

Нерекуперативно кочење синхроних мотора са перманентним магнетима уз контролу напона једносмјерног међукола претвараача

Петар Матић

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

Дарко Марчетић

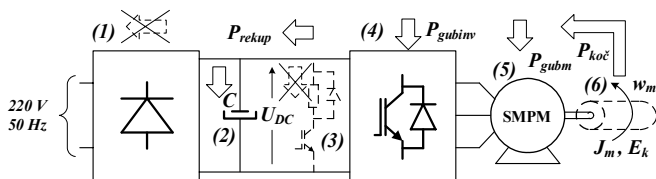
Катедра за енергетску електронику и претварааче
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Нови Сад, Србија
darmar@uns.ac.rs

Сажетак—У раду је предложен поступак за нерекуперативно кочење електромоторног погона са синхроним мотором са површински монтираним перманентним магнетима. Током кочења, енергија кочења се дисипира у самом мотору и погонском претвараачу, а напон једносмјерног међукола се помоћу предложеног поступка ограничава на задатој вриједности. Контролом губитака остварује се нерекуперативно кочење уз задовољавање струјних и напонских ограничења мотора и претвараача, што је потврђено рачунарским симулацијама експериментом на прототипу.

Кључне ријечи—електромоторни погон, нерекуперативно кочење, синхрони мотор са перманентним магнетима

I. УВОД

Нерекуперативно кочење синхроних мотора са перманентним магнетима (СМПМ) примјењује се у јефтним електромоторним погонима на ијењеним уређајима широке потрошње, нпр. у кућним апаратима [1]. Како би се цијена погона задржала на што нижој вриједности, мотор се напаја из претвараача који на свом улазу (енг. *front-end*) садржи јефтну неуправљиви диодни исправљач, како је приказано на Сл. 1.



Слика 1. Погон СМПМ са диодним исправљачем на улазу

Диодни исправљач (1) са Сл. 1 омогућава само позитиван ток енергије од мреже ка инвертору (4), мотору (5) и оптерећењу (6). Приликом успоравања, или, у општем случају, када је оптерећење потенцијално, енергија кочења се враћа у једносмјерно међуколо и пуни кондензатор (2), па напон на њему расте. Како би се спријечио раст напона преко дозвољене вриједности, вишак енергије кочења се мора дисипирати на отпорнику за кочење (3). Међутим, у претвараачима за погоне широке потрошње овај отпорник

се не уграђује (због ограничене цијене), па се енергија кочења мора дисипирати кроз губитке у самом мотору и инвертору, путем нерекуперативног кочења.

У погонима широке потрошње карактеристика оптерећења је чисто реактивна, тако да се режими кочења јављају само приликом успоравања, када је потребно смањити кинетичку енергију ротирајућих маса. Контролом успоравања, ограничава се снага рекулације P_{rekup} тако да буде једнака збиру губитака у мотору P_{gubm} и инвертору P_{gubinv} , чиме се и напон на кондензатору одржава на дозвољеној вриједности [2-5]. Да би кочење било што ефикасније, неопходно је остварити максимални кочни момент, уз услов да ни напон ни струја мотора током кочења не пређу максимално дозвољене вриједности.

У овом раду показује се да се ограничавањем снаге рекулације и примјеном одговарајућег регулатора, напон на кондензатору може регулисати на задатој вриједности, а да се при томе губици максимизују како би кочење било што ефикасније.

Рај је организован на следећи начин. У наредном, другом, дијелу, даће се математички модели векторски управљаног СМПМ са површински монтираним перманентним магнетима (енг. *Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Machines – SMPMSM*) и једносмјерног међукола. Након тога, у трећем и четвртном дијелу, обрадиће се услови нерекуперативног кочења у струјном и напонском лимиту и одговарајуће граничне брзине за поједине кочне режими. У петом дијелу ће се дати трајекторије струја мотора у напонском и струјном лимиту. У шестом дијелу предложиће се рјешење нерекуперативног кочења контролом губитака са регулатором напона једносмјерног међукола. У седмом дијелу рјешење је илустровано рачунарском симулацијом и потврђено експериментом. Осми дио је закључак.

II. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛИ

A. Математички модел мотора

Математички модел СМПМ, са d осом оријентисаном према перманентном магнету, дат је једначинама [6-7]:

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

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$m_e = \frac{3}{2} p \Psi_{PM} i_q, \quad (3)$$

гдје су u_d , u_q , i_d , i_q , Ψ_d и Ψ_q , напони, струје и флуksни обухвати по *d* и *q* осима, Ψ_{PM} флуksни обухват перманентног магнета на ротору, L_s синхрона реактанса статора, а p број пари полова. Синхрона брзина ω_e је p пута већа од механичке брзине ω_m . Губици у бакуру P_{Cu} и гвожђу P_{Fe} постоје само на статору, и рачунају се из:

$$P_{Cu} = \frac{3}{2} R_s I_s^2, \quad (4)$$

$$P_{Fe} \approx \frac{3}{2} \frac{U_s^2}{R_c(\omega)}, \quad (5)$$

гдје су струја и напон мотора:

$$I_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}, \quad (6)$$

$$U_s = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}, \quad (7)$$

а $R_c(\omega)$ фиктивни отпорник који моделује губитке у гвожђу који расту са брзином, па и он зависи од брзине ω [8-9]. Да мотор и инвертор не би били угрожени, неопходно је да буду задовољени струјни и напонски лимити:

$$I_s \leq I_{MAX}, \quad (8)$$

$$U_s \leq U_{MAX}. \quad (9)$$

У режиму високих брзина (односно напонском лимиту-слабљењу поља), пад напона на отпорности статора се може занемарити, па се напон у стационарном стању из (1) и (7) тада може приближно израчунати из:

$$U_s \approx \omega_e \sqrt{(L_s i_d + \Psi_{PM})^2 + (L_s i_q)^2}. \quad (10)$$

V. Модел једносмјерног међукола у режиму кочења

Биланс снага погонског претварача са Сл. 1 у режиму нерекуперативног кочења описан је токовима снага:

$$P_{koc} = P_{gubm} + P_{gubinv} + P_{DC}, \quad (11)$$

гдје снага кочења одговара моменту кочења:

$$P_{koc} = m_e \omega_m = \frac{3}{2} \omega_e \Psi_{PM} i_q, \quad (12)$$

губици у мотору су збир губитака у бакуру и гвожђу:

$$P_{gubm} = P_{Cu} + P_{Fe}, \quad (13)$$

губици у инвертору су занемарени, а снага која се предаје кондензатору је:

$$P_{DC} = u_{DC} i_C = u_{DC} C \frac{du_{DC}}{dt} = \frac{1}{2} C \frac{du_{DC}^2}{dt}. \quad (14)$$

При нерекуперативном кочењу, снага рекулације је једнака нули, а сва снага кочења се дисипира на губицима:

$$P_{rekup} = P_{koc} - P_{gubm} = 0 \quad (15)$$

па је напон на кондензатору из (14) и (15):

$$u_{DC} = \sqrt{U_{DC0}^2 + \frac{2}{C} \int_0^t P_{rekup}(t) dt}, \quad (16)$$

гдје је U_{DC0} почетна вриједност напона. Из (16) се може закључити да се средња вриједност напона на кондензатору неће мијењати (односно расти) само ако се средња снага рекулације одржава на нули.

C. Ефикасно нерекуперативно кочење

У режиму нерекуперативног кочења СМПМ фактички ради као генератор на сопственој мрежи, чија се брзина постепено смањује током кочења. Електрична снага, добијена конверзијом енергије кочења, троши се на губицима у бакуру и гвожђу унутар машине. Како би нерекуперативно кочење било што ефикасније, неопходно је да током кочења губици (4-5) буду што већи, јер је тада и момент кочења максималан. Осим максимизације губитака, истовремено морају да се задовоље напонски и струјни лимити (8-9) како ни машина ни претварач не би били угрожени. При кочењу брзина се смањује, па се ограничења морају задовољити у три области:

- Кочење на великим брзинама (у слабљењу поља), када је машина у напонском лимиту и доминантни су губици у гвожђу (5),
- Кочење на малим брзинама (у првој зони), у струјном лимиту и доминантни су губици у бакуру (4),
- Кочење на врло малим брзинама, када је електромоторна сила недовољна да успостави максималну струју (8), па се машина кочи губицима у бакуру мањим од максимално могућих.

Нерекуперативно кочење примјењује се у погонима са реактивним оптерећењем (момент оптерећења се супротставља кретању). У даљем излагању, посматраће се критичан случај, када се занемарују момент оптерећења и трење. Момент оптерећења, као и трење, доприносе кочењу, па је занемарење на страни сигурности.

III. ОГРАНИЧЕЊА ПРИ НЕРЕКУПЕРАТИВНОМ КОЧЕЊУ

Начин управљања машином при нерекуперативном кочењу зависи од тога да ли се машина налази у струјном или у напонском лимиту, тј, зависи од брзине. Посматраће се само доминантни губици у појединим режимима, и то: у струјном лимиту занемариваће се губици у гвожђу, а у напонском лимиту занемариваће се губици у бакуру. Ова занемарења су на страни сигурности, јер су сви губици увијек позитивни и доприносе кочењу.

A. Лимит по максималној струји

Како би струја мотора била мања од максималне струје, неопходно је да њене компоненте (6) задовољавају услов (8), па се за лимит по максималној струји добија:

$$i_d^2 + i_q^2 = I_{MAX}^2. \quad (17)$$

Добијени лимит представља једначину кружнице у dq равни са центром у координатном почетку, константног полупречника, како је приказано на Сл. 2 плавом бојом.

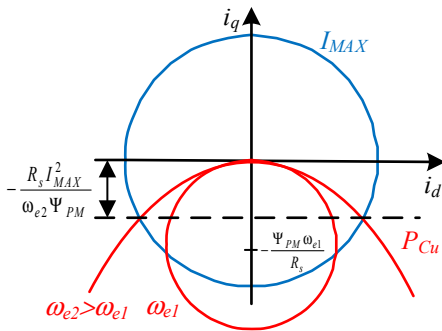
B. Лимит по снази рекулериције по губицима у бакру

На малим брзинама (фреквенцијама) губици у гвожђу су релативно мали, па је оправдано посматрати само губитке у бакру. Тада се лимит по снази рекулериције добија из услова $P_{koc} = -P_{Cu}$ односно из (4), (6), (8) и (12):

$$\frac{3}{2} \Psi_{PM} i_q \omega_e = -\frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2), \quad (18)$$

$$i_d^2 + \left(i_q + \frac{\Psi_{PM} \omega_e}{2R_s} \right)^2 = \left(\frac{\Psi_{PM} \omega_e}{2R_s} \right)^2. \quad (19)$$

Добијени израз представља једначину кружнице у dq равни чији је центар на q оси, и која пролази кроз координатни почетак. Повећавањем брзине ω_e полупречник кружнице расте, а њен центар се на q оси удаљава од координатног почетка, како је дато на Сл. 2.



Слика 2. Кружница струјног лимита (плаво) и кружница лимита по снази рекулериције у бакру (црвено)

Кружнице лимита по снази рекулериције у бакру и кружница струјног лимита се увијек сијекну у двије тачке, по правој паралелној са d осом, а која се смањењем брзине удаљава од координатног почетка. Струје које одговарају овим пресецима рачунају се из (17) и (19), а струја i_d може да буде и позитивна и негативна:

$$i_q = -\frac{R_s I_{MAX}^2}{\omega_e \Psi_{PM}}, \quad (20)$$

$$i_d = \pm \sqrt{I_{MAX}^2 - i_q^2}. \quad (21)$$

C. Лимит по максималном напону

Како би напон био мањи од за максималног (или дозвољеног), неопходно је да буде задовољен услов (12):

$$\omega_e^2 \left[(L_s i_d + \Psi_{PM})^2 + (L_s i_q)^2 \right] = U_{MAX}^2. \quad (22)$$

Сређивањем се добија израз:

$$\left(i_d + \frac{\Psi_{PM}}{L_s} \right)^2 + i_q^2 = \left(\frac{U_{MAX}}{\omega_e L_s} \right)^2, \quad (23)$$

који представља једначину кружнице у dq равни са центром на d оси, а чији се полупречник смањује са растом брзине. Овај лимит приказан је на Сл. 3 зеленом бојом за неколико вриједности брзина.

D. Лимит по снази рекулериције по губицима у гвожђу

На великим брзинама оправдано је посматрати само доминантне губитке у гвожђу, па се лимит по снази рекулериције добија уз услов $P_{koc} = -P_{Fe}$ односно из (5), (7), (10) и (12):

$$\frac{3}{2} \Psi_{PM} i_q \omega_e = -\frac{3}{2} \frac{\omega_e^2 \left[(L_s i_d + \Psi_{PM})^2 + (L_s i_q)^2 \right]}{R_c} \quad (24)$$

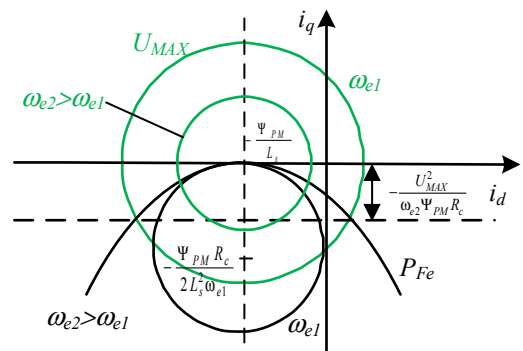
$$\left(i_d + \frac{\Psi_{PM}}{L_s} \right)^2 + \left(i_q + \frac{\Psi_{PM} R_c}{2L_s^2 \omega_e} \right)^2 = \left(\frac{\Psi_{PM} R_c}{2L_s^2 \omega_e} \right)^2. \quad (25)$$

Добијени израз представља једначину кружнице у dq равни, и која је приказана црном бојом на Сл. 3 заједно са кружницама напонског лимита. Повећавањем брзине ω_e полупречници ове кружнице се смањују, али увијек постоје двије пресејне тачке на правој паралелној са d осом, и које се лако рачунају из (10) и (25):

$$i_q = -\frac{U_{MAX}^2}{\omega_e \Psi_{PM} R_c}, \quad (26)$$

$$i_d = \pm \sqrt{\left(\frac{U_{MAX}}{\omega_e L_s} \right)^2 - i_q^2} - \frac{\Psi_{PM}}{L_s}. \quad (27)$$

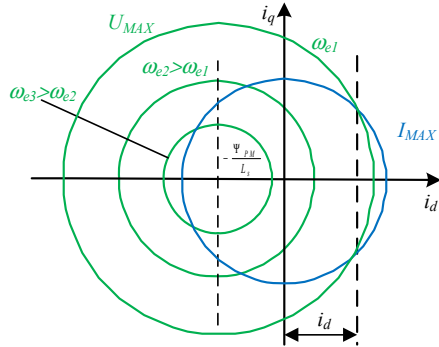
Смањењем брзине обртања апсолутне вриједности струја (29) и (30) расту, а струја i_d може да буде позитивна и негативна.



Слика 3. Кружница напонског лимита (зелено) и кружница лимита по снази рекулериције у гвожђу (црно)

Е. Лимит по максималној струји и напону

Прелазак из напонског у струјни лимит, и обрнуто, наступа на пресеку кружница струјног лимита (17) и напонског лимита (23). На Сл. 4 приказани су лимити по струји и напону за неколико вриједности брзина.



Слика 4. Кружнице лимита: по струји (плаво) и напона (зелено)

Струјни и напонски лимити се сијекну у двије тачке, по правој паралелној са осом, а одговарајуће струје у трећем и четвртном квадранту се одређују из (23) и (17):

$$i_d = \frac{L_s}{2\Psi_{PM}} \left[\left(\frac{U_{MAX}}{\omega_e L_s} \right)^2 - I_{MAX}^2 - \left(\frac{\Psi_{PM}}{L_s} \right)^2 \right]. \quad (28)$$

$$i_q = -\sqrt{I_{MAX}^2 - i_d^2}. \quad (29)$$

Са Сл. 4 види се да струја i_d може да буде и позитивна и негативна. Како услови преласка из напонског у струјни лимит не би зависили од струје i_d , посматраће се ситуација преласка између лимита при струји i_q једнакој нули. Тада је из (28) и (29) гранична брзина:

$$\omega_e^U = \frac{U_{MAX}}{L_s I_{MAX} \pm \Psi_{PM}}, \quad (30)$$

гдје знак „-“ одговара трећем, а „+“ четвртном квадранту.

IV. ГРАНИЧНЕ БРЗИНЕ, МОМЕНТ И СНАГА КОЧЕЊА

На основу претходне анализе је јасно да лимити по снази рекуперације и лимит по напону зависе од брзине, тако да је потребно одредити брзину ω_e^U при којој се оптимално прелази из напонског у струјни лимит. Такође, могуће је одредити и минималну брзину ω_e^I испод које није могуће инјектовати максималну струју, па самим тим ни остварити максималну снагу рекуперације.

А. Минимална брзина за струјни лимит

У струјном лимиту, снага кочења је једнака губицима у бакру при максималној струји:

$$P_{koc} = \frac{3}{2} R_s I_{MAX}^2. \quad (31)$$

Момент кочења опада са брзином, односно како се брзина смањује, момент кочења расте:

$$m_k = -\frac{3}{2} \frac{R_s I_{MAX}^2}{\omega_e}, \quad (32)$$

У овом режиму струја i_d се подешава на такву вриједност да укупна струја, односно губици у бакру, буду максимални. Због тога је снага кочења константна, с тим да струја i_q расте од неке почетне вриједности до I_{MAX} , док се струја i_d постепено смањује. Међутим, смањењем брзине обртања смањује се и индукована електромоторна сила, па самим тим и струја која може да се успостави кроз намотаје. Из (20) и (21) одређује се минимална брзина при којој се може успоставити струја I_{MAX} (када је подкоријена величина позитивна):

$$\omega_e^I = \frac{R_s I_{MAX}}{\Psi_{PM}}. \quad (33)$$

Када брзина падне до ω_e^I , струја i_d је пала на нулу, а струја i_q је порасла до I_{MAX} . Даљи раст струје није могућ због недовољног напона, па се за кочење на брзинама мањим од ω_e^I услов нерекуперације своди на изједначавање снаге кочења са губицима у бакру при струји i_d једнакој нули:

$$\frac{3}{2} \Psi_{PM} i_q \omega_e = -\frac{3}{2} R_s i_q^2. \quad (34)$$

Из услова нерекуперације добијају се зависности струја, момента и снаге кочења за брзине мање од ω_e^I при $i_d=0$:

$$i_q = -\frac{\omega_e \Psi_{PM}}{R_s}, \quad (35)$$

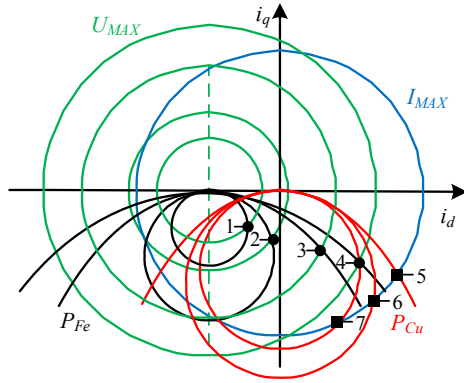
$$m_k = -\frac{3}{2} \frac{\Psi_{PM}^2}{R_s} \omega_e, \quad (36)$$

$$P_{koc} = -\frac{3}{2} \frac{\Psi_{PM}^2}{R_s} \omega_e^2. \quad (37)$$

За брзине мање од ω_e^I момент и снага кочења зависе од брзине, односно квадрата брзине, па се смањењем брзине значајно смањују и момент и снага кочења, односно нерекуперативно кочење није погодно за врло мале вриједности брзине. Због тога се нерекуперативно кочење може ефикасно користити до брзине (33).

V. ТРАЈЕКТОРИЈЕ РАДНИХ ТАЧАКА

Добијена ограничења дефинишу трајекторију струја при нерекуперативном кочењу, како је приказано на Сл. 5. У почетку кочења, тачка 1 одређена је пресеком напонског лимита (зелено) и условом нерекуперације губитака у гвожђу (црно), а обје струје су негативне. Како брзина опада, кружнице напонског лимита се шире, а нерекуперације скупљају, те се струја i_d смањује, а струја i_q расте у тачки 2.



Слика 5. Трајекторије радних тачака у напонском и струјном лимиту

Даљим смањењем брзине, настају радне тачке 3 и 4 у којима је струја i_d позитивна, а струја i_q се и даље повећава у негативну страну. У тачки 5 прелази се из напонског у струјни лимит, те се радне тачке 5, 6 и 7 налазе у пресеку кружнице лимита максималне струје (плаво) и услова нерекуперације по губицима у баку (црвено).

VI. НЕРЕКУПЕРАТИВНО КОЧЕЊЕ КОНТРОЛОМ ГУБИТАКА

На основу претходне анализе, управљачка шема за нерекуперативно кочење дата је једначинама:

$$I_s = \begin{cases} I_{MAX}, & \omega_e < \omega_e^u \\ \sqrt{i_d^2 + i_q^2}, & \omega_e \geq \omega_e^u \end{cases} \quad (38)$$

$$U_s = \begin{cases} \omega_e \sqrt{(L_s i_d + \Psi_{PM})^2 + (L_s i_q)^2}, & \omega_e < \omega_e^u \\ U_{MAX}, & \omega_e \geq \omega_e^u \end{cases} \quad (39)$$

Како би се при кочењу напон на кондензатору одржавао на задатој вриједности, на основу (16) и (17) потребно је користити пропорционални регулатор квадрата напона, слично као у [5]. Струје током кочења тада су:

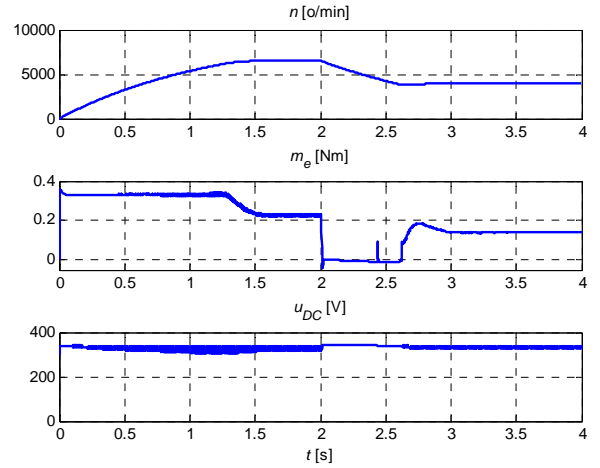
$$i_{qkoc} = -\frac{2}{3\Psi_{PM}} \left[k_p (U_{DCref}^2 - u_{DC}^2) + P_{Cu} + P_{Fe} \right] \quad (40)$$

$$i_{dkoc} = \begin{cases} \sqrt{I_{MAX}^2 - i_{qkoc}^2}, & \omega_e < \omega_e^u \\ \sqrt{\frac{U_{MAX}^2}{\omega_e^2 L_s^2} - i_{qkoc}^2} - \frac{\Psi_{PM}}{L_s}, & \omega_e \geq \omega_e^u \end{cases} \quad (41)$$

На предложени начин омогућена је регулација напона једносмјерног међукола на вриједности U_{DCref} , примјеном пропорционалног регулатора са појачањем k_p . Захваљујући одређивању губитака из (4)- (5) уважени су губици у баку и у гвозђу и на малим и великим брзинама. Услов за активирање кочења је да референтна (негативна) струја i_{qref} буде већа од вриједности из (40).

VII. РЕЗУЛТАТИ СИМУЛАЦИЈЕ И ЕКСПЕРИМЕНТА

У циљу илустрације предложеног рјешења, на а Сл. 6-8 приказани су резултати рачунарске симулације при кочењу са брзине од 6500o/minна 4000o/min. Напон једносмјерног међукола ограничава се на номиналну вриједност $U_{DCref} = 340$ Ванапон и струја мотора на $U_{MAX}=170V$ и $I_{MAX}=0.75A$.



Слика 6. Брзина, момент и напон међукола при кочењу - симулација

Кочење почиње у тренутку $t=2s$ смањењем референтне вриједности брзине, Сл. 6. Од почетка кочења па до тренутка $t=2,4s$ кочи се максималним напонем, након чега се достиже гранична брзина, па се напушта напонски лимит и прелази се на кочење максималном струјом до $t=2,6s$, што се види и на Сл. 7 и Сл. 8. Са Сл. 6. види се да момент у тренутку кочења пада на врло малу негативну вриједност, такву да се сва снага рекуперације троши на губицима, а даље, како губици и струја расту, и он расте.

Напон једносмјерног међукола у напонском лимиту расте на максимално допуштену вриједност, а затим, преласком у струјни лимит, он дјелимично опада. На Сл. 7 приказане су d и q компоненте напона и струје. Струја i_q је током кочења увијек негативна, и њена вриједност се постепено повећава, док је струја i_d у почетку негативна, затим расте у позитивну страну, те на крају опада, као што се види на Сл. 5. На Сл. 8 приказане су амплитуде напона и струје, које су на максималним вриједностима.

На Сл. 9 приказани су резултати експеримента. Експеримент је рађен на СМППМ намијењеним употреби у кућним апаратима са параметрима: $R_s = 1,7 \Omega$ $L_s = 0,02$ H, $p=8$. Да би се повећао момент инерције, на ротор је монтиран метални диск, тако да је укупни момент инерције $J=0,12kgm^2$.

Поређењем Сл. 6-8 и Сл. 9, види се да су одзиви експеримента идентичног облика као и у симулацији.

VIII. ЗАКЉУЧАК

Предложени метод нерекуперативног кочења заснован је на контроли губитака у напонском и струјном лимиту. У оба случаја, предложеним поступком обухваћени су губици и у баку и у гвожђу, а уједно се регулише и напон једносмјерног међукола. Поступак је веома једноставан.

Постоји више пресјечних тачака, односно различитих вриједности парова струја i_d и i_q које задовољавају услове нерекуперације и струјног и напонског лимита. Због тога се могу дефинисати и другачије трајекторије радних тачака него што је дато на Сл. 5. На тај начин, предложени поступак може се проширити и на СМПИМ са истурењима, код којих је пожељно да струја i_d не мијења знак како би релуктантни и синхронни момент били истог смјера.

ЛИТЕРАТУРА

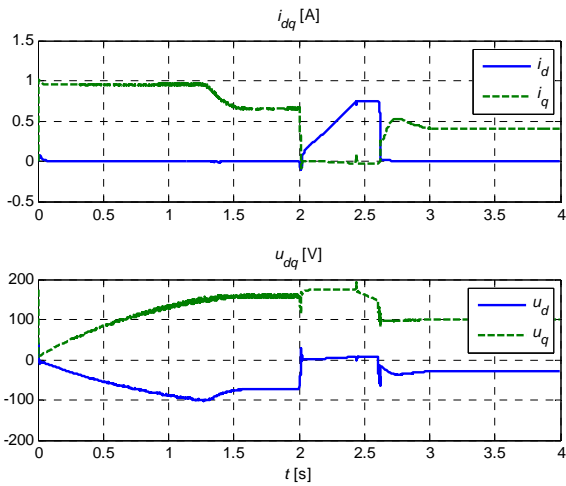
- [1] Дарко Марчетић, Владимир Поповић, Марко Гецић, Ђура Орос: „Нерегенеративно кочење асинхроног мотора без давача на вратилу контролисаног напонским и струјним инвертором“, техничко решење на пројекту TR42004 Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, 2014.
- [2] Петар Матић, Дарко Марчетић: „Нерекуперативно кочење високобрзинских синхроних мотора са перманентним магнетима“, Научно-стручни симпозијум Информационе технологије – ИНФОТЕХ, *Зборник радова*, Јахорина, 22-24. март 2017.
- [3] Vladan R. Jevremović, Borislav Jeftenić: “An Efficient Braking Algorithm for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors”, 13th International Symposium on Power Electronics - Ee 2005, *Proceedings*, Novi Sad, November 2nd -4th, 2005.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Владан Вучковић, „Електрични погони“, Електротехнички факултет, Београд, 1997.
- [7] Дарко П. Марчетић, „Микропроцесорско управљање енергетским претварачима“, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2012.
- [8] Петар Матић, Марко Гецић, Дарко Марчетић, Владимир Поповић, Ђура Орос: “Математички модел високобрзинског синхроног мотора са перманентним магнетима са уваженим губицима у гвожђу”, ШСимпозијум Енергетска ефикасност – ЕНЕФ 2017, *Зборник радова*, Бања Лука, 3-4. Новембар 2017.

ABSTRACT

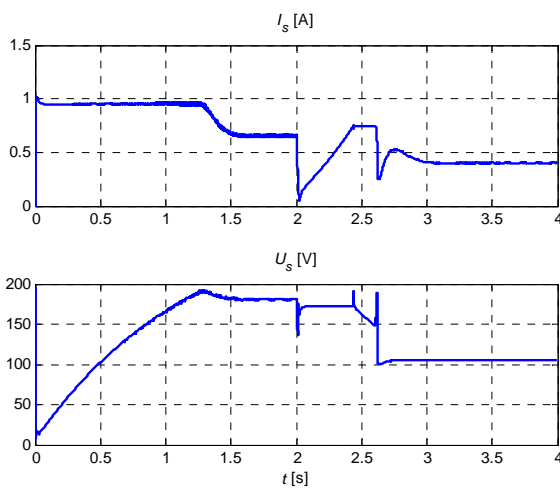
In the paper an approach for non regenerative electric braking of permanent magnet synchronous motor drives with DC bus voltage control is proposed. During the braking, recovery energy is dissipated in the motor itself, and DC bus voltage is controlled on the wanted value with the action of proposed voltage regulator. Proposed approach provides efficient non regenerative braking with taking into account both voltage and current limits. The results are confirmed by computer simulations.

NON REGENERATIVE BRAKING OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS WITH DC BUS VOLTAGE CONTROL

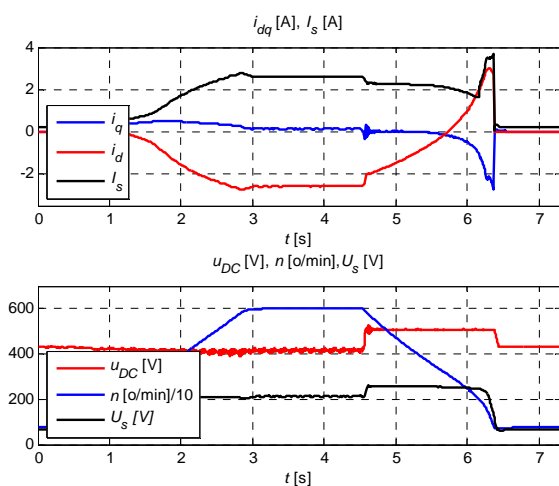
Petar Matic, Darko Marčetić



Слика 7. Компоненте струје и напона при кочењу - симулација



Слика 8. Модули струје и напона при кочењу-симулација



Слика 9. Струје, напони и брзина при кочењу-експеримент