

Horváth Krisztián

**Nemlineáris állapotbecslési módszerek
aszinkron gép szögsebesség-érzékelő nélküli
mezőorientált szabályozásához**

Doktori tézisek

Témavezetők:

Dr. Szénásy István
egyetemi docens

Széchenyi István Egyetem

Dr. Fodor Dénes
egyetemi docens

Széchenyi István Egyetem, Pannon Egyetem

Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése
Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola

Győr, 2022

1. Motiváció és célkitűzések

Napjainkban az ipari és szállítmányozási rendszerek alapvető részei a változtatható fordulatszámú villamos hajtások. Ezekben a hajtásokban gyakran alkalmaznak kalickás forgórészű aszinkron gépeket, mivel ezek a konstrukciók robusztus felépítésűek, megbízhatóak és zord üzemi körülmények között is működtethetők. Mindemellett kedvezőek az aszinkron gépek gyártási és üzemeltetési költségei.

A korszerű aszinkron gépes hajtások a szigorú minőségi követelmények teljesítése miatt általában szabályozottak. A hajtásszabályozási módszerek többségének alapvető fontosságú információ a forgórész szögsebessége, illetve szöghelyzete, amelyeket általában valamilyen mechanikus érzékelő szolgáltat. Azonban a forgó szenzorok alkalmazásának jól ismert hátrányai, hogy növelik a hajtás árát és méretét, többlet kábelezést tesznek szükségessé, csökkentik a zajimmunitást és a hajtás megbízhatóságát, hiszen az érzékelő és annak működtetéséhez szükséges további eszközök is meghibásodhatnak. A felsorolt hátrányok elkerülése érdekében célszerű forgó jeladó nélkül építeni a hajtásokat és a minőségi követelmények biztosításához szögsebesség-érzékelő nélküli hajtásszabályozási módszereket alkalmazni, amelyekben a szükséges szögsebesség-, vagy pozícióinformáció alternatív forrásból származik.

A szögsebesség-érzékelő nélküli módszerek két alapvető típusa a fundamentális modellen alapuló megközelítések és a gép anizotróp tulajdonságait kihasználó technikák. Utóbbiak többségében jelbefecskenedést alkalmaznak, amelynek köszönhetően precíz szabályozást tesznek lehetővé az alacsony fordulatszám-tartományban. Azonban jelentős hátrányuk, hogy csak megfelelő mértékű anizotrópiával rendelkező motorokkonstrukciók esetén alkalmazhatók. Ezzel szemben a fundamentális modellen alapuló módszerek nem igényelnek speciális kialakítást, így univerzálisan használhatóak. Mindemellett figyelembe kell venni, hogy ezek a becslők kedvezőtlenebbül teljesítenek az alacsony fordulatszám-tartományban és a becslés pontosságára jelentős hatással vannak a paraméterbizonytalanságok.

A fundamentális modellen alapuló technikák közül legnépszerűbbek a gép viselkedését determinisztikus jelek segítségével leíró becslési módszerek, hiszen ezek egyszerűek, könnyen hangolhatóak és alacsony számításigénnyel rendelkeznek. Ezzel szemben a sztochasztikus leírást alkalmazó állapotbecslők bonyolultabbak és számításigényesebbek, azonban a zajmodellek alkalmazása miatt általában kevésbé érzékenyek a paraméterbizonytalanságokra és jobb zajnyomást biztosítanak.

Dolgozatomban aszinkron gép szögsebesség-érzékelő nélküli mezőorientált szabályozásához (field oriented control, FOC) alkalmazható sztochasztikus állapotbecslők tervezésével, illetve azok szimulációs és tényleges fizikai környezetben történő vizsgálatával foglalkozom. Ehhez célul tűztem ki egy modellalapú környezet és egy kísérleti összeállítás megvalósítását.

Kutatómunkám további célkitűzése újszerű állapotbecslők kidolgozása és megvalósítása aszinkron gép szögsebesség-érzékelő nélküli mezőorientált szabályozásához. Mivel a becslőket alapvetően FOC struktúrához szánom, így ezek tervezéséhez olyan állapottermodell meghatározását tűztem ki célul, amely alkalmazásával egyrészt az elektromágneses viselkedést leíró állapotváltozók a mezőorientált szabályozás koordináta-rendszerében, vagyis a forgórészfluxus-térvektor koordináta-rendszerében állíthatók elő, másrészt megvalósítható a forgórész-szögsebesség és a terhelőnyomaték becslése is. Így a becslőt állapotváltozók közvetlenül, további számítások és transzformációk nélkül felhasználhatók mezőorientált szabályozáshoz. A becslők tervezéséhez javasolt nemlineáris modell megfigyelhetőségét is biztosítani kívánom, így szükséges a megfigyelhetőségi vizsgálat elvégzése és a megfigyelhetőség feltételének meghatározása. A nemlineáris rendszerleírás miatt a becslőalgoritmusoknak csak olyan fajtái alkalmazhatók, amelyek képesek kezelni a nemlinearitásokat, így munkám során a linearizáláson alapuló kiterjesztett Kalman-szűrőt (extended Kalman filter, EKF), valamint a numerikus integráláson alapuló unscented és cubature Kalman-szűrőket (unscented Kalman filter, UKF; cubature Kalman filter, CKF) alkalmaztam.

Figyelembe véve, hogy a szögsebesség-érzékelő nélküli állapotbecslők elsődleges célja a szögsebesség-információ előállításának közvetlen mérés nélkül, így az általam javasolt állapotbecslőket szögsebességbecslési pontosság, paraméterérzékenység és számításigény tekintetében összehasonlítottam a széleskörűen alkalmazott modellreferenciás adaptív megfigyelővel, az adaptív Luenberger-megfigyelővel és a csúszómód megfigyelővel.

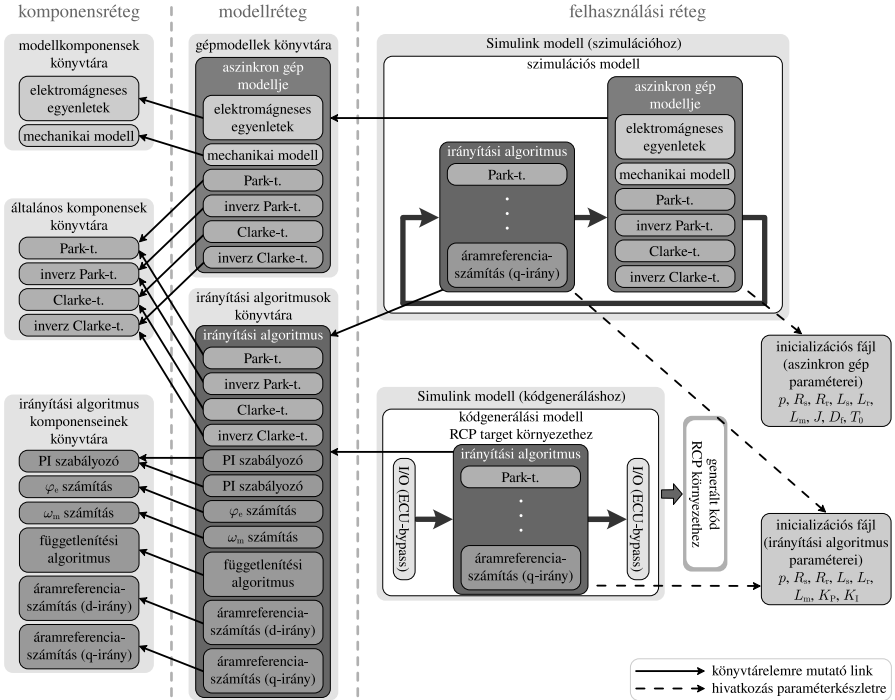
További célom szögsebesség-érzékelő nélküli mezőorientált szabályozás megvalósítása az újszerű állapotbecslőkkel. A szabályozott hajtás dinamikus viselkedésének szimulációs és kísérleti vizsgálataival mellett, az ellenállásparaméterek megváltozásának állandósult állapotra gyakorolt hatását is vizsgáltam a különböző üzemi tartományokban. Ennek szemléltetéséhez paraméterérzékenységi térképeket készítettem. Emellett foglalkoztam a becslők zajparamétereinek ellenállásparaméter-érzékenységre gyakorolt hatásával.

2. Az alkalmazott módszerek és eredményeik

Az aszinkron gép szögsebesség-érzékelő nélküli állapotbecslőinek és hajtásirányítási algoritmusának implementációjához, valamint szimulációs és tényleges fizikai környezetben történő vizsgálataihoz megvalósítottam egy modellalapú környezetet és egy kísérleti összeállítást. Ezek alkalmazását a dolgozatban az aszinkron gép mezőorientált szabályozásának példáján keresztül mutattam be.

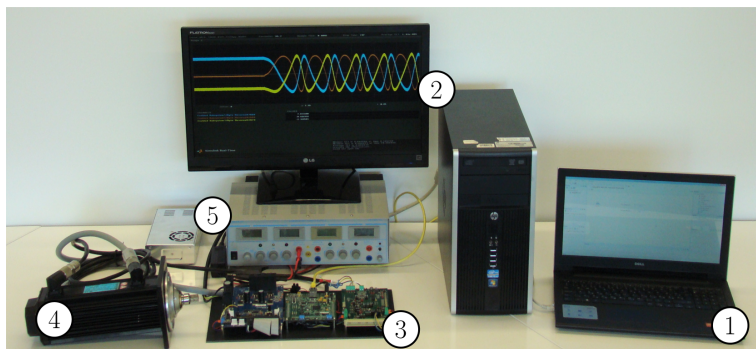
Munkám során a könyvtárak és modellek 1. ábrán látható háromrétegű architektúráját alkalmaztam, amelynek rétegei a *komponensréteg*, a *modellréteg* és a *felhasználási réteg*. A komponensréteg tartalmazza a rendszer elemi komponenseit, amelyek a különböző funkciók szétválasztása során jöttek létre. Ebben a rétegben külön könyvtárakba rendeztem a szimulációs modell komponenseit, az irányítási algoritmusok komponenseit és azokat az általános komponenseket, amelyek egyaránt felhasználhatók az aszinkron gép szimulációs modelljében és az irányítási algoritmusokban. A modellrétegben külön könyvtár tartalmazza az aszinkron gép szimulációs modelljét, illetve az irányítási algoritmusok implementációit. Bár az 1. ábrán az irányítási algoritmusok könyvtárában csak a példaként alkalmazott FOC algoritmus szerepel, ezt a könyvtárat bővítettem a szögsebesség-érzékelő nélküli hajtásszabályozási módszer kidolgozását követően annak implementációjával. A harmadik réteg a felhasználási réteg, ahol a modellek ténylegesen alkalmazásra kerülnek szimulációhoz vagy kódgeneráláshoz. Ebben a rétegben történik meg a komponensek példányosítása, így a paraméterek hozzárendelése is az egyes blokkokhoz.

Az 1. ábrán látható, hogy a komponensrétegben található elemi komponensek többször is felhasználhatóak, azonban elegendő egyetlen prototípust implementálni. Például az irányítási algoritmus komponenseinek könyvtárában egyetlen PI szabályozó található, amelyet az FOC algoritmus kétszer is felhasznál az i_{ds} fluxus-, illetve az i_{qs} nyomatékképző állórészáram-komponensek szabályozási köreiben. Függetlenül attól, hogy a példaként említett PI szabályozó csak egyszer van implementálva a komponensrétegben, a példányosítás során a d-, illetve a q-irányú áramszabályozókban alkalmazhatók eltérő arányos és integráló erősítési tényezők. Ezt az elvet alkalmazva a teljes rendszer is könnyen adaptálható különböző gépekhez, hiszen a meglévő algoritmusokhoz társíthatók módosított paraméterfájlok. Emellett az alkalmazott modellarchitektúra megkönnyíti a szoftverkarbantartást, hiszen az első réteg valamely prototípus-komponensén végzett javítás automatikusan érvényre jut a linkeken keresztül az összes példányon. Tehát ha egy komponensnek több példánya is van, akkor elegendő a prototípus karbantartását elvégezni.



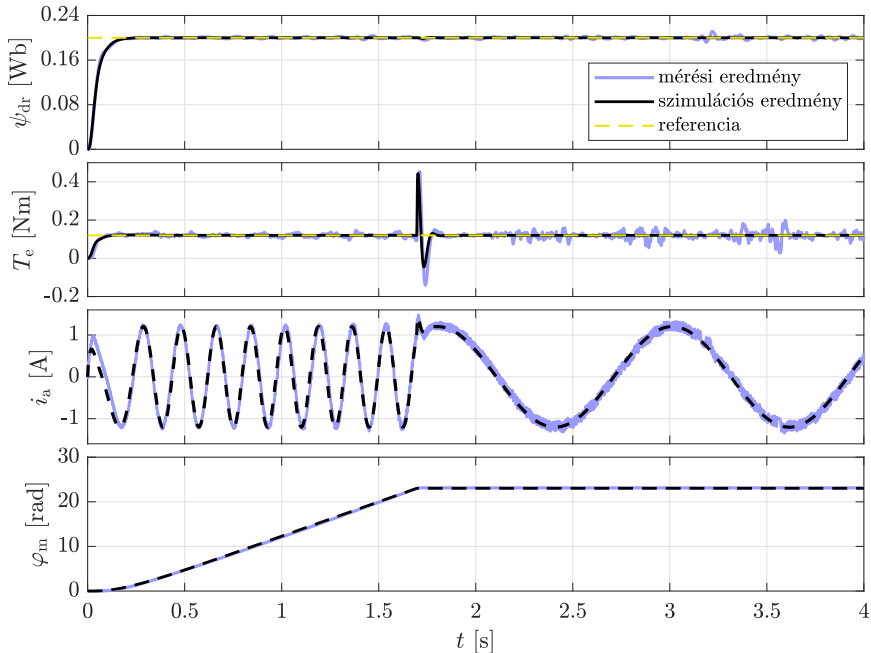
1. ábra. A könyvtárak és modellek háromrétegű architektúrája

A hajtásirányítási algoritmusok tényleges fizikai környezetben történő vizsgálataihoz megvalósítottam a 2. ábrán látható kísérleti összeállítást. A gyorsprototípus-vizsgálati (rapid control prototyping, RCP) rendszer központi eleme egy dedikált, valós idejű működésre képes target számítógép a megfelelő szoftverkészlettel. A kutatásokhoz szükséges magas számítási teljesítményt ez a target számítógép biztosítja, amely gyorsan és egyszerűen hozzáférhető a fejlesztőkörnyezetből, így az irányítási algoritmusból generált kód is könnyen feltölthető. Emellett a felhasználói felület lehetővé teszi a kísérletek felügyeletét és automatizált végrehajtását, virtuális műszerezés megvalósítását, a paraméterek módosítását, valamint a változók valós idejű megjelenítését és az adatgyűjtést. RCP alkalmazásával az irányítási algoritmusok az említett előnyök mellett futtathatók a tényleges fizikai környezetben.



2. ábra. A kísérleti eszköz: 1 host számítógép, 2 Simulink Real-Time target számítógép, 3 motorirányító egység, 4 aszinkron gép, 5 tápegységek

A modellalapú környezet és a gyorsprototípus-vizsgálati rendszer alkalmazhatóságát egy implementációs példa segítségével demonstráltam, amely során az FOC algoritmus szimulációs vizsgálatának eredményeit kísérletileg is validáltam a szimulációs és a mért jelek, illetve a közvetlenül nem mért, de valós időben számított jelek összehasonlításával. A szimulációs és kísérleti eredmények összehasonlításához ugyanazt a vizsgálatot végeztem el szimulációs és tényleges fizikai környezetben is. A hajtást külső terhelés nélkül indítottam konstans fluxus- és nyomatékreferencia mellett, majd az állandósult szögsebesség elérését követően az elektromechanikus fék segítségével megállítottam a forgórészt, így a hirtelen fellépő terhelésváltozás hatása is vizsgálható volt. A legfontosabb szimulációs és kísérleti eredményeket a 3. ábra mutatja. Látható, hogy a szabályozott ψ_{dr} fluxus és T_e elektromágneses nyomaték is megfelelő referenciakövetési pontosságot mutat a gyors tranzienszt követően, valamint hogy a szabályozók abban az esetben is működőképesek maradnak, ha külső terhelés hirtelen megállítja a forgórészt. Emellett látható, hogy az i_a fázisáram és a φ_m forgórész-pozíció mért és szimulációs értékei között csupán kismértékűek az eltérések. Azonkívül, hogy a közölt eredmények az FOC algoritmus megfelelő teljesítőképességét mutatják, alátámasztják azt is, hogy a javasolt modellalapú környezet alkalmas helyesen működő gépmodell és irányítási algoritmus megvalósítására, továbbá a kísérleti összeállítás alkalmazható tényleges fizikai környezetben történő kísérleti vizsgálatokhoz, így az újszerű szögsebesség-érzékelő nélküli állapotbecslő és hajtásirányítási algoritmusok vizsgálatához ezt a rendszert alkalmazom.



3. ábra. A származtatott ψ_{dr} és T_e , valamint a mért i_a és φ_m változók összehasonlítása a szimulációs eredményekkel

A szögsebesség-érzékelő nélküli állapotbecslők tervezése során úgy definiáltam az állapottérmodellt, hogy a becsült állapotváltozók közvetlenül, további számítások és transzformációk nélkül, felhasználhatók legyenek mezőorientált szabályozási algoritmusban. Vagyis az állapotbecslők tervezésénél figyelembe vettem a mezőorientáció elvét, annak érdekében, hogy a forgórészfluxus-térvektor koordináta-rendszerében álljanak elő az FOC algoritmus számára szükséges változók becsült értékei.

A becslők tervezéséhez alkalmazott modell esetében állapotváltozóként definiáltam az i_{ds} fluxusképző és az i_{qs} nyomatékképző áramkomponenseket, a forgórészfluxus-térvektor ψ_{dr} hosszát és φ_e irányszögét. Az elektromágneses változók mellett állapotváltozónak választottam a forgórész ω_m szögsebességét is, amelynek becslése teszi lehetővé a mechanikus szenzor elhagyását. A becslők tranzienst viselkedésének javításához az állapottérmodell felírásánál

felhasználtam mozgásegyenletet, és így a T_1 terhelőnyomatékok is állapotváltozóként választottam. Ezáltal a tervezett állapotbecslők terhelésbecslésre is alkalmassá válnak.

A javasolt modell állapotegyenlete:

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \varphi_e \\ \omega_m \\ T_1 \end{bmatrix}}_{\frac{dx}{dt}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{(v_{\beta s} \cos(\varphi_e) + v_{\alpha s} \sin(\varphi_e))}{L_s \sigma} - \frac{R_s i_{ds}}{L_s \sigma} + \frac{R_r L_m (\psi_{dr} - L_m i_{ds})}{L_s L_r^2 \sigma} + (p\omega_m + \frac{R_r L_m}{L_r} \frac{i_{qs}}{\psi_{dr}}) i_{qs} \\ \frac{(v_{\beta s} \cos(\varphi_e) - v_{\alpha s} \sin(\varphi_e))}{L_s \sigma} - \frac{R_s i_{qs}}{L_s \sigma} - (p\omega_m + \frac{R_r L_m}{L_r} \frac{i_{qs}}{\psi_{dr}}) (i_{ds} + \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} \psi_{dr}) \\ \frac{R_r L_m}{L_r} i_{ds} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{dr} \\ p\omega_m + \frac{R_r L_m}{L_r} \frac{i_{qs}}{\psi_{dr}} \\ \frac{3}{2} \frac{p}{J} \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \psi_{dr} - \frac{1}{J} T_1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{f(x, u)}, \quad (1)$$

amelynek bemenetei az állórész koordináta-rendszerében megadott $v_{\alpha s}$, $v_{\beta s}$ állórészfeszültség-komponensek. A modell paraméterei az R_s állórész-ellenállás, az R_r forgórész-ellenállás, az L_m kölcsönös induktivitás, az L_s állórész-induktivitás, az L_r forgórész-induktivitás, a p póluspárszám és a J tehetetlenségi nyomaték. Az (1) állapotegyenletben $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ jelöli a szivárgási tényezőt.

A mechanikus érzékelő nélküli alkalmazás miatt a modell kimenetei az állórész koordináta-rendszerében megadott $i_{\alpha s}$ és $i_{\beta s}$ állórészáram-komponensek, így az állapotterezs leírás kimeneti egyenlete a következő:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix}}_{\mathbf{y}} = \underbrace{\begin{bmatrix} i_{ds} \cos(\varphi_e) - i_{qs} \sin(\varphi_e) \\ i_{ds} \sin(\varphi_e) + i_{qs} \cos(\varphi_e) \end{bmatrix}}_{\mathbf{h}(\mathbf{x})}. \quad (2)$$

Az (1)-(2) nemlineáris állapotteremmodell megfigyelhetőségi vizsgálata során meghatároztam a

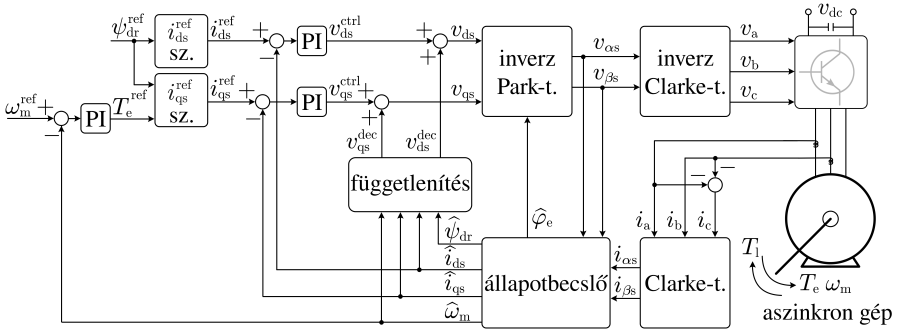
$$\psi_{dr} \neq 0 \wedge \frac{R_r^2 + L_r^2 p^2 \omega_m^2}{R_r L_r p} \frac{d\varphi_e}{dt} + \frac{d\omega_m}{dt} \neq 0 \quad (3)$$

feltételt, amellyel biztosítható a modell lokálisan gyengén megfigyelhetősége.

Az (1)-(2) modell felhasználásával EKF, UKF és CKF alapú szögsebesség-érzékelő nélküli állapotbecslőket valósítottam meg, amelyeknek elvégeztem a részletes szimulációs és kísérleti vizsgálatait. Ennek eredményei alapján megállapítottam, hogy az általam javasolt módszerek megfelelően alkalmazhatók aszinkron gép szögsebesség-érzékelő nélküli állapotbecslésére. A

dolgozatban emellett összehasonlítottam a javasolt sztochasztikus becslőket a forgórészfluxus alapú modellreferenciás adaptív megfigyelővel, az adaptív Luenberger-megfigyelővel és az adaptív csúszómód megfigyelővel. A vizsgálatok során az általam javasolt állapotbecslők pontosabb szögsebességbecslést biztosítottak szimulációs környezetben névleges paraméterek esetén, illetve 50%-kal elhangolt állórész-ellenállás mellett, valamint a tényleges fizikai környezetben végzett alacsony fordulatszám-tartománybeli mérések során.

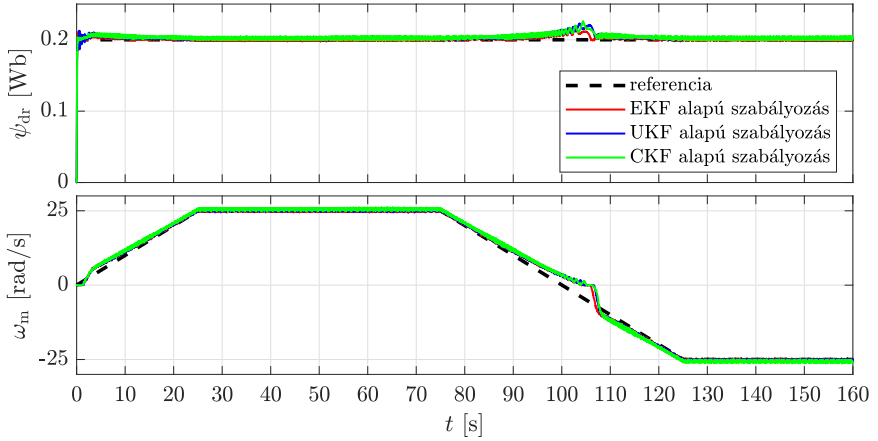
A javasolt állapotbecslők felhasználásával mechanikus érzékelő nélküli mezőorientált hajtásszabályozási módszert valósítottam meg, amelynek blokkvázlatát a 4. ábra mutatja.



4. ábra. Aszinkron gépes hajtás állapotbecslésen alapuló szögsebesség-érzékelő nélküli mezőorientált szabályozásának blokkvázlata

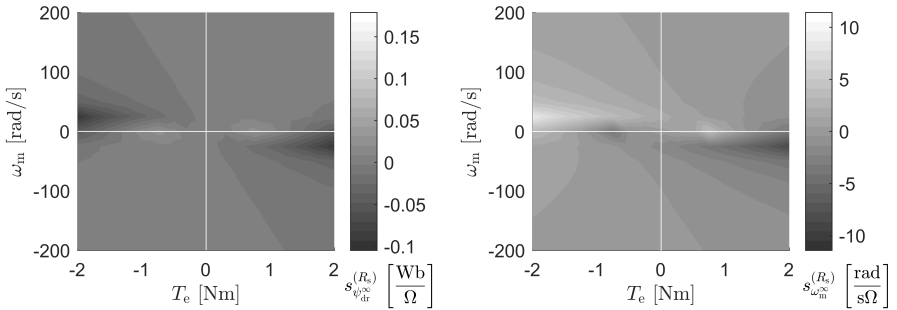
A szögsebesség-érzékelő nélküli irányítás teljesítőképességét részletesen vizsgáltam a különböző becselőalgoritmusok alkalmazása mellett. Ezek eredményei a hajtásszabályozási módszer megfelelő működését mutatják, azonban az 5. ábrán látható kísérleti eredmények szerint a referenciakövetés pontossága leromlik az alacsony fordulatszám-tartományban. Ugyanakkor a hajtásszabályozás zérus körüli szögsebesség-tartományban is működőképes marad.

A hajtásszabályozási algoritmus paraméterérzékenységi vizsgálatához egy újszerű megközelítést javasoltam, amellyel egy előre meghatározott üzemi tartományban, érzékenységi térképek segítségével vizsgálható a szögsebesség-érzékelő nélküli irányítás paraméterérzékenysége. Az UKF állapotbecslőn alapuló hajtásszabályozás állórészellenállás-érzékenységi térképei a 6. ábrán láthatók. Munkám során elvégeztem az R_s és R_r ellenállás-paraméterek megváltozására vonatkozó érzékenységi vizsgálatokat az EKF, UKF és CKF alapú



5. ábra. Fluxus- és szögsebességválaszok kísérleti összehasonlítása az alacsony fordulatszám-tartományban végzett mérés során

hajtásszabályozásokhoz, valamint vizsgáltam a zajparaméterek érzékenységre gyakorolt hatását is.



(a) A szabályozott ψ_{dr} forgórészfluxus érzékenysége R_s megváltozására **(b)** A szabályozott ω_m szögsebesség érzékenysége R_s megváltozására

6. ábra. Az UKF állapotbecslőn alapuló szögsebesség-érzékelő nélküli hajtásszabályozás paraméter-érzékenységi térképei

3. Az új tudományos eredmények összefoglalása

1. tézis

Aszinkron gépes hajtásirányítási algoritmusok kutatási és fejlesztési folyamatahoz megvalósítottam egy újszerű környezetet a modellalapú módszertan alkalmazásával. A következetesen felépített háromrétegű modellarchitektúrán alapuló környezet nagymértékben támogatja az újfajta irányítási algoritmusok fejlesztését, ezáltal elősegíti a szögsebesség-érzékelő nélküli módszerek kutatását is. Megvalósítottam továbbá egy olyan kísérleti összeállítást az irányítási algoritmusok tényleges fizikai környezetben történő vizsgálatához, amely biztosítja a kutatásokhoz szükséges magas számítási teljesítményt. A modellalapú környezet és a kísérleti összeállítás alkalmazhatóságát egy implementációs példa segítségével demonstráltam, amely során szimulációs eredményeket validáltam általam mért kísérleti eredményekkel.

Az 1. tézishez kapcsolódó saját publikációk a következők: [1, 2].

2. tézis

Kidolgoztam és megvalósítottam három újszerű mechanikus érzékelő nélküli, csak villamos mennyiségekre támaszkodó állapotbecslőt aszinkron gépes hajtásokhoz. Az állapotbecslők tervezéséhez egy újszerű állapottermodellt javasoltam, amely 6 állapotváltozó segítségével írja le a gép dinamikus viselkedését. Ennek az állapottermodellnek köszönhetően az állapotbecslők közvetlenül képesek előállítani mezőorientált hajtásszabályozási algoritmus számára szükséges változók becslt értékeit, mivel az állapotvektor és a mezőorientált szabályozás koordináta-rendszere azonos. A nemlineáris rendszerleírás miatt a linearizáláson alapuló kiterjesztett Kalman-szűrőt, valamint a numerikus integráláson alapuló unscented és cubature Kalman-szűrőket alkalmaztam becslőalgoritmusként. Mindhárom állapotbecslőt validáltam szimulációs és tényleges fizikai környezetben.

2.1. altézis

Elvégeztem a javasolt nemlineáris állapottermodell megfigyelhetőségi vizsgálatát és a lokális megfigyelhetőség biztosításához meghatároztam a

$$\psi_{dr} \neq 0 \wedge \frac{R_r^2 + L_r^2 p^2 \omega_m^2}{R_r L_r p} \frac{d\varphi_e}{dt} + \frac{d\omega_m}{dt} \neq 0$$

megfigyelhetőségi feltételt.

2.2. altézis

A cubature Kalman-szűrőt elsőként alkalmaztam aszinkron gép szögsebesség-érzékelő nélküli állapotbecsléséhez, ezáltal új alkalmazási területet javasoltam ennek a becslőalgoritmusnak.

2.3. altézis

Összehasonlító vizsgálatokat végeztem az általam javasolt állapotbecslők, a modellreferenciás adaptív megfigyelő, az adaptív Luenberger-féle megfigyelő és az adaptív csúszómód megfigyelő között. A szimulációs vizsgálatok során névleges paraméterek és 50%-kal elhangolt állórész-ellenállás mellett is pontosabb szögsebességbecslést biztosítottak a teljes vizsgált tartományra vonatkozóan az újszerű állapotbecslők, mint a determinisztikus megfigyelők. Emellett az alacsony fordulatszám-tartományban végzett kísérletek során is kisebb átlagos szögsebesség-becslési hibát mutattak a teljes vizsgált tartományra vonatkozóan a javasolt állapotbecslők, mint a determinisztikus megfigyelők.

A 2. tézishez kapcsolódó saját publikációk a következők: [3–9].

3. tézis

Az általam kidolgozott állapotbecslők alkalmazásával szögsebesség-érzékelő nélküli mezőorientált szabályozást valósítottam meg. A szabályozott hajtást mindhárom becslőalgoritmus mellett szimulációs és tényleges fizikai környezetben is vizsgáltam. A vizsgálatok eredményei alapján megállapítottam, hogy mindhárom állapotbecslő alkalmazásával a hajtásszabályozási módszer működőképes, és a különböző becslőket alkalmazó irányítási algoritmusok teljesítőképessége között jelentős eltérés nem tapasztalható.

3.1. altézis

Az állapotbecslésen alapuló hajtásszabályozás állandósult állapotbeli paramétereérzékenységi vizsgálatához kidolgoztam egy újszerű eljárást, amellyel egy előre definiált működési tartományhoz paramétereérzékenységi térképek állíthatók elő.

3.2. altézis

Elvégeztem a javasolt hajtásszabályozási módszer érzékenységi vizsgálatát az ellenállás-paraméterekre vonatkozóan és az eredmények alapján a következőket állapítottam meg. Az érzékenység változik a működési tartományban és függ az alkalmazott becslőalgoritmustól, valamint annak zajparamétereitől. Az állórész-ellenállás megváltozására a fluxus- és

a szögsebesség-szabályozás érzékenyebb generátorüzemben, mint motorüzemben. A szabályozott forgórészfluxus kevésbé érzékeny a forgórész-ellenállás megváltozására, mint az állórész-ellenállás megváltozására. A szögsebesség-szabályozás motorüzemben a forgórész-ellenállás, generátorüzemben az állórész-ellenállás megváltozására érzékenyebb.

A 3. tézishez kapcsolódó saját publikációk a következők: [3, 5–7].

4. Konklúzió

Munkám során aszinkron gépes hajtások állapotbecslési és szögsebesség-érzékelő nélküli mezőorientált irányítási módszereivel foglalkoztam. Ezek tervezéséhez és fejlesztési folyamatához egy modellalapú környezetet valósítottam meg, amelyet moduláris kutatási platformként alkalmaztam. Az újszerű módszerek tényleges fizikai környezetben történő vizsgálatához egy kísérleti összeállítást is létrehoztam. Kidolgoztam továbbá aszinkron gépes hajtásokhoz három újszerű állapotbecslőt, amelyek közvetlenül képesek előállítani a mezőorientált hajtásirányítási algoritmusok számára szükséges változókat. Ehhez a becslők tervezése során a mezőorientáció elvének felhasználásával definiáltam állapottérmodellt, amelyhez megfigyelhetőségi feltételt is meghatároztam. A nemlineáris állapottérmodell miatt a linearizáláson alapuló EKF, illetve a numerikus integráláson alapuló UKF és CKF becslőalgoritmusokat alkalmaztam. A javasolt állapotbecslőket szimulációs és tényleges fizikai környezetben is validáltam, valamint összehasonlítottam három széleskörűen alkalmazott determinisztikus megfigyelővel. Az elvégzett vizsgálatok eredményei szerint az általam javasolt módszerek névleges paraméterek alkalmazása mellett és 50%-kal elhangolt állórész-ellenállás mellett is felülmúlják szögsebességbecslési pontosság tekintetében a determinisztikus megfigyelőket. A dolgozat végén szögsebesség-érzékelő nélküli mezőorientált szabályozási struktúrában alkalmaztam és vizsgáltam az általam kidolgozott állapotbecslőket. A vizsgálatok eredményei szerint a hajtásszabályozás mindhárom állapotbecslő alkalmazása mellett megfelelően működik.

A szakirodalomból is ismert és az általam végzett kísérletek eredményei alapján is látható volt, hogy a fundamentális modellen alapuló szögsebesség-érzékelő nélküli becslők és hajtásszabályozási módszerek teljesítőképessége leromlik az alacsony fordulatszám-tartományban. A [32, 72] áttekintő tanulmányok szerint ennek fő okai a paraméterbizonytalanságok és az inverter által okozott nemlineáris hatások. Az általam végzett paraméterérzékenységi vizsgálatok eredményei szerint a paraméterérzékenység függ az állapotbecslők zajparamétereitől, így a későbbiekben szeretnék kidolgozni egy olyan eljárást, amellyel meghatározhatók robusztus viselkedést biztosító zajparaméterek. Emellett az inverter nemlineáris hatásainak figyelembevételével szeretném javítani az általam javasolt állapotbecslési és hajtásszabályozási módszerek alacsony fordulatszám-tartománybeli viselkedését.

Irodalomjegyzék

Az értekezésben hivatkozott saját publikációk

- [1] K. Horváth and M. Kuslits. Model-based development of induction motor control algorithms with modular architecture. In *Proceedings of 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, pages 133–138, Varna, Sept. 2016.
Hivatkozások – Független: 6, Független: 2
- [2] K. Horváth, M. Kuslits, and Sz. Lovas. Model-based control algorithm development of induction machines by using a well-defined model architecture and rapid control prototyping. *Electrical Engineering – Archiv für Elektrotechnik*, 102(3):1103–1116, 2020. (IF: 1,836)
Hivatkozások – Független: 4, Független: 0
- [3] K. Horváth and M. Kuslits. Speed sensorless field oriented control of induction machines using unscented Kalman filter. In *Proceedings of 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, pages 523–528, Brasov, May 2017.
Hivatkozások – Független: 4, Független: 4
- [4] K. Horváth and M. Kuslits. Optimization-based parameter tuning of unscented Kalman filter for speed sensorless state estimation of induction machines. In *Proceedings of 2017 5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*, pages 132–138, Galati, Oct. 2017.
Hivatkozások – Független: 5, Független: 2
- [5] K. Horváth. Cubature Kalman filter-based speed sensorless control of induction machines. In *Proceedings of 2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, pages 204–207, Bourgas, June 2018.
Hivatkozások – Független: 3, Független: 1
- [6] K. Horváth and M. Kuslits. Parameter sensitivity analysis method for speed sensorless induction machine drives based on unscented Kalman filter. In *Proceedings of 2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, pages 744–749, Budapest, Aug. 2018.

Hivatkozások – Független: 1, Függő: 0

- [7] K. Horváth and M. Kuslits. Dynamic performance of estimator-based speed sensorless control of induction machines using extended and unscented Kalman filters. *Power Electronics and Drives – Open Access Journal*, 3(1):129–144, 2018.

Hivatkozások – Független: 7, Függő: 2

- [8] K. Horváth and D. Fodor. Low speed operation of sensorless estimators for induction machines using extended, unscented and cubature Kalman filter techniques. In *Proceedings of 2019 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, pages 279–285, The High Tatras, Sept. 2019.

Hivatkozások – Független: 2, Függő: 0

- [9] K. Horváth. Observability conditions for speed sensorless induction motor models with neglected or included iron loss representation. In *Proceedings of 2021 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, pages 97–101, Dubrovnik, Sept. 2021.

A jelölt egyéb saját publikációi

- [10] K. Kyslan, V. Šlapák, V. Fedák, F. Ďurovský, and K. Horváth. Design of load torque and mechanical speed estimator of PMSM with unscented Kalman filter — An engineering guide. In *Proceedings of 2017 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, pages 297–302, Dubrovnik, Oct. 2017.

Hivatkozások – Független: 17, Függő: 1

- [11] M. Kuczmann and K. Horváth. Design of feedback linearization controllers for induction motor drives by using stator reference frame models. In *Proceedings of 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, pages 766–773, Gliwice, Apr. 2021.

- [12] Sz. Kocsis Szürke, A. Dineva, K. Horváth, and I. Lakatos. Statistical approach for designing generic 18650 battery model. In *Proceedings of 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, pages 391–394, Sofia, July 2021.

A felhasznált irodalomjegyzék kivonata

- [13] H. H. Afshari, S. A. Gadsden, and S. Habibi. Gaussian filters for parameter and state estimation: A general review of theory and recent trends. *Signal Processing*, 135:218–238, 2017.
- [14] B. Akin, U. Orguner, A. Ersak, and M. Ehsani. Simple derivative-free nonlinear state observer for sensorless AC drives. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 11(5):634–643, 2006.
- [15] I. Arasaratnam and S. Haykin. Cubature Kalman filters. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(6):1254–1269, 2009.
- [16] F. Auger, M. Hilaret, J. M. Guerrero, E. Monmasson, T. Orłowska-Kowalska, and S. Katsura. Industrial applications of the Kalman filter: A review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(12):5458–5471, 2013.
- [17] U. Baader, M. Depenbrock, and G. Gierse. Direct self control (DSC) of inverter-fed induction machine: A basis for speed control without speed measurement. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(3):581–588, 1992.
- [18] M. Barut, S. Bogosyan, and M. Gokasan. Experimental evaluation of braided EKF for sensorless control of induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(2):620–632, 2008.
- [19] M. Barut, S. Bogosyan, and M. Gokasan. Speed-sensorless estimation for induction motors using extended Kalman filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(1):272–280, 2007.
- [20] I. Boldea. Control issues in adjustable speed drives. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2(3):32–50, 2008.
- [21] S. Bolognani, L. Peretti, and M. Zigliotto. Parameter sensitivity analysis of an improved open-loop speed estimate for induction motor drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(4):2127–2135, 2008.
- [22] F. Briz and M. W. Degner. Rotor position estimation. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 5(2):24–36, 2011.
- [23] F. Briz, M. W. Degner, P. Garcia, and R. D. Lorenz. Comparison of saliency-based sensorless control techniques for AC machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(4):1107–1115, 2004.

- [24] G. S. Buja and M. P. Kazmierkowski. Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors - A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(4):744–757, 2004.
- [25] C. Canudas De Wit, A. Youssef, J. P. Barbot, P. Martin, and F. Malrait. Observability conditions of induction motors at low frequencies. In *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 2044–2049, Sydney, Dec. 2000.
- [26] D. Casadei, F. Profumo, G. Serra, and A. Tani. FOC and DTC: Two viable schemes for induction motors torque control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17(5):779–787, 2002.
- [27] A. Chandra, S. Datta, A. Dey, and S. Chowdhuri. Performance evaluation of CKF based sensorless vector controlled PM synchronous motor drive. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 16(2):889–897, 2021.
- [28] M. Comanescu and L. Xu. Sliding-mode MRAS speed estimators for sensorless vector control of induction machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(1):146–153, 2006.
- [29] M. W. Degner and R. D. Lorenz. Using multiple saliencies for the estimation of flux, position, and velocity in AC machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34(5):1097–1104, 1998.
- [30] M. Depenbrock. Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 3(4):420–429, 1988.
- [31] A. Ferrah, K. J. Bradley, and G. M. Asher. An FFT-based novel approach to noninvasive speed measurement in induction motor drives. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 41(6):797–802, 1992.
- [32] J. W. Finch and D. Giaouris. Controlled AC electrical drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(2):481–491, 2008.
- [33] D. Fodor and R. Tóth. Speed sensorless linear parameter variant H_∞ control of the induction motor. In *Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 4435–4440, Nassau, Dec. 2004.
- [34] S. M. Gadoue, D. Giaouris, and J. W. Finch. Sensorless control of induction motor drives at very low and zero speeds using neural network flux observers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(8):3029–3039, 2009.

- [35] M. Ghanes, J. De Leon, and A. Glumineau. Observability study and observer-based interconnected form for sensorless induction motor. In *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 1240–1245, San Diego, Dec. 2006.
- [36] F. Gustafsson and G. Hendeby. Some relations between extended and unscented Kalman filters. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 60(2):545–555, 2012.
- [37] J. Guzinski, H. Abu-Rub, M. Diguët, Z. Krzeminski, and A. Lewicki. Speed and load torque observer application in high-speed train electric drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(2):565–574, 2010.
- [38] J.-I. Ha and S.-K. Sul. Sensorless field-orientation control of an induction machine by high-frequency signal injection. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35(1):45–51, 1999.
- [39] R. Hermann and A. Krener. Nonlinear controllability and observability. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22(5):728–740, 1977.
- [40] M. Hinkkanen and J. Luomi. Parameter sensitivity of full-order flux observers for induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(4):1127–1135, 2003.
- [41] J. Holtz. Sensorless control of induction motor drives. *Proceedings of the IEEE*, 90(8):1359–1394, 2002.
- [42] J. Holtz. Sensorless control of induction machines – With or without signal injection? *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(1):7–30, 2006.
- [43] J. Holtz and H. Pan. Elimination of saturation effects in sensorless position-controlled induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(2):623–631, 2004.
- [44] C. Ilas, A. Bettini, L. Ferraris, G. Griva, and F. Profumo. Comparison of different schemes without shaft sensors for field oriented control drives. In *Proceedings of IECON'94 - 20th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, pages 1579–1588, Bologna, Sept. 1994.
- [45] S. Jafarzadeh, C. Lascu, and M. S. Fadali. Square root unscented Kalman filters for state estimation of induction motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(1):92–99, 2013.

- [46] S. Jafarzadeh, C. Lascu, and M. S. Fadali. State estimation of induction motor drives using the unscented Kalman filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(11):4207–4216, 2012.
- [47] S. J. Julier and J. K. Uhlmann. Unscented filtering and nonlinear estimation. *Proceedings of the IEEE*, 92(3):401–422, 2004.
- [48] B. Karanayil, M. F. Rahman, and C. Grantham. Online stator and rotor resistance estimation scheme using artificial neural networks for vector controlled speed sensorless induction motor drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(1):167–176, 2007.
- [49] Y. R. Kim, S.-K. Sul, and M. H. Park. Speed sensorless vector control of induction motor using extended Kalman filter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(5):1225–1233, 1994.
- [50] P. Korondi, D. Young, and H. Hashimoto. Sliding mode based disturbance compensation for motion control. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation (IECON)*, pages 73–78, New Orleans, Nov. 1997.
- [51] M. Korzonek, G. Tarchala, and T. Orłowska-Kowalska. A review on MRAS-type speed estimators for reliable and efficient induction motor drives. *ISA Transactions*, 93:1–13, 2019.
- [52] M. Koteich, A. Maloum, G. Duc, and G. Sandou. Local weak observability conditions of sensorless AC drives. In *Proceedings of 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, pages 1725–1734, Geneva, Sept. 2015.
- [53] H. Kubota and K. Matsuse. Speed sensorless field-oriented control of induction motor with rotor resistance adaptation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(5):1219–1224, 1994.
- [54] R. Kumar, S. Das, P. Syam, and A. K. Chattopadhyay. Review on model reference adaptive system for sensorless vector control of induction motor drives. *IET Electric Power Applications*, 9:496–511, 2015.
- [55] S. Kumar, J. Prakash, and P. Kanagasabapathy. A critical evaluation and experimental verification of extended Kalman filter, unscented Kalman filter and neural state filter for state estimation of three phase induction motor. *Applied Soft Computing*, 11(3):3199–3208, 2011.

- [56] C. Lascu, I. Boldea, and F. Blaabjerg. A class of speed-sensorless sliding-mode observers for high-performance induction motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(9):3394–3403, 2009.
- [57] C. Lascu, I. Boldea, and F. Blaabjerg. Comparative study of adaptive and inherently sensorless observers for variable-speed induction-motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(1):57–65, 2006.
- [58] E. Levi. Impact of iron loss on behavior of vector controlled induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(6):1287–1296, 1995.
- [59] J. Maes and J. A. Melkebeek. Speed-sensorless direct torque control of induction motors using an adaptive flux observer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(3):778–785, 2000.
- [60] T. Ohtani, N. Takada, and K. Tanaka. Vector control of induction motor without shaft encoder. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(1):157–164, 1992.
- [61] T. Orłowska-Kowalska and M. Dybkowski. Stator-current-based MRAS estimator for a wide range speed-sensorless induction-motor drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(4):1296–1308, 2010.
- [62] T. Orłowska-Kowalska, M. Korzonek, and G. Tarchala. Stability improvement methods of the adaptive full-order observer for sensorless induction motor drive — Comparative study. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(11):6114–6126, 2019.
- [63] F. Z. Peng and T. Fukao. Robust speed identification for speed-sensorless vector control of induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(5):1234–1240, 1994.
- [64] K. Rajashekara, A. Kawamura, and K. Matsuse. *Sensorless Control of AC Motor Drives: Speed and Position Sensorless Operation*. A selected reprint series. IEEE, 1996.
- [65] C. Schauder. Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(5):1054–1061, 1992.
- [66] K. L. Shi, T. F. Chan, Y. K. Wong, and S. L. Ho. Speed estimation of an induction motor drive using an optimized extended Kalman filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(1):124–133, 2002.

- [67] M. G. Simoes and B. K. Bose. Neural network based estimation of feedback signals for a vector controlled induction motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(3):620–629, 1995.
- [68] H. Tajima and Y. Hori. Speed sensorless field-orientation control of the induction machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 29(1):175–180, 1993.
- [69] I. Takahashi and T. Noguchi. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-22(5):820–827, Sept. 1986.
- [70] G. Tarchala and T. Orłowska-Kowalska. Equivalent-signal-based sliding mode speed MRAS-type estimator for induction motor drive stable in the regenerating mode. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(9):6936–6947, 2018.
- [71] P. Vaclavek, P. Blaha, and I. Herman. AC drive observability analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(8):3047–3059, 2013.
- [72] D. Xu, B. Wang, G. Zhang, G. Wang, and Y. Yu. A review of sensorless control methods for AC motor drives. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2(1):104–115, 2018.
- [73] Z. Yan, C. Jin, and V. Utkin. Sensorless sliding-mode control of induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(6):1286–1297, 2000.
- [74] R. Yildiz, M. Barut, and E. Zerdali. A comprehensive comparison of extended and unscented Kalman filters for speed-sensorless control applications of induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(10):6423–6432, 2020.
- [75] Z. Yin, F. Gao, Y. Zhang, C. Du, G. Li, and X. Sun. A review of nonlinear Kalman filter applying to sensorless control for AC motor drives. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 3(4):351–362, 2019.
- [76] M. S. Zaky, M. Khater, H. Yasin, and S. S. Shokralla. Review of different speed estimation schemes for sensorless induction motor drives. *Journal of Electrical Engineering*, 8(1):102–140, 2008.
- [77] D. S. Zinger, F. Profumo, T. A. Lipo, and D. W. Novotny. A direct field-oriented controller for induction motor drives using tapped stator windings. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 5(4):446–453, 1990.