

Fakulta elektrotechnická Regionální inovační centrum elektrotechniky

Využití FCS-MPC pro potlačení elektromagnetického hluku pohonu 2

Pracoviště: RICE
Číslo dokumentu: 22190-029-2017
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Ing. Michal Kroneisl
Hlavní řešitel: Ing. Michal Kroneisl
Počet stran: 18
Datum vydání: 20.09.2017
Oborové zařazení: JA – Elektronika a optoelektronika, elektrotechnika

Zadavatel / zákazník:

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Regionální inovační centrum
elektrotechniky
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Ing. Michal Kroneisl
tel. 37763 4139
mikr@rice.zcu.cz

Tato práce vznikla s podporou projektů CIDAM TE02000103 a SGS-2015-038

Anotace

Tato výzkumná zpráva popisuje řídicí algoritmus pohonu s asynchronním motorem založený na FCS-MPC (Finite Control Set - Model Predictive Control) a využívající model motoru v rotujícím souřadném systému. Řídicí algoritmus je využit pro snížení elektromagnetického hluku pohonu.

Klíčová slova

Asynchronní motor, střídač, elektromagnetický hluk, FCS-MPC

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Application of FCS-MPC for reducing of electric drive electromagnetic noise 2

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report describes control algorithm of electric drive with induction motor based on FCS-MPC (Finite Control Set - Model Predictive Control) which is using mathematical model in rotational coordinates. The control algorithm is used to decrease the electromagnetic noise of the drive.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Induction motor, inverter, electromagnetic noise, FCS-MPC

Seznam symbolů a zkratk

FCS-MPC	Prediktivní řízení s matematickým modelem a konečnou množinou akčních zásahů (Finite Control Set - Model Predictive Control)
f_R	rotorová frekvence
f_S	statorová frekvence
f_T	spínací frekvence
f_{y_d}, f_{y_q}	výstupy filtrů statorového proudu
g	ztrátová funkce
i_{pd1}, i_{pq1}	predikovaný statorový proud pro kompenzaci dopravního zpoždění (v rotujícím souřadném systému)
i_{pd2}, i_{pq2}	vektor predikovaných statorových proudů (v rotujícím souřadném systému)
i_{sx}, i_{sy}	statorový proud (ve stojícím souřadném systému)
i_{sd}, i_{sq}	statorový proud (v rotujícím souřadném systému)
i_{sdw}, i_{sqw}	požadovaný statorový proud (v rotujícím souřadném systému)
J	moment setrvačnosti
L_h	hlavní (magnetizační) indukčnost stroje
$L_{r\sigma}$	rozptylová indukčnost rotoru
$L_{s\sigma}$	rozptylová indukčnost statoru
M	hloubka modulace
p_p	počet pólů
PWM	pulsně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
R_r	rotorový odpor
R_s	statorový odpor
T_s	vzorkovací perioda
u_{a0}, u_{b0}, u_{c0}	fázové napětí střídače
U_d	napětí stejnosměrného obvodu
u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}	fázové napětí motoru
u_{sx}, u_{sy}	vektor střídačem realizovatelných napětí (ve stojícím souřadném systému)
u_{sx}, u_{sy}	fázové napětí motoru (ve stojícím souřadném systému)
u_{sd}, u_{sq}	vektor střídačem realizovatelných napětí (v rotujícím souřadném systému)
u_{sd}, u_{sq}	fázové napětí motoru (v rotujícím souřadném systému)
ψ_{rx}, ψ_{ry}	rotorový tok (ve stojícím souřadném systému)
ψ_{rd}, ψ_{rq}	rotorový tok (v rotujícím souřadném systému)

ϑ	vzájemné natočení stojící a rotující souřadné soustavy
ϑ_m	mechanický úhel
$\vartheta_{r\psi}$	úhel mezi rotorovým tokem a rotorem
ω_m	mechanická úhlová frekvence
$\omega_{r\psi}$	úhlová rychlost rotorového toku vůči rotoru
ω_s	úhlová statorová frekvence
$\omega_{s\psi}$	úhlová rychlost rotorového toku vůči statoru
ω_T	úhlová spínací frekvence

Obsah

1 ÚVOD.....	6
2 FCS-MPC A ŘÍZENÍ STŘÍDAČE.....	7
3 ALGORITMUS FCS-MPC V ROTUJÍCÍM SOUŘADNÉM SYSTÉMU.....	8
4 TESTOVÁNÍ ALGORITMU NA POHONU A MĚŘENÍ.....	12
5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	13
6 ZÁVĚR.....	15
7 LITERATURA.....	16

1 Úvod

Elektrický pohon při svém provozu ovlivňuje okolí různými způsoby. Jedním z nich je hluk, který se šíří z motoru. Tento hluk lze rozdělit na několik druhů podle způsobu vzniku:

- Mechanický hluk - hluk ložisek, převodů, vibrace vlivem excentricity
- Aerodynamický hluk - uplatní se především v případě nuceného chlazení vzduchem
- Elektromagnetický hluk - následek časově proměnných elektromagnetických sil

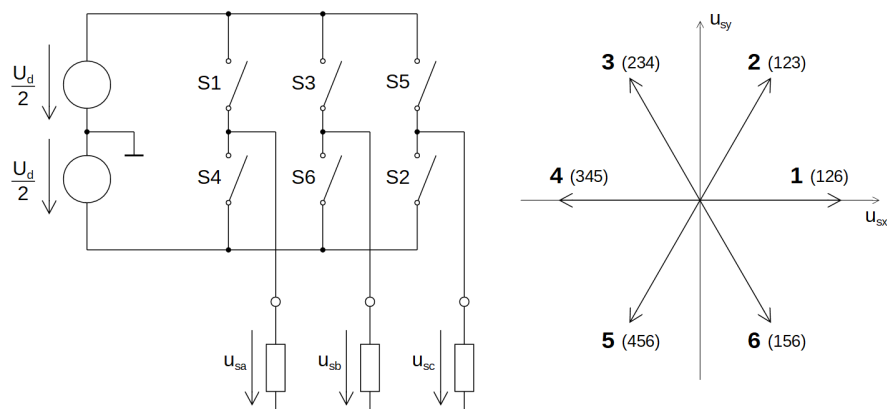
Elektromagnetický hluk vzniká v každém elektrickém stroji, ať už je napájen ze sítě nebo ze střídače. Napájení ze střídače však do frekvenčního spektra napětí, proudu i hluku přináší další nežádoucí frekvence. Hluk přidáný použitím střídače lze však podstatně ovlivnit způsobem jeho řízení.

Uvažujeme-li pohon s asynchronním motorem a napěťovým střídačem, který je řízen PWM, budou se ve spektru proudu objevovat frekvence odvozené ze spínací a statorové frekvence. To má za následek „pískavý“ zvuk, který může v některých případech působit velmi rušivě. Z pohledu psychoakustiky vykazuje zvuk pohonu při použití PWM vysokou tonalitu. To znamená, že energie je soustředěna do určitých frekvencí, které ve spektru tvoří „špičky“. Z hlediska vnímání hluku člověkem by naopak byl méně rušivý zvuk s plochým spektrem, v ideálním případě blízcím se spektru bílého šumu, který vykazuje nízkou tonalitu.

Tato zpráva popisuje řídicí algoritmus pohonu, který má za úkol potlačovat elektromagnetický hluk, či alespoň zmenšovat jeho rušivý vliv. Algoritmus je založen na FCS-MPC s tvarováním spektra proudu a využívá matematický model v rotujícím souřadném systému. Tento algoritmus byl nasimulován a implementován na reálném pohonu. Výsledky měření jsou porovnány s obvyklým řízením s PWM.

2 FCS-MPC a řízení střídače

Řídicí algoritmus je založen na FCS-MPC (Finite Control Set - Model Predictive Control), tedy prediktivním řízení s matematickým modelem a konečným počtem akčních zásahů. Řízení funguje tak, že pro každý z možných akčních zásahů je matematickým modelem predikována odezva řízeného systému a pak je vybrán ten akční zásah, který poskytuje výsledek nejbližší požadovanému stavu. V případě řízení pohonu s napěťovým střídačem je množina akčních zásahů tvořena vektory napětí, které je střídač schopen na výstupu vytvořit.



Obr. 2.1: Spínací kombinace a odpovídající vektory napětí ve stojícím souřadném systému

Tab. 2.1: Spínací kombinace a vektory napětí

Číslo vektoru	Spínací kombinace	Vektor napětí	
		$\frac{u_{sx}}{U_d}$	$\frac{u_{sy}}{U_d}$
0	1,3,5	0	0
1	1,2,6	$\frac{2}{3}$	0
2	1,2,3	$\frac{1}{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$
3	2,3,4	$-\frac{1}{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$
4	3,4,5	$-\frac{2}{3}$	0
5	4,5,6	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$
6	1,5,6	$\frac{1}{3}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$
7	2,4,6	0	0

3 Algoritmus FCS-MPC v rotujícím souřadném systému

Považujeme-li otáčky stroje za konstantní nebo měnící se pomalu, lze asynchronní stroj popsat 4 stavovými rovnicemi. Za stavové veličiny byl zvolen rotorový tok a statorový proud v souřadném systému dq. Osa d je svázána s rotorovým tokem, díky čemuž je jedna ze složek rotorového toku nulová. Rovnice mají tento tvar:

$$\frac{di_{sd}}{dt} = -\alpha i_{sd} + \omega_s \Psi_{sq} + \beta \Psi_{rd} + \delta u_{sd} \quad (3.1)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\omega_s \Psi_{sd} - \mu i_{sq} - \eta \omega_s \Psi_{rd} + \delta u_{sq} \quad (3.2)$$

$$\frac{d\Psi_{rd}}{dt} = R_r \frac{L_h}{L_r} i_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \Psi_{rd} \quad (3.3)$$

$$\frac{d\Psi_{rq}}{dt} = 0 \quad (3.4)$$

Koeficienty v rovnicích jsou odvozeny z parametrů stroje.

$\lambda = L_{s\sigma} + L_{r\sigma} \cdot \frac{L_h}{L_r}$				
$\alpha = \frac{R_s + R_r \cdot \frac{L_h^2}{L_r^2}}{\lambda}$	$\beta = \frac{R_r \cdot \frac{L_h}{L_r^2}}{\lambda}$	$\delta = \frac{1}{\lambda}$	$\mu = \frac{R_s}{\lambda}$	$\eta = \frac{L_h}{\lambda}$

Úhlová rychlost $\omega_{s\psi}$, která se v rovnicích vyskytuje jako koeficient, je rychlostí rotace rotorového toku vůči statoru a v našem případě tedy rotace mezi stojícím a rotujícím souřadným systémem:

$$\omega_{s\psi} = p_p \omega_m + \omega_{r\psi} \quad (3.5)$$

kde $\omega_{r\psi}$ je úhlová rychlost rotorového toku vůči rotoru. Vynásobením obou stran rovnice diferenciálem času dt získáme vztah pro diferenciály úhlů:

$$\omega_{s\psi} dt = p_p \omega_m dt + \omega_{r\psi} dt \quad (3.6)$$

$$d\vartheta = p_p d\vartheta_m + d\vartheta_{r\psi} \quad (3.7)$$

Podle toho lze upravit rovnice pro statorový proud:

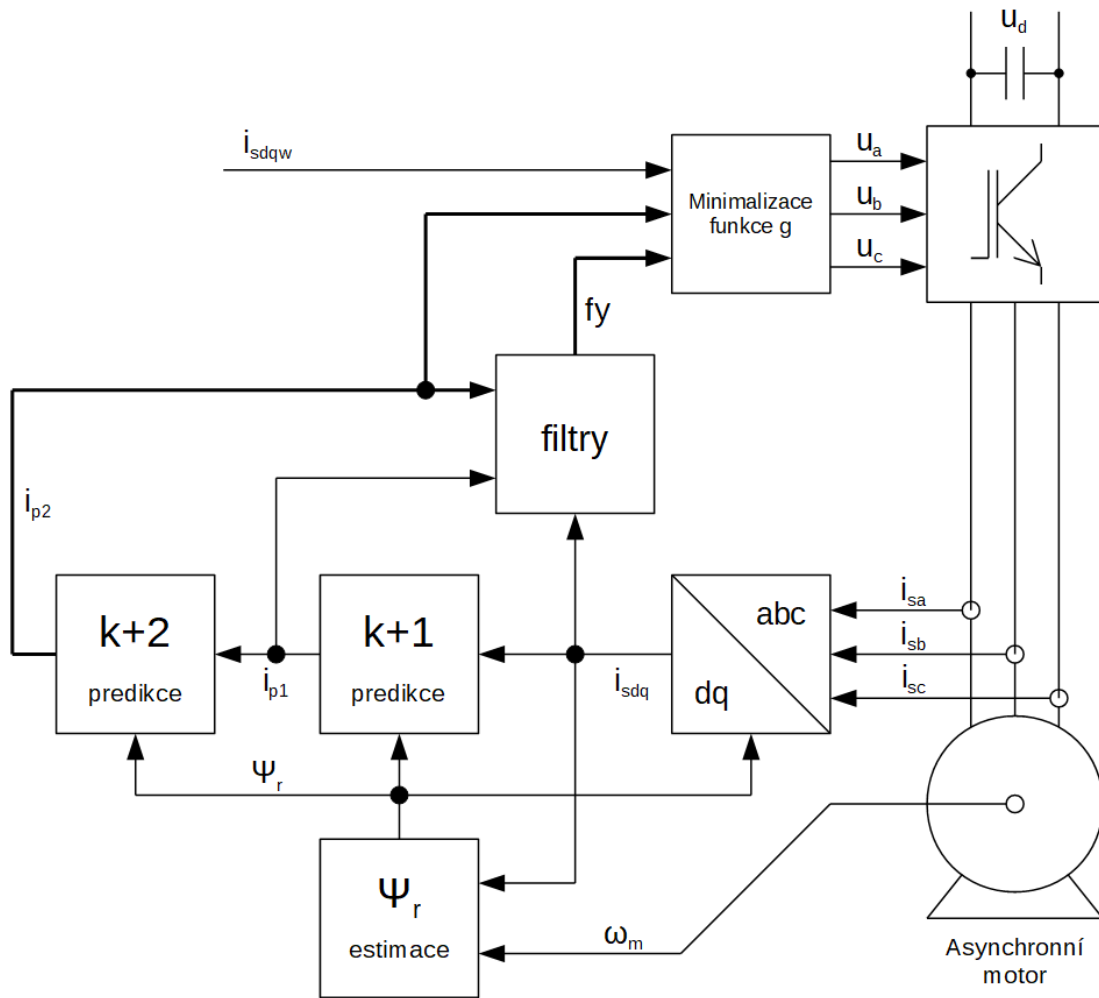
$$di_{sd} = (-\alpha i_{sd} + \beta \Psi_{rd} + \delta u_{sd}) dt + i_{sq} d\vartheta \quad (3.8)$$

$$di_{sq} = (-\mu i_{sq} + \delta u_{sq}) dt + (-i_{sd} - \eta \Psi_{rd}) d\vartheta \quad (3.9)$$

To znamená, že změna statorového proudu se skládá ze dvou složek, kde jedna je úměrná změně času a druhá změně natočení magnetického pole. Vzájemné natočení souřadných soustav ϑ lze získat různými způsoby, například estimací rotorového toku ve stojícím souřadném systému. Pro ten platí:

$$\frac{d\Psi_{rx}}{dt} = R_r \frac{L_h}{L_r} i_{sx} - \frac{R_r}{L_r} \Psi_{rx} - p_p \omega_m \Psi_{ry} \quad (3.10)$$

$$\frac{d\Psi_{ry}}{dt} = R_r \frac{L_h}{L_r} i_{sy} - \frac{R_r}{L_r} \Psi_{ry} + p_p \omega_m \Psi_{rx} \quad (3.11)$$



Obr. 3.1: Blokové schéma FCS-MPC v rotujícím souřadném systému

Tyto vztahy lze také rozepsat na dvě složky:

$$d\Psi_{rx} = \left(R_r \frac{L_h}{L_r} i_{sx} - \frac{R_r}{L_r} \Psi_{rx} \right) dt + (-p_p \Psi_{ry}) d\vartheta_m \quad (3.12)$$

$$d\Psi_{ry} = \left(R_r \frac{L_h}{L_r} i_{sy} - \frac{R_r}{L_r} \Psi_{ry} \right) dt + (p_p \Psi_{rx}) d\vartheta_m \quad (3.13)$$

Algoritmus je v procesoru implementován následujícím způsobem. Nejprve se provede estimace rotorového toku ve stojícím souřadném systému:

$$\Psi_{rx}(k) = \Psi_{rx}(k-1) + \left(R_r \frac{L_h}{L_r} i_{sx}(k-1) - \frac{R_r}{L_r} \Psi_{rx}(k-1) \right) T_s + (-p_p \Psi_{ry}(k-1)) \Delta \vartheta_m(k) \quad (3.14)$$

$$\Psi_{ry}(k) = \Psi_{ry}(k-1) + \left(R_r \frac{L_h}{L_r} i_{sy}(k-1) - \frac{R_r}{L_r} \Psi_{ry}(k-1) \right) T_s + (p_p \Psi_{rx}(k-1)) \Delta \vartheta_m(k) \quad (3.15)$$

Díky tomu získáme úhel mezi stojící a rotující souřadnou soustavou:

$$\vartheta(k) = \arctan2(\Psi_{ry}(k), \Psi_{rx}(k)) \quad (3.16)$$

$$\sin(\vartheta(k)) = \frac{\Psi_{ry}(k)}{|\Psi_r(k)|} \quad (3.17)$$

$$\cos(\vartheta(k)) = \frac{\Psi_{rx}(k)}{|\Psi_r(k)|} \quad (3.18)$$

Změřené proudy převedeme do stojící a následně rotující souřadné soustavy:

$$\begin{aligned} i_{sx}(k) &= \frac{2}{3} i_{sa}(k) - \frac{1}{3} (i_{sb}(k) + i_{sc}(k)) \\ i_{sy}(k) &= \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{sb}(k) - i_{sc}(k)) \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} i_{sd}(k) &= i_{sx}(k) \cos(\vartheta(k)) + i_{sy}(k) \sin(\vartheta(k)) \\ i_{sq}(k) &= i_{sy}(k) \cos(\vartheta(k)) - i_{sx}(k) \sin(\vartheta(k)) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Vektory výstupního napětí střídače jsou konstantní pouze ve stojícím souřadném systému. Vůči rotujícímu souřadnému systému rotují rychlostí $-\omega_{s\psi}$. Proto je třeba je v každém kroku znovu transformovat do rotujícího souřadného systému:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{sd}(k) &= \mathbf{u}_{sx}(k) \cos(\vartheta(k)) + \mathbf{u}_{sy}(k) \sin(\vartheta(k)) \\ \mathbf{u}_{sq}(k) &= \mathbf{u}_{sy}(k) \cos(\vartheta(k)) - \mathbf{u}_{sx}(k) \sin(\vartheta(k)) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Dále je třeba provést kompenzaci dopravního zpoždění, což se provede predikcí o jeden krok podle napětí nastaveného v minulém kroku:

$$\begin{aligned} i_{pd1}(k+1) &= i_{sd}(k) + (-\alpha i_{sd}(k) + \beta \Psi_{rd}(k) + \delta u_{sd}(k-1)) T_s + \\ &\quad + i_{sq}(k) \Delta \vartheta(k-1) \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$i_{pq1}(k+1) = i_{sq}(k) + (-\mu i_{sq}(k) + \delta u_{sq}(k-1))T_s + (-i_{sd}(k) - \eta \Psi_{rd}(k))\Delta \vartheta(k-1) \quad (3.23)$$

Poté se spočítá predikce na dva kroky dopředu pro všechny realizovatelné vektory napětí:

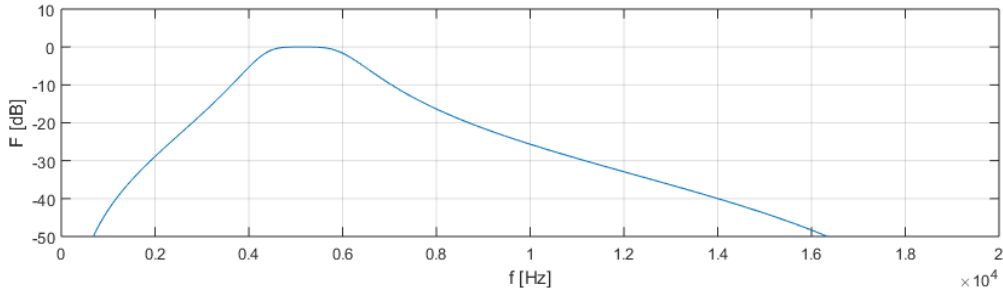
$$i_{pd2}(k+2) = i_{pd1}(k+1) + (-\alpha i_{pd1}(k+1) + \beta \Psi_{rd}(k) + \delta u_{sd}(k))T_s + i_{pq1}(k+1)\Delta \vartheta(k) \quad (3.24)$$

$$i_{pq2}(k+2) = i_{pq1}(k+1) + (-\mu i_{pq1}(k+1) + \delta u_{sq}(k))T_s + (-i_{pd1}(k+1) - \eta \Psi_{rd}(k))\Delta \vartheta(k) \quad (3.25)$$

Ztrátová funkce, kterou se řídicí algoritmus snaží minimalizovat, má tvar:

$$g = |i_{sdw} - i_{pd2}|^2 + |i_{sqw} - i_{pq2}|^2 + c_f (|fy_d|^2 + |fy_q|^2) \quad (3.26)$$

První dva členy v rovnici představují kvadráty regulačních odchylek proudu v rotujícím souřadném systému a představují řízení motoru. Proměnné f_{yd} a f_{yq} jsou výstupy filtrů proudů i_{sd} a i_{sq} . Tyto filtry jsou použity pro tvarování spektra proudu. V našem případě je potřeba ve spektru proudu potlačit frekvence v okolí mechanické rezonance motoru, která se nachází na 5200 Hz. Jako filtry jsou použity pásmové propusti 4. řádu (viz obr. 3.2). Řízení se snaží minimalizovat výstup filtrů a tím se potlačují nežádoucí frekvence ve spektru. Míru, s jakou jsou frekvence potlačeny, určuje koeficient c_f .



Obr. 3.2: Amplitudová frekvenční charakteristika filtru - pásmová propust 4200 až 6200 Hz

Filtry mají přenos:

$$F(z) = \frac{b_4 z^4 + b_3 z^3 + b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{a_4 z^4 + a_3 z^3 + a_2 z^2 + a_1 z + a_0} ; \quad a_0 = 1$$

a počítají se z predikovaných i změřených proudů:

$$fy_d(k) = b_0 i_{pd2}(k+2) + b_1 i_{pd1}(k+1) + b_2 i_{sd}(k) + b_3 i_{sd}(k-1) + b_3 i_{sd}(k-2) - a_1 fy_d(k-1) - a_2 fy_d(k-2) - a_3 fy_d(k-3) - a_4 fy_d(k-4) \quad (3.27)$$

$$fy_q(k) = b_0 i_{pq2}(k+2) + b_1 i_{pq1}(k+1) + b_2 i_{sq}(k) + b_3 i_{sq}(k-1) + b_3 i_{sq}(k-2) - a_1 fy_q(k-1) - a_2 fy_q(k-2) - a_3 fy_q(k-3) - a_4 fy_q(k-4) \quad (3.28)$$

4 Testování algoritmu na pohonu a měření

Řídicí algoritmus byl implementován v procesoru Texas Instruments TMS320F28335. Pohon se skládal z třífázového napěťového střídače a asynchronního motoru. Jeho parametry jsou uvedeny v tabulkách 4.1 a 4.2. Vzorkovací frekvence algoritmu byla 37,5 kHz. Požadovaná tokotvorná složka statorového proudu i_{sdw} byla nastavena na 5 A, momentotvorná složka i_{sqw} byla připojena na výstup PI regulátoru otáček. Požadované otáčky byly 750 ot./min., což odpovídá elektrické frekvenci 25 Hz ($p_p = 2$).

Tab. 4.1: Štítkové hodnoty použitého asynchronního motoru

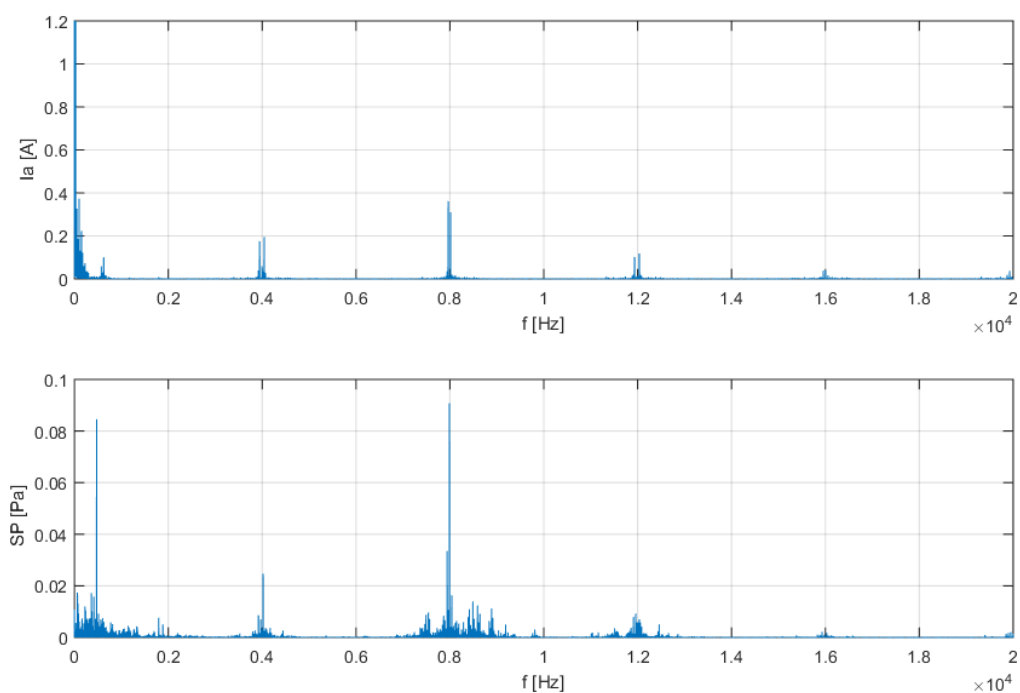
Výrobce:	Siemens	Typ:	1LA7163-4AA60-Z
Frekvence:	50 Hz	Napětí:	400 / 690 V (D/Y)
Výkon:	11 kW	Proud:	21,5 / 12,4 A (D/Y)
Účinník:	0,84	Otáčky:	1460 ot./min.

Tab. 4.2: Parametry náhradního schématu motoru

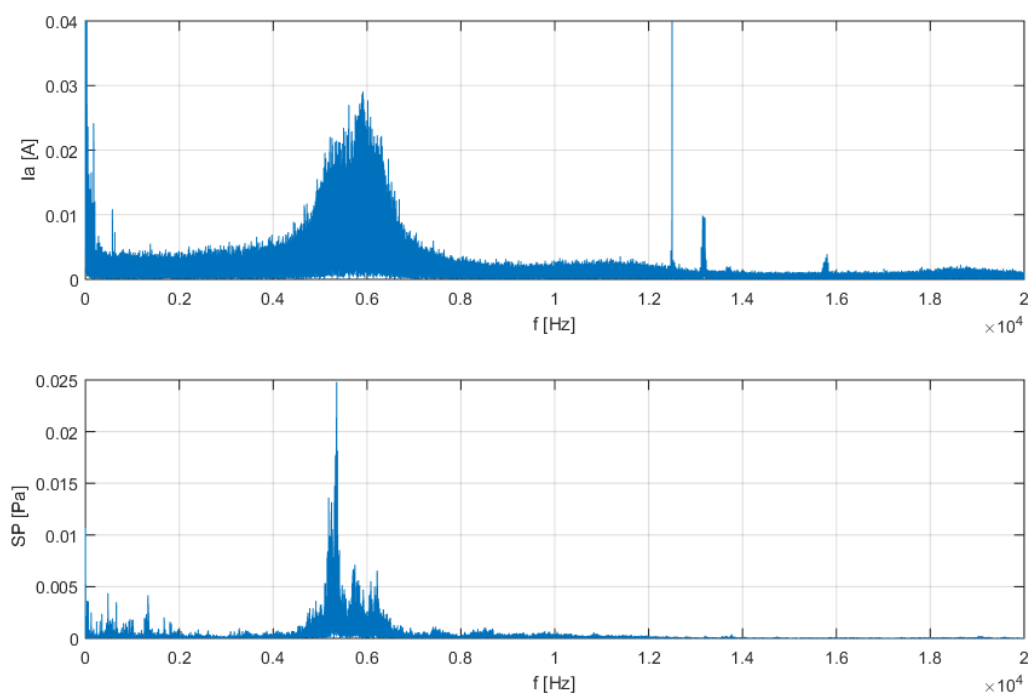
R_s	1,15 Ω	R_r	1,456334 Ω
$L_{s\sigma}$	0,008921 H	$L_{r\sigma}$	0,011297 H
L_h	0,219073 H		

Měření byla zaznamenána DAQ přístrojem USB-6356 (M32 MS) BNC od firmy National Instruments. Proud byl měřen sondou Tektronix A622. Hluk snímal kapacitní mikrofon Behringer ECM 8000 a signál byl následně zesílen předzesilovačem se zesílením 60 dB a anti-aliasingovým filtrem 4. řádu s mezní frekvencí 22 kHz. Při měření bylo použito okno o délce 10 s a vzorkovací frekvence DAQ byla zvolena 100 kHz.

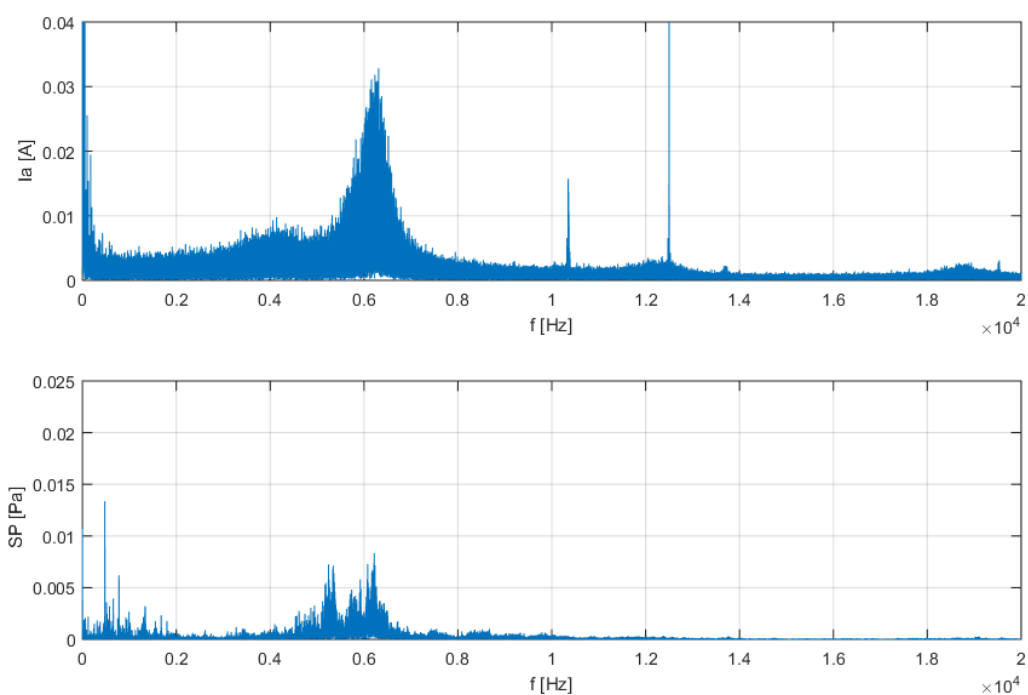
5 Výsledky měření



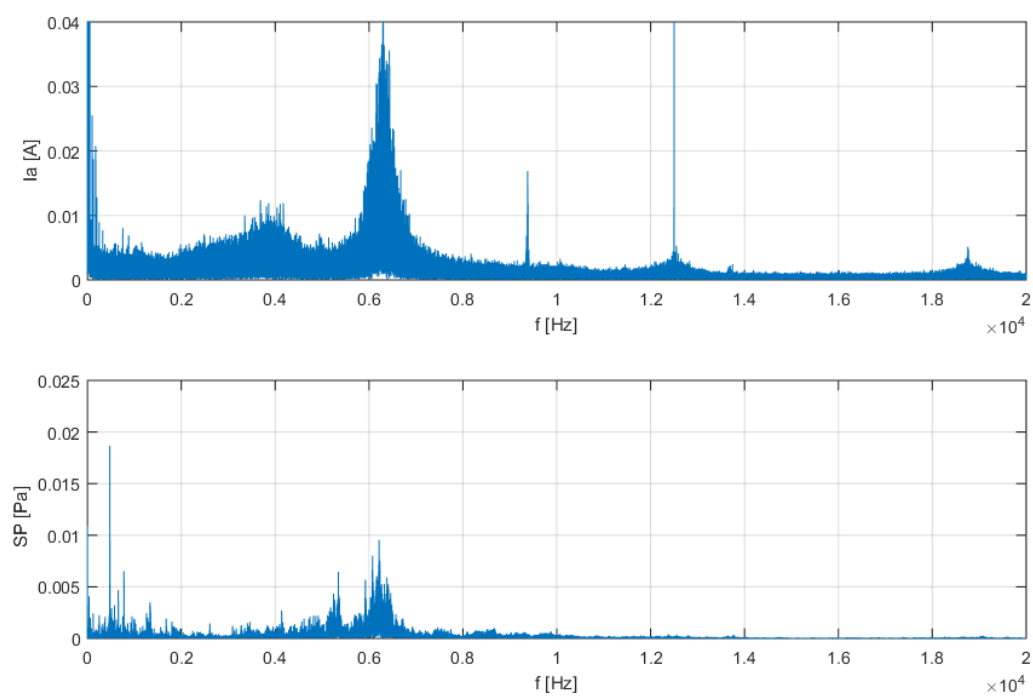
Obr. 5.1: Spektrum proudu a hluku při použití PWM, $f_T = 4$ kHz, $f_s = 25$ Hz, $U_d = 560$ V (uvedeno pro porovnání)



Obr. 5.2: Spektrum proudu a hluku FCS-MPC, $U_d = 560$ V, $n = 750$ ot./min., $c_f = 0$



Obr. 5.3: Spektrum proudu a hluku FCS-MPC, $U_d = 560$ V, $n = 750$ ot./min., $c_f = 10$



Obr. 5.4: Spektrum proudu a hluku FCS-MPC, $U_d = 560$ V, $n = 750$ ot./min., $c_f = 20$

6 Závěr

Prediktivní řízení založené na FCS-MPC bylo testováno v simulacích i na reálném pohonu. Na něm pak bylo provedeno měření proudu a hluku.

Ve srovnání s prediktivním řízením využívajícím matematický model ve stojícím souřadném systému vede řízení s modelem v rotujícím souřadném systému ke srovnatelným výsledkům. Ve srovnání s PWM je spektrum mnohem lépe rozprostřené a ve spektru lze dobře potlačit špičky způsobené mechanickými rezonancemi.

Zatím byl pro tvarování spektra proudu použit jeden filtr pro potlačení určitého pásma frekvencí. Dalším krokem ve vývoji bude tvarování spektra podle změřené odezvy motoru.

7 Literatura

- [1] Vondrášek, F.: Výkonová elektronika: Měníče s vlastní komutací a bez komutace. Západočeská univerzita v Plzni, 2003
- [2] Zeman, K., Peroutka, Z., Janda, M.: Automatická regulace pohonů s asynchronními motory. Západočeská univerzita v Plzni, 2007
- [3] Rodríguez, J., Cortés, P.: Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives. Wiley 2012

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Spínací kombinace a odpovídající vektory napětí ve stojícím souřadném systému.....	7
Obr. 3.1: Blokové schéma FCS-MPC v rotujícím souřadném systému.....	9
Obr. 3.2: Amplitudová frekvenční charakteristika filtru - pásmová propust 4200 až 6200 Hz.....	11
Obr. 5.1: Spektrum proudu a hluku při použití PWM, $f_T = 4 \text{ kHz}$, $f_S = 25 \text{ Hz}$, $U_d = 560 \text{ V}$ (uvedeno pro porovnání).....	13
Obr. 5.2: Spektrum proudu a hluku FCS-MPC, $U_d = 560 \text{ V}$, $n = 750 \text{ ot./min.}$, $cf = 0$	13
Obr. 5.3: Spektrum proudu a hluku FCS-MPC, $U_d = 560 \text{ V}$, $n = 750 \text{ ot./min.}$, $cf = 10$	14
Obr. 5.4: Spektrum proudu a hluku FCS-MPC, $U_d = 560 \text{ V}$, $n = 750 \text{ ot./min.}$, $cf = 20$	14

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	20.9.2017	M. Kroneisl