

Нерекуперативно кочење високобрзинских синхроних мотора са перманентним магнетима

Петар Матић

Катедра за електроенергетику
Електротехнички факултет
Бања Лука, Република Српска, БиХ
petar.matic@etfbl.net

Дарко Марчетић

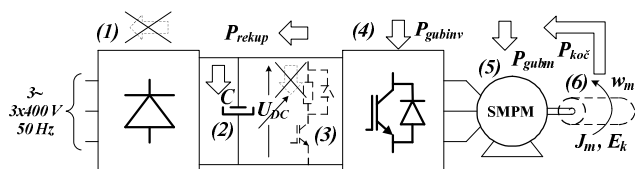
Катедра за енергетску електронику и претвараче
Факултет техничких наука
Нови Сад, Србија
darmar@uns.ac.rs

Сажетак—У раду је обрађена проблематика електричног кочења електромоторних погона са високобрзинским синхроним моторима са перманентним магнетима. Због ограничења у цијени, ови погони не посједују погонски претварач који би омогућио рекуперацију енергије у примарни извор, тако да је неопходно користити методе за дисипирање енергије кочења у самом мотору и погонском претварачу. Рад садржи преглед и теоријску анализу различитих метода нерекуперативног кочења, математичке моделе, те приједлог једног рјешења погодан за употребу у високобрзинским погонима широке потрошње.

Кључне ријечи—Електромоторни погони, нерекуперативно кочење, синхрони мотор са перманентним магнетима

I. УВОД

У савременим уређајима широке потрошње, нпр. за уградњу у кућним апаратима, цијена је пресудан фактор за избор типа мотора и погонског претварача. Данас се врло често користе високобрзински синхрони мотори са перманентним магнетима (СМПМ) који су, захваљујући напретку технологије и паду цијена перманентних магнета, постали конкурентни асинхроним моторима (АМ). При томе, СМПМ су, као и АМ, веома робусни, али су енергетски значајно ефикаснији. За управљање погонима са СМПМ користе се сличне технике као и за управљање АМ, векторско управљање без давача брзине/ позиције (енг. *sensorless*), и са само једним давачем струје у једносмјерном међуколу. Како би се цијена погона задржала на што нижој вриједности, СМПМ се напајају из претварача који на свом улазу (енг. *front-end*) садржи јефтину неуправљиви диодни исправљач, који омогућава само један смјер енергије – из примарног извора ка мотору, како је приказано на Сл. 1 [1], [2].



Слика 1. Погон СМПМ са диодним исправљачем на улазу

Топологија са Сл. 1 посједује диодни исправљач (1) на свом улазу, кондензатор (2) у једносмјерном међуколу, трофазни мостни инвертор (4) и електричну машину (5). Уобичајени ток енергије је од примарног извора (градске мреже) ка мотору и оптерећењу (6). Међутим, при кочењу (успоравању), као и у општем случају када је оптерећење потенцијално, електрична машина прелази у генераторски режим рада, претварајући механичку снагу у електричну и враћајући је у једносмјерно међуколо. Пошто је једносмјерно међуколо напајано из диодног исправљача, није могућа рекуперација енергије, те се кондензатор у једносмјерном међуколу пуни и напон на њему поприма недозвољено велике вриједности. Због тога се, у погонима код којих цијена није пресудан фактор, у једносмјерно међуколо додаје отпорник за кочење (3) на коме се дисипира енергија кочења. У случају погона са великим потенцијалним оптерећењима, економски је прихватљива чак и замјена нерегулисаног диодног исправљача управљивим четвороквадрантним претварачем, како би се омогућила рекуперација енергије у мрежу, што се примјењује нпр. у погонима лифтова и дизалица.

У погонима широке потрошње, природа оптерећења је реактивна, па машина прелази у генераторски режим рада само приликом успоравања, када је потребно умањити кинетичку енергију ротирајућих маса, па није економски оправдано додавати отпорник за кочење (3), нити управљиви претварач за рекуперацију. Због тога се енергија кочења мора дисипирати у мотору и инвертору нерекуперативним кочењем [3], [4], што је предмет рада.

Рад је организован на следећи начин. У наредном, другом, дијелу, даће се теоријска анализа проблематике нерекуперативног кочења, преглед губитака у погону, математички модел СМПМ са унутрашње монтираним перманентним магнетима (енг. *Internal Permanent Magnet Synchronous Machines – IPMSM*) и пројектни захтјеви у високобрзинским погонима. Након тога, у трећем дијелу, описаће се постојећи начини нерекуперативног кочења, и изложити њихове карактеристике. У четвртном дијелу биће предложено једно рјешење нерекуперативног кочења прихватљиво за примјену у високобрзинским погонима засновано на контроли снаге рекуперације. У петом дијелу рјешење ће бити илустровано рачунарском симулацијом. Шести дио је закључак.

II. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛИ

У овом дијелу прво ће се анализирати токови снага у погону СМПМ са Сл. 1 у моторском и кочном режиму, биланси снага мотора и претварача, а затим ће се дати математички модели векторски управљаног синхроног мотора у широком опсегу брзина.

A. Биланс снага при кочењу у погону са СМПМ

Механички подсистем погона са Сл. 1 описан је познатом Њутновом једначином ротационог кретања [1]:

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = m_e - (m_m + k_m \omega_m) \quad (1)$$

гдје је J_m укупни момент инерције ротора и оптерећења (сведен на вратило мотора), k_m је коефицијент трења и вентилације, ω_m угаона брзина обртања, а m_e и m_m електромагнетни момент мотора и момент оптерећења. У погонима широке потрошње (у уређајима за домаћинство) природа оптерећења је чисто реактивна, па је $m_m > 0$, односно момент оптерећења, као и момент трења, се увијек супротстављају кретању. Због тога, у нормалном раду машина ради само у моторском режиму. Међутим, у ротирајућим масама налази се акумулисана кинетичка енергија W_k , која се, приликом успоравања са неке брзине ω_{m1} на брзину ω_{m2} , смањује са W_{k1} на W_{k2} :

$$\Delta W_k = W_{k1} - W_{k2} = \frac{J_m}{2} (\omega_{m1}^2 - \omega_{m2}^2), \quad (2)$$

и ствара негативни (генераторски) кочни момент. Енергија кочења предаје се СМПМ путем снага кочења P_{koc} , па машина прелази у генераторски режим рада током успоравања. Акумулисана енергија је веома велика код високобрзинских машина због велике брзине обртања.

Електрична снага добијена кочењем се дијелом дисипира у машини у виду снага губитака P_{gubm} , а остатак се предаје инвертору, гдје се дио дисипира у самом инвертору као губици P_{gubinv} , а наредни остатак предаје једносмјерном међуколу као снага рекуперације P_{rekup} , како је приказано на Сл. 1.

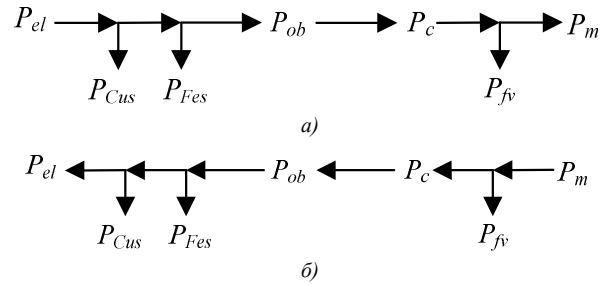
Пошто се на улазу претварача налази неуправљиви диодни исправљач, снага рекуперације не може да се врати у мрежу, него пуни кондензатор у једносмјерном међуколу и напон на њему расте. Да би се спријечио претјерани пораст напона, неопходно је да се сва енергија кочења дисипира у мотору и у погонском претварачу:

$$P_{koc} = P_{gubm} - P_{gubinv}, \quad (2)$$

тако да снага рекуперације буде $P_{rekup} = 0$. Због тога се проблем нерекуперативног кочења своди на проблем развоја такве управљачке стратегије којом ће се контролисати губици у мотору и инвертору како би снага рекуперације била једнака нули. С обзиром на то да постоји толеранција напона на кондензатору, могуће је и толерисати краткотрајно повећавање напона кондензатора преко номиналне вриједности при кочењу.

B. Биланс снага СМПМ

Губици у СМПМ могу се представити преко биланса снага (структуре губитака) приказане на Сл. 2.



Слика 2. Биланс снага СМПМ: а) у моторском режиму рада и б) у генераторском (кочном) режиму рада

У моторском режиму рада, Сл. 2а, у СМПМ улази електрична снага P_{el} на статору, па се дио снаге губи кроз губитке у намотајима (губици у бакру статора):

$$P_{Cus} = 3R_s I_s^2, \quad (3)$$

и губитке у магнетном колу статора (губици у гвожђу статора) [5]:

$$P_{Fes} \sim (k_h \omega_m + k_{vs} \omega_m^2) \Psi_s^2 = \frac{\omega^2 \Psi_s^2}{R_c}, \quad (4)$$

гдје су R_s и I_s фазна отпорност и струја статора, k_h и k_{vs} коефицијенти хистерезисних губитака и губитака вртложних струја, а Ψ_s флуks статора. Еквивалентним отпорником $R_c(\omega_e)$ моделују се губици у гвожђу у функцији синхроне брзине ω_e [6]. Преостала снага је снага обртног поља, P_{ob} , која се кроз ваздушни зазор преноси са статора на ротор. СМПМ нема губитке снаге на ротору, јер не постоје намотаји са побудном струјом, а флуks побудног магнета је константан и у синхронизму је са обртним пољем. Снага обртног поља једнака је снази конверзије P_c која се из електричног облика претвара у механички облик. Коначно, када се од снаге конверзије одбију губици на трење и вентилацију:

$$P_{fv} = k_m \omega_m^2, \quad (5)$$

добија се корисна излазна механичка снага на вратилу P_m . У генераторском (кочном) режиму рада, ток снаге са Сл. 2а се мијења, како је приказано на Сл. 2б.

Губици у бакру статора (3) зависе од квадрата струје статора, а губици у гвожђу статора (4) зависе од квадрата флуksа статора и квадрата синхроне брзине. Губици трења и вентилације (4) зависе од квадрата брзине обртања.

На основу израза (3) и (4), закључује се да ће губици у СМПМ бити већи када је струја кроз статорске намотаје што већа, и када је флуks статора већи. Осим тога, из (4) и (5) закључује се да су губици већи при већим брзинама обртања.

C. Биланс снага инвертора и једносмјерног међукола

У инвертору настају три врсте губитака: комутациони губици, кондукциони губици, и губици у непроводном стању. Да би губици у инвертору били већи, потребно је да струја и учестаност комутације буду што већи [7].

Напон на кондензатору C у једносмјерном међуколу са Сл. 1 једнак је напону међукола U_{DC} . Тренутна снага кондензатора, када је диодни исправљач блокиран, једнака је снази рекулације:

$$P_c = u_{DC} i_C = u_{DC} C \frac{du_{dc}}{dt} = P_{рекуп}, \quad (6)$$

односно енергија рекулације пуни кондензатор струјом i_C и напон на њему расте са почетне вриједности U_{DC0} на:

$$u_{DC} = \sqrt{U_{DC0}^2 + \frac{2}{C} \int_0^t P_{рекуп}(t) dt}. \quad (7)$$

Из (7) се може закључити да се средња вриједност напона на кондензатору неће мијењати (односно расти) само ако је средња снага рекулације једнака нули.

D. Модел векторског управљања СМПМ

Математички модел електричног подсистема СМПМ, са унутрашње монтираним магнетима, и уз занемарење губитака у гвожђу, дат је једначинама [2]:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_{PM}, \quad (9)$$

$$\Psi_q = L_q i_q, \quad (10)$$

$$m_e = \frac{3}{2} P (\Psi_{PM} i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}), \quad (11)$$

гдје су u_d , u_q , i_d , i_q , Ψ_d и Ψ_q , напони, струје и флуksни обухвати по d и q оси, Ψ_{PM} флуksни обухват перманентног магнета на ротору, L_d и L_q синхроне реактансе статора, а P број пари полова. Момент m_e садржи синхрону и релуктантну компоненту, а електрична снага је:

$$P_e = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q). \quad (12)$$

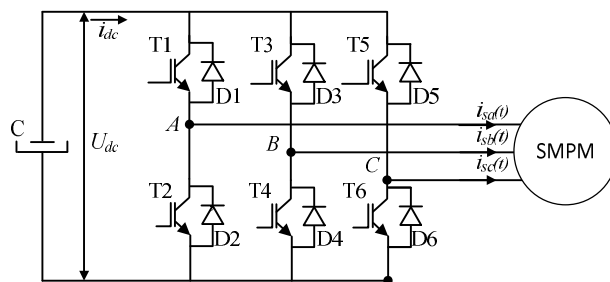
За рад у првој зони (за брзине мање од номиналне), струја i_d се подешава тако да се добије максимални момент при датој струји (енг. *Maximum Torque Per Ampere* – *MTPA*). Пошто је $L_d < L_q$ код IPMSM машина, струја i_d је негативна како би релуктантни момент био позитиван. Моментом се управља струјом i_q по методи векторског управљања (енг. *Field Oriented Control* - *FOC*) [2]. За рад у другој зони (за брзине веће од номиналне) мора се умањити флуks статора, када напон достигне своју максималну вриједност:

$$\sqrt{u_d^2 + u_q^2} = U_{MAX}. \quad (13)$$

Високобрзинске машине, због ниже цијене, пројектују се тако да претежно раде у слабењу поља, при чему је максимална радна брзина 3-6 пута већа од номиналне. У напонском лимиту, струје i_d и i_q су спрегнуте [9].

III. КЛАСИЧНО НЕРЕКУПЕРАТИВНО КОЧЕЊЕ

Нерекулперативно електрично кочење са Сл. 1 представља специјалан случај динамичког кочења СМПМ. Енергија кочења (2) се, умјесто у отпорнику за кочење код класичног динамичког кочења, мора дисипирати унутар мотора и инвертора [3], [4], тако да је у овом режиму мотор у стању кратког споја, како је приказано на Сл. 3.



Слика 3. СМПМ напајан из трофазног мостног инвертора

Најједноставнији начин за кочење је да се истовремено укључе сва три „доња“ транзистора T2, T4 и T6 са Сл. 3, чиме се СМПМ налази у стању пуног кратког споја на статору, па кроз намотаје теку велике струје које стварају кочни момент. Због великих струја кратког споја, које могу да оштете мотор и инверторски мост, овај начин кочења се обично користи само за хаваријско заустављање. Напреднији начин кочења је да се „дођим“ транзисторима истовремено управља импулсно-ширинском модулацијом, чиме се контролише струја кроз намотаје мотора, односно снага кочења се одржава на жељеној вриједности. Додатна предност овог поступка је у томе што тада у инверторском мосту, осим губитака провођења, постоје и комутациони губици, чиме се још један дио снаге кочења дисипира у инверторском мосту. Међутим, велики недостатак динамичког кочења у обје варијанте је у томе што је током кочења суспендован векторски контролер, па машина није контролабилна ни по моменту, ни по флуksу. По завршетку кочења, векторски контролер мора да преузме контролу над машином, што резултује новим прелазним процесом успостављања задатог флуksа и момента. Овај поступак је нарочито сложен у режиму слабења поља због проблема са стабилношћу естиматора флуksа [3].

IV. НЕРЕКУПЕРАТИВНО КОЧЕЊЕ КОНТРОЛОМ ГУБИТАКА

Да би мотор нерекулперативно кочио, потребно је да при негативном моменту (11) снага рекулације са Сл. 1. буде једнака нули:

$$P_{рекуп} = 0. \quad (14)$$

односно, уз занемарење губитака у инвертору, потребно је да улазна снага (12) буде једнака нули.

На основу биланса снага са Сл. 2б, услов (14) биће испуњен ако је снага кочења једнака збиру губитака у бакуру и гвожђу:

$$P_{Cu} + P_{Fe} = P_{koc}. \quad (15)$$

Снага кочења (која је негативна) може се изразити преко момента (11) и синхроне брзине $\omega_e = P\omega_m$ сведене на један пар полова као:

$$P_{koc} = -\frac{3}{2} \left[\Psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] \omega_e. \quad (16)$$

Уврштавањем израза за губитке у бакуру (3), гвожђу (4), флуксних обухвата (9) и (10), те снаге кочења (16) у услов (15), добија се:

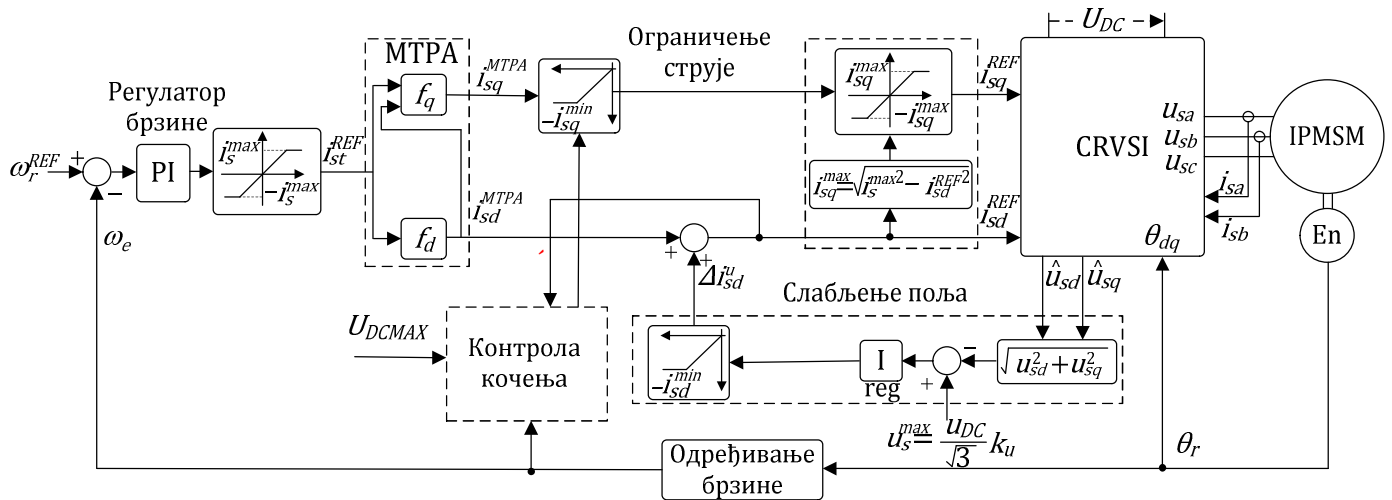
$$\begin{aligned} \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2) + \frac{\omega_e^2}{R_c} \left[(\Psi_{PM} + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2 \right] = \\ = -\frac{3}{2} \left[\Psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] \omega_e \end{aligned}, \quad (17)$$

односно успоставља се веза између струја i_d и i_q која одговара услову нерекуперативног кочења (14).

Стратегија нерекуперативног кочења своди се на додавање услова (17) у класичну структуру FOC-а IPMSM машине са MTPA алгоритмом [2] тако да:

- машина током кочења буде контролабилна,
- струја кочења буде мања или једнака максимално дозвољеној струји,
- напон на кондензатору током кочења буде мањи или једнак максимално дозвољеном напону.

Предложени поступак приказан је на Сл. 4. У првој зони струје i_d и i_q добијају се помоћу регулатора брзине и MTPA алгоритма, а у другој зони помоћу регулатора брзине и услова слабљења поља (напонског лимита). Да би се могло остварити контролисано нерекуперативно кочење, мора се задржати регулатор брзине, а искључити MTPA алгоритам и допунити услов слабљења поља, условом (17). На тај начин ће током кочења регулатор брзине у обје зоне генерисати негативну струју i_q , која ће бити ограничена на такву вриједност да ће губици регенерације бити једнаки губицима при датој струји i_d дефинисаној напонским лимитом.



Слика 4. Векторски управљан IPMSM у широком опсегу брзина са нерекуперативним кочењем

Струја i_q одређује снагу рекуперације, па се мора ограничити на такву вриједност i_{qmin} да се сва снага рекуперације може дисипирати унутар машине према (15). Ограничење највеће негативне струје i_q која ће генерисати такву снагу рекуперације да се у потпуности дисипира на губицима у машини одређује се рјешавањем услова (17), и садржана је у блоку *Контрола кочења* са Сл. 4. Та струја износи:

$$i_{qmin} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (18)$$

гдје су:

$$a = \frac{3}{2} R_s + \frac{\omega_e^2 L_q^2}{R_c}, \quad (19)$$

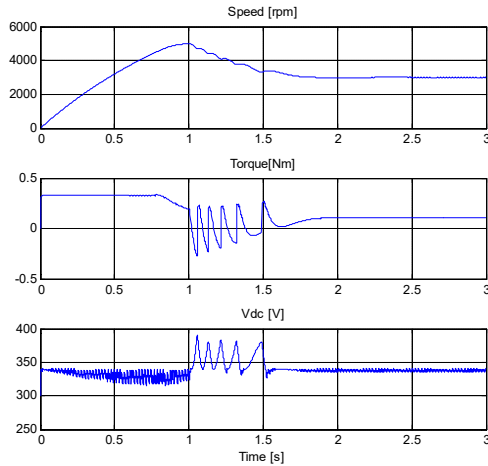
$$b = \frac{3\omega_e}{2} \left[\Psi_{PM} + (L_d - L_q) i_d \right], \quad (20)$$

$$c = \frac{3}{2} R_s i_d^2 + \frac{\omega_e^2}{R_c} (\Psi_{PM} + L_d i_d)^2. \quad (21)$$

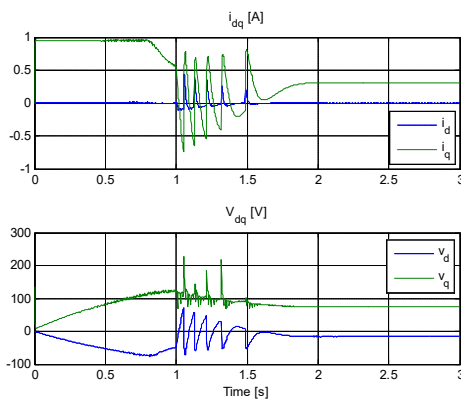
У почетку кочења, напон једносмјерног међукола U_{DC} расте, те када достигне максималну дозвољену вриједност U_{DCMAX} активира се блок за нерекуперативно кочење *Braking control* са Сл. 4. Струја i_q , која је у кочењу негативна, ограничва се на минималну вриједност i_{qmin} , помоћу израза (18), тако да се сва примљена снага регенерације дисипира при датој струји i_d . На приказани начин, истовремено је задовољено и напонско ограничење, јер се референтна струја i_d преузима након што је на Сл. 4 прилагођена расположивом напону у слабљењу поља.

V. РЕЗУЛТАТИ СИМУЛАЦИЈЕ

На Сл. 5 и Сл. 6 приказани су резултати рачунарске симулације алгоритма предложеног на Сл. 4 при кочењу са брзине од 5000 o/min на 3000 o/min. Са Сл. 5 и Сл. 6 види се да током кочења напон једносмјерног међукола U_{DC} осцилује између своје радне и максималне вриједности U_{DCMAX} , при чему момент кочења такође осцилује, али тако да је средња снага рекулације P_{rekup} из (7) једнака нули. Захваљујући одржавању средње снаге на нули, постиже се да је током кочења напон једносмјерног међукола приближно једнак својој радној вриједности.



Слика 5. Брзина, момент и напон једносмјерног међукола при кочењу



Слика 6. Компоненте струје и напона при кочењу

VI. ЗАКЉУЧАК

У раду је предложен поступак за нерекуперативно кочење СМПИМ контролом губитака током кочења. Предложеним поступком струја кочења i_q се ограничава, те се ствара кочни момент према задатој струји i_d тако да се сва снага регенерације дисипира унутар мотора.

Предложени поступак нерегенеративног кочења је једним дијелом сличан приступу код кочења АМ [10]. Међутим, кочење СМПИМ је знатно сложеније него кочење

АМ због постојања флукса перманентног магнета. Осим тога, код *IPMSM* машина постоји и релуктантни момент.

У предложеном рјешењу занемарени су губици у инвертору, као и додатни губици у мотору. Међутим, ови губици доприносе кочењу, тако да ће кочење реалне машине бити ефикасније него у симулацији.

У наредном истраживању потребно је анализирати могућност проширења предложеног рјешења, тако да се пулсације напона једносмјерног међукола умање, креирањем одговарајуће регулационе структуре, те треба додатно дискутовати вишеструка рјешења једначине (18).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Владан Вучковић, „Електрични погони“, Електротехнички факултет, Београд, 1997.
- [2] Дарко П. Марчетић, „Микропроцесорско управљање енергетским претварачима“, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2012.
- [3] J. Jiang, J.Holtz, „An Efficient Braking Method for Controlled AC Drives With a Diode Rectifier Front End“, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 5, Sep/Oct 2001.
- [4] M. Hinkkanen, J. Luomi: “Braking Scheme for Vector – Controlled Induction Motor Drives Equipped With Diode Rectifier Without Braking Resistor”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, No. 5, Sept/Oct 2006.
- [5] Младен Терзић, Драган Михаљ, Слободан Вукосавић, „Одређивање зависности губитака у гвожђу СМСМ од брзине у празном ходу коришћењем методе коначних елемената“, Конференција за ЕТРАН 2012, *Зборник радова*, Златибор 11-14. јуни 2012.
- [6] F. Bernal, A. Cerrada, R. Faure “Model-Based Loss Minimization for DC and AC Vector-Controlled Motors Including Core Saturation”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 3, May/June 2000.
- [7] J. W. Kolar, F. C. Zach and F. Casanellas, „Losses in PWM inverters using IGBTs“, IEE proceedings – Electric Power Applications, vol. 142, No 4, pp. 285-288, Jul 1995.
- [8] Марко Гецић: „Енергетски ефикасно дигитално управљање синхроним мотором са сталним магнетима при великим брзинама обртања“, *докторска дисертација*, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2017.
- [9] Petar Matić, Aleksandar Rakić, Darko Marčetić: “Voltage Angle Torque control of SMPM in Field Weakening”, *Proceedings on 17th International Symposium on Power Electronics Ee 2013*, Novi Sad, October 30th – November 1st 2013.
- [10] Дарко Марчетић, Владимир Поповић, Марко Гецић, Ђура Орос: „Нерегенеративно кочење асинхроног мотора без давача на вратили контролисаног напонским и струјним инвертором“, техничко решење на пројекту ТР42004 Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, 2014.

ABSTRACT

The paper deals with non regenerative electric braking of electric drives with high speed permanent magnet synchronous drives. Due to cost limitations, these drives do not have braking resistor for dissipating regenerating power. The paper contains theoretical analysis of different methods for non regenerative braking and proper mathematical models. A non-regenerative braking solution suitable for use in high-speed drives is proposed in the paper.

NON REGENERATIVE BRAKING OF HIGH SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Petar Matić, Darko Marčetić