

ÁLLANDÓMÁGNESES SZINKRONGÉPEK VISSZACSATOLÁSOS LINEARIZÁCIÓ ALAPÚ ÉRZÉKELŐMENTES SZABÁLYOZÁSA

Bertók Zsanett

*Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem, MSc hallgató, bertok.zsanett@mogi.bme.hu*

Stumpf Péter

*Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék, Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem, egyetemi docens, stumpf.peter@aut.bme.hu*

Budai Csaba

*Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem, adjunktus, budai@mogi.bme.hu*

Absztrakt

A technológiai fejlődésnek köszönhetően egyre gyakrabban alkalmaznak érzékelőmentes szabályozási technikákat villamos gépek irányításához. Ezen módszerek elterjedésének következményeként már nem feltétlenül szükséges a hajtást fordulatszám vagy szög helyzetérzékelővel ellátni, hanem elegendő a motorra kiadott feszültség és a rajta mért áramerősségek felhasználásával becsülni a szükséges fizikai mennyiségeket, ezáltal jelentős költségcsökkentés érhető el.

A villamos hajtásokra alkalmazott megfigyelési eljárásokban közös, hogy jellemzően az indukált feszültség becslése alapján állítják elő a motor forgórészének szögsebességét és pozícióját. Ez azonban alacsony fordulatszám tartományon korlátozottan használható, mivel ezen a tartományon az indukált feszültség alacsony jel-zaj viszonytal rendelkezik. Ezért jellemzően az érzékelő nélküli szabályozások indításához alternatív módszert alkalmaznak (például nagyfrekvenciás jelinjektálást), majd abban az esetben, amikor a hajtás elérte azt a meghatározott minimális fordulatszámot, amelyen már megbízható az állapotmegfigyelő működése, a megfigyelő által szolgáltatott jelek felhasználhatóvá válnak a szabályozáshoz. Jelen tanulmányban bemutatásra kerül egy olyan új, visszacsatolással történő linearizáción alapuló megfigyelési módszer, amely lehetővé teszi a nemlineáris karakterisztikával bíró villamos gépek, például állandómágneses szinkrongép állapotainak becslését a teljes mérési tartományon.

Visszacsatolós linearizáció alkalmazásával egy nemlineáris rendszerből egy egzakt, lineáris modell állítható elő, melyre különböző lineáris állapotmegfigyelési technikák is alkalmazhatóvá válnak, így a Luenberger-féle állapotmegfigyelő is. Mivel a módszer a vizsgálat szempontjából egy közelítésektől mentes, lineáris modellt eredményez, így az erre alapozott állapotmegfigyelő már az egzakt modellel dolgozik, ezáltal közvetlenül képes becsülni a hajtás szögsebességét és szögelfordulását egyaránt. Így a kidolgozott módszer már alacsony szögsebességtartományon is kellően pontos becslést ad a hajtás állapotairól, ezáltal kialakítható egy érzékelőmentes szabályozás, további kiegészítő eljárások alkalmazása nélkül. Ezen túlmenően az alkalmazott lineáris megfigyelő megvalósítása kis számítási igénnyel rendelkezik. A kidolgozott módszer villamos gépekre való alkalmazhatósága szimulációk útján kerül igazolásra, egy állandómágneses szinkrongép mozgásszabályozásának megvalósításán keresztül.

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

1. Bevezetés

Egy rendszer szabályozása során elengedhetetlen megadott időpillanatokban ismerni annak bizonyos fizikai jellemzőit, állapotait, azonban valós rendszerek esetében gyakran nem mérhető közvetlenül az összes, a szabályozás szempontjából lényeges jellemző. Állapotmegfigyelő alkalmazásával ezekre az ismeretlen állapotokra is adható becslés a rendszer mérhető állapotai, vagyis kimenő jelei alapján. Megfelelően gyors beállású, stabil megfigyelő alkalmazása esetén a rendszer összes állapota folyamatosan rendelkezésre áll, így ezek felhasználhatók zárt hurkú szabályozás során.

Villamos hajtások mozgásszabályozása során általában nélkülözhetetlen a felhasznált motor aktuális fázisáramait, szöghelyzetét, valamint szögsebességét minél pontosabban ismerni. Ez utóbbiak gyakran kevésbé pontosan, kisebb mintavételi frekvenciával mérhetők a hajtás villamos jeleihez képest, ezért becslésükre érzékelő nélküli szabályozási módszerek terjedtek el. Ezek alkalmazása esetén nincs szükség szögelfordulás érzékelőre, így csökkennek a megvalósítási költségek. Ezen érzékelőmentes módszerek általában valamilyen megfigyelő alapú megoldást használnak, amelyek a rendelkezésre álló, mért mennyiségekből, mint a gerjesztő feszültség vagy a fázisáramok, állítják elő a szabályozás számára a pozíció-, valamint szögsebességinformációt.

A szenzormentes hajtások elterjedéséhez elengedhetetlen volt a modell alapú állapotmegfigyelő módszerek fejlődése. A Luenberger által kidolgozott lineáris rendszerekre alkalmazható állapotmegfigyelőre [1], [2] alapozva megjelentek ennek nemlineáris rendszerekre is alkalmazható változatai [3][4], melyek lehetővé teszik a bonyolultabb struktúrával rendelkező rendszerek állapotainak becslését is. A napjainkban rendelkezésre álló, modern állapotmegfigyelő alapú technikák olyan módszereket alkalmaznak állapotbecslésre, mint a Kálmán-szűrő [5], a csúszómód alapú megfigyelő [6], vagy a széles körben elterjedt terhelésbecslők [7].

A nemlineáris villamos gépek, például állandómágneses szinkrongépek (PMSM) esetén jellemzően indukált feszültség alapú állapotmegfigyelést alkalmaznak az érzékelőmentes szabályozás alapjául. Ezek a módszerek azonban nem használhatók a motor indításakor, mivel alacsony szögsebességtartományon az indukált feszültség jel-zaj aránya alacsony, így indításkor általában kiegészítő becselőket, például nagyfrekvenciás jelinjektálást [8] alkalmaznak.

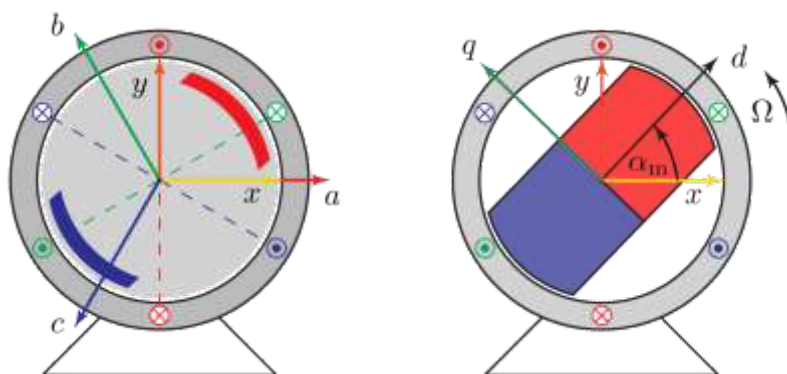
Jelen kutatás célja, hogy egy olyan új megfigyelési módszert mutasson be, amely kis sebességeken is képes megbízhatóan megadni a hajtás szögelfordulását és -sebességét. A kidolgozott eljárás így képes a teljes üzemi tartományon során használható jeleket biztosítani, ezért ennek alkalmazásával elkerülhetővé válik az egyes megfigyelési technikák közötti váltás a szabályozás során. A bemutatott módszer az egyre népszerűbb visszacsatolással történő linearizáción alapszik [9], amely a nemlineáris rendszerből egy közelítésektől teljesen mentes, lineáris modellt képes előállítani. Ez a linearizáció lehetővé teszi, hogy PMSM hajtások esetén is alkalmazhatóvá váljanak a lineáris megfigyelési módszerek, így például egy egyszerű Luenberger állapotmegfigyelővel is becsülhetővé válnak a hajtás jelei.

A következőkben először a PMSM hajtások modellezése kerül bemutatásra, amelyre építve levezethető a rendszer visszacsatolással linearizált modellje. Az ezzel kapott egzakt, lineáris modell alapján megtervezzük a Luenberger állapotmegfigyelőt, amely alkalmas a hajtás állapotainak becslésére, valamint egy állapotvisszacsatolással történő pozíciószabályozást. Végül a kidolgozott módszert és hangolási lehetőségeit szimulációkkal vizsgáljuk, majd az erre

alapozott érzékelőmentes szabályozás szimulációja segítségével igazoljuk a javasolt eljárás alkalmazhatóságát.

2. A vizsgált rendszer modellje

Az állandómágneses szinkrongépek esetén a forgórészben találhatók az állandómágnesek. A mágnesek által létrehozott tér kölcsönhatásba lép az állórész háromfázisú tekercselése által gerjesztett forgó mágneses mezővel. A rotor pólusai együtt mozognak a mágneses térrel, így a forgórész mechanikai szögsebessége és a mágneses tér forgási sebessége közötti kapcsolatot az $\omega = P \Omega$ egyenlet írja le, ahol ω a motor villamos, Ω a mechanikai szögsebessége, valamint P a motor póluspárjainak száma. A gép mozgásának leírásához szükséges állórészhez rögzített x - y illetve forgórészhez rögzített d - q koordinátarendszereket az 1. ábra szemlélteti. A koordinátarendszerek közötti áttérés Clarke és Park koordinátatranszformációk segítségével végezhető el.



1. ábra: A PMSM mozgását leíró koordinátarendszerek

A szimmetrikus forgórészrel rendelkező állandómágneses szinkron gépek villamos egyenletei a forgórészhez rögzített d - q koordinátarendszerben a következőképp írhatók fel [10].

$$\begin{aligned} u_d &= R i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q, \\ u_q &= R i_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega (L i_d + \psi_p), \end{aligned} \quad (1)$$

ahol u_{dq} és i_{dq} jelölik a d - q koordinátarendszerben felírt feszültség- és áramkomponenseket, ω a villamos szögsebesség. Az i_q áramkomponens hozza létre a motor elektromechanikai nyomatékát, amely

$$M = \frac{3}{2} P \psi_p i_q = K_t i_q \quad (2)$$

alakban adható meg szimmetrikus forgórészű motor esetén. A q irányú áramkomponens és a villamos nyomaték közti kapcsolatot a K_t nyomatékkonstans írja le. A hajtás mozgásegyenlete, amennyiben az esetleges zavarásként ható terhelőnyomatékot elhanyagoljuk,

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M - b \Omega = K_t i_q - b \Omega, \quad (3)$$

ahol J a forgórész tehetetlenségi nyomatéka, b a viszkózus csillapítási tényezője. Felhasználva a hajtás villamos és mechanikai szögsebességére vonatkozó összefüggést,

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{K_t P}{J} i_q - \frac{b}{J} \omega \quad (4)$$

egyenlet kapható a villamos szögsebesség változására nézve.

3. Visszacsatolással történő linearizáció tervezése

A vizsgált rendszer nemlineáris állapotter modellje alapján tervezhető visszacsatolós linearizáció, amelynek alapját a [11] és [12] irodalmak adják.

Villamos gépek érzékelőmentes szabályozásakor a motor villamos és mechanikai szögsebességét, valamint a motor szöghelyzetét az áramkomponensek mérése, valamint a kiadott feszültségkomponensek alapján állítják elő. A (2) és (3) egyenletek alapján a villamos nyomaték független a d irányú komponens értékétől, amelyet emellett normál üzemi tartományban nullára szabályozunk. Így ez nincs hatással sem a hajtás szögsebességére, sem szöghelyzetére, ezért nem tekintjük állapotváltozónak [13]. Ennek megfelelően a szükséges állapotok az i_q áramkomponens, az ω villamos szögsebesség, és az α szöghelyzet.

Az állapotegyenlet az (1) és (3) egyenletek alapján

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega \\ \alpha \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R}{L} i_q - i_d \omega - \frac{\psi_p}{L} \omega \\ \frac{PK_t}{J} i_q - \frac{b}{J} \omega \\ \omega \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}(\mathbf{x})} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{g}(\mathbf{x})} u_q \quad (5)$$

formában írható fel, ahol u_q a rendszer bemenete. Látható, hogy a kapott modellben például $i_d \omega$ nemlineáris tag szerepel, ezért ahhoz, hogy statikus paraméterekkel rendelkező állapotmegfigyelőt tervezhessünk a rendszerhez, linearizációra van szükség.

A visszacsatolással történő linearizáció csak abban az esetben hajtható végre, ha a vizsgált rendszer ún. relatív fokszáma megegyezik az állapotok számával [11]. Ez a feltétel kizárólag $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \alpha$ választással teljesül, így a kimeneti egyenlet

$$y = \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \alpha. \quad (6)$$

A nemlineáris állapotter modellben $\mathbf{f}$, $\mathbf{g}$ és $\mathbf{h}$ $\mathbf{x}$ tetszőlegesen sokszor deriválható, sima függvényei. A linearizációhoz szükséges állapottranszformációt [14] alapján elvégezve, az új állapotvektor az alábbi

$$\mathbf{z} := \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}(\mathbf{x}) \\ L_f \mathbf{h}(\mathbf{x}) \\ L_f^2 \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \omega \\ \frac{PK_t}{J} i_q - \frac{b}{J} \omega \end{bmatrix}, \quad (7)$$

ahol $L_f \mathbf{h}(\mathbf{x})$ a $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ függvény Lie-deriváltja $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ vektormező mentén. A transzformációval, a modell az alábbi alakra hozható

$$\frac{d\mathbf{z}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}v, \quad (8)$$

ahol

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ és } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

valamint

$$v = \underbrace{\frac{PK_t}{JL}}_{\gamma} \left[\underbrace{u_q - Ri_q - Li_d \omega - \psi_p \omega - \frac{bL}{J} i_q + \frac{b^2 L}{PJ K_t} \omega}_{\beta(\mathbf{x})} \right]. \quad (10)$$

4. A linearizált rendszer megfigyelhetőségének vizsgálata

A kapott lineáris rendszerhez tervezhető akár a legegyszerűbb, lineáris Luenberger állapotmegfigyelő is [15].

Állapotmegfigyelés során a vizsgált rendszer kimenete mérhető mennyiség, így az eredetileg feltételezett α szögelfordulás helyett az i_q áramkomponens adja a rendszer kimenetét, amely alapján a megfigyelés történik. A transzformált állapotterben ez a

$$\mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad 0] \mathbf{T}^{-1}(\mathbf{z}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{b}{PK_t} & \frac{J}{PK_t} \end{bmatrix} \quad (11)$$

kimeneti mátrix segítségével adható meg.

A linearizált rendszer állapot- és kimeneti mátrixainak ismeretében vizsgálható a rendszer megfigyelhetősége. A megfigyelhetőségi mátrix alapján

$$\mathbf{M}_o = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{PK_t} \begin{bmatrix} 0 & b & J \\ 0 & 0 & b \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

vagyis a visszacsatolásos linearizációval kapott rendszer nem megfigyelhető. Ennek kiküszöbölésére a visszacsatolásos linearizációs módszernek egy új, módosított változata adható meg, amely biztosítja a rendszer megfigyelhetőségét. Ehhez a (10) összefüggés módosítása a következőképp tehető meg.

$$\frac{d\mathbf{z}}{dt} = \mathbf{A}_m \mathbf{z} + \mathbf{B}v, \quad (13)$$

ahol

$$\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

valamint

$$v = \gamma \left[u_q - \underbrace{\beta(x) - \gamma^{-1}\alpha}_{\tilde{\beta}(x)} \right]. \quad (15)$$

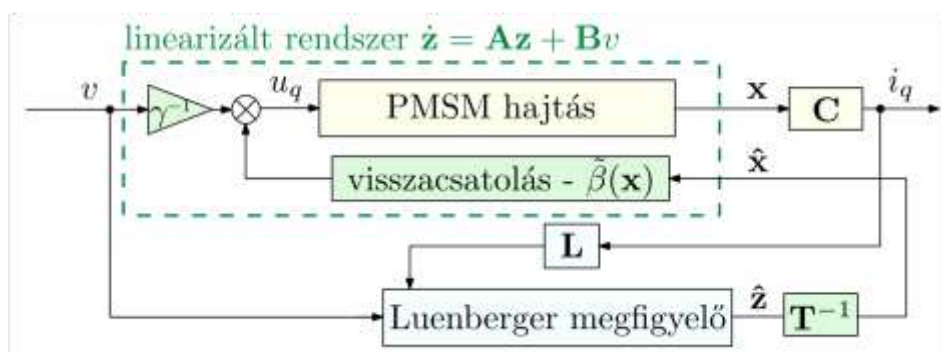
Az új állapotmátrix segítségével kapott megfigyelhetőségi mátrix

$$\mathbf{M}_{o,m} = \frac{1}{PK_t} \begin{bmatrix} 0 & b & J \\ J & 0 & b \\ b & J & 0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

vagyis a módosított visszacsatolással linearizált rendszer megfigyelhető, így erre tervezhető lineáris megfigyelő.

5. Luenberger megfigyelő és az erre alapozott szabályozás tervezése a módosított linearizációval kapott rendszer számára

A visszacsatolásos linearizációra alapozott állapotmegfigyelő elvi felépítése a 2. ábrán látható.



2. ábra: Visszacsatolásos linearizációra alapozott állapotmegfigyelő elvi felépítése

A Luenberger megfigyelő állapotegyenlete [1]

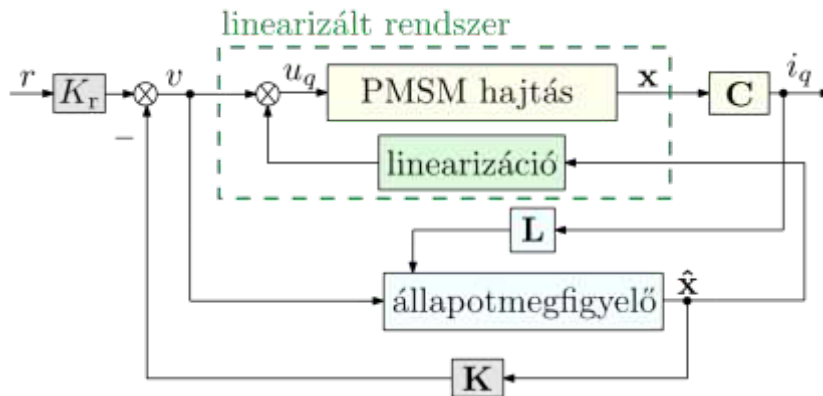
$$\dot{\hat{\mathbf{z}}} = (\mathbf{A}_m - \mathbf{L}\mathbf{C})\hat{\mathbf{z}} + \mathbf{B}v + \mathbf{L}y, \quad (17)$$

ahol az $\mathbf{L}$ mátrix az Ackermann-formula segítségével [16] az alábbi összefüggés szerint határozható meg

$$\mathbf{L} = \phi_o(\mathbf{A}_m)\mathbf{M}_{o,m}^{-1}\mathbf{e}_n, \quad (18)$$

ahol ϕ_o a kívánt pólusokból képzett karakterisztikus polinom $\mathbf{A}_m$ függvényeként, míg $\mathbf{e}_n$ az n -edik egységvektort jelöli. Így az elvárt dinamika, és az ehhez tartozó pólusok definiálása után a szükséges visszacsatoló mátrix meghatározható.

A linearizációval kapott rendszerhez állapotvisszacsatolásos szabályozás tervezhető. Az így kapott érzékelőmentes szabályozás felépítését az 3. ábra illusztrálja.



3. ábra: A javasolt megfigyelőre alapozott állapotvisszacsatolásos szabályozás elvi felépítése

Ehhez a linearizált rendszer bemenete

$$v = K_r r - \mathbf{K} \mathbf{z} \quad (19)$$

formában adható meg [16], ahol r jelöli a referenciajelet, $\mathbf{K}$ az állapotokat visszacsatoló szabályozó tag, K_r a statikus alapjelkompenzációhoz alkalmazott erősítés. Az erősítés

$$K_r = -[\mathbf{C}(\mathbf{A}_m - \mathbf{B}\mathbf{K})^{-1}\mathbf{B}]^{-1} \quad (20)$$

összefüggés szerint számítható. A $\mathbf{K}$ visszacsatolás az elérni kívánt szabályozó dinamika függvényében, szintén az Ackermann-formula segítségével

$$\mathbf{K} = \mathbf{e}_n^T \mathbf{M}_{c,m}^{-1} \phi_c(\mathbf{A}_m) \quad (21)$$

ahol $\mathbf{M}_{c,m}$ a linearizált rendszer irányíthatósági mátrixa, és ϕ_c adja meg a szabályozott rendszer pólusait tartalmazó karakterisztikus polinomot $\mathbf{A}_m$ függvényében. Fontos megjegyezni, hogy a szabályozási kör dinamikájának hangolásakor az állapotmegfigyelő pólusainál kisebb valós értékkel rendelkező pólusok megválasztása szükséges. Ezzel biztosítható, hogy a megfigyelő gyorsabb működésű legyen a szabályozónál, így megvalósítható legyen a megfigyelőre alapozott szabályozás.

6. Eredmények

A javasolt állapotmegfigyelési módszer alkalmazhatósága szimulációk segítségével került igazolásra. Először a megfigyelő hangolásának lehetőségei kerülnek bemutatásra. Ebben az esetben a szabályozó kör számára szükséges szögsebesség és pozíció jeleket a szimulált PMSM modell szolgáltatja. A megfelelő pólusok meghatározása után vizsgálható a megfigyelő alkalmazhatósága érzékelőmentes szabályozás esetén.

6.1 Az állapotmegfigyelő hangolásának vizsgálata

A szimuláció felépítése a 3. ábrával összhangban MATLAB Simulink környezetben került kialakításra. A szimulációk során az i_d áramkomponens nullára van szabályozva egy PI szabályozó segítségével. A vizsgált PMSM hajtás paramétereit az 1. táblázat foglalja össze.

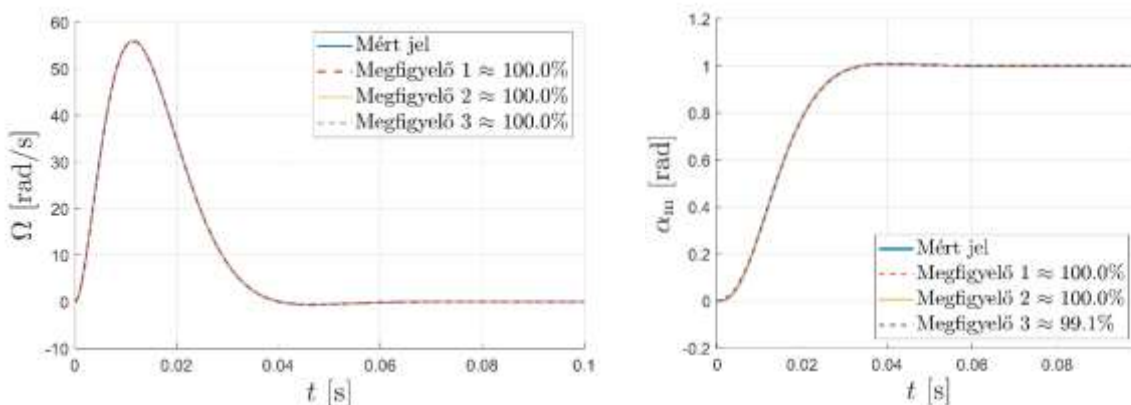
1. táblázat: A vizsgált PMSM hajtás paramétereit

	Érték	Mértékegység
Póluspárok száma (P)	5	-
Névleges feszültség (U_n)	24	V
Ellenállás (R)	0,285	Ω
Induktivitás (L)	$0,32 \cdot 10^{-3}$	H
Pólusfluxus (ψ_p)	0,0079	Wb
Tehetetlenségi nyomaték (J)	$1,7 \cdot 10^{-5}$	kgm ²
Viszkózus csillapítási tényező (b)	$5 \cdot 10^{-5}$	Ns/m

Az állapotvisszacsatolás alapú szabályozással a villamos gép pozíciószabályozását valósítottuk meg. A különböző módon hangolt megfigyelők beállítását egységugrás referencia segítségével vizsgáltuk meg. Az eredményeket a 4. ábra szemlélteti. Az egyes Luenberger megfigyelők pólusai minden esetben a szabályozási kör pólusainál gyorsabbra, azoknak rendre 10-, 100- és 1000-szeresére lettek választva. A szimulációk során használt pólusokat a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A szimulációk során beállított pólusok a szabályozó kör és az egyes megfigyelők esetén

	$p_{1,2}$	p_3
Szabályozó kör	$-130,4 \pm 105,18$	-195,60
Megfigyelő 1	-1304	-1956
Megfigyelő 2	-13040	-19560
Megfigyelő 3	-130400	-195600



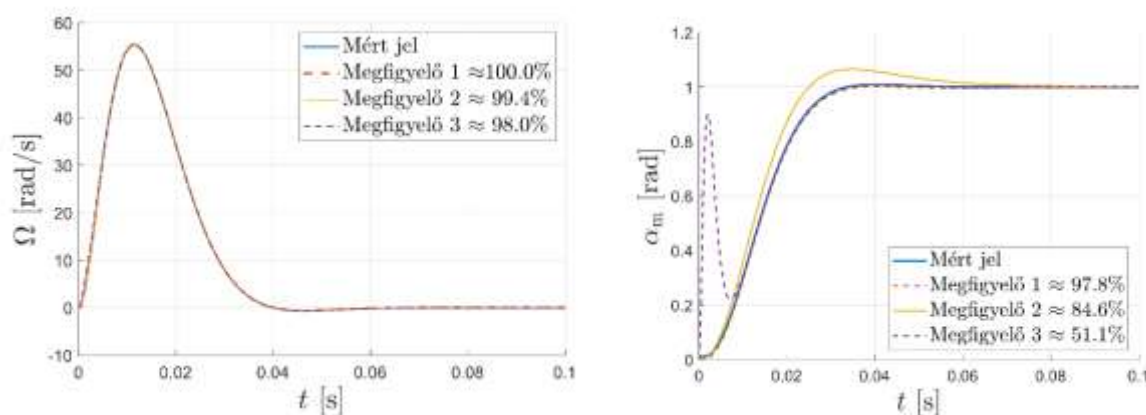
4. ábra: A hajtás és az állapotmegfigyelők által becsült jelek összehasonlítása

Látható, hogy a megfigyelők minden esetben sikeresen követték a szimulált hajtás jeleit a teljes szögsebességtartományon. A hajtás és a megfigyelők jelei közötti illeszkedés normalizált átlagos négyzetes eltérés (NRMSE - normalized root mean squared error) alapján a

$$(1 - \text{NRMSE}) \cdot 100\% \quad (22)$$

összefüggéssel került meghatározásra.

A szimuláció során mind a PMSM modell, mind a megfigyelők nulla pozíció és szögsebesség értékről indultak, azonban fontos megemlíteni, hogy bár a nulla kezdősebesség egy valós mérés során is feltételezhető, a kezdeti pozíció változhat. Ennek kiküszöbölésére jellemzően indítás előtt egy meghatározott háromfázisú feszültséget adnak a motorra, azaz beforgatják egy azonos pozícióba. Természetesen így is előfordulhat, hogy a kezdeti pozíciók között van egy kis eltérés, például száraz súrlódás jelenlétéből adódóan. Ennek modellezésére a szimulációk olyan esetre is elvégezhetők, amikor a kezdeti pozíció kis mértékben különbözik a megfigyelők indítási értékétől. Ezen szimulációk eredményeit mutatja az 5. ábra.

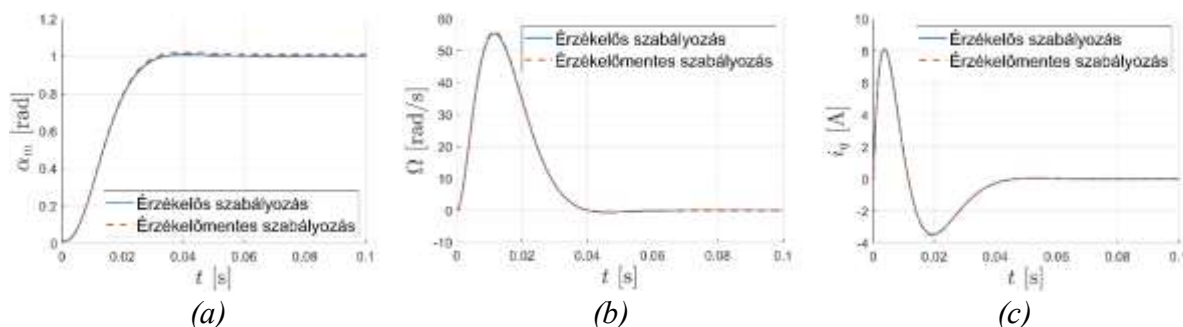


5. ábra: A hajtás és az állapotmegfigyelők által becsült jelek összehasonlítása kis kezdeti pozíció eltérés esetén

Megállapítható, hogy a szögsebesség megfigyelése ebben az esetben is pontosnak mondható, azonban a becsült szögelfordulás jelek jelentős hibával terheltek. Ez a hiba ronthatja a megfigyelőre alapozott szabályozó kör stabilitását, például az ábrán lilával jelölt esetben, ezért érdemes kisebb értékű pólusokat választani a javasolt állapotmegfigyelő számára. Ennek határt szabnak a szabályozó kör pólusai, mivel a megfigyelőnek mindig gyorsabb beállásúnak kell lennie. Az ajánlások [16] szerint a pólusok közötti különbség legalább tízszeres kell legyen, így az ábrákon pirossal jelölt hangolás kielégítőnek mondható.

6.2 A javasolt megfigyelési módszerre alapozott érzékelőmentes szabályozás vizsgálata

Az előzőekben kidolgozott megfigyelési módszerre alapozott szabályozást szimulációk segítségével vizsgáltuk. A kapott érzékelőmentes szabályozás áramerősség, szögsebesség és pozíció jeleit, valamint ezek összehasonlítását az eredeti, a szimulált hajtás jeleire alapozott szabályozással szemlélteti a 6. ábra.



6. ábra: A megfigyelőre és a szimulált hajtás jeleire alapozott szabályozás összehasonlítása

Megállapítható, hogy a javasolt megfigyelőre alapozott pozíciószabályozás sikeresnek bizonyult, a megfigyelési folyamat nem befolyásolta jelentősen a szabályozó kör dinamikai tulajdonságait. Emellett, a kidolgozott állapotmegfigyelési módszer a teljes mérési tartományon kielégítően becsülte a hajtás szögsebességét és pozícióját.

7. Konklúzió

Az előzőekben bemutatásra került egy olyan új állapotmegfigyelési módszer, amely az elterjedten használt megfigyelési módszerekkel ellentétben alkalmas az állandómágneses szinkrongépes hajtások állapotainak teljes szögsebességtartományon történő becslésére. A javasolt folyamat a PMSM hajtás visszacsatolással történő linearizációján alapszik, amely képes a rendszer egy közelítésektől mentes linearizációját előállítani. Ezzel az így kapott lineáris rendszerre alkalmazhatóvá válnak a lineáris megfigyelési és irányítási módszerek, melyek szisztematikus lépésekben, például Ackermann-formulával tervezhetők.

A kidolgozott módszer alkalmassága PMSM hajtás állapotainak megfigyelésére szimulációkkal került igazolásra, valamint hangolási lehetőségei is bemutatásra kerültek. Szimulációk segítségével megmutattuk, hogy a javasolt eljárásra alapozva valóban megvalósítható érzékelőmentes szabályozás. Az így kapott megfigyelőre alapozott pozíciószabályozás stabilnak bizonyult, és a dinamikája sem módosult jelentősen a hajtás szimulált jeleire alapozott szabályozáshoz képest. Így összefoglalásképp elmondható, hogy a módszer nem igényli indításkor kiegészítő becselő alkalmazását, a teljes mérési tartományon sikeresen becsli a hajtás szögsebességét és pozícióját, ezzel alternatívát kínál az elterjedten használt módszerekre.

Köszönetnyilvánítás

Jelen kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-2-I-BME-168 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Irodalomjegyzék

- [1] D. Luenberger. An introduction to observers. IEEE Transactions on Automatic Control, 16 (6):596–602, 1971. doi:10.1109/TAC.1971.1099826.
- [2] David G. Luenberger. Observing the state of a linear system. IEEE Transactions on Military Electronics, 8(2):74–80, 1964. doi:10.1109/TME.1964.4323124.
- [3] M. Zeitz. The extended luenberger observer for nonlinear systems. Systems & Control Letters, 9(2):149–156, 1987. doi:https://doi.org/10.1016/0167-6911(87)90021-1.

- [4] Edgar Ergueta, Robert Seifried, Roberto Horowitz, and Masayoshi Tomizuka. Extended luenberger observer for a mimo nonlinear nonholonomic system. IFAC Proceedings Volumes, 41:9260–9265, 2008. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:7712752>.
- [5] A. Radke and Zhiqiang Gao. A survey of state and disturbance observers for practitioners. In 2006 American Control Conference, pages 6 pp., 2006. doi:10.1109/ACC.2006.1657545.
- [6] Cai-Xue Chen, Yun-Xiang Xie, and Yong-Hong Lan. Backstepping control of speed sensorless permanent magnet synchronous motor based on slide model observer. International Journal of Automation and Computing, 12:149–155, 04 2015. doi:10.1007/s11633-015-0881-2.
- [7] Wen-Hua Chen, Jun Yang, Lei Guo, and Shihua Li. Disturbance-observer-based control and related methods—an overview. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 63(2): 1083–1095, 2016. doi:10.1109/TIE.2015.2478397.
- [8] Jyoti Agrawal and Sanjay Bodkhe. Low speed sensorless control of pmsm drive using high frequency signal injection. In 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), pages 1–6, 2015. doi:10.1109/INDICON.2015.7443383.
- [9] A. Isidori. Nonlinear Control Systems. Communications and Control Engineering. Springer London, 1995. ISBN 9783540199168. URL https://books.google.hu/books?id=fPGzHK_pto4C.
- [10] Andrea Cervone, Obrad Dordevic, and Gianluca Brando. General approach for modeling and control of multiphase pmsm drives. IEEE Transactions on Power Electronics, 36(9): 10490–10503, 2021. doi:10.1109/TPEL.2021.3063791.
- [11] José de Jesús Rubio. Robust feedback linearization for nonlinear processes control. ISA Transactions, 74:155–164, 2018. doi:<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.01.017>.
- [12] Yuanqing Wu, Alberto Isidori, Renquan Lu, and Hassan K. Khalil. Performance recovery of dynamic feedback-linearization methods for multivariable nonlinear systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 65(4):1365–1380, 2020. doi:10.1109/TAC.2019.2924176.
- [13] Joohn-Sheok Kim and Seung-Ki Sul. High performance pmsm drives without rotational position sensors using reduced order observer. In IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, volume 1, pages 75–82 vol.1, 1995. doi:10.1109/IAS.1995.530286.
- [14] B. Charlet, J. Lévine, and R. Marino. On dynamic feedback linearization. Systems & Control Letters, 13(2):143–151, 1989. doi:[https://doi.org/10.1016/0167-6911\(89\)90031-5](https://doi.org/10.1016/0167-6911(89)90031-5).
- [15] R.E. Kalman. Lectures on controllability and observability. In Controllability and Observability, pages 1–149. Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 9783642110634. doi:10.1007/978-3-642-11063-4_1.
- [16] Béla Lantos. Irányítási rendszerek elmélete és tervezése I. Akadémiai Kiadó, 2016. ISBN 978 963 05 9848 4. doi:10.1556/9789630598484. URL <https://mersz.hu/kiadvany/31>.

Lektorálta: Dr. Sütő Zoltán, egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék