

Одређивање параметара модела губитака у гвожђу синхроног мотора са утиснутим перманентним магнетима

Петар Матић

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

Владимир Поповић, Дарко Марчетић

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

Сажетак—У раду је предложен начин за експериментално одређивање параметара модела губитака у гвожђу синхроних машина са утиснутим перманентним магнетима. Предложена је модификација уобичајеног огледа празног хода са циљем примјене у испитивању високобрзинских синхроних мотора са перманентним магнетима у режиму слабљења поља. Начин аквизиције мјерених вриједности и обраде експериментално добијених резултата су прилагођени брзинама ротора које карактеришу изузетно високе фреквенције статорског поља и значајни механички губици празног хода.

Кључне ријечи: Синхрони мотор са утиснутим магнетима, модел губитака, одређивање параметара модела

I. УВОД

Захваљујући паду цијене и развоју техника управљања, високобрзински синхрони мотори са утиснутим перманентним магнетима широко се примјењују у јефтинијим погонима опште намјене, као што су, нпр. кућни апарати [1, 2]. У односу на асинхроне моторе, који су се традиционално користили у таквим погонима, мотори са утиснутим перманентним магнетима (енг. *Internal Permanent Magnet Synchronous Motor – IPMSM*) имају значајно бољу ефикасност, мање димензије и нижу цијену. Уобичајена техника векторског управљања, успјешно се примјењује и за управљање синхроним моторима, користећи стандардизоване јефтине погонске претвараче енергетске електронике [3], уз додатне могућности, од којих је најзначајнија увећавање ефикасности, примјеном одговарајућих оптимизационих техника.

У сврху развоја и примјене техника умањења губитака током рада [4-7], као и додатних напредних функција, као што је неркуперативно кочење [8-9], неопходно је познавати параметре модела губитака. Ови параметри се, као и код осталих врста машина за наизмјеничну струју, одређују у огледу празног хода. Међутим, за разлику од класичних асинхроних и синхроних машина (са побудним намотајем), извођење огледа празног хода високобрзинске машине са перманентним магнетима је знатно сложеније. Наиме, због присуства перманентног магнета, и чињенице

да високобрзински синхрони мотори раде у режиму слабљења поља, оглед празног хода мора се изводити при негативној, демагнетишућој, компоненти струје, како напон празног хода не би био већи од номиналног и тиме угрозио погонски претварач. Потреба за демагнетизационом струјом празног хода, као и значајни губици трења и вентилације који се не смију занемарити код високобрзинских мотора, компликују одређивање параметара модела, првенствено губитака у гвожђу.

У раду је обрађена проблематика одређивања параметара модела губитака у гвожђу високобрзинских *IPMSM*, који је, за општи случај, наведен у Поглављу II. У Поглављу III обрађена је структура губитака *IPMSM*, класични поступци одређивања губитака празног хода према [11], те потребне модификације за извођење таквог огледа и одређивање параметара на високобрзинском мотору са перманентним магнетима. У Поглављу IV дат је опис поступка аквизиције и обраде резултата мјерења заснован на методи минимума квадрата. Објашњено је како се на осовно скупа мјерења раздвајају губици у гвожђу од губитака трења и вентилације, те одређују параметри модела губитака у гвожђу. У поглављу V дати су резултати експеримента на типичном високобрзинском *IPMSM*, након чега слиједи Закључак.

II. МОДЕЛ *IPMSM* СА УВАЖЕНИМ ГУБИЦИМА У ГВОЖЂУ

Модел *IPMSM* са уваженим губицима у гвожђу познат је из литературе [10], и дат је сљедећим једначинама, са флуксевима као промјенљивим стања:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{0d} \\ \Psi_{0q} \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} 0 & -\left(1 + \frac{R_s}{R_c}\right) \\ 1 + \frac{R_s}{R_c} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{0d} \\ \Psi_{0q} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{0d} \\ \Psi_{0q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$m_c = \frac{3}{2} P \left[\Psi_{PM} i_{0q} + (L_d - L_q) i_{0d} i_{0q} \right], \quad (3)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = m_c - m_{opt}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \frac{\omega_e}{R_c} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{0d} \\ \Psi_{0q} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

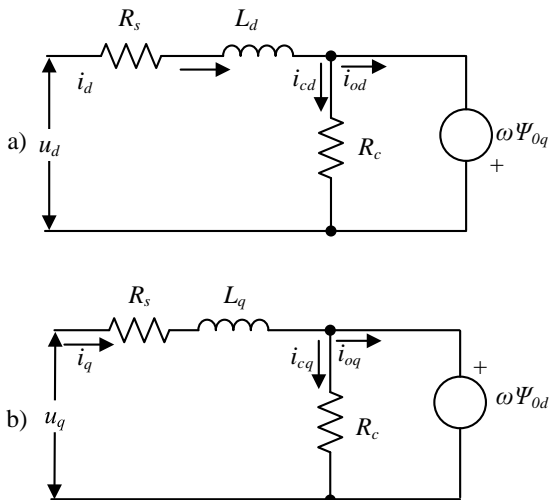
$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

при чему се губици у бакуру и гвожђу рачунају из:

$$P_{Cu} = \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2) = \frac{3}{2} R_s \left[\left(i_{0d} - \frac{\omega_e L_q i_{0q}}{R_c} \right)^2 + \left(i_{0q} + \frac{\omega_e (\Psi_{PM} + L_d i_{0d})}{R_c} \right)^2 \right], \quad (7)$$

$$P_{Fe} = \frac{3}{2} R_c (i_{cd}^2 + i_{cq}^2) = \frac{3}{2} \frac{\omega_e^2}{R_c} \left[(\Psi_{PM} + L_d i_{0d})^2 + (L_q i_{0q})^2 \right]. \quad (8)$$

Ознаке су следеће: $u_d, u_q, i_d, i_q, \Psi_{0d}$ и Ψ_{0q} , напони, струје и флуksни обухвати по d и q оси, Ψ_{PM} флуks перманентног магнета на ротору, L_d и L_q синхроне реактансе, а P број пари полова. Синхронни координатни систем постављен је у правац флуksа магнета на ротору. Брзина ротора сведена на један пар полова је ω_e , J је момент инерције, m_c , и m_{opt} су електромагнетни момент мотора и момент оптерећења, а P_{Cu} и P_{Fe} су губици у бакуру и гвожђу. Параметри модела R_s и R_c представљају омску отпорност фазног намотаја статора и фиктивну отпорност која моделује губитке у гвожђу. Фиктивне струје магнећења $i_{0d} = i_{cd}$ и $i_{0q} = i_{cq}$ стварају губитке у гвожђу празног хода. Еквивалентна шема за устаљена стања приказана је на слици 1.

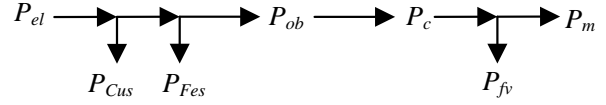


Слика 1. Еквивалентна шема са IPMSM у устаљеном стању

III. СТРУКТУРА ГУБИТАКА И ОГЛЕД ПРАЗНОГ ХОДА

A. Структура губитака

На слици 2 приказана је структура губитака IPMSM у моторском режиму рада, гдје су P_{el} , P_{Cus} , P_{Fes} , P_{ob} , P_c , P_{fv} и P_m редом улазна електрична снага, губици у бакуру и гвожђу статора, снага обртног поља, губици трења и вентилације и излазна механичка снага.



Слика 2: Токови снага у моторском режиму погона са IPMSM

Губици у гвожђу зависе од учестаности, односно брзине обртања и индукције, док губици трења и вентилације зависе од брзине обртања (најчешће од квадрата брзине). Из (1) и (8) у стационарном стању, односно према слици 1, губици у гвожђу, при датој брзини, тј. учестаности, зависе од квадрата напона:

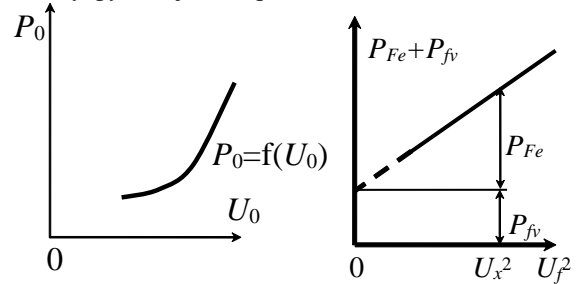
$$P_{Fe} = \frac{3}{2} \frac{(U_0 - R_s I_0)^2}{R_c} - P_{fv}. \quad (9)$$

B. Оглед празног хода

У огледу моторског празног хода механичко оптерећење је једнако нули, $P_m = 0$, па се збир губитака у гвожђу и трења и вентилације одређује из:

$$P_{Fes} + P_{fv} = P_{el0} - 3R_s I_{0f}^2, \quad (10)$$

гдје је P_{el0} измјерена улазна електрична снага у огледу празног хода, а I_{0f} фазна струја празног хода. Уколико се оглед празног хода изводи при константној брзини обртања, а мијења напон празног хода, зависност (10) се може представити као на слици 3а, односно, ако се прикаже у функцији квадрата напона, као на слици 3б.



Слика 3: Зависност губитака празног хода од: а) напона празног хода, б) квадрата напона празног хода

На основу слике 3б, види се да је при датој брзини, познавајући губитке празног хода у функцији напона или квадрата напона, могуће раздвојити губитке у гвожђу од губитака трења и вентилације екстраполацијом до брзине једнаке нули.

C. Оглед празног хода на ултра високим брзинама обртања

Стандардни алгоритми за одређивање параметра отпорника који моделује губитке у гвожђу R_c у празном ходу најчешће занемарују постојање губитака у механичком подсистему. Ова апроксимација ипак није смислена у случају разматрања мотора који раде у опсегу ултра великих брзина (брзине веће од 10000 о/мин). Механички губици узимају значајан удио у губицима у празном ходу како расте брзина обртања. У тим случајевима је неопходно користити алгоритам за раздвајање губитака у гвожђу и поменутих механичких губитака, модификацијом приступа из [11].

Под претпоставком да су губици у гвожђу зависни од квадрата ЕМС (електромоторне силе), што је оправдано након што се одбију губици у баку у (10), могуће је при датој брзини прорачунавањем ужих губитака празног хода (10) за више напона добити њихову егзактну функционалну зависност приказану на сликама 3а или 3б. Аквизиција поменуте карактеристике се врши путем мјерења у тачкама чије вриједности напона обезбјеђују одређену маргину стабилности рада мотора у слабљењу поља, док се за ниже напоне врши екстраполација криве до тачке са нултим напонам. Пошто се износ механичких губитака не мијења са промјеном напона напајања при датој брзини, могуће је издвојити вриједност тих константних губитака читавањем вриједности ужих губитака празног хода у тачки пресјека са ординатом криве. Екстраполациони метод се заснива на процјени зависности као суме константе и линеарне функције, како је приказано на слици 3б, кориштењем методе минимума квадрата за екстраполацију одсјечка праве и њеног нагиба.

Процедура се понавља за различите вриједности референце брзине обртања машине, чиме се добија трајна зависност параметра R_c од брзине обртања. У сврху брже прорачуна, при малим брзинама је могуће механичке губитке занемарити, $P_{f_v}=0$, чиме се прорачун максимално упрошћава кориштењем (9) и (10). При више различитих напона, вриједност параметра R_c се добија као аритметичка средина вриједности срачунатих за више тачака напона.

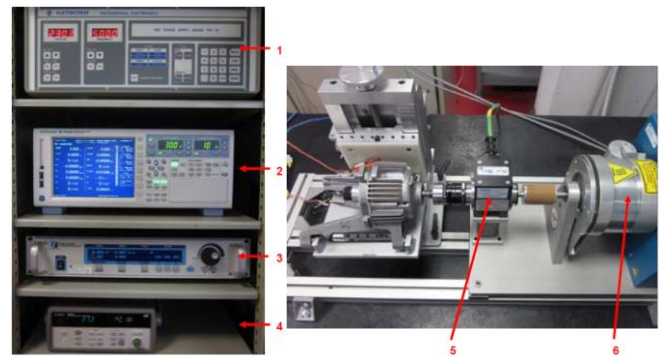
IV. ПРИМЈЕНА ПРЕДЛОЖЕНЕ МЕТОДЕ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА МОДЕЛА ГУБИТАКА У ГВОЖЂУ

Предложена метода заснива се на мјерењу линијских напона и струја, као и улазне снаге, при непромјенљивој брзини за разне напонске нивое. Затим се користи прорачун који од укупних губитака празног хода издваја губитке у гвожђу за разне вриједности напона, односно једно R_c за дату брзину, и губитке трења и вентилације за дату брзину.

A. Коришћена опрема

Мјерење снаге губитака у гвожђу и рачун еквивалентне отпорности R_c су изведени експерименталном поставком приказаном на слици 4. Поставка садржи: 1. Напајање: Electrotest 0-300V 10-80Hz, 2. Анализатор снаге:

Yokogawa WT3000 (4 power inputs + torque + speed), 3. Контролер момента оптерећења: Magtrol DSP6001A, 4. Уређај за праћење процеса (Data Logger): Agilent 34970A, 5. Мјерач момента: Magtrol TM306/01 20000rpm 5Nm 0.1%, 6. Хистерезисна кочница: Magtrol HD710 NA 25000rpm, 3.25Nm, 1500W.



Слика 4. Експериментална поставка коришћена за испитивање мотора

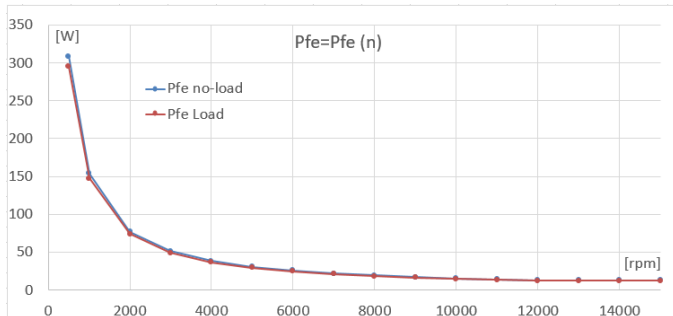
B. Резултати огледа и обрада резултата

Оглед мјерења снаге губитака у гвожђу и одређивање еквивалентне отпорности R_c је изведен за мотор повезан са кочницом у празном ходу (како би се истражио утицај повећаних губитака трења и вентилације) и за мотор у празном ходу. Огледи су изведени за све брзине ротора од интереса. На свакој брзини оглед је извршен за више напонских нивоа. Примјер резултата мјерених линијских напона и струја, као и улазних снага мотора и срачунатих губитака трења и вентилације и отпорности R_c за брзину од 8000 о/мин дати су у табели 1. Горњи дио табеле даје резултате за мотор са оптерећењем, а доњи за мотор у празном ходу. У табели су дате и остале вриједности потребне да се на основу алгоритма уписаног у поглављу III издвоје губици у гвожђу заједно са механичким губицима за разне вриједности напона, а затим да се прорачуна вриједност R_c која одговара датој брзини за било коју вриједност напона.

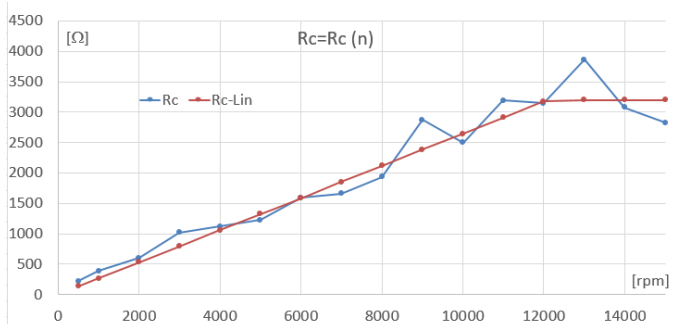
ТАБЕЛА 1: РЕЗУЛТАТИ МЈЕРЕЊА И РАЧУН R_c НА 8000 о/мин: ГОРЕ – СА ПОВЕЗАНОМ КОЧНИЦОМ, ДОЛЕ – БЕЗ КОЧНИЦЕ

8000 rpm								Results		
instrument readout				calc				Pfv	Rfe	
	VLL rms	IIline rms	PO	Vphase	Vphase^2	PCu0	Pfe+Pfv			
1	202	1,056	91	116,62	13601,33	6,49	84,51	63,42	1931	
2	181,4	1,265	91	104,73	10968,65	9,32	81,68			
3	163	1,447	88,1	94,11	8856,33	12,22	75,88			
4	143,7	1,635	89,5	82,97	6883,23	15,63	73,87			
5	124,6	1,827	90,4	71,94	5175,05	19,55	70,85			
6	105,5	2,019	94,1	60,91	3710,08	23,92	70,18			
8000 rpm - free shaft								Results		
instrument readout				calc				Pfv	Rfe	
	VLL rms	IIline rms	PO	Vphase	Vphase^2	PCu0	Pfe+Pfv			
1	191,5	0,737	33,45	110,56	12224,08	4,74	28,71	8,03	1836	
2	179,26	0,847	31,33	103,50	10711,38	6,27	25,06			
3	167,39	0,9529	30,81	96,64	9339,80	7,96	22,85			
4	145,65	1,148	30,85	84,09	7071,31	11,57	19,28			
5	135,14	1,243	31,67	78,02	6087,61	13,60	18,07			
6	124,38	1,3387	32,7	71,81	5156,79	15,81	16,89			

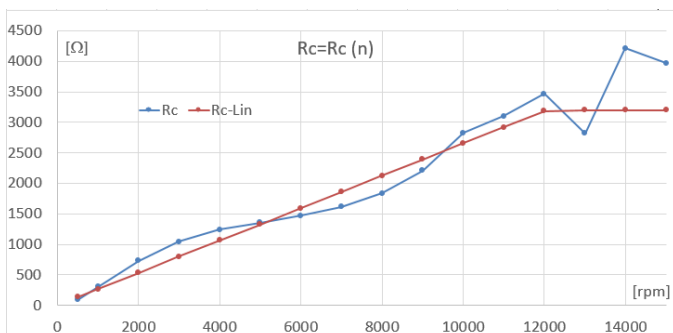
Горњи резултати указују на значајно веће механичке губитке мотора повезаног на оптерећење. Ипак, након издвајања механичких губитака, преостали губици у гвожђу за исти напонски ниво су слични, слика 5.



Слика 5. Срачунати губици у гвожђу за мотор са (P_{fe} Load) и без повезаног оптерећења (P_{fe} no-load) у опсегу брзина од интереса. Као резултат, добијају се и сличне вриједности параметра R_c . Слика 6 показује зависност R_c од брзине, за мотор тестиран без оптерећења, у празном ходу. Слика 7 даје сличне резултате, с тим да је мотор сада повезан на оптерећење, дакле са значајно већим механичким губицима током теста.



Слика 6. Зависност отпорника R_c од брзине обртања – мјерено без повезаног оптерећења



Слика 7. Зависност отпорника R_c од брзине обртања – мјерено са повезаним оптерећењем

V. ЗАКЉУЧАК

Рад је показао да је опште прихваћену методу за мјерење губитака у гвожђу засновану на огледу празног

хода неопходно надоградити за примјену на високобрзинским синхроним моторима са перманентним магнетима. Предложена надоградња се односи на извођење огледа при више напонских нивоа на истој брзини, чиме се елиминише утицај механичких губитака на резултате прорачуна, као и њихово непосредно рачунање. Ово је потврђено експериментално, са резултатима мјерења и прорачуна предложеном методом који су врло слични за мотор празног хода, као и повезан на оптерећење са значајним механичким губицима.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] С. Вукосавић, Електричне машине, Академска мисао, Београд, 2010.
- [2] Д. Марчетић, „Микропроцесорско управљање енергетским претварачима“, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2012.
- [3] Z. Li, Y. Li, X. Li.; “Flux Control of a CPPM Machine for Both a Wide Speed Range and High Efficiency”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 9, September 2014.
- [4] M. Caruso, A. Di Tommaso, R. Miceli, C. Nevoloso, C. Spataro, F. Viola: “Interior Permanent Magnet Synchronous Motor: Impact of the Variability of the Parameters on their Efficiency”, 5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Birmingham, November 2016.
- [5] C. Cavallaro, A. Di Tommaso, R. Miceli, A. Raciti, G. R. Galluvaro, M. Trapanese: „Efficiency Enhancement of Permanent – Magnet Synchronous Motor Drives By Online Loss Minimization Approaches“, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 42, No. 4, August 2005.
- [6] Марко Гецић: „Енергетски ефикасно дигитално управљање синхроним мотором са сталним магнетима при великим брзинама обртања“, докторска дисертација, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2017.
- [7] S. Morimoto, Y. Ton g, Y. Takeda, T. Hirasu: “Loss Minimization Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 541, No. 5, October 1994.
- [8] Петар Матић, Дарко Марчетић: „Нерекуперативно кочење високобрзинских синхроних мотора са перманентним магнетима“, Научно – стручни симпозијум ИНФОТЕХ, Јахорина, март 2017.
- [9] Петар Матић, Дарко Марчетић: „Нерекуперативно кочење синхроних мотора са перманентним магнетима уз контролу напона једносмјерног међукола претварача“, Научно – стручни симпозијум ИНФОТЕХ, Јахорина, март 2018.
- [10] Петар Матић, Марко Гецић, Дарко Марчетић, Владимир Поповић, Ђура Орос: „Математички модел високобрзинског синхроног мотора са перманентним магнетима са уваженим губицима у гвожђу“, III научно-стручни симпозијум ЕНЕФ 2017, Бања Лука, 1-4.11.2017.
- [11] N. Urasaki, T. Senju, K. Uezato: “A Novel Calculation Method for iron Loss Resistance Suitable in Modeling Permanent Magnet Synchronous Motors”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol 18, No.1, March 2003.

IRON LOSSES MODEL IDENTIFICATION IN HIGH SPEED IPMSM DRIVE

Petar Matic, Vladimir Popović, Darko Marčetić

In this paper, the experimental approach for the identification of iron losses model in high speed IPMSM drive is proposed. The modification of the standard no-load test for the purposes

of parameter identification is introduced in order to fit to the specific demands of high speed IPMSM drive in field-weakening region. Data acquisition and signal processing is therefore adjusted to accurately calculate the parameters in the operating modes characterized with the high operating frequencies and significant mechanical losses.