

Једно решење за старт синхроних мотора са утиснутим перманентним магнетима

Дарко Марчетић

Факултет техничких наука
Универзитет у Новом Саду
Нови Сад, Србија
darmar@uns.ac.rs

Петар Матић

Електротехнички факултет
Универзитет у Бања Луци
Бања Лука, Република Српска
pero@etfbl.net

Abstract— У раду је предложена нова техника за енергетски ефикасан старт синхроних мотора са утиснутим магнетима без давача положаја на вратилу. Предложена техника је базирана на скаларној контроли, али са додатним механизмом који адаптира амплитуду статорског напона према тренутном оптерећењу, како током самог старта из мировања, тако и током убрзавања. Техника је једноставна и неинвазивна, тј. не зависи од сложених модела мотора и не користи утискивање нежељеног високо фреквентног тест сигнала за процену положаја. Имплементирана је на јефтину процесору и тестирана за разна оптерећења. Добијени резултати показују да је предложена метода старта ефикаснија од постојећих управљачких шема засниваних на моделу, и да су јој перформансе сличне онима које постижу шеме које користе високо фреквентни тест сигнал.

Keyword: *IPMSM, v_f control, speed ramping*

I. УВОД

Синхрона машина са утиснутим магнетима, енг. *Interior Permanent Magnet Synchronous Machine (IPMSM)* се данас често користи у регулисаним погонима због своје релативно ниске цене, високе ефикасности и великог односа момент-инерција [1]. Ипак, *IPMSM* се ретко користе у погонима код којих се захтева ниска јединична цена. Са једне стране, у овим погонима се користи економично начињен мотор са минималном количним материјала који захтева сложено управљање, што се уобичајено постиже векторском контролом којој је неопходна тачна информација о тренутном положају ротора. Са друге стране, јефтин погон је увек реализован без давача на вратилу и његов контролни алгоритам мора да се ослани на естимацију положаја која представља сложен проблем, поготово током старта.

Старт *IPMSM* мотора са непознатим оптерећењем је велики изазов због проблема са естимацијом положаја ротора пре отпочињања старта и у почетној фази старта. У овим фазама старта брзина ротора је једнака нули или је веома ниска, тако да је контра електромоторна сила (емс) ротора премала за ефикасну примену алгоритама за процену положаја ротора. Због тога се естиматори засновани на моделу *IPMSM* не могу поуздано користити. Зато већина решења за оптимални старт *IPMSM* са непознатим стартим оптерећењем користи утискивање високо фреквентних (ВФ) тест сигнала за индиректну процену положаја, чиме се елиминише проблем мале

основне емс. ВФ сигнал се може утиснути као ротирајући фазор у стационарном систему оса [2] или као пулсациони сигнал у естимираном *dq* систему оса [3]. Праћењем промене процењеног положаја ротора векторски контролер је у могућности да правовремено адаптира амплитуду и угао вектора струје статора променама оптерећења и брзине ротора, и уједно имплементира и алгоритме за минимизацију губитака. Највећи недостатак ових метода је бука која је резултат утиснутог ВФ сигнала у намотаје статора, и која је неприхватљива у већини апликација.

Друго решење за старт *IPMSM* са непознатим оптерећењем је управљање у отвореној спрези, тако да се напон и учестаност задају по рампи уз усвојени однос напона и учестаности. Међутим, да би се обезбедио поуздан старт, неопходно је да се однос v/f унапред одабере према највећем очекиваном оптерећењу. Овакав избор резултује енергетски неефикасним стартом за оптерећења мања од претпостављеног, што доводи до непотребних губитака током старта и прегревања мотора.

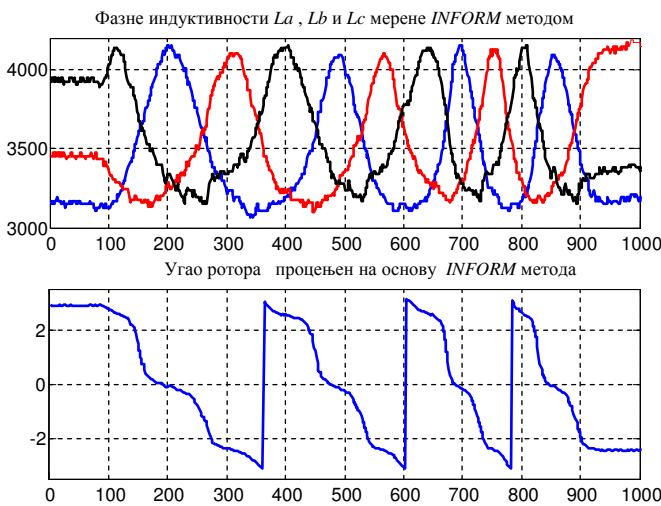
Основни циљ овог рада је да предложи нову шему за старт *IPMSM* која не користи бучни ВФ сигнал и нема потребу за информацијом о тренутном положају ротора. Шема треба да буде енергетски ефикасна, односно способна да се брзо адаптира на могуће промене оптерећења током целе фазе старта, без задавања непотребно великог напона на мотору. Предложено решење покреће ротор из мировања и убрзава га до брзине при којој је емс довољна за ефикасну примену управљања заснованог на процени положаја ротора (нпр. векторског управљања). Циљно подручје примене су погони у домаћинству код којих је енергетска ефикасност обавезна, али било каква бука у току рада неприхватљива. Предложено решење независно посматра три фазе старта: фазу одређивања иницијалног положаја ротора и фазу стартовања из мировања (погл. II), и фазу убрзавања ка брзини након које векторски контролер преузима (погл. III). Експериментални резултати су дати у погл. IV.

II. ПРОЦЕНА ИНИЦИЈАЛНОГ ПОЛОЖАЈА И ПОКРЕТАЊЕ

Прва фаза старта *IPMSM* је процена иницијалног положаја мирујућег ротора, његово покретање из иницијалног положаја, и процена потребног почетног момента, односно напона, за покретање тог оптерећења.

Код великог броја постојећих техника, покретању *IPMSM* претходи фаза позиционирања ротора на познату почетну позицију, уобичајено паралелну са осом фазе а статора [1]. Али, овај поступак је робусан и ефикасан само ако се познаје полазно оптерећење, па се може одредити оптималан ниво струје за правилно позиционирање ротора. Уколико је почетно оптерећење непознато, позиционирање ротора се мора обављати са високим нивоима струје, што га чини изразито енергетски неефикасним.

Дакле, позиционирање ротора не сме да буде део ефикасног старта непознатог оптерећења. Мотор је неопходно стартовати из његове иницијалне позиције у којој се затекао пре старта, па је зато неопходно ту позицију пре старта проценити. Један начин да се то уради без бучног ВФ сигнала је применом *INFORM* методе [4]. *INFORM* метода користи инхерентне варијације струје статора услед PWM напонског сигнала. Ове осцилације су изван чујног подручја ($\geq 16\text{kHz}$) али се могу искористити за мерење индуктивности три фазе статора. Типични облици сигнала процењених L_a , L_b and L_c заједно са прецењеним положајем ротора $\hat{\theta}_r = \arctan(L_\alpha/L_\beta)$ за ручно окретан ротор су приказани на слици 1. Процена иницијалног положаја ротора се завршава са два узастопна напонска импулса различитих поларитета којима се утврђује поларитет магнета и по потреби коригује положај за 180° .



Слика 1. Типичан изглед естимираних индуктивности и угла ротора

Након што је естимиран иницијални положај ротора, прелази се на покретања ротора *IPMSM*. У овој фази је потребно обезбедити почетни момент адекватан за тренутно оптерећење. То се може остварити тако што се вектор напона прво постави у оптималан положај у односу на магнет, а затим се увећава његова амплитуда све док се не осети покрет ротора. На пример, у овој фази вектор напона се може држати под углом од 90° у односу на почетни положај ротора. Пошто је фактор снаге близак јединици, пораст напона доводи и до пораста струје тачно у q -оси магнета чиме расте и момент. Када напон порасте тако да се успостави довољно момента за дато оптерећење, ротор почиње да се помера у правцу напонског (и струјног) вектора. Овај покрет је могуће лако осетити и

даље применом *INFORM* методе, чиме је старт детектован и идентификован потребан стартни напон.

Након што је детектован успешан старт, статорска фреквенција може се повећавати како би се ротор убрзао све док се не детектује користан ниво амплитуде емс ротора. Када емс довољно порасте, контролу преузима предложени контролер амплитуде и фреквенције статорског напона, што је објашњено у следећем поглављу.

III. АЛГОРИТАМ ЗА ЕФИКАСНО И РОБУСНО УБРЗАВАЊЕ *IPMSM* СА НЕПОЗНАТИМ ОПТЕРЕЋЕЊЕМ

У трећој фази претпоставља се да је почетним напоном ротор покренут у правом смеру и да га је сада неопходно убрзати. Током убрзавања по рампи брзине, статорски напон треба модификовати у односу на почетну вредност тако да расте са растом брзине, али и да се додатно увећа при евентуалној промени момента оптерећења. Додатним повећавањем напона при повећавању оптерећења увећава се и робусност система. Потребан напонски вектор се може пронаћи на основу стационарног модела *IPMSM* у синхронно ротирајућем dq систему:

$$V_d = R_s I_d - \omega_e \Psi_q, \quad V_q = R_s I_q - \omega_e \Psi_d \quad (1)$$

$$\Psi_d = \Psi_{PM} + L_d I_d, \quad \Psi_q = L_q I_q \quad (2)$$

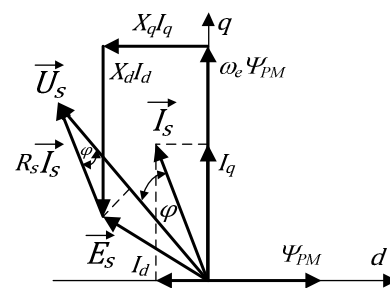
$$t_e = \frac{3}{2} P (\Psi_{PM} I_q + (L_d - L_q) I_d I_q) \quad (3)$$

где су V_d , V_q , I_d , I_q , Ψ_d , Ψ_q dq компоненте вектора статорског напона, струје и роторског флуksа, ω_e је синхронна брзина, Ψ_{PM} је флуks магнета, P број пари полова, t_e момент, и R_s , L_d , L_q су статорска отпорност и индуктивности d и q осе. Даље важи:

$$\vec{V}_s = R_s \vec{I}_s + \vec{E}_s, \quad (4)$$

$$\vec{E}_s = j\omega_e \Psi_{PM} + jX_d I_d + X_q I_q, \quad (5)$$

где су \vec{V}_s , \vec{I}_s и \vec{E}_s вектори напона, струје и емс, X_d and X_q су dq реактансе статора. Векторски дијаграм мотора са d осом у правцу флуksа магнета је дат на слици 2.



Слика 2. Стационарни векторски дијаграм *IPMSM* за $I_d < 0$

На основу слике 2 важи:

$$V_s = R_s I_s \cos \varphi + \sqrt{E_s^2 - R_s^2 I_s^2 \sin^2 \varphi} \quad (6)$$

$$E_s^2 = (\omega_e \Psi_{PM} - X_d I_d)^2 + (X_q I_q)^2 \quad (7)$$

Да би постигао ефикасно v/f управљање Перера [5] предлаже да се амплитуда статорског напона подеси тако да се добије константна амплитуда флукса статора без обзира на промене терета. Задржавањем константног флукса статора напон се одржава на релативно ниској вредности, а притом не долази до значајног умањења моментних могућности. Перера усваја оптималну вредност статорског флукса једнаку флуксу ротора:

$$\Psi_s = \Psi_r = \Psi_{PM}. \quad (8)$$

У том случају важи:

$$(\omega_e \Psi_{PM})^2 = (\omega_e \Psi_{PM} - X_d I_d)^2 + (X_q I_q)^2 \quad (9)$$

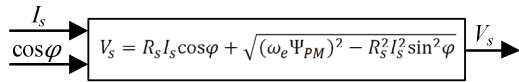
и за компоненте статорске струје се добија:

$$(L_d I_d)^2 + 2\Psi_{PM} L_d I_d + (L_q I_q)^2 = 0 \quad (10)$$

Амплитуда статорског напона која одговара жељеној амплитуди статорског флукса гласи:

$$V_s = R_s I_s \cos\varphi + \sqrt{(\omega_e \Psi_{PM})^2 - R_s^2 I_s^2 \sin^2\varphi}, \quad (11)$$

Перера користи (11) да одржи статорски флукс на Ψ_{PM} нивоу, слика 3.



Слика 3. Рачун оптималне вредности статорског напона по [5]

Шема са слике 3 ради добро на великим и средњим брзинама, али поседује озбиљне недостатке при старту мотора. Прво, може се показати да напон (11) резултује у фактору снаге блиском јединици, што не даје довољну моментну маргину потребну при наглим променама оптерећења. Друго, ова једначина даје коректан резултат само у стационарном стању, тј. када је статорски флукс једнак роторском. Као последица, не постоји гладак прелазак са почетног стартног напона на онај израчунат на основу (11). У случају превеликог почетног напона аргумент испод корена у (11) чак постаје негативан, и нова оптимална вредност напона се не може ни израчунати.

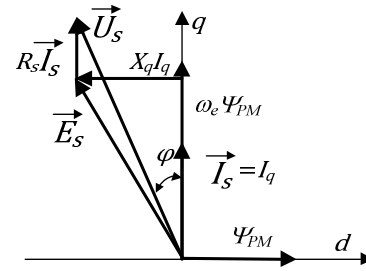
Очигледно је да је за ефикасан и робустан старт $IPMSM$ потребно модификовати дату шему. Прво, шема мора бити способна за брз прелазак са почетног на оптимални напон. Друго, шема мора бити робусна на промену оптерећења које се може десити током убрзања. Да би се остварио први услов, шема се трансформише у шему са повратном спрегом по амплитуди статорске емс, или њеног квадрата:

$$E_s^2 = (V_s - R_s I_s \cos\varphi)^2 + R_s^2 I_s^2 \sin^2\varphi, \quad (12)$$

коју је потребно поредити са квадратом жељене вредности емс. Да би се остварио други услов, тј повећала робусност шеме на нагле промене оптерећења, референцу квадрата статорске емс треба мењати са оптерећењем. На пример, ако се референца мења на следећи начин,

$$(E_s^{REF})^2 = (\omega_e \Psi_{PM})^2 + (X_q I_q)^2, \quad (13)$$

вектор струје статора се за било које оптерећење задржава у q оси ротора, слика 4, чиме се у сваком тренутку задржава довољна моментна маргина.



Слика 4. Стационарни векторски дијаграм $IPMSM$ за $I_d = 0$

Једначина (13) се не може директно користити, јер нису познате компоненте струје статора у синхронном координатном систему, али је могуће референцу емс кориговати са оптерећењем на следећи начин:

$$(E_s^{REF})^2 = (\omega_e \Psi_{PM})^2 + \omega_e K t_{el}^2 \quad (14)$$

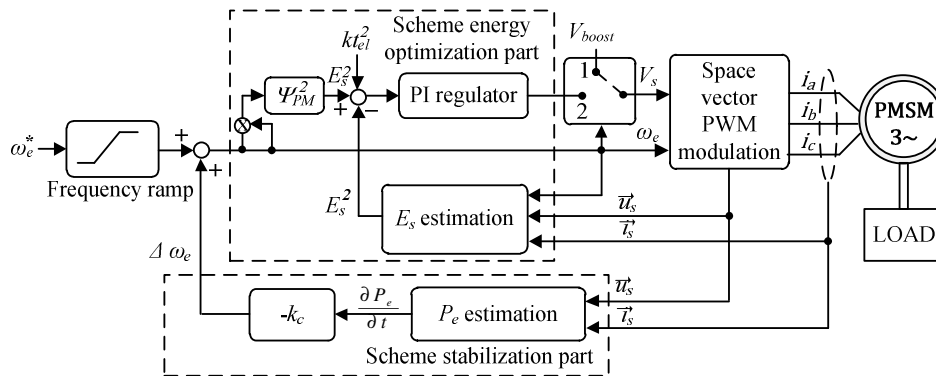
Предложени блок дијаграм контролера статорског напона и фреквенције подесан за убрзање $IPMSM$ је приказан на слици 5. Предвиђено је да се шема укључује када се детектује покретање ротора, односно када треба да започне рампа фреквенције. Док се не достигне минимална оперативна фреквенција, односно заврше прва и друга фаза старта, напон се задржава на почетном нивоу, прекидач у положају 1. Након те фреквенције прекидач прелази у положај 2, чиме се активира напонски ПИ регулатор који одржава жељени ниво статорског флукса. Ако је почетни напон био превелики, шема ће га смањити и оптимизирати укупне губитке. Уколико дође до увећања оптерећења, статорска емс пада испод референтне и шема ће увећати напон и тиме сачувати ротор у синхронизму.

IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

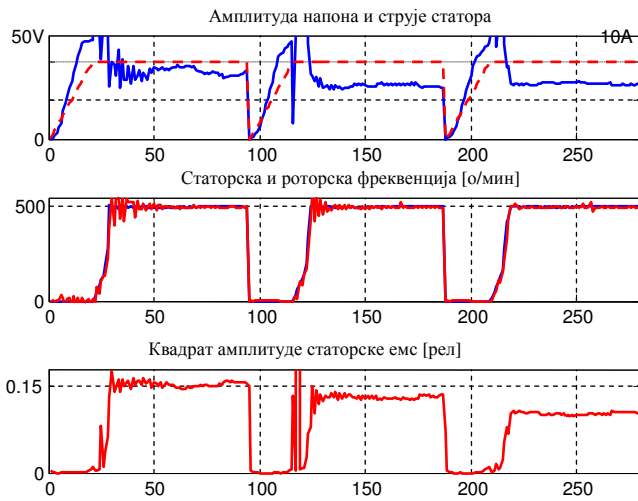
У експерименту је коришћен $IPMSM$ са следећим параметрима: $R_s=3.47\Omega$, $L_d=20\text{mH}$, $L_q=30\text{mH}$, $P=4$, $\Psi_{PM}=0.07\text{Wb}$. $IPMSM$ је напајан из дигиталног контролера, а оптерећиван кочницом MAGTROL HD-705-7.

Резултати су сумирани у две слике. Слика 6 приказује класично стартовање у коме се напон мења по v/f закону подешеним за максимално оптерећење. Слика 7 приказује старт са алгоритмом приказаним на слици 5 који напон статора подешава у зависности од оптерећења. Константан напон дефинисан током старта се користи до 150 о/мин.

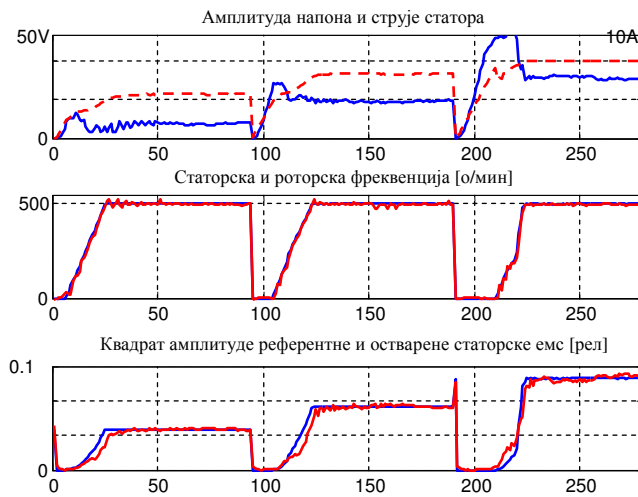
Обе слике приказују карактеристичне вредности за старт неоптерећеног, полу оптерећеног и максимално оптерећеног погона. Горњи траг показује напон (испрекидано/црвено) и струју (пуна/плава). Средњи траг приказује статорску и роторску фреквенцију у механичким обртајима. Доњи траг на слици 6 показује измерени квадрат електромоторне силе (црвено) док је на слици 7 додата и њена референтна вредност (плава). Поређењем добијених резултата очигледне су предности предложене шеме због мањег примењеног напона.



Слика 5. Предложена техника за робусни и енергетски ефикасно убрзање *IPMSM* од стања мировања до жељене брзине



Слика 6. Неоптимални старт *IPMSM* за различита оптерећења



Слика 7. Оптимални старт *IPMSM* за различита оптерећења

V. ЗАКЉУЧАК

Експериментални рад са *IPMSM* без давача положаја указује да оптимално и робусно решење за старт и убрзање тог типа мотора не постоји. Сва решења базирана на моделу мотора, колико год да је модел комплексан, се

показују неуспешним када се покреће оптерећен мотор, или када дође до промене оптерећења током убрзавања. Са друге стране, решења базирана на утискивању ВФ сигнала су робусна, али прати их неприхватљива бука. Постојећа решења заснована на примени *u/f* закона такође нису погодна за стартовање оптерећеног мотора. Предложено решење засновано на адаптацији *u/f* закона према тренутном терету се чини робусним, а уједно и доводи до извесне оптимизације губитака за све нивое оптерећења.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Murray, M. Palma, and A. Husain, "Performance comparison of permanent magnet synchronous motors and controlled induction motors in washing machine applications using sensorless field oriented control," in IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08., oct. 2008, pp. 1-6.
- [2] M. J. Corley and R. D. Lorenz, "Rotor position and velocity estimation for a salient-pole permanent magnet synchronous machine at standstill and high speed," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 34, no. 4, pp. 784-789, Jul./Aug. 1998.
- [3] G. Foo and M. F. Rahman, "Sensorless sliding-mode MTPA control of an IPM synchronous motor drive using a sliding-mode observer and HF signal injection," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 4, pp. 1270-1278, Apr. 2010.
- [4] M. Schroedl, Sensorless Control of AC Machines at Low Speed and Standstill Based on the "INFORM" Method, IEEE Conference Record of Industrial Applications Conference, Vol. 1, pp. 270-277, 1996.
- [5] C. Perera, F. Blaabjerg, J. Pedersen, and P. Thøgersen, "A Sensorless, Stable V/f Control Method for Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives" IEEE Trans on Ind. Application, vol. 39, No. 3, May/June 2003.

ABSTRACT

A new technique for energy efficient start of *IPMSM* without shaft sensor is proposed in this paper. The suggested technique is scalar control based, but with mechanism that adapts the stator voltage amplitude to the unknown load both immediately during the motor startup, and also during the speed ramp. The technique does not rely on the complex motor models and does not use the injection of any high-frequency test signal. It is implemented in the fixed point microprocessor and tested under various operations conditions. The results show that suggested *IPMSM* startup is more robust and efficient than model based startups, with the performance comparable with HF signal based sensorless startups.

ONE SOLUTION FOR IPMSM START

Darko Marčetić, Petar Matić