

David Uzel – Zdeněk Peroutka

Pohon se Synchronním motorem s vnitřními permanentními magnety: Injektážní bezsenzorová metoda - Vliv syčení a vzájemných indukčností

Technická zpráva

Pracovní balíček:

11 – Elektrické části pohonu

Rok řešení:

2013



Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky

Výzkumná zpráva č.: 22190-048-2013

Pohon se Synchronním motorem s vnitřními permanentními magnety: Injektážní bezsenzorová metoda - Vliv sycení a vzájemných indukčností

Druh úkolu: Vědecko-výzkumný

Řešitelé: Ing. D. Uzel, prof. Ing. Z. Peroutka, Ph.D.

Vedoucí úkolu: prof. Ing. Z. Peroutka, Ph.D.

Počet stran: 12

Datum vydání: říjen 2013

Revize: 1

Anotace

Tato výzkumná zpráva poukazuje na vliv sycení magnetického obvodu a vzájemných indukčností v rotujícím souřadném systému d,q na vlastnosti estimace polohy rotoru synchronního stroje s vnitřními permanentními magnety, jejímž základem je injektování vysokofrekvenčního signálu do statorového vinutí motoru, kde pro vlastní vyhodnocení polohy je využit fázový závěs.

Obsah

1	ÚVOD	4
2	TEORETICKÉ ÚVAHY	4
3	EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY	9
4	ZÁVĚR	11

Použité symboly a zkratky

α, β	Stojící souřadný systém.
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) [°]
ε	Poloha požadovaného vektoru napětí ve stojícím souřadném systému (α, β) [°]
J	Moment setrvačnosti [kgm^2]
f	Frekvence [Hz]
I, i	Elektrický proud [A]
L	Indukčnost [H]
ω	Úhlová frekvence [rad.s^{-1}]
R	Elektrický odpor [Ω], regulátor
t	Čas [s]
A	Amplituda střídavé veličiny
U, u	Elektrické napětí [V]
SM	Synchronní motor

Indexy

α, β	Stojící souřadný systém
d, q	Rotující souřadný systém svázaný s polohou rotoru
s	Veličina statoru, veličina odpovídající funkci sinus
r	Veličina rotoru
w	Požadovaná hodnota veličiny
I	Elektrický proud
i	Veličina spjata s injektovanou frekvencí či signálem

1 Úvod

V předkládané zprávě je uveden teoretický a simulační rozbor vlivu sycení magnetického obvodu a vzájemných indukčností na injektážní bezsenzorové metody pro vyhodnocení polohy rotoru synchronního motoru s vnitřními permanentními magnety, kde pro generování polohy rotoru je použit fázový závěs. Zpráva poukazuje na principiální vlastnosti.

2 Teoretické úvahy

Vzhledem k významně proměnné vzduchové mezeře po obvodu motoru obsahuje statorový proud složky, které nesou informaci o poloze rotoru. Pokud se podíváme na specifika motoru s vnitřními per. magnety. Oproti motoru s povrchovými magnety se zde uplatňují efekty spjaté se sycením magnetického obvodu (změna vlastních a vzájemných indukčností v jednotlivých osách) a harmonické statorového toku.

Pokud se zaměříme pouze na efekt sycení mg. obvodu. Pro principiální náhled vyjdeme ze základních rovnic motoru v systému d,q. Z důvodu vyšetřování pouze vysokých frekvencí se omezíme na tvar:

$$U_{sd} = d\psi_{sd} / dt \quad (2.1)$$

$$U_{sq} = d\psi_{sq} / dt$$

, kde

$$\psi_{sd} = L_{sd} I_{sd} \quad (2.2)$$

$$\psi_{sq} = L_{sq} I_{sq}$$

Pokud uvažujeme injektování do reálné osy d (princip tzv pulzujících injektáží při zavěšeném estimátoru) signálu ve tvaru

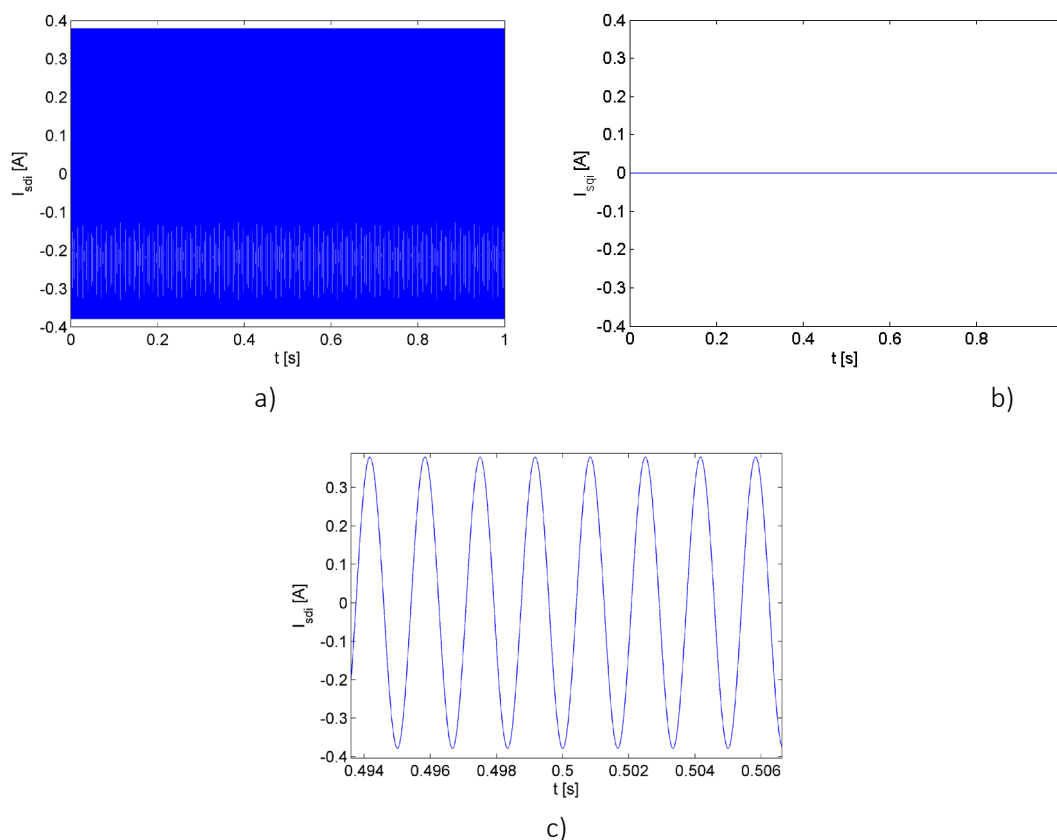
$$U_{sdi} = A_i \cos(\omega_i t) \quad (2.3)$$

Dostáváme

$$A_i \cos(\omega_i t) = L_{sd} dI_{sd} / dt \quad (2.4)$$

$$0 = L_{sq} dI_{sq} / dt$$

Zde je zjevné, že injektovaný signál produkuje pouze proud v ose d. Demodulační technika tedy je založena na hledání nulového proudu osou q. Následující výsledky simulace Obr. 2.1 poukazují proudy při zavěšeném estimátoru.

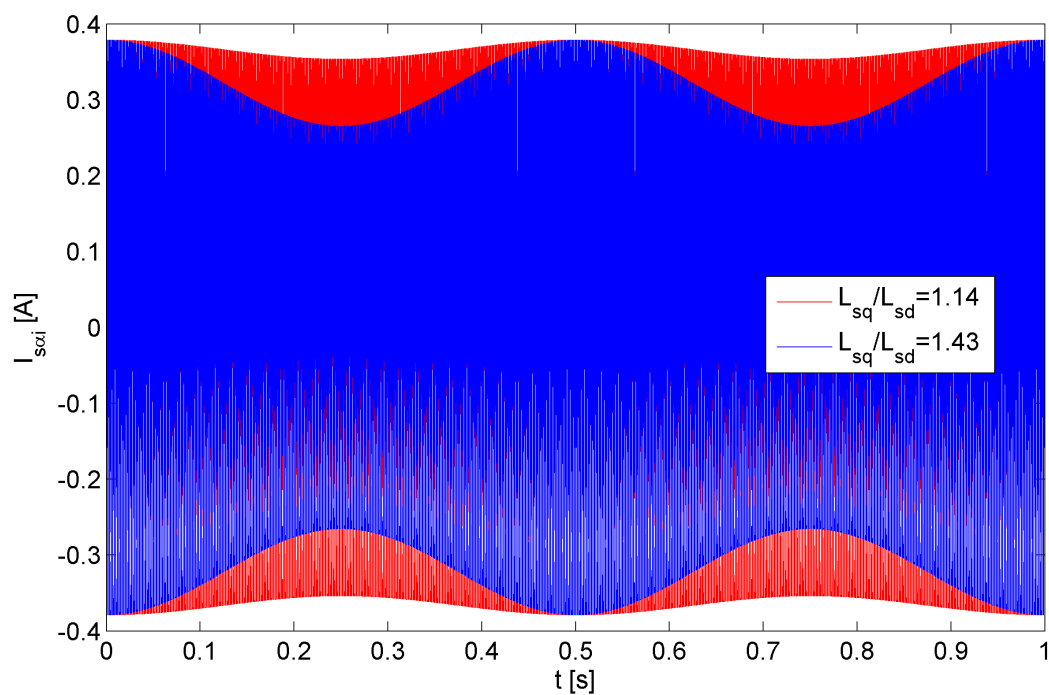


Obr. 2.1 Injektážní princip – základ estimace
a) proud I_{sdi} , b) proud I_{sqi} , c) zvětšení časového měřítka – proud I_{sdi}

Pokud je estimátor nezavěšený (představme si počáteční stav, kdy je injektováno do osy α a motor se točí $\rightarrow$ úhel mezi estimovaným a reálným systémem je proměnný dle otáčení stroje), lze z plných rovnic po vyjádření statorových proudů a přetransformování do stojícího souř. systému získat předpis statorového proud v ose α ve tvaru:

$$I_{s\alpha i} = \frac{A_i \sin(\omega_i t)}{\omega_i L_{sd} L_{sq}} L_{sq} \cos^2(\vartheta_r) + L_{sd} \sin^2(\vartheta_r) \quad (2.5)$$

V případě, že u reálného motoru se indukčnosti mění v závislosti na jednotlivých složkách statorových proudů. Dochází nejčastěji k poklesu rozdílu indukčností, tedy L_{sq} se vzrůstajícím proudem I_{sq} klesá. Vliv na estimační proces je naznačen vykreslením statorového proudu $I_{s\alpha i}$ pro různé poměry indukčností viz Obr. 2.2. Pokud by se indukčnosti takřka, nebo dokonce zcela vyrovnali, byla by estimace obtížná až dokonce teoreticky nemožná (obálka proudu v ose α dle (2.5), by se stala konstantní a estimátor by nebyl schopen zavěšení), což také poukazuje následující vztah pro proud v ose d při uvažování obecného systému d, q_i před zavěšením estimátoru na reálný systém d, q :



Obr. 2.2 Injektážní princip – vliv rozdílu indukčností
- proud I_{sai}

$$I_{sqi} = \frac{A_i \sin(\omega_i t)}{\omega_i L_{sd} L_{sq}} (L_{sd} - L_{sq}) \sin(\vartheta_{ri} - \vartheta_r) \cos(\vartheta_{ri} - \vartheta_r) \quad (2.6)$$

Jestliže se podíváme na efekt vzájemných indukčností, platí pro statorové toky a vysoké frekvence následující:

$$\psi_{sd} = L_{sd} I_{sd} + L_{sdq} I_{sq} \quad (2.7)$$

$$\psi_{sq} = L_{sq} I_{sq} + L_{sqd} I_{sd}$$

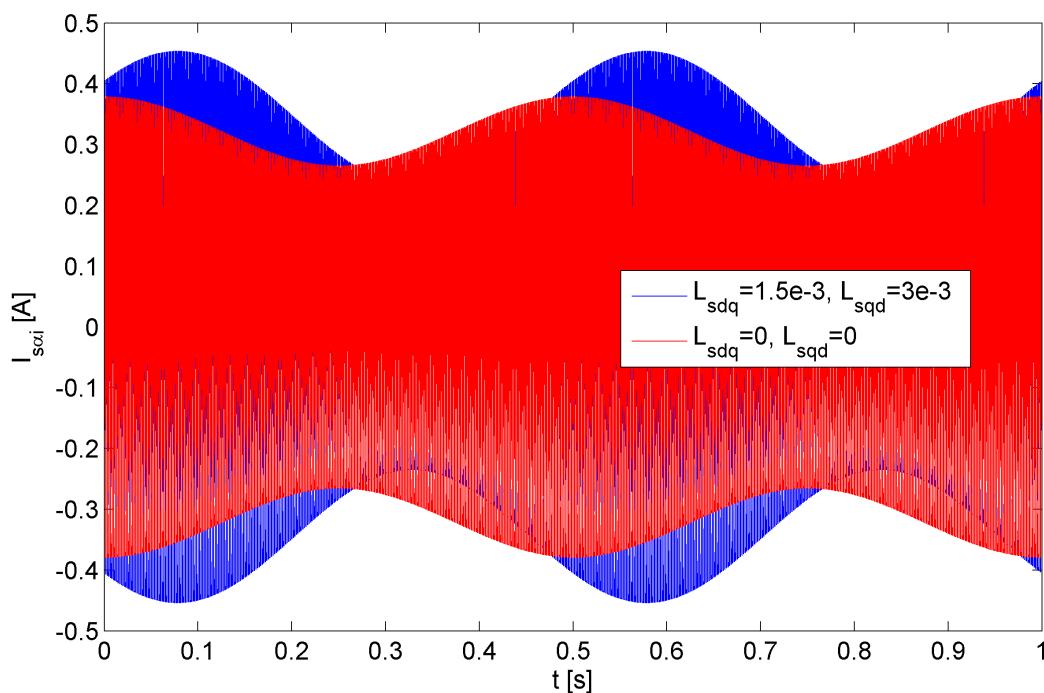
Dostáváme po dosazení do rovnice (2.1) a injeckce (2.3):

$$\begin{aligned} A_i \cos(\omega_i t) &= L_{sd} dI_{sd} / dt + L_{sdq} dI_{sq} / dt \\ 0 &= L_{sq} dI_{sq} / dt + L_{sqd} dI_{sd} / dt \end{aligned} \quad (2.8)$$

Poté z plných rovnic po vyjádření statorových proudů a přetransformování do stojícího souř. systému získat předpis statorového proudu v ose α ve tvaru:

$$I_{sai} = \frac{A_i \sin(\omega_i t)}{\omega_i (L_{sd} L_{sq} - L_{sdq} L_{sqd})} L_{sq} \cos^2(\vartheta_r) + L_{sd} \sin^2(\vartheta_r) + (L_{sdq} + L_{sqd}) \sin(\vartheta_r) \cos(\vartheta_r) \quad (2.9)$$

Grafická reprezentace tohoto vztahu pro nulové a nenulové hodnoty ($L_{sdq} = 1,5\text{mH}$, $L_{sqd} = 3\text{mH}$) je na Obr. 2.3.



Obr. 2.3 Injeckční princip – vliv vzájemných indukčností proudu I_{sai} , ($L_{sq}/L_{sd}=1,43$)

Zde je zjevné, že extrém obálky nesouhlasí s polohou osy d , a tak se estimátor může zavěsit mimo hledanou osu. Vzniká tak chybný offset v estimované poloze.

Je zjevné, že krom umístění extrémů obálky je také ovlivněn její rozkmit (vliv změny rozdílnosti indukčností v jednotlivých osách), což může mít také negativní následek na estimaci polohy z výše uvedeného důvodu u části věnované vlivu saturace mg. obvodu. Prokázáno je to vztahem (2.10), který

analogicky se vztahem (2.6) popisuje proud v ose q při nezavěšeném estimátoru (d_i, q_i se neshoduje s reálným systémem d, q o úhel $\vartheta_i - \vartheta$) ovšem se zahrnutím vzájemných indukčností.

$$I_{sqi} = \frac{A_i \sin(\omega_i t)}{\omega_i (L_{sd} L_{sq} - L_{sdq} L_{sqd})} (L_{sd} - L_{sq}) \sin(\vartheta_{ri} - \vartheta_r) \cos(\vartheta_{ri} - \vartheta_r) + L_{sdq} \sin^2(\vartheta_{ri} - \vartheta_r) - L_{sqd} \cos^2(\vartheta_{ri} - \vartheta_r) \quad (2.10)$$

Tento jev graficky znázorňuje Obr. 2.4.

a)

b)

c)

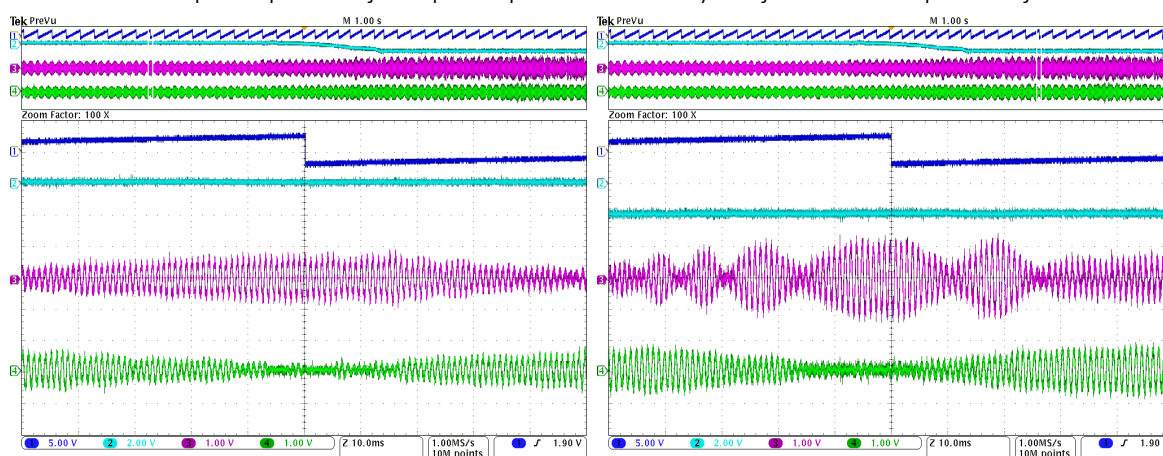
Obr. 2.4 I Injektážní princip – vliv vzájemných indukčností
a) reálná poloha rotoru ϑ_r , b) proud I_{sdi} , c) proud I_{sqi} ($L_{sq}/L_{sd}=1,43$)

3 Experimentální výsledky

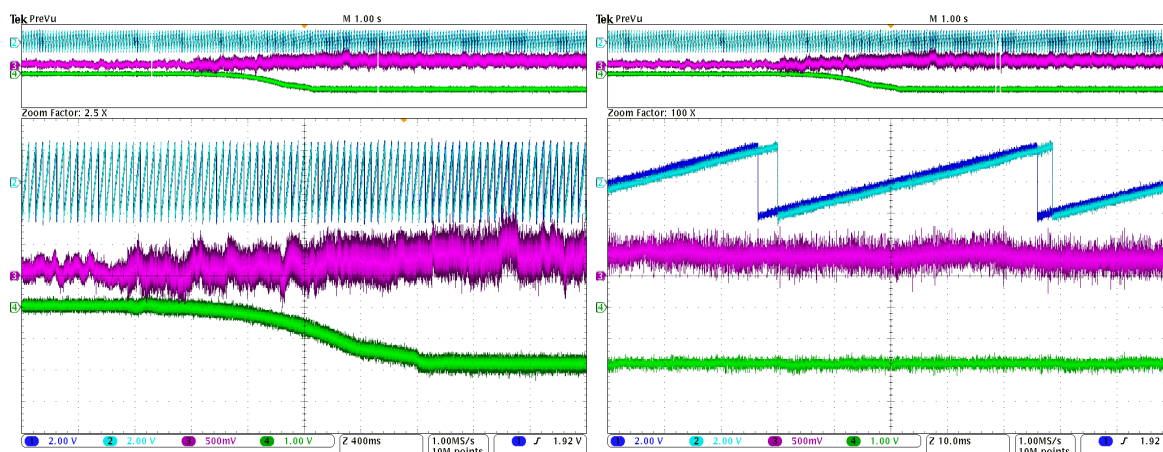
Teoreticky zkoumané jevy byly pozorovány i na reálném prototypu synchronního motoru. V první variantě byly provedeny testy jak s motorem s povrchovými magnety, tak s motorem s vnitřními magnety. Motor s povrchovými permanentními magnety byl testován dle teoretického podkladu, kdy je vysokofrekvenční signál injektován do osy α stojícího systému a s motorem je točeno za pomoci mechanicky spárovaného zatěžovacího asynchronního motoru, tak s plným estimátorem typu fázového závěsu, kde je kontrolována estimovaná poloha rotoru a skutečná poloha z optického absolutního čidla polohy. Motor s vnitřními per. magnety prošel stejným testem a protože nebylo možné zatěžovacím strojem dosáhnout přetížení, byl motor zabrzděn a test byl proveden také tak, že bylo s injektovaným vektorem pootáčeno frekvencí $f_{si} = 1\text{ Hz}$ a motor byl zatížen na 1,65 násobek jmenovitého momentu.

Dané experimenty, jejichž výsledky ukazují následující oscilogramy, byly provedeny za následujících společných podmínek: $T_{reg} = 125\mu\text{s}$, $A_i = 10\text{V}$, $f_i = 1\text{ kHz}$.

U motoru s povrchovými magnety (magnety jsou zřejmě zapuštěny do železa rotoru, projevují se tak zde částečně vlastnosti vyjádřeného rotoru) k výraznému vlivu vzájemných indukčností, jelikož estimovaná poloha i odezvové proudy vykazují posuv vůči skutečné poloze rotoru a to i v oblasti do jmenovitého zatížení. Obr. 3.1 vlevo – nezatížený motor s takřka nulovou chybou estimace. Naproti tomu Obr. 3.1 vpravo poukazuje na posuv proudové odezvy. Stejně vlastnosti poukazuje Obr. 3.2.

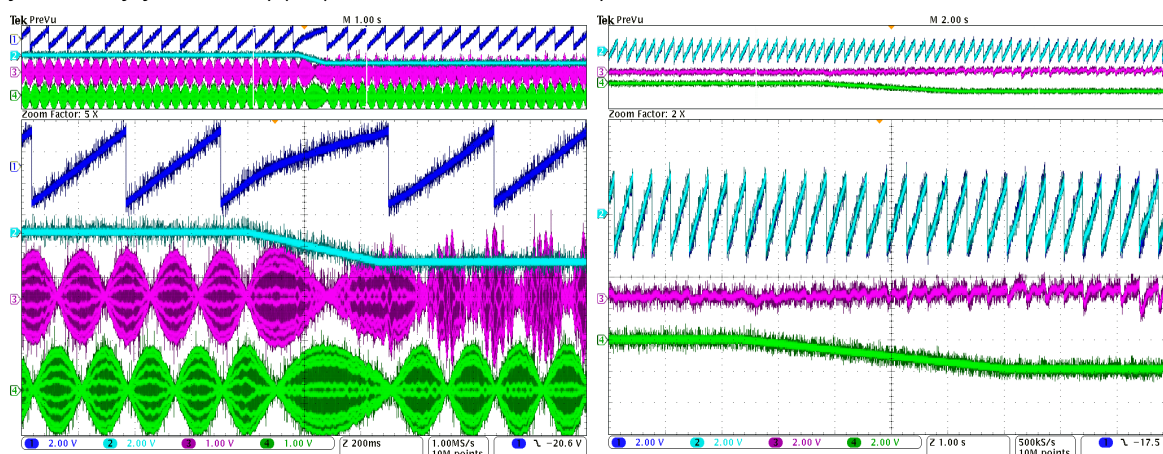


Obr. 3.1 PMSM – $f_s = 5\text{ Hz}$, $k1$: skutečná poloha rotoru ϑ_r ($72^\circ/\text{V}$), $k2$: moment M (20 Nm/V), $k3$: proud I_{sdi} ($0,7\text{ A/V}$), $k4$: proud I_{sqi} ($0,7\text{ A/V}$)

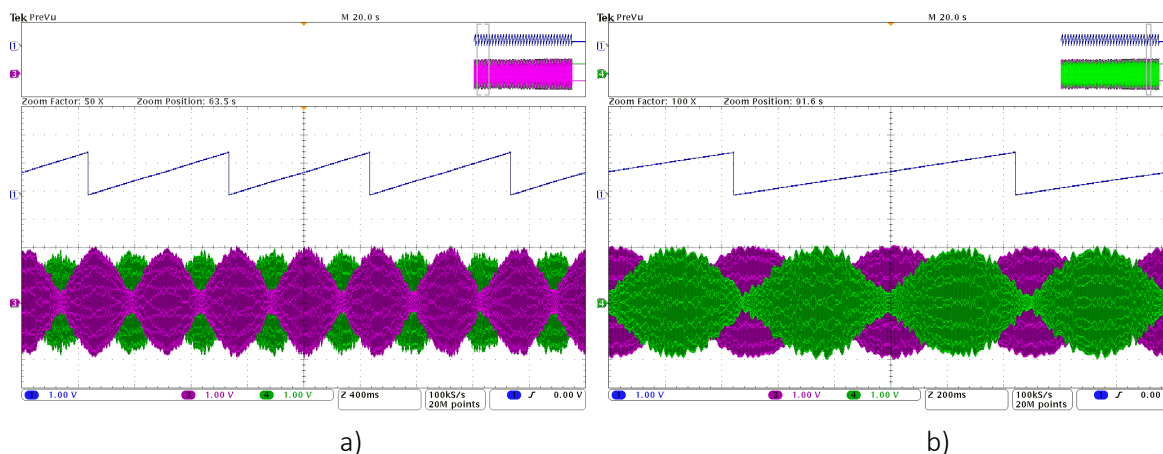


Obr. 3.2 PMSM – $f_s = 5$ Hz, k1: skutečná poloha rotoru ϑ_r (72 °/V), k2: estimovaná poloha rotoru ϑ_e (72 °/V), k3: chyba estimované polohy $\Delta\vartheta$ (72 °/V), k4: moment M (20Nm/V)

Shodné vlastnosti byly objeveny u motoru s vnitřními per. magnety do jmenovitého momentu viz Obr. 3.3 a Obr. 3.4. Doplněním je test na Obr. 3.5, kde je motor zabrzděn a přetížen na 1,65 násobek jmenovitého momentu. Proudové odezvy I_{sd} , I_{sq} poukazují i na změnu poměru indukčností, jelikož se jejich vrcholy při přetížení téměř srovnaly.



Obr. 3.3 PMSM – $f_s = 3$ Hz, k1: skutečná poloha rotoru ϑ_r (72 °/V), k2: moment M (20Nm/V), k3: rotoru ϑ_r (72 °/V), k4: proud I_{sd} (0,16 A/V)
Obr. 3.4 PMSM – $f_s = 3$ Hz, k1: skutečná poloha rotoru ϑ_r (72 °/V), k2: estimovaná poloha rotoru ϑ_e (72 °/V), k3: chyba estimované polohy $\Delta\vartheta$ (72 °/V), k4: moment M (20Nm/V)



Obr. 3.5 IPMSM – $f_{si} = 1$ Hz

**a) $I_{sq} = 0A$ (nezatížený motor), b) $I_{sq} = 19A$ (1,65 násobek jmenovitého momentu)
k1: poloha systému d_i , q_i ($240^\circ/V$), k3: proud I_{sdi} ($0,12 A/V$), k4: proud I_{sqi} ($0,12 A/V$)**

4 Závěr

Předkládaná zpráva teoreticky a experimentálně ověřuje vliv zatížení synchronního motoru s vnitřními permanentními magnety. Je známo obecné chování motoru (je zde velká závislost na konstrukčním návrhu motoru), kde při zvýšení zatížení, typicky při 2 a více násobku, tedy proudu I_{sq} , dochází k poklesu indukčnosti v této ose. To se projeví snížením rozdílu vlastních indukčností v jednotlivých osách. To má za následek zhoršení možnosti estimace, a při jejich vyrovnaní, dokonce k její nemožnosti.

Vlivem změny pracovního bodu pohonu se projevuje také jev vzájemných indukčností (opět závislé od konstrukce motoru). Po jejich zahrnutí do této problematiky, ovlivňuje jejich velikost, jak možnost či nemožnost estimace tedy poměr indukčností, tak způsobuje posuv estimované osy d_i vůči reálné ose stroje d . Estimovaná poloha poté vykazuje chybu závislou na daném pracovním bodě stroje, dle kterého ji lze kompenzovat přidáním offsetu polohy.

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum Jméno / Odd.
1	Všechny	Publikování dokumentu	30.11.2013 DU / RICE