

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

Model elektrického vozidla v programu SIMULINK/SIMSCAPE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

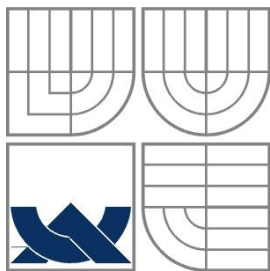
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

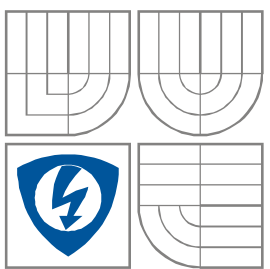
AUTHOR

Bc. Jan Kachlík

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

MODEL ELEKTRICKÉHO VOZIDLA V PROGRAMU SIMULINK/SIMSCAPE

MODEL OF ELECTIC VEHICLE IN SIMULINK/SIMSCAPE PROGRAM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Jan Kachlík

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Rostislav Huzlík



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Jan Kachlík **ID:** 78163
Ročník: 2 **Akademický rok:** 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Model elektrického vozidla v programu SIMULINK/SIMSCAPE

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte v programu SIMULINK/SIMSCAPE model elektrického vozidla.
2. Na základě pokynů vedoucího na tomto modelu proveďte vybrané simulace.
3. Provedené simulace vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 23.9.2010 **Termín odevzdání:** 19.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Rostislav Huzlík

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tématem diplomové práce je matematický model automobilu s elektrickým pohonem. Pohon se skládá z baterie článků Li-Ion, trojfázového střídače a synchronního motoru s permanentními magnety. Hlavním úkolem této práce je vytvoření funkčního modelu a provedení simulací v programu SIMULINK/SIMSCAPE. Práce je rozdělena do třech hlavních částí. První část je věnována teoretickému popisu hlavních částí pohonu. Druhá část popisuje jednotlivé podsystémy modelu. V poslední části práce je sestaven kompletní model elektromobilu a provedeny simulace různých režimů jízdy.

Abstract

The topic of this diploma thesis is mathematical model of electric vehicle. The traction drive consists of Li-Ion battery, free-phase DC/AC converter and permanent magnet synchronous machine. The main goal of the thesis is development of function model and making simulations in SIMULINK/SIMSCAPE program. Work is divided into three main parts. The first part is dedicated to the theoretical description of the main drive components. The second part describes partial subsystems of the model. In the last part is build a complete model of electric vehicle and simulated different driving mode.

Klíčová slova

elektromobil; synchronní motor s permanentními magnety; DC/AC měnič; Matlab; Simulink; Simscape

Keywords

electric vehicle; permanent magnet synchronous machine; DC/AC converter; Matlab; Simulink; Simscape

Bibliografická citace

KACHLÍK, J. *Model elektrického vozidla v programu SIMULINK/SIMSCAPE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 60s. Vedoucí diplomové práce Ing. Rostislav Huzlík.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Model elektrického vozidla v programu SIMULINK/SIMSCAPE jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

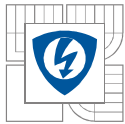
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Rostislavu Huzlíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

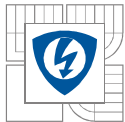
V Brně dne

Podpis autora

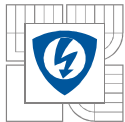


Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
ÚVOD	14
1 STRUKTURA POHONU ELEKTRICKÉHO VOZIDLA.....	15
1.1 VÝHODY POUŽITÍ ELEKTRICKÉHO POHONU	16
1.2 AKUMULÁTORY VHODNÉ PRO TRAKČNÍ POHON.....	17
1.3 PULSNÍ MĚNIČE DC/DC, DC/AC	18
1.3.1 PRACOVNÍ KVADRANTY PULSNÍHO MĚNIČE	18
1.4 VOLBA VHODNÉHO ELEKTROMOTORU.....	20
1.5 SOFTWAREVÉ PROSTŘEDÍ SIMULINK/SIMSCAPE.....	21
1.6 SYNCHRONNÍ MOTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY	22
1.7 TRANSFORMACE STATOROVÝCH VELIČIN	23
1.7.1 PARKOVA TRANSFORMACE TŘÍFÁZOVÉHO NAPĚTÍ.....	23
1.7.2 TRANSFORMACE PROSTOROVÉHO VEKTORU ZE STATOROVÉHO SYSTÉMU S (A,B) DO OBEČNÉHO K (U,V).....	24
1.7.3 MATEMATICKÝ MODEL PMSM	25
1.7.4 TRANSFORMACE NAPĚŤOVÝCH ROVNIC DO D-Q SOUŘADNIC	28
2 JEDNOTLIVÉ ČÁSTI POHONU V SIMULINK/SIMSCAPE.....	30
2.1 LI-ION BATERIE	30
2.1.1 MODEL LI-ION BATERIE	30
2.2 MODEL TROJFÁZOVÉHO STRÍDAČE	33
2.2.1 PWM ŘÍZENÍ FREKVENČNÍHO MĚNIČE.....	33
2.2.2 MĚNIČ V REŽIMU TROJFÁZOVÝ STRÍDAČ.....	34
2.2.3 MĚNIČ V REŽIMU AKTIVNÍ USMĚRŇOVAČ	35
2.3 MODEL SYNCHRONNÍHO MOTORU S PERMANENTNÍMI MAGNETY	36
2.3.1 NÁVRH REGULÁTORŮ PROUDU	38
2.4 MECHANIKA ELEKTROPOHONU	39
2.4.1 VLIV ZEMSKÉ PŘITAŽLIVOSTI	40
2.4.2 VLIV ODPORU VZDUCHU	40
2.4.3 VLIV VALIVÉHO ODPORU PNEUMATIK	40
2.4.4 PŘEPOČET ZATĚŽOVACÍCH SIL A SETRVAČNOSTI NA HRÍDEL MOTORU.	40
3 MODEL ELEKTRICKÉHO VOZIDLA	42
3.1 AKCELERACE VOZIDLA Z 0-90KM/H ZA RŮZNÝCH PODMÍNEK	42
3.2 REKUPERAČNÍ BRZDĚNÍ VOZIDLA	47
3.3 JÍZDA KONSTANTNÍ RYCHLOSTÍ.....	50
3.4 SROVNÁNÍ VÝSLEDKU S MODELEM PMSM V D-Q SOUŘADNICÍCH.....	53
4 ZÁVĚR.....	54

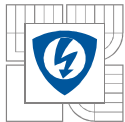


LITERATURA	55
SEZNAM PŘÍLOH.....	56
PŘÍLOHA A: MODEL PMSM V D-Q OSÁCH	57
PŘÍLOHA B: MODEL LI-ION BATERIE	58
PŘÍLOHA C: MODEL BUDIČE VÝKONOVÝCH PRVKŮ.....	58
PŘÍLOHA D: KOMPLETNÍ PARAMETRY MODELU	59



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>obr. 1.1</i>	<i>Obecné schéma elektrického pohonu.....</i>	<i>15</i>
<i>obr. 1.2</i>	<i>Pracovní kvadranty pulsního měniče.....</i>	<i>19</i>
<i>obr. 1.3</i>	<i>Snižující měnič.....</i>	<i>19</i>
<i>obr. 1.4</i>	<i>Zvyšující měnič.....</i>	<i>19</i>
<i>obr. 1.5</i>	<i>Čtyřkvadrantový pulsní měnič.....</i>	<i>20</i>
<i>obr. 1.6</i>	<i>Trojfázový střídač.....</i>	<i>20</i>
<i>obr. 1.7</i>	<i>Momentové charakteristiky elektrických motorů.....</i>	<i>20</i>
<i>obr. 1.8</i>	<i>Dvoupólový trojfázový synchronní motor s PM.....</i>	<i>25</i>
<i>obr. 2.1</i>	<i>Model baterie v Simscape.....</i>	<i>31</i>
<i>obr. 2.2</i>	<i>Vybíjecí charakteristika Li-ion článku.....</i>	<i>32</i>
<i>obr. 2.3</i>	<i>Odezva na proudový impuls.....</i>	<i>32</i>
<i>obr. 2.4</i>	<i>Schéma střídače v Simscape.....</i>	<i>33</i>
<i>obr. 2.5</i>	<i>Průběh napětí a proudu na jedné fázi zátěže.....</i>	<i>34</i>
<i>obr. 2.6</i>	<i>Proud odebíraný z ss strany střídače.....</i>	<i>35</i>
<i>obr. 2.7</i>	<i>Průběh napětí a proudu na jedné fázi zátěže.....</i>	<i>35</i>
<i>obr. 2.8</i>	<i>Proud dodávaný na ss stranu střídače.....</i>	<i>36</i>
<i>obr. 2.9</i>	<i>Náhradní obvod PMSM v ose d.....</i>	<i>36</i>
<i>obr. 2.10</i>	<i>Náhradní obvod PMSM v ose q.....</i>	<i>37</i>
<i>obr. 2.11</i>	<i>Průběh vlastních a vzájemných indukčností v závislosti na úhlu natočení.....</i>	<i>37</i>
<i>obr. 2.12</i>	<i>Model zátěže představující PMSM.....</i>	<i>38</i>
<i>obr. 2.13</i>	<i>Schéma regulační smyčky proudu.....</i>	<i>39</i>
<i>obr. 2.14</i>	<i>Závislost zátěžného momentu na úhlové rychlosti při různých sklonech vozovky.....</i>	<i>41</i>
<i>obr. 3.1</i>	<i>Celkový model elektromobilu.....</i>	<i>42</i>
<i>obr. 3.2</i>	<i>Průběh proudů i_d a i_q ($I_{qmax}=150A$).....</i>	<i>42</i>
<i>obr. 3.3</i>	<i>Napětí a proud na vinutí první fáze ($I_{qmax}=150A$).....</i>	<i>43</i>
<i>obr. 3.4</i>	<i>Průběh indukovaného napětí a proudu ($I_{qmax}=150A$).....</i>	<i>43</i>
<i>obr. 3.5</i>	<i>Vybrané veličiny baterie a moment motoru ($I_{qmax}=150A$).....</i>	<i>43</i>
<i>obr. 3.6</i>	<i>Průběh proudů i_d a i_q ($I_{qmax}=200A$).....</i>	<i>44</i>
<i>obr. 3.7</i>	<i>Napětí a proud na vinutí první fáze ($I_{qmax}=200A$).....</i>	<i>44</i>
<i>obr. 3.8</i>	<i>Vybrané veličiny baterie a moment motoru ($I_{qmax}=200A$).....</i>	<i>44</i>
<i>obr. 3.9</i>	<i>Průběh proudů i_d a i_q ($I_{qmax}=200A$, stoupání 5%).....</i>	<i>45</i>
<i>obr. 3.10</i>	<i>Napětí a proud na vinutí první fáze ($I_{qmax}=200A$, stoupání 5%).....</i>	<i>45</i>

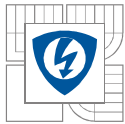


<i>obr. 3.11 Vybrané veličiny baterie a moment motoru ($I_{qmax}=200A$, stoupání 5%)</i>	45
<i>obr. 3.12 Průběh proudů i_d a i_q ($I_{qmax}=200A$, stoupání 10%)</i>	46
<i>obr. 3.13 Napětí a proud na vinutí první fáze ($I_{qmax}=200A$, stoupání 10%)</i>	46
<i>obr. 3.14 Vybrané veličiny baterie a moment motoru ($I_{qmax}=200A$, stoupání 10%)</i>	46
<i>obr. 3.15 Průběh proudů i_d a i_q ($I_{qmin}= -150A$, brzdění 90-0 km/h)</i>	47
<i>obr. 3.16 Napětí a proud na vinutí první fáze ($I_{qmin}= -150A$, brzdění 90-0 km/h)</i>	48
<i>obr. 3.17 Průběh indukovaného napětí a proudu ($I_{qmin}= -150A$, brzdění 90-0 km/h)</i>	48
<i>obr. 3.18 Napětí a proud na vinutí první fáze ($I_{qmin}= -150A$, brzdění 90-0 km/h)</i>	48
<i>obr. 3.19 Vybrané veličiny baterie a moment motoru ($I_{qmin}= -150A$, brzdění 90-0 km/h)</i>	49
<i>obr. 3.20 Průběh proudů i_d a i_q ($I_{qmin}= -200A$, brzdění 90-0 km/h)</i>	49
<i>obr. 3.21 Průběh indukovaného napětí a proudu ($I_{qmin}= -200A$, brzdění 90-0 km/h)</i>	49
<i>obr. 3.22 Napětí a proud na vinutí první fáze ($I_{qmin}= -200A$, brzdění 90-0 km/h)</i>	50
<i>obr. 3.23 Vybrané veličiny baterie a moment motoru ($I_{qmin}= -200A$, brzdění 90-0 km/h)</i>	50
<i>obr. 3.24 Výškový profil trati</i>	51
<i>obr. 3.25 Průběh proudů i_d a i_q (udržování konstantní rychlosti 50km/h)</i>	51
<i>obr. 3.26 Napětí a proud na vinutí první fáze (udržování konstantní rychlosti 50km/h)</i>	51
<i>obr. 3.27 Vybrané veličiny baterie, moment motoru, fázový proud a rychlost</i>	52
<i>obr. 3.28 Srovnání proudů i_d a i_q s modelem v d-q osách</i>	53
<i>obr. 0.1 Subsystem nabíjení-vybíjení</i>	58
<i>obr. 0.1 Schéma PWM řízení v Simulinku</i>	58

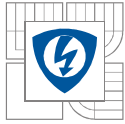


SEZNAM TABULEK

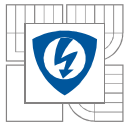
<i>Tabulka 1-1 Srovnání nejpoužívanějších typů průmyslových baterií.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 1-2 Porovnání souřadných soustav [5].....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 2-1 Parametry baterie</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 2-2 Parametry měniče</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 2-3 Parametry motoru.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 3-1 Parametry automobilu</i>	<i>42</i>

**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

symbol	název	jednotka
ω	Úhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]
M	Točivý moment	[Nm]
DC/DC	Stejnoseměrný měnič	[-]
DC/AC	Střídač	[-]
PWM	Pulzně šířková modulace	[-]
R	Odpor	[Ω]
L	Indukčnost	[H]
U_i	Indukované napětí	[V]
U_d	Napětí ve stejnosměrném meziobvodu	[V]
n	Otáčky	[ot.min ⁻¹]
PMSM	Synchronní stroj s permanentními magnety	[-]
ω_s	Synchronní úhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]
s	Statorový souřadný systém	[-]
r	Rotorový souřadný systém	[-]
k	Obecný souřadný systém	[-]
u, v	Obecný souřadný systém	[V]
d-q	Osy svázané s rotorem	[-]
α, β	Osy svázané se státorem	[-]
u_d, u_q	Napětí v ose d a q	[V]
u_α, u_β	Napětí v ose α a β	[V]
u_a, u_b, u_c	Fázová napětí	[V]
i_d, i_q	Proud v ose d a q	[A]
i_α, i_β	Proud v ose α a β	[A]
i_a, i_b, i_c	Fázové proudy	[A]
Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c	Spřažené magnetické toky ve fázích	[Wb]
Ψ_d, Ψ_q	Spřažené magnetické toky v ose d a q	[Wb]
PM	Permanentní magnet	[-]
L_{aa}, L_{bb} a L_{cc}	Vlastní indukčnosti v jednotlivých fázích statoru	[H]
L_{ab}, L_{bc} a L_{ac}	Vzájemné indukčnosti mezi fázemi statoru	[H]
L_d	Indukčnost v ose d	[H]
L_q	Indukčnost v ose q	[H]
L_0	Průměrná indukčnost	[H]
L_{ms}	Změna indukčnosti v závislosti na poloze rotoru	[H]
L_{ss}	Matice všech statorových indukčností	[H]
Ψ_r	Magnetický tok vytvářený permanentním magnetem	[Wb]
k_d, k_q, k_0	Transformační koeficienty	[-]
p	Okamžitý výkon	[W]



P_p	Počet pólpárů	[-]
M_i	Moment magnetického původu	[Nm]
ω_m	Mechanická úhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]
U_0	Jmenovité napětí li-ion článku	[V]
K	Polarizační konstanta	[Ah ⁻¹]
Q	Maximální kapacita baterie	[Ah]
A	Exponenciální napětí	[V]
B	Exponenciální kapacita	[Ah ⁻¹]
t	Čas	[s]
$1C$	Proud odpovídající kapacitě baterie	[A]
$F_R(p)$	Přenos regulátoru proudu	[-]
$F_M(p)$	Přenos měniče napětí	[-]
$F_q(p)$	Přenos náhradního obvodu osy q	[-]
K_I	Přenos proudového čidla	[-]
$i_{\text{ž}}(t)$	Požadovaný proud	[A]
$F_0(p)$	Přenos otevřené smyčky	[-]
τ_0	Časová konstanta regulátoru	[s]
τ_1	Časová konstanta regulátoru	[s]
τ_q	Časová konstanta PMSM v ose q	[s]
τ_d	Časová konstanta PMSM v ose d	[s]
τ_m	Časová konstanta měniče	[s]
K_s	Zesílení soustavy	[-]
M_d	Dynamický moment	[Nm]
M_z	Zátěžný moment	[Nm]
$M_{z\text{red}}$	Redukovaný zátěžný moment	[Nm]
J_{red}	Redukovaný moment setrvačnosti	[kg.m ²]
g	Gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
m_v	Hmotnost vozidla	[kg]
F_g	Gravitační síla	[N]
F_0	Síla odporu vzduchu	[N]
F_v	Síla odpovídající valivému odporu	[N]
c_x	Součinitel odporu vzduchu	[-]
S	Čelní plocha auta	[m ²]
ρ	Hustota vzduchu	[kg.m ⁻³]
v	Rychlost vozidla	[m.s]
C_{rr}	Součinitel valivého odporu	[-]
r_p	Poloměr poháněného kola	[m]
η_p	Účinnost přenosu výkonu na kolo	[-]



ÚVOD

Silniční doprava patří k největším znečišťovatelům ovzduší. Lze předpokládat, že důraz na ochranu životního prostředí povede v odvětví, ve kterém stále dominuje nepřilíš efektivní technologie spalovacího motoru, k významným změnám. Dalším důvodem je stále rostoucí cena ropy, růst její spotřeby po celém světě a omezené zásoby do budoucna. Řešením je hledání alternativních druhů pohonů automobilu. Jedním z nich je využití elektrické energie k pohonu v takzvaných elektromobilech.

Elektrickou energii lze v automobilu akumulovat v bateriích, což je velmi limitující z důvodu relativně malé kapacity dnešních baterií. Proto v nejbližší době nelze očekávat masový rozvoj automobilů spoléhajících čistě na elektrický pohon. V současné době jsou na trhu především první typy hybridních automobilů, které mají jako hlavní druh pohonu klasický spalovací motor a elektromotor plní pouze pomocnou funkci při rozjezdu a zrychlení. Tyto vozidla mají velmi malou kapacitu baterií a nedokážou se pohybovat čistě na elektrický pohon. Druhým vývojovým stupněm elektromobilu jsou takzvané plug-in hybridy, které jsou již vybaveny větší baterií a výkonnějším elektromotorem. Plug-in hybrid umožňuje nabíjet baterie z elektrické sítě a jízdu na krátkou vzdálenost pouze na elektrický motor.

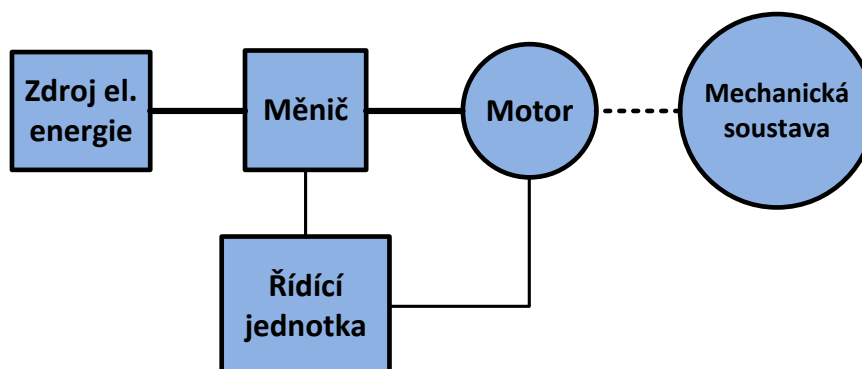
Dalším možným zdrojem elektrické energie pro elektromobil se jeví palivový článek. Automobily vybavené palivovými články mají několik zásadních výhod. Palivem pro palivový článek je vodík, který je obnovitelným zdrojem energie a do budoucna se s ním počítá jako s náhradou nynějších fosilních paliv. Palivový článek má nulové emise. Během jeho provozu vzniká pouze neškodná vodní pára. Nevýhodou této technologie je získávání vodíku. Pokud se podaří vyřešit ekologickou výrobu vodíku ve velkém množství, má tato technologie velkou budoucnost.

Cílem této práce je vytvořit model elektrického vozidla v prostředí MATLAB/SIMULINK. Vozidlo bude poháněné synchronním motorem s permanentními magnety napájeného z Li-Ion baterie přes trojfázový střídač. Na tomto modelu budou provedeny simulace různých režimů jízdy.

1 STRUKTURA POHONU ELEKTRICKÉHO VOZIDLA

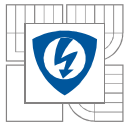
Elektrický pohon vozidla je složitý elektromechanický systém, který v současné době zažívá prudký rozvoj všech svých komponent, zejména výkonových polovodičových měničů, technických prostředků pro realizaci regulačních systémů, použitých algoritmů a podpůrných diagnostických systémů. Problematiku elektrických pohonů lze označit za komplexní disciplínu, která v sobě zahrnuje několik náročných oborů. Při návrhu kvalitního moderního pohonu je třeba využít znalosti o elektrických strojích, mechanických soustavách, výkonové elektronice a regulaci. Elektrické stroje tvoří akční členy, výkonová elektronika je základem pro návrh napájecích měničů elektrické energie a regulace celých systémů v sobě zahrnuje teoretické zákonitosti, ale i poznatky z praxe nutné pro realizaci obvodových struktur regulátoru a implementaci řídicích algoritmů. Moderní elektrický pohon je řízen výhradně pomocí mikroprocesorového regulátoru. Neméně důležité jsou i měřicí, testovací a diagnostické obvody nezbytné pro uvádění do chodu a provoz pohonných systémů.

Konstrukce pohonů z minulých let odráží stav dostupných prostředků použitých k jejich realizaci v době vzniku. V oblasti výkonových měničů to byla například nedostupnost plně říditelných součástek dostatečného výkonu, v regulační technice omezené možnosti analogových systémů. Základní principy elektrických strojů zůstávají stále platné, stroje samotné však získávají díky novým přístupům k jejich regulaci zcela nové vlastnosti.



obr. 1.1 Obecné schéma elektrického pohonu

U pohonu je možné regulovat moment, rychlost nebo polohu. Složitější celky většinou obsahují jednodušší podřízené regulační smyčky. Podstatná je také schopnost elektrického brzdění, kdy se kinetická energie mechanické soustavy přeměňuje na elektrickou, která se buď rekuperuje zpět do napájecí sítě, akumuluje, nebo se přeměňuje v teplo v elektrickém stroji či v brzdných odporech. Tato vlastnost je u zvláště u elektromobilu velkou výhodou, neboť lze rekuperačním brzděním ušetřit značné množství energie a zároveň snížit opotřebení konvenčních brzd.



1.1 Výhody použití elektrického pohonu

Použití elektrických pohonů s sebou přináší celou řadu výhod:

- Jsou vhodné téměř pro libovolný požadovaný výkon. (od jednotek mW v elektricky poháněných hodinkách až po desítky MW u pohonů čerpadel vodních přečerpávacích elektráren)
- Dosahují širokého rozsahu momentu a rychlosti. (od několika stovek Nm u motorů pro mlýny a rychlosti vyšší než desítky tisíc otáček/min pro pohony centrifug a odstředivek.
- Jsou přizpůsobitelné téměř pro libovolné provozní podmínky. Mohou být vzduchem chlazené nebo úplně uzavřené, ponořené v kapalině, vystavené vlivu výbušného nebo radioaktivního prostředí. Elektrické motory nevyžadují nebezpečné palivo a neprodukuje žádné škodlivé zplodiny, nemají vliv na své bezprostřední okolí. Oproti spalovacím motorům je jejich provoz relativně tichý.
- Jsou připraveny k okamžité činnosti a mohou být ihned plně zatěžovány, nepotřebují doplňovat palivo, ve srovnání s jinými druhy pohonů vyžadují pouze nenáročný servis.
- Elektrické motory mají nízkou hladinu ztrát naprázdno a pracují s vysokou účinností, snášejí výrazné krátkodobé přetížení.
- Jsou snadno říditelné, stavové charakteristiky mohou být tvarovány téměř dle potřeby. Trakční motory nepotřebují rychlostí převodovky, jako mají spalovací motory. Díky elektronickému řízení dosahují vynikajících dynamických vlastností.
- Mohou pracovat ve všech čtyřech kvadrantech roviny $\omega=f(M)$ bez potřeby speciální reverzační převodovky. Během brzdění (pracovní bod v kvadrantu 2 nebo 4) může docházet k rekuperaci energie setrvačných hmot nazpět do sítě, což je velká výhoda oproti spalovacím motorům.
- Rotačně souměrné elektrické stroje, což je většina motorů pracujících na elektromagnetickém principu, mají téměř nezávislý průběh momentu na hřídeli a pracují s malou úrovní vibrací. Dosahované hodnoty ustálených oteplení nezpůsobují výraznou únavu nebo degradaci materiálu. Z toho vyplývá dlouhá životnost.
- Díky možnosti přesného řízení se při návrhu trakčního pohonu není třeba omezovat pouze na jeden motor. Umožňuje konstrukci vícemotorových pohonů, které mohou být v určitých aplikacích výhodnější.

Podle očekávání mají elektrické pohony také několik nevýhod, které omezují nebo přímo vylučují jejich nasazení:

- Závislost na plynulé dodávce elektrické energie. U elektromobilů nutnost akubaterie, která je poměrně objemná, těžká a především velice drahá.
- Nasycení magnetického obvodu. U motoru s permanentními magnety riziko jejich odmagnetování při větším přetížení a problémy s chlazením. [1]

1.2 Akumulátory vhodné pro trakční pohon

- Olověný akumulátor – je galvanický článek s elektrodami na bázi olova. Jako elektrolyt se používá kyselina sírová. Olověné akumulátory jsou nejpoužívanějším elektrochemickým zdrojem energie. Hlavními výhodami je poměrně nenáročná a levná výroba a vysoká proudová zatížitelnost. Díky těmto vlastnostem se například pro startování automobilu používají výhradně olověné baterie.
- Ni-Cd – Nikl-kadmiový akumulátor se skládá ze tří vrstev. Kladnou elektrodu tvoří hydroxid niklu, zápornou kadmium. Obě elektrody odděluje separátor obsahující elektrolyt (hydroxid draselný). Výhodou je vysoká proudová zatížitelnost a odolnost vůči mrazu. Ni-Cd akumulátor snáší vysoké nabíjecí proudy. Nevýhodou je použití jedovatého kadmia a paměťový efekt. Je-li Ni-Cd akumulátor dobíjen malým proudem a před nabíjením nebyl zcela vybit, postihuje jej paměťový efekt a ačkoliv je akumulátor plně nabit, při zatížení selže. Důvodem je usazení kovových krystalků na záporné elektrodě a s tím související zvýšení vnitřního odporu. Akumulátor postižený paměťovým efektem jde opět reaktivovat opakovaným nabíjením a vybíjením.
- Ni-MH – mají podobnou konstrukci jako Ni-Cd. Používají však mnohem ekologičtější materiály. Kladná elektroda je opět z hydroxidu niklu, záporná je tvořena kovovou slitinou schopnou vázat vodík. Separátor oddělující obě elektrody obsahuje i zde alkalický elektrolyt (hydroxid draselný). Jediný rozdíl oproti řešení Ni-Cd představuje vodík vázající slitina, která nahradila jedovaté kadmium. Jmenovité napětí článku je opět 1,2V. Ni-MH akumulátor má o něco slabší paměťový efekt. Je proto vhodné jej čas od času před nabíjením zcela vybit. Ni-MH článek uskladní při téže hmotnosti téměř dvojnásobek energie, ale má o mnoho menší proudovou zatížitelnost.
- Li-ion – Lithium-iontová baterie se skládá z uhlíkové anody a katody tvořené oxidem kovu. Jako elektrolyt se používá lithiová sůl v organickém rozpouštědle. Uvnitř každé běžně prodávané baterie se nachází čip, který hlídá stav a kontroluje průběh nabíjení. Výhodami těchto typů akumulátorů jsou velmi vysoká hustota energie (až třikrát vyšší jak Ni-MH), možnost výroby v téměř libovolných tvarech a především akumulátory tohoto typu netrpí paměťovým efektem a mají delší životnost. Baterie však stárne a tím postupně ztrácí svou kapacitu bez ohledu na to, jestli je nebo není používána. Rychlost stárnutí se zvyšuje s vyšším zatížením, vyšší teplotou a přebíjením nad jmenovitou kapacitu.
- LiFePO₄ – Lithium-železo-fosfátový akumulátor je druh lithium-iontového akumulátoru, který používá jako katodového materiálu LiFePO₄. Tyto baterie sdílí mnoho vlastností s rozšířenými lithium iontovými bateriemi. Mezi klíčové výhody LiFePO₄ patří bezpečnost (odolnost proti tepelným únikům) a schopnost dodávat vysoký proud ve špičkách. LiFePO₄ mají oproti běžným Li-ion bateriím menší energetickou hustotu. Tato nevýhoda je však kompenzována menším vlivem stárnutí a tím pádem pomalejším snižováním kapacity. Po roce používání má článek už podobnou energetickou hustotu jako Li-ion akumulátor.

Tabulka 1-1 Srovnání nejpoužívanějších typů průmyslových baterií

Typ článku	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion	Olověný AGM
Doba nabíjení	1-2h	2-4h	0,5-4h	8-16h
Hustota energie (Wh/kg)	45-80	60-120	90-120	30-50
Počet cyklů (při 80% hloubce vybití)	1500	300-500	>1500	400-500
Projektovaná životnost	5 let+	3-4 roky	10 let+	10 let+
Nominální napětí článku	1,2V	1,2V	3,3V	2V
Proudová zatížitelnost				
špička	20C	5C	25C	5C
optimální	1C	0,5C	5C	0,2C
Provozní teploty	-40 - 60°C	-40 - 60°C	-40 - 60°C	-40 - 60°C
Požadavky na servis	30-60dnů	60-90dnů	6 měsíců	6 měsíců
Přibližné náklady (Kč/Wh)	8,25	16,25	8,25	2,75

[10]

1.3 Pulsní měniče DC/DC, DC/AC

V současnosti se většina pohonů nenapájí přímo ze zdroje, ale je připojena přes plně říditelný měnič napětí realizovaný pomocí výkonových spínacích tranzistorů (obvykle IGBT). Podle použitého motoru měniče rozdělujeme:

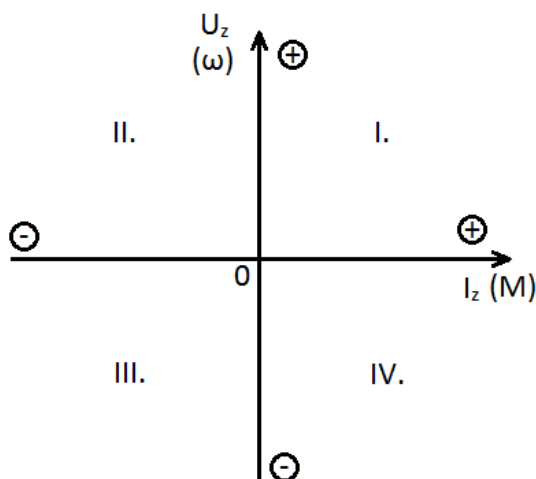
- Stejnoseměrné měniče typu DC/DC – pracují v režimu pulzní šířkové modulace PWM (Pulse Width Modulation) s nosnou frekvencí 2-20kHz. Pro přenos činného výkonu je podstatná pouze stejnosměrná složka výstupního impulzního napětí. Střídavé složky způsobují tzv. přídavné vířivé a hysterezní ztráty v železe motoru, ale na přenosu užitečného výkonu se nepodílejí.
- Střídavé měniče typu DC/AC (střídače) – slouží pro napájení asynchronních a synchronních motorů (nejčastěji s permanentními magnety na rotoru). Střídače mohou být jak v jednofázovém, tak trojfázovém provedení. Obvykle pracují v režimu sinusové pulzní šířkové modulace PWM s vysokofrekvenčním nosným kmitočtem 2-20kHz. Činný výkon je přenášen první harmonickou složkou výstupního napětí, která se pohybuje v rozmezí 0 až 400Hz. Vyšší harmonické složky výstupního napětí způsobují pouze přídavné vířivé a hysterezní ztráty v železe.

1.3.1 Pracovní kvadranty pulsního měniče

Soustava měnič-motor může pracovat ve čtyřech různých režimech. Tyto režimy odpovídají 4 kvadrantům roviny tvořené osou proudu motorem (osa x) a osou napětí na motoru (osa y). Motor představuje pro měnič tzv. aktivní zátěž. To znamená, že náhradní schéma obsahuje kromě odporu vinutí R a indukčnosti vinutí L také zdroj vnitřního indukovaného napětí U_i . Podle obr. 1.2 může motor pracovat v motorickém režimu (I. a III. kvadrant), nebo v režimu brzděném (II. a IV. kvadrant). Úhlová rychlost stroje je přímo úměrná indukovanému napětí U_i , které se přibližně rovná napětí na svorkách motoru. Stejně tak moment na hřídeli je přímo úměrný

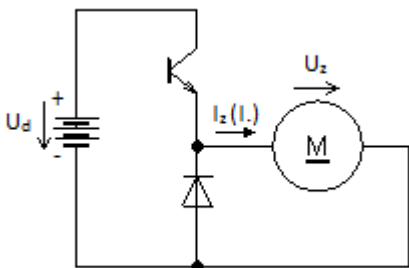
protékanému proudu vinutím motoru. Proto můžeme osám na obr. 1.2 nahradit elektrické veličiny za mechanické.

Obecně platí, že v motorickém režimu je elektrická energie čerpána ze zdroje přes měnič do motoru. V brzdném režimu je kinetická energie v motoru převáděna na elektrickou energii a ta se přes měnič vrací zpět do baterie. Tento jev se nazývá rekuperace energie.

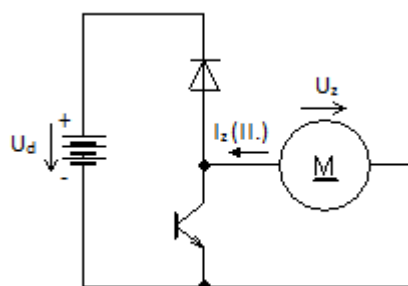


obr. 1.2 Pracovní kvadranty pulsního měniče

Základ každého měniče tvoří trojpól sestavený ze spínacího prvku (tranzistor) a nulové diody. Pomocí toho funkčního celku lze sestavit téměř libovolný měnič. Na obr. 1.3 je měnič pracující v prvním kvadrantu. Tento měnič umožňuje změnu střídy spínání tranzistoru regulovat napětí na motoru v rozsahu $0 - U_d$. Z tohoto důvodu se mu říká snižující měnič. Ve vedení proudu se střídá tranzistor s diodou. obr. 1.4 znázorňuje měnič pracující ve druhém kvadrantu. Měnič dokáže odčerpávat elektrickou energii z motoru a vracet ji zpět do baterie. Tuto funkci zvládá dokonce i v případě, že indukované napětí na kotvě motoru je menší, než napětí baterie. Díky této vlastnosti se nazývá zvyšující měnič.

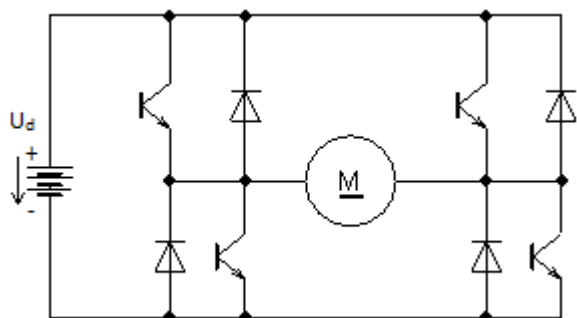


obr. 1.3 Snižující měnič

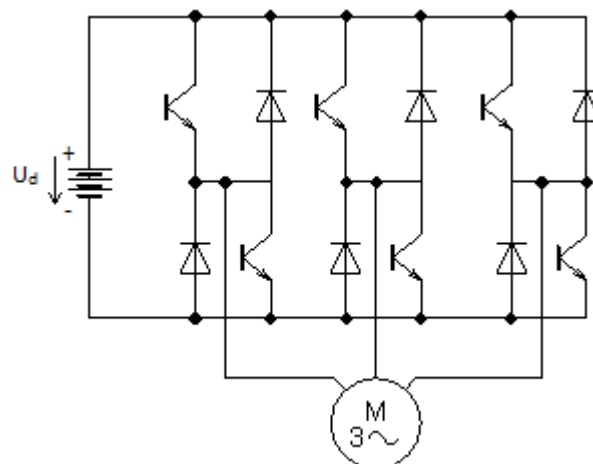


obr. 1.4 Zvyšující měnič

Paralelní kombinací snižujícího a zvyšujícího měniče lze sestavit měnič schopný pracovat ve všech čtyřech kvadrantech (obr. 1.5). Čtyřkvadrantový pulsní měnič zvládá obě polarity napětí i oba směry proudu. Podle typu řízení může fungovat také jako jednofázový střídač. Přidáním další větve k čtyřkvadrantovému měniči vznikne trojfázový střídač (obr. 1.6) Tento střídač se v pohonech používá v kombinaci s trojfázovými asynchronními nebo synchronními motory a opět zvládá oba směry toku energie. [2]



obr. 1.5 Čtyřkvadrantový pulsní měnič

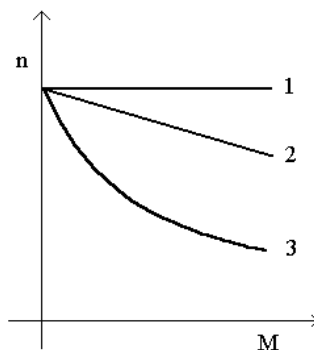


obr. 1.6 Trojfázový střídač

1.4 Volba vhodného elektromotoru

Při návrhu elektrického pohonu elektromobilu je nutno zvolit elektromotor s vhodnou momentovou charakteristikou.

Momentovou charakteristikou elektrického motoru nazýváme závislost jeho otáček na momentu, tj. funkci $n = f(M)$. Téměř všechny elektromotory mají tu vlastnost, že jejich moment klesá s rostoucími otáčkami. Tuto vlastnost mají všechny obyčejné elektromotory užívané v průmyslu, tj. stejnosměrné motory derivační, sériové, asynchronní a komutátorové motory na střídavý proud. U různých druhů motorů změna otáček v závislosti na momentu probíhá různě a charakterizuje se tzv. tvrdostí jejich momentových charakteristik. Momentové charakteristiky elektrických motorů lze rozdělit do tří hlavních skupin:



obr. 1.7 Momentové charakteristiky elektrických motorů

- Absolutně tvrdá momentová charakteristika (křivka 1, obr. 1.7). Tuto charakteristiku mají synchronní motory.



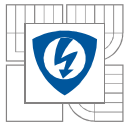
- Tvrdá momentová charakteristika (křivka 2, obr. 1.7) Moment při rostoucích otáčkách pozvolna lineárně klesá. Tato charakteristika je společná pro stejnosměrné derivační motory a asynchronní motory v tzv. pracovní oblasti momentové charakteristiky.
- Měkká momentová charakteristika (křivka 3, obr. 1.7). Moment rapidně klesá s rostoucími otáčkami. Tato charakteristika se vyskytuje u stejnosměrných sériově buzených motorů. [1]

Velice důležité je také výkonové dimenzování. Motor, který je pro své použití výkonově předdimenzován má zbytečně velké rozměry, hmotnost, což se jistě projeví na jeho ceně. Zároveň také pracuje s nižší účinností, než optimálně navržený motor. Naopak poddimenzovaný motor má za následek snížení dynamiky pohonu a v důsledku přetěžování se motoru snižuje životnost. Otázka ztrát a dobré energetické účinnosti je u elektromobilů zvláště důležitá z důvodu omezené kapacity baterií.

Dříve se v elektrické trakci používali převážně komutátorové stroje se sériovým buzením díky svým dynamickým a regulačním vlastnostem. Společným znakem komutátorových strojů byl problematický mechanický komutátor, který byl limitující konstrukční částí tohoto stroje z hlediska spolehlivosti a proudového zatížení. Negativními vlastnostmi těchto strojů jsou jejich vlastní komutační jevy, které se prakticky nepodařilo odstranit do dnešní doby. Myšlenka použít pro elektrickou trakci střídavý bezkomutátorový motor zpočátku narážela na problém tehdy dostupné regulační techniky. Ve srovnání s komutátorovými motory jsou hlavními přednostmi indukčního motoru menší geometrické rozměry, protože komutátor zabírá až třetinu délky stroje. Další velkou výhodou je větší proudová a momentová přetížitelnost a nižší nároky na údržbu. Rozvoj výkonové elektroniky a mikroelektroniky umožnil aplikaci vyšších forem řízení, což sebou přineslo zvýšení účinnosti celého pohonu a zlepšení dynamických vlastností. V poslední době se jako nejvýhodnější motor pro elektrickou trakci jeví synchronní motor s permanentními magnety (PMSM). Oproti asynchronnímu stroji má PMSM při stejné hmotnosti vyšší točivý moment, vyšší účinnost a menší nároky na chlazení. Jeho další předností je, že může vyvíjet maximální točivý moment už při nulových otáčkách, což je pro použití v trakci velmi důležitá vlastnost. Vzhledem k těmto vlastnostem lze PMSM použít pro bezpřevodovkový pohon lehkých dopravních prostředků, jako jsou elektromobily, elektroskútry atd.

1.5 Softwarové prostředí Simulink/Simscape

Matlab je dnes jedním z nejrozšířenějších programových balíků pro technické výpočty v mnoha oborech. Používá se ve firmách, výzkumných pracovištích a na univerzitách po celém světě. MATLAB (MATrix LABoratory) je výkonné interaktivní prostředí pro vědecké výpočty. Spojuje technické výpočty, vizualizaci dat a programovací jazyk v jednom prostředí. Společně s množstvím dostupných modulů tak vytváří ideální prostředek pro inženýry, vědce, matematiky a učitele při řešení problémů z mnoha oblastí. Aplikaci vyvíjí firma MathWorks a dodává ji s celou řadou rozšíření a toolboxů. Matlab používají lidé ke své práci po celém světě, existuje proto široká komunita, množství dokumentace a ukázkových příkladů. Firma MathWorks na svých stránkách provozuje Matlab Central (<http://www.mathworks.com/matlabcentral>), což je otevřené rozhraní pro výměnu informací mezi uživateli Matlabu a Simulinku, přičemž Simulink je nejrozšířenější toolbox určený pro simulaci dynamických systémů. Systém pro výměnu souborů [File Exchange] je zdroj několika tisíc příkladů ze všech oblastí lidského bádání, soubory jsou rozříděny do kategorií a k dispozici k volnému stažení. Dále pak obsahuje několik desítek



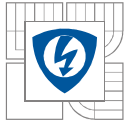
záznamů webových seminářů zaměřených na úplné základy práce s Matlabem i na vysoce specializované úkoly s konkrétními toolboxy. Řešení technických problémů je v prostředí Matlabu mnohem jednodušší než v jiných programovacích jazycích nebo vývojových prostředích, neboť obsahuje velké množství vestavěných funkcí, které usnadňují vývoj, jako jsou přímá podpora komplexních čísel, sofistikované řešiče soustav lineárních algebraických rovnic, práce s velkými řídkými maticemi nebo řešení obyčejných diferenciálních rovnic. Mezi jeho klíčové vlastnosti patří:

- vysokoúrovňový jazyk pro technické výpočty
- otevřený a rozšiřitelný systém
- velké množství aplikačních knihoven
- podpora vícerozměrných polí a datových struktur
- interaktivní nástroje pro tvorbu grafického uživatelského rozhraní
- import a export dat do mnoha formátů
- komunikace s externími měřicími a monitorovacími přístroji v reálném čase
- rozšiřitelnost modulů jazyky C, C++, Fortran, Java [3]

Simscape rozšiřuje Simulink o nástroje pro modelování a simulace tzv. "multi-domain" systémů obsahujících propojení mechanických, elektrických a hydraulických komponent. Simscape využívá nový přístup k modelování systémů. Zavádí do simulačních schémat reálné fyzikální veličiny, jako jsou síly, momenty, napětí, proudy, tlaky, průtoky atd. Podobně jako při montáži reálného systému, vzniká model v Simscape grafickým propojením bloků, které přímo odpovídají fyzickým prvkům reálného systému. Bloky se spojují do sítě, ve které spojení mezi elementy odpovídají přenosům energie v systému. Tento přístup umožňuje systémy modelovat přímo popisem jejich fyzické struktury a odbourává se potřeba odvozování příslušných matematických vztahů mezi sledovanými veličinami. Simscape tyto vztahy generuje automaticky. Simscape obsahuje knihovny základních mechanických, elektrických a hydraulických bloků, které umožňují vytvářet uživatelské bloky a schémata komplexnějších komponent systému. Využití Simscape je široké, uplatnění najde v automobilovém průmyslu, letectví, obraně, návrhu průmyslových a stavebních strojů a podobně. Simscape obsahuje i vlastní jazyk, založený na jazyku MATLABu. Lze jej využít k tvorbě uživatelských komponent, rozšiřujících knihovny prvků v dané fyzikální doméně, nebo k tvorbě celých uživatelsky definovaných fyzikálních domén. [4]

1.6 Synchronní motor s permanentními magnety

Stator synchronního stroje se nijak zvlášť neliší od asynchronního motoru. Je opatřen obvykle trojfázovým vinutím. Na rotoru je soustava pólů buzených permanentními magnety. Přivedeme-li na statorové vinutí třífázový proud, vznikne točivé magnetické pole, které s sebou unáší nabuzený rotor. Rotor je elektromagnetickou silou nucen sledovat úhel natočení magnetického pole statoru. Otáčí se tedy stejnou (synchronní) rychlostí jako magnetické pole statoru. Otáčky jsou nezávislé na velikosti zatížení až do chvíle překročení maximálního záťažného momentu, kdy motor vypadává ze synchronizmu a musí být odpojen. Nevýhodou synchronního motoru je neschopnost rozběhu přímým připojením na síť, proto bývá někdy vybaven pomocným klecovým vinutím, jako má asynchronní motor. Toto vinutí také plní funkci tlumícího vinutí a zabraňuje kývání rotoru, při změně otáček nebo zatížení.



1.7 Transformace statorových veličin

Z hlediska dynamických vlastností regulace je výhodné regulovat stejnosměrné proudy a napětí, než přímo střídavé. Tohoto dosáhneme použitím transformace z os a,b,c na systém d-q souřadnic. Ten se pohybuje vůči stacionárnímu systému α,β synchronní rychlostí ω_s . Vzhledem k tomu, že vektory statorového proudu a napětí se otáčejí touto synchronní rychlostí, budou se po transformaci do d-q jevit jako stejnosměrné.

1.7.1 Parkova transformace třífázového napětí

$$\begin{aligned} u &= u_\alpha + ju_\beta = \frac{2}{3} \left(u_a + u_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + u_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = |u| e^{j\varepsilon} = \\ &= \frac{2}{3} \left(u_a + u_b \left(\cos \frac{2\pi}{3} + j \sin \frac{2\pi}{3} \right) + u_c \left(\cos \frac{4\pi}{3} + j \sin \frac{4\pi}{3} \right) \right) = \\ &= \frac{1}{3} (2u_a - u_b - u_c) + j \frac{\sqrt{3}}{3} (u_b - u_c) \end{aligned} \quad (1.1)$$

Tento komplexní tvar můžeme napsat jako:

$$u_\alpha = \frac{1}{3} (2u_a - u_b - u_c) \quad u_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3} (u_b - u_c) \quad (1.2)$$

Zpětná transformace:

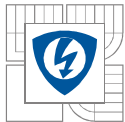
$$u_a = u_\alpha + u_0 \quad u_b = \left(-\frac{1}{2}u_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}u_\beta \right) + u_0 \quad u_c = \left(-\frac{1}{2}u_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}u_\beta \right) + u_0 \quad (1.3)$$

Kde tzv. nulová složka u_0 je svázána s fázovými hodnotami vztahem:

$$u_0 = \frac{1}{3} (u_a + u_b + u_c) \quad (1.4)$$

Při splnění podmínek symetrie se nulová složka neuplatní.

Prostorový vektor lze vyjádřit i pomocí absolutní hodnoty a úhlu, pak hovoříme o transformaci 2/P, resp. zpětné P/2. Prostorové vektory můžeme vyjádřit také v jiné komplexní rovině, která rotuje zvolenou úhlovou rychlostí ω_k vůči statoru. Na základě volby ω_k pak hovoříme o různých souřadných soustavách – viz následující tabulka.



Komplexní rovina	Úhlová rychlost	Označení os	Název souřadné soustavy	Příklad použití
s	0	α, β	Spojený se státorem	Při simulaci v časové oblasti dostáváme skutečné časové průběhy veličin – např. při zkoumání neharmonického napájení z měniče kmitočtu
r	ω_s	d, q	Spojený s rotorem	Při harmonickém napájení se střídavé veličiny zobrazují jako stejnosměrné – např. při zkoumání přechodových dějů motoru jako členu regulačního systému
k	ω_k	u, v	Rotující všeobecnou úhlovou rychlostí	Při vysvětlování, když se neklade důraz na žádný ze souřadných systémů

Tabulka 1-2 Porovnání souřadných soustav [5]

1.7.2 Transformace prostorového vektoru ze statorového systému s (α, β) do obecného k (u,v)

$$\begin{aligned} u_s^k &= u_{su} + ju_{sv} = (u_{s\alpha} + ju_{s\beta})(\cos(-\theta_k) + j \sin(-\theta_k)) = (u_{s\alpha} + ju_{s\beta})(\cos\theta_k - j \sin\theta_k) = \\ &= u_{s\alpha} \cos\theta_k + u_{s\beta} \sin\theta_k + j(-u_{s\alpha} \sin\theta_k + u_{s\beta} \cos\theta_k) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Tento komplexní tvar můžeme napsat jako:

$$u_{su} = u_{s\alpha} \cos\theta_k + u_{s\beta} \sin\theta_k \quad u_{sv} = -u_{s\alpha} \sin\theta_k + u_{s\beta} \cos\theta_k \quad (1.6)$$

Zpětná transformace:

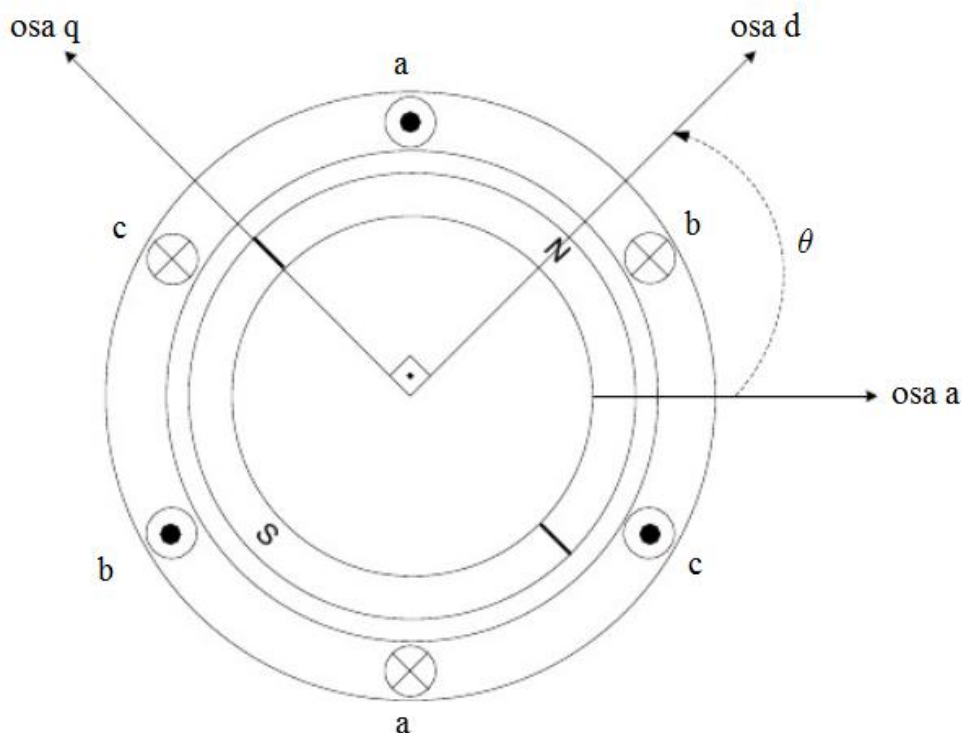
$$\begin{aligned} u_s^s &= (u_{s\alpha} + ju_{s\beta}) = \frac{u_s^k}{e^{-j\theta_k}} = u_s^k e^{j\theta_k} = (u_{su} + ju_{sv})(\cos\theta_k + j \sin\theta_k) = \\ &= u_{su} \cos\theta_k - u_{sv} \sin\theta_k + j(u_{su} \sin\theta_k + u_{sv} \cos\theta_k) \end{aligned} \quad (1.7)$$

$$u_{s\alpha} = u_{su} \cos\theta_k - u_{sv} \sin\theta_k \quad u_{s\beta} = u_{su} \sin\theta_k + u_{sv} \cos\theta_k \quad (1.8)$$

Transformace uvedené ve (1.1) až (1.11) lze použít i pro ostatní statorové veličiny. [5]

1.7.3 Matematický model PMSM

V synchronním motoru s permanentními magnety jsou spřažené magnetické toky funkcí natočení rotoru. Proto je výhodným řešením rovnice transformovat do souřadného systému pevně svázaného s rotorem (d-q)



obr. 1.8 Dvoupólový trojfázový synchronní motor s PM

Prostorový vektor napětí na statoru lze napsat v tomto tvaru:

$$\vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} \quad (1.9)$$

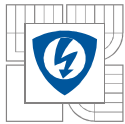
Kde, R_s , \vec{u}_s , \vec{i}_s a $\vec{\Psi}_s$ je odpor statorového vinutí, komplexní prostorový vektor 3fázového statorového napětí, proudů a spřažených toků. Všechny veličiny jsou vyjádřeny v statickém souřadném systému svázaném se státorem, lépe řečeno jsou definovány takhle:

$$\begin{aligned} \vec{u}_s &= \frac{2}{3} [u_{sa}(t) + a v_{sb}(t) + a^2 u_{sc}(t)] \\ \vec{i}_s &= \frac{2}{3} [i_{sa}(t) + a i_{sb}(t) + a^2 i_{sc}(t)] \\ \vec{\Psi}_s &= \frac{2}{3} [\Psi_{sa}(t) + a \Psi_{sb}(t) + a^2 \Psi_{sc}(t)] \end{aligned} \quad (1.10)$$

Výsledné vektory napětí, proudu a spřaženého magnetického toku napsané v (1.10) jsou vypočítány vynásobením okamžité hodnoty fázové veličiny její geometrickou orientací. Fáze a je volena jako 0° , fáze b 120° a fáze c 240° elektrických posunutých od fáze a.

Symboly použité v rovnicích (1.10) představují:

\underline{a} , \underline{a}^2 - prostorové operátory pro určení orientace statorových vinutí; $a = e^{j2\pi/3}$, $a^2 = e^{j4\pi/3}$.



u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} – okamžité hodnoty statorových fázových napětí.

$\Psi_{sa}, \Psi_{sb}, \Psi_{sc}$ – okamžité hodnoty spřažených toků, které jsou dány vztahy:

$$\begin{aligned}\Psi_{sa} &= L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c + \Psi_{ra} \\ \Psi_{sb} &= L_{ab}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c + \Psi_{rb} \\ \Psi_{sc} &= L_{ac}i_a + L_{bc}i_b + L_{cc}i_c + \Psi_{rc}\end{aligned}\tag{1.11}$$

Kde

L_{aa}, L_{bb} a L_{cc} jsou vlastní indukčnosti vinutí statoru a fáze, b fáze a c fáze.

L_{ab}, L_{bc} a L_{ac} jsou vzájemné indukčnosti mezi jednotlivými fázemi.

Ψ_{ra}, Ψ_{rb} a Ψ_{rc} jsou spřažené magnetické toky vytvářené permanentními magnety na rotoru. Jejich velikost je závislá na úhlu natočení rotoru podle vztahů (1.12).

$$\begin{aligned}\Psi_{ra} &= \Psi_r \cos \theta \\ \Psi_{rb} &= \Psi_r \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \Psi_{rc} &= \Psi_r \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}\tag{1.12}$$

Ψ_r představuje maximální hodnotu spřaženého magnetického toku vytvářeného permanentními magnety. V literatuře bývá označován také jako back-EMF konstanta k_e . Na obr. 1.8 lze vidět, že směr spřaženého toku Ψ_r je zvolen jako osa d. Osa q je kolmá na osu d a předbíhá o úhel 90° . Úhel θ představuje natočení osy q vůči ose a. Okamžité hodnoty spřažených magnetických toků, vlastních a vzájemných indukčností jsou funkcí úhlu θ .

$$\begin{aligned}L_{aa} &= L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta) \\ L_{ab} &= L_{ba} = -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}\tag{1.13}$$

Kde L_{ls} je rozptylová indukčnost statorového vinutí. L_0 je průměrná indukčnost. L_{ms} je kolísání indukčnosti v závislosti na poloze rotoru. Koeficient $-1/2$ u vzájemných indukčností se objevuje z důvodu rozložení statorových vinutí po 120° a $\cos(120^\circ) = -1/2$.

$$\begin{aligned}L_0 &= \frac{1}{2}(L_q + L_d) \\ L_{ms} &= \frac{1}{2}(L_d - L_q)\end{aligned}\tag{1.14}$$

Stejně vztahy lze napsat také pro vlastní a vzájemné indukčnosti fází b a c, ale k úhlu θ je třeba přičíst $-\frac{2\pi}{3}$ pro fázi b a $+\frac{2\pi}{3}$ pro fázi c. Všechny statorové indukčnosti jsou vyjádřeny v maticové formě v (1.15).

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \\ -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta) \\ -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta) & L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Díky znalosti rovnic pro spřažené magnetické toky (1.11) a indukčnosti statoru (1.15) lze vyjádřit napěťové rovnice statorových vinutí dosazením do obecného vztahu (1.9). [6]

$$u_{sa} = R_a i_a + L_{aa} \frac{di_a}{dt} + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} + \Psi_r \sin \theta \cdot \omega \quad (1.16)$$

$$u_{sb} = R_a i_b + L_{bb} \frac{di_b}{dt} + L_{ab} \frac{di_a}{dt} + L_{bc} \frac{di_c}{dt} + \Psi_r \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \omega \quad (1.17)$$

$$u_{sc} = R_a i_c + L_{cc} \frac{di_c}{dt} + L_{ac} \frac{di_a}{dt} + L_{bc} \frac{di_b}{dt} + \Psi_r \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \omega \quad (1.18)$$

Z rovnic je zřejmé, že veškeré hodnoty indukčností a spřažených magnetických toků jsou časově proměnné, což má za následek velkou náročnost výpočtu. K odstranění časové závislosti napětí, proudů, spřažených toků a indukčností se používá transformace do d-q os otáčejících se synchronně s rotorem. Tímto řešením je dosaženo, že veškeré veličiny mají časově nezávislé koeficienty. V ideálním stroji je rotor přímo v osách \underline{d} a \underline{q} . Proto stačí převést pouze statorové veličiny pomocí Parkovy transformace.

Transformace souřadnic z abc do d-q se provádí pomocí následující transformační rovnice:

$$[X_{dq0}] = [T_{dq0}(\theta_r)] [X_{abc}] \quad (1.19)$$

Kde za X dosadíme libovolnou statorovou veličinu (u, i, Ψ). Transformační matice do d-q je definována jako:

$$[T_{dq0}(\theta_r)] = \begin{bmatrix} k_d \cos \theta_r & k_d \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & k_d \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -k_q \sin \theta_r & -k_q \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -k_q \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ k_0 & k_0 & k_0 \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

Transformační činitele k_d , k_q a k_0 lze volit libovolně kromě nulové hodnoty, dokonce různě pro transformaci proudů, napětí a magnetických toků. Tato volba však nepřináší žádné výhody, a proto budou dále uvažovány stejné transformační činitele pro všechny statorové veličiny. Fyzikálně si lze představit veličinu X_d jako průmět velikostí okamžitých veličin X_a , X_b , X_c do osy \underline{d} , která je osou rotorového magnetického toku a otáčí se rychlostí rotoru. Veličinu X_q si lze představit jako průmět velikostí okamžitých veličin do osy \underline{q} kolmé na osu \underline{d} otáčející se rovněž rychlostí rotoru. Znaménko mínus v druhém řádku transformační matice odpovídá ose \underline{q} , předbíhající ve smyslu otočení o $\pi/2$ osu \underline{d} .

Zpětná transformace souřadnic z d-q do abc se provádí podle následující rovnice:

$$[X_{abc}] = [T_{dq0}(\theta_r)]^{-1} [X_{dq0}] \quad (1.21)$$

Transformační matice má tvar:

$$[T_{dq0}(\theta_r)]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \cos \theta_r & -\frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \sin \theta_r & \frac{1}{3k_0} \\ \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & -\frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \sin \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{3k_0} \\ \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & -\frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \sin \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{3k_0} \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Transformační činitele se volí různí autoři různě. Park zvolil $k_d = k_q = 2/3$ a $k_0 = 1/3$, čímž se zjednoduší zpětná transformační matice $[T_{dq0}(\theta_r)]^{-1}$.

1.7.4 Transformace napěťových rovnic do d-q souřadnic

Obecná rovnice pro satorová napětí Synchronního stroje s PM:

$$u_k = R_k i_k + \frac{d\Psi_k}{dt} \quad (1.23)$$

Kde $k = a, b, c$

Lineární transformace napěťových rovnic statoru se odvodí tímto postupem:

Vydeme z rovnice spřaženého magnetického toku fáze a, který je dán vztahem podle rovnice (1.11)

$$\Psi_a = \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \Psi_d \cos \theta_r - \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \Psi_q \sin \theta_r + \frac{1}{3k_0} \Psi_0 \quad (1.24)$$

Tento vztah derivujeme podle času a dostaneme:

(Pro úhel platí $\theta_r = \omega_e t + \theta_0$, $\theta_0 = 0$)

$$\frac{d\Psi_a}{dt} = \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \frac{d\Psi_d}{dt} \cos \theta_r - \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \Psi_d \omega_e \sin \theta_r - \frac{2}{3} \frac{1}{k_q} \frac{d\Psi_q}{dt} \sin \theta_r - \frac{2}{3} \frac{1}{k_q} \Psi_q \omega_e \cos \theta_r + \frac{1}{3k_0} \frac{d\Psi_0}{dt} \quad (1.25)$$

Z obecné rovnice satorového napětí je zřejmé že:

$$\frac{d\Psi_a}{dt} = u_a - R_a i_a \quad (1.26)$$

Do této rovnice dosadíme za u_a, i_a transformované veličiny:

$$\frac{d\Psi_a}{dt} = \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} u_d \cos \theta_r - \frac{2}{3} \frac{1}{k_q} u_q \sin \theta_r + \frac{1}{3k_0} u_0 - R \left(\frac{2}{3} \frac{1}{k_d} i_d \cos \theta_r - \frac{2}{3} \frac{1}{k_q} i_q \sin \theta_r + \frac{1}{3k_0} i_0 \right) \quad (1.27)$$

Rovnice (1.25) a (1.27) se sobě rovnají, jsou-li koeficienty u stejných trigonometrických funkcí stejné. Srovnání koeficientů při $\cos \theta_r$, $\sin \theta_r$ a členů bez trigonometrické funkce dostaneme při $k_d = k_q$.

Po úpravách je možné dostat napěťové rovnice pro d a q osy.

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \omega_e &= u_d - R_a i_d \\ u_d &= R_a i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \omega_e \end{aligned} \quad (1.28)$$

Kde

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (1.29)$$

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_{PM}$$

Dosazením (1.29) do (1.28) dostaneme:

$$u_d = R_a i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (1.30)$$

$$-\frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \omega_e = -u_q + R_a i_q \quad (1.31)$$

$$u_q = R_a i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \omega_e$$

Dosazením (1.29) do (1.31) dostaneme:

$$u_q = R_a i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \Psi_{PM} \quad (1.32)$$

$$\frac{d\Psi_0}{dt} = u_0 - R_a i_0 \quad (1.33)$$

$$u_0 = R_a i_0 + \frac{d\Psi_0}{dt}$$

Rovnice (1.30), (1.32) a (1.33) popisují napěťové poměry v synchronním stroji s permanentními magnety bez uvažování ztrát v železe. V ideálním trojfázovém stroji je součet trojfázových proudů roven nule.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (1.34)$$

Proto nulová složka proudu má nulovou hodnotu.

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) = 0 \quad (1.35)$$

Obdobný vztah platí také pro ostatní statorové veličiny u_0 a Ψ_0 .

Okamžitý elektrický výkon trojfázového motoru v systému a, b, c je:

$$p = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1.36)$$

Po transformaci do d-q os a úpravách dostaneme pro výkon vztah:

$$p = \frac{2}{3} u_d i_d + \frac{2}{3} u_q i_q + 3 u_0 i_0 \quad (1.37)$$

Tento příkon se skládá z Joulových ztrát, časové změně energie magnetického pole a vnitřního přeměněného výkonu. Vnitřní výkon je dán rotačními napětími, která jsou obsažena jen v napěťových rovnicích vinutí \underline{d} , \underline{q} . Z rovnice (1.37) po dosazení za u_d a u_q podle (1.30) a (1.32) dostaneme rovnici pro vnitřní moment. [9]

$$M_i = \frac{P_i}{\omega_m} = \frac{2}{3} P_p [\Psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (1.38)$$

2 JEDNOTLIVÉ ČÁSTI POHONU V SIMULINK/SIMSCAPE

V této kapitole se nachází dílčí součásti modelu elektromobilu. Celý pohon se skládá z pěti základních bloků. Z baterie akumulátorů, trojfázového střídače, synchronního motoru s permanentními magnety, regulátorů proudu a modelu mechanické zátěže.

2.1 Li-Ion Baterie

Lithium-iontová baterie se skládá z uhlíkové anody a katody tvořené oxidem kovu. Jako elektrolyt se používá lithiová sůl v organickém rozpouštědle. Uvnitř každé běžně prodávané baterie se nachází čip, který hlídá stav a kontroluje průběh nabíjení. Výhodami těchto typů akumulátorů jsou velmi vysoká hustota energie (až třikrát vyšší jak Ni-MH), možnost výroby v téměř libovolných tvarech a především akumulátory tohoto typu netrpí paměťovým efektem a mají delší životnost. Baterie však stárne a tím postupně ztrácí svou kapacitu bez ohledu na to, jestli je nebo není používána. Rychlost stárnutí se zvyšuje s vyšším zatížením, vyšší teplotou a přebíjením nad jmenovitou kapacitu.

Velice vysoké nároky na vlastnosti akumulátorů klade použití v elektrických pohonech velkých mobilních zařízení, především v elektromobilech. Pro velmi hrubou představu o potřebné velikosti akumulované energie může posloužit následující příklad. Vozidlo o hmotnosti 1000kg pohybující se průměrnou rychlostí 60km/h potřebuje pro svůj provoz střední výkon 12 až 16kW. Z toho pro akční rádius vozidla v délce dvě hodiny vyplývá potřeba asi 30kWh elektrické energie. Z uvedených hodnot je zřejmé, že napětí jednoho článku 3,6V není příliš vhodné z důvodu omezení ztrát ve vodičích, měniči a vinutí motoru. Proto je nutné tyto články řadit do série. Běžně používané hodnoty napětí baterie jsou 100 až 600V.

2.1.1 Model Li-ion baterie

Vybíjecí charakteristiku modelu Li-ion baterie definuje tato rovnice:

$$U = U_0 - \frac{Q}{Q - it} i - K \frac{Q}{Q - it} it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (2.1)$$

Rovnice nabíjení Li-ion baterie:

$$U = U_0 - \frac{Q}{Q - it} i - K \frac{Q}{Q - it} it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (2.2)$$

Kde:

U_0 = jmenovité napětí [V]

K = polarizační konstanta [Ah^{-1}]

Q = maximální kapacita baterie [Ah]

A = exponenciální napětí [V]

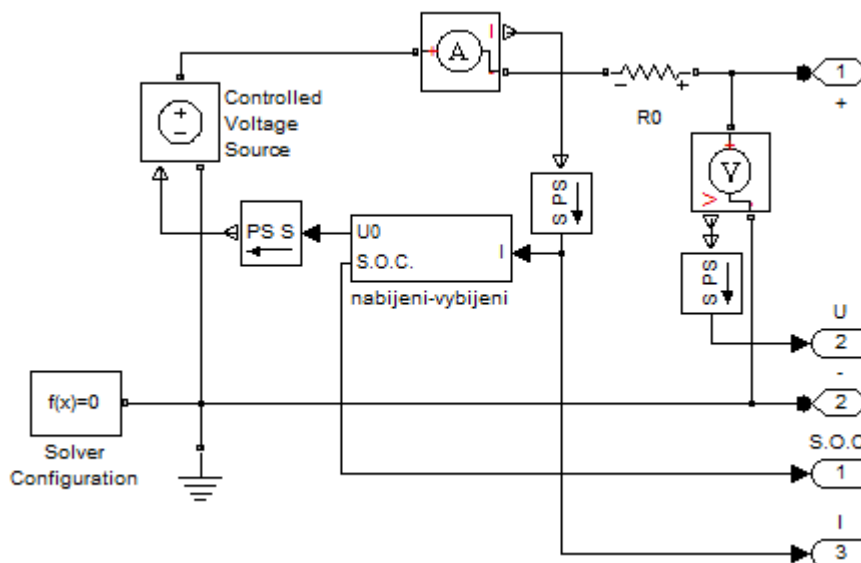
B = exponenciální kapacita [Ah^{-1}]

i = odebíraný proud [A]

t = čas [h]

[11]

Rovnice (2.1) a (2.2) se přepínají podle směru proudu baterie.



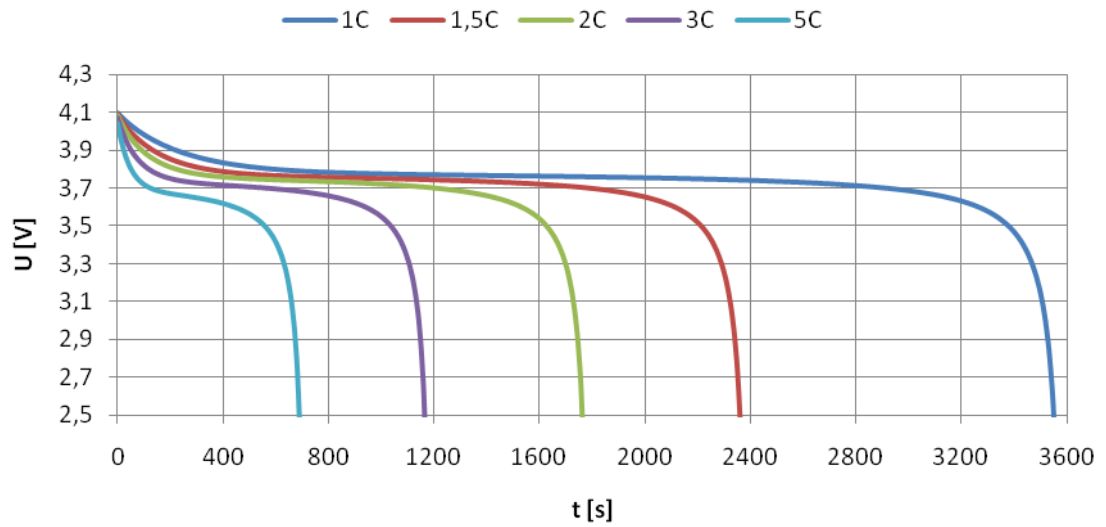
obr. 2.1 Model baterie v Simscape

Model baterie se skládá z řízeného zdroje napětí, který je řízen pomocí zpětné vazby od proudového čidla. Rezistor R_0 představuje vnitřní odpor baterie. Pro výpočet vybíjecí charakteristiky je jako zátěž použit řízený proudový zdroj. Parametry modelu jsou v následující tabulce:

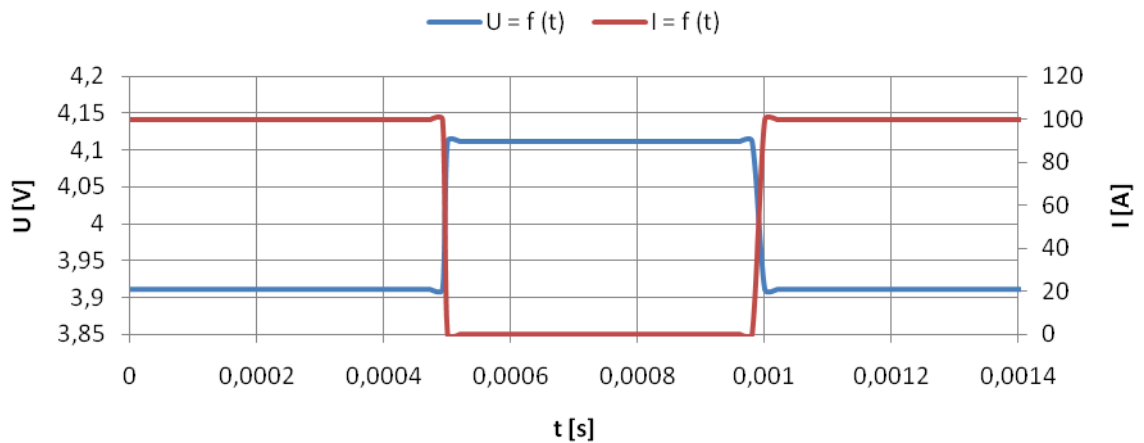
Tabulka 2-1 Parametry baterie

Jmenovité napětí	Kapacita baterie	Vnitřní odpor	Polarizační konstanta	Exponenciální napětí	Exponenciální kapacita
$U_0 = 3,8V$	$Q = 6,5Ah$	$R_0 = 0,002\Omega$	$K=0,014Ah^{-1}$	$A=0,3V$	$B=2,3Ah^{-1}$

Základním znakem bateriových článků je jejich vybíjecí charakteristika. Podle této charakteristiky se určuje vhodnost baterie pro různá použití. Na obr. 2.2 se nachází vybíjecí charakteristika Li-ion článku. Napětí na plně nabitě baterii nejprve prudce klesá, až se ustálí na jmenovité hodnotě. Tohle napětí baterie udržuje na téměř konstantní hodnotě až do téměř úplného vyčerpání uložené energie. Při dalším zatěžování článku dochází k velmi prudkému poklesu napětí. Vybíjení musí být ukončeno nejpozději při dosažení konečného vybíjecího napětí. Při hlubokém vybití vzniknou nevratné změny ve struktuře článku a článek degraduje. Velikost nabíjecího a vybíjecího proudu se často označuje pomocí násobku kapacity baterie (písmeno C). Např. pokud má baterie s kapacitou 6,5Ah vybíjecí proud 1C, znamená to, že se dá vybíjet proudem až 6,5A. Ostatní vypočítané charakteristiky odpovídají násobkům tohoto proudu.



obr. 2.2 Vybíjecí charakteristika Li-ion článku

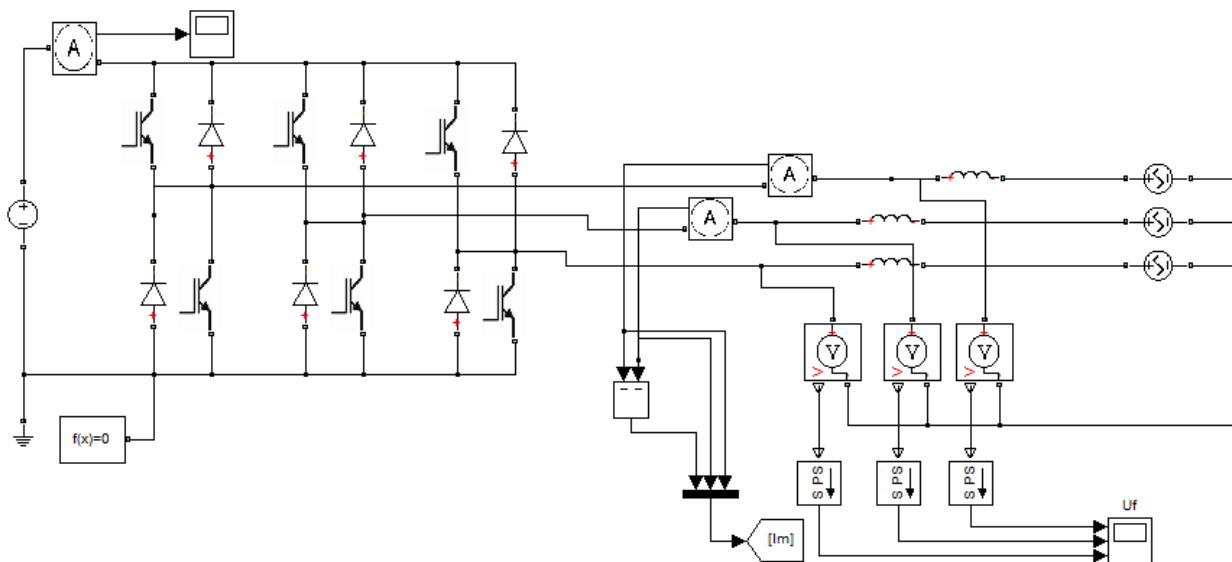


obr. 2.3 Odezva na proudový impuls

Z dynamické charakteristiky je patrné, že při zatížení velkým impulsním proudem dojde pouze k malému poklesu napětí. Z toho se dá vyvodit, že Li-ion akumulátor je tvrdý zdroj a lze jej zatěžovat vysokými vybíjecími proudy. Vysoká zatížitelnost z něj dělá vhodného kandidáta pro použití v trakčních pohonech.

2.2 Model trojfázového střídače

Model je sestaven pomocí základních bloků z knihovny *Simscape/foundation*. Spínání tranzistorů je řízeno sinusovou pulsně šířkovou modulací. Pro odzkoušení funkčnosti měniče byla na výstup připojena trojfázová symetrická zátěž R, L, U_i. Měnič dokáže pracovat nejen jako střídač, ale také jako aktivní usměrňovač. Nosná frekvence PWM byla s ohledem na velkou výpočetní náročnost zvolena 2kHz.



obr. 2.4 Schéma střídače v Simscape

2.2.1 PWM řízení frekvenčního měniče

PWM je realizováno pomocí komparátoru, který porovnává hodnoty nízkofrekvenčního modulačního signálu (sinus) a vysokofrekvenčního nosného signálu ve tvaru rovnoramenného trojúhelníku. Výstupem komparátoru je signál, který nabývá hodnot 1 nebo 0. Tímto signálem se spíná horní tranzistor ve větvi měniče a invertovaným signálem spodní tranzistor ve větvi. Třífázový střídač obsahuje 3 větve a z toho důvodu jsou potřeba také tři komparátory a nízkofrekvenční modulační signály.

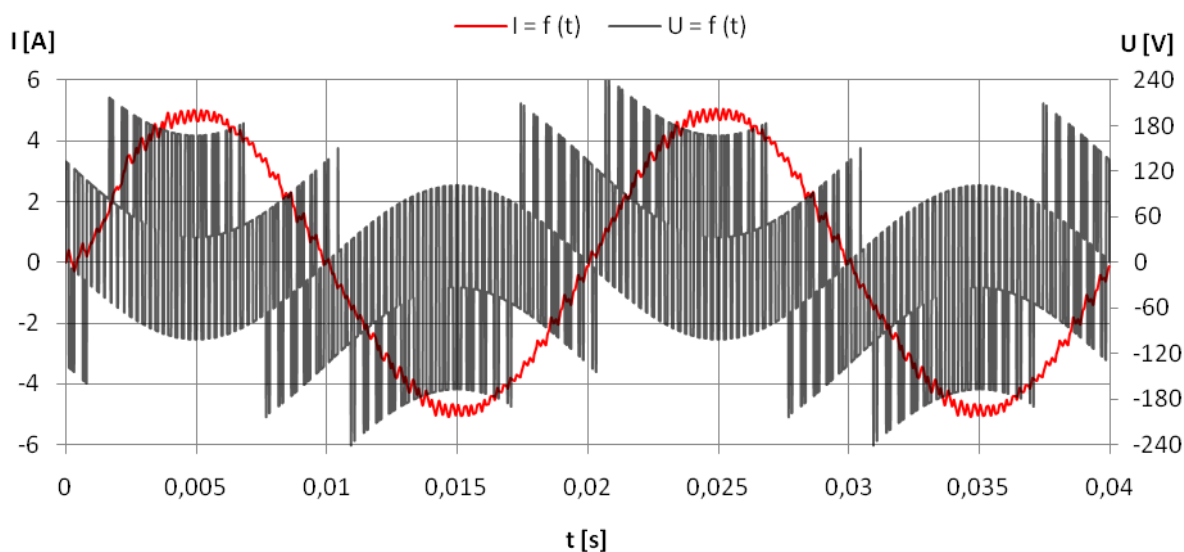
Trojfázový střídač může mít maximální možnou velikost amplitudy 1. harmonické fázového napětí $U_d/2$. Sdružené napětí je pak $\sqrt{3}$ -krát větší jak fázové. Maximální možná amplituda 1. harmonické je tedy $\frac{\sqrt{3}U_d}{2} = 0,866U_d$. Aby bylo možné dosáhnout větší amplitudy je původní sinusový modulační signál zvětšen v poměru $\frac{2}{\sqrt{3}}$ oproti původnímu případu. Přecházející část sinusoidy nad trojúhelníkový nosný signál má pak šířku přesně 60° . Takto vzniklou přecházející úseč doplníme na periodický signál o trojnásobném kmitočtu a k původní zvětšené sinusoidě přičteme. Tím se eliminuje přecházející část, ale amplituda 1. harmonické zůstane nezměněna. Tento signál nazýváme vychylovací napětí. Díky trojnásobnému kmitočtu se vychylovací napětí neobjeví na výstupním napětí měniče. První harmonická fázového napětí má nejvyšší možnou velikost $\frac{U_d}{\sqrt{3}}$ a první harmonická sdruženého napětí se rovná napětí mezilehlého stejnosměrného obvodu U_d .

Tabulka 2-2 Parametry měniče

Napětí U_d	Odpor sepnutého tranzistoru	Vodivost vypnutého tranzistoru	Odpor diody v propustném směru	Vodivost diody v závěrném směru	Úbytek napětí na diodě v propustném směru
$U_d = 560V$	$R_{Ton} = 1m\Omega$	$G_{Toff} = 1\mu S$	$R_{Don} = 3m\Omega$	$G_{Doff} = 10\mu S$	$U_{FV} = 0,6V$

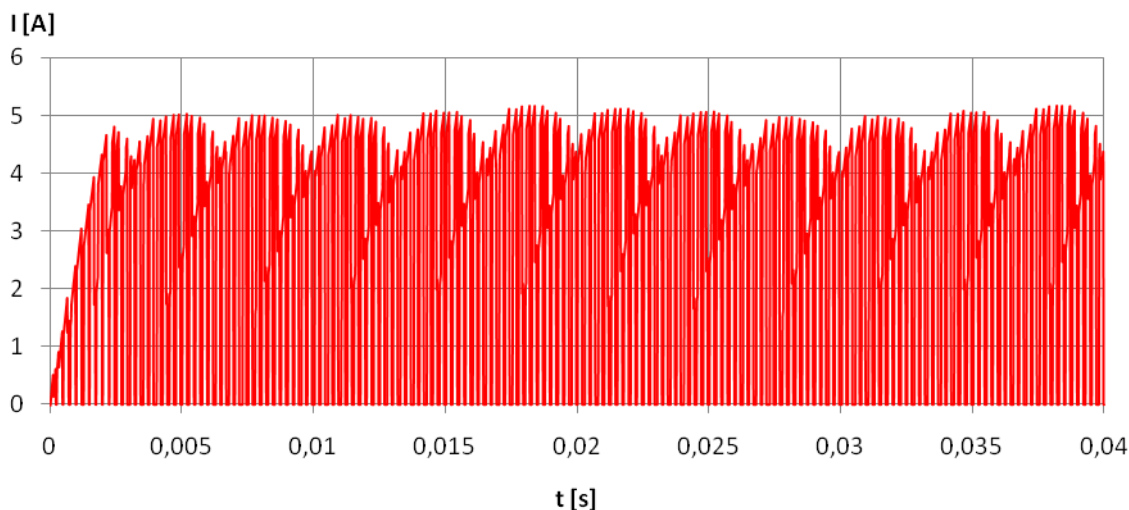
2.2.2 Měnič v režimu trojfázový střídač

Správná funkce měniče byla vyzkoušena na při napájení zátěže R, L, U_i . Soustava měnič – aktivní zátěž byla řízena pomocí vektorového řízení. Výhodou tohoto řízení je, že lze ovlivňovat zvlášť činnou a jalovou složku proudu. Na obr. 2.5 je výsledek simulace řízení na konstantní proud zátěži $i_q=5A, i_d=0A$. Proud i_d je výhodné udržovat na nulové hodnotě, neboť odpovídá velikosti jalového proudu, který se nepodílí na přenosu činného výkonu. Z průběhů je patrné, že regulační algoritmus dokáže pomocí PWM spínat tranzistory tak, že proud zátěži se přibližuje sinusovému průběhu a je přesně v protifázi s indukovaným napětím na zátěži.



obr. 2.5 Průběh napětí a proudu na jedné fázi zátěže.

Další výhodou řízení proudu s nulovou jalovou složkou $i_d=0$ je odebíraný proud ze stejnosměrné strany střídače, který obsahuje pouze kladné pulsy. Jak jde vidět na obr. 2.6. Změnou polaritu požadovaného proudu i_q se obrátí směr toku energie a měnič se začne chovat jako aktivní usměrňovač. Tento režim je popsán v následující kapitole.

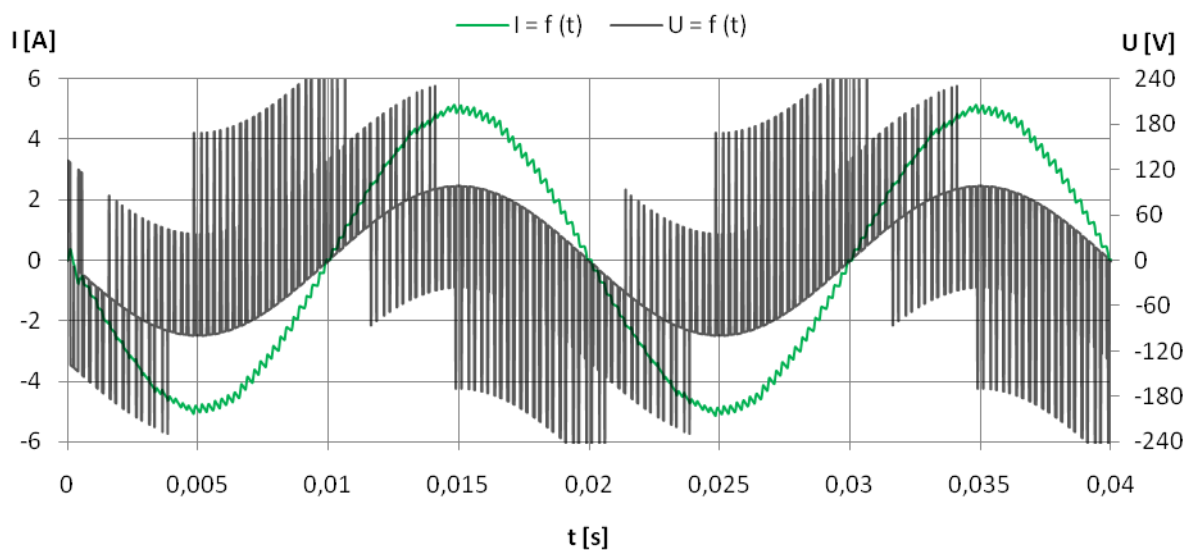


obr. 2.6 Proud odebíraný z ss strany střídače

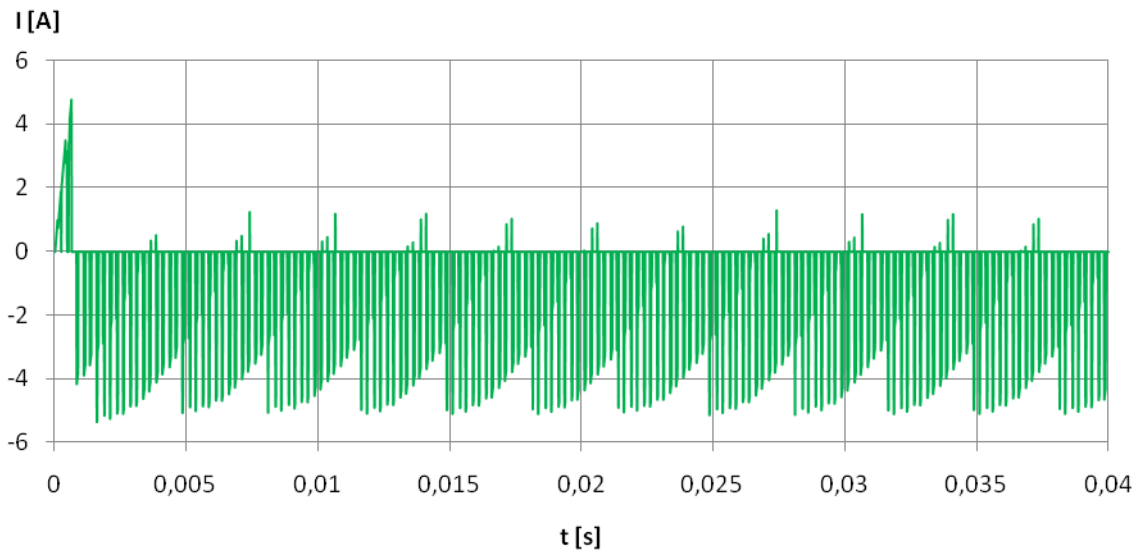
2.2.3 Měníč v režimu aktivní usměrňovač

Princip trojfázového aktivního usměrňovače spočívá v přesunu energie ze střídavé strany měniče do stejnosměrného meziobvodu. Podmínkou říditelnosti je, že stejnosměrné napětí musí být vyšší než amplituda sdruženého napětí na střídavé straně. Měníč pracuje v režimu zvyšujícího napětí. Tranzistory jsou spínané pomocí sinusové PWM a algoritmus regulace proudu se snaží, aby fázové proudy byly co nejvíc podobné sinusoidě. Řídící algoritmus je opět založený na principu vektorového řízení, díky kterému lze řídit nejen velikost proudu ale i jeho fázový posun vůči fázovému napětí.

Na obr. 2.7 je zobrazen průběh napětí a proudu na zátěži při požadovaném proudu $i_q = -5A$, $i_d = 0A$. Na průběhu proudu jde vidět, že je přesně ve fázi s indukovaným napětím a měnič odebírá energii ze zátěže. To potvrzuje i na měřený proud ve stejnosměrném meziobvodu na obr. 2.8.



obr. 2.7 Průběh napětí a proudu na jedné fázi zátěže.



obr. 2.8 Proud dodávaný na ss stranu střídače

2.3 Model synchronního motoru s permanentními magnety

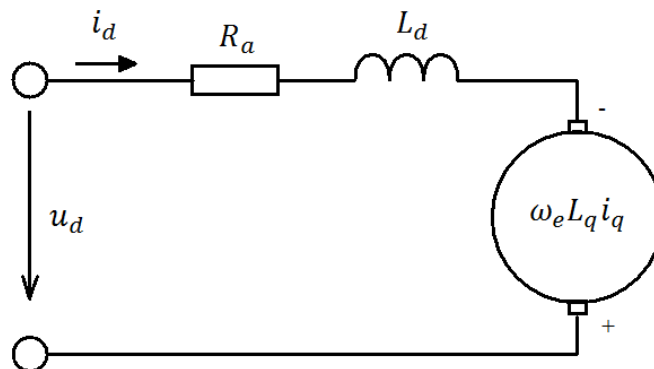
Model motoru je vytvořen z transformovaných rovnic do d-q os odvozených v kapitole 1.7.4.

Tabulka 2-3 Parametry motoru

Indukčnost v ose d	Indukčnost v ose q	Odpor statorového vinutí	Počet pólpárů	Magnetický tok PM
$L_d=1,6\text{mH}$	$L_q=3,7\text{mH}$	$R_a=0,05\Omega$	$P_p=4$	$\Psi_{PM}=0.8\text{ Wb}$

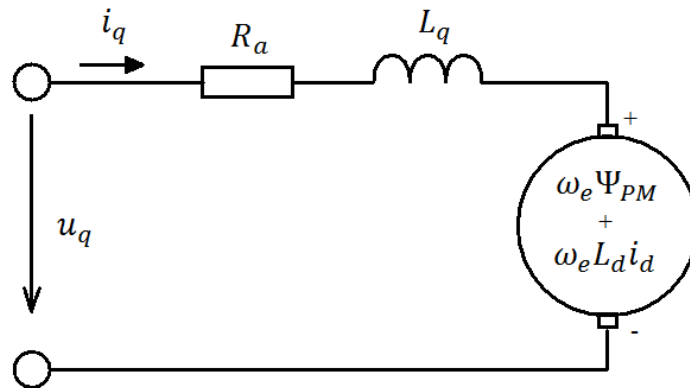
Pomocí napěťových rovnic (1.30) a (1.33) lze sestavit náhradní obvod zvlášť pro d a q osu. Jak je vidět na obr. 2.9 a obr. 2.10. Náhradní obvody se velmi podobají stejnosměrnému motoru s cizím buzením, čehož lze s výhodou využít při návrhu regulátoru.

$$u_d = R_a i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q$$



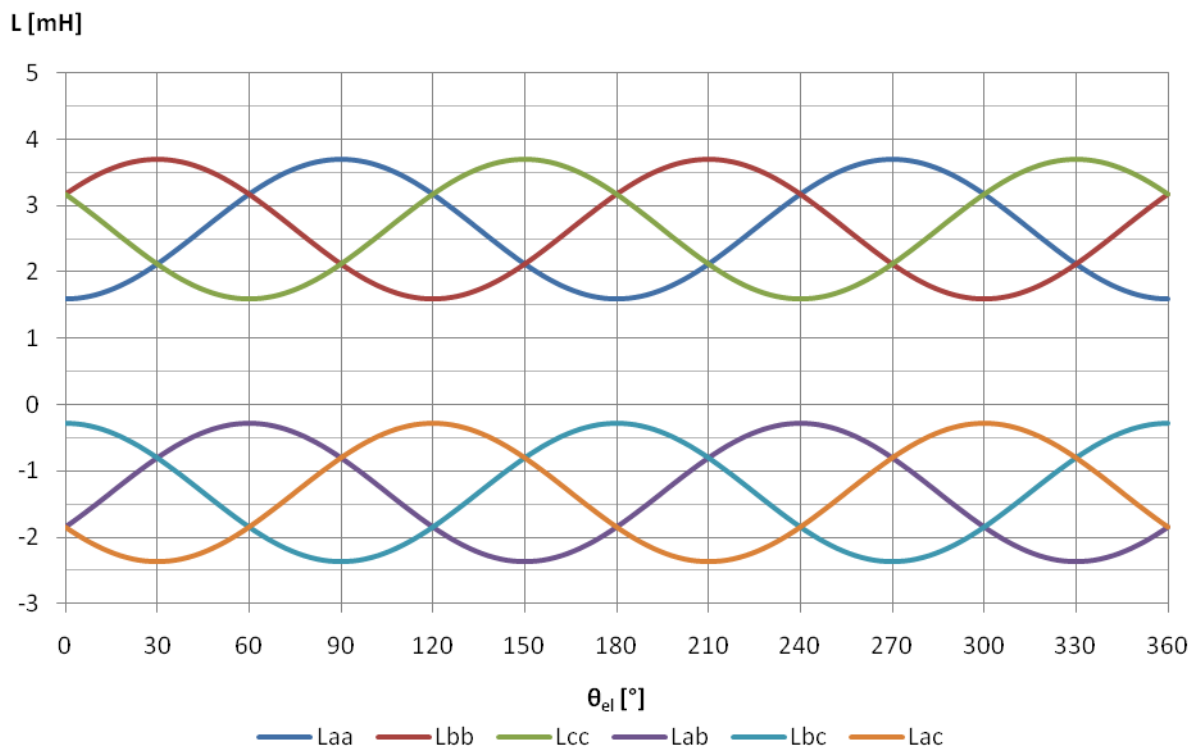
obr. 2.9 Náhradní obvod PMSM v ose d

$$u_q = R_a i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \Psi_{PM}$$

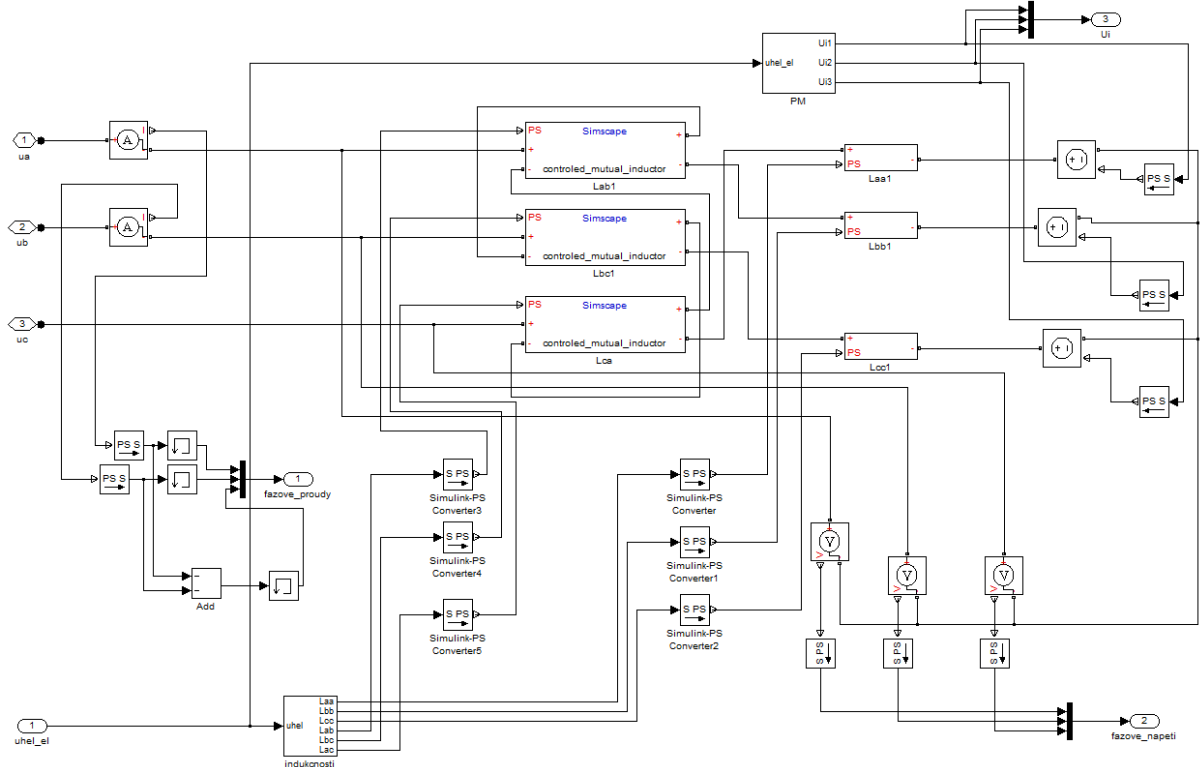


obr. 2.10 Náhradní obvod PMSM v ose q

Model PMSM v d-q osách bude sloužit pouze pro porovnání výsledku. U kompletního modelu elektromobilu bude synchronní motor představovat pro měnič zátěž s proměnnými vlastními i vzájemnými indukčnostmi a indukovaným napětím od permanentních magnetů. Průběh vlastních a vzájemných indukčností je na obr. 2.11.



obr. 2.11 Průběh vlastních a vzájemných indukčností v závislosti na úhlu natočení



obr. 2.12 Model zátěže představující PMSM

2.3.1 Návrh regulátorů proudu

Synchronní motor je výhodné řídit na nulovou hodnotu proudu i_d . Hlavní výhodou této strategie řízení je velké usnadnění řízení momentu, protože linearizuje vztah mezi točivým momentem a proudem. To znamená, že lze využít lineární regulátor momentu. Díky této strategii je řízení PMSM velmi podobné stejnosměrnému motoru.

Při splnění podmínky nulového proudu v ose d platí pro elektromagnetický moment vztah:

$$M_i = \frac{2}{3} P p \Psi_{PM} i_q \quad (2.3)$$

Ze vztahu (2.3) vyplývá, že moment je řízen proudem i_q , což je jediná proměnná veličina v momentové rovnici.

Pro návrh regulátoru proudu je potřeba nejprve stanovit přenosovou funkci PMSM. Protože předpokládaný proud v ose d je nulový, budeme se soustředit na osu q. Napěťová rovnice osy q je popsána v (1.32). Při předpokladu $i_d = 0$ a $\omega_e = 0$ se rovnice zjednoduší na:

$$u_q = R_a i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \quad (2.4)$$

Po provedení Laplaceovy transformace dostaneme:

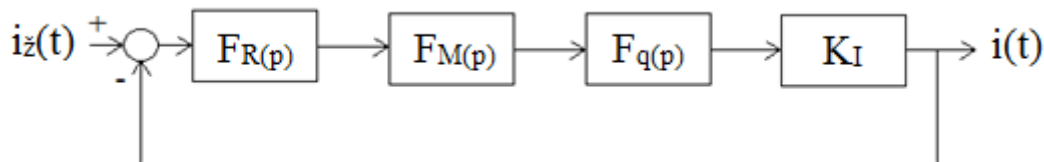
$$u_q = R_a i_q + p L_q i_q \quad (2.5)$$

Z tohoto vztahu vyjádříme přenosovou funkci osy q:

$$F_q(p) = \frac{i_q}{u_q} = \frac{1/R_a}{1+p\tau_q} \quad \tau_q = \frac{L_q}{R_a} \quad (2.6)$$

Podobný vztah platí i pro přenosovou funkci osy d:

$$F_d(p) = \frac{i_d}{u_d} = \frac{1/R_a}{1+p\tau_d} \quad \tau_d = \frac{L_d}{R_a} \quad (2.7)$$



obr. 2.13 Schéma regulační smyčky proudu

Správně navržený regulátor by měl zajistit ochranu a stabilitu celého pohonu. Motor s permanentními magnety je citlivý na přetěžování. Při nadproudu může dojít k nenávratnému poškození permanentních magnetu. Je tedy vhodné pomocí regulátoru zajistit proudové omezení. Pro návrh regulátoru proudu jsem zvolil metodu optimálního modulu z důvodu menšího překmitu přechodové charakteristiky.

$$F_M(p) = \frac{\frac{U_d}{\sqrt{3}}}{1+p\tau_m} \quad \tau_m = \frac{1}{f_n} \quad (2.8)$$

$$F_s(p) = \frac{K_s}{(1+p\tau_m)(1+p\tau_q)} \quad (2.9)$$

$$\text{Kde } K_s = \frac{U_d}{\sqrt{3}R_a} \cdot 8$$

Přenos otevřené smyčky podle metody optimálního modulu:

$$F_0 = \frac{1}{2\tau_m p(1+p\tau_m)} \quad (2.10)$$

Z přenosu otevřené smyčky se určí přenos regulátoru:

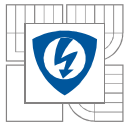
$$F_R = F_0 \frac{1}{F_s} = \frac{(1+p\tau_m)(1+p\tau_q)}{2K_s\tau_m p(1+p\tau_m)} = \frac{1+p\tau_q}{2K_s 2\tau_m p} = \frac{1+p\tau_1}{p\tau_0} \quad (2.11)$$

2.4 Mechanika elektropohonu

Tato kapitola popisuje vzájemné vztahy mezi elektromotorem a poháněným vozidlem. Simulace počítá s vlivem gravitace, odporem vzduchu a valivým odporem pneumatik. Chování rotační mechanické soustavy lze popsat matematickou rovnicí známou v mechanice jako d'Alambertův princip:

$$\sum_{i=1}^n M_i + M_d = 0 \quad (2.12)$$

Kde M_i jsou hnací a zátěžné momenty a M_d je dynamický moment.



Pro dynamický moment M_d platí:

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.13)$$

J je moment setrvačnosti soustavy a ω úhlová rychlost soustavy. Tento vztah platí v případě, že moment setrvačnosti není proměnný v čase.

2.4.1 Vliv zemské přitažlivosti

Na vozidlo působí jako na všechny ostatní předměty gravitační síla. V případě jízdy po dokonalé rovině tato síla působí kolmo ve směru jízdy a nemá vliv na pohon vozidla. Pokud má vozovka určitý sklon α , musí se s touto silou počítat.

Gravitační síla působící na vozidlo:

$$F_G = g \cdot m_v \cdot \sin \alpha \quad (2.14)$$

2.4.2 Vliv odporu vzduchu

Při pohybu vozidla klade prostředí odpor proti jeho pohybu. Při nízkých rychlostech je odporová síla poměrně malá a je považována za přímo úměrnou rychlosti pohybu. Při vyšších rychlostech však odporová síla vzrůstá s druhou mocninou rychlosti.

Velikost odporové síly jde vyjádřit pomocí tzv. Newtonova zákona odporu.

$$F_O = \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot S \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2.15)$$

Ze vztahu je patrné, že velikost odporové síly je závislá na velikosti čelní plochy S , na hustotě okolního prostředí, druhé mocnině rychlosti v a na tvaru tělesa. K obecnému popisu tvaru tělesa slouží tzv. součinitel odporu c_x , který určuje tvar a kvalita povrchu tělesa.

2.4.3 Vliv valivého odporu pneumatik

Valivý odpor vzniká valením pneumatiky po povrchu. Pneumatika se odvalováním deformuje. Kinetická energie kola se mění v teplo. Valivý odpor závisí na konstrukci pneumatiky, především na materiálu, ze kterého je vyrobena, tvaru dezénu a rozměrech. Valivý odpor je dále závislý na povrchu vozovky, rychlosti otáčení, zatížení, tlaku a teplotě.

Pro zjednodušení lze přibližnou velikost valivého odporu spočítat pomocí vztahu:

$$F_V = C_{rr} \cdot F_g \quad (2.16)$$

Kde F_g je gravitační síla působící na kolo a C_{rr} koeficient valivého odporu. Běžné pneumatiky pro osobní automobily mají C_{rr} 0,010 – 0,015.

2.4.4 Přepočítání zatěžovacích sil a setrvačnosti na hřídel motoru.

Celý elektropohon si lze přestavit jako jediné fiktivní těleso, na které působí všechny síly a momenty. Postupujeme tak, že píšeme přímo pohybovou rovnici, ve které vystupuje redukovaný mechanický moment a redukovaný moment setrvačnosti. Pod pojmem redukovaný si představujeme přepočítaný na vztaznou soustavu hřídele elektromotoru.

$$M - M_{zred} = J_{red} \frac{d\omega_{mech}}{dt} \quad (2.17)$$

Zátěžný moment redukováný na hřídel motoru určíme z podmínky rovnosti výkonů. Platí, že výkon přiváděný na hřídel motoru, zmenšený o ztráty ve vlastní soustavě, se rovná výkonu odebíranému v místě zátěže.

$$M_{zred} \cdot \omega_{mech} \cdot \eta_p = (F_G + F_o + F_v) \cdot v \quad (2.18)$$

Použitím známého vztahu mezi úhlovou rychlostí ω a obvodovou rychlostí dostaneme výsledný vztah pro zátěžný moment elektromotoru.

$$v = \omega_{mech} \cdot r_p$$

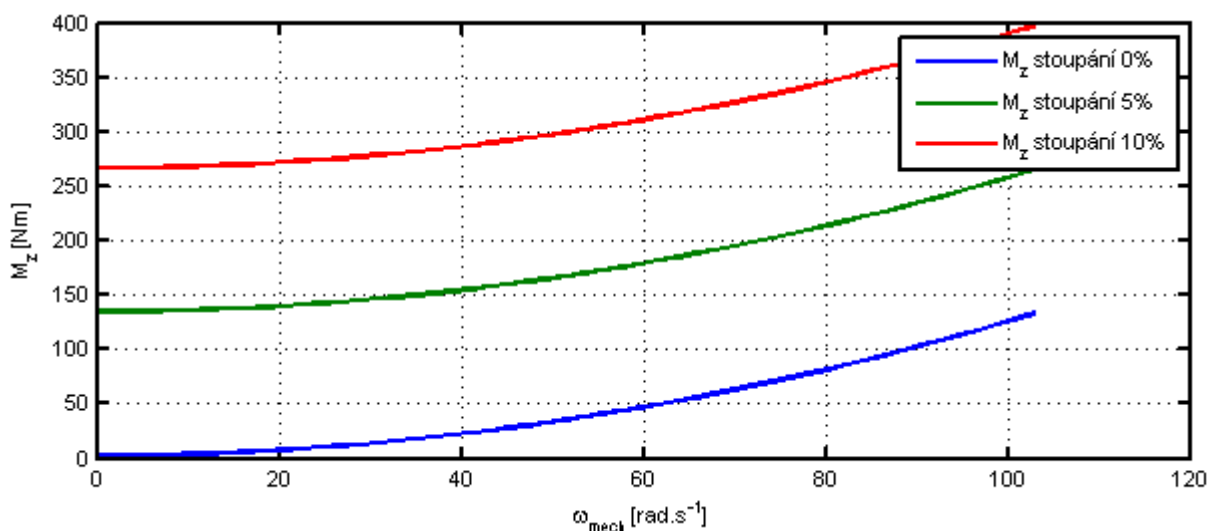
$$M_{zred} = (F_G + F_o + F_v) r_p \frac{1}{\eta_p} \quad (2.19)$$

Kde r_p je poloměr pneumatiky a η_p je účinnost přenosové cesty. Při přepočtu setrvačnosti vozidla na hřídel motoru vycházíme z podmínky zachování kinetické energie.

$$\frac{1}{2} J_{red} \omega_{mech}^2 = \frac{1}{2} m_v v^2 \quad (2.20)$$

kde m_v hmotnost vozidla a v je rychlost vozidla. Po úpravě dostaneme vztah pro redukováný moment setrvačnosti:

$$J_{red} = m_v \left(\frac{v}{\omega_{mech}} \right)^2 \quad (2.21)$$



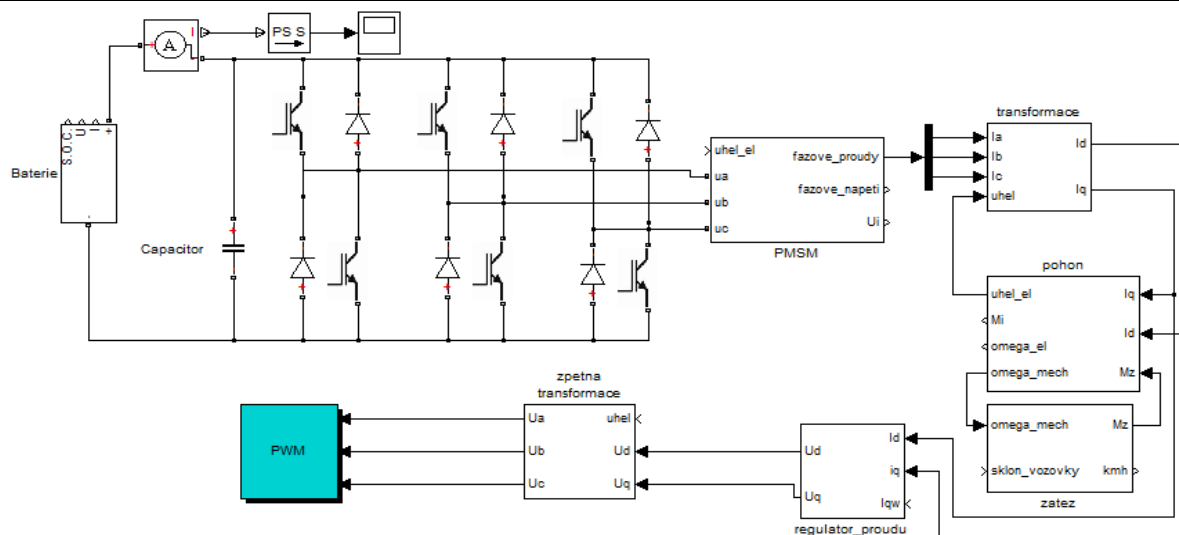
obr. 2.14 Závislost zátěžného momentu na úhlové rychlosti při různých sklonech vozovky

3 MODEL ELEKTRICKÉHO VOZIDLA

V této kapitole se nachází všechny dříve představené součásti pohonu elektromobilu zapojené v jednom celku. Baterie se skládá ze 150 kusů Li-Ion článků zapojených do série. Funkčnost modelu je prezentována při rozjezdu, rekuperačním brzdění a udržování navolené konstantní rychlosti při průjezdu po trase s proměnným sklonem vozovky.

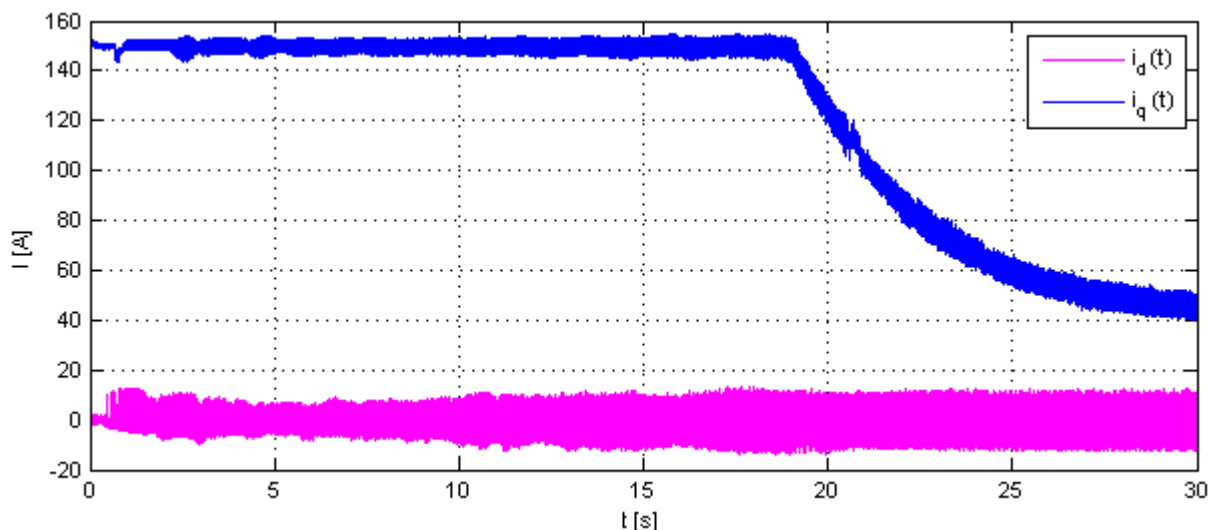
Tabulka 3-1 Parametry automobilu

Hmotnost automobilu	Součinitel odporu vzduchu	Čelní plocha auta	Převod otáček motoru na osu kola	Poloměr poháněných kol
$m = 1000\text{kg}$	$c_x = 0,34$	$S = 3\text{m}^2$	1:1	$r_k = 0.27\text{m}$

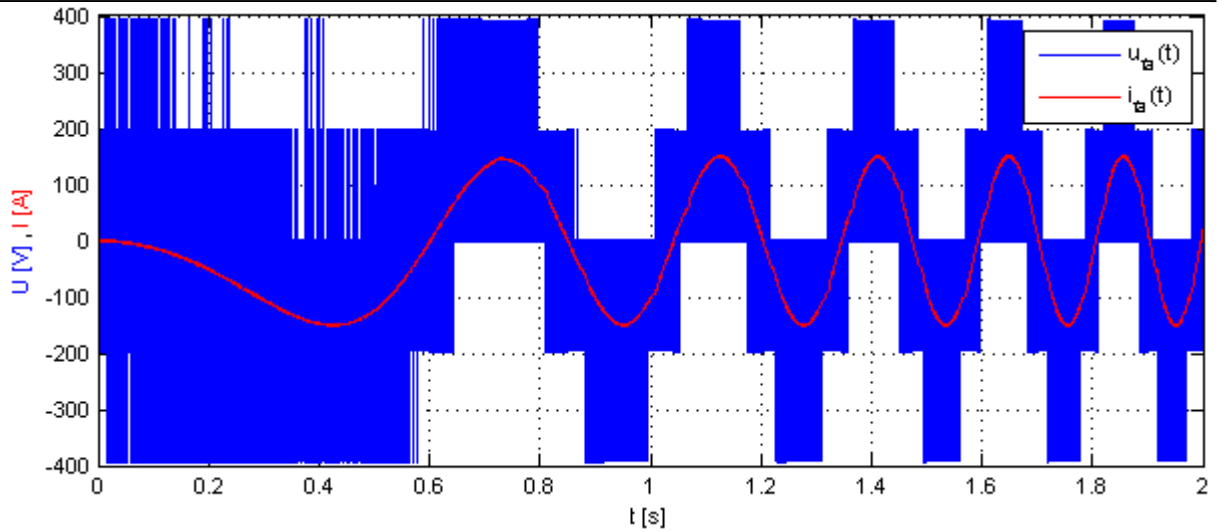


obr. 3.1 Celkový model elektromobilu

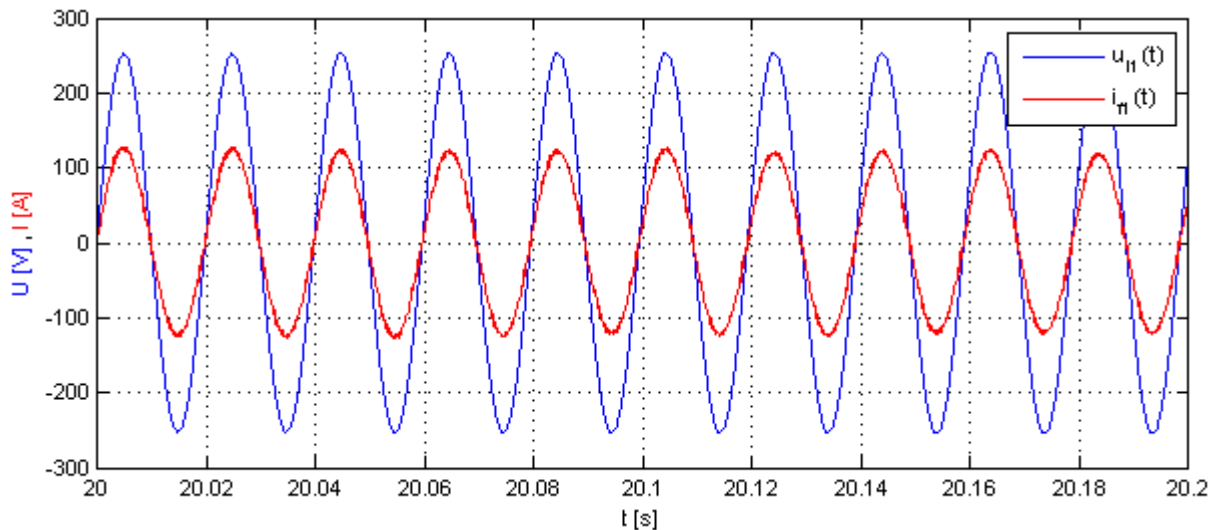
3.1 Akcelerace vozidla z 0-90km/h za různých podmínek



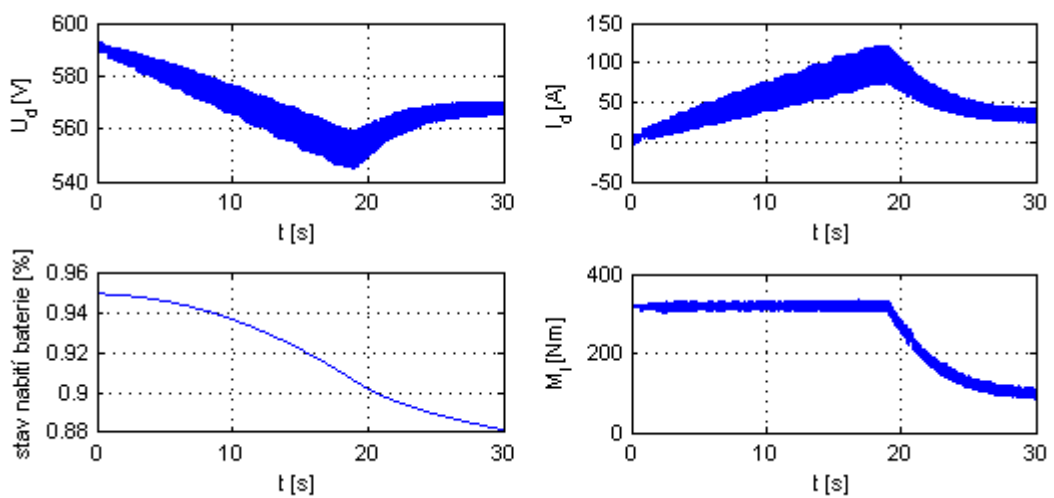
obr. 3.2 Průběh proudů i_d a i_q ($I_{qmax}=150\text{A}$)



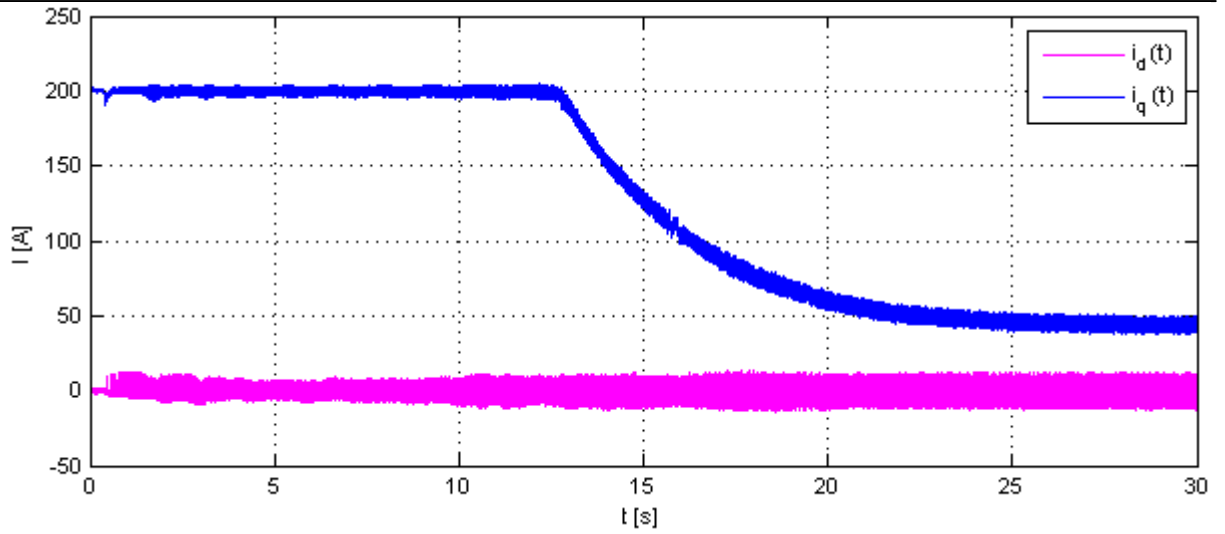
obr. 3.3 Napětí a proud na vinutí první fáze ($I_{qmax}=150A$)



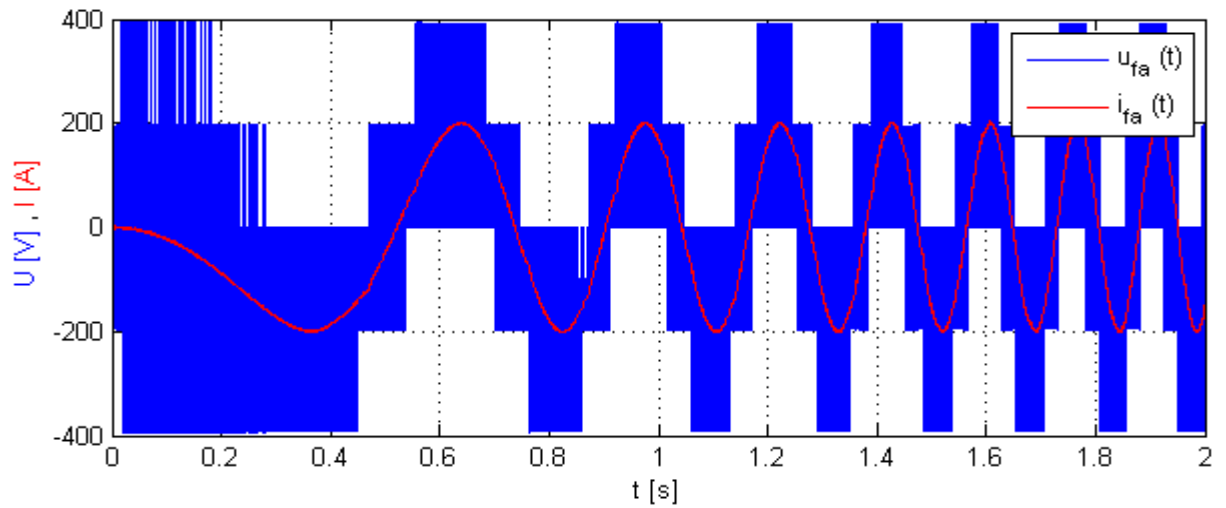
obr. 3.4 Průběh indukovaného napětí a proudu ($I_{qmax}=150A$)



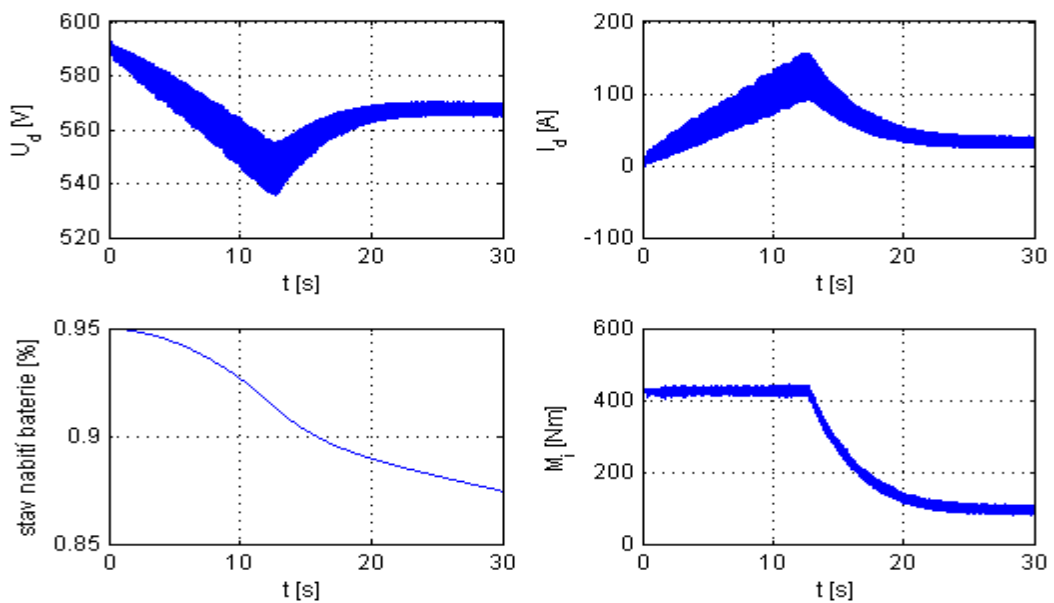
obr. 3.5 Vybrané veličiny baterie a moment motoru ($I_{qmax}=150A$)



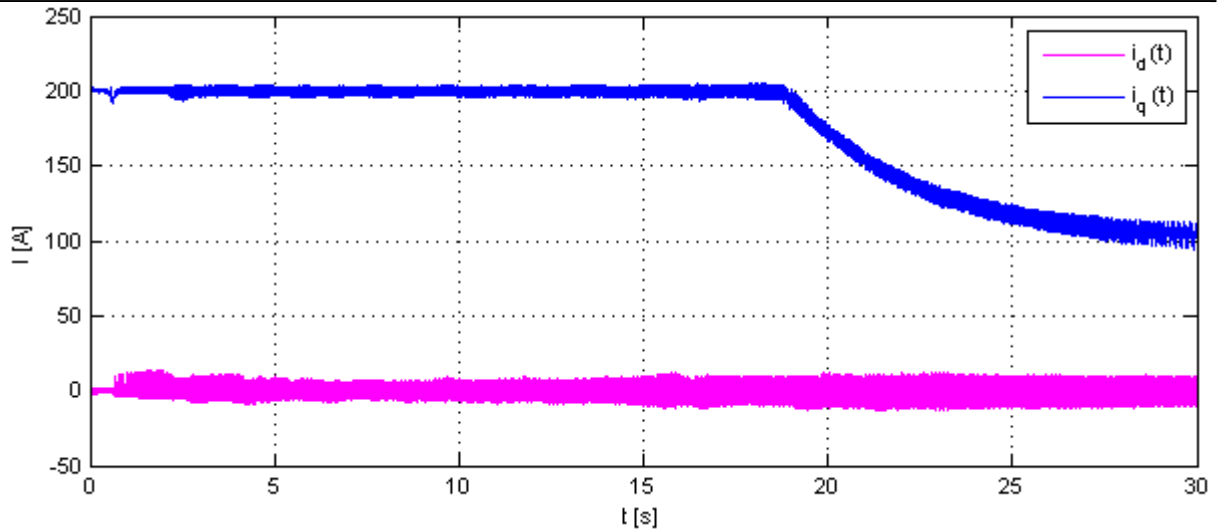
obr. 3.6 Průběh proudů i_d a i_q ($I_{qmax}=200A$)



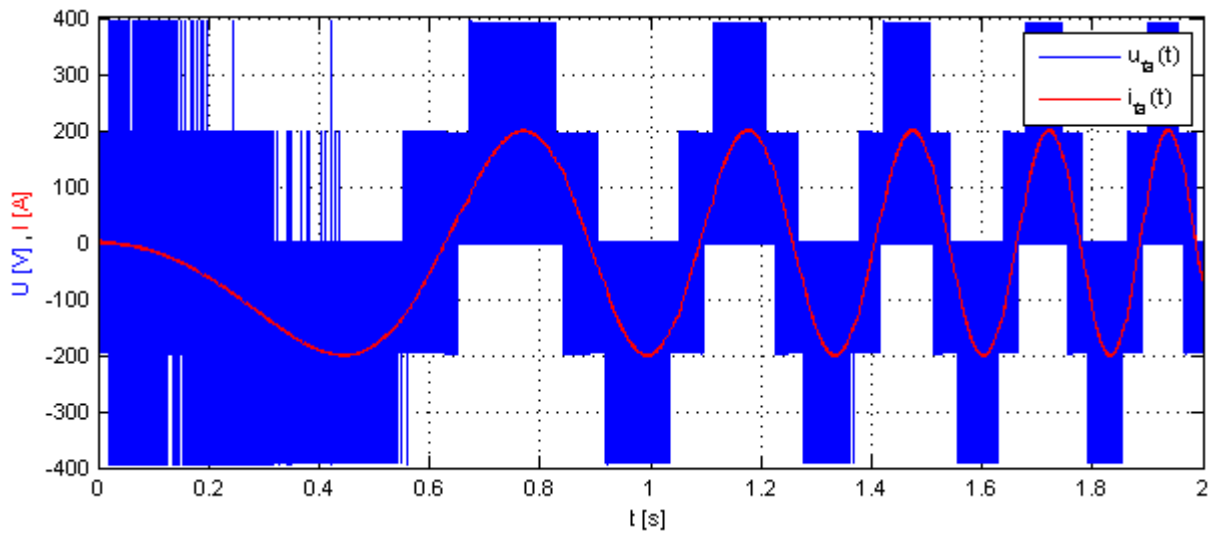
obr. 3.7 Napětí a proud na vinutí první fáze ($I_{qmax}=200A$)



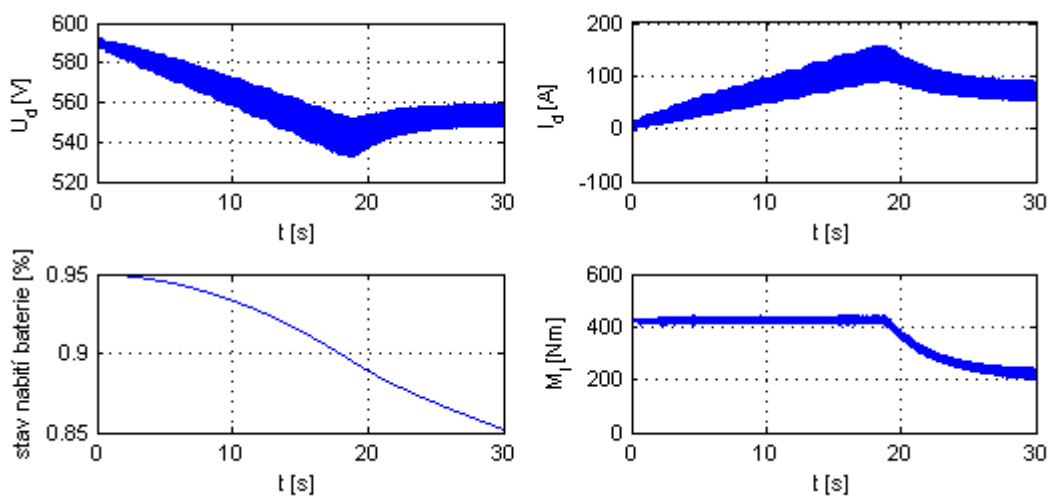
obr. 3.8 Vybrané veličiny baterie a moment motoru ($I_{qmax}=200A$)



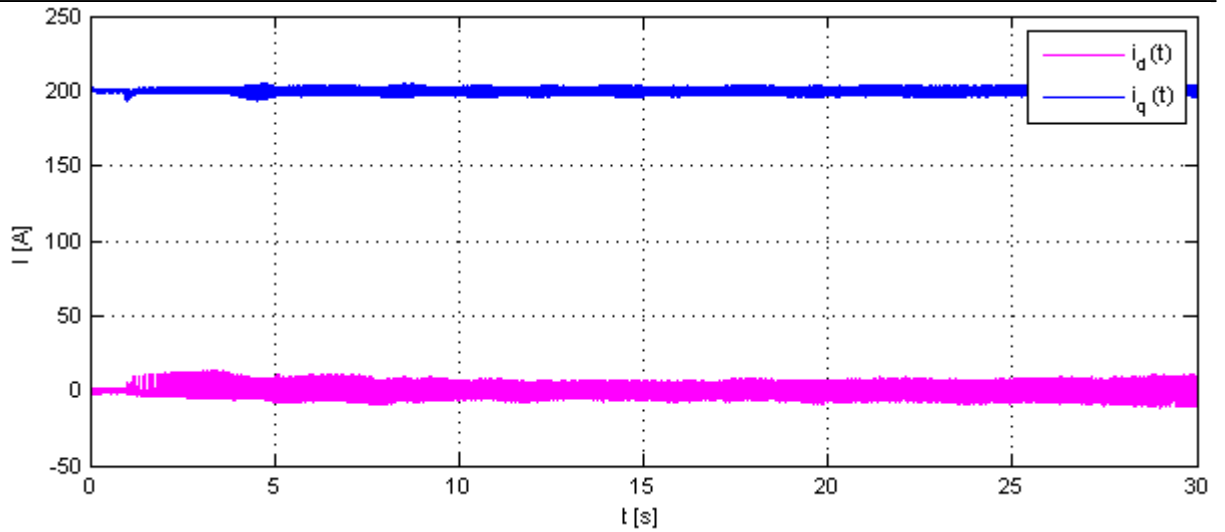
obr. 3.9 Průběh proudů i_d a i_q ($I_{qmax}=200A$, stoupání 5%)



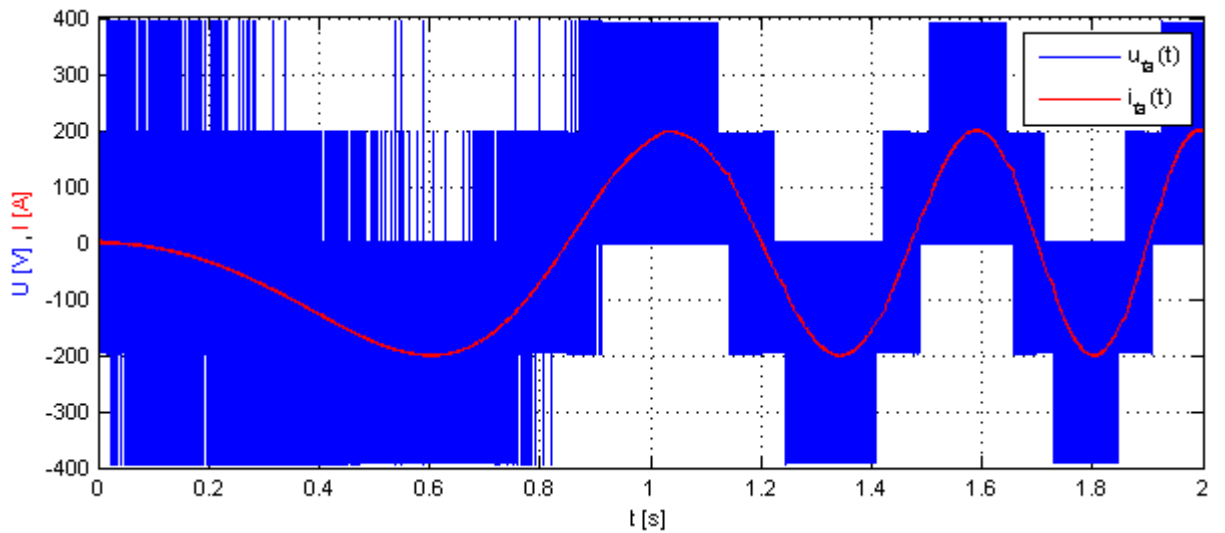
obr. 3.10 Napětí a proud na vinutí první fáze ($I_{qmax}=200A$, stoupání 5%)



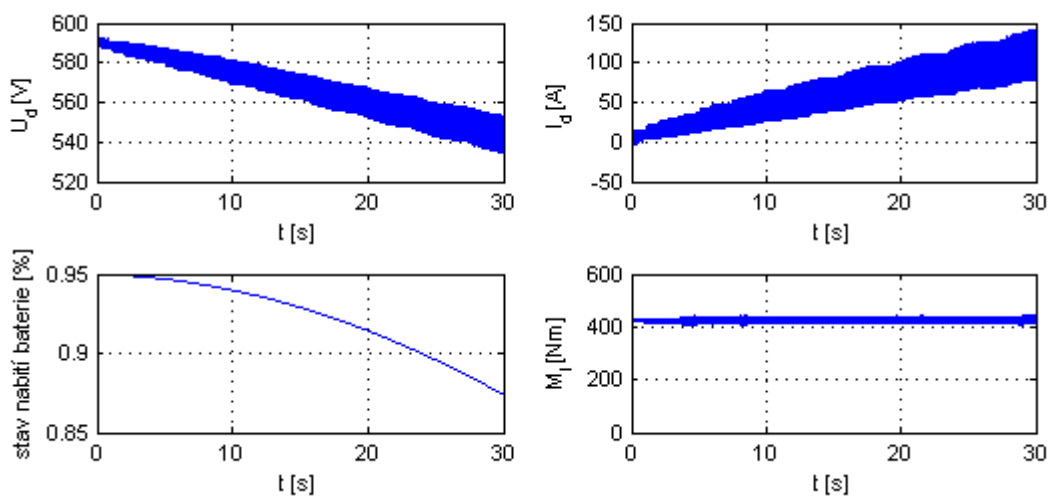
obr. 3.11 Vybrané veličiny baterie a moment motoru ($I_{qmax}=200A$, stoupání 5%)



obr. 3.12 Průběh proudů i_d a i_q ($I_{qmax}=200A$, stoupání 10%)



obr. 3.13 Napětí a proud na vinutí první fáze ($I_{qmax}=200A$, stoupání 10%)



obr. 3.14 Vybrané veličiny baterie a moment motoru ($I_{qmax}=200A$, stoupání 10%)

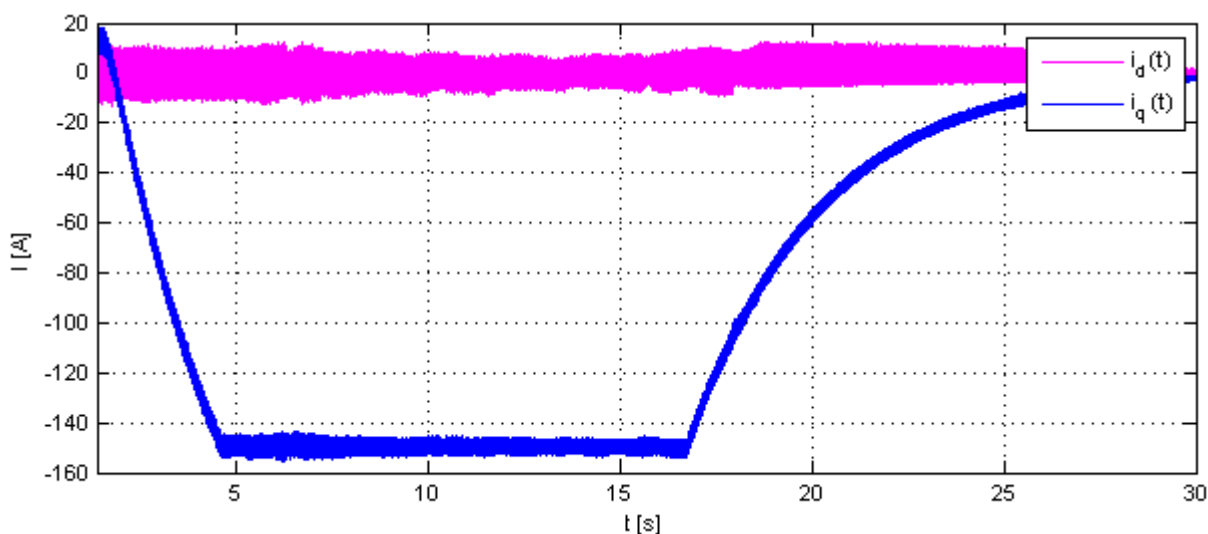
Cílem těchto simulací bylo ověřit funkčnost modelu elektromobilu při rozjezdu z klidového stavu na rychlost 90km/h. Simulace byly provedeny pro následující podmínky:

- Rozjezd s proudovým omezením $I_{q\max} = 150A$
- Rozjezd s proudovým omezením $I_{q\max} = 200A$
- Rozjezd do kopce s 5% stoupáním a proudovým omezením $I_{q\max} = 200A$
- Rozjezd do kopce s 10% stoupáním a proudovým omezením $I_{q\max} = 200A$

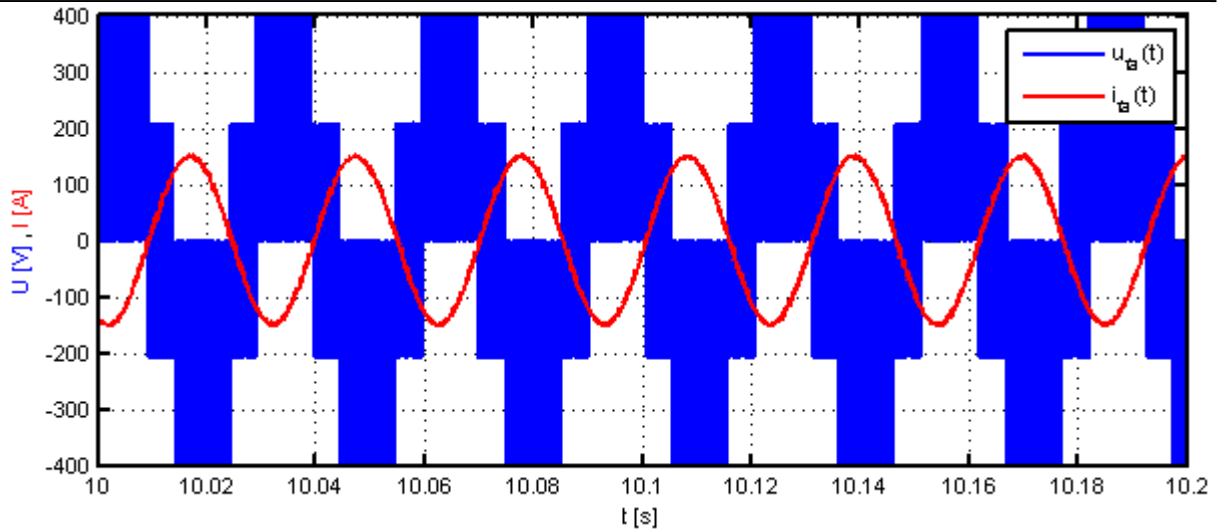
Grafy zobrazující průběhy fázových veličin a indukovaného napětí kvůli přehlednosti nezobrazují celý průběh simulace, ale jenom krátký časový usek. Fázový proud je podle předpokladů přesně ve fázi s indukovaným napětím a jeho průběh se blíží sinusoidě. Motor tedy pracuje s účinníkem blízcím se jedné, čímž se minimalizují ztráty na vedení. Ze simulací vyplývá, že rozjezd vozidla je velmi energeticky náročný. Použitá baterie sice dokáže dodávat vysoký výkon, ale má kapacitu pouze 6,5Ah a dojezd vozidla při častém rozjíždění by byl velmi malý. Motor má dostatečný točivý moment a zvládá i rozjezd do prudkého 10% stoupání. Problémem pohonu s PMSM je dosahování vysokých rychlostí, kvůli silným permanentním magnetům indukujících ve statoru velké protinapětí. Při vyšších otáčkách tak dochází k omezení proudu limitací ze strany maximálního napětí střídače. Možnost dosahování vysokých otáček lze řešit pomocí odbuzování permanentních magnetů. Tato problematika je však poměrně rozsáhlá a tak se v této práci se s režimem odbuzování nepracuje.

3.2 Rekuperační brzdění vozidla

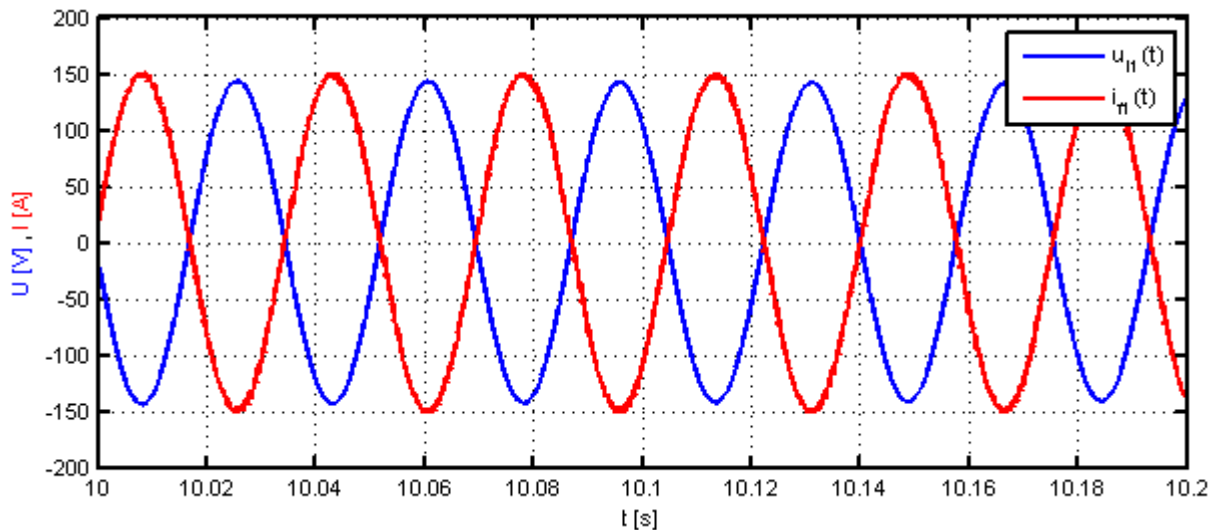
Jak již bylo dříve v práci zmíněno, výhodou elektrického pohonu automobilu je, že dokáže při brzdění přeměňovat kinetickou energii vozidla zpět na elektrickou a ukládat ji v baterii. Následující simulace ukazuje průběhy sledovaných veličin při brzdění vozidla z rychlosti 90km/h do zastavení při proudovém omezení 150A a 200A.



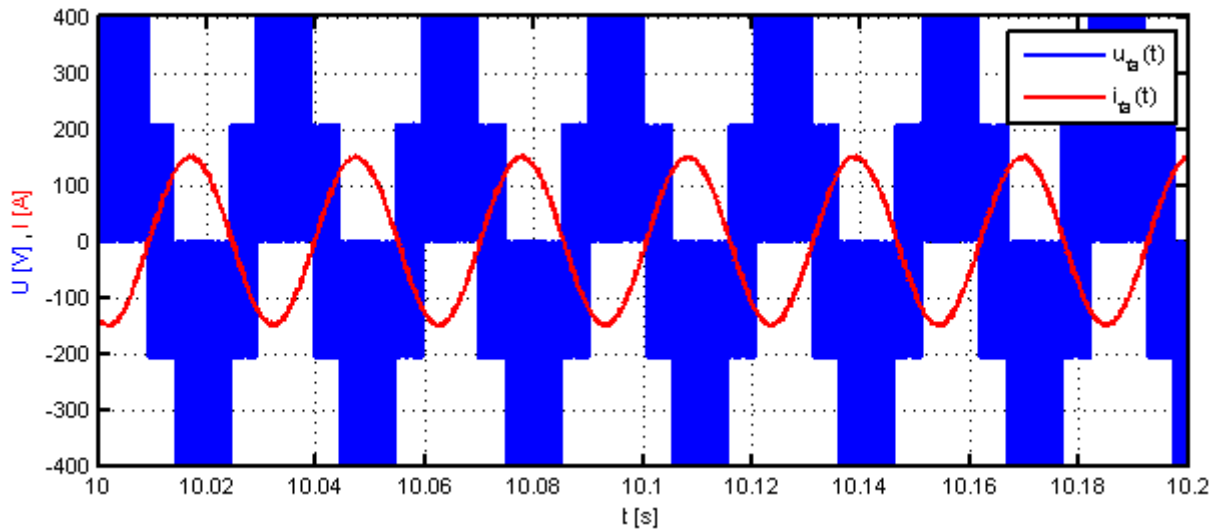
obr. 3.15 Průběh proudů i_d a i_q ($I_{q\min} = -150A$, brzdění 90-0 km/h)



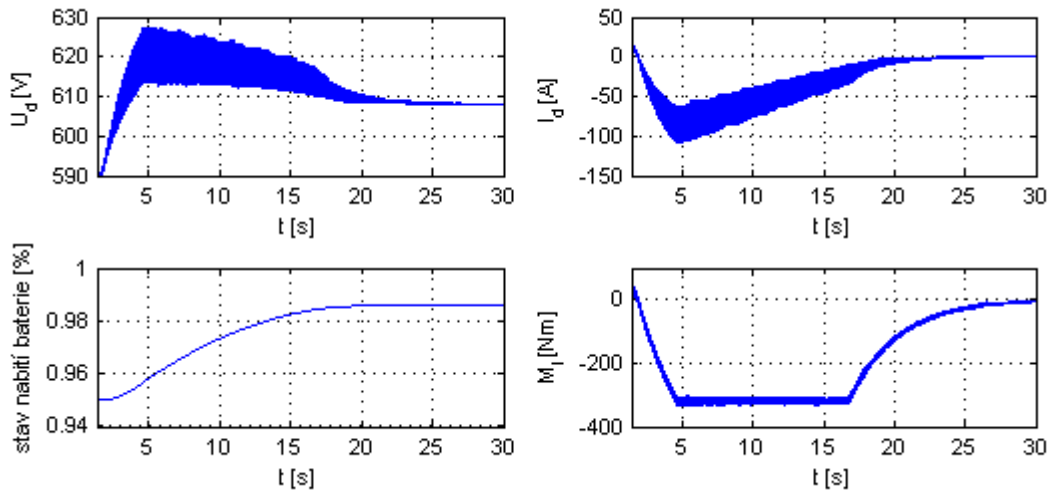
obr. 3.16 Napětí a proud na vinutí první fáze ($I_{qmin} = -150A$, brzdění 90-0 km/h)



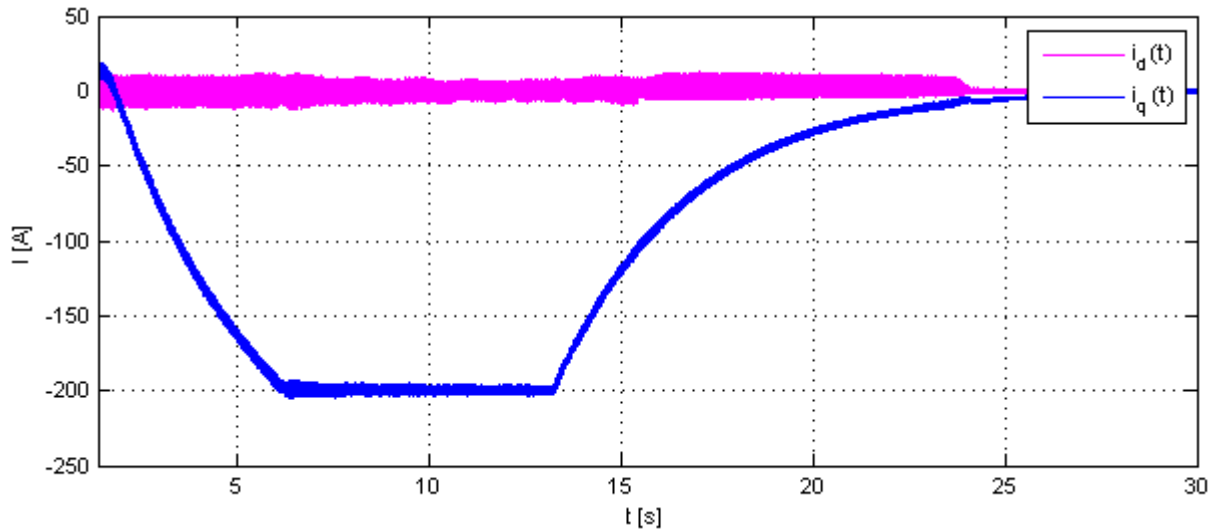
obr. 3.17 Průběh indukovaného napětí a proudu ($I_{qmin} = -150A$, brzdění 90-0 km/h)



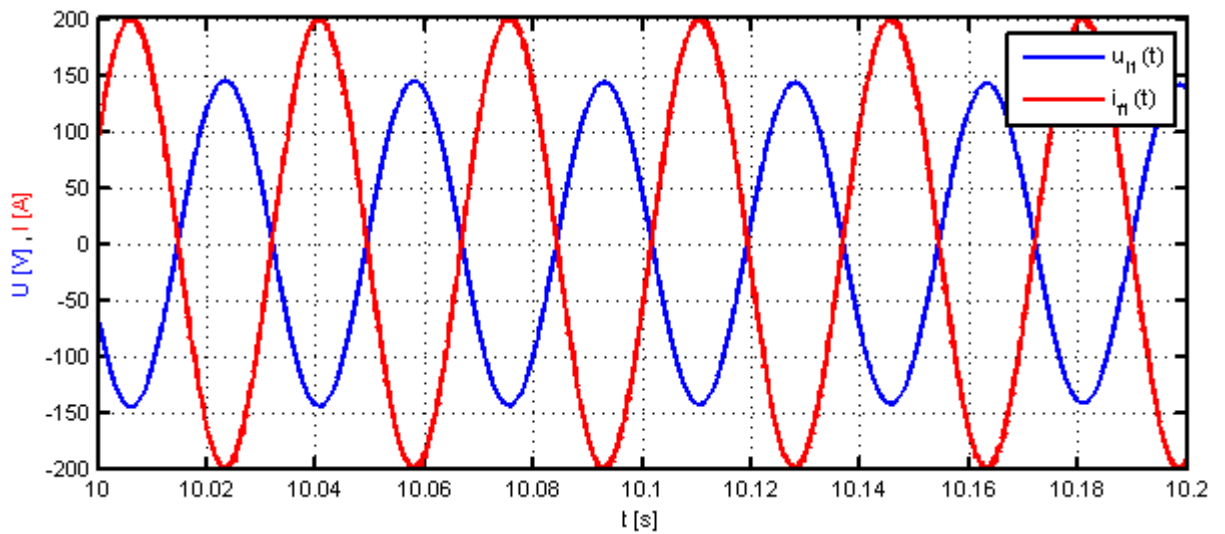
obr. 3.18 Napětí a proud na vinutí první fáze ($I_{qmin} = -150A$, brzdění 90-0 km/h)



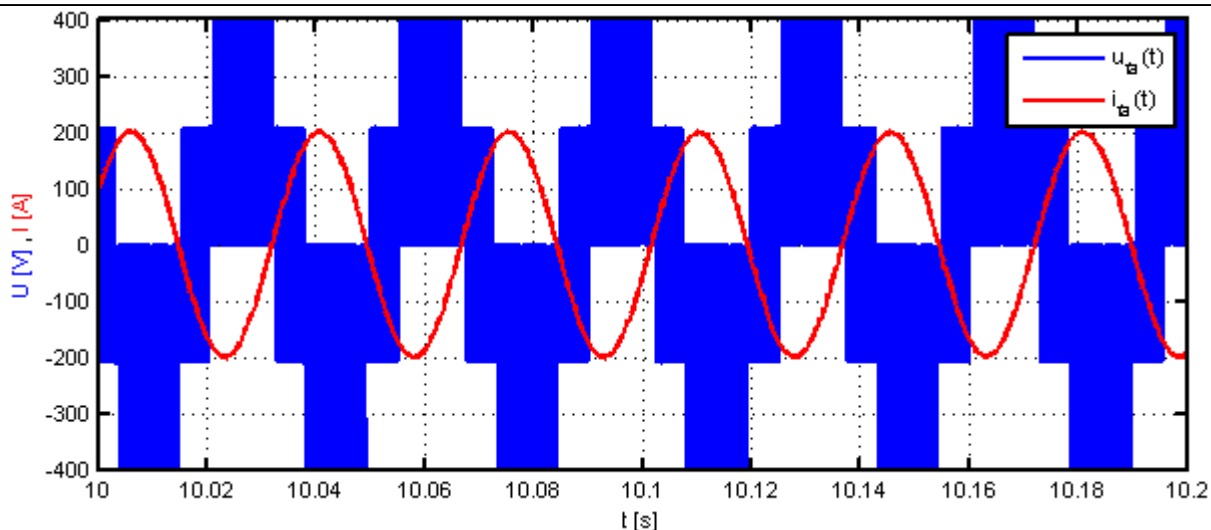
obr. 3.19 Vybrané veličiny baterie a moment motoru ($I_{qmin} = -150A$, brzdění 90-0 km/h)



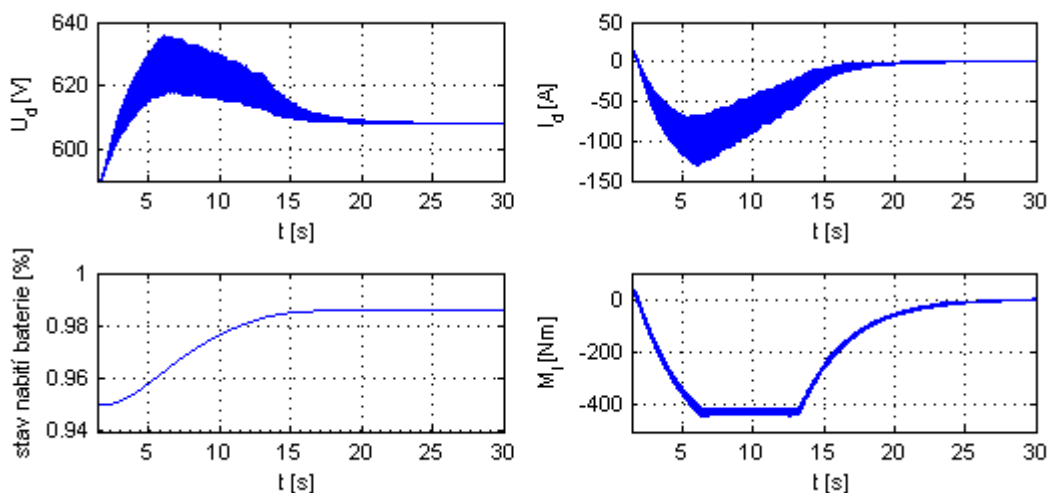
obr. 3.20 Průběh proudů i_d a i_q ($I_{qmin} = -200A$, brzdění 90-0 km/h)



obr. 3.21 Průběh indukovaného napětí a proudu ($I_{qmin} = -200A$, brzdění 90-0 km/h)



obr. 3.22 Napětí a proud na vinutí první fáze ($I_{qmin} = -200A$, brzdění 90-0 km/h)

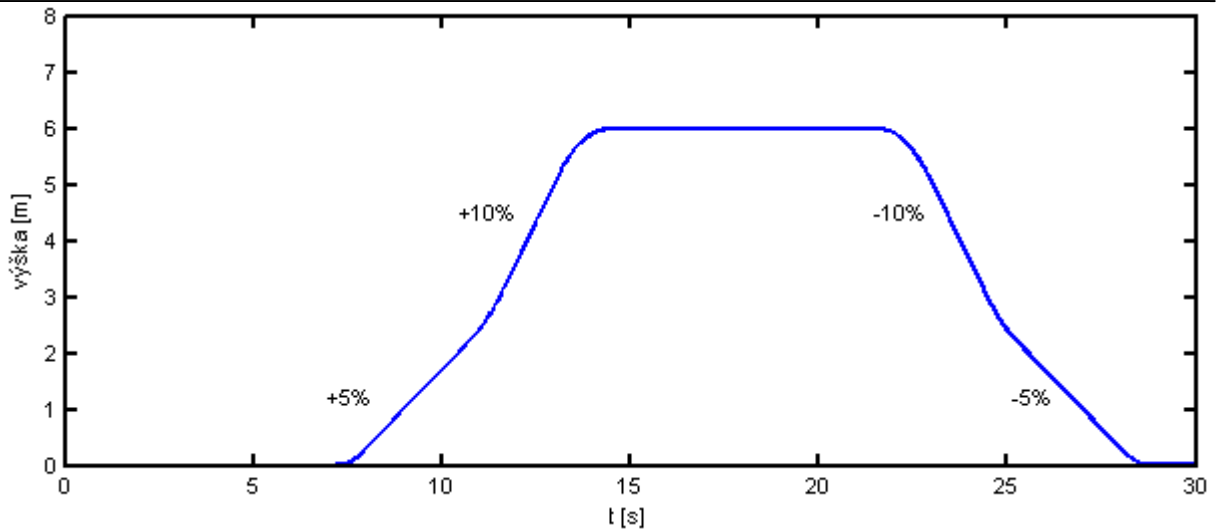


obr. 3.23 Vybrané veličiny baterie a moment motoru ($I_{qmin} = -200A$, brzdění 90-0 km/h)

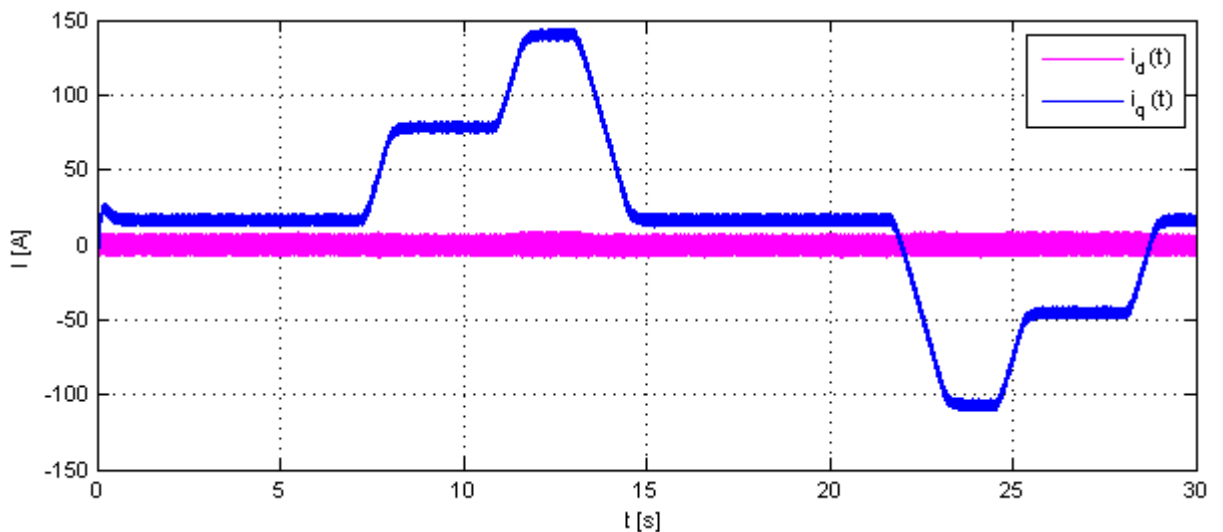
Průběhy ukazují, že fázový proud má sinusový tvar a je přesně v protifázi s indukovaným napětím. Motor pracuje v generátorickém režimu a trojfázový střídač se pro něho jeví jako odporová zátěž. Ze stavu baterie je vidět, že vrácená energie při rekuperačním brzdění je zhruba polovina z energie potřebné na rozjezd automobilu zpět na 90km/h. Zbytek energie byl spotřebován na překonání odporu vzduchu a na pokrytí ztrát v pneumatikách, motoru, měniči a vnitřním odporu baterie.

3.3 Jízda konstantní rychlostí

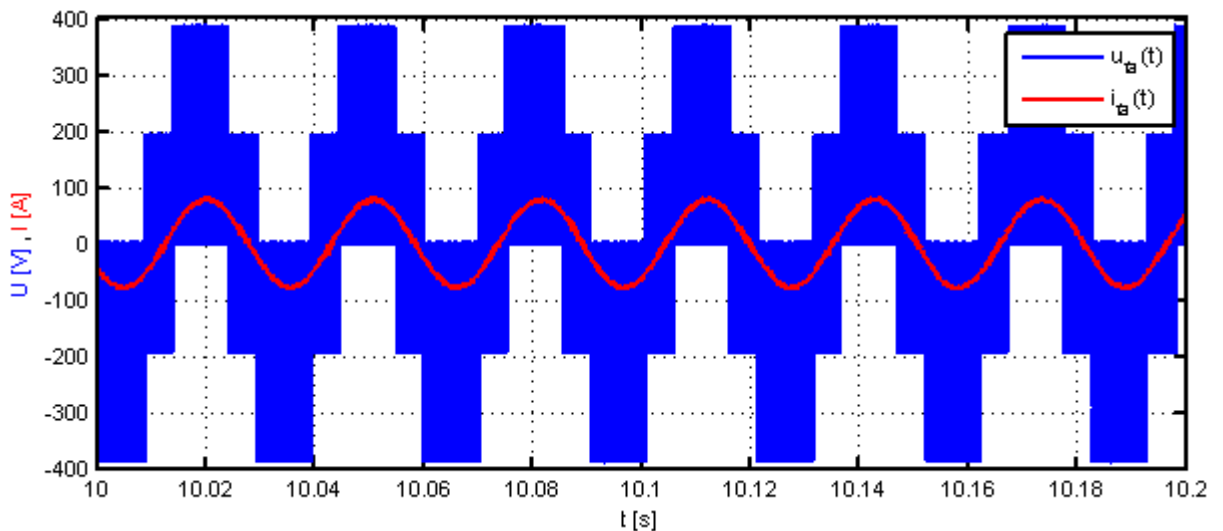
Následující simulace ukazuje jízdu se zapnutým tempomatem nastaveným na rychlost 50km/h. Tempomat je realizovaný nadřazenou otáčkovou smyčkou s PI regulátorem. Během jízdy se plynule mění sklon vozovky. Výškový profil testovací trati je na obr. 3.24. Poměr stoupání a klesání je nastaven na 1:1.



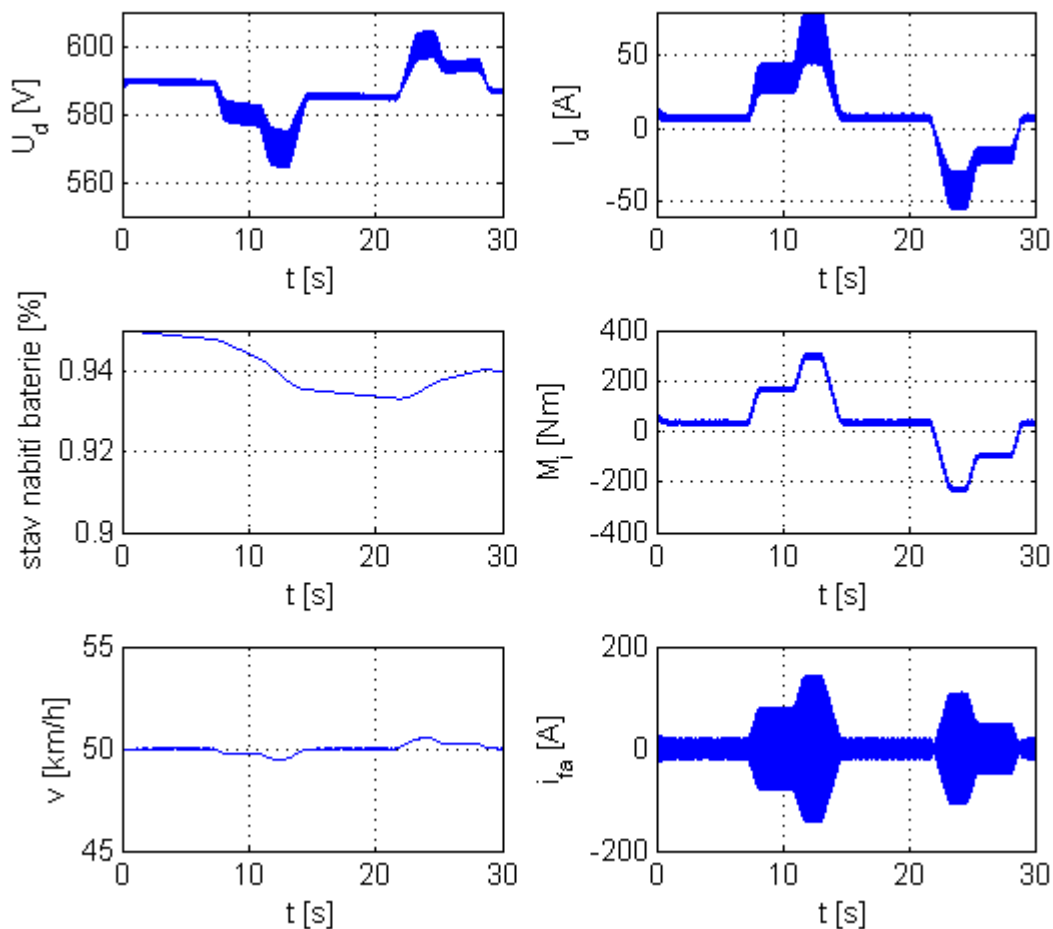
obr. 3.24 Výškový profil trati



obr. 3.25 Průběh proudů i_d a i_q (udržování konstantní rychlosti 50km/h)



obr. 3.26 Napětí a proud na vinutí první fáze (udržování konstantní rychlosti 50km/h)

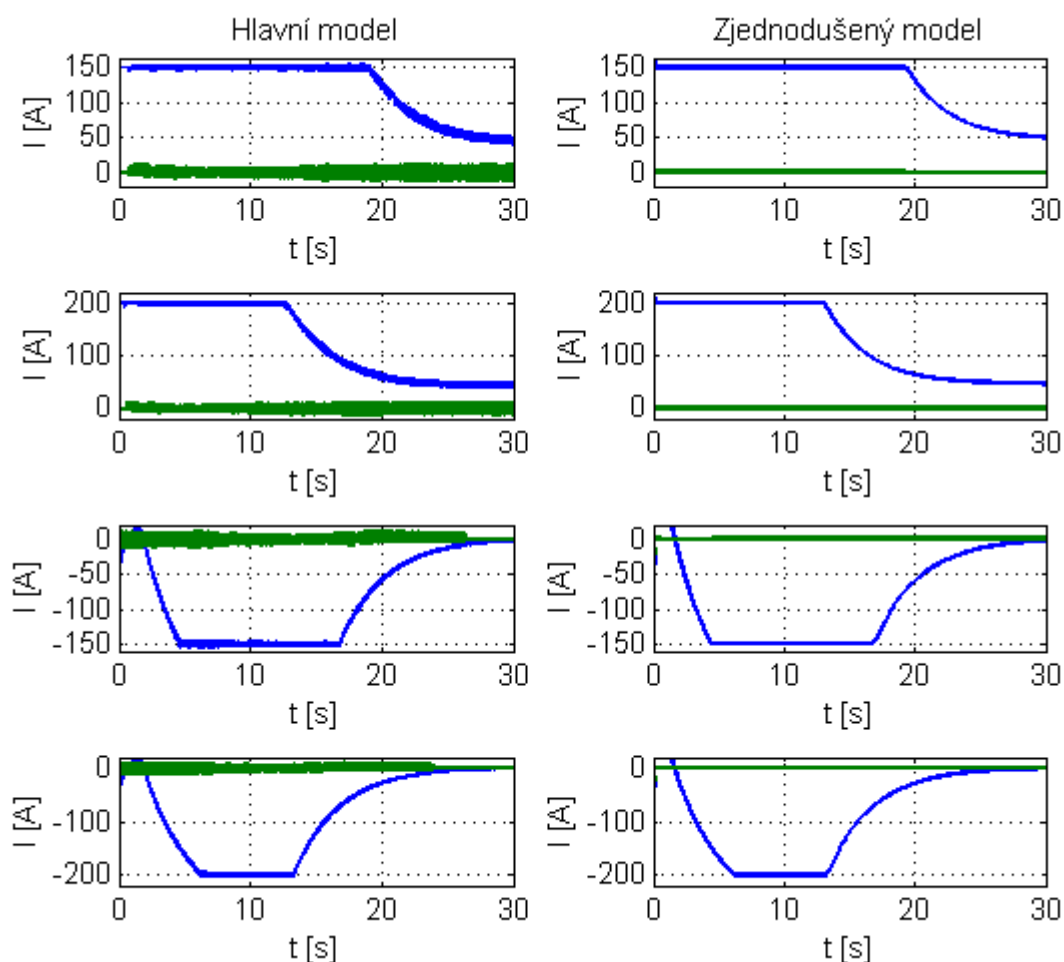


obr. 3.27 Vybrané veličiny baterie, moment motoru, fázový proud a rychlost

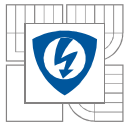
Z průběhu rychlosti vozidla jde vidět, že regulátor otáček funguje poměrně přesně a odchylka od požadované rychlosti je i při změnách zatížení je téměř zanedbatelná. Při ustálené rychlosti 50 km/h po rovině jsou odporové síly působící na automobil malé a motor si vystačí s malým točivým momentem. Zatížení motoru se rapidně zvýší při stoupání a tím pádem i odebíraný proud. Při klesání motor plynule přechází do generátorického režimu a vrací dříve odebranou potenciální energii zpět do baterie.

3.4 Srovnání výsledku s modelem PMSM v d-q souřadnicích

Pro porovnání správnosti výsledků simulace elektromobilu posloužil model synchronního motoru v d-q osách, jehož rovnice jsou odvozeny v kapitole 1.7.4. PMSM v d-q byl připojený na stejný model zátěže a regulátory proudu jako hlavní model a sdílel totožné parametry. Na obr. 3.28 je srovnání výsledku při simulaci rozjezdu vozidla z 0-90 km/h při proudovém omezení proudu I_q na 150A a 200A a rekuperační brzdění při tomtéž proudovém omezení. Z tohoto porovnání zřetelně vyplývá, že proudy se téměř shodují jak tvarem průběhu, tak i v absolutních hodnotách. Zvlnění proudu u hlavního modelu je způsobené jednak napájením motoru z měniče pulsním napětím a také kolísáním napětí na baterii. Vliv má nejspíš také metoda výpočtu v Matlabu, u kterého byl velký problém vybrat funkční řešič a jeho nastavení tak, aby šla simulace vůbec spustit. Za těchto okolností považují dosažené výsledky za úspěch.



obr. 3.28 Srovnání proudů i_d a i_q s modelem v d-q osách



4 ZÁVĚR

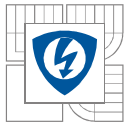
Tato diplomová práce se zabývá trakčním pohonem elektromobilu. Pohon vozidla zajišťuje synchronní motor s permanentními magnety. Motor je napájen z Li-Ion baterie přes trojfázový střídač. Diplomová práce je rozdělena do třech hlavních částí.

První část obsahuje teoretické poznatky o elektrických pohonech obecně. Popisuje výhody náhrady konvenčního spalovacího motoru elektromotorem. Dále se věnuje různým typům akumulátorů používaných v elektrické trakci a popisuje jejich hlavní vlastnosti. V následující kapitole je rozbor základních typu pulsních tranzistorových měničů, princip jejich činnosti a řízení. Hlavním úkolem práce bylo vytvořit komplexní model elektromobilu v programu MATLAB/SIMULINK, práce proto obsahuje krátké představení tohoto softwarového vybavení. V závěru teoretické části je kapitola věnovaná výběru vhodného typu elektromotoru a matematický popis synchronního motoru s permanentními magnety.

Druhá část práce popisuje jednotlivé podsystémy modelu elektrického vozidla Li-Ion baterii, vektorové řízený trojfázový měnič umožňující práci v obou směrech toku energie, synchronní motor transformovaný do d-q os a také jako zátěž pro měnič s časově proměnnými vlastními a vzájemnými indukčnostmi, návrh regulátorů proudů i_d a i_q a model zatížení motoru, který zohledňuje vliv aerodynamického odporu, valivého tření pneumatik a gravitace.

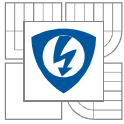
Poslední část obsahuje kompletní model elektromobilu a je zde provedena série simulací různých režimů jízdy vozidla. Simulován je rozjezd vozidla z 0-90km/h při proudovém omezení 150A a 200A na rovině, stoupání 5% a 10%. Dále je simulováno rekuperační brzdění z 90km/h do nulové rychlosti. Jako poslední simulace je prezentován režim udržování konstantní navolené rychlosti při proměnném sklonu vozovky. Pro tento účel byla přidána k řízení proudu nadřazená regulace otáček. V této simulaci synchronní stroj plynule přechází z motorického do generátorického režimu. Výsledky simulací jsou porovnány se zjednodušeným modelem synchronního motoru v d-q osách. Z tohoto porovnání vyplynulo, že vypočítané výsledky simulací odpovídají předpokladům a model pracuje správně.

Téma pohonu elektromobilu je velmi rozsáhlé a obsahuje ještě mnoho problémů, kterým by bylo vhodné věnovat pozornost. Model trojfázového střídače například nepočítá s přepínacími ztrátami na tranzistorech. Model PMSM nezohledňuje ztráty vířivými proudy a hysterezní ztráty. Dále by bylo vhodné zapracovat do modelu režim odbuzování permanentních magnetů pro dosahování vyšších otáček motoru. Řešení těchto a dalších problémů by mohlo pokračovat v navazující práci.



LITERATURA

- [1] KOLÁČNÝ, Josef. *Elektrické pohony*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií : VUT Brno, 2006. 127 s.
- [2] PATOČKA, Miroslav. *Pulsní měniče bez transformátoru*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií : VUT Brno, 2005. 109 s.
- [3] KARBAN, Pavel. *Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink*. Brno : Computer Press, a.s., 2006. 220 s.
- [4] Simscape: Modelování a simulace fyzikálních systémů
Dostupné z WWW: <<http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/aknihovny/simscape/>>.
- [5] Neborák, Ivo: Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů
Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, 2002
- [6] ONG, Chee-Mun. *Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab&Simulink* .
School of Electrical & Computer Engineering : Purdue University, 1998. 641 s.
- [7] GREGORA, Stanislav ; NOVÁK, Jaroslav . *Modernizace trakčních pohonů vozidel elektrické trakce*. Praha : ČVUT, 2004. 13 s.
- [8] SKALICKÝ, Jiří . *Elektrické regulované pohony*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií : VUT Brno, 2007. 123 s.
- [9] MĚŘIČKA, J.; ZOUBEK, Z. *Obecná teorie elektrického stroje*. Spálená 51, Praha 1 : SNTL, 1973. 164 s.
- [10] *Lithiové - Lithium Ion baterie* [online]. 2010 [cit. 2011-05-21]. FgFORTE s.r.o.. Dostupné z WWW: <<http://www.fg-forte.cz/>>.
- [11] *Battery. Mathworks Product Documentation* [online]. 2009, 12, [cit. 2011-03-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/powersys/ref/battery.html>>.



SEZNAM PŘÍLOH

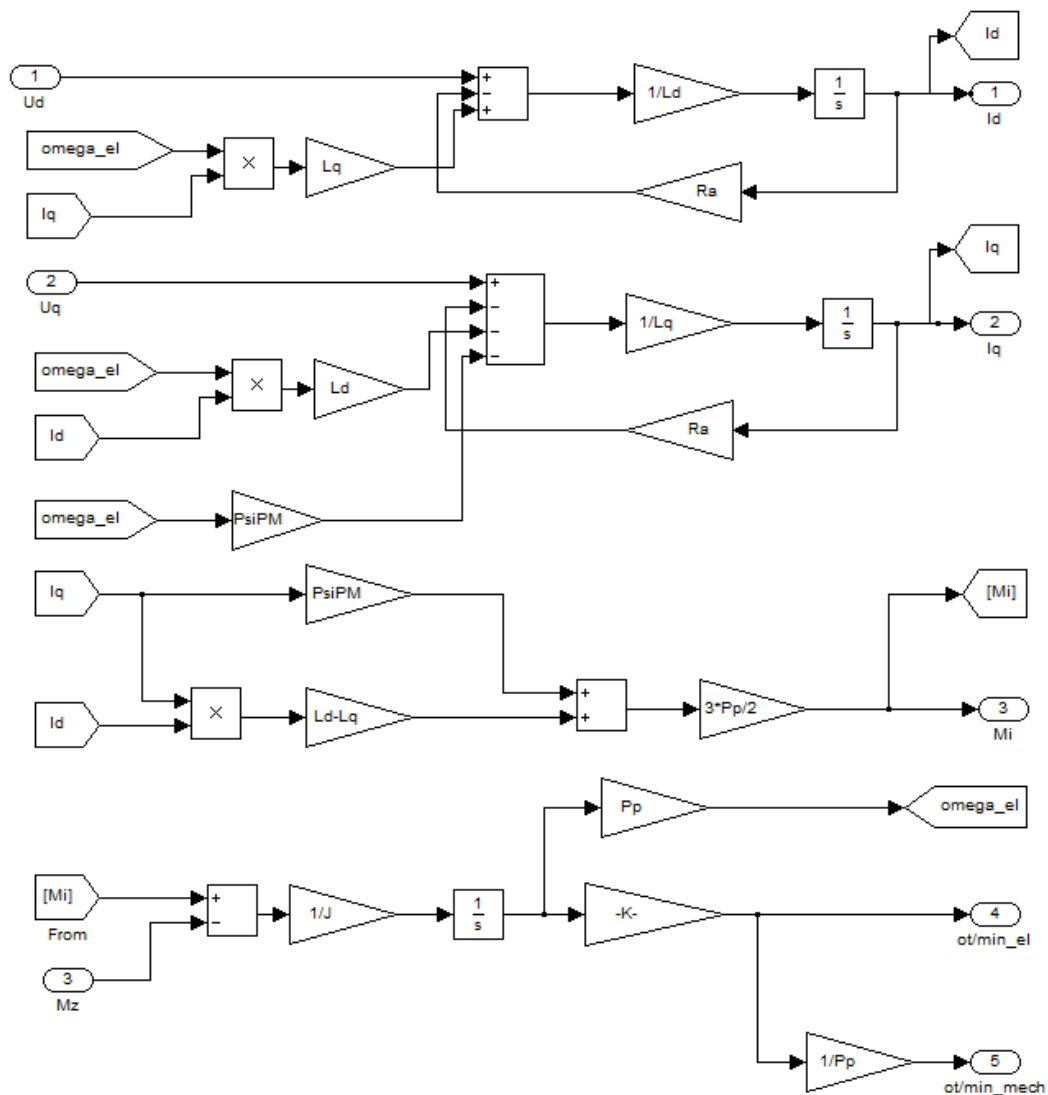
Příloha A: model PMSM v d-q osách

Příloha B: model Li-Ion baterie

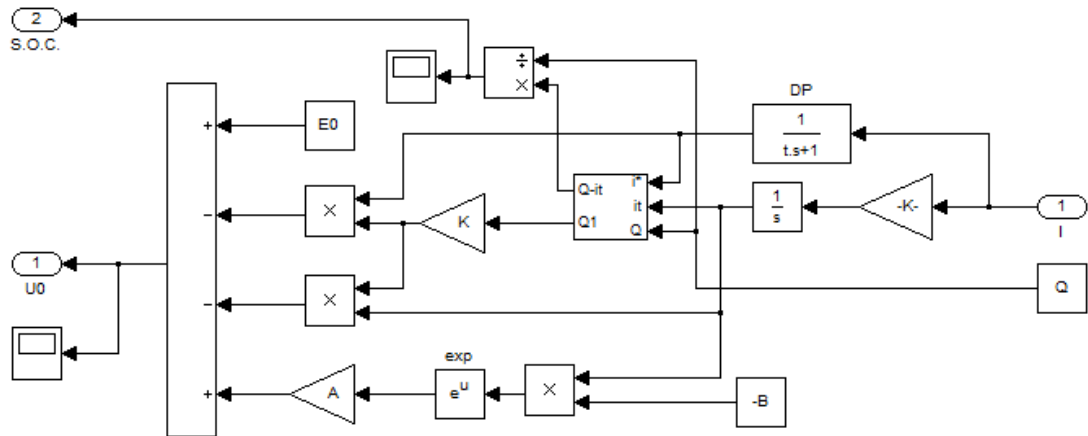
Příloha C: model budiče výkonových prvků

Příloha D: Kompletní parametry modelu

PŘÍLOHA A: MODEL PMSM V D-Q OSÁCH

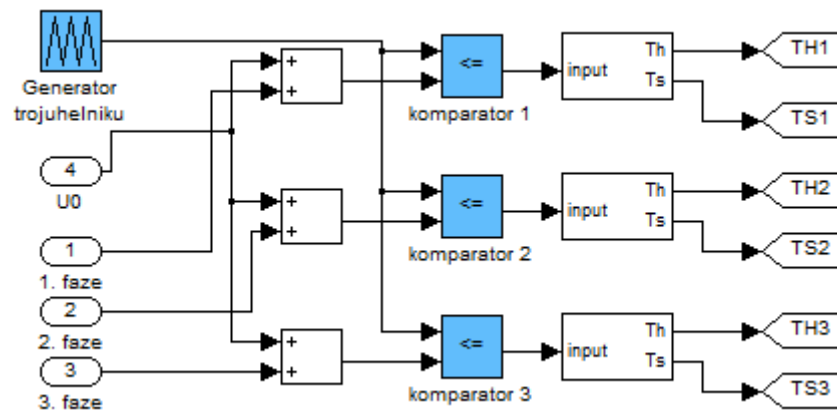


PŘÍLOHA B: MODEL LI-ION BATERIE

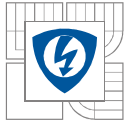


obr. 0.1 Subsystem nabíjení-vybíjení

PŘÍLOHA C: MODEL BUDIČE VÝKONOVÝCH PRVKŮ



obr. 0.1 Schéma PWM řízení v Simulinku



PŘÍLOHA D: KOMPLETNÍ PARAMETRY MODELU

```
%parametry auta
m=1000; %hmotnost auta
g=9.81; %gravitacni zrychleni
Cx=0.34; %soucinitel odporu vzduchu
S=3; %celni plocha auta
Crr=0.01; %soucinitel valiveho odporu
rkola=0.27; %polomer kol auta
ro=1.2256; %hustota vzduchu v 0m nadmorske vysky
Kp=1; %prevod

%parametry synchronniho motoru s PM
Ld = 0.0016; %indukcnost v ose d
Lq = 0.0037; %indukcnost v ose q
Ra = 0.05; %odpor vinutí satoru
PsiPM = 0.8; %magnetický tok PM
J=(Kp*rkola)*(Kp*rkola)*m; %moment setrvacnosti auta
Pp=4; %pocet polaparů
L0=(Ld+Lq)/2; %středni indukcnost
Lms=(Lq-Ld)/2; %kolisani indukcnosti

%navrh regulatoru proudu metodou optimalniho modulu
f=2000;%frekvence nosného signalu
Kfi=400;%zesileni menice
tau0=(1/f)*2*Kfi/Ra %
tauq=Lq/Ra
taud=Ld/Ra
t1=4*1/f;
t2=12*(1/f)*(1/f)*PsiPM*Pp;

%zatez menice
R=Ra;
L=L0;
Ui=100;
%vlastnosti polovodicu
RTon=0.001; %odpor v sepnutem stavu
RToff=1/100000000; %vodivost ve vypnutém stavu
FV=0.6; %ubytek napeti na diode
RDon=0.003; %odpor v propustném smeru
RDoff=1/100000000; %vodivost v zavernem smeru

%parametry baterie
c_ser = 150; %pocet clanku v serii
c_par = 1; %pocet clanku paralelne
E0 = 3.8*c_ser; % constant voltage
K = 0.0014043; % polarization rezistance
Q = 6.5*c_par; % maximum capacity Ah
A = 0.31104*c_ser; %expo voltage
B = 2.3077*c_par; %expo capacity
R0 = 0.002*c_ser/c_par; %internal resistance
t = 30 ; %response time
N = 95; % počáteční nabití
Qp = Q*(1- N/100);
Lpar = 10e-9; % 10nH parazitní indukčnost
```