



Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky

Výzkumná zpráva č.: 22190-029-2015

Pohon se Synchronním motorem s elektrickým buzením: optimální řízení v celém otáčkovém rozsahu

Druh úkolu: Vědecko-výzkumný
Řešitelé: Ing. D. Uzel, Ph.D., prof. Ing. Z. Peroutka, Ph.D.
Vedoucí úkolu: prof. Ing. Z. Peroutka, Ph.D.
Počet stran: 19
Datum vydání: prosinec 2015
Revize: 1

Tato práce vznikla s podporou projektů ed2.1.00/03.0094
a SGS-2015-038

Anotace

Tato výzkumná zpráva uvádí optimální řízení synchronního motoru s vinutým rotorem určené pro moderní těžní stroj. Optimem je míněn požadavek na maximální kroutící moment motoru. Proto hlavní myšlenkou je najít optimální hodnoty tokotvorné složky proudu statoru I_{sd} a budícího proudu rotoru I_f pro dosažení maximálního točivého momentu stroje.

Obsah

1	ÚVOD.....	5
2	TEORETICKÉ ÚVAHY	5
2.1	Oblast regulace s konstantním momentem $\omega_r < \omega_{rN}$	6
2.2	Oblast regulace s konstantním napětím $\omega_r > \omega_{rN}$	7
3	VÝSLEDKY SIMULACE	8
3.2	Hledání optima	9
3.3	Simulace rozjezdu pohonu	11
4	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ.....	13
5	ZÁVĚR.....	15
	PŘÍLOHA 1.....	16
	Parametry motoru	16
5.1	Synchronní motor – 10kW	16
5.2	Parametry regulace	16
5.3	Magnetizační charakteristika.....	17

Použité symboly a zkratky

α, β	Stojící souřadný systém.
a, b, c	Fázové souřadnice
d, q	Rotující souřadný systém svázaný s polohou rotoru (motor) nebo vektoru napětí zdroje (usměrňovač)
ψ	Magnetický tok [Wb]
ϑ	Poloha osy d ve stojícím souřadném systému (α, β) [$^\circ$]
ε	Poloha požadovaného vektoru napětí ve stojícím souřadném systému (α, β) [$^\circ$]
Δ	Rozdíl dvou hodnot, změna veličiny
J	Moment setrvačnosti [kgm^2]
f	Frekvence [Hz]
i, I	Elektrický proud [A]
L, l	Indukčnost [H]
ω	Úhlová frekvence [rad.s^{-1}]
M	Moment [Nm]
R	Elektrický odpor [Ω], regulátor
t	Čas [s]
A	Amplituda střídavé veličiny
U, u	Elektrické napětí [V]
WRSM	Synchronní motor s vinutým rotorem
PWM	Pulsně šířková modulace
DP	Dolnoproustný filtr
d	Dílek, derivace
dt	Časová derivace
k_p	Konstanta transformace, převod rotor-stator stroje
p_p	Počet pólpárů
const	konstanta

P	Výkonové ztráty
---	-----------------

Indexy

α, β	Stojící souřadný systém
d, q	Rotující souřadný systém svázaný s polohou rotoru
s	Veličina statoru
f	Veličina pole (buzení přepočteno na stranu statoru pomocí převodu k_p) motoru (z anglického field)
σ	Rozptyl
r	Veličina rotoru, referenční hodnota, řídicí hodnota
w	Požadovaná hodnota veličiny
I	Elektrický proud
i	Indukovaná veličina
c	Veličina kondenzátoru ve stejnosměrném meziobvodu
m	Maximální, mechanická hodnota, magnetizační veličina
max	Maximální hodnota
0	Hodnoty ustáleného stavu
j	Jouleovy ztráty

1 Úvod

V předkládané zprávě je uveden simulační a experimentální rozbor optimálního řízení synchronního motoru s vinutým rotorem v ustáleném stavu. Zpráva poukazuje na principiální vlastnosti.

2 Teoretické úvahy

Pro simulaci daného pohonu byl zvolen model v souřadnicích rotoru d, q. Jeho plnné znění uvádí následující rovnice:

Rovnice statorových napětí

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + d\psi_{sd} / dt - \omega_r \psi_{sq} \quad (2.1)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + d\psi_{sq} / dt + \omega_r \psi_{sd} \quad (2.2)$$

Rovnice rotorových napětí

$$u_f = R_f i_f + d\psi_f / dt \quad (2.3)$$

$$0 = R_{rd} i_{rd} + d\psi_{rd} / dt \quad (2.4)$$

$$0 = R_{rq} i_{rq} + d\psi_{rq} / dt \quad (2.5)$$

Rovnice statorových magnetických toků

$$\psi_{sd} = \psi_{\sigma d} + \psi_{md} \quad (2.6)$$

$$\psi_{sq} = \psi_{\sigma q} + \psi_{mq} \quad (2.7)$$

$$\psi_{\sigma d} = L_{\sigma d} i_{sd} \quad (2.8)$$

$$\psi_{\sigma q} = L_{\sigma q} i_{sq} \quad (2.9)$$

$$\psi_{md} = L_{md} (i_{sd} + i_f + i_{rd}) \quad (2.10)$$

$$\psi_{mq} = L_{mq} (i_{sq} + i_{rq}) \quad (2.11)$$

$$\psi_{rd} = L_{\sigma rd} i_{rd} + \psi_{md} \quad (2.12)$$

$$\psi_{rq} = L_{\sigma rq} i_{rq} + \psi_{mq} \quad (2.13)$$

$$\psi_f = L_{md} i_f \quad (2.14)$$

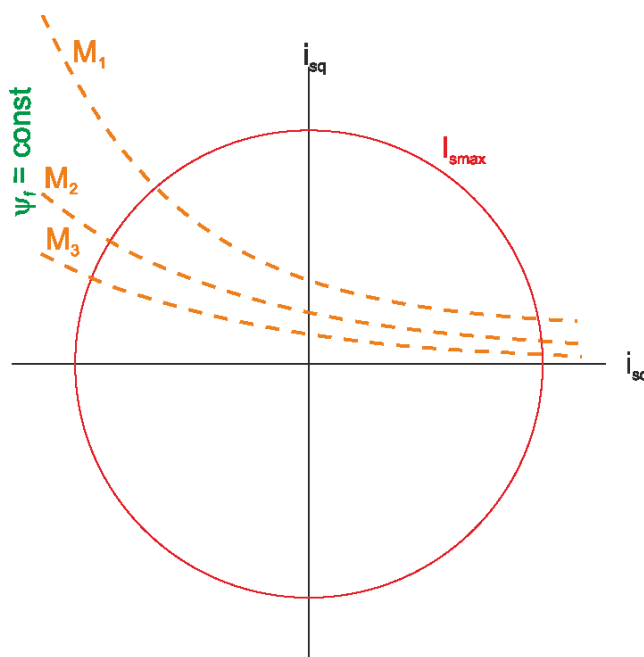
Rovnice momentu

$$M = k_p p_p [\psi_f i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq} + L_{md} i_{sq} i_{rd} - L_{mq} i_{sd} i_{rq}] \quad (2.15)$$

Pro ustálený stav jsou dané rovnice oprostěny o členy s derivacemi a členy obsahující rotorové proudy, jelikož při idealizovaném řízení dané proudy nejsou indukovány.

2.1 Oblast regulace s konstantním momentem $\omega_r < \omega_{rN}$

V oblasti nízkých otáček je oblast pracovních bodů řízení omezena pouze kružnicí maximálního proudu statoru I_{smax} .



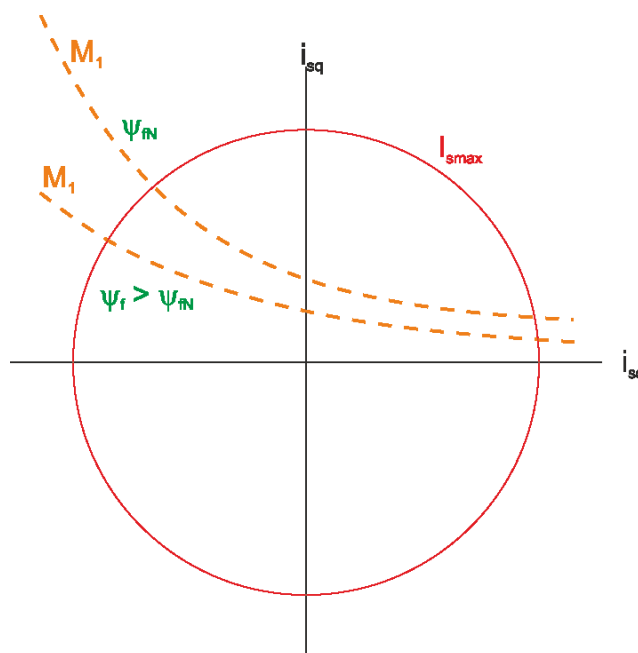
Obr.2.1 dq diagram – nízké otáčky, nominální nabuzení

Pokud je uvažováno nominální nabuzení motoru, dosažení maximálního momentu je zajištěno klasickou strategií držení nulového proudu v ose d (na křivce konstantního momentu je minimum statorového proudu při $I_{sd} = 0$).

Při použití buzeného motoru je možné měnit nabuzení stroje ovšem je nutné uvažovat magnetizační charakteristiku stroje. Shodný moment při různém nabuzení ukazuje následující diagram. Je vidno dosažení stejného momentu při vyšším nabuzení s nižším proudem v ose q, ale s vyšším proudem v ose d (proud je vyšší, ale se záporným znaménkem). Tato myšlenka vedla k rozvaze nad optimem momentové rovnice ve tvaru:

$$M = k_p p_p [\psi_f i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq}] \quad (2.16)$$

Ovšem z hlediska oteplení stroje musí být zajištěno nominální nabuzení motoru. Zde je využita rovnice 2.10, jak bylo uvedeno, bez vlivu rotoru:



Obr.2.2 dq diagram – nízké otáčky, vliv rozdílného nabuzení

$$\psi_{md} = L_{md}(i_{sd} + i_f) \quad (2.17)$$

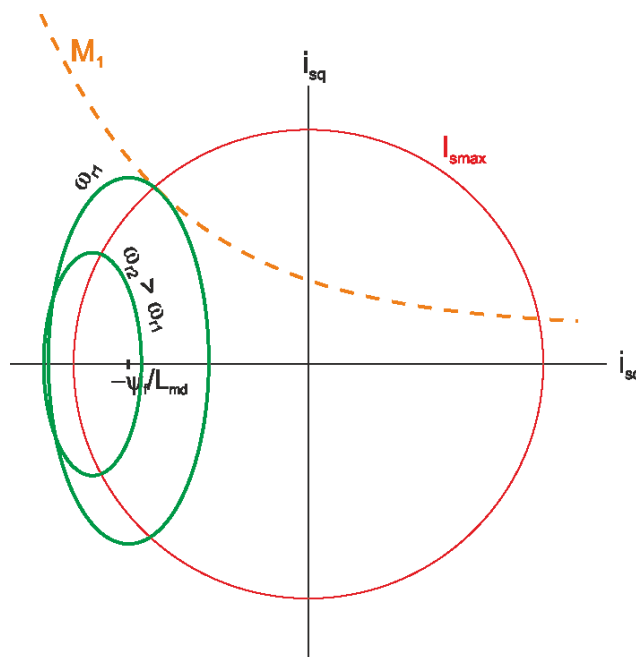
Nominálního nabuzení je tak možné dosáhnout při vyšším nabuzení rotoru pomocí odbuzení ze strany statoru, tedy záporný proud v ose d je aplikován.

2.2 Oblast regulace s konstantním napětím $\omega_r > \omega_N$

V oblasti odbuzování je oblast možných pracovních bodů dána jak kružnicí maximálního proudu, tak oblastí ohraničující body, kde je možné daný stroj odbudit (zajistit říditelnost vektorového řízení). Pro synchronní motor s vinutým rotorem je uvažován poměr jednotlivých indukčností nižší než jedna:

$$L_{sq} / L_{sd} < 1 \quad (2.18)$$

, tedy $L_{sd} > L_{sq}$ (v ose d leží železo vinutého pólu rotoru oproti velké vzduchové mezeře v ose q). Z důvodu rozdílnosti indukčností má ohraničující oblast tvar elipsy s natočením viz následující diagram. Zde je možné vypořádat zmenšování oblasti s přibývajícím otáčkami a závislosti pozice středu v rámci osy d na nabuzení stroje.



Obr.2.3 dq diagram – vysoké otáčky, hranice odbuzení

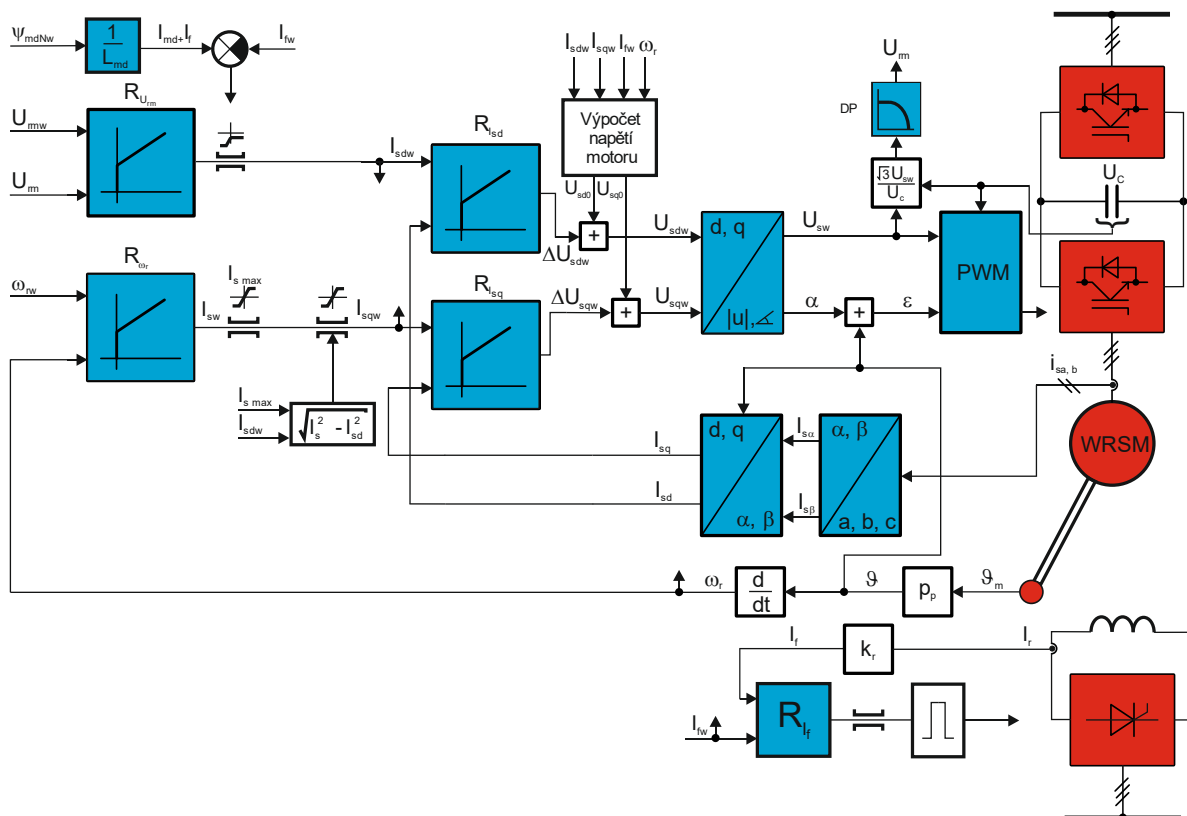
3 Výsledky simulace

Veškeré simulační výsledky byli vyprodukovány modelem v prostředí Matlab/Simulink. Principiální blokové schema pohonu je uvedeno na následujícím obrázku. Základem řízení je dynamické řízení obou složek vektoru statorového proudu i_{sd} , i_{sq} , kde příslušné složky vektoru napětí jsou předvypočítávány modelem motoru v ustáleném stavu (Výpočet napětí motoru):

$$u_{sd0} = R_s i_{sd} - \omega_r L_{sq} i_{sq} \quad (3.1)$$

$$u_{sq0} = R_s i_{sq} + \omega_r L_{sd} i_{sd} + \omega_r L_{md} i_f \quad (3.2)$$

Proudové smyčce vektorového řízení je nadřazena smyčka otáčková sestávající se z regulátoru otáček $R_{\omega r}$. Odbuzování je zajištěno regulátorem hloubky modulace R_{Urm} , jehož výstupní omezovač umožňuje nastavení optimalizovaného pracovního bodu skrze požadavku na jmenovité nabuzení dle rovnice 2.17.

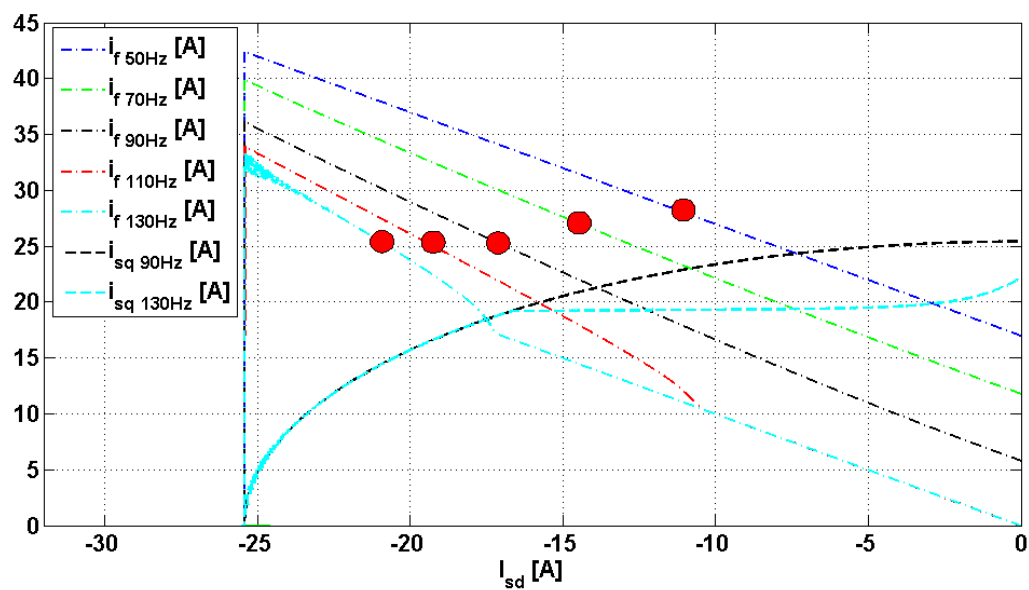


Obr.3.4 Blokové schéma pohonu s vektorovým řízením

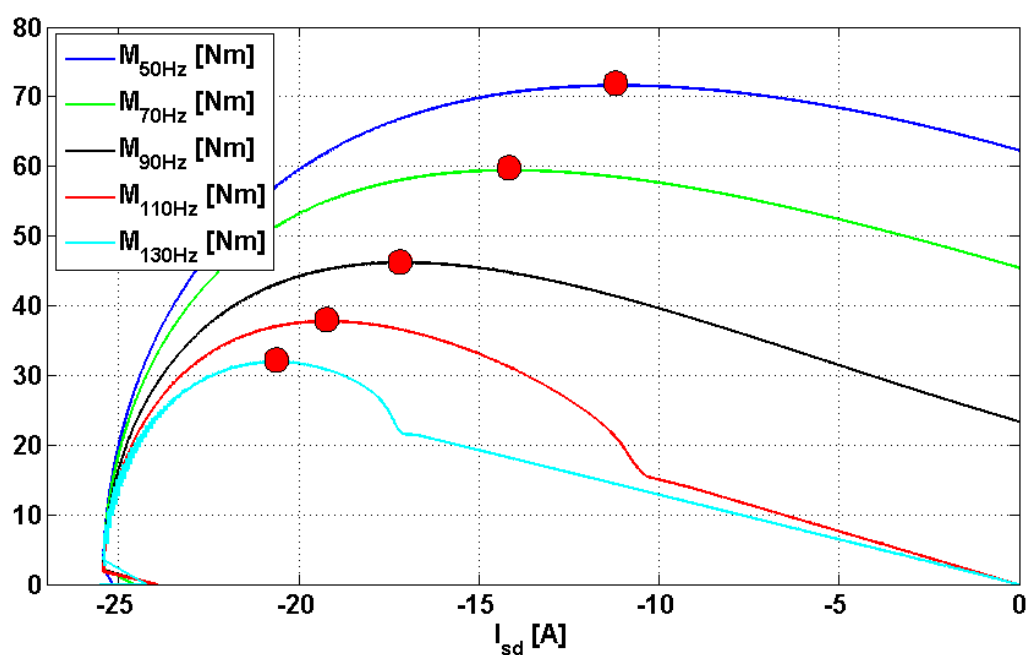
3.2 Hledání optima

Je nutné poznamenat, že následující výsledky jsou závislé na použitém motoru a jeho parametrech. Pro simulace byli použity parametry motoru dle přílohy 1, který byl použit pro experimentální ověření.

Pro nalezení optima byl proveden velmi pomalý přechodný děj (simulace mnoha ustálených stavů najednou), kdy vektorové řízení bylo pouze ve variantě základní proudové smyčky s odbuzováním. Byly proměřovány maximální možné pracovní body řízení, tedy oblast hraničních křivek. Vždy pro konstantní otáčky (moment setrvačnosti $J \rightarrow \infty$) byl měněn budicí proud i_f od jmenovité hodnoty, do hodnoty $i_f + I_{smax}$. Pro zajištění jmenovitého nabuzení je příslušně zvyšována záporná složka proudu v ose d. Kvůli udržení maximální velikosti vektoru statorového proudu, je snižována q složka proudu. V oblasti odbuzování je hodnota požadovaného toku řízena regulátorem odbuzování. Požadovaný tok se tedy snižuje. Výsledkem daných simulačních běhů jsou následující grafy.



Obr.3.5 Přechodný děj – Graf statorových a rotorového proudu $f_s = 50 - 130\text{Hz}$

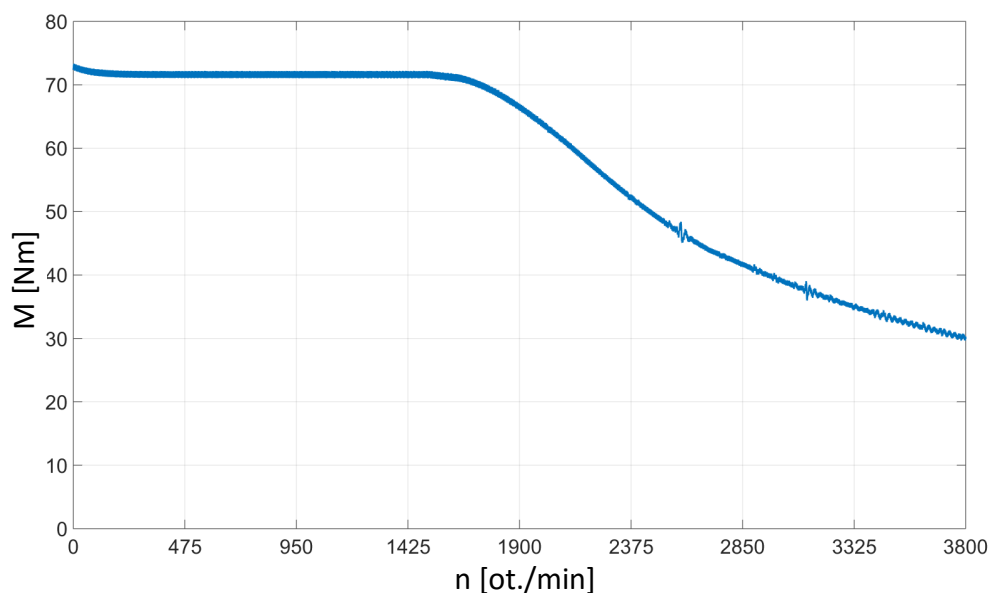


Obr.3.6 Přechodový děj – Graf momentu motoru $f_s = 50 - 130\text{Hz}$

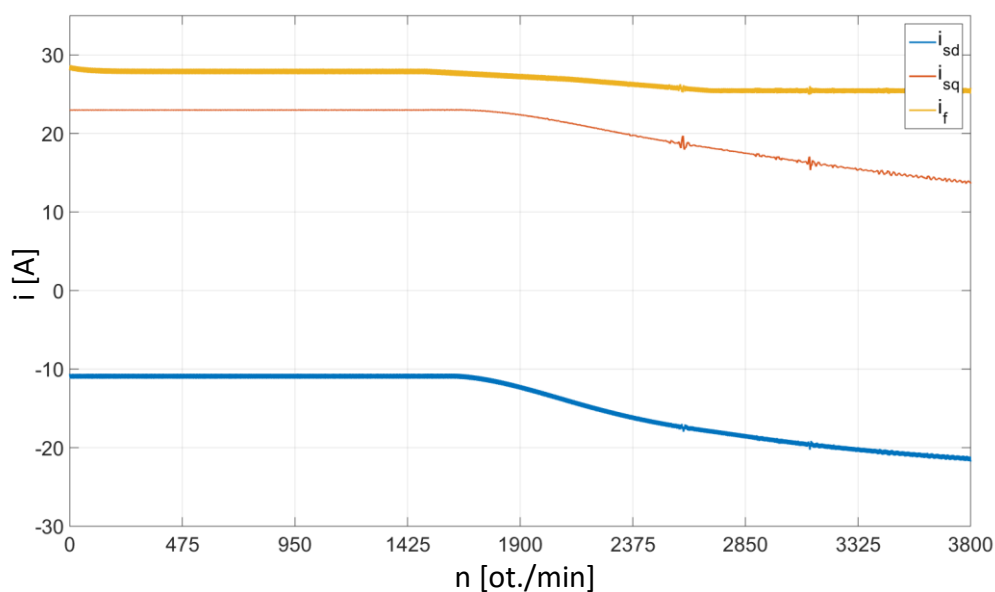
Ve vykreslených grafech jsou červeným bodem naznačeny optimální pracovní body. Jedná se body s maximálním momentem motoru pro danou rychlost. Z výsledků je zjevná nízká závislost rotorového proudu na velikosti rychlosti. Paradoxně tedy odbuzování pomocí rotorového proudu je neoptimální pro dosažení maxima momentu.

3.3 Simulace rozjezdu pohonu

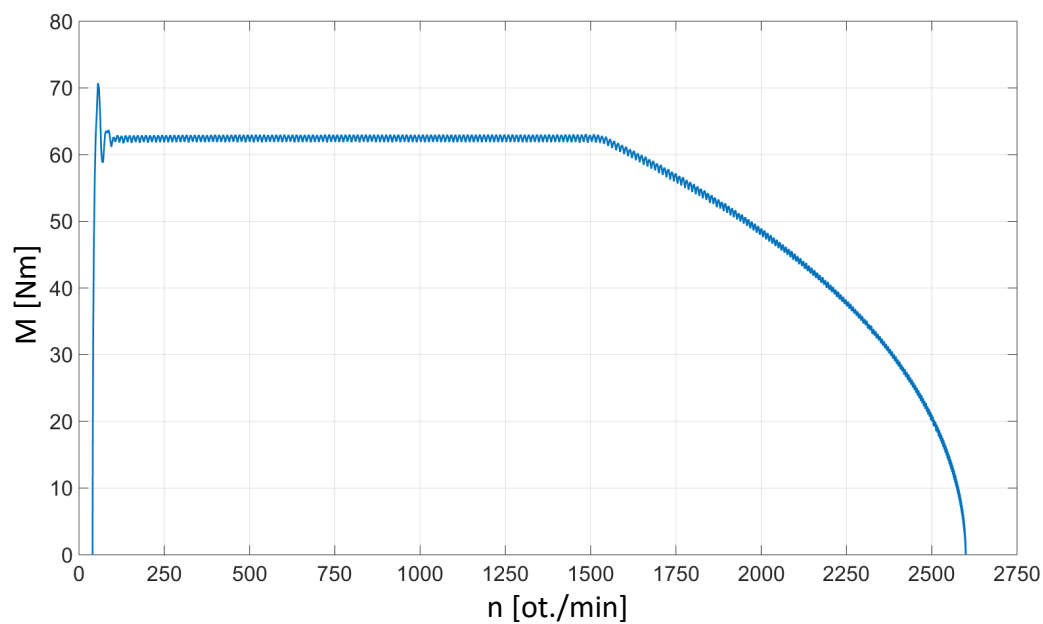
V návaznosti na získané optimální pracovní body byl simulován rozjezd pohonu pro ověření řízení pro celý otáčkový rozsah. Pro porovnání byl simulován také pohon s nulovým proudem v ose d (odbuzování je prováděno pomocí snižování proudu rotorem) a jmenovitým nabuzením $i_f = i_{fN}$, který byl v oblasti odbuzování snižován. Výsledky simulace při napájení motoru sinusovým zdrojem a momentu setrvačnosti $J = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ uvádí následující grafy.



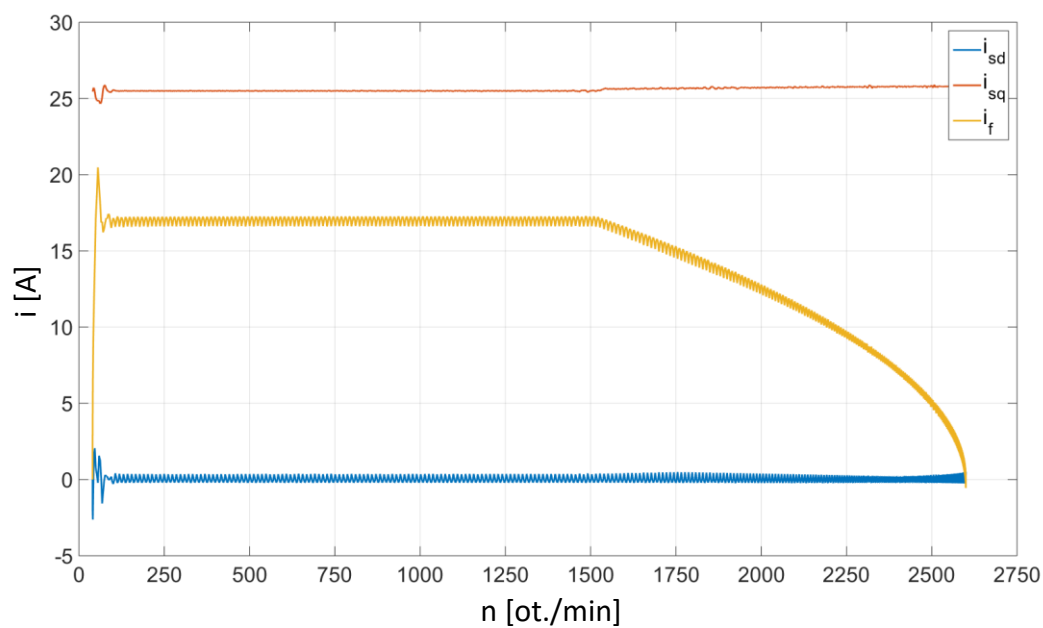
Obr.3.7 Optimální řízení - přechodový děj: rozjezd pohonu – graf momentu motoru
 $f_s = 0 - 130 \text{ Hz}$



Obr.3.8 Optimální řízení - přechodový děj: rozjezd pohonu – graf proudů motoru
 $f_s = 0 - 130\text{Hz}$



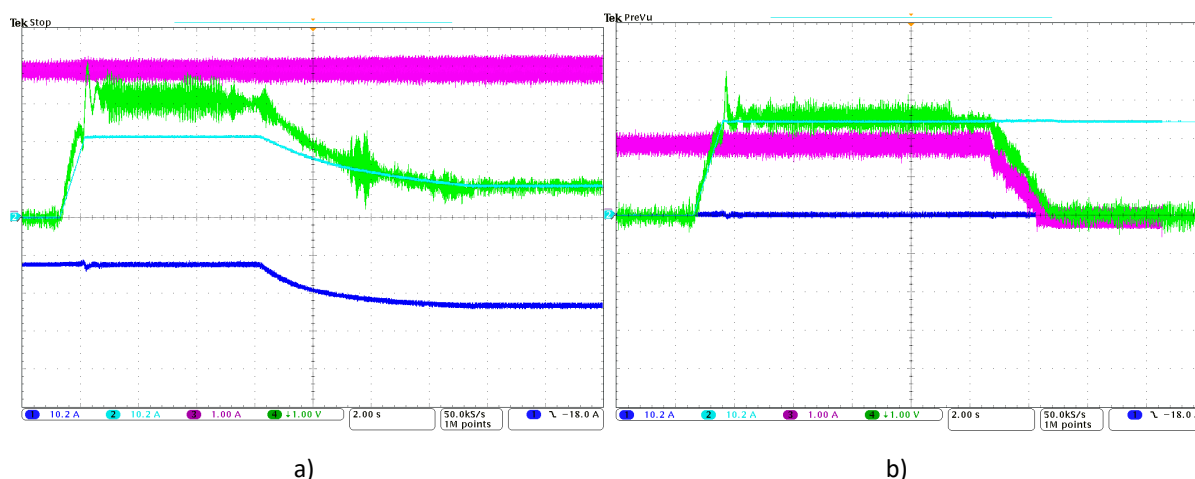
Obr.3.9 Řízení s $I_{sd}=0$ - přechodový děj: rozjezd pohonu - graf momentu motoru
 $f_s = 0 - 90\text{Hz}$



Obr.3.10 Řízení s $I_{sd}=0$ - přechodový děj: rozjezd pohonu – graf proudů motoru
 $f_s = 0 - 90\text{Hz}$

4 Experimentální ověření

Simulační výsledky byly ověřeny shodnou strukturou řízení při zadání optimálních pracovních bodů dle naměřených hodnot z reálného motoru. V důsledku zanedbatelných změn rotorového proudu se změnou otáček, byl rotorový proud nastaven konstantní v celém otáčkovém rozsahu $i_r = 4A$. Z důvodu omezené maximální mechanické rychlosti soustrojí byla snížena požadovaná hloubka modulace $U_{rm} = 0,2$, tedy pohon přechází do odbuzování již při cca $f_s = 10Hz = f_{sN}$. Pro proměření maximálních hodnot byla u testovaného motoru vyřazena regulace otáček, tedy řízení zajišťovalo pouze momentovou (proudovou) regulaci s požadavky na optimální pracovní body. Zatěžovací asynchronní motor v regulaci otáček pak určuje rampu rychlosti. Moment motoru je měřen momentovým čidlem v místě spojení hřídelí obou motorů. Výsledky rozjezdu pohonu pro řízení s odbuzováním rotoru a s optimalizovanou variantou uvádí následující oscilogramy:



Obr.4.11 Rozjezd pohonu – a) optimální řízení b) řízení s $I_{sd} = 0$

a) $f_s = 0 - 30Hz$ b) $f_s = 0 - 15Hz$: K1: proud v ose d i_{sd} [10,2A/d], K2: proud v ose q i_{sq} [10,2A/d], K3: budicí proud i_f [8,66A/d] (i_r [1A/d]), K4: moment motoru M [20Nm/d]

Při porovnání přístupu odbuzování pomocí statorového a rotorového vinutí jsou zjevné následující vlastnosti. Základně je dosaženo širšího otáčkového rozsahu, což je požadováno hlavně pro trakční aplikace. Tento jev je zjednodušeně (bez uvažování přechodných jevů, statorového odporu, rozptylů a chování napětí pouze v ose q) vysvětlován přímou úměrou snižování rotorového proudu se vzrůstající rychlostí ($U_s = \text{konst.} = \omega_r L_{md} i_f$, $\omega_r \uparrow$, $\psi_f \downarrow$, $i_f \downarrow$), oproti případu s odbuzováním statoru, kde pro ti sobě stojí indukované napětí a reaktance kotvy ($U_s = \text{konst.} = \omega_r L_{md} i_f - \omega_r L_{md} i_{sd}$). Co se týče dynamiky, pokud je

odbuzování prováděno skrze statorový obvod, kde jsou indukčnosti nízké v porovnání s rotorem, je odbuzování dynamické a bezpečné z pohledu stability řízení ve vysokých otáčkách. Z pohledu ztrát, u optimálního řízení jsou navýšeny pouze jouleovy ztráty v rotoru (tok stroje je udržován nezměněn, statorový proud není překračován snižováním proudu v ose q), které u testovaného motoru nedosahují přírůstku výkonu stroje. Vlivem nárůstu rotorového proudu se navýší Jouleovy ztráty o $\Delta P_{jr} = 12\text{W}$, přičemž jmenovitý výkon motoru vzroste o $\Delta P = 1414\text{W}$.

5 Závěr

Tato zpráva předkládá teoretický rozbor, simulační a experimentální výsledky optimálního řízení synchronního motoru s vinutým rotorem.

Příloha 1

Parametry motoru

5.1 Synchronní motor – 10kW

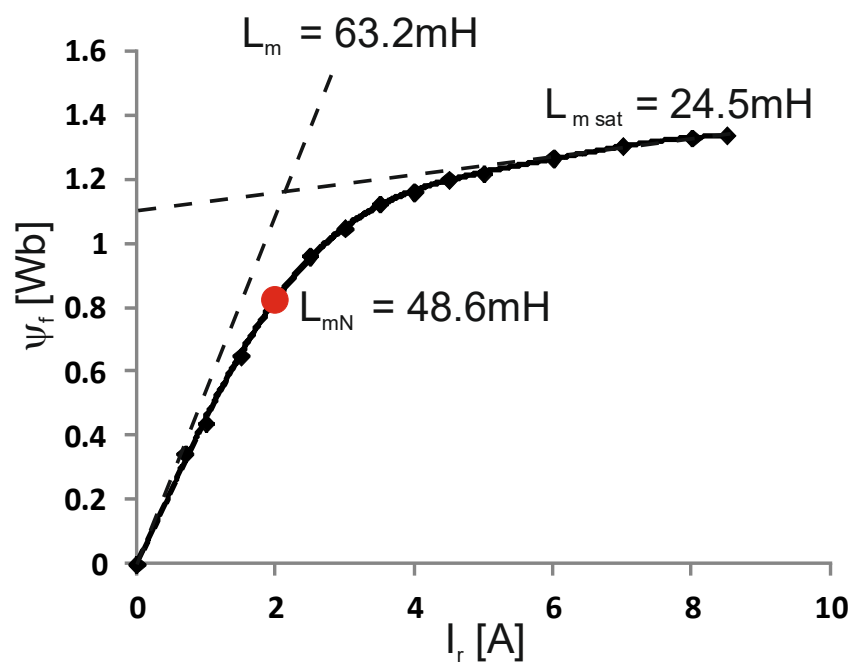


Jmenovitý výkon motoru P_m	10kW
Jmenovitá rychlost n_N	1500ot./min
Počet pólů p_p	2
Jmenovitý proud motoru I_{sN}	18A _{rms}
Jmenovitý proud buzení I_{fN}	2A
Odpor statoru R_s	0,28Ω
Statorová indukčnost v ose d L_{sd}	48,6mH
Statorová indukčnost v ose q L_{sq}	25mH

5.2 Parametry regulace

Perioda vzorkování regulátoru T_{vz}	1/1600s
Frekvence pulsně šířkové modulace f_{PWM}	800Hz
Napětí stejnosměrného meziobvodu U_c	700V
Vstupní napětí usměrňovače U_{usm}	80V _{rms}
Proporční zesílení PI regulátorů proudu K_{pls}	5 [-]
Časová konstanta PI regulátorů proudu T_{rls}	0,05s
Proporční zesílení PI regulátoru buzení K_{plf}	20 [-]
Časová konstanta PI regulátoru buzení T_{rlf}	0,05s
Hloubka modulace U_{rmw}	0,2 [-] ($f_{sN} = 10\text{Hz}$, $n_N = 300\text{ot./min}$)

5.3 Magnetizační charakteristika



Historie revizí

[illegible]