

Állapotmegfigyelő tervezése állandómágneses gépek számára

State Observer Design for Permanent Magnet Machines

BERTÓK Zsanett¹ hallgató, Dr. STUMPF Péter Pál² egyetemi docens, Dr. BUDAI Csaba¹ adjunktus

¹Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

²Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

Email: bertok.zsanett@mogi.bme.hu, stumpf.peter@aut.bme.hu, budaicsaba@mogi.bme.hu

Abstract

In the sensorless control of electric drives, observers are commonly used to estimate the angular velocity and position of the motor. However, prevalent methods often fail to provide accurate estimation at low speeds in the case of nonlinear system characteristics. This paper presents a novel state observation method based on feedback linearization that is applicable to nonlinear systems, which is able to adequately estimate the states of the drive over the entire angular velocity range.

Keywords: sensorless control, electric drives, state observer, feedback linearization, PMSM

Kivonat

Villamos hajtások szenzormentes szabályozása során jellemzően állapotmegfigyelőt alkalmaznak a motor szögsebességének és -helyzetének becslésére. Azonban állandómágneses szinkrongépek (PMSM) esetén az elterjedt módszerek alacsony sebességtartományban nem képesek pontos becslést adni. Jelen munkában bemutatásra kerül egy új, nemlineáris rendszerekre alkalmazható, visszacsatolásos linearizáción alapuló megfigyelési módszer, amely a hajtás indításától kezdve képes kielégítően megfigyelni a hajtás állapotait.

Kulcsszavak: érzékelőmentes szabályozás, villamos hajtások, állapotmegfigyelő, visszacsatolásos linearizáció, PMSM

1. BEVEZETÉS

Villamos hajtások alkalmazásakor egyre szélesebb körben használnak érzékelőmentes szabályozási módszereket a műszaki életben [1]. A lineáris modellel leírható kefések egyenáramú gépek esetén a szenzormentes szabályozás akár egy Luenberger állapotmegfigyelő alkalmazásával megoldható. Az állandómágneses szinkrongépek (Permanent Magnet Synchronous Machine, PMSM) esetén indukált feszültség megfigyelésére alapozott eljárások terjedtek el [2][3], melyeknek jelentős hátránya, hogy alacsony szögsebességek esetén nem tudják pontosan becsülni a hajtás szög helyzetét és -sebességét, így a motor indításakor ezek nem alkalmazhatók megfelelően, csak más technikával kiegészítve használhatók.

Jelen tanulmányban bemutatásra kerül egy olyan új, általános nemlineáris rendszerekre is alkalmazható állapotmegfigyelési módszer, mely alkalmas a nemlineáris karakterisztikával rendelkező PMSM hajtások állapotainak becslésére. A kidolgozott eljárás alapja a vizsgált rendszer visszacsatolással történő linearizációja, amellyel egzakt lineáris modell kapható a hajtásról. Erre alapozható akár lineáris Luenberger állapotmegfigyelő is, az egyenáramú gépek mintájára. Az így kapott állapotmegfigyelő mellett, hogy szisztematikus lépésekben tervezhető, valamint alacsony számítási kapacitást igényel, a teljes fordulatszám tartományon képes megbízhatóan becsülni a PMSM hajtás szögsebességét, ellentétben az elterjedten alkalmazott módszerekkel.

A munkában először bemutatásra kerül a Luenberger állapotmegfigyelő alkalmazhatósága lineáris modellel leírható kefések egyenáramú gép állapotainak becslésére. Ezután a visszacsatolásos linearizációs módszer módosításával kidolgozásra kerül egy olyan eljárás, amely a nemlineáris rendszerekről olyan lineáris modellt képes adni, amely mindenképpen megfigyelhető, így ezekre is érvényessé válnak az egyenáramú gép esetén bemutatott megfigyelési elvek. Végül a bemutatott megfigyelő állandómágneses szinkrongép

példáján kerül megvalósításra, valamint numerikus szimulációk segítségével igazolásra kerül, hogy a javasolt módszerre önállóan is alapozható szenzormentes szabályozás.

2. ÁLLAPOTMEGFIFYELŐ TERVEZÉSE KEFÉS EGYENÁRAMÚ MOTORHOZ

Az egyenáramú gép érzékelőmentes szabályozásakor [4][5] kizárólag az armatúra áramerősség mérése alapján történik a forgórész szögelfordulásának, valamint szögsebességének becslése. A hajtás

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \quad (1)$$

állapotegyenlete az alábbi formában írható fel, amennyiben az aktuális szöghelyzetet a motor szögsebességének megfigyelésén keresztül, integrálással képezzük, így nem része a hajtás állapotér modelljének.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i(t) \\ \Omega(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k_e}{L} \\ \frac{k_m}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ \Omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u_{be}(t) \quad (2)$$

állapotegyenletben $u_{be}(t)$ a motor kapocsfeszültsége, $i(t)$ armatúráján átfolyó áramerősség, valamint $\Omega(t)$ jelöli a hajtás szögsebességét. Az armatúra ellenállása és induktivitása rendre R és L , k_e és k_m a sebesség- illetve nyomatékkonstans, B a hajtás viszkózus csillapítási tényezője, J a forgórész tehetetlenségi nyomatéka. Az állapotér modellhez tartozó kimeneti egyenlet

$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} i(t) \\ \Omega(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

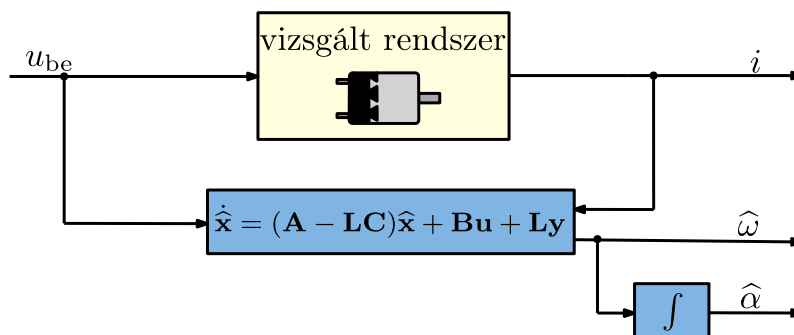
mivel az áramerősség mérése adja a vizsgált rendszer kimenetét. A rendszer teljesíti a Kálmán-féle rangfeltételt,

$$\mathbf{M}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{R}{L} & -\frac{k_e}{L} \end{bmatrix} \quad (4)$$

megfigyelhetőségi mátrixa teljes rangú, vagyis megfigyelhető. Így a vizsgált rendszerhez tervezhető Luenberger állapotmegfigyelő, amely az $\mathbf{x}(t)$ állapotokat $\hat{\mathbf{x}}(t)$ megfigyelt állapotok segítségével becsli. A felírható megfigyelő egyenlete

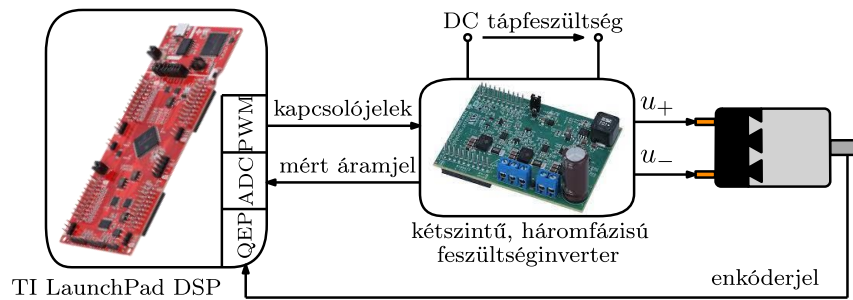
$$\frac{d}{dt} \hat{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{LC})\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{L}y(t). \quad (5)$$

A becsült állapotok beállításának dinamikája az \mathbf{L} mátrixon keresztül állítható be, például Ackermann-formula alkalmazásával. Az állapotmegfigyelő struktúráját az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. Az állapotmegfigyelő felépítése

A bemutatott Luenberger állapotmegfigyelő vizsgálata kísérleti mérés segítségével történt, melynek összeállítása a 2. ábrán látható. A vizsgált hajtás paramétereit az 1. táblázat foglalja össze.



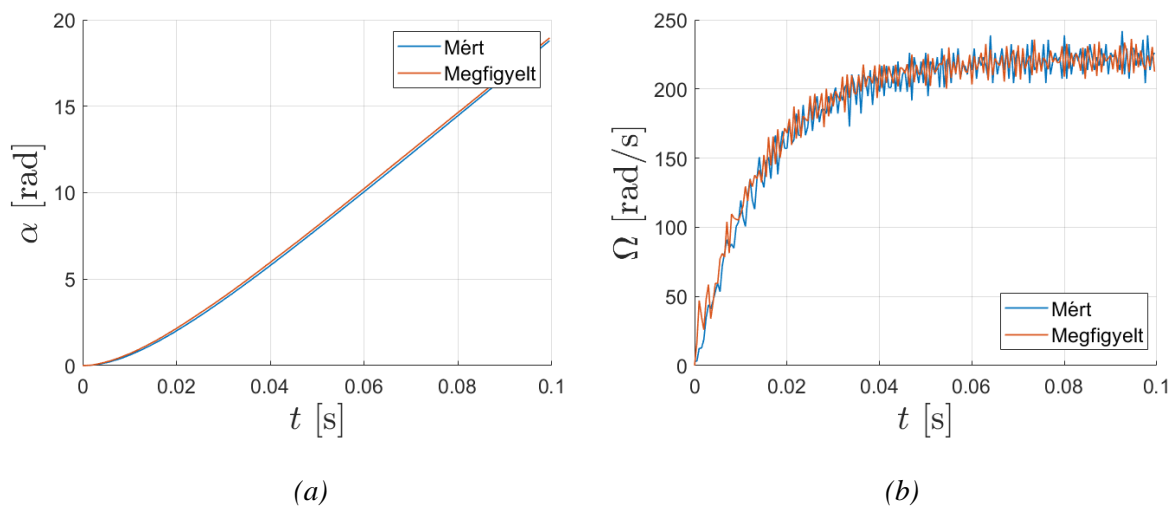
2. ábra. A kísérleti mérési elrendezés

3. A vizsgált egyenáramú motor paramétereit

1. táblázat

Villamos paraméterek		Mechanikai paraméterek	
R	$4,37 \Omega$	k_m	$0,0338 \text{ Nm/A}$
L	$0,493 \text{ mH}$	J	$1,35 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$
k_e	$0,0338 \text{ Vs/rad}$	B	$1,15 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}$

A vizsgálat során a megfigyelő digitálisan került megvalósításra, zérus pólusok mellett. Az így kapott szögsebesség és -elfordulás beállítás látható a 3. ábrán. Megfigyelhető, hogy a becsült szögsebesség és szöghelyzet jól közelíti az optikai enkóderrel mért jeleket.



3. ábra. Az állapotmegfigyelő (a) szögelfordulás és (b) szögsebesség beállása

3. ÁLLAPOTMEGFIGYELŐ TERVEZÉSE NEMLINEÁRIS RENDSZEREKHEZ

A következőkben bemutatásra kerül a visszacsatolással történő linearizációs eljárás, amellyel olyan lineáris modell kapható a rendszerrel, amire, a kefésegyenáramú géphez hasonlóan, akár lineáris Luenberger állapotmegfigyelő is alapozható. A visszacsatolós linearizáció módszere önmagában nem minden esetben ad megfigyelhető rendszert, azonban formula módosításával biztosítható a kapott rendszer megfigyelhetősége. A kidolgozott eljárás egy állandómágneses szinkrongép szenzormentes szabályozásának példáján keresztül kerül bemutatásra.

3.1. Nemlineáris rendszerek állapotmegfigyelése visszacsatolásos linearizációval

Egy nemlineáris rendszer általánosan felírható

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}(t) \quad (6)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \quad (7)$$

alakban. A fenti modell alapján a visszacsatolással történő linearizációhoz [7] összeállítható a rendszer $L_f \mathbf{h}(\mathbf{x})$ Lie-deriváltjai segítségével

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}) = [\mathbf{h}(\mathbf{x}) \quad L_f \mathbf{h}(\mathbf{x}) \quad \dots \quad L_f^{n-1} \mathbf{h}(\mathbf{x})]^\top \quad (8)$$

transzformációs mátrix. A rendszeren az így kapott $\mathbf{z} = \mathbf{T}(\mathbf{x})$ állapottranszformációt végrehajtva

$$\frac{d}{dt} \mathbf{z}(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{z}(t) + \mathbf{B}_c \boldsymbol{\beta}^{-1} [\mathbf{u}(t) - \boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x})] \quad (9)$$

rendszerhez jutunk. A transzformált állapotterben a rendszer állapotait $\mathbf{z}(t)$ jelöli, bemenete $\mathbf{u}(t)$, $\boldsymbol{\beta}^{-1}$ konstans, $\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x})$ az eredeti állapotoktól függő tag. Ekkor

$$\mathbf{u}(t) = \boldsymbol{\beta} \mathbf{v}(t) + \boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x}) \quad (10)$$

választással élve, $\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x})$ visszacsatolása révén

$$\frac{d}{dt} \mathbf{z}(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{z}(t) + \mathbf{B}_c \mathbf{v}(t), \quad (11)$$

linearizált rendszer adódik [8], ahol

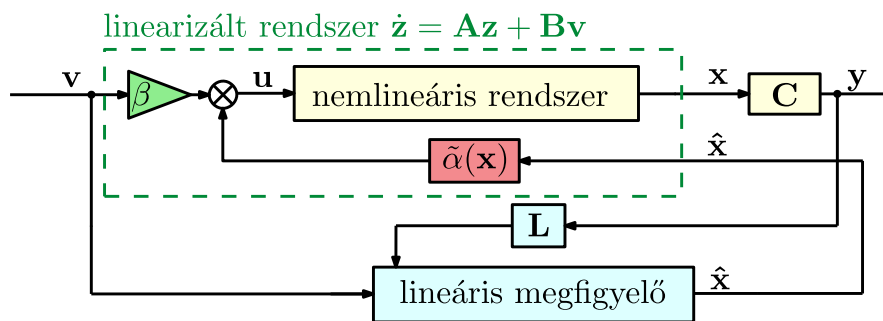
$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ és } \mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

amennyiben a rendszer dimenziója 3. Mivel a kapott rendszer minden esetben egzakt, lineáris modellel leírható, az egyenáramú géphez hasonlóan, lineáris állapotmegfigyelő tervezhető. Ehhez azonban biztosítani kell, hogy a kapott rendszer megfigyelhető legyen, bármelyik állapotot választva a rendszer kimenetének.

Ez csak akkor teljesül, ha az első állapotváltozót tekintjük a rendszer kimenetének, azonban a megfigyelő számára olyan kimenetet szükséges választani, ami mérhető. Ennek kiküszöbölésére a linearizációs módszer módosítása szükséges. A következőképp módosítva az állapotegyenletet biztosítható a rendszer megfigyelhetősége.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{z}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \left[\mathbf{u}(t) - \underbrace{\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x}) - \mathbf{z}_1}_{-\tilde{\boldsymbol{\alpha}}(\mathbf{x})} \right] \quad (13)$$

Így az $\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x})$ helyett $\tilde{\boldsymbol{\alpha}}(\mathbf{x})$ visszacsatoló tagot használva olyan linearizáció kapható, amely minden esetben megfigyelhető rendszert ad, hiszen belátható, hogy az új állapotmátrix bármilyen kimeneti mátrixszal teljes rangú megfigyelhetőségi mátrixot ad. A kidolgozott módszer felépítését a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra. A megfigyelhetőséget biztosító visszacsatolásos linearizált rendszer felépítése

3.2. Állandómágneses szinkrongép érzékelőmentes szabályozása a kidolgozott megfigyelési módszerre alapozva

Egy nemlineáris karakterisztikával rendelkező állandómágneses szinkrongép (PMSM) hajtás (6)-nak megfelelő alakra hozva

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q(t) \\ \Omega(t) \\ \alpha_{mech}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} i_q(t) - Li_d P \Omega(t) - \psi_p P \Omega(t) \\ \frac{K_t}{J} i_q(t) - \frac{B}{J} \Omega(t) \\ \Omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_q(t) \quad (14)$$

modell adódik, ahol i_q és u_q a forgórészhez rögzített koordinátarendszerben felírt q irányú áram- és feszültségkomponens, Ω a hajtás mechanikai szögsebessége, α_{mech} a szögelfordulása. R és L jelöli az állórész ellenállását és inuktivitását, P a póluspárok számát, ψ_p a pólusfluxus, K_t a nyomatékkonstans, B a viszkózus csillapítási tényező, J a forgórész tehetetlenségi nyomatéka.

Az így kapott nemlineáris modellre alkalmazható az előzőekben bemutatott visszacsatolás. Így

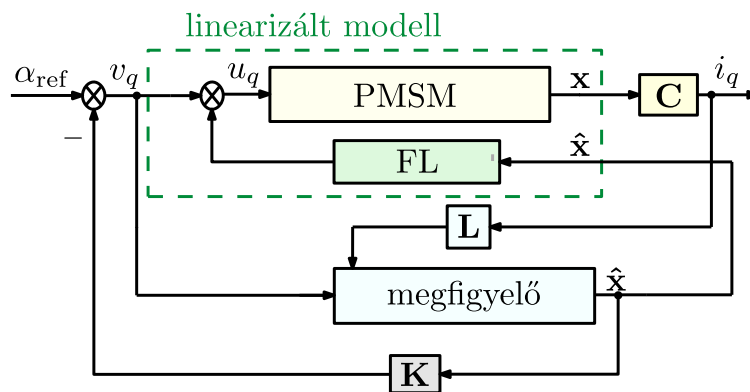
$$u_q(t) = \frac{JL}{K_t} v(t) + \tilde{\alpha}(x) \quad (15)$$

bemenet választással élve

$$\frac{d}{dt} z(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v(t) \quad (16)$$

linearizált rendszer kapható. A kapott linearizált állapotter modell alapján egyszerű Luenberger megfigyelő tervezhető, a (5) egyenletnek megfelelően. Az állapotmegfigyelőhöz szükséges L mátrix, az elérni kívánt dinamikai tulajdonságoknak megfelelően Ackermann-formula alkalmazásával került beállításra. Az egyenáramú géphez hasonlóan, a digitális megvalósítást figyelembe véve, a megfigyelőhöz zérus pólusok kerültek megválasztásra.

A visszacsatolásos linearizáció alapú megfigyelő működése az 5. ábrán látható felépítésnek megfelelően, szimulációkkal került igazolásra. A szimuláció során a becsült jel a PMSM hajtás pozíciószabályozásának visszacsatolását adta. A szimulált hajtás paramétereit a 2. táblázat foglalja össze.



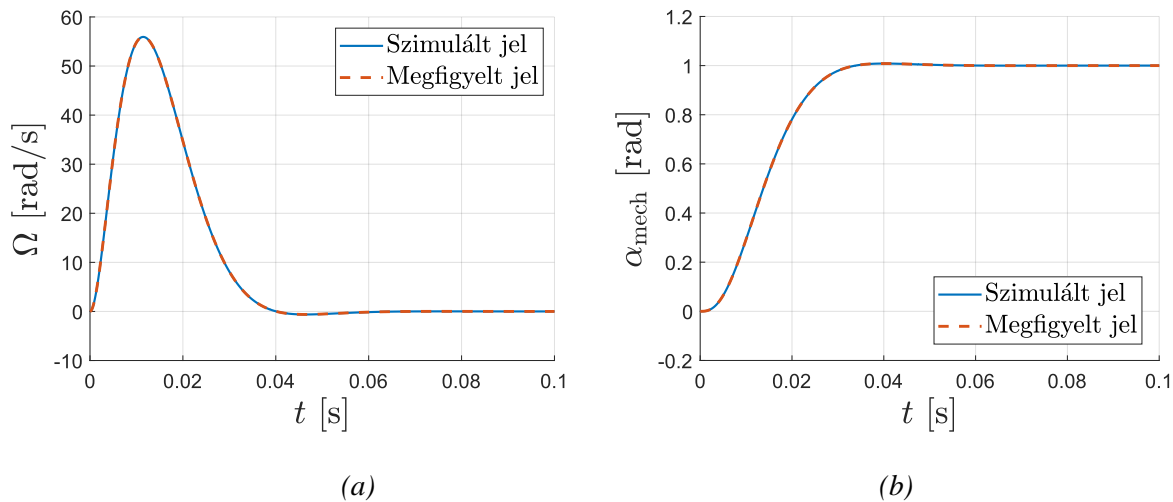
5. ábra. A megfigyelhetőséget biztosító visszacsatolással linearizált rendszer felépítése

A vizsgált 10 pólusú PMSM hajtás paramétereit

2. táblázat

Villamos paraméterek		Mechanikai paraméterek	
R	0,285 Ω	K_t	0,059 Nm/A
L	0,32 mH	J	$1,77 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$
ψ_p	0,0079 Wb	B	$5 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}$

A szimulációs vizsgálat eredményeit a 6. ábra szemlélteti. Látható, hogy mind a megfigyelő által adott szögsebesség-, mind a szögelfordulásjel nagy pontossággal képes volt becsülni a szimuláció során kialakuló jeleket. A megfigyelés a teljes mérési tartományon sikeresnek bizonyult. Ezzel a kidolgozott eljárás, a PMSM hajtások esetén elterjedten alkalmazott indukált feszültség alapú eljárásokkal ellentétben, már a motor indításától kezdve használható a rendszer állapotainak becslésére. Mivel az állapotmegfigyelő a teljes szögsebességtartományon képes volt kielégítően becsülni a hajtás szögsebesség és -pozíció jelét, önmagában is alapozható rá szenzormentes szabályozás, így az indításhoz szükséges kiegészítő becsülő alkalmazása szükségtelenné válik.



6. ábra. A visszacsatolásos linearizációra alapozott megfigyelő beállása, és az erre alapozott pozíciószabályozás

4. KONKLÚZIÓ

Az előzőekben bemutatásra került, hogy visszacsatolásos linearizációs módszer módosításával egy olyan eljárás kapható, amely alkalmas egy nemlineáris rendszer linearizálására úgy, hogy erre építve akár lineáris Luenberger megfigyelő is tervezhető a rendszerhez. A kidolgozott módszerre önállóan is alapozható érzékelőmentes szabályozás, ellentétben az elterjedten alkalmazott indukált feszültség alapú módszerekkel, melyek a hajtás indításakor nem használhatók.

A PMSM hajtáson a visszacsatolásos linearizációs módszert alkalmazva egy olyan egzakt lineáris modell kapható, amelyre a kefék egyenáramú gép esetén alkalmazott Luenberger megfigyelő tervezhető, szisztematikus tervezési lépések segítségével. Az így kapott állapotmegfigyelő beállási tulajdonságai szimulációk útján kerültek bemutatásra, amely igazolta, hogy a javasolt módszer alkalmas szenzormentes szabályozásban történő alkalmazásra, így kiváló alternatívája lehet a jellemzően használt eljárásoknak.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Mohan H.; Pathak M. K.; Dwivedi S. K. *Sensorless Control of Electric Drives – A Technological Review*. IETE Technical Review 37.5, 2020, 504–528.
- [2] Teymoori, V.; Kamper, M.; Wang, R.-J.; Kennel, R. *Sensorless Control of Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines—A Review*. Energies 2023., 16, 1326.
- [3] Stănică, D. M., Bizon, N., Arva M. C., *A brief review of sensorless AC motors control*, 2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Pitești, Romania, 2021, pp. 1-7,
- [4] Debabrata P. *Full Order Observer Controller Design for DC Motor Based on State Space Approach* International Journal of Science and Research, 2016
- [5] Madhavan Pillai, Branesh, Suthakorn, Jackrit. *Motion control applications: observer based DC motor parameters estimation for novices*. International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 2019. pp195-210.
- [6] Cervone, A., Dordevic, O., Brando, G. *General Approach for Modeling and Control of Multiphase PMSM Drives*. IEEE Transactions on Power Electronics. 2021 PP. 1-1. 10.1109/TPEL.2021.3063791.
- [7] Krener, A. *Feedback Linearization of Nonlinear Systems*. 2013. 10.1007/978-1-4471-5102-9_81-1.
- [8] Isidori, A., Persis, C. *Feedback Linearization of Nonlinear Systems*. 2010. 10.1201/b10384-55.