

# Experimentální otestování pulzujícího injektážního estimátoru polohy rotoru PMSM

Marek Jiříček

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Fakulta elektrotechnická

Západočeská univerzita v Plzni

jiricekm@kev.zcu.cz

## Experimental Testing of Pulsating Injection Rotor Position Estimator for PMSM

**Abstract** – This paper presents description of pulsating injection rotor position estimator algorithm for PMSM and results of experimental tests. Estimator is used for position and speed feedback in sensorless control of PMSM drive. Experimental tests were focused on determining usability of rotor position estimator with emphasis on rotor speed limitation.

**Keywords** – PMSM; Pulsating injection; Rotor position estimator; Sensorless Control; Vector Control.

### I. ÚVOD

Při bezsenzorovém řízení PMSM je poloha a rychlost rotoru vyhodnocována na základě elektrických veličin motoru. Při velmi nízkých a nulových rychlostech za běžného způsobu provozu PMSM bez čidla polohy není zajištěna pozorovatelnost systému. Při zapojení algoritmu pulzujícího injektážního estimátoru je tento problém řešen pomocí „vysokofrekvenční“ injektáže testovacího napětí, které vyvolává proudovou odezvu. Při dostatečně velké magnetické anizotropii stroje (rozdíl indukčností v příčné a podélné ose) obsahuje tato proudová odezva informaci o poloze rotoru. Pulzující injektážní estimátor zajišťuje vyhodnocení polohy a rychlosti rotoru PMSM a zároveň řídí injektáž testovacího napětí.

### II. MATEMATICKÝ MODEL ODEZVY NA INJEKTÁŽ

Injektované testovací napětí je popsáno pulzujícím prostorovým vektorem (1) ve stojícím systému spřaženým s magnetickou osou jedné z fází motoru (systém alfa-beta).

$$\hat{u}_{sInjII} = U_{mInj} \cos(\omega_e t) e^{j(\vartheta_{Inj} - \vartheta_{el})} \quad (1)$$

Proudová odezva na takto injektované napětí je v systému spřaženém s polohou  $\vartheta_{Inj}$  popsána rovnicemi (2).

$$\begin{bmatrix} i_{Injd(ref)} \\ i_{Injq(ref)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{U_{mInj}}{\omega_{Inj}} \sin(\omega_e t) \frac{1}{2} \left( \frac{1}{L_{sd}} + \frac{1}{L_{sq}} + \left( \frac{1}{L_{sd}} - \frac{1}{L_{sq}} \right) \cos(2\Delta\vartheta) \right) \\ \frac{U_{mInj}}{\omega_{Inj}} \sin(\omega_e t) \frac{1}{2} \left( \frac{1}{L_{sq}} - \frac{1}{L_{sd}} \right) \sin(2\Delta\vartheta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Úhel  $\Delta\vartheta$  je rozdíl mezi polohou injektáže  $\vartheta_{Inj}$  a skutečnou elektrickou polohou osy permanentních magnetů rotoru (PM). Odvození rovnic [1], [2] předpokládá  $\omega_e \gg \omega_{el}$ , kde se jedná o injektovanou úhlovou frekvenci a elektrickou rychlost rotoru, a nulovou

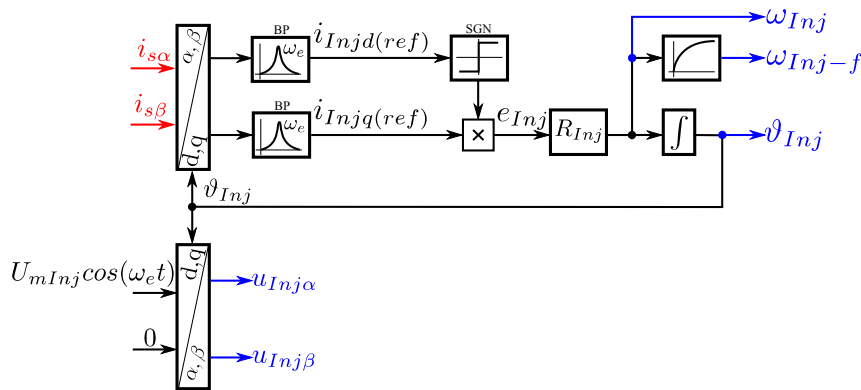
změnu  $\Delta\vartheta$ . V reálném případě se jedná o použitelnou aproximaci. Model udává, že složky proudové odezvy mají harmonický průběh o injektované frekvenci a jejich proměnná amplituda závisí na  $\Delta\vartheta$ . Průběh u složky  $i_{Injq(ref)}$  navíc také podle  $\Delta\vartheta$  může nabývat fáze 0, nebo  $180^\circ$ .

### III. ALGORITMUS ESTIMÁTORU

Výše zmíněné chování proudové odezvy je využíváno takzvaným indikátorem  $\Delta\vartheta$ . Výstup indikátoru je dán vztahem (3).

$$e_{Inj} = \text{sgn}(i_{Injd(ref)})i_{Injq(ref)} \quad (3)$$

Průběh na výstupu je zvlněný, nicméně je unipolární a jeho maximální hodnota se dá minimalizovat změnou  $\Delta\vartheta$ . Toho estimátor polohy za výše zmíněných podmínek dosahuje pomocí řízení polohy  $\vartheta_{Inj}$  na principu fázového závěsu s PI regulátorem, který minimalizuje  $e_{Inj}$  změnou  $\vartheta_{Inj}$ , potažmo udává rychlost rotace polohy injektáže  $\omega_{Inj} = \frac{d}{dt}\vartheta_{Inj}$ .



**Obrázek I. Blokové schéma estimátoru polohy osy PM**

Algoritmus estimátoru popsany obrázkem I zajišťuje zadávání testovacího napětíového signálu a zároveň řízení polohy  $\vartheta_{Inj}$  do které je toto napětí v podobě pulzujícího vektoru (1) injektováno. Při provozu estimátoru je předpokládáno, že se  $\vartheta_{Inj}$  jen velmi málo odchyluje od polohy osy PM a tato hodnota je tedy i výstupem estimátoru, potažmo estimovanou polohou PM.

### IV. EXPERIMENTY

Prezentovaný estimátor polohy byl testován za bezsenzorového řízení PMSM. To znamená že byl použit pro zpětnou vazbu rychlosti a polohy rotoru. Úkolem bezsenzorového řízení byla regulace rychlosti motoru. Cílem experimentů bylo nalezení stavů, kdy bezsenzorové řízení podává přijatelné výsledky a kdy naopak na základě funkce estimátoru selhává. Algoritmy byly implementovány do DSP TMS320f28335 na vývojové desce MLC Interface [3]. Jako řídicí algoritmus bylo použito standardní vektorové řízení v kartézském souřadném systému svázaném s tokem PM. Měníč pohonu dvojúrovňový napětíový střídač s IGB tranzistory. Použitá modulace byla asynchronní pulsně šířková. Řízení neobsahovalo injektáž třetí harmonické, ani jiné opatření pro zvýšení modulačního indexu.

### A. Parametry experimentálního prototypu

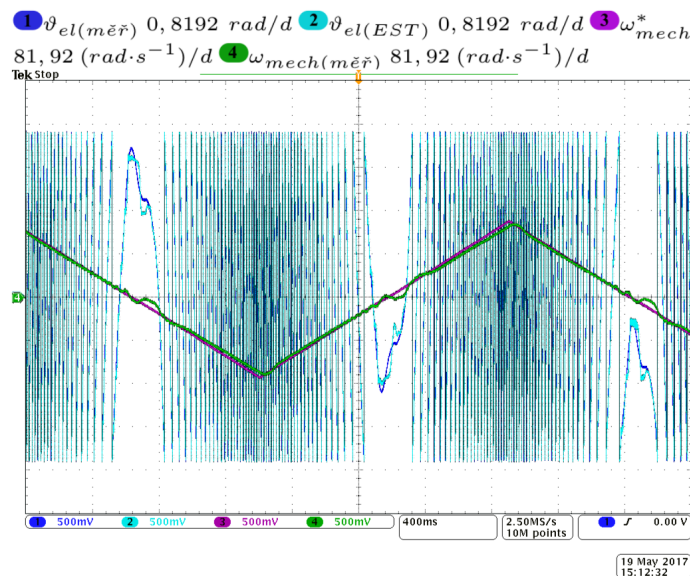
Tabulka I obsahuje hlavní parametry použitého motoru a algoritmu řízení. Parametry řízení, jako například vzorkovací frekvence a frekvence injektovaného signálu byly vybrány s ohledem na využití výpočetního času a odstup základní statorové frekvence, injektované frekvence a vzorkovací, potažmo frekvence nosného signálu (pily) PWM.

TABULKA I. PARAMETRY EXPERIMENTÁLNÍHO PROTOTYPU

Počet pól párů motoru	3
Jmenovitý výkon motoru	310 W
Jmenovitý proud motoru	9 A
Jmenovité napětí stejnosměrného meziobvodu	30 V
Vzorkovací frekvence a frekvence pily PWM	12 kHz
Injektovaná frekvence	1200 Hz
Amplituda injektovaného vektoru napětí	8 V
Proporcionální zesílení regulátoru $\vartheta_{Inj}$	1000
Časová konstanta integrační složky regulátoru $\vartheta_{Inj}$	0,1
Propustné pásmo filtru pásmová propust	1000 Hz až 1400 Hz

### B. Experimentální výsledky

Zde jsou prezentovány výsledky dosažené na mezi použitelnosti estimátoru. Pro nezatížený motor.



**Obrázek II. Bezsenzorové řízení [čas 400 ms/d]**

Na obrázku II je mechanická rychlost zadávána jako trojúhelníkový průběhem s maximem 150 rad/s a periodou 3 s. Motor byl nezatížený. Oscilogram porovnává požadovanou rychlost se skutečnou a odhadovanou polohu se skutečnou. Obrázek III ukazuje stavy selhání bezsenzorového řízení vlivem chybné estimace polohy. V případě a) je zadáván požadavek na mechanickou rychlost v podobě trojúhelníkového průběhu s maximem 170 rad/s a periodou 3 s. V případě b) byl požadavek na rychlost skokově změněn z hodnoty 150 rad/s na 160 rad/s.

