

Szalay István

**Állandó mágneses szinkronmotorok  
érzékelő nélküli szöghelyzet meghatározása  
korszerű szabályozási eljárásokhoz**

DOKTORI TÉZISEK

Témavezető:

Dr. Fodor Dénes

Széchenyi István Egyetem



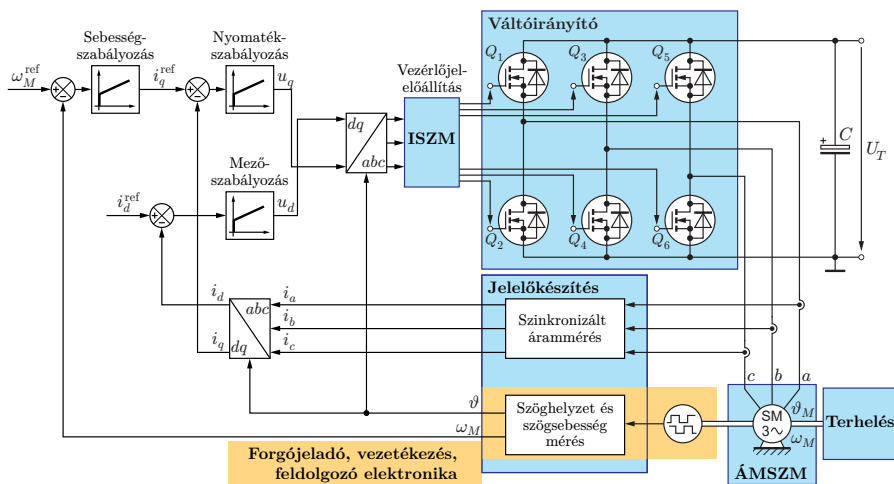
Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése  
Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola



# Az érzékelő nélküli hajtások kutatását ösztönző tényezők

A váltakozó áramú villamos hajtások forgójeladóinak – szöghelyzet és szögsebesség érzékelőinek – kiküszöbölése érdekében immár több mint három évtizede folyik kutatás [1, 2]. Az erre a célra kifejlesztett eljárásokat a szakirodalom összefoglalóan érzékelő nélküli módszereknek nevezi. Kutatásukat az érzékelők költségeinek megtakarítása, a méretcsökkentés, valamint a hajtás megbízhatóságának növelése indokolja.

Az állandó mágneses szinkronmotorokat (ÁMSZM) nagy teljesítménysűrűségűeknek, hatásfokuknak és forgatónyomaték-térfogat arányuknak köszönhetően elsősorattal alkalmazzák a nagy teljesítőképességű, nagy pontosságú és gyorsválaszú villamos hajtásokban [3]. A háztartási készülékektől kezdve a villamos járművekig számos területen megszokott az alkalmazásuk [4–7].



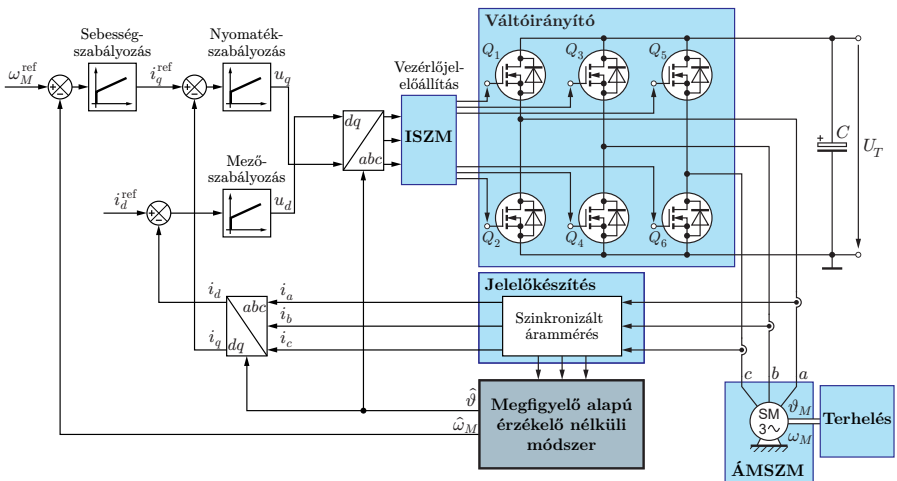
1. ábra. A forgójeladót alkalmazó állandó mágneses szinkronmotoros hajtás

Az ÁMSZM mezőorientált szabályozásához szükséges a fázisáramok és a forgórész szöghelyzetének mérése és visszacsatolása (1. ábra). A hagyományos ÁMSZM hajtásokban a szöghelyzet és a szögsebesség méréseire forgójeladót, rendszerint optikai enkódert vagy rezolvert alkalmaznak, ami azonban növeli az alkatrész-költséget és a motor méretét, valamint számos ipari berendezésben csökkenti a hajtás megbízhatóságát és általános ellenálló képességét [8–10].

Ezekon felül számos forgójeladó csak kis felbontással szolgáltatja a forgórész kezdeti szöghelyzetét, vagy egyáltalán nem tudja mérni azt. A megbízhatóbb és költséghatékonyabb ÁMSZM hajtások megvalósításához kulcsfontosságú a forgójeladók, valamint a kapcsolódó jelfeldolgozó elektronika és vezetékezés elhagyása a szöghelyzet-érzékelő nélküli módszerek bevezetésével.

Az ÁMSZM hajtásokhoz kidolgozott érzékelő nélküli módszerek a forgórész villamos szöghelyzetét és szögsebességét rendszerint árammérésre és a villamos gép modelljére támaszkodva, közvetett módon határozzák meg. A motor alaphelyzetbe állítás, visszirányú forgás és nemkívánatos lengés nélkül történő indításához a forgórész kezdeti szöghelyzetét, beleértve a forgórész mágnesesinek polaritását is, kellően pontosan meg kell határozni [11, 12].

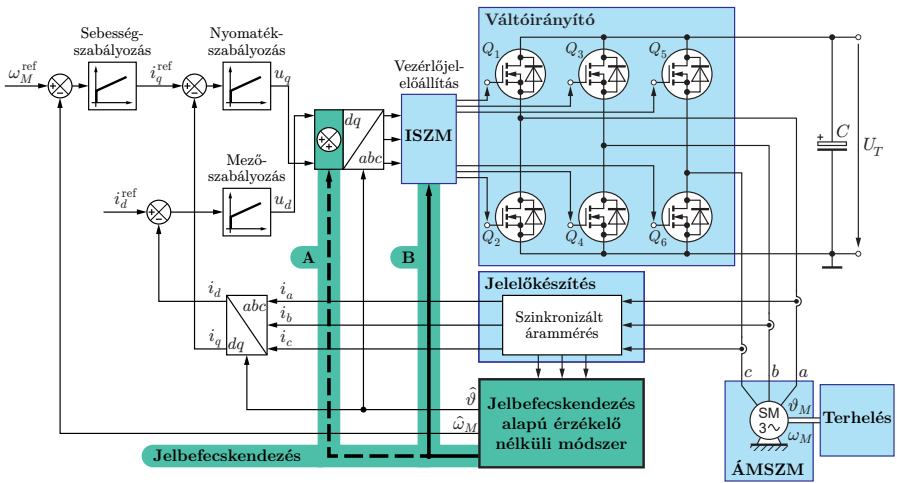
Az érzékelő nélküli módszereket két nagy csoportba lehet osztani, megkülönböztethetünk nagyfordulatszámú és kisfordulatszámú módszereket. Előbbiek a gép alaperjesztési modelljére és egy állapotmegfigyelőre támaszkodva a forgási feszültség által az áramokra gyakorolt hatás alapján becslik forgórész szöghelyzetét és szögsebességét (2. ábra). A nagyfordulatszámú érzékelő nélküli módszerek számára komoly problémát jelent, hogy a fordulatszám csökkenésével a feszültségek és az áramok is csökkennek, és emiatt a becslés, és vele a szabályozás jósága gyorsan romlik.



2. ábra. Az állapotmegfigyelőt alkalmazó érzékelő nélküli állandó mágneses szinkronmotoros hajtás elvi felépítése

A nagyfordulatszámú érzékelő nélküli módszerek a névleges fordulatszám kb. 3 %-a felett képesek jól működő szabályozást biztosítani, amikor a forgási feszültség elég nagy [13–17]. Az érzékelő nélküli működési tartomány kisebb fordulatszámokra és állóhelyzetre történő kiterjesztését célozva kezdték kidolgozni a gerjesztést alkalmazó kisfordulatszámú módszereket, amelyek lehetnek az ISZM gerjesztésen, illetve kis- vagy nagyfrekvenciás jelbefecskendezésen alapuló forgórész követő módszerek (3. ábra) [18–21]. Az ÁMSZM fázisáramai torzulnak a szöghelyzet és szögsebesség függvényében, mivel a forgórész kialakítása és a mágneses telítődés miatt a tekercselés mágnesköreinek viselkedése függ a forgórész szöghelyzetétől és szögsebességétől [22, 23].

A nagyfrekvenciás módszereknél az alkalmazott vizsgálójel frekvenciája általában 100 Hz és 10 kHz közé esik. A szakirodalomban ismertetett módszerek általában szinuszos vagy négyszög alakú vizsgálójellet alkalmaznak [K-1].



3. ábra. A jelbefecskendezést alkalmazó érzékelő nélküli állandó mágneses szinkronmotoros hajtás elvi felépítése

A gerjesztésen alapuló kisfordulatszámú érzékelő nélküli módszerek megoldást ígérnek a nagyfordulatszámú módszerek fő hiányosságára, a kis fordulatszámokon és állóhelyzetben történő szöghelyzet-meghatározásra, és erre alapozva a szabályozott indításra, illetve általánosságban a kis fordulatszámú működésre, de a létező megoldásoknak van néhány jelentős hiányossága.

Az érzékelő nélküli módszerek fontos részfeladata az állóhelyzetben történő vagy kezdeti szöghelyzet meghatározás, amit a néhány létező módszer két lépésben végez el. Először az induktivitás-alapú forgórész követő megkeresi a  $+d/-d$  tengelyt, majd egy másik módszer ismeri fel a forgórész mágnesek polaritását, ami alapján a  $+d$  és  $-d$  tengely megkülönböztethető [14, 24, 25].

Az ÁMSZM esetén az  $abc$  induktivitásoknak villamos szögben a második térbeli harmonikusa a meghatározó, bármely  $\vartheta$  és  $\vartheta+180^\circ$  villamos szöghelyzetben megegyeznek [26, K-2]. Emiatt az induktivitás alapú algoritmusok ugyan meg tudják találni a  $+d/-d$  tengelyt, de a forgórész mágnesének polaritását nem tudják felismerni. Mivel ez a kétértelműség ellenirányú forgást és nem kívánatos lengéseket okozhat, a polaritásfelismeréséhez egy eltérő algoritmusra, a jelenség leírásához pedig nemlineáris modellre van szükség.

A polaritás felismerése a forgórész megmozdítása nélkül a mágneses telítődés okozta szöghelyzetfüggések alapján lehetséges, ugyanis ezek között találunk olyanokat, amelyeknek villamos szögben a térbeli alapharmonikusa a meghatározó. A linearizált modellezési eljárások két különböző időállandójú lineáris modellre bontják a gép modelljét, ezzel szakadást okozva az áram előjelváltása esetén, és ráadásul a modell érvényessége a  $d$ -irányú betáplálásra korlátozódik [27–32]. A linearizálásnál általánosabb modellezési megközelítések a tekercsfluxus-áram összefüggést a mágnesezési görbék fázisáramok szerint sorba fejtett Taylor-polinomjaként írják fel. Ezek közös sajátossága, hogy a polaritásfüggő mennyiség a  $d$ -irányú mágnesezési görbe  $i_d$ -szerinti második deriváltjához, azaz a mágnesezési görbe görbületéhez kötődik.

## **A létező ÁMSZM telítődés modellek és érzékelő nélküli polaritásfelismerő módszerek hiányosságai**

Az érzékelő nélküli módszerekben alkalmazott mágneses telítődés modellek hiányosságait a jelenség és a kapcsolódó matematikai összefüggések bonyolultsága miatt tett egyszerűsítések okozzák. A telítődés eredendően nemlineáris jelenség, emiatt a linearizált modellek óhatatlanul elveszítik a rendszer bizonyos sajátosságait, szakadásokat vagy töréspontokat okoznak, és ezen felül korlátozzák a modell érvényességét, például  $d$ -irányú vagy  $q$ -irányú, pozitív vagy negatív gerjesztésre. A linearizált jelleg miatt ezek a modellek a telítődés nemlineáris hatásainak analitikus vizsgálatára sem használhatók fel.

A tekercsfluxus-áram függvény a választott koordináta-rendszertől függetlenül többváltozós és vektorértékű, amiben a forgórész szöghelyzete is megjelenik, vagy legalábbis megjelenhet, mint második független változó az áramvektor mellett. A függvény valódi egyenlete nem ismert, mindenképpen közelítő egyenletet kell alkalmaznunk, aminek a paramétereit tudjuk mérési úton meghatározni. Ezek a paraméterek a forgórész szöghelyzetének függvényei, és különböző térbeli harmonikus tartalommal rendelkezhetnek, amit ugyancsak mérési úton lehet meghatározni. A helyzetet tovább bonyolítja, hogy mind a fő fluxus telítődés, mind a keresztelítődés kiválthat a paraméterekben különböző térbeli harmonikusokat, a polaritásfelismerő algoritmusokban azonban ezek közül csak a térbeli alapharmonikussal rendelkezőkre van szükség.

A paraméter identifikációs módszerek alkalmazásához olyan fluxusmodellt kellett kidolgoznom, amit behelyettesítve a feszültségegyenletbe a módszernek megfelelő felépítésű modellegyenletekhez jutunk, például lineáris regressziós módszereknél a feszültségegyenletnek a mérhető mennyiségek lineáris kombinációjából kell felépülni, és az ismeretlen paramétereknek az együttthatókban kell szerepelniük. Ennek a követelménynek matematikai szempontból a Taylor-polinom alapú fluxusmodellek felelnek meg leginkább, viszont a szakirodalom ezekre csak  $d-q$ -beli példákat hoz, miközben a motorokon közvetlen mérést a háromfázisú  $abc$ -rendszerben tudunk végezni. Ezen felül a szakirodalmi példák minőségi modellek, a polaritás információt hordozó mennyiségek nem mért paraméterek, hanem pusztán az értékükre, ezen belül is általában az előjelükre tett következtetésekből kiindulva vonnak le következtetéseket az áram sajátosságaira vonatkozóan [3, 14, 27, 33–35]. A polaritásfelismerő algoritmus által befecskendezett feszültségimpulzusok hosszának vagy amplitúdójának tervezhetőségéhez mennyiségi modellre van szükség.

A létező nagyfrekvenciás modellek egy további hiányossága, hogy elhanyagolják a fázisellenállásokat [13, 14, 36]. A nagyobb méretű ÁMSZM-ek induktivitásai általában nagyobbak, fázisellenállásuk és villamos időállandójuk pedig kisebb, mint a kisméretű motoroké. Bizonyos alkalmazásokban, például ahol a váltóirányító és a motor közötti vezetékvezés hosszú, illetve bizonyos motortípusoknál, például a kutatásomban felhasznált kisméretű, légmagos tekercselésű ÁMSZM-ek esetén, a fázisellenállások értéke a jelbefecskendezés számára megfelelő frekvencia sávban nem hanyagolható el.

## A kutatás célkitűzései

Az értekezés célja egy megbízható polaritásfelismerésre képes és költséghatékonyan kivitelezhető érzékelő nélküli kezdeti szöghelyzet meghatározó módszer kidolgozása háromfázisú, légmagos tekercselésű, állandó mágneses szinkron motorokhoz. Ezt a következő részfeladatokra bontottam:

- Egy olyan állandó mágneses szinkrongép modell kidolgozása, amely magába foglalja a gép szöghelyzet- és polaritásfüggő sajátosságait és beépíti a hagyományos modellbe. A modellnek lehetőség szerint fehér doboz jellegűnek kell lennie, azaz a modellezett fizikai jelenségek működését és a kapcsolódó mennyiségek jelentését is fel kell tárni.
- A kidolgozott modell paramétereit mérési úton meg kell határozni, és az értéküktől független sajátosságaikat a modellbe be kell építeni. Itt elsősorban a szöghelyzetfüggő és különösen a polaritásfüggő mennyiségek térbeli harmonikus tartalmára gondolok, amit a villamos gépek modellezésében használt állórészhez és forgórészhez kötött koordináta-rendszerek sajátos kapcsolatának köszönhetően paraméterből a modell szerkezetének részévé lehet tenni.
- A kidolgozott és felparaméterezett modellt mérési úton érvényesíteni kell. Az érzékelő nélküli kezdeti szöghelyzet meghatározás és polaritásfelismerés szempontjából a modellel szembeni legfontosabb elvárás, hogy a hajtásban mérhető mennyiségek, elsősorban a fázisáramok szöghelyzetfüggő sajátosságait helyesen jelezze előre, de emellett a tranzienst és a frekvenciatartományon mutatott viselkedés is vizsgálandó. A modellnek összhangban kell lennie a szakirodalomban ismertetett kísérleti eredményekkel, amelyek szerint a négyszög feszültségjelre adott áramválasz szöghelyzet- és polaritásfüggő, szinuszos befeckendezés esetén pedig polaritásfüggő második harmonikus képződés figyelhető meg.
- Az érvényesített modellre támaszkodva érzékelő nélküli szöghelyzet meghatározó és polaritásfelismerő módszert kell kidolgozni. Mérési adatok alapján fel kell térképezni a módszer teljesítőképessége és a vizsgálójel jellemzői közötti összefüggéseket, és a vizsgálójel méretezésére szolgáló eljárást kell kidolgozni, szem előtt tartva a költséghatékonyt.



## A kutatás során alkalmazott módszerek összefoglalása

A nagyfrekvenciás jelbefecskendezés alapú érzékelő nélküli polaritásfelismerés elméleti megalapozásához egy újszerű, másodfokú fluxus-áram függvényt alkalmazó állandó mágneses szinkrongép modellt dolgoztam ki. Az alap gondolat e mögött a mágnesezési görbe S-alakjának kiaknázása, a polaritástól függő görbület beépítése a modellbe, amit a függvény második deriváltjai képeznek le. Többváltozós vektorértékű függvényről lévő szó, a második deriváltak, azaz a telítődési együtthatók a  $k \in \{a, b, c\}$  fázis  $\Psi_k$  tekercsfluxusának esetén a

$$\underline{\Gamma}_k(\vartheta) = \underline{\underline{H}}_{(\underline{0}A, \vartheta)}^{\Psi_k} = \frac{\partial^2 \Psi_k}{\partial i_{abc}^2} \Big|_{(\underline{0}A, \vartheta)} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad (1)$$

Hesse-mátrixot alkotják. Mértékegységük  $[\Gamma] = [\Psi] / [i^2] = \text{Wb}/\text{A}^2 = \text{H}/\text{A}$ .

Az új modell megalkotásának fontos lépése volt az  $abc$  tekercsfluxus függvény összevont Hesse-mátrixának, a

$$\underline{\underline{\Gamma}}_{abc}(\vartheta) = \underline{\underline{H}}_{(\underline{0}A, \vartheta)}^{\Psi_{abc}} = \begin{bmatrix} \underline{\Gamma}_a(\vartheta) \\ \underline{\Gamma}_b(\vartheta) \\ \underline{\Gamma}_c(\vartheta) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{9 \times 3} \quad (2)$$

mátrixnak a bevezetése, amit a tenzor alak és a háromméretű mátrix alak elkerülése érdekében tettem. Az összevont Hesse-mátrix és a Kronecker-szorzat ( $\otimes$ ) felhasználásával az  $abc$  tekercsfluxus függvény közelítésére a

$$\underline{\Psi}_{abc}(i_{abc}, \vartheta) = \underline{\Psi}_{abc}^{PM}(\vartheta) + \underline{\underline{L}}_{abc}(\vartheta) i_{abc} + \frac{1}{2} (\underline{\underline{I}}_3 \otimes i_{abc}^T) \underline{\underline{\Gamma}}_{abc}(\vartheta) i_{abc} \quad (3)$$

másodfokú Taylor-polinom alapú közelítő alakot írtam fel, ahol az állandó tag az állandó mágnesek, az induktivitás mátrix, a négyzetes tag pedig a mágnesezési görbék görbületének hatását veszi figyelembe.

A háromfázisú, csillagkapcsolt gép kibővített feszültségegyenlete az

$$\underline{u}_{abc} = R \dot{i}_{abc} + \underline{\underline{L}}_{abc}(\vartheta) \frac{d i_{abc}}{dt} + (\underline{\underline{I}}_3 \otimes i_{abc}^T) \underline{\underline{\Gamma}}_{abc}(\vartheta) \frac{d i_{abc}}{dt} + \omega \left( \frac{\partial \underline{\Psi}_{abc}^{PM}}{\partial \vartheta} + \frac{\partial \underline{\underline{L}}_{abc}}{\partial \vartheta} i_{abc} + \frac{1}{2} (\underline{\underline{I}}_3 \otimes i_{abc}^T) \frac{\partial \underline{\underline{\Gamma}}_{abc}}{\partial \vartheta} i_{abc} \right) \quad (4)$$

alakot veszi fel, amelyben a fázisáram, a szögsebesség és szöghelyzet az ismeretlen függvények. A feszültségegyenlet a nyomatékegyenlettel közösen megoldható csatolt differenciálegyenlet-rendszert alkot.

A háromfázisú villamos gépek szabályozása általában a forgórészhez kötött vonatkoztatási rendszerben történik, ezért kidolgoztam a kibővített modell egyenleteinek és mennyiségeinek Park- és inverz Park-átalakításait. Az összevont Hesse-mátrix Park- és inverz Park-átalakítása

$$\underline{\underline{\Gamma}}_{dq0} = (\underline{\underline{I}}_3 \otimes \underline{\underline{T}}^{T^{-1}}(\vartheta))(\underline{\underline{T}}(\vartheta) \otimes \underline{\underline{I}}_3)\underline{\underline{\Gamma}}_{abc}(\vartheta)\underline{\underline{T}}^{-1}(\vartheta) \quad \text{és} \quad (5)$$

$$\underline{\underline{\Gamma}}_{abc}(\vartheta) = (\underline{\underline{I}}_3 \otimes \underline{\underline{T}}^T(\vartheta))(\underline{\underline{T}}^{-1}(\vartheta) \otimes \underline{\underline{I}}_3)\underline{\underline{\Gamma}}_{dq0}\underline{\underline{T}}(\vartheta). \quad (6)$$

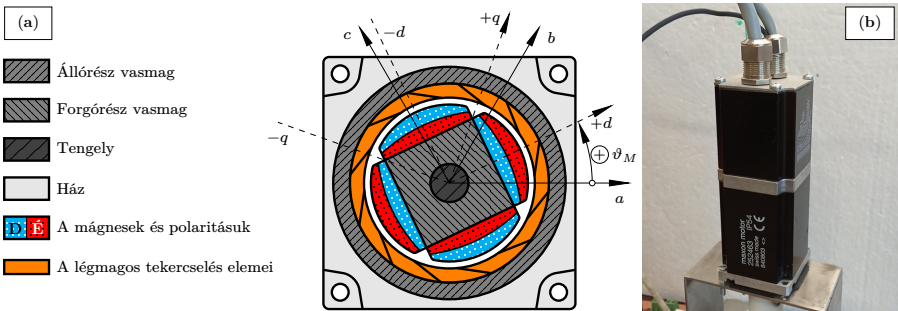
Az összevont Hesse-mátrix Park-átalakításának kidolgozása után fel tudtam írni a  $dq0$ -beli tekercsfluxus függvény másodfokú Taylor-polinomját is.

$$\underline{\Psi}_{dq0}(i_{dq0}) = \underline{\Psi}_{dq0}^{PM} + \underline{\underline{L}}_{dq0}i_{dq0} + \frac{1}{2}(\underline{\underline{I}}_3 \otimes i_{dq0})\underline{\underline{\Gamma}}_{dq0}i_{dq0} \quad (7)$$

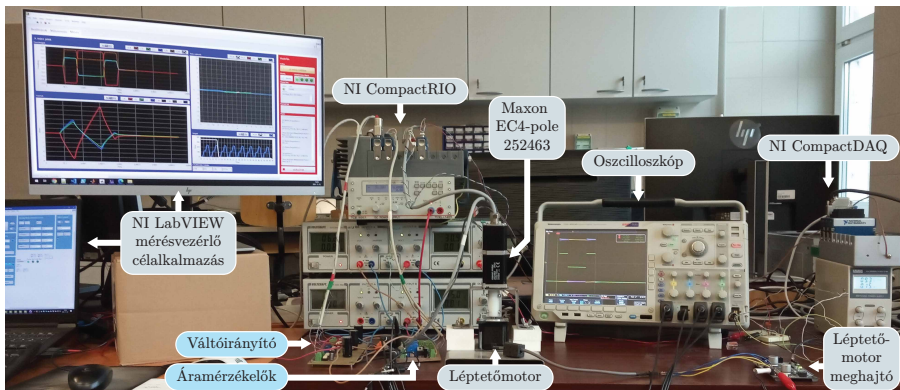
A kibővített szinkrongép modell  $dq0$ -beli feszültségegyenletete

$$\underline{u}_{dq0} = R\underline{i}_{dq0} + \underline{\underline{L}}_{dq0} \frac{d\underline{i}_{dq0}}{dt} + (\underline{\underline{I}}_3 \otimes \underline{i}_{dq0}^T)\underline{\underline{\Gamma}}_{dq0} \frac{d\underline{i}_{dq0}}{dt} + \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left( \underline{\Psi}_{dq0}^{PM} + \underline{\underline{L}}_{dq0}i_{dq0} + \frac{1}{2}(\underline{\underline{I}}_3 \otimes i_{dq0})\underline{\underline{\Gamma}}_{dq0}i_{dq0} \right). \quad (8)$$

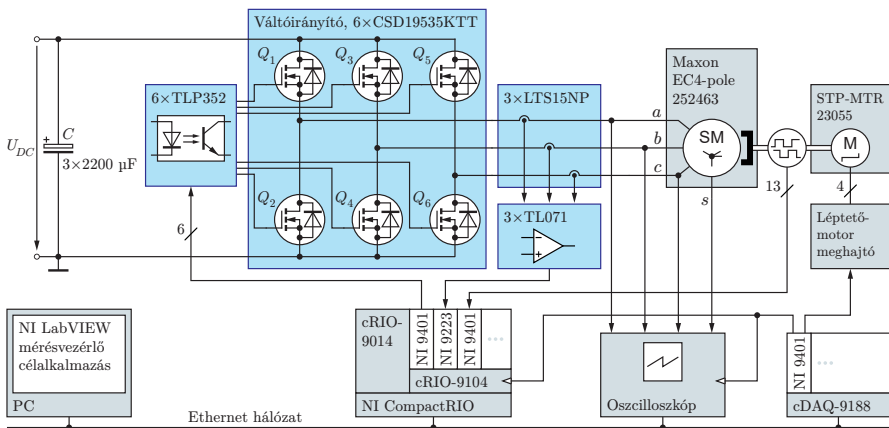
A kibővített modell polaritásfelismerésben történő felhasználhatóságának feltétele, hogy  $\underline{\underline{\Gamma}}_{abc}$  elemei meghatározó térbeli alapharmonikussal rendelkezzenek. Ennek kísérleti igazolására a 4. ábrán látható ÁMSZM típus köré mérőkönyezetet alakítottam ki (5. és 6. ábra).



4. ábra. (a) A tesztmotorként használt, kétpóluspáros, légmagos tekercselésű Maxon EC4-pole 45 252463 ÁMSZM keresztmetszete és főbb alkatrészei. (b) Az egyik tesztmotor fényképe.



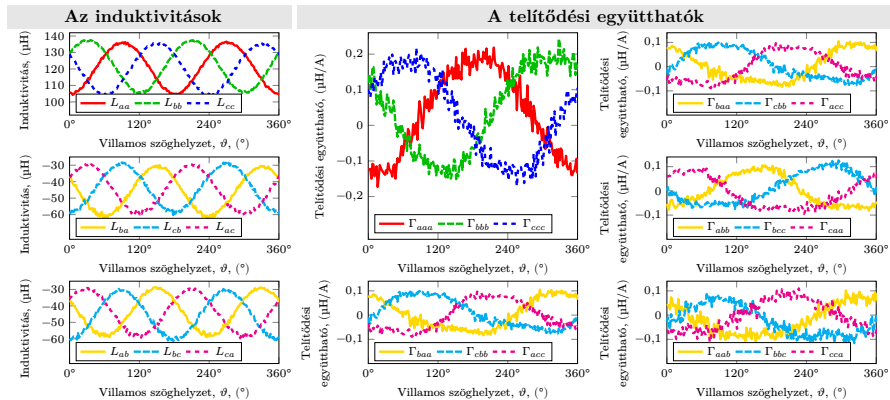
5. ábra. A kísérleti ÁMSZM hajtás és a köré épített mérőkörnyezet.



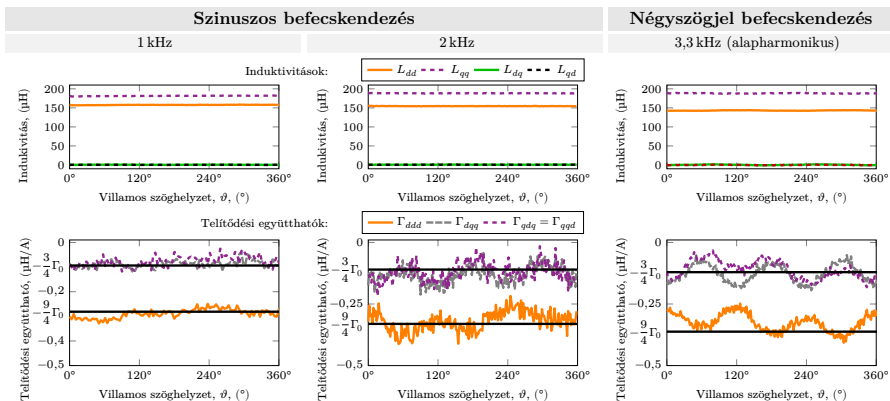
6. ábra. A kísérleti ÁMSZM hajtás és a mérőkörnyezet kapcsolási rajza.

A mérőkörnyezetben a műszervezést és a mérésfeldolgozást nagyrészt automatizáltam, így nagy szöghelyzet-felbontású méréssorozatokat tudtam elvégezni. Az elvégzett négyszög és szinuszos gerjesztésű mérések megfelelő adathalmazt szolgáltatnak a gépparaméter szöghelyzetfüggésének azonosításához és a kibővített modell érvényesítéséhez. Az induktivitások és a telítődési együtthatók azonosított értékei a 7. és 8. ábrákon láthatók.

Az  $abc$ -beli mérési eredmények igazolják a telítődési együtthatók a feltételezett térbeli alapharmonikus-tartalmának meglétét, a  $dq0$ -beliek pedig lehe-



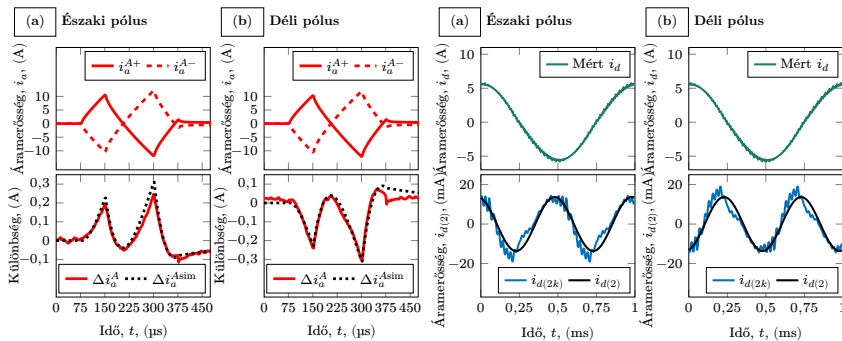
7. ábra. Az induktivitások és telítődési együtthatók szöghelyzetfüggése az állórészhez kötött  $abc$  rendszerben



8. ábra. Az induktivitások és telítődési együtthatók szöghelyzetfüggése a forgórészhez kötött  $dq0$  rendszerben

tővé tették a modell idealizálását és a  $\Gamma_0$  polaritásfüggő telítődési együttható bevezetését a Hesse-mátrixok elemeinek meghatározására.

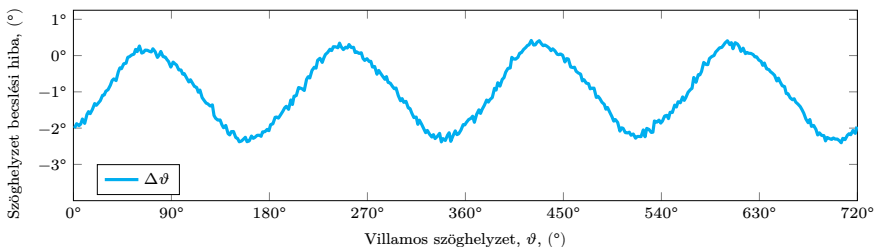
A kibővített modellel szemben az az elvárás, hogy helyesen jelezze előre az érzékelő nélküli módszerek szokásos vizsgálójelei esetén a válaszáramokban jelentkező polaritásfüggő torzulásokat. A modell érvényesítése során ezért megvizsgáltam, hogy négyszögjel és szinuszos befecskendezés esetén milyen viszonyban van a modell által előrejelzett fázisáramok tranziens viselkedése és szöghelyzet függése a kísérleti hajtáson mért áramokkal. A kísérleti eredmé-



9. ábra. A polaritás hatása négyszögjel és szinuszos befecskendezés esetén.

nyek alapján a modell helyesen jelzi előre négyszögjel befecskendezés esetén az eltérő áramválaszt a felfutó és lefutó éllel kezdődő befecskendezés esetén, és helyesen jelzi előre a polaritásfüggő második harmonikus képződést szinuszos befecskendezésnél (9. ábra).

Mind a modell, mind a mérési eredmények azt támasztották alá, hogy a négyszögjel-befecskendezés alkalmazása előnyösebb a polaritásfelismerésben, ezért erre alapozva kidolgoztam egy érzékelő nélküli módszert. A módszer kezdeti szöghelyzet meghatározási hibája villamos szögben  $-3^\circ$  és  $1^\circ$  közötti érték (10. ábra).



10. ábra. A kidolgozott kezdeti szöghelyzet meghatározó módszer becslési hibája.

## 1. tézis

Az állóhelyzetben és kis fordulatszámú történő, jelbefecskendezés alapú érzékelő nélküli polaritásfelismerés lehetővé és tervezhetővé tétele érdekében kidolgoztam egy újszerű, kibővített állandó mágneses szinkrongép modellt, amely a tekercsfluxus-áram összefüggés másodfokú Taylor-polinomján alapul. A kibővített fluxusmodell négyzetes tagja a mágnesezési görbe polaritástól függő előjelű görbületét képezi le az összevont Hesse-mátrixot alkotó telítődési együtthatókba, amelyeket villamos szögben térbeli alapharmonikus határoz meg. Kidolgoztam az állandó mágneses szinkrongépek számára mind az állórészhez kötött, mind a forgórészhez kötött koordináta-rendszerekben egy-egy olyan idealizált fluxusmodell alakot, amely mind a mérési eredményekhez, mind a villamos gépek hagyományos modellezéséhez jól illeszkedik.

A kidolgozott modell lehetővé teszi a jelbefecskendezés alapú érzékelő nélküli módszerek numerikus szimulációs környezetben történő fejlesztését.

A kapcsolódó tudományos közleményeim: [F-1], [F-2], [F-3], [F-4], [K-2], [K-3]

## 2. tézis

Mérési és paraméter identifikációs eljárásokat dolgoztam ki az érzékelő nélküli polaritásfelismerés fizikai alapját szolgáltató telítődési együtthatók szöghelyzetfüggésének meghatározására.

### 2.1. altézis

A tesztmotorok csillagpontját kivezetve egy és két fázisos méréseket végeztem négyszögjel betáplálással, és meghatároztam a telítődési együtthatók szöghelyzetfüggését az állórészhez kötött háromfázisú koordináta-rendszerben. A telítődési együtthatók villamos szögben meghatározó térbeli alapharmonikusokkal rendelkeznek, lehetővé téve a forgórész polaritásának felismerését.

### 2.2. altézis

A polaritásfüggő telítődési együttható csillagpont kivezetés nélküli mérésére kidolgoztam egy második, modulált szinuszos jelbefecskendezést alkalmazó mérési módszert.

A kapcsolódó tudományos közleményeim: [F-2], [F-3], [K-2], [E-1], [E-2]

### 3. tézis

Kísérleti úton érvényesítettem a kidolgozott újszerű állandó mágneses szinkrongép modellt, igazolva, hogy feszültségjel-befecskendezés esetén helyesen jelzi előre a polaritás információt hordozó áram-összetevők tranziens viselkedését és szöghelyzetfüggését.

#### 3.1. altézés

Háromfázisos négyszögjel-betáplálásos mérésekkel igazoltam, hogy a modell helyesen jelzi előre, hogy az azonos nagyságú, felfutó és lefutó éllel kezdődő négyszög feszültségjelekre adott áramválaszok között eltérés van. Az áramválasz-különbség villamos szöghelyzetfüggését döntően térbeli alapharmonikus határozza meg és ennek köszönhetően felhasználható a forgórész mágnesek polaritásának felismerésében.

#### 3.2. altézés

Impulzusszélesség-modulált szinuszos befecskendezéses mérésekkel igazoltam a modell közelítő megoldása által az áramokban előre jelzett polaritásfüggő frekvencia kétszereződés meglétét. A d-irányú áram időbeli második harmonikusának alapharmonikushoz viszonyított fáziseltolódása alapján a forgórész mágnesek polaritása felismerhető.

#### 3.3. altézés

Összehasonlítottam a négyszögjel-betáplálásos és a szinuszos jelbefecskendezést, és igazoltam, hogy négyszögjel-betáplálás esetén ugyanakkora áramcsúcsértékek mellett a polaritás információt hordozó áram-összetevő lényegesen nagyobb értékű, azaz állóhelyzetben, terheletlen motor esetén ezt a módszert célszerű alkalmazni a polaritásfelismerésére.

A kapcsolódó tudományos közleményeim: [F-1], [F-2], [K-1], [K-4], [E-3]

### 4. tézis

A kibővített állandó mágneses szinkrongép modellre támaszkodva kifejlesztettem egy páros bipoláris négyszög-feszültségjel befecskendezésen alapuló érzékelő nélküli kezdeti szöghelyzet meghatározó és polaritásfelismerő módszert. Az algoritmus a válaszáramok csúcsértékeiből, kis számításigényű eljárással határozza meg a forgórész szöghelyzetét, amelyhez nem igényli a gépparaméterek értékének ismeretét.

#### 4.1. altézis

A kibővített modell alapján a befecskendezési időtartam méretezésére szolgáló eljárást dolgoztam ki, amellyel a megbízható polaritásfelismerés biztosítható.

#### 4.2. altézis

A fázistekercselések közötti különbségek és aszimmetriák által okozott szisztematikus szöghelyzetbecslési hiba helyesbítésére mérés alapú eljárást dolgoztam ki.

A kapcsolódó tudományos közleményeim: [F-2], [K-1], [E-4]

### A kutatási eredmények összefoglalása

Az értekezésben egy újszerű kibővített állandó mágneses szinkrongép modellt ismertettem, és bemutattam a paramétereinek meghatározását, valamint tranziens viselkedésének és szöghelyzetfüggésének mérési úton történő érvényesítését. A modellbővítés a gép mágnesköreinek szöghelyzet és polaritásfüggő tulajdonságaira irányult. A kibővített modell újszerűségét az adja, hogy a tekercsfluxus-áram függvény másodfokú Taylor-polinomját alkalmazza, és be is építi a szinkrongép-modellezés hagyományos keretrendszerébe a Park- és inverz Park-átalakítások kidolgozásával. A modell a telítődési együtthatókat, amelyek az állórészhez kötött vonatkoztatási rendszerben meghatározó térbeli alapharmonikkussal rendelkeznek, és ennek köszönhetően felhasználhatók a polaritásfelismerésben. A mágneses telítődés számszerű jellemzésére bevezettem a  $\Gamma_0$  polaritásfüggő telítődési együtthatót.

A kibővített modell telítődési együtthatóinak mérésére egy teljesebb képet szolgáltató, de csillagpont kivezetést igénylő, és egy egyszerűsített, csillagpont kivezetést nem igénylő mérési és paraméter identifikációs eljárást is kidolgoztam, és kiépítettem egy mérőkörnyezetet, ahol a méréseket tesztmotorokon el is végeztem. Mind a mérési eredmények, mind az érvényesített modell azt igazolta, hogy a tesztmotorok esetén a polaritásfelismerés szempontjából a négyszög feszültségjel-befecskendezés alkalmazása célszerű. A modellbővítés tapasztalatait felhasználva kifejlesztettem egy nemmodulált páros négyszög feszültségjel-befecskendezésen alapuló érzékelő nélküli módszert, amely képes kezdeti szöghelyzet meghatározásra és polaritásfelismerésre.



## Közleményjegyzék

### Az értekezéshez kapcsolódó folyóiratcikkek

[F-1] Szalay, I., Fodor, D., Enisz, K., Medve, H.: Permanent Magnet Synchronous Motor Model Extension for High-Frequency Signal Injection-Based Sensorless Magnet Polarity Detection  
Energies, 15. kötet, 3. szám (2022). DOI: 10.3390/en15031131  
Hivatkozások: 3 független, 1 függő.

[F-2] Szalay, I., Fodor, D., Enisz, K., Medve, H.: Saliency Model Extension for Sensorless Initial Position and Polarity Detection of Permanent Magnet Synchronous Motors  
IEEE Access, 9. kötet (2021) 168292–168314. old. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3136917  
Hivatkozások: 0 független, 1 függő.

[F-3] Szalay, I., Fodor, D., Medve, H.: Analysis and Modeling of Slotless Permanent Magnet Synchronous Motors  
Hungarian Journal of Industry and Chemistry, 39. kötet, 1. szám (2011) 141–146. old.  
Hivatkozások: 0 független, 0 függő.

[F-4] Fodor, D., Medve, H., Szalay, I., Kulcsár, T.: Sensorless Rotor Position Detection of PMSM for Automotive Application  
Hungarian Journal of Industry and Chemistry, 38. kötet, 2. szám (2010) 207–210. old.  
Hivatkozások: 4 független, 0 függő.

### További folyóiratcikkek

[TF-1] Márton, Z., Szalay, I., Fodor, D.: Convolutional Neural Network-Based Tire Pressure Monitoring System  
IEEE Access, 11. kötet (2023) 70317–70332. old. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3294408.

[TF-2] Szalay, I., Enisz, K., Medve, H., Fodor, D.: Localization accuracy improvement of autonomous vehicles using sensor fusion and extended Kalman filter  
Hungarian Journal of Industry and Chemistry, 48. kötet (2020) 109–115. old. DOI: 10.33927/hjic-2020-16  
Hivatkozások: 0 független, 0 függő.

[TF-3] Enisz, K., Szalay, I., Kohlrusz, G., Fodor, D.: Tyre-road friction coefficient estimation based on the discrete-time extended Kalman filter

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, D: Journal of Automobile Engineering, 229. kötet, 9. szám (2015) 1158–1168. old. DOI: 10.1177/0954407014556115

Hivatkozások: 25 független, 0 függő.

[TF-4] Enisz, K., Fodor, D., Szalay, I., Kovacs, L.: Reconfigurable real-time hardware-in-the-loop environment for automotive electronic control unit testing and verification

IEEE Instrumentation And Measurement Magazine, 17. kötet, 4. szám (2014) 31–36. old. DOI: 10.1109/MIM.2014.6873729

Hivatkozások: 28 független, 0 függő.

[TF-5] Enisz, K., Szalay, I., Fodor, D., Nagy, K., Jakab, R.: Bicycle Anti-Lock Braking System Prototype Development

Acta Universitatis Sapientiae, Electrical and Mechanical Engineering, 4. kötet, 1. szám (2012) 45–57. old.

Hivatkozások: 4 független, 0 függő.

## **Az értekezéshez kapcsolódó konferenci cikkek**

[K-1] Szalay, I., Fodor, D., Enisz, K.: Comparison of square-wave and sinusoidal signal injection in sensorless polarity detection for PMSMs

Konferenciakiadvány: 2022 IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC) (2022) 583–589. old. DOI: 10.1109/PEMC51159.2022.9962876

Hivatkozások: 0 független, 0 függő.

[K-2] Szalay, I., Kohlrusz, G., Fodor, D.: Modeling of slotless surface-mounted PM synchronous motor for sensorless applications

Konferenciakiadvány: IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC) (2014) 1–5. old. DOI: 10.1109/IEVC.2014.7056198

Hivatkozások: 6 független, 4 függő.

[K-3] Szalay, I., Fodor, D.: Modeling of slotless surface-mounted PM synchronous motor for sensorless applications

Konferenciakiadvány: 17th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE) (2013) 73–78. old.

Hivatkozások: 0 független, 0 függő.

[K-4] Kohlrusz, G., Szalay, I., Fodor, D.: OrCAD PSpice Implementation of a Realistic Three-Phase PMSM Model for Diagnostic Purposes

Konferenciakiadvány: 2019 IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC) (2019) 372–376. old. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785371

Hivatkozások: 1 független, 1 függő.

[K-5] Kohlrusz, G., Szalay, I., Fodor, D.: Telítődési jelenség mérése és modellezése légmagos tekerccselésű állandó mágneses szinkron motor érzékelő nélküli pozíció meghatározásához  
Konferenciakiadvány: Proceedings of Factory Automation 2013 (2013) 1. old.  
Hivatkozások: 0 független, 0 függő.

### **További konferenciatickek**

[TK-1] Enisz, K., Fodor, D., Szalay, I., Kohlrusz, G.: Improvement of active safety systems by the extended Kalman filter based estimation of tire-road friction coefficient  
Konferenciakiadvány: IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC) (2014) 1–5. old. DOI: 10.1109/IEVC.2014.7056186  
Hivatkozások: 5 független, 0 függő.

[TK-2] Fodor, D., Enisz, K., Szalay, I., Speiser, F.: Elektronikus vezérlőegységek járműdinamikán alapuló tesztelése valósídejű HIL szimulátoron  
Konferenciakiadvány: XIII. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika konferencia (ENELKO 2012) (2012) 2. old.  
Hivatkozások: 0 független, 0 függő.

### **Az értekezéshez kapcsolódó konferencia-előadások**

[E-1] Szalay, I. *Mérőkönyvet fejlesztése önvezető jármű kisteljesítményű villamos hajtásainak vizsgálatára.* OGÉT 2019 XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia. 2019.

[E-2] Szalay, I., Kohlrusz, G., Fodor, D. *Including the shaft position information in the model of an PMSM motor for sensorless control application.* Workshop on Design, Simulation, Optimization and Control of Green Vehicles and Transportation. 2014.

[E-3] Szalay, I., Fodor, D., Enisz, K. *Állandó mágneses szinkron motorok érzékelő nélküli polaritás meghatározása szinuszos nagyfrekvenciás jelbefecskendezéssel.* Autonóm Járművek Konferencia – Jövőformáló járműipari kutatások. 2021. nov.

[E-4] Szalay, I., Fodor, D. *Állandó mágneses szinkron motorok érzékelő nélküli kezdeti szög-helyzet meghatározása.* Digitális Járműipari Kutatások a Széchenyi István Egyetemen. 2021. máj.

### **További konferencia-előadások**

[TE-1] Szalay, I. *Vehicle dynamics based localization accuracy improvement of autonomous vehicles.* Autonóm Járművek Konferencia – Intelligens Közlekedési Rendszerek A Fenntarthatóságért. 2020. nov.

[TE-2] Enisz, K., Szalay, I., Fodor, D., Kohlrusz, G., Márton, Z., Nagy, K. *Extended Kalman filter based friction coefficient estimation in HIL environment.* Workshop on Design, Simulation, Optimization and Control of Green Vehicles and Transportation. 2014.

# Irodalomjegyzék

- [1] Plunkett, A. B., Turnbull, F. G.: Load-Commutated Inverter/Synchronous Motor Drive Without a Shaft Position Sensor  
IEEE Transactions on Industry Applications, IA-15. kötet, 1. szám (1979) 63–71. old. DOI: 10.1109/TIA.1979.4503613.
- [2] Garces, L. J.: Parameter Adaption for the Speed-Controlled Static AC Drive with a Squirrel-Cage Induction Motor  
IEEE Transactions on Industry Applications, IA-16. kötet, 2. szám (1980) 173–178. old. DOI: 10.1109/TIA.1980.4503768.
- [3] Jeong, Y.-S., Lorenz, R., Jahns, T., Sul, S.-K.: Initial rotor position estimation of an interior permanent-magnet synchronous machine using carrier-frequency injection methods  
IEEE Transactions on Industry Applications, 41. kötet, 1. szám (2005) 38–45. old. DOI: 10.1109/TIA.2004.840978.
- [4] De Kock, H. W., Kamper, M. J., Kennel, R. M.: Anisotropy comparison of reluctance and PM synchronous machines for position sensorless control using HF carrier injection  
IEEE Transactions on Power Electronics, 24. kötet, 8. szám (2009) 1905–1913. old. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2017537.
- [5] Lehmann, O., Schuster, J., Roth-Stielow, J.: Sensorless Control Techniques as Redundancy for the Control of Permanent Magnet Synchronous Machines in Electric Vehicles  
Konferenciakiadvány: 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) (2014) 1–6. old. DOI: 10.1109/VPPC.2014.7007127.
- [6] Jarzebowicz, L., Karwowski, K., Kulesza, W. J.: Sensorless algorithm for sustaining controllability of IPMSM drive in electric vehicle after resolver fault  
Control Engineering Practice, 58. kötet (2017) 117–126. old. DOI: 10.1016/j.conengprac.2016.10.004.
- [7] Rind, S. J., Jamil, M., Amjad, A.: Electric Motors and Speed Sensorless Control for Electric and Hybrid Electric Vehicles: A Review  
Konferenciakiadvány: 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC) (2018) 1–6. old. DOI: 10.1109/UPEC.2018.8541871.
- [8] Wei, J., Xu, H., Zhou, B., Zhang, Z., Gerada, C.: An Integrated Method for Three-Phase AC Excitation and High-Frequency Voltage Signal Injection for Sensorless Starting of Aircraft Starter/Generator  
IEEE Transactions on Industrial Electronics, 66. kötet, 7. szám (2019) 5611–5622. old. DOI: 10.1109/TIE.2018.2871795.
- [9] Hua, Y., Zhu, H.: Sensorless Control of Bearingless Permanent Magnet Synchronous Motor Based on LS-SVM Inverse System  
Electronics, 10. kötet, 3. szám (2021). DOI: 10.3390/electronics10030265.
- [10] Zhao, Y., Yu, H., Wang, S.: An Improved Super-Twisting High-Order Sliding Mode Observer for Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor  
Energies, 14. kötet, 19. szám (2021). DOI: 10.3390/en14196047.
- [11] Wu, R., Slemon, G. R.: A permanent magnet motor drive without a shaft sensor  
IEEE Transactions on Industry Applications, 27. kötet, 5. szám (1991) 1005–1011. old. DOI: 10.1109/28.90359.
- [12] Bojoi, R., Pastorelli, M., Bottomley, J., Giangrande, P., Gerada, C.: Sensorless control of PM motor drives – A technology status review  
Konferenciakiadvány: 2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD) (2013) 168–182. old. DOI: 10.1109/WEMDCD.2013.6525177.

- [13] Briz, F., Degner, M. W.: Rotor position estimation – A review of high-frequency methods  
IEEE Industrial Electronics Magazine, 5. kötet, 2. szám (2011) 24–36. old. DOI: 10.1109/IEE.2011.941118.
- [14] Holtz, J.: Initial rotor polarity detection and sensorless control of PM synchronous machines  
Konferenciakiadvány: Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting (2006) 2040–2047. old. DOI: 10.1109/IAS.2006.256816.
- [15] Liu, Y., Fang, J., Tan, K., Huang, B., He, W.: Sliding Mode Observer with Adaptive Parameter Estimation for Sensorless Control of IPMSM  
Energies, 13. kötet, 22. szám (2020). DOI: 10.3390/en13225991.
- [16] Marchesoni, M., Passalacqua, M., Vaccaro, L., Calvini, M., Venturini, M.: Performance improvement in a sensorless surface-mounted PMSM drive based on rotor flux observer  
Control Engineering Practice, 96. kötet (2020) 104276–104286. old. DOI: 10.1016/j.conengprac.2019.104276.
- [17] Dilys, J., Stankevič, V., Łuksza, K.: Implementation of Extended Kalman Filter with Optimized Execution Time for Sensorless Control of a PMSM Using ARM Cortex-M3 Microcontroller  
Energies, 14. kötet, 12. szám (2021). DOI: 10.3390/en14123491.
- [18] Robeischl, E., Schrödl, M.: Optimized INFORM measurement sequence for sensorless PM synchronous motor drives with respect to minimum current distortion  
IEEE Transactions on Industry Applications, 40. kötet, 2. szám (2004) 591–598. old. DOI: 10.1109/TIA.2004.824510.
- [19] Bolognani, S., Calligaro, S., Petrella, R., Tursini, M.: Sensorless Control of IPM Motors in the Low-Speed Range and at Standstill by HF Injection and DFT Processing  
IEEE Transactions on Industry Applications, 47. kötet, 1. szám (2011) 96–104. old. DOI: 10.1109/TIA.2010.2090317.
- [20] Spießberger, R., Brunner, A., Schrödl, M.: Saliency-Based Position Sensorless Control of a Heavily Cross-Saturated PMSM  
Konferenciakiadvány: IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (2021) 1–7. old. DOI: 10.1109/IECON48115.2021.9589210.
- [21] Repecho, V., Waqar, J. B., Biel, D., Dòria-Cerezo, A.: Zero Speed Sensorless Scheme for Permanent Magnet Synchronous Machine Under Decoupled Sliding-Mode Control  
IEEE Transactions on Industrial Electronics, 69. kötet, 2. szám (2022) 1288–1297. old. DOI: 10.1109/TIE.2021.3062260.
- [22] Vas, P.: Sensorless Vector and Direct Torque Control  
Könyv: Oxford University Press, USA (1998). ISBN: 9780198564652.
- [23] Wang, G., Valla, M., Solsona, J.: Position Sensorless Permanent Magnet Synchronous Machine Drives—A Review  
IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67. kötet, 7. szám (2020) 5830–5842. old. DOI: 10.1109/TIE.2019.2955409.
- [24] Zhao, C., Tanaskovic, M., Percacci, F., Mariéthoz, S., Gnos, P.: Sensorless Position Estimation for Slotless Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors in Full Speed Range  
IEEE Transactions on Power Electronics, 34. kötet, 12. szám (2019) 11566–11579. old. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2908408.

- [25] Wang, Z., Yao, B., Guo, L., Jin, X., Li, X., Wang, H.: Initial Rotor Position Detection for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on High-Frequency Voltage Injection without Filter  
World Electric Vehicle Journal, 11. kötet, 4. szám (2020). DOI: 10.3390/wevj11040071.
- [26] Seilmeier, M., Piepenbreier, B.: Modeling of PMSM with multiple saliencies using a stator-oriented magnetic circuit approach  
Konferenciakiadvány: 2011 IEEE International Electric Machines Drives Conference (2011) 131–136. old. DOI: 10.1109/IEMDC.2011.5994796.
- [27] Tursini, M., Petrella, R., Parasiliti, F.: Initial rotor position estimation method for PM motors  
IEEE Transactions on Industry Applications, 39. kötet, 6. szám (2003) 1630–1640. old. DOI: 10.1109/TIA.2003.818977.
- [28] Lee, W.-J., Sul, S.-K.: A New Starting Method of BLDC Motors Without Position Sensor  
IEEE Transactions on Industry Applications, 42. kötet, 6. szám (2006) 1532–1538. old. DOI: 10.1109/TIA.2006.882668.
- [29] Lin, M., Zhang, Z., Lin, K.: A novel and easy-realizing initial rotor position detection method and speedup algorithm for sensorless BLDC motor drives  
Konferenciakiadvány: 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems (2008) 2860–2865. old.
- [30] Hu, H., Xu, G., Hu, B.: A New Start Method for Sensorless Brushless DC Motor Based on Pulse Injection  
Konferenciakiadvány: Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (2009) 1–5. old. DOI: 10.1109/APPEEC.2009.4918079.
- [31] Murakami, S., Shiota, T., Ohto, M., Ide, K., Hisatsune, M.: Encoderless Servo Drive With Adequately Designed IPMSM for Pulse-Voltage-Injection-Based Position Detection  
IEEE Transactions on Industry Applications, 48. kötet, 6. szám (2012) 1922–1930. old. DOI: 10.1109/TIA.2012.2226132.
- [32] Wang, Z., Cao, Z., He, Z.: Improved Fast Method of Initial Rotor Position Estimation for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor by Symmetric Pulse Voltage Injection  
IEEE Access, 8. kötet (2020) 59998–60007. old. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2983106.
- [33] Kim, H., Huh, K.-K., Lorenz, R., Jahns, T.: A novel method for initial rotor position estimation for IPM synchronous machine drives  
IEEE Transactions on Industry Applications, 40. kötet, 5. szám (2004) 1369–1378. old. DOI: 10.1109/TIA.2004.834091.
- [34] Filka, R., Balazovic, P., Dobrucky, B.: Transducerless speed control with initial position detection for low cost PMSM drives  
Konferenciakiadvány: 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (2008) 1402–1408. old. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635464.
- [35] Zossak, S., Stulraiter, M., Makys, P., Sumega, M.: Initial Position Detection of PMSM  
Konferenciakiadvány: 2018 IEEE 9th International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED) (2018) 12–17. old. DOI: 10.1109/SLED.2018.8486043.
- [36] Kumar, P., Bottesi, O., Calligaro, S., Alberti, L., Petrella, R.: Self-Adaptive High-Frequency Injection Based Sensorless Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drives  
Energies, 12. kötet, 19. szám (2019). DOI: 10.3390/en12193645.



