

MECHANIKAI ÉRZÉKELŐ NÉLKÜLI KALICKÁS INDUKCIÓS MOTOR KETTŐS MEZŐORIENTÁCIÓS SZABÁLYOZÁSÁNAK IMPLEMENTÁCIÓJA

IMPLEMENTATION OF THE DOUBLE FIELD-ORIENTED CONTROL STRUCTURE FOR SENSORLESS CAGE INDUCTION MOTOR

Szabó Csaba¹, Imecs Mária², Szőke sz. Benk Enikő³, Incze János Jób⁴

*Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamosmérnöki Kar, Villamos Gépek és Hajtások
Tanszék, Románia, Kolozsvár, Romania, 400114, Kolozsvár/Cluj-Napoca, Str.
Memorandumului Nr. 28.*

¹ csaba.szabo@emd.utcluj.ro, ² maria.imecs@emd.utcluj.ro,

³ eniko.szoke@emd.utcluj.ro, ⁴ ioan.incze@emd.utcluj.ro

Abstract

The paper presents a mechanical sensorless vector control system for cage induction motor with double field orientation with focus on the rotor parameter independence regarding both the computation of the control variables and the speed identification procedure. The induction motor is fed by a voltage controlled pulse-width-modulated voltage-source IGBT inverter. The reference rotor speed is generated by a torque controller in the feedback of the active control loop, as a consequence the rotor-parameter dependence is eliminated in the feedback loop. The same aim is followed by the applied direct field-orientation procedure, based on the integration of the stator-voltage equation, avoiding the slip compensation in the identification of the orientation-flux position angle. The rotor-parameter independence in the computation of the control variables is realized by the double field-orientation procedure. The practical implementation was performed on an experimental rig controlled by a dSPACE DS1104 controller card.

Keywords: *Vector Control, Pulse-Width Modulation (PWM), Voltage-Source Inverter (VSI), Static Frequency Converter*

Összefoglalás

A dolgozat egy mechanikai érzékelő nélküli kalickás indukciós motor kettős mezőorientációs szabályozásának a gyakorlati implementációját mutatja be. A hajtómotor betáplálása nyílt hurkú feszültség típusú impulzusszélesség-modulációval (ISZM) vezérelt IGBT-s feszültségforrás jellegű váltóirányítóról történik. A mechanikai érzékelő nélküli struktúrában a sebességvisszacsatolási jelet egy kaszkád-kapcsolású nyomatékszabályozó generálja, mellyel elkerülhető a rotorparaméter-függőség. Ugyancsak ezt a célt szolgálja a direkt mezőorientáció, mely az alkalmazott fluxusidentifikációs eljárásnak köszönhető. Ez az állórész feszültségegyenletének az integrálásán alapul, és mellőzi a csúszáskompenzálást az orientációs fluxus pozíciószögének az identifikációjában. A vezérlési ágba a rotorparaméter-függőséget a kettős mezőorientációval küszöböljük ki. A gyakorlati implementációt a dSPACE cég által kifejlesztett DS1104 típusú személyi számítógépbe illesztett vezérlőkártya segítségével hajtottuk végre.

Kulcsszavak: *vektoriális szabályozás, impulzusszélesség-moduláció, feszültséginverter, statikus frekvenciaváltó.*

1. Bevezető

A kalickás indukciós motor (KIM) mechanikai (sebesség-) érzékelő nélküli (MÉN) úgynevezett „*sensorless*” rendszereinél alkalmazott eddig ismert technikák – mint a nyílt hurkú becslők, a referencia-modell alapú adaptív rendszerek (MRAS – „*Model reference Adaptive Systems*”), a Luenberger-megfigyelők, a Kálmán-szűrős eljárások stb. – hátrányai között elsősorban a leszűkített sebességtartományt és a nagy szoftverszámítási igényt sorolják fel. Az ipari alkalmazások terén mindezek a hátrányok korlátozzák a MÉN-rendszerek felhasználhatóságát. Ha nem túl igényes sebességszabályozásra van szükség, akkor ez megoldható egyszerűbb rendszerekkel, viszont így számolnunk kell a rotorparaméter-függőséggel.

Ezen paraméterek identifikációja bonyolult és nagy számítási kapacitást igényel, ugyanakkor ezeknek az értéke (főleg a rotorellenállás) változik a működési hőmérséklet függvényében [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8].

Ismerve a kettős mezőorientáció (2MO) alkalmazási lehetőségeit és előnyeit [9], [10], [11], [12], alkalmazása a MÉN-KIM szabályozási rendszereknél is rotorparaméter-független struktúrákhoz vezethet [13]. Ugyancsak a 2MO-s eljárásnak köszönhetően a rendszer kisebb számítási kapacitás (ami az állórészfeszültség mint szabályozási mennyiség számolását illeti) mellett jobb dinamikát és stabilitást, valamint nagyobb túlterhelőséget biztosít.

2. A kettős mezőorientációs sebesség-érzékelő nélküli hajtás

Kutatásaink során a számítógépes szimulációk, illetve a próbapadi implementációk alkalmával nyert eredmények folyamatos kiértékelése eredményeképpen a bemutatott struktúrák fokozatosan módosultak,

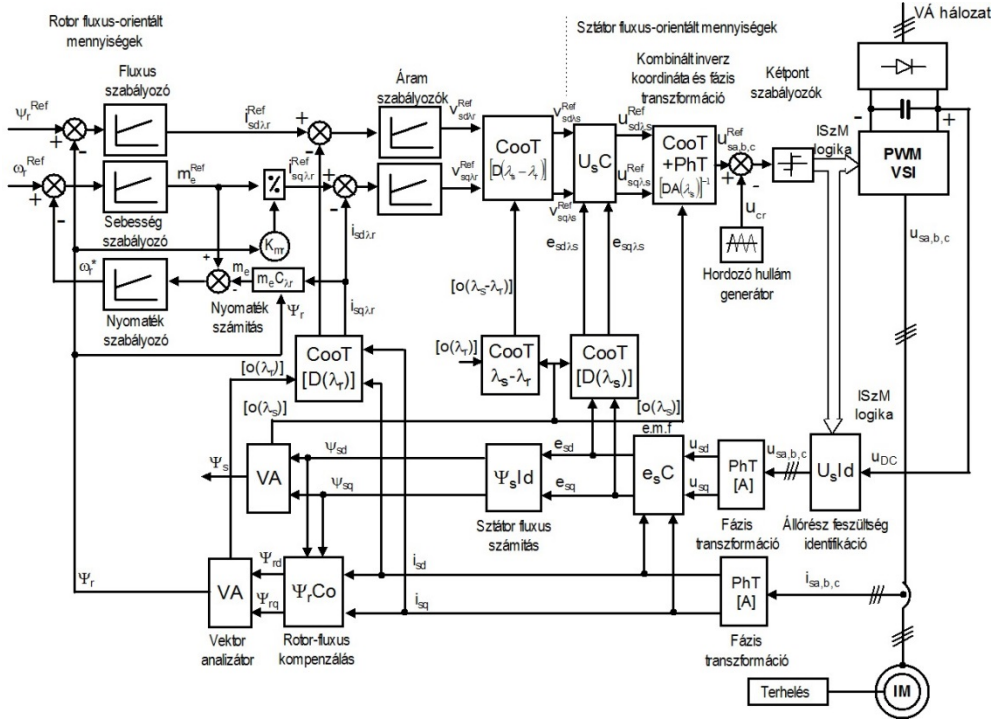
ugyanakkor nem veszítve szem elől mindazokat a fontosabb elemeket, amelyek a KIM-2MO-ra, illetve az alkalmazott sebesség identifikációs módszerre vonatkoznak. Ennek tükrében megmaradt a rotorfluxus szabályozás (RFSz), mely jó dinamikussá viselkedést és működési stabilitást kölcsönöz a hajtásnak, míg az váltóirányító vezérléséhez szükséges állórészfeszültség számítását, állórész-mezőorientációban végezzük, ami rotorparaméter-függetlenséget biztosít.

A gyakorlatilag implementált rendszer az [6], [7], [8]-ban került bemutatásra. Legelső próbálkozásaink során a két (azaz az aktív, illetve a reaktív) áramösszetevő-szabályozó állórészfluxus szerint orientált koordináta-rendszerben működik [4], [5], [10], [11], [12], [13], [14].

A legújabb eredmények azt bizonyították, hogy tranziens folyamatok során (úgy mint az indítás vagy a gyors irányváltás), amennyiben ezek az áramszabályozók rotormező-orientált koordináta-rendszerben dolgoznak, a rendszer viselkedése feljavul [6], [7], [8]. Ugyancsak ennek köszönhetően, a sebességidentifikációt szintén a rotormező-orientált állórészáram aktív összetevőjének a szabályozójával valósítottuk meg [4], [6], [7], [14], ahogyan az már előzőleg közlésre került [15], [16]. Az áramszabályozó helyett alkalmazhatunk nyomatékszabályozót is [3], [5].

Az a megoldás, amelynek során a sebességszabályozáshoz szükséges visszacsatoló jelet egy, a sebességszabályozóval kaszkádban kapcsolt áram- vagy nyomatékszabályozóval generáljuk, kiküszöböli a visszacsatolásban a sebesség effektív számolását, és lehetővé teszi a rotorparaméter-függetlenség elérhetőségét [3], [4], [5], [6].

Az **1. ábrán** látható a MÉN-KIM-os hajtásra alkalmazott, az általunk kifejlesztett 2MO-n alapuló vektoriális szabályozási struktúra.



1. ábra. Sebességérzékelő nélküli indukciós motor (IM) kettős mezőorientációs szabályozása kaszkádban kapcsolt nyomatékszabályozóval generált sebességvisszacsatolással

A KIM-et egyenáramú közbensőkörös statikus frekvenciaváltóról tápláljuk, melynek a nyílt hurkú impulzusszélesség-modulációs feszültség típusú váltóirányítója (PWM-VSI – „Pulse-Width Modulation Voltage-Source Inverter”) a hajtás beavatkozó eszköze. A sebességszabályozáshoz szükséges visszacsatolási értéket egy kaszkádban kapcsolt nyomatékszabályozó generálja rotor-fluxus szerinti mezőorientációban [7], [8], hasonlóképpen, mint az [5]-ben.

A sebességszabályozó kimenetén az aktív szabályozási hurokban az m_e^{Ref} nyomatékreferenciát generáljuk, mely a becsült ω_r^* rotorszögsebességet előállító nyomatékszabályozó alapjeleként is szolgál. A szabályozó visszacsatoló m_e elektromagne-

ses nyomatékot az $m_e C_{\lambda r}$ blokkban a következő összefüggés alapján számítjuk ki:

$$m_e = k_{Mr} \Psi_r i_{rq\lambda_r} \quad (1)$$

ahol k_{Mr} a nyomatékkoefficiens [16], [17].

Az sebesség-hurokban az állórész-áram szabályozó rotorfluxus-orientált aktív áram alapjelet a következő összefüggés alapján számoljuk:

$$i_{rq\lambda_r}^{Ref} = \frac{m_e^{Ref}}{k_{Mr} \Psi_r} \quad (2)$$

Mivel a vezérlési ágban a nyomatékszabályozó hiányzik (helyette egyszerűen osztással nyerjük az aktív áram alapjelét), a struktúra úgynevezett közvetlen (indirekt) nyomatékszabályozást biztosít.

A sztátorfluxus identifikációja az elektromotoros feszültség integrálása révén történik, ami direkt mezőorientációhoz vezet, kiküszöbölve a csúszáskompenzálást a visz-zacsatolási hurokban [18], [19].

Ami újítást ez a szabályozási struktúra az eddigiekhez képest hoz, az a szátoráram-összetevők szabályozására vonatkozik, melyet rotorfluxus-orientációs koordináta-rendszerben végzünk (sztátorfluxus szerinti orientáció helyett). Ezzel a struktúrával, változó terhelő nyomaték esetén, a hajtás viselkedésének a feljavítása érhető el.

3. Implementációs eredmények

A KIM-et tápláló PWM-VSI (1. ábra) váltóirányító vezérlését egy DANFOSS gyártmányú, VLT5004 típusú ipari frekvenciaváltó módosításával tettük hozzáférhetővé. Az IGBT-s feszültségforrás jellegű váltóirányító vezérlőjeleit egy, a dSPACE cég által gyors folyamatok vezérlésére kifejlesztett, DS1104 típusú személyi számítógépbe illesztett vezérlőkártya processzora generálja.

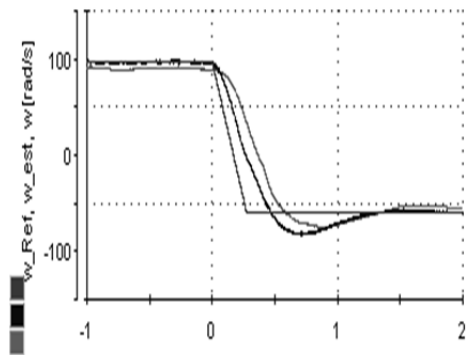
A kártyát támogató Matlab-Simulink® szoftverre szükség van a fejlesztési munka minden fázisában, a számítógépes szimulációtól elkezdve, az implementációs eljárás kivitelezésében, egészen a mért adatok kiértékeléséig [7], [8].

Az alkalmazott 1LA7-106 4AA10 típusú SIEMENS gyártmányú indukciós motor névleges adatai: $P_{TN}=2,2\text{kW}$, $U_{sN}=230/400\text{V}^{\text{eff}}$, $I_{sN}=8,2/4,7\text{A}^{\text{eff}}$, $f_N=50\text{Hz}$, $n_N=1420$ ford/perc. A névleges munkapont-ra számított értékek: az elektromágneses nyomaték $m_{eN}=15\text{Nm}$ és az alapjelek: $\omega_{rN}=297$ rad/s villamos szögsebesség, valamint a rotorfluxus amplitúdója $\Psi_{rN}=0,9$ Wb [5], [6], [7], [8], [11], [13].

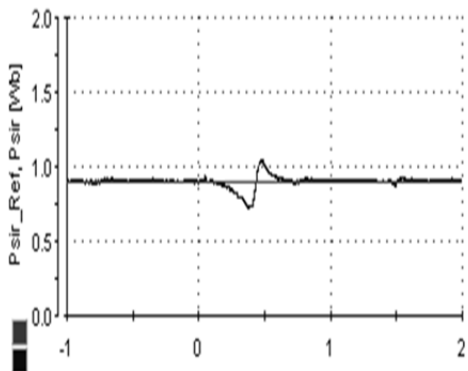
A 2-13 ábrákon látható implementációs eredmények egy, állandósul állapotból történő forgásirányváltás folyamatát mutatják be, ami 100 rad/s szögsebességről -60 rad/s-ra enyhe $m_L=2\text{Nm}$ nyomatékterhelés

alatt történik (az időbeli diagramokon a 0s-ban). Ahogyan a 2. ábra diagramján látható, a becült sebességérték (a középső görbének felel meg) megelőzi a mért sebességértéket.

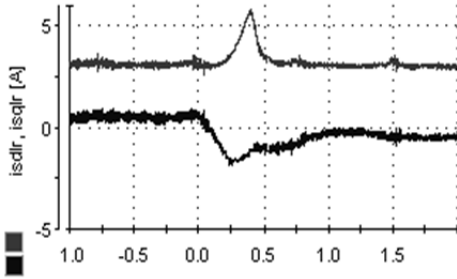
Az előírt rotorfluxus alapjel a névleges értéken állandó marad. Az irányváltás folyamán az identifikált aktuális rotorfluxus értékén megfigyelhető lüktetés abban az időszakaszban jelentkezik, amikor a motor nagyon alacsony sebességen működik, következképpen ekkor az elektromotoros feszültség is nulla felé tart.



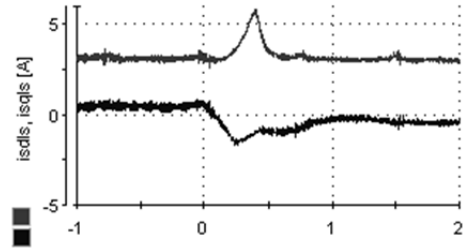
2. ábra. Az előírt (w_{Ref}), a becült (w_{est}), illetve a mért (w) szögsebességek (az 1. ábrán ω_r jelöléssel) időbeli változása



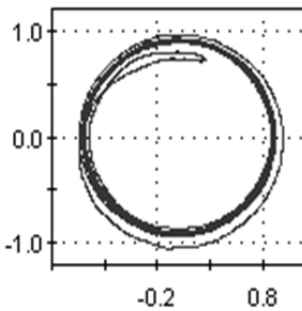
3. ábra. Az előírt állandó értékű alapjel (Ψ_{r_Ref} , az 1. ábrán Ψ_r) és az aktuális rotorfluxus (Ψ_r) amplitúdójának időbeli változása



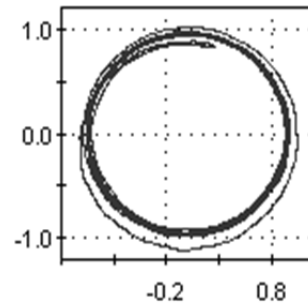
4. ábra. A szttatoráram (isdlr a felső, isqlr az alsó diagram) rotormező-orientált két-fázisú összetevőinek (az 1. ábrán $d\lambda_r$ - $q\lambda_r$ jelöléssel) időbeli változása



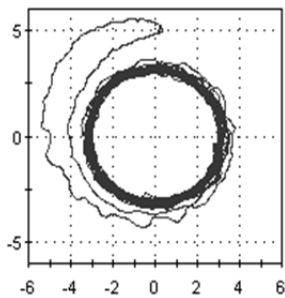
5. ábra. A szttatoráram (isdlr a felső, isqls az alsó diagram) szttatormező-orientált két-fázisú összetevőinek (az 1. ábrán $d\lambda_s$ - $q\lambda_s$ jelöléssel) időbeli változása



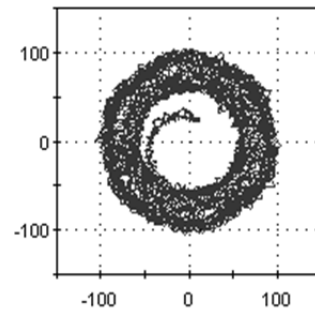
6. ábra. A rotorfluxus térfázordiagramja



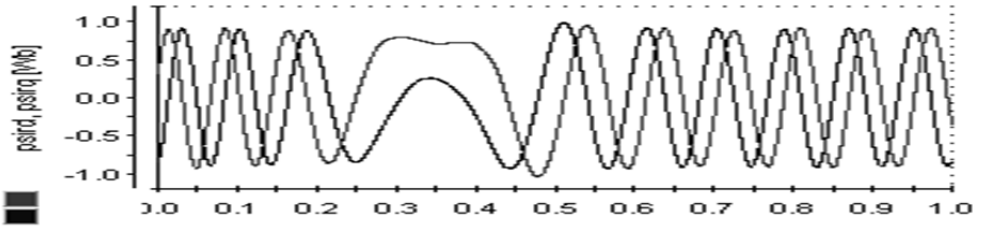
7. ábra. A szttatorfluxus térfázordiagramja



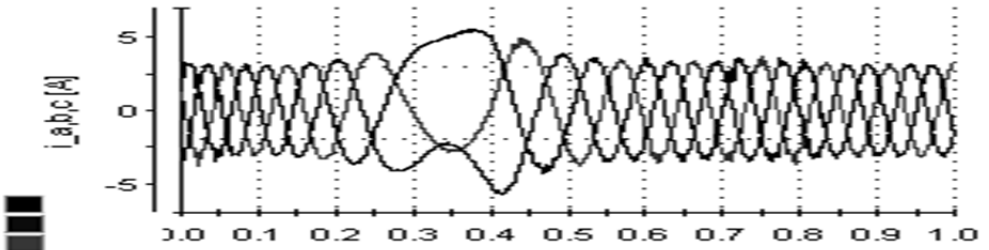
8. ábra. Az szttatoráram térfázordiagramja



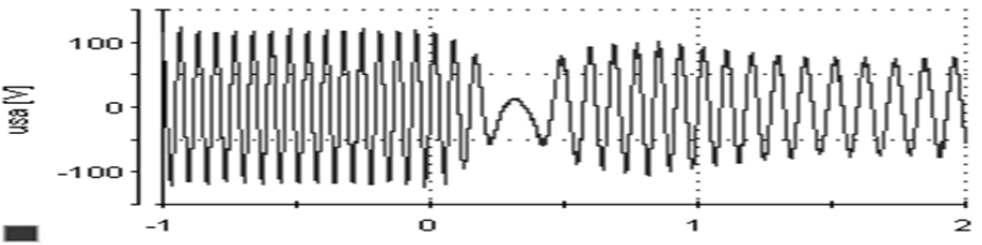
9. ábra. Az szttatorfeszültség térfázordiagramja



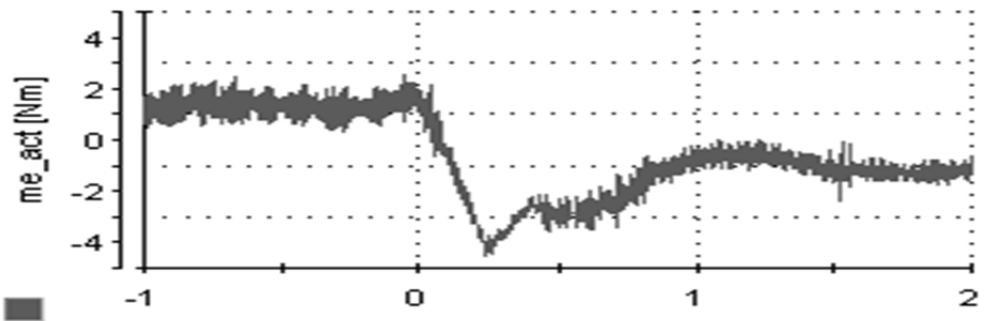
10. ábra. A Ψ_r rotorfluxus szttatororientált kétfázisú d-q összetevőinek időbeli lefolyása



11. ábra. Az állórész három fázisáramának (i_a, b, c) időbeli lefolyása



12. ábra. Az állórész feszültség időbeli lefolyása az „a” fázisban



13. ábra. Az elektromágneses nyomaték időbeli változása

A MÉN-rendszerek azon ismert hátránya, miszerint alacsony sebességen a struktúrában azonosított sebességértékek kevésbé megbízhatóak, az alkalmazott fluxus-identifikációs módszerek is tulajdonítható, mely az elektromotoros feszültség integrálásán alapszik.

A dinamikus viselkedést illetően az eredmények kielégítőek. A közvetett nyomatékszabályozásnak köszönhetően a forgásirányváltás pillanatában, amikor az indukciós motor fékező üzemmódba kerül, az áramerősség, illetve nyomaték értékeket sikerült megfelelő korlátok között tartani.

Többszöri kísérletezés után az eredmények azt mutatták, hogy a hajtás dinamikája és robusztussága tovább növelhető, amennyiben az aktív ágon lévő áramszabályozót adaptív szabályozóval helyettesítjük.

Az adaptív jellegét a klasszikus PI-szabályozónak a K_I integráló tag valós időben történő újrarahangolása adhatja meg.

4. Következtetések

A dolgozatban bemutatott mechanikai érzékelő nélküli kalickás indukciós motoros hajtás sebesség-visszacsatolási jelét a sebességszabályozóval kaszkádba kapcsolt nyomatékszabályozó generálja, mellyel a visszacsatolási ágon kiküszöbölhető a rotorparaméter-függő számítások nagy része. A többi számítás rotorparaméter-függőségét az alkalmazott fluxus-identifikációs módszernek köszönhetően a direkt (közvetlen) mezőorientációval kiküszöböltük ki, mint ahogyan a [3]-ban volt javasolva az addig alkalmazott indirekt (közvetett) csúszáskompenzáláson alapuló forgómező-sebesség számolása helyett [5], [14], [15], [16].

A kettős mezőorientáción alapuló szabályozási struktúra rotorparaméter-függétlenséget biztosít váltó-irányító vezérléséhez szükséges állórészfeszültség alapjeleinek a számításához.

Az újított struktúra szerint az állórész-áram szabályozása sztátormező-orientált összetevők helyett rotormező-orientált összetevőkkel történik, ami megnöveli a hajtásrendszer dinamikáját és stabilitását nyomatékperturbációk esetén.

Amennyiben a klasszikus PI jellegű szabályozót részben adaptív szabályozóval helyettesítjük (csupán az integráló tag adaptálásával) a rendszer jobb viselkedést mutat a referenciasebesség változtatásakor, illetve a terhelőnyomaték által okozott perturbációk esetén.

Ha a sebességszabályozó kimenetén nem közvetlenül az aktív sztátoráram-összetevő alapjelét generáljuk, hanem az elektromágneses nyomatékét, akkor ebből a rotorfluxus segítségével egy egyszerű osztással az előbb említett aktív áram-összetevő számolható. Ezzel az eljárással a szabályozási struktúrának közvetett (indirekt) nyomatékszabályozást biztosítunk.

Amennyiben a motor nyomatékát pontosabban szeretnénk szabályozni, az aktív áramösszetevőt egy nyomatékszabályozó segítségével állíthatjuk elő (direkt/közvetlen nyomatékszabályozás). Ez esetben megnő a szabályozási struktúra komplexitása, és ennek következtében a számítási igény is, mely kritikus tényező lehet a próbabadi implementáció során.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Vas P.: *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. New York, Oxford University Press, ISBN: 978 0198564652, 1998.
- [2] Holtz J.: *Sensorless Control of Induction Motors*. Proceedings of the IEEE, Vol.90, No.8, Aug. 2002, pp.1358–1394.
- [3] Imecs M.: *Kettős mezőorientációs szabályozási struktúra mechanikai érzékelő nélküli kalickás indukciós motoros hajtás részére*. XIV. Műszaki Tudományos Ülésszak MTÜ 2013, Erdélyi Múzeum-Egyesület Műszaki Tudományos Szakosztálya, Kolozsvár, 2013. Nov. 23, e-Book, pp. 69–80, ISBN: 978-606-8178-80-6, <http://hdl.handle.net/10598/28082>.

- [4] Imecs, M.; Szabó, Cs.; Szőke Benk, E.; Incze, I. I.: *Mechanikai érzékelő nélküli kalickás indukciós motor kettős mezőorientációs szabályozási struktúrájának szimulációja*, XIX. FMTÜ Nemzetközi Tudományos Konferencia, Műszaki Tudományos Füzetek, Erdélyi Múzeum-Egyesület kiadványa, Kolozsvár, 2014, pp. 213-216, ISSN 2067-6 808, <http://eda.eme.ro/handle/10598/28186>.
- [5] Negrea, C. A.: *Identificarea poziției și vitezei în acționări cu motor de inducție (Position and Speed Identification in Induction Motor Drives)*, Doktori tézis, Kolozsvári Műszaki Egyetem, 2014.
- [6] Szőke Benk, E.: *Implementarea structurii de reglare vectorială a mașinii de inducție fără senzor mecanic cu orientare dublă după câmp (Implementation of Vector Control Structure for Speed Sensorless Induction Machine with Double Field Orientation)*, Doktori tézis, Kolozsvári Műszaki Egyetem, 2014.
- [7] Szabó, Cs.; Szőke Benk, E.; Imecs, M.; Incze, J. J.: *Sebesség-érzékelő nélküli kettős mezőorientációs vektoriálisan szabályozott aszinkron motoros hajtás*. XV. Nemzetközi Energetika–Elektrotechnika Konferencia, ENELKO 2014, Székelyudvarhely, 2009 okt. 9-12, ISSN 1842-4546, 94–99.
- [8] Szőke Benk, E.; Szabó, Cs.; Imecs, M.; Incze, I. I.: *Double field oriented sensorless control of cage induction motor*. 15th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics, CINTI 2014, Budapest, nov. 19–21, 2014. (Elfogadott dolgozat, nyomtatás alatt).
- [9] Imecs, M.: *Kalickás indukciós motorok forgó-és állórész mezőorientált vektoriális szabályozási rendszereinek összehasonlítása*. ENELKO 2009. X. Nemzetközi Energetika–Elektrotechnika Konferencia, Marosvásárhely 2009. ISSN 1842-4546, 66–71 old.
- [10] Imecs, M.; Incze, I. I.; Szabo, Cs.: *Double field orientated vector control structure for cage induction motor drive*. Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Transaction of Power Engineering, Tom 53 (67), Special Issue: Proceedings of the 14th National Conference on Electrical Drives CNAE, 2008. ISSN 1582-7194, pp. 135–140.
- [11] Imecs, Mária; Szabó, Cs.; Incze, I. I.: *Vector control of the cage induction motor with dual field orientation*. 9th International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence and Informatics CINTI 2008, Budapest, 2008. ISBN 978-963-7154-82-9, 47–58 old.
- [12] Imecs, M.; Szabó, Cs.; Incze, J. J.: *Kalickás indukciós motorok vektoriális szabályozása kettős mező-orientációval*. ENELKO 2009. X. Nemzetközi Energetika–Elektrotechnika Konferencia, Marosvásárhely 2009. ISSN 1842-4546, 72–77 old.
- [13] Imecs, M.; Incze, I. I.; Szabó, Cs.: *Dual field orientation for vector controlled cage induction motors*, 13th IEEE Intern. Conference on Intelligent Engineering Systems, INES 2009, Barbados, CD-ROM, ISBN: 978-1-4244-4111-2, pp. 143–148.
- [14] Imecs, M.; Negrea, C. A.; Szabó, Cs.; Incze, J. J.: *Sebesség-érzékelő nélküli aktív áramszabályozáson és közvetett mező-orientáción alapuló vektoriális aszinkron motoros hajtás szimulációja*. ENELKO 2013. XIV. Nemzetközi Energetika–Elektrotechnika Konferencia, Nagyszeben, 2013. ISSN 1842-4546, 54–59 old.
- [15] Akeshi, M.; Thung, H. C.; Hiroichirou, T.; Takashi, K.; Ysugutosi, O.: *Today's AC drive industrial application in Japan*. 4th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'91, Florence, 1991. pp. 2-618–2-624.
- [16] Kelemen, Á.; Imecs, M.: *Vector Control of AC Drives*. Vol. 1: *Vector Control of Induction Machine Drives*. OMIKK-Publisher, Budapest, 1991. ISBN 963 593 140 9.
- [17] Imecs, M.: *A villamos gépek modern szabályozási módszerei a térfázor elmélet alapján*. Plenáris előadás, Fialat Műszakiak Tudományos Ülésszaka, XVI. FMTÜ Nemzetközi Tudományos Konf., Műszaki Tudományos Füzetek, Erdélyi Múzeum-Egyesület kiadványa, Kolozsvár, 2011. pp. XIX–XLIV, ISSN 2067-6 808, <http://eda.eme.ro/handle/10598/13994>.
- [18] Incze, I. I.; Imecs, M.; Szabó, Cs.; Vásárhelyi, J.: *Orientation-field identification in asynchronous motor drive systems*. 6th IEEE International Carpathian Control Conference ICC 2005. Lillafüred-Miskolc, Hungary, 2005. Vol I, ISBN 963 661 644 2, pp. 131–136.
- [19] Imecs, M.; Incze, J. J.; Szabó, Cs.: *Fluxus-identifikációs és szabályozási módszerek kalickás indukciós motorok mező-orientált hajtás-rendszereiben*. ENELKO 2009 X. Nemzetközi Energetika–Elektrotechnika Konferencia, Marosvásárhely, 2009, ISSN 1842-4546, pp. 60–65.