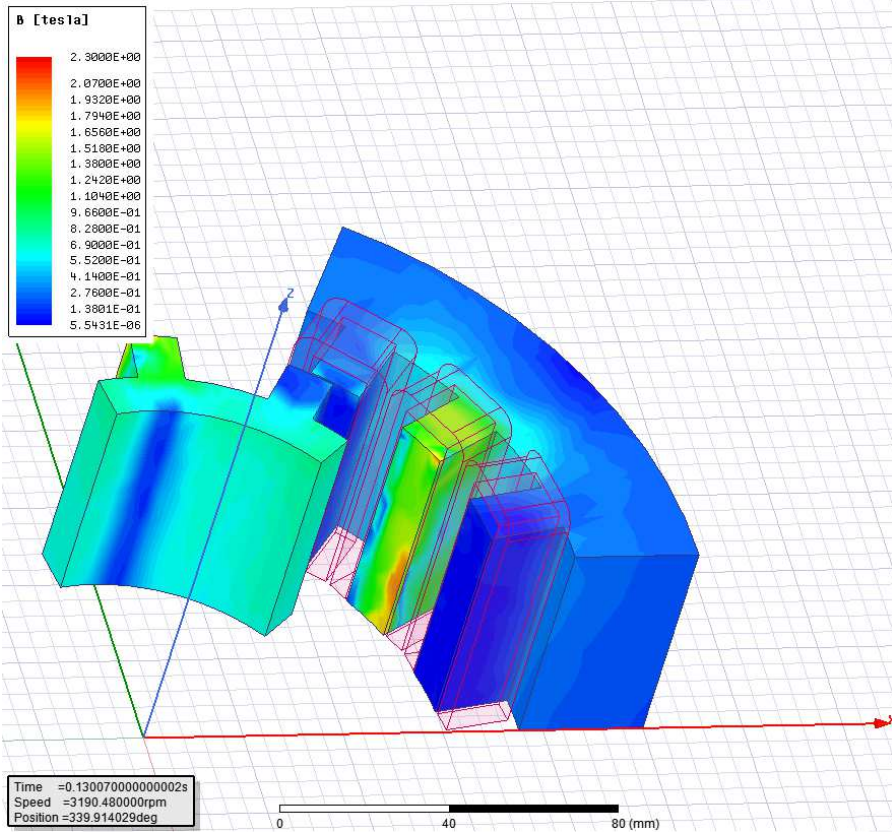
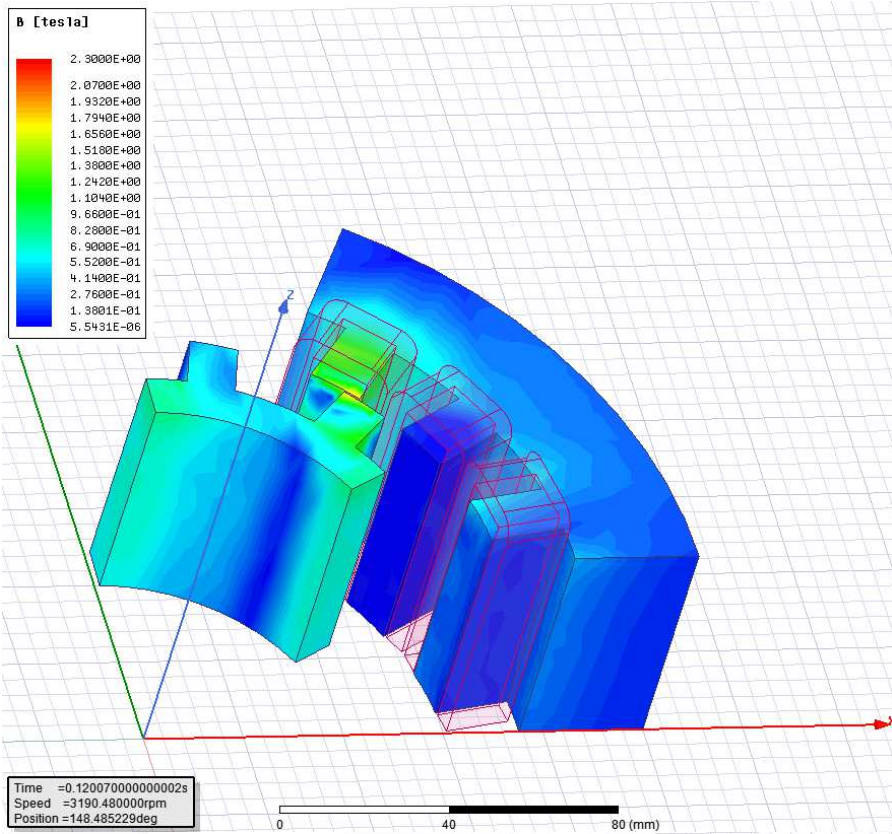


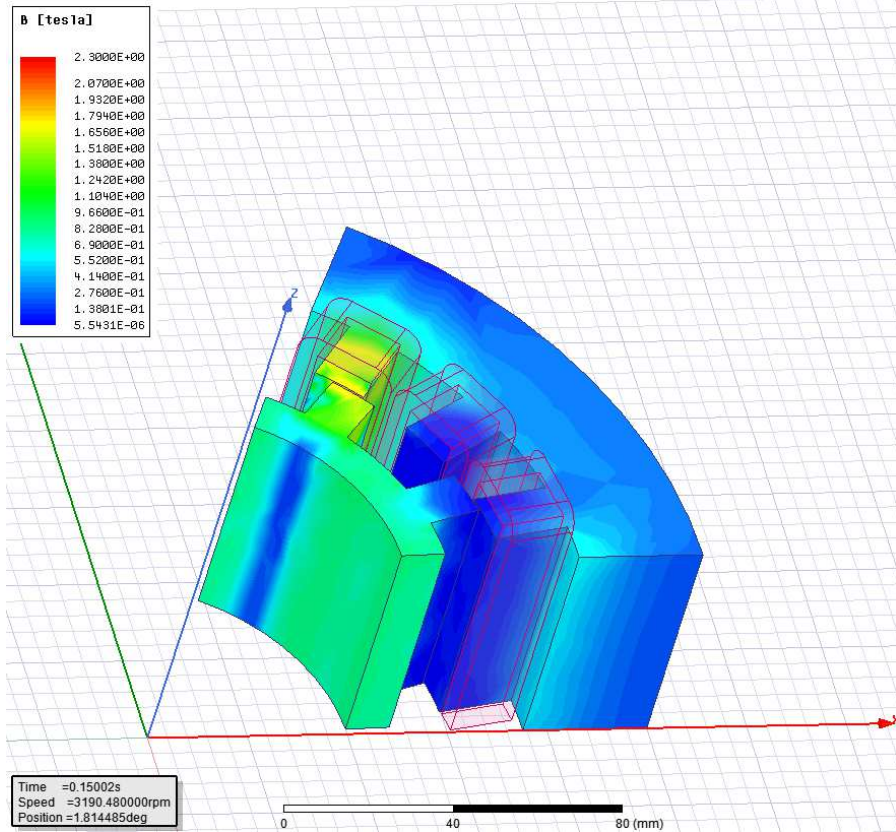
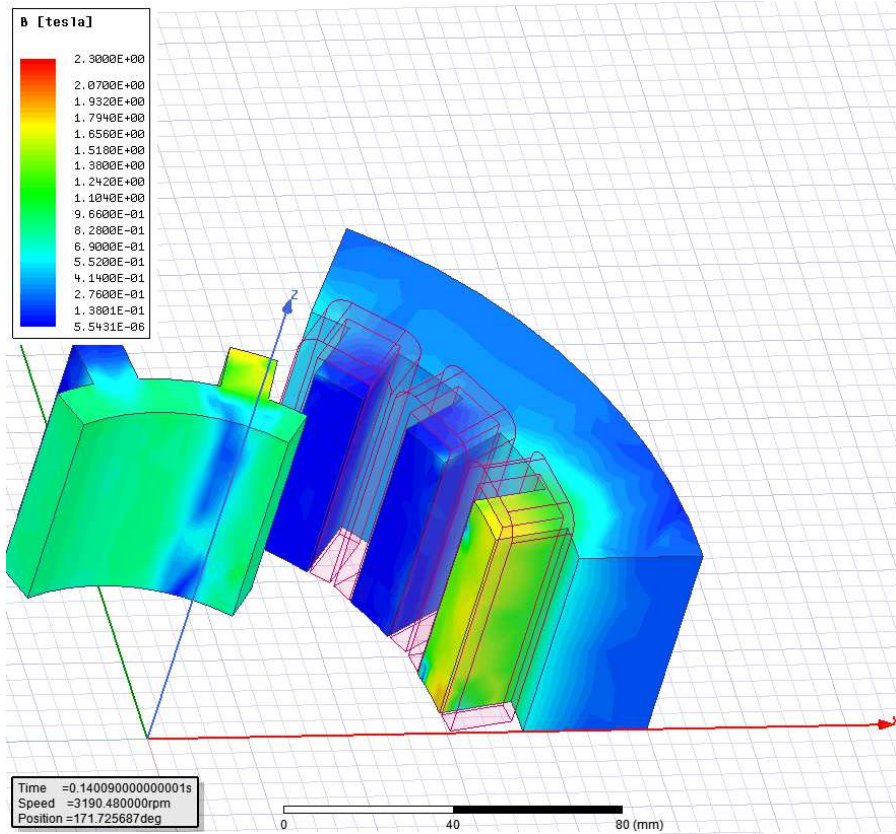




Příloha P - Magnetická indukce 3D model







Příloha Q – Magnetické indukce při různých otáčkách

