



Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky

Výzkumná zpráva č.: 22190-068-2013

Pohon se Synchronním motorem s elektrickým buzením: Injektážní metoda na principu resolveru - Fázový závěs – Experimentální studie

Druh úkolu: Vědecko-výzkumný
Řešitelé: Ing. D. Uzel, prof. Ing. Z. Peroutka, Ph.D.
Vedoucí úkolu: prof. Ing. Z. Peroutka, Ph.D.
Počet stran: 21
Datum vydání: červenec 2013
Revize: 1

Anotace

Tato výzkumná zpráva poukazuje experimentální výsledky z laboratorního prototypu ohledně vlastností estimace polohy rotoru synchronního stroje s elektrickým buzením, jejímž základem je analogie konstrukce motoru s konstrukcí analogového absolutního čidla polohy tzv. Resolveru, kde pro vlastní vyhodnocení polohy je využit fázový závěs. Metoda je svým charakterem speciálním případem tzv. injektážích bezsenzorových metod, ovšem nevykazuje problém s neznalostí polarit budícího pole.

Obsah

1	ÚVOD.....	5
2	PRINCIP A TEORETICKÝ ROZBOR.....	5
2.1	Princip	5
3	BLOKOVÉ SCHÉMA	6
4	EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY	8
5	PARAMETRY SYNCHRONNÍHO MOTORU A REGULACE	15
5.1	Synchronní motor – 10kW	15
5.2	Parametry regulace	15
5.3	Design filtru.....	16
6	ZÁVĚR.....	18

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]
n	Mechanické otáčky motoru [ot./min]
ϑ	Poloha osy d ve stojícím souřadném systému (α, β) [°]
ε	Poloha požadovaného vektoru napětí ve stojícím souřadném systému (α, β) [°]
α	Poloha požadovaného vektoru napětí v rotujícím souřadném systému (d, q) [°], řídicí úhel [°]
p_p	Počet pólových dvojic [-]
P	Výkon [W]
J	Moment setrvačnosti [kgm ²]
O	Omezovač
f	Frekvence [Hz]
I, i	Elektrický proud [A], Integrátor
L	Indukčnost [H]
ω	Úhlová frekvence [rad.s ⁻¹]
R	Elektrický odpor [Ω], regulátor
T	Perioda [s], časová konstanta regulátoru [s]
t	Čas [s]
A	Amplituda střídavé veličiny
U, u	Elektrické napětí [V]
arctg	Arkus tangens
PWM	Pulsně šířková modulace
SM	Synchronní motor
PP	Filtr - pásmová propust

Kp	Proporční zesílení regulátoru [-]
Δ	Rozdíl (diference) dvou signálů
PLL	Fázový závěs

Indexy

a, b, c	Označení fáze
α, β	Stojící souřadný systém
d, q	Rotující souřadný systém svázaný s polohou rotoru
s	Veličina statoru, veličina odpovídající funkci sinus
PWM	Pulsně šířková modulace
USM	Veličina spjata s obvodem usměrňovače v rotorovém obvodu stroje
w	Požadovaná hodnota veličiny
I	Elektrický proud
N	Jmenovitá hodnota
vz	Veličina vzorkování signálu
c	Veličina spjata s kapacitou stejnosměrného meziobvodu, veličina odpovídající funkci cosinus
0	Veličina popisující ustálený stav
r	Řídicí signál, veličina rotoru, veličina regulátoru
m	Veličina mechanická
f	Veličina buzení (rotorová hodnota přepočtená na stator)
e	Estimovaná veličina
nef	Nefiltrovaná veličina
arc	Veličina vyhodnocena funkcí arkustangens
i	Složka na injektované frekvenci

1 Úvod

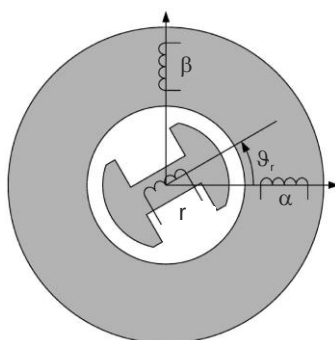
V předkládané zprávě je uveden experimentální rozbor vlastností injektážní bezsenzorové metody pro vyhodnocení polohy rotoru synchronního motoru s elektrickým buzením, kde pro generování polohy rotoru je použit fázový závěs. Zpráva poukazuje na reálné problémy dané metody.

K provedení experimentů byl použit laboratorní prototyp synchronního motoru s vinutým rotorem a vyjádřenými póly o výkonu 10 kW se štítkovými hodnotami dle kap. 0.

2 Princip a teoretický rozbor

2.1 Princip

Princip vlastní metody uvádí lit. [1]. Základní myšlenkou je použití vlastního motoru, který svou konstrukcí je totožný s analogovým absolutním čidlem polohy zvaným revolver, pro vyhodnocení absolutní polohy motoru. Princip funkce resolveru a potažmo i předkládané metody je následující. Máme-li el. stroj s konstrukcí dle Obr.2.1. Při napájení rotoru „vysokofrekvenčním“ signálem, kterým je v tomto případě 300Hz složka 3f usměrňovače, který napájí rotor, se do statorového vinutí ve stojícím souřadném systému α, β indukují 300Hz složky, které po demodulování (pronásobením) rotorovým signálem udávají sinusový a kosinusový signál z něhož lze jednoznačně demodulovat absolutní poloha rotoru motoru.

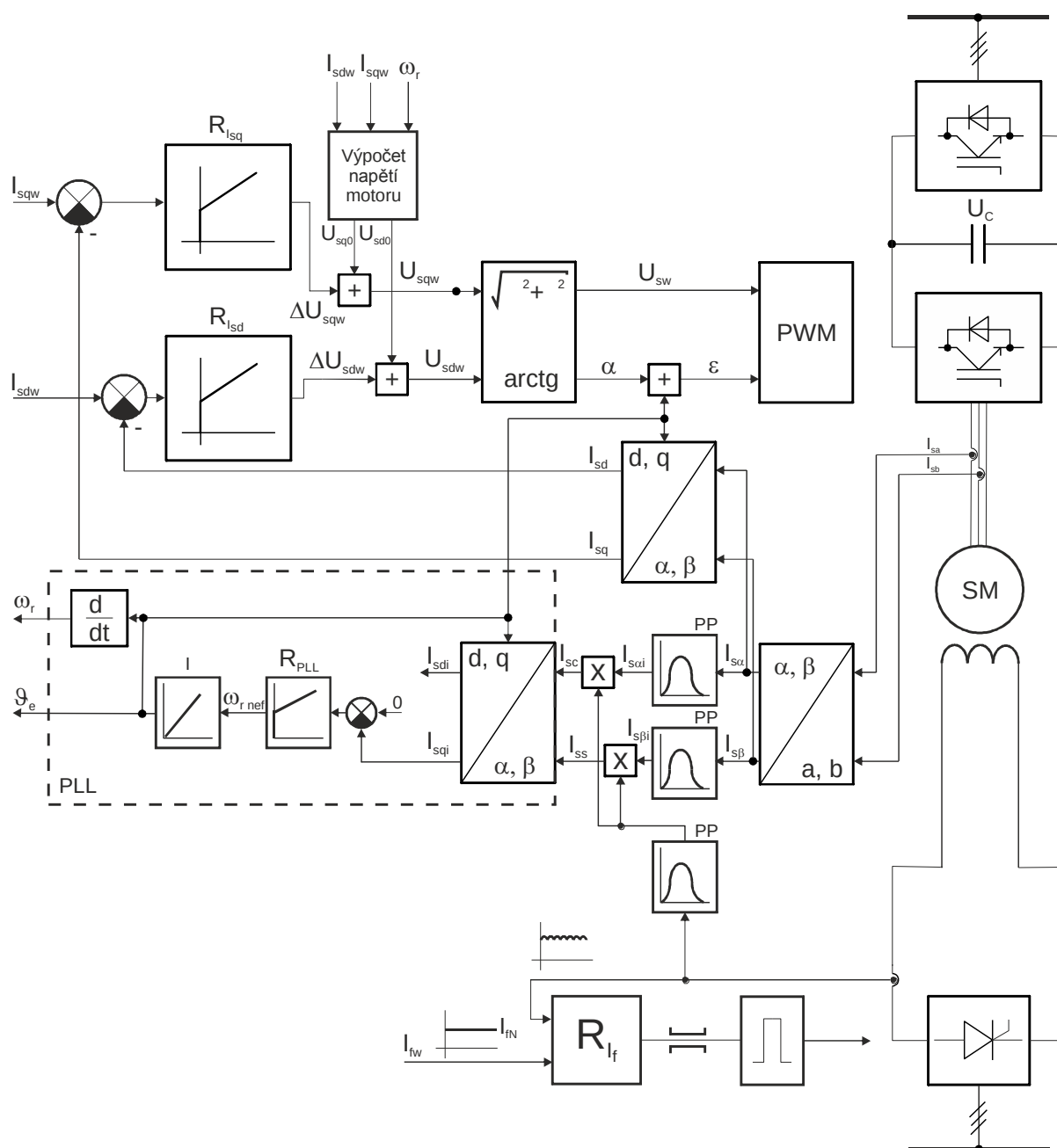


Obr.2.1 Konstrukce resolveru

Pro koncovou demodulaci je v této zprávě využit fázový závěs. Tento princip je často využíván u klasických injektážních metod pro generování estimované polohy. Detailní simulační studii tohoto řešení uvádí [2].

3 Blokové schéma

Blokové schéma předkládané metody viz Obr.3.2. Jedná se klasické vektorové řízení v kartézských souřadnicích s regulátory podélné a příčné složky vektoru proudu. Ty udávají vektor statorového napětí, které je nuceno do motoru pomocí napěťového střídače. Rotorové vinutí napájí 3f tyristorový usměrňovač v proudové regulační smyčce. Právě charakteristického zvlnění proudu od usměrňovače na frekvenci 300Hz (3f můstkové spojení) je využíváno jako budící (injektovaná) frekvence. Protože na rozdíl od resolveru, u klasického motoru je zde základní složka proudu motoru, je nutné 300Hz složku vyfiltrovat. V našem případě je použit filtr IIR jako pásmová propust (totožný filtr byl použit na statorové i rotorové veličiny). Proudů statoru v α , β souřadnicích (o frekvenci 300Hz) jsou demodulovány rotorovým vyfiltrovaným signálem o stejné frekvenci a dostáváme tak cos a sin signál, které jsou vyhodnoceni fázovým závěsem PLL (Phase locked loop), jehož výstupem je estimovaná poloha rotoru.

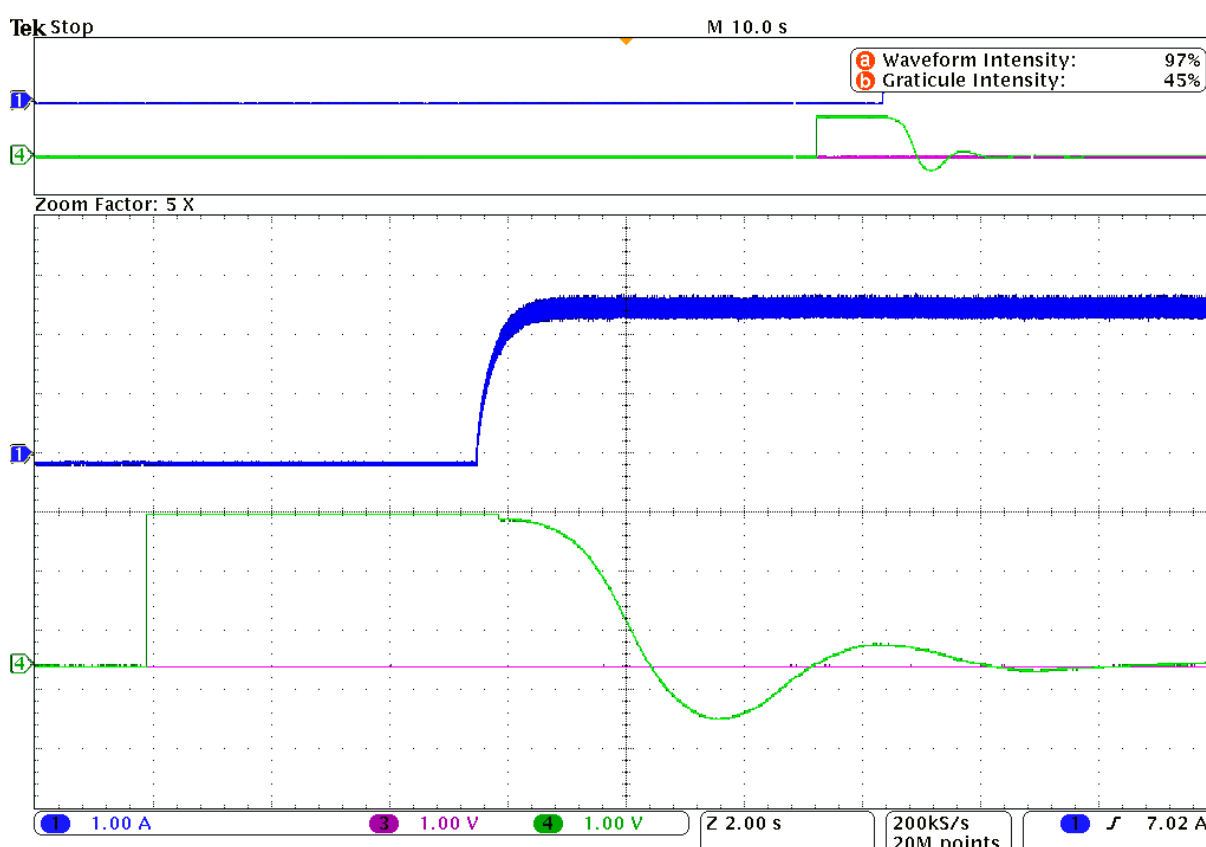


Obr.3.2 Blokové schéma estimace polohy s usměrňovačem v rotorovém obvodu

4 Experimentální výsledky

Simulace byly provedeny pro pohon dle blokového schématu Obr.3.2 a, pokud není uvedeno jinak, pro parametry dle kap. 5.

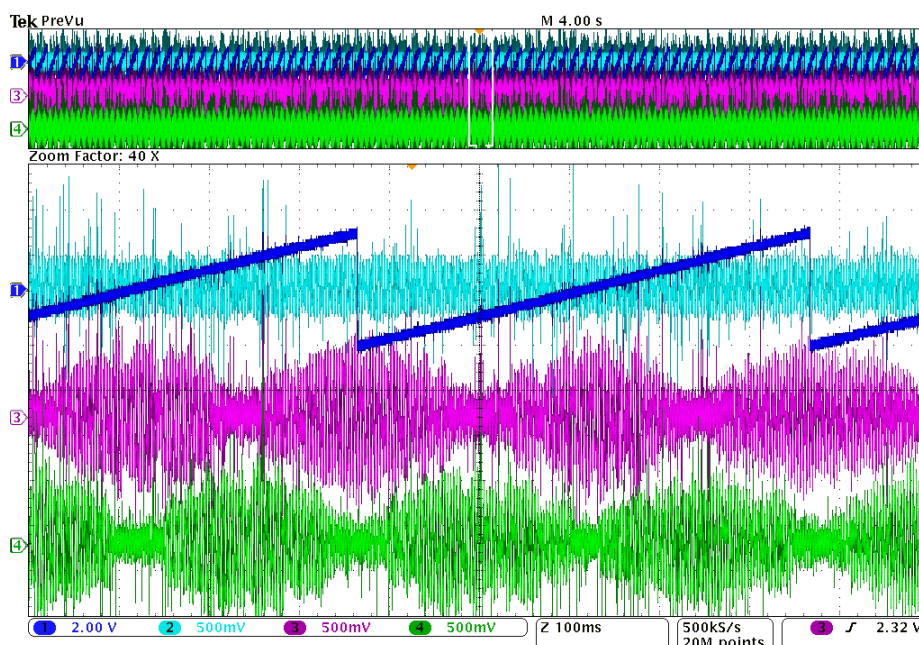
Základní otázka při využití fázového závěsu pro generování estimované polohy dle Obr.3.2 je existence dvou poloh, kde je splněno $I_{sqi} = 0$ (odpovídá stavu $\vartheta_e = \vartheta_r$ a také $\vartheta_e = \vartheta_r + \pi$), ověření tvrzení že pouze jedna poloha je stabilní, uvádí následující oscilogram.



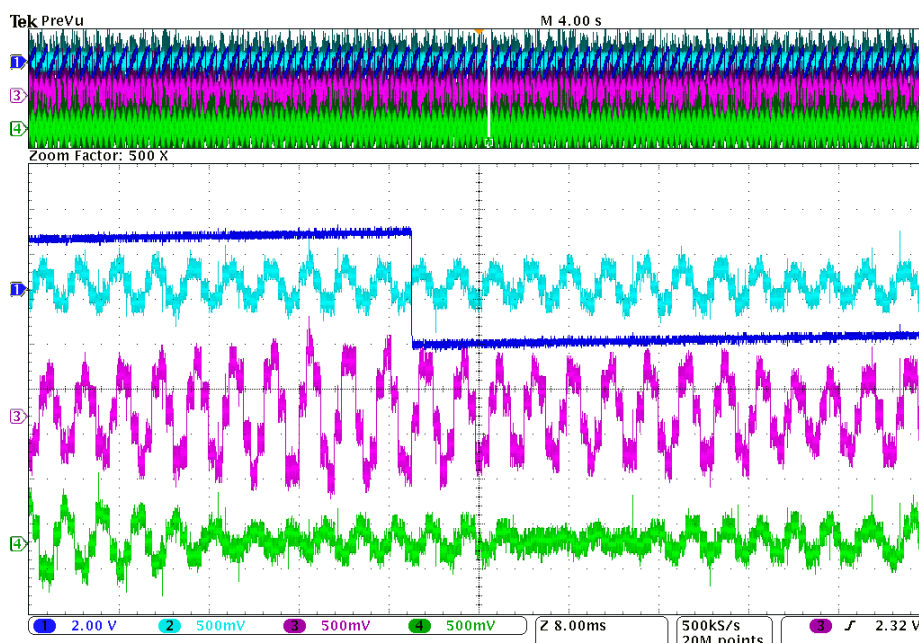
Obr.4.3 Zabržděný pohon - $K_{pPLL} = 200$, $T_{rPLL} = 0.1$ – K1: proud buzení I_r [1A/d], K3: skutečná poloha rotoru ϑ_r [72°/d], K4: estimovaná poloha rotoru ϑ_e [72°/d]

Oscilogram naznačuje, že i při počátečním nastavení estimované polohy do $\vartheta_e = \vartheta_r + \pi$, kde je splněna podmínka $I_{sqi} = 0$, ale jedná se o labilní polohu, se estimátor zorientuje do správného pracovního bodu i při nízkém zesílení fázového závěsu.

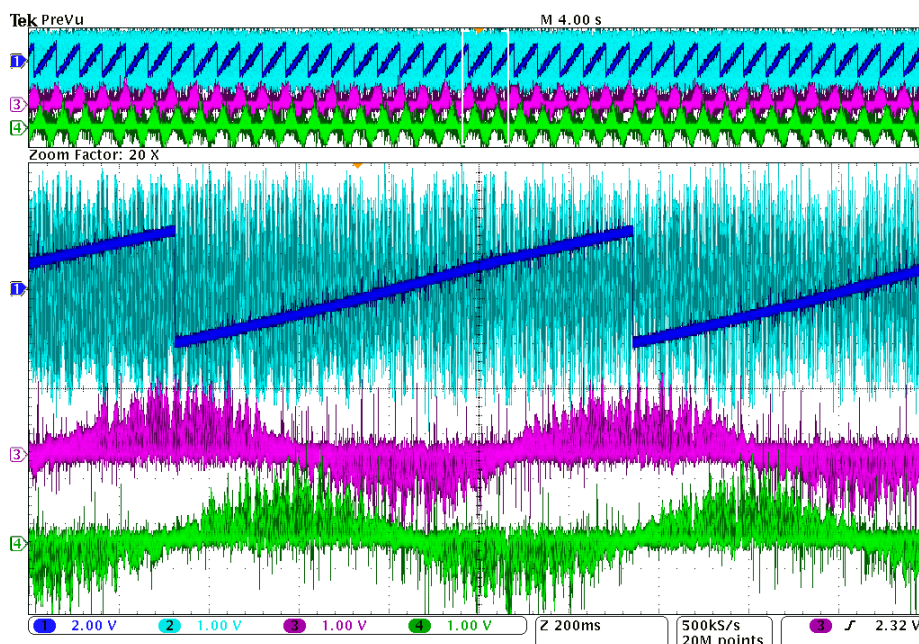
Následující oscilogramy popisují základní signály bezsenzorové metody popsané v teoretické práci [1].



Obr.4.4 Proudové odezvy na satoru – K1: skutečná poloha rotoru ϑ_r [144 %d], K2: injektovaná složka rotorového proudu buzení I_{ri} [0,3A/d], K3: proudová odezva satoru v ose α $I_{s\alpha i}$ [0,3A/d], K4: proudová odezva satoru v ose β $I_{s\beta i}$ [0,3A/d]

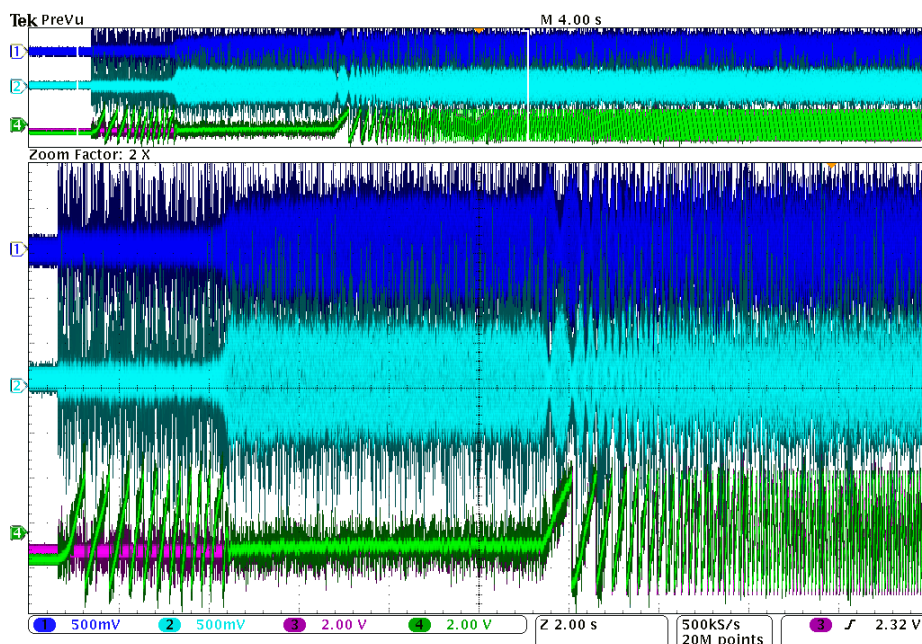


Obr.4.5 Proudové odezvy na satoru – zoom – K1: skutečná poloha rotoru ϑ_r [144 %d], K2: injektovaná složka rotorového proudu buzení I_{ri} [0,3A/d], K3: proudová odezva satoru v ose α $I_{s\alpha i}$ [0,3A/d], K4: proudová odezva satoru v ose β $I_{s\beta i}$ [0,3A/d]

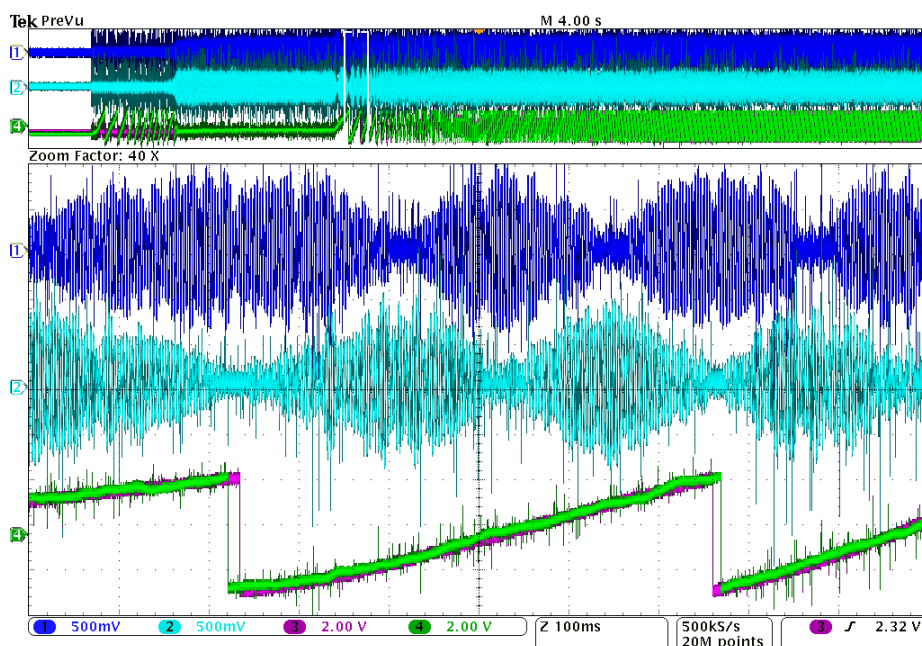


Obr.4.6 Demodulované proudové odezvy na statoru – K1: skutečná poloha rotoru ϑ_r [144 %d], K2: injektovaná složka rotorového proudu buzení I_{ri} [0,15A/d], K3: kosinusová proudová odezva statoru I_{sc} [0,15A/d], K4: sinusová proudová odezva statoru I_{ss} [0,15A/d]

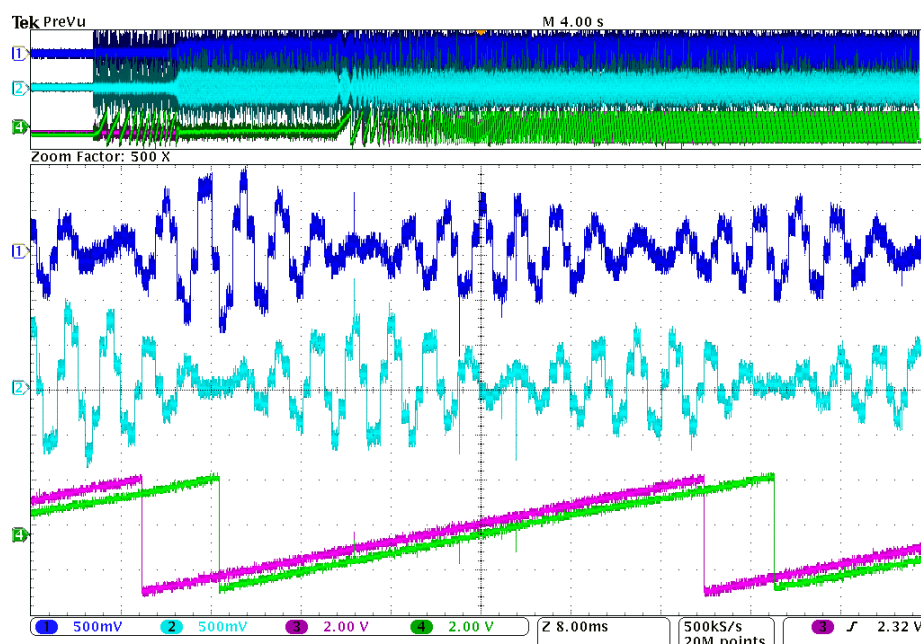
Obr.4.5 poukazuje na fázový posuv estimované polohy vůči skutečné vlivem využití vstupní pásmové propusti. Dále je tento efekt znatelný zejména při vyšších otáčkách motoru viz Obr.4.9. Toto zpoždění je možné kompenzovat dle rychlosti otáčení kompenzačním přírůstkem polohy. Na Obr.4.7 je možné si povšimnout nenabuzeného motoru (injektovaný signál není k dispozici), kde fázový závěs není zavěšen. Po nabuzení stroje je neomylně nalezena poloha rotoru. Oscilogramy Obr.4.10 a Obr.4.11 testují vliv změny rotorového proudu na estimaci polohy. Z důvodu velké indukčnosti rotoru a určité setrvačnosti fázového závěsu není u testovaného prototypu s tímto jevem problém. Problém nastává při rychlých změnách statorových proudů, jelikož injektovaná frekvence 300Hz není dostatečně vzdálená od základních frekvencí motoru viz Obr.4.12 a Obr.4.13. Při zasynchronizovaném estimátoru polohy má destabilizační vliv pouze rušení v ose q, jelikož pouze ten fázový závěs využívá. To je možné ošetřit návrhem opatrného nadřazeného řízení otáček, nebo zvýšením injektované frekvence použitím jiného měniče napájecího rotorový obvod.



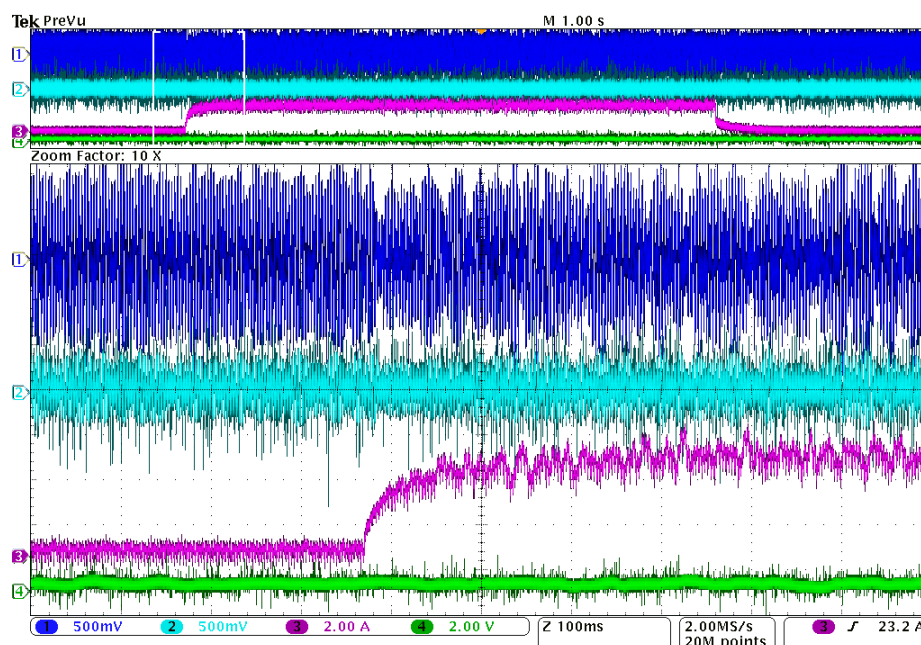
Obr.4.7 Rozjezd pohonu 0 – 600ot. – K1: proudová odezva statoru v ose α $I_{s\alpha i}$ [0,3A/d], K2: proudová odezva statoru v ose β $I_{s\beta i}$ [0,3A/d], K3: skutečná poloha rotoru ϑ_r [144 %d], K4: estimovaná poloha rotoru ϑ_e [144 %d]



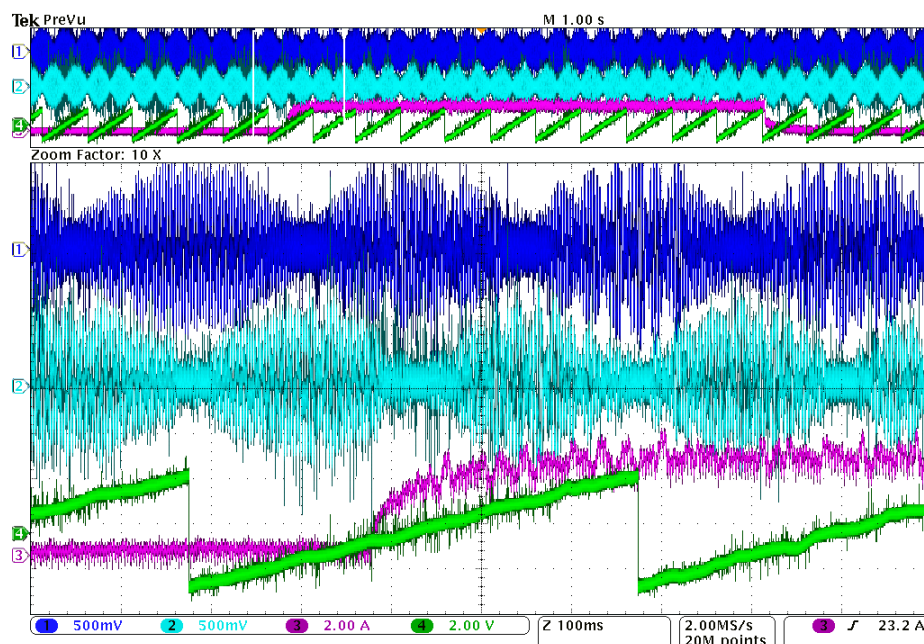
Obr.4.8 Rozjezd pohonu 0 – 600ot. – nízké otáčky - K1: proudová odezva statoru v ose α $I_{s\alpha i}$ [0,3A/d], K2: proudová odezva statoru v ose β $I_{s\beta i}$ [0,3A/d], K3: skutečná poloha rotoru ϑ_r [144 %d], K4: estimovaná poloha rotoru ϑ_e [144 %d]



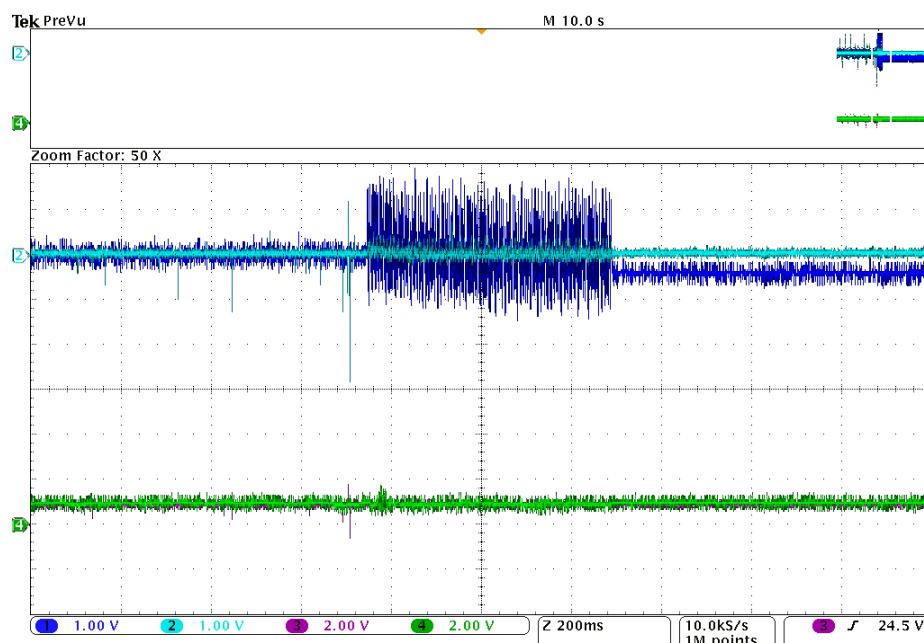
Obr.4.9 Rozjezd pohonu 0 – 600ot. – vysoké otáčky - K1: proudová odezva statoru v ose α $I_{s\alpha i}$ [0,3A/d], K2: proudová odezva statoru v ose β $I_{s\beta i}$ [0,3A/d], K3: skutečná poloha rotoru ϑ_r [144 %d], K4: estimovaná poloha rotoru ϑ_e [144 %d]



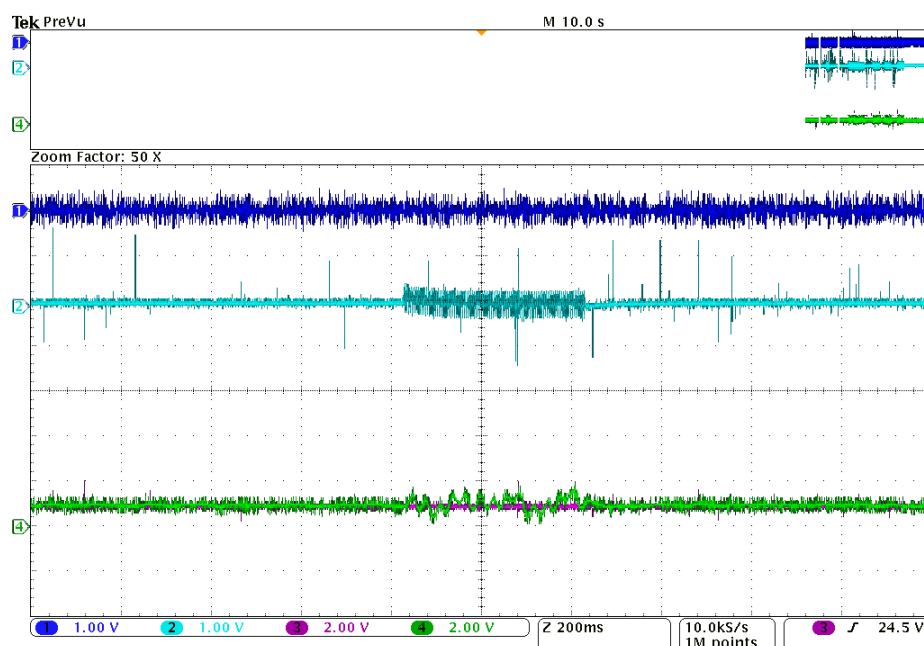
Obr.4.10 Vliv změny proudu buzení – $K_{pIf} = 40$, $T_{rIf} = 0,05$ - K1: proudová odezva statoru v ose α $I_{s\alpha i}$ [0,3A/d], K2: proudová odezva statoru v ose β $I_{s\beta i}$ [0,3A/d], K3: proud buzení I_r [2A/d], K4: estimovaná poloha rotoru ϑ_e [144 %d]



Obr.4.11 Vliv změny proudu buzení – $K_{pIf} = 40$, $T_{rIf} = 0,05$ - K1: proudová odezva statoru v ose α $I_{s\alpha i}$ [0,3A/d], K2: proudová odezva statoru v ose β $I_{s\beta i}$ [0,3A/d], K3: proud buzení I_r [2A/d], K4: estimovaná poloha rotoru ϑ_e [144°/d]



Obr.4.12 Vliv změny statorového proudu v ose d – injektováno 300Hz - K1: proud statoru v ose d I_{sd} [2,55A/d], K2: proud statoru v ose q I_{sq} [2,55A/d], K3: skutečná poloha rotoru ϑ_r [180°/d], K4: estimovaná poloha rotoru ϑ_e [180°/d]



Obr.4.13 Vliv změny statorového proudu v ose q – injektováno 300Hz - K1: proud statoru v ose d I_{sd} [2,55A/d], K2: proud statoru v ose q I_{sq} [2,55A/d], K3: skutečná poloha rotoru ϑ_r [180°d], K4: estimovaná poloha rotoru ϑ_e [180°d]

5 Parametry synchronního motoru a regulace

5.1 Synchronní motor – 10kW

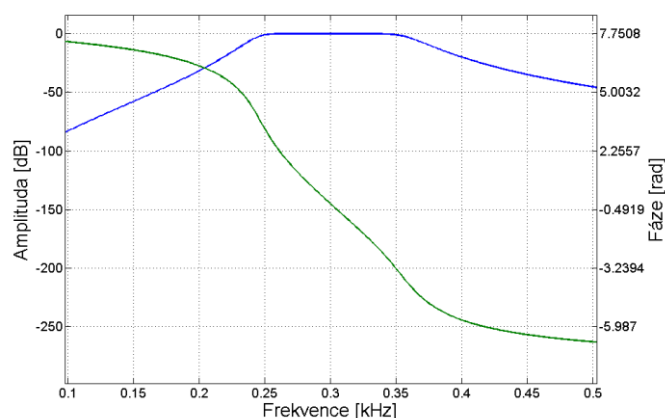
Jmenovitý výkon motoru P_m	10kW
Jmenovitá rychlost n_N	1500 ot./min
Počet pólů p_p	2
Jmenovitý proud motoru I_{sN}	18A _{rms}
Jmenovitý proud buzení I_{rN}	2A
Odpor statoru R_s	0,28Ω
Statorová indukčnost v ose d L_{sd}	90mH
Statorová indukčnost v ose q L_{sq}	25mH

5.2 Parametry regulace

Požadovaná hodnota proudu I_{sdw}	0A
Požadovaná hodnota proudu I_{sqw}	5A
Moment setrvačnosti J	cca 0,1kgm ²
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_{pIs}	6 [-]
Časová konstanta PI regulátorů proudu T_{rIs}	0,05s
Proporční zesílení PI regulátoru buzení K_{pIf}	20 [-]
Časová konstanta PI regulátoru buzení T_{rIf}	0,05s
Proporční zesílení PI regulátoru buzení K_{pPLL}	1200 [-]
Časová konstanta PI regulátoru buzení T_{rPLL}	0,01s

5.3 Design filtru

IIR filter – metoda návrhu Butterworth, struktura Direct-form II SOS. Filtr musí být souměrný kolem injektované frekvence a propouštět pásmo rovno dvojnásobné maximální základní statorové frekvenci motoru (pro demodulaci jsou nutné obě složky modulované na injektované frekvenci).



Obr.5.14 Design filtru

```
//středová frekvence 300Hz, vzorkovací frekvence 1600Hz
const float NUM_iir[MWSPT_NSEC][3] = {
```

```
{
    0.1859509796,      0,      0
},
{
    1,      0,      -1
},
{
    0.1859509796,      0,      0
},
{
    1,      0,      -1
},
{
    0.08949917555,      0,      0
},
{
    1,      0,      -1
},
{
    1,      0,      0
}
};
```

```
const float DEN_iir[MWSPT_NSEC][3] = {  
    {  
        1,          0,          0  
    },  
    {  
        1, -0.3838066757,  0.9026302695  
    },  
    {  
        1,          0,          0  
    },  
    {  
        1, -1.055522799,  0.9164228439  
    },  
    {  
        1,          0,          0  
    },  
    {  
        1, -0.7105196118,  0.8210016489  
    },  
    {  
        1,          0,          0  
    }  
}
```

6 Závěr

Z uvedených experimentů na reálném prototypu byly ověřeny teoretické předpoklady dle zprávy [1] a [2]. Oproti simulacím je zjevné velké zarušení užitečných signálů, což při principu amplitudové modulace, má vliv na výsledný tvar estimované polohy. Pro vylepšení by bylo možné použít pokročilejší techniku na vyhodnocení např. na principu Kalmanova filtru.

Literatura

- [1] Uzel, D.; Peroutka, Z.: Pohon se Synchronním motorem s elektrickým buzením: Injektážní metoda na principu resolveru – Teoretický rozbor. Oponovaná výzkumná zpráva č. 22190-22-2012, Plzeň 2012.

- [2] Uzel, D.; Peroutka, Z.: Pohon se Synchronním motorem s elektrickým buzením: Injektážní metoda na principu resolveru – Fázový závěs – Simulační studie. Oponovaná výzkumná zpráva č. 22190-23-2012, Plzeň 2012.

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum Jméno / Odd.
1	Všechny	Publikování dokumentu	27.10.2013 DU / RICE