

Fluxus és Nyomatékhibák Direkt Nyomatékszabályozott Rendszerben

Szabó Gergely

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Villamos Energetika Tanszék,

Magyarország, 1111, Budapest, Egrý József Utca 18, V1 épület, III-IV. Emelet

szabogergely1991@gmail.com

Kivonat: Az 1980-as évek végére a mezőorientált szabályozási módok az ipari alkalmazások döntő többségében elterjedtek, de ezzel párhuzamosan egy új, közvetlen szabályozás jelent meg a DTC formájában[1][2]. A fejlesztések fő irányvonala egy olyan új módszer keresése volt, amely korábbi megoldásokkal szemben jobb dinamikát és nyomatékszabályozást tud megvalósítani jóval egyszerűbb irányítási struktúrával. Egy DTC-n alapuló hajtás nem igényel koordináta transzformációkat, áramszabályozási hurkokat és ISZM modulátorokat, valamint a mezőorientált szabályozásokra jellemző paraméter érzékenységet is nagymértékben lecsökkenti. A Simulink alapú szimulációk során nem várt fluxus, illetve nyomatékhibák jelentkeztek kisfrekvenciás és generátoros üzemmódokban, amelyeket egy igényes hajtás létrehozásához mindképp kezelni kell. A vizsgálat rámutatott, hogy ezen hibák könnyen megelőzhetőek a kétszintű kapcsolási táblát használva, azonban ennek alkalmazása nagyobb kapcsolási frekvenciát is eredményez. A probléma kezelésére egy új algoritmust implementáltam, amely a kétszintű táblázatból kiválasztja a megfelelő aktív vektort mindaddig, amíg a kritikus üzemiállapotok fennállnak, egyébként a háromszintű táblázatot használja a kapcsolási frekvencia csökkentése érdekében.

Kulcsszavak: Direkt fluxus és nyomatékszabályozás; DTC; Fluxus és nyomatékhiba; MATLAB, Simulink

1 Bevezetés

Manapság a szabályozott villamos hajtások rohamos fejlődése és nagyszámú elterjedése miatt a villamos forgógépekkel és hajtásokkal szembeni elvárások egyre nagyobbak.

A fejlesztő mérnökök számára a szakirodalom számos hajtás algoritmust kínál fel, amelyek előnyeit és hátrányait az adott applikációhoz felállított szempontrendszer

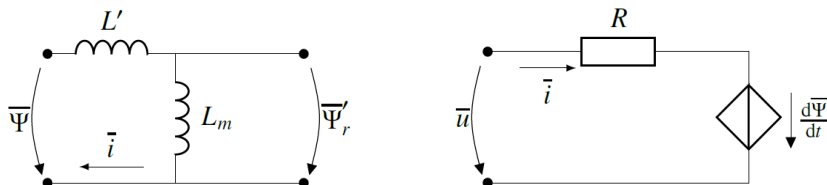
alapján mérlegelve a szabályozási feladatot megfelelő módon kielégítő megoldás kiválasztható. A rendelkezésre álló módszereket a szabályozott jellemzők közvetett vagy közvetlen szabályozása alapján csoportosíthatjuk.

Közvetlen szabályozást választva az ISZM modulátort alkalmazó közvetett megoldásoknál jobb dinamikát lehet elérni, illetve a paraméterérzékenység is nagymértékben csökkenthető. Fontos azonban szem előtt tartani, hogy ezen megoldások rendszerint változó kapcsolási frekvenciát eredményeznek.

A cikk célja a direkt fluxus és nyomatékszabályozás általános bemutatásán túl egy igényes hajtáshoz szükséges kiegészítő algoritmusok, illetve a szimulációk során, meghatározott üzemállapotokban jelentkezett fluxus és nyomatékhibák és az ezekre kidolgozott megoldás ismertetése. Ezen módszerek állandómágneses szinkron és kalickás forgórészű aszinkron gépes hajtásokra is alkalmazhatóak, melyek a kapcsolási frekvenciát a lehető legkisebb mértékben növelik.

2 Direkt fluxus és nyomatékszabályozás

Az 1. ábrán látható aszinkron gép helyettesítő kép alapján a felírhatjuk az állórész fluxusegyenletét, amely segítségével az állórész árama az (1) egyenletben látható módon fejezhető ki.



1. ábra

Fluxusokra és feszültségekre felírható helyettesítő kép

$$\bar{i} = \frac{\bar{\psi} - \bar{\psi}_R}{L'} \quad (1)$$

Ezt felhasználva a gép elektromechanikai nyomatéka kifejezhető az álló- és forgórész fluxusok nagyságával, illetve a vektoraik által bezárt szög segítségével, ahogy azt (2) egyenlet mutatja.

$$|m| = \left| \frac{3}{2} \bar{\psi} \times \bar{i} \right| = \frac{3}{2L'} \psi_r \psi \sin(\delta) \quad (2)$$

ahol δ az állórész és forgórész fluxusvektor által bezárt szög. A 1. ábrán látható helyettesítő kép alapján felírható a gép állórészének (3) feszültségegyenlete.

$$\bar{u} = R\bar{i} + \frac{d\bar{\psi}}{dt} \approx \frac{d\bar{\psi}}{dt} \quad (3)$$

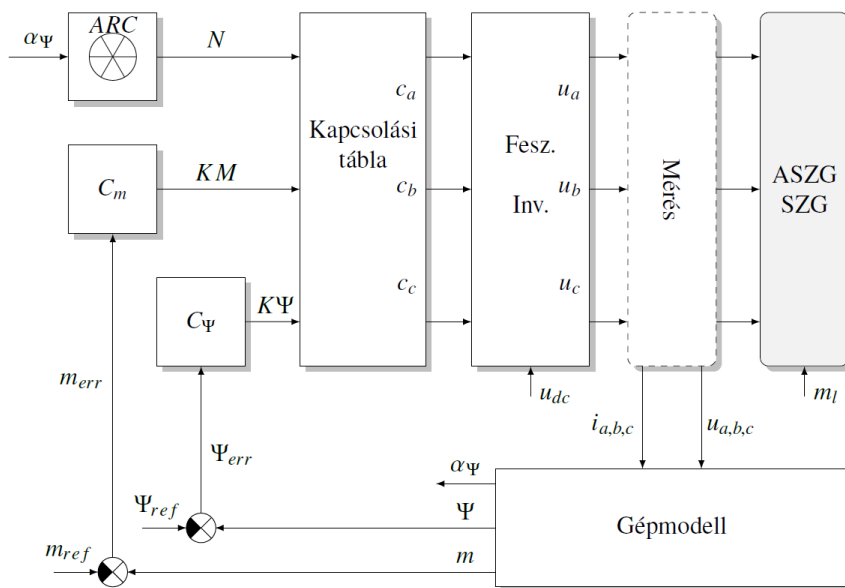
Észrevehető, hogyha az állórész ellenállása kellően kicsi, akkor a fluxus sebességvektor közel egyenlő nagyságú lesz a gépre kapcsolt feszültségvektorral. Egy háromfázisú villamos forgógép esetén az állórész kör időállandója rendszerint legalább egy nagyságrenddel kisebb, mint a forgórészé, így az állórész fluxusa gyorsabb változásokra képes a forgórész fluxussal szemben. A DTC pontosan ezt használja ki, hiszen az (2) egyenlet alapján könnyen belátható, hogy a leggyorsabb nyomatékváltozást a vektorok által bezárt szög manipulálásával lehet elérni. Egy térvektoros szabályozóhoz hasonlóan a síkot a fluxusvektor aktuális pozíciója alapján 6 darab 60°-os szektorra oszthatjuk, azonban ezek a feszültségvektorok által kijelöltekhez képest 30°-kal el vannak forgatva.

Belátható, hogy a fluxusvektorok által bezárt szög a sztátor fluxusvektorra közel merőleges feszültségvektorral változtatható a leggyorsabban. Ez lehetőséget ad a feszültségvektorok osztályozására a fluxusvektorra gyakorolt hatásuk alapján, így $\omega_{\psi_r} > 0$ és $m > 0$ feltételekkel az n -edik szektorban:

- $\bar{u}(n-1)$, $\bar{u}(n)$, $\bar{u}(n+1)$ vektorok növelik a fluxust,
- $\bar{u}(n+2)$, $\bar{u}(n+3)$, $\bar{u}(n+4)$ vektorok csökkentik a fluxust,
- $\bar{u}(n+1)$, $\bar{u}(n+2)$ vektorok növelik a nyomatékot,
- $\bar{u}(n-1)$, $\bar{u}(n-2)$ vektorok csökkentik a nyomatékot,
- $\bar{u}(7)$ megállítja a fluxusvektort és csökkenti nyomatékot.

A 2. ábra egy DTC-n alapuló rendszer blokkdiagramját mutatja be, ahol C_{ψ} és C_m fluxus- és nyomatékszabályozók, ARC jelű blokk a fluxusvektor aktuális pozícióját szolgáltatja.

A fluxus kétpont szabályozó egy kétszintű komparátor $K_{\psi} = 0,1$ lehetséges visszatérési értékkel. A nyomatékszabályozó felépítését az adott alkalmazáshoz szokták igazítani: háromszintű komparátort alkalmaznak például egy négynegyedes járműhajtásban, kétszintű táblázatot használnak egy szélturbina kétnegyedes hajtásában. A háromszintű vezérlő $K_M = -1,0,1$ visszatérési értékkel rendelkezik a $m_{err} = m_{ref} - m$ nyomatékhiba függvényében, míg a kétszintű verzió kimenete 0,1 vagy -1, 1 lehet. A K_{ψ} , K_M és N értékeit figyelembe véve két különböző kapcsolási tábla írható fel a 1. táblázatnak megfelelő módon.



2. ábra

Direkt nyomatékszabályozott rendszer blokkdiagramja

1.táblázat

Háromszintű és kétszintű kapcsolási táblázat

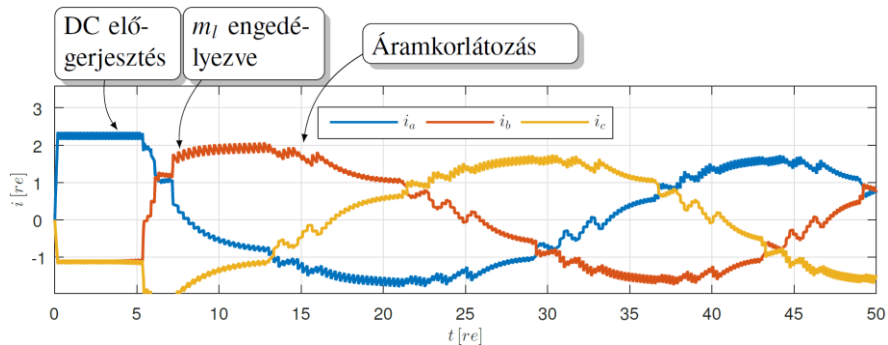
$K\psi$	KM	N					
		1	2	3	4	5	6
	1	2	3	4	5	6	1
1	0	7P	7N	7P	7N	7P	7N
	-1	6	1	2	3	4	5
	1	3	4	5	6	1	2
0	0	7P	7N	7P	7N	7P	7N
	-1	5	6	1	2	3	4

$K\psi$	KM	N					
		1	2	3	4	5	6
	1	2	3	4	5	6	1
1	1	2	3	4	5	6	1
	-1	6	1	2	3	4	5
	1	3	4	5	6	1	2
0	1	3	4	5	6	1	2
	-1	5	6	1	2	3	4

3 Kiegészítő algoritmusok

3.1 Indítási tranziens problémák és áramkorlátozás

DTC-t használva az áramok nagyságát állandósult állapotban a fluxuson és a nyomatékon keresztül korlátozzák a szabályozók. Ez azonban nem elégséges, mivel kezdetben, amíg a sztátor fluxus nem éri el a névleges értékét túlságosan nagy indítási áram alakulhat ki.



3. ábra

Indítási stratégia és áramkorlátozás

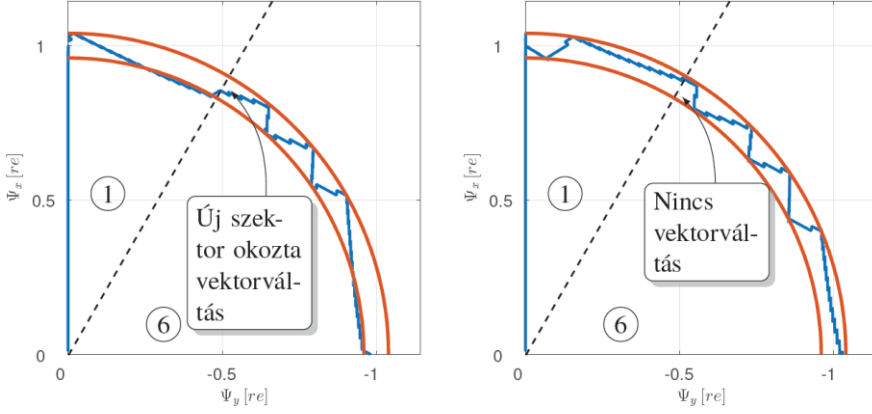
A hajtás indítását követően KM -et 1-re, N -et pedig 1,2..6 között bármely tetszőleges értékre kell állítani, továbbá a terhelő nyomatékot is csak akkor szabad engedélyezni, ha az állórész fluxus eléri a névleges értékét. Észrevehető, hogy a 1. táblázat alapján ez egyenáramú előgerjesztést valósít meg, ahogy az a 3. ábrán is látható.

A hajtás biztonságos működéséhez elengedhetetlen egy áramkorlátozó algoritmus. Ezt szimulációkban az aktuális vektor figyelembevételével kiválasztott nullvektorok beiktatásával oldattam meg [3]. A korlátozás aktív vektorok segítségével is megoldható, azonban ezen megoldások rendszerint kettes átkapcsolásokat eredményeznek.

3.2 Vektorváltások megszüntetése fluxus szektorváltáskor

Könnyen belátható, hogy a 2. ábrán vázolt ARC blokk azonnal megváltoztatja a kimenetét, ha a fluxusvektor szektort vált, ami a 4. ábrán látható hatással van a fluxusvektor trajektóriájára. Ez a változás a kapcsolási táblázatból azonnal egy új vektor címez ki, így kényszerítve a fluxusvektort irányváltoztatásra az alsó vagy a felső korlát elérése előtt.

Ezen nemkívánatos kommutációk elkerülhetők, ha N értékét csakis akkor frissítjük, ha a fluxus eléri az alsó vagy a felső korlátot.



4. ábra

Fluxus szektorváltás okozta vektorváltások megszüntetése

3.3 Mezőgyengítés

A 2. ábrán látható elrendezést egy fölérendelt fordulatszám szabályozási körrel egészítettem ki. Nagyobb fordulatszám tartományban az állórész fluxus nagyságát a (4) egyenlet alapján csökkenteni kell, annak érdekében, hogy a gép feszültsége ne haladja meg a megengedett maximumát.

$$\psi_{ref} = \frac{\omega_n}{|\omega|} \psi_n \quad (4)$$

Könnyen belátható, hogy egy aszinkron gép esetén a fluxus korlátozásával közvetett módon i_d áram is kézben tartható. Egy jó dinamikájú hajtáshoz szükséges a nyomaték alapjelet is korlátozni, mivel a fluxus csökkenésével a gép nyomaték terhelhetősége is lecsökken. A szimulációs eredmények kiértékelése után a (5) egyenletben részletezett, rotor fluxussal arányos korlátozás bizonyult a leghatékonyabbnak. A gépre felírható nyomatékegyenlet értelmében, ez jó korlátot ad a nyomatéknak és egyben i_q áramnak is.

$$m_{ref} = \begin{cases} k\psi_{ref}, & \text{ha } m_{ref} > k\psi_{ref}, \\ -k\psi_{ref}, & \text{ha } m_{ref} < -k\psi_{ref}, \\ m_{ref}, & \text{egyébként.} \end{cases} \quad (5)$$

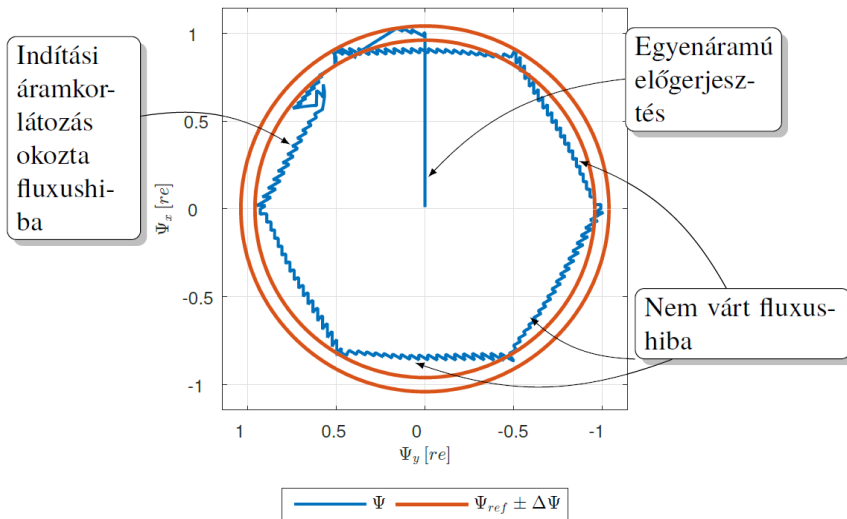
4 Fluxus és nyomatékhibák jellemzése

A főlérendelt fordulatszám szabályozási hurokkal ellátott DTC alapú hajtástól elvártam, hogy képes legyen négynegyedes üzem megvalósítására is akár mezőgyengítéses üzemben is.

Észrevettem, hogy egy háromszintű táblázatot használó direkt nyomatékszabályozott rendszer néhány üzemállapotban nem képes a fluxust és a nyomatékot az előírt tolerancia sávon belül tartani. Ezen események akkor figyelhetők meg, ha

- a fordulatszám alapjel kicsi, rendszerint a néveleges érték 5%-a alatt van és zérus, vagy csak nagyon kicsi terhelő nyomatékot kapcsolunk a rendszerre,
- a fordulatszám alapjel előjelet vált, amely hatására a gép generátoros üzembe megy át. Ez a jelenség mezőgyengítéses üzemben még kritikusabbá válik.

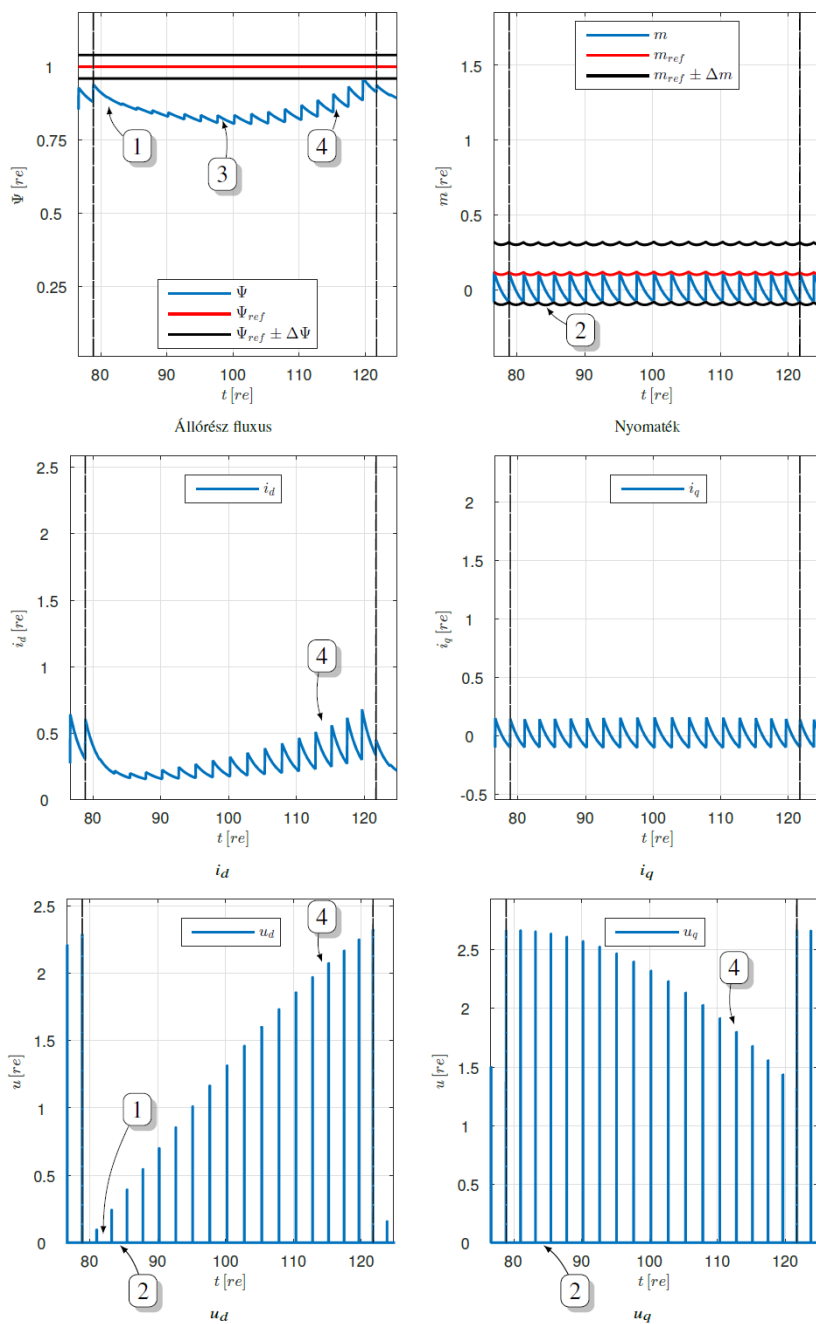
4.1 Fluxushibák kis fordulatszám esetén



5. ábra

Fluxushiba kis fordulatszám esetén

A 5.ábra egy torzult fluxusvektor trajektóriát mutat be $\omega_{ref} = 0.025re$ és $m_l = 0re$ bemenő paraméterekkel. A hiba közben lejátszódó folyamatot a 6. ábra részletezi.



6. ábra

Kis fordulatszámokon jelentkező fluxushiba

A folyamat legelején a fluxusvektor belép az új szektorba, amely a fenti példában a negyedik szektort jelenti, miközben a gép kapcsain $7N$ térvektor van jelen, mindaddig, amíg a nyomaték el nem éri a megengedett minimumát^[1]. Amint ez bekövetkezik, KM értéke 1-re változik, így a háromszintű táblázatból a szabályozók $\bar{u}(5)$ vektort választják ki a nyomaték növelése érdekében.

Ebben a pontban közel 90° -ot zár be a fluxusvektor és a feszültségvektor a közös koordináta-rendszerben, így az utóbbi szinte csak q irányú komponenssel rendelkezik^[2]. A kalickás forgórészű aszinkron gépre felírható differenciálegyenlet-rendszer [4] [5] alapján ilyen bemeneti értékekkel i_q és ezáltal nyomaték sokkal gyorsabban változik, mint i_d , amely a fluxus nagyságával arányos. Ezt az aktív feszültségvektort a szabályozók csak addig választják ki, amíg a nyomaték el nem éri a referencia értéket. Azonban u_d ilyen kicsi aránya u_q komponenshez képest nem teszi lehetővé, hogy a fluxus amplitúdója kellőképpen növekedjen ez idő alatt.

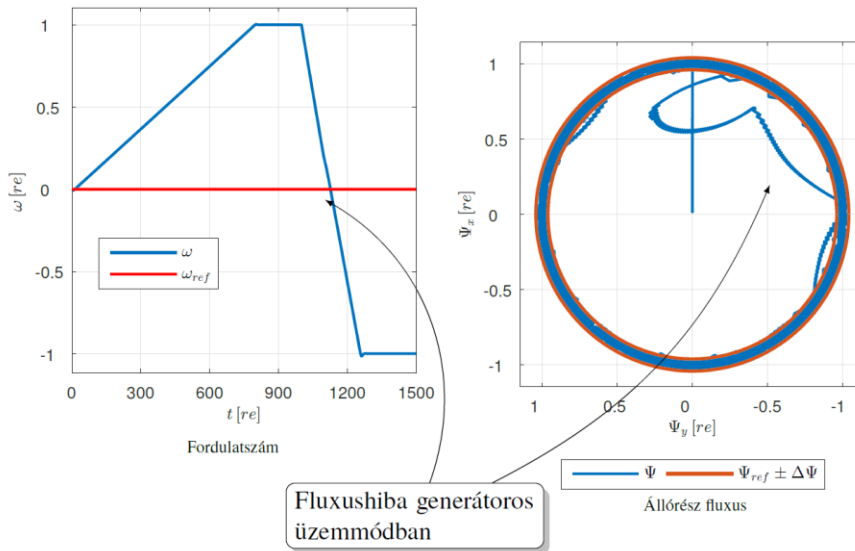
Ezt követően a nyomaték csökkenéshez szükséges $7N$ feszültségvektor jelenik meg újra a gép kapcsain, de sokkal hosszabb ideig, mint az őt megelőző aktív vektor. Észrevetendő, hogy ez alatt az állórész ellenállása miatt az állórész árama elkezd csökkenni, amely az előzőekhez képest még nagyobb sztátor fluxus csökkenést idéz elő^[3].

Ez a folyamat ismétlődik addig, amíg az állórész fluxusvektor belép a szektor utolsó negyedébe, ahol a kiválasztott aktív vektor és fluxusvektor közötti szög már kisebb mint 45° . Ebben a tartományban u_d komponens nagyobb mint u_q , így a kívánt nyomatékváltozás elérése érdekében a szabályozók hosszabb ideig alkalmazzák a kiválasztott aktív vektort, amely másodszor a fluxus növekedését is segíti^[4].

Összességében ezt a problémát u_d és u_q egy szektoron belüli, hosszú ideig tartó egymáshoz viszonyított kicsi aránya okozza, továbbá, hogy a háromszintű kapcsolási tábla elsősorban a nyomaték előírt értékét biztosítja, de a fluxusét nem.

4.2 Fluxus és nyomatékhibák generátoros üzemmódban

Az előbb részletezethez nagyon hasonló jelenség figyelhető meg, amikor a gép generátorosan fékez. A 7. ábrán egy torzult fluxusvektor trajektória látható $m_l = 1re$ terhelő nyomatékkal és szintén az 7. ábrán látható fordulatszám alapjellel.



7. ábra

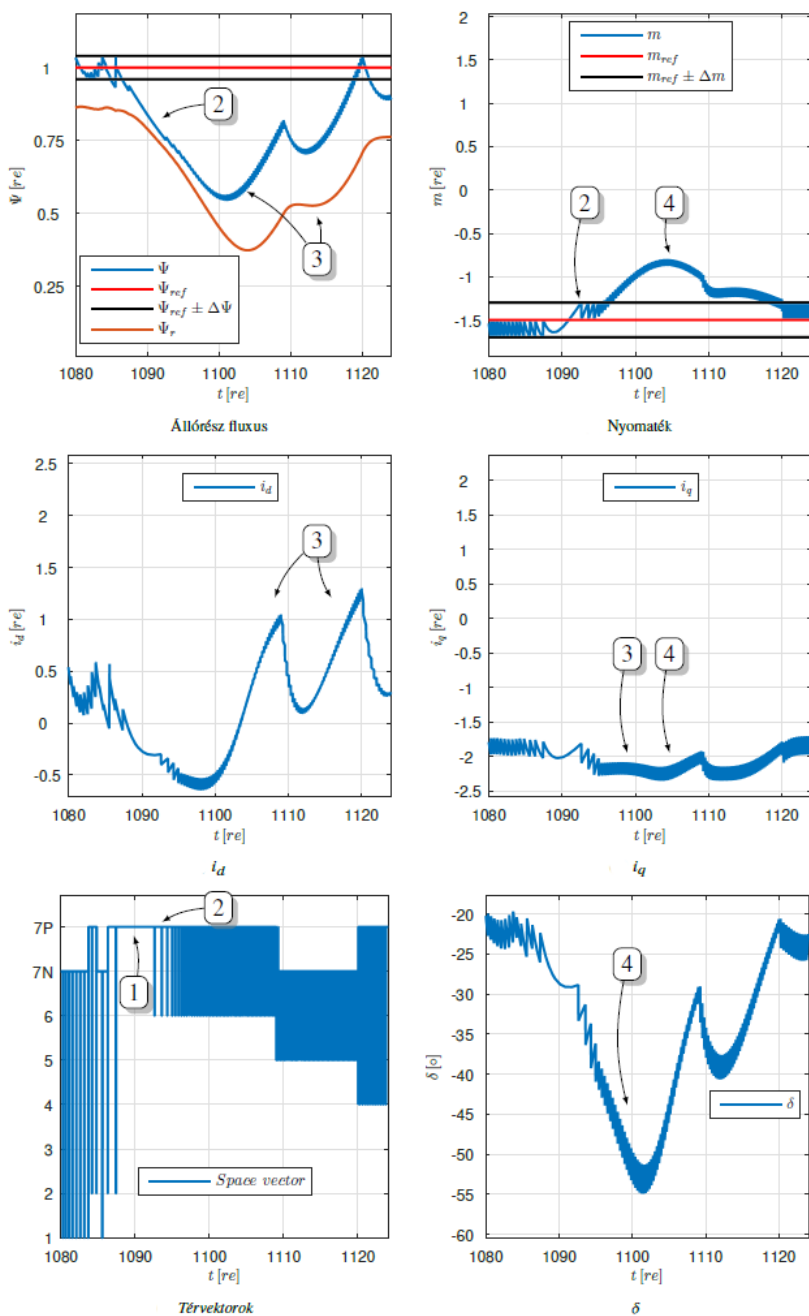
Fluxushiba generátoros üzemmódban

A 8. ábrán látható nyomaték- és fluxushiba akkor jelentkezik, ha a villamos forgógép generátorosan fékez és a szögsebesség egy kritikus érték alá csökken. Ebben az üzemállapotban a folyamatosan csökkenő fordulatszám és a szabályozója által előírt legnagyobb negatív nyomaték miatt a túl sokszor és túl hosszú ideig jelennek meg nullvektorok a gép kapcsain ^[1].

Ez a folyamat addig ismétlődik, amíg az áramvektor meghaladja a megengedett maximális hosszát, amely hatására az áramkorlátozó algoritmus újabb nullvektorokat kezd el beiktatni. A nullvektorok sokasága a nyomaték növekedését segítik elő, azonban ez párhuzamosan sztátor és rotor fluxus csökkenését is eredményez ^[2].

Az alkalmazott áramkorlátozási módszer segítségével az áram a megengedett maximális értéke alatt tartható, de működése a gép ezen üzemállapotában erős tranziens viselkedést vált ki i_d áramban, ami nagymértékben befolyásolja a fluxusokat ^[3].

A (2) egyenlet alapján a gép nyomatéka nem csak a fluxusvektorok által bezárt szögtől, hanem a vektorok hosszától is függ. Ennek eredményeként nagy i_q ellenére a nyomaték abszolút értéke mégis csökkenni kezd ^[4].



8. ábra

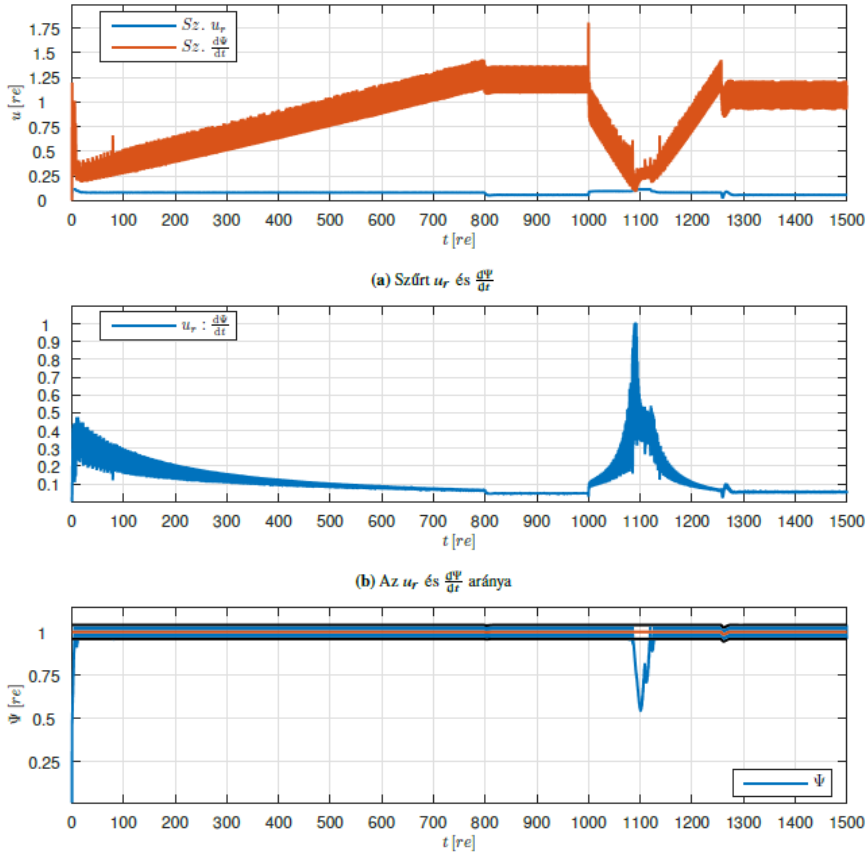
Generátoros üzemmódban jelentkező fluxus és nyomatékhiba

5 Új algoritmus implementálása

A szimulációs eredmények kiértékelése során észrevettem, hogy az állórész ellenállás feszültsége és az állórész fluxus idő szerinti deriváltja felhasználható az előzőekben részletezett fluxussal és nyomatékkal kapcsolatos hibák detektálására és megelőzésére.

Akárhányszor a szabályozók túl sok nullvektort jelölnek ki, túl hosszú ideig a kapcsolófeszültség alapharmonikusa elkezd csökkenni, miközben a szűrt állórész ellenállás feszültsége a szűrt $\frac{d\psi}{dt}$ -hez képest elkezd növekedni.

A 9. ábrán jól látható, hogyha ez az arány kellően nagy, akkor a szabályozók nem képesek a fluxust az előírt tolerancia sávon belül tartani.

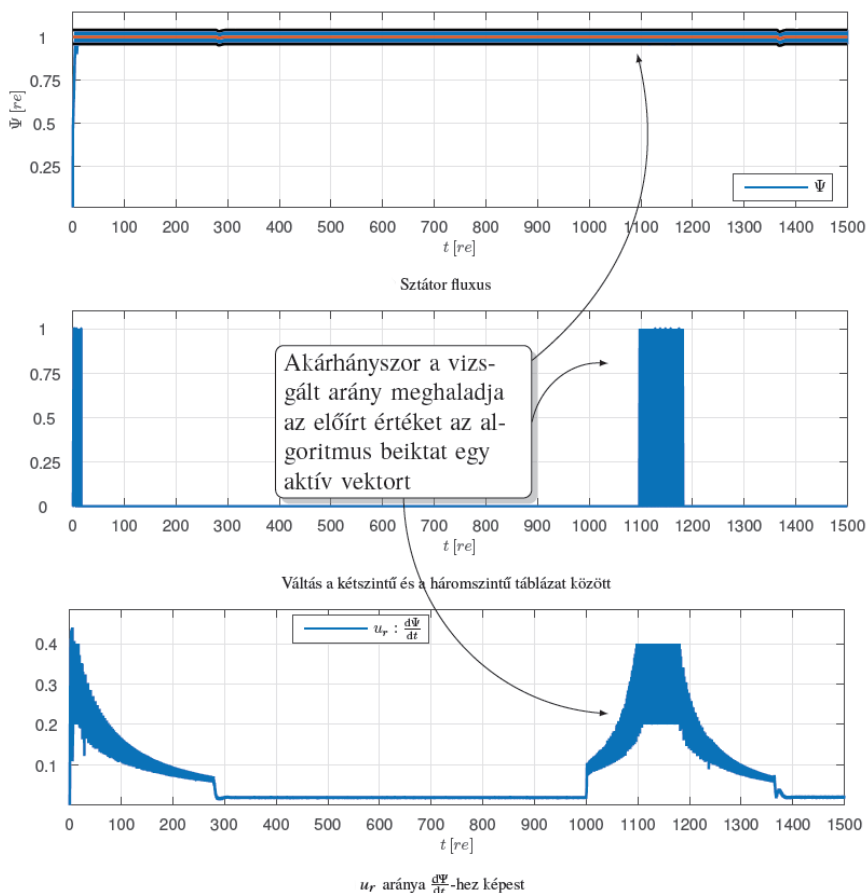


9. ábra

Feszültségarányok és fluxushiba

Belátható, hogy a hibajelenségek kétszintű táblázatot használva elkerülhetőek, azonban ez a kapcsolási táblázat sokkal nagyobb kapcsolási frekvenciát eredményez, mivel csak kettes átkapcsolásokat tud megvalósítani.

Ezt elkerülendő, egy olyan algoritmust implementáltam, amely a kétszintű táblázatból kiválasztja a megfelelő feszültségvektort, akárhányszor u_R és $\frac{d\psi}{dt}$ szűrt jeleinek egymáshoz viszonyított aránya meghalad egy előre definiált felső korlátot, majd újra a háromszintű táblázatot kezdi le használni, ha ez az érték egy alsó korlát alá csökken. Könnyen észrevehető, hogy a háromszintű táblázat már tartalmazza a kétszintűt, így a megfelelő vektor kiválasztása egyszerűen megvalósítható egy kétszintű nyomaték komparátor segítségével, amely csak $KM = 1, 1$ értéket ad vissza.

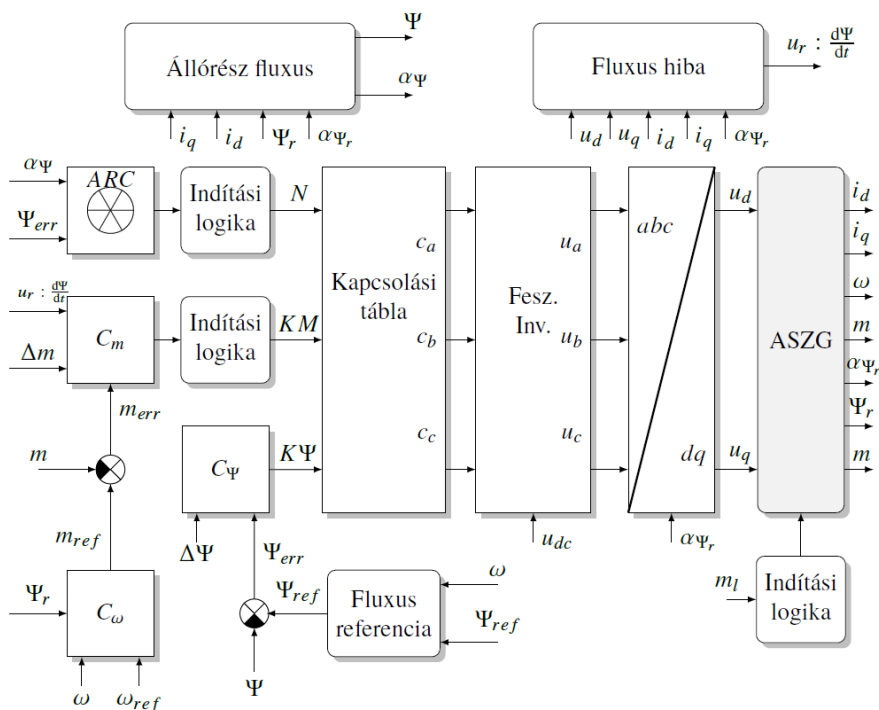


10. ábra

A fluxushibák megakadályozása

6 Szimulációs eredmények

Az eddig részletezett algoritmusokkal kiegészített rendszer blokkvázlatát a 11. ábra szemlélteti.



11. ábra

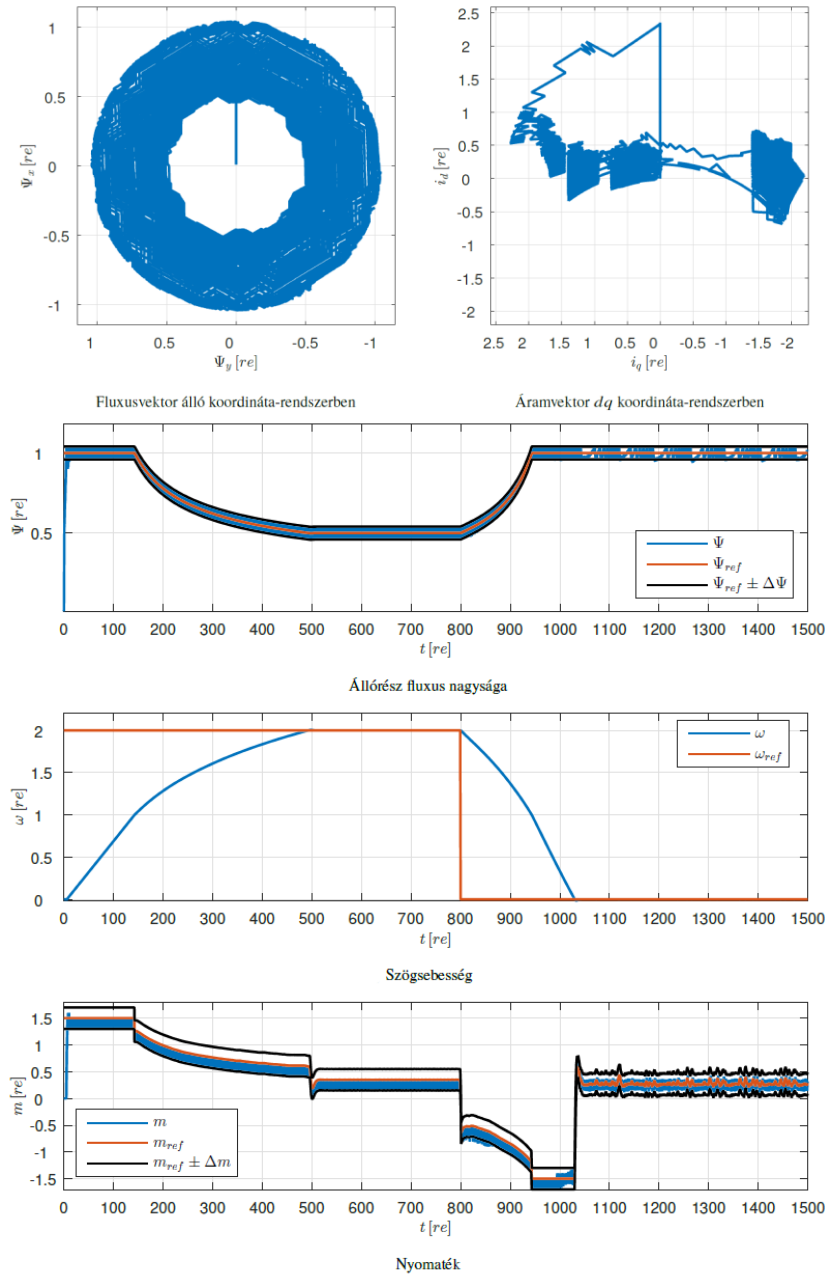
Az új algoritmusokkal ellátott rendszer blokkdiagramja

A szimulációkban használt, relatív egységekben vett aszinkron gép paramétereit a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat

Aszinkron gép paraméterek

Állórész transziens induktivitás	$L_v=0.2re$
Állórész ellenállás	$R=0.05re$
Sztátor kör időállandója	$T_d=L_v/R$
Elektromechanikai időállandó	$T_{in}=314re$
Rotor ellenállás	$R_r=0.05re$
Főmező induktivitás	$L_m=3re$
Rotor kör időállandója	$T_{ro}=L_m/R_r$



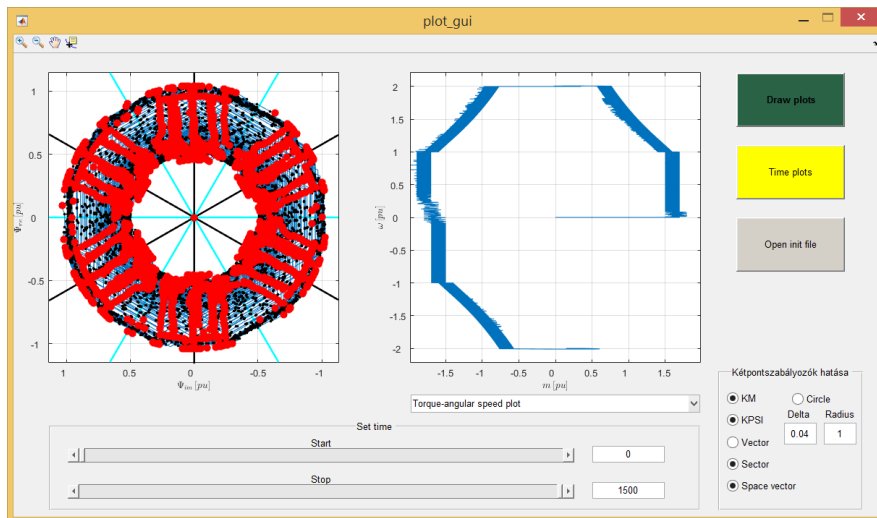
12. ábra

Szimulációs eredmények

A 12. ábrán jól látható, hogy a rendszernek a névlegesnél nagyobb fordulatszám alapjelet adtam meg annak érdekében, hogy a mezőgyengítéses üzem megfelelő működéséről meggyőződjek. A rendszer a szimulációk során konstans $m_l = 0.25re$ terhelő nyomatékot kapott. A fluxus kétpont szabályozónál $\Delta\Psi = 0.04re$ eltérést engedtem meg, míg a háromszintű komparátor $\Delta m = 0.2re$ paraméterekkel üzemelt. Az fluxushibát megelőző algoritmus a vizsgált arány 0.4-nél nagyobb értékén a kétszintű táblázatot használja, majd ha ez az arány lecsökken 0.2 alá, akkor újra a háromszintű táblázatból címzi ki a térvektorokat.

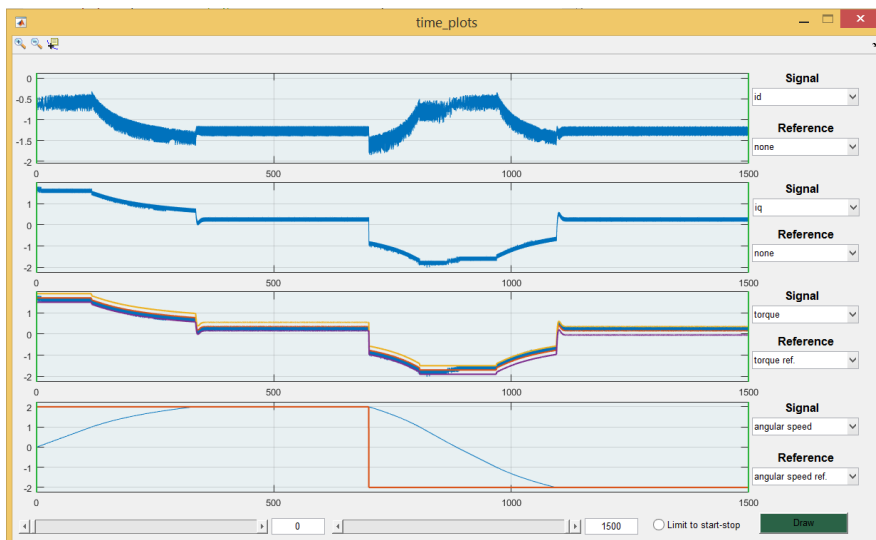
A névleges fordulatszám kétszeresére való felfutás után a fordulatszám alapjelre $\omega = 0.01re$ értéket írtam elő, amely hatására a rendszer generátoros fékezésbe kezdett, majd az előírt fordulatszámra beállt. Jól látható, hogy ez az alapjel váltás a fluxushibák előfordulásának kritikus állapotait lefedi, de eközben az implementált új algoritmus megfelelően működött.

A szimulációs eredmények kiértékelésének felgyorsítása érdekében egy felhasználói felületet fejlesztettem. Komplex hajtások szimulációiban a belső jelek vizsgálata Simulink környezetben a futásidőt rendkívül megnöveli, így célszerűbb az adatok utólagos feldolgozása. Ez több szempontból is előnyös, mivel a Workspace-be kimentett adatsorok tetszőleges kombinációjával a hajtásban bekövetkezett változásokról még több információt tudunk kinyerni.



12. ábra

A vektorsíkon bekövetkezett változások nyomon követése



13. ábra

A időbeli folyamatokban bekövetkezett változások nyomon követése

A 12. és 13. ábrán látható felhasználói felület fejlesztésekor a célom a vektoros egyenletek felírásakor elvesztett időbeliség visszanyerése volt. Ezen program lehetővé tette az egyes szabályozók hatásának egyidejű vizsgálatát a fluxusvektor trajektóriára, az áramvektorokra, nyomaték-szögsebesség vektorra illetve az időbeli jelekre.

Konklúzió

Ebben a cikkben a direkt fluxus és nyomatékszabályozás használó rendszer kritikus üzemállapotaiban jelentkező fluxus és nyomatékhibák mögötti jelenséget és az ezekre kidolgozott algoritmust mutattam be.

Az algoritmus kidolgozása során a cél a felmerülő hibák megszüntetése volt egy olyan módszer kidolgozásával, amely a kapcsolási frekvenciát a lehető legkisebb mértékben növeli. A részletezett kiegészítő algoritmusok megválasztása is erre törekedett.

A hajtások vizsgálatához a MATLAB nyújtotta felhasználói felület fejlesztési lehetőséget kihasználtam, így egy olyan programot hoztam létre, amely lehetővé teszi a vektoros egyenletek bevezetésével elvesztett időbeliség visszanyerését, a szabályozók hatásának egyidejű vizsgálatát a vektorsíkon, illetve az időbeli folyamatokban. Ez a feldolgozási módszer nagymértékben segítette a cikkben

részletezett nyomaték és fluxushibák feltárását, a különböző algoritmusok kidolgozását, összehasonlítását és így a megfelelőnek ítélt variáns kiválasztását.

A vizsgálatok következő szakaszát a kidolgozott algoritmusok valós környezetbeli implementálása, illetve fix kapcsolási frekvenciát megvalósító direkt fluxus és nyomatékszabályozás jelenti.

Hivatkozások

- [1] M. Depenbrock. Direct self-control (dsc) of inverter-fed induction machine. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 3(4), 1988, pp.420–429
- [2] 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),1986, pp. 820–827
- [3] Y. A. Chapuis and D. Roze. Direct torque control and current limitation method in start up of an induction machine. *Power Electronics and Variable Speed Drives, 1998. Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 456)*,1998, pp 451–455
- [4] Dr. István Schmidt and Dr. Károly Veszprémi. *Hajtákszabályozások*. 2012.
- [5] Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c.Werner Leonhard. *Control of electrical drives*. Springer Berlin Heidelberg, 1996, pp 155–166