

Vektoriálisan szabályozott permanens mágneses szinkron gépes hajtás egyszerűsített modellezése és szimulálása

Vectorial-controlled permanent magnet synchronous machine drive – simple approach of modelling and simulation

*Dr. IMECS Mária, emeritus egyetemi tanár¹, FERENCZ János, doktorandusz²;
Dr. KELEMEN András, egyetemi adjunktus³;*

¹ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Memorandumului utca 28, Kolozsvár 400114, www.utcluj.ro, maria.imecs@emd.utcluj.ro

² Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamosmérnöki Kar, Doktori Iskola, Kolozsvár, www.utcluj.ro, janos.ferencz.phd.project@gmail.com

³ Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar, 540485 Marosvásárhely, O.p. 9, C.p. 4, www.ms.sapientia.ro, kandras@ms.sapientia.ro

Abstract

The paper presents a computational algorithm, a static and a dynamic simulation structure (SiS), all of them based on a simplified mathematical model (MaMo) of the PM motor corresponding to the control procedure when it operates with stator current vector perpendicular to the PM flux. By means of simulation of the SiS-s there are verified the identified the motor parameters and also the compatibility of the MATLAB/Simulink[®] motor block with the applied MaMo, which is required for the control system implementation.

Keywords: PM synchronous motor, vector control, mathematical modelling, simulation structures.

Kivonat

A dolgozat bemutat egy motor számítási algoritmust, valamint egy statikus és egy dinamikus szimulációs struktúrát (SiS), ami olyan egyszerűsített matematikai modellen (MaMo) alapszik, ami megfelel a PM fluxusra merőlegesen szabályozott áramvektoros üzemmódnak. A SiS-ek szimulálásával ellenőrizzük a motor becsült paramétereinek a számítási helyességét és meg lehet állapítani a MATLAB/Simulink[®] motorblokk kompatibilitását az általunk alkalmazott MaMo-val, ami szükséges feltétel a szabályozás implementálásához.

Kulcsszavak: PM szinkron motor, vektoriális szabályozás, matematikai modellezés, szimulációs struktúrák

1. BEVEZETŐ

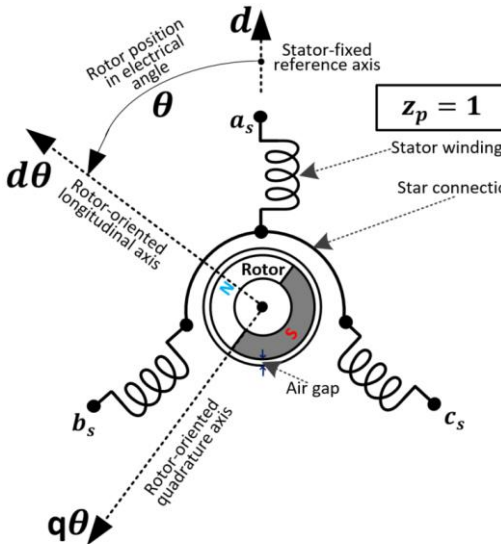
A permanens mágneses (PM) forgórészű szinkron típusú gépek a legelterjedtebb villamos gépek közé tartoznak az aszinkron motorok mellett. Széles körben alkalmazzák mind a hajtástechnikában motorként, mind energiatermelésre generátorként a szélturbinákban. A szinuszos mágneses eloszlású PM szinkron motoroknak (SzM) alapvetően négy szabályozási elvét ismerjük [1], [2]. Ezek közül a legismertebb és legalkalmazottabb módszer szerint a sztátoráram vektorát úgy szabályozzák, hogy merőleges legyen a rotor mágneses tengelyére. Ebben az esetben, igaz ugyan, hogy az eredő fluxus nem állandó és az áram induktív jellegű, viszont előnyként meg lehet említeni, hogy minimális árammal jön létre az elektromágneses nyomaték (EMNy) és ezen kívül a jelenleg gyártott változó reluktanciájú (VR) PM-SzM-eknél – melyeknél $L_{sd} < L_{sq}$ – a PM nyomatékát csökkentő negatív reluktancia nyomaték nulla a hosszanti armatúra visszahatás (HAVH) hiányában.

2. A PM FLUXUSRA MERŐLEGES ÁRAM SZABÁLYOZÁSI ELVE

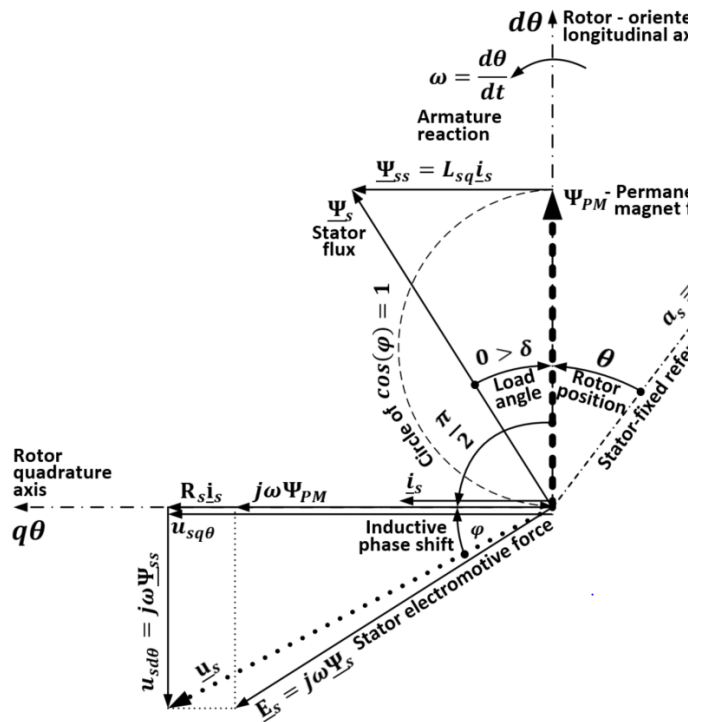
Az 1. ábrán az állandó légrésű szinuszos mágneses mező-eloszlású PM-SzM egy-póluspárú ($z_p = 1$) helyettesítő szerkezeti vázlatát láthatjuk, ahol θ a rotor / forgórész (FR) elfordulási pozíciója villamos szögben jelenik meg az állórész- (ÁR) orientált rögzített d referenci tengelytől mérve, mely az a_s fázis mágnesezési tengelyének felel meg. A szinkron gépek matematikai modelljét (MaMo) a FR-hez kötött, azaz rotororientált $d\theta$ - $q\theta$ koordináta-rendszerben (KooR) adják meg az általános Park-modell alapján [3], [4]. Ez tulajdonképpen

PM-mezőorientációt jelent. A csillapító rudak nélküli PM-SzM általános egyenleteit az általános Park modellből is le lehet vezetni, úgy, hogy a FR áramköreitől eltekintünk és a gerjesztő áram által létrehozott fluxust a PM-fluxussal helyettesítjük [5]. A PM-re merőleges árammal működő SzM fázordiagramja állandósult állapotban (ÁÁ) a 2. ábrán látható, melynek alapján felírhatjuk az ennek megfelelő egyszerűsített dinamikus MaMo-t.

θ – a forgórész pozíciója villamos-szögben
 d – ÁR-orientált direkt fix referencia-tengely
 $d\theta$ - $q\theta$ –rotor-orientált koordináta-rendszer



1. ábra. Állandó légrésű PM-es forgórészű szinkron motor $z_p=1$ póluspárú elvi szerkezeti vázlata.



2. ábra. Fázordiagram állandósult állapotban a PM-re merőlegesre szabályozott áramvektorral $d\theta$ - $q\theta$ rotor-orientált szinkron forgó koordináta-rendszerben.

Az áram merőlegességét a PM fluxusára ($\Psi_{PM} \perp \underline{i}_s$) az áram hosszanti (direkt) összetevőjének, azaz a HAVH nullára szabályozásával ($i_{sd\theta}=0$ vagy $\Psi_{ssd\theta}=0$) valósítjuk meg. Következésképpen az áram modulusa i_s egyenlővé válik a keresztirányú (kvadratura) összetevővel ($i_{sq\theta} = i_s$), ahogyan a 2. ábrán is látható. Az EMNy-t a PM fluxusa hozza létre a merőleges ÁR árammal. Az 1. táblázatban ennek a sajátos üzemmódnak a dinamikus modellje látható, ideális esetben, vagyis feltételezve, hogy az áram és a PM-fluxus vektoroknak a merőlegessége állandó jelleggel szabályozással megvalósítható dinamikus működés alatt is.

1. táblázat: A PM-SzM egyszerűsített dinamikus matematikai modellje.

Áram-összetevők	Eredő ÁR fluxus-összetevők	Kapocsfeszültség-összetevők
$\begin{cases} i_{sd\theta} = 0; \\ i_{sq\theta} = i_s; \end{cases} \quad (1)$	$\begin{cases} \Psi_{sd\theta} = \Psi_{PM}; \\ \Psi_{sq\theta} = L_{sq} i_s = \Psi_{ss}; \end{cases} \quad (2)$	$\begin{cases} u_{sd\theta} = -\omega \Psi_{ss} = -\omega L_{sq} i_s; \\ u_{sq\theta} = R_s i_s + \omega \Psi_{PM} + L_{sq} \frac{di_s}{dt}; \end{cases} \quad (3)$
Mozgásegyenlet:	$m_e = K_M z_p \Psi_{PM} i_s = m_L + J_{Eq} \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4)$	$\omega_m = \frac{\omega}{z_p} \quad (5) \quad \omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (6)$

A fenti egyenletekben Ψ_{PM} a PM fluxusa, Ψ_{ss} az armatúra-visszahatás, R_s az ÁR fázisellenállása, ω a villamos szögsebesség, ω_m a mechanikai szögsebesség, m_L a terhelő nyomaték. Az m_e EMNy koefficiense $K_M = 3$, ha effektív értékekkel számolunk, illetve $K_M = 3/2$, ha a változókat amplitúdóban definiáljuk. Ha a gép állandó légrésű, akkor a hosszanti (direkt) és a keresztirányú (kvadratura) háromfázisú induktivitások egyenlők ($L_{sd}=L_{sq}=L_s$). A statikus MaMo csak abban különbözik az 1. táblázatban bemutatott dinamikus MaMo-tól, hogy a (3)-ban és a (4)-ben eltekintünk az önindukciós feszültségtől és a dinamikai nyomatéktól, mivel az áram, illetve a szögsebesség állandó, a deriváltjukat anuláljuk. A fázordiagram tranziens állapotban

is nagyjából érvényes marad a $\Psi_{PM} \perp \dot{i}_s$ merőlegesség feltételével azzal a kiegészítéssel, hogy a feszültség kvadratúra összetevőjében figyelembe kell venni az áram modulusának a változása által létrehozott önindukciós feszültséget ($u_{ss} = d\Psi_{ss}/dt$). A szögsebesség változása nem jelenik meg a fázordiagramban.

A továbbiakban bemutatunk egy számítási algoritmust a fenti egyszerűsített matematikai modell alapján és a 2. táblázatban két megtervezett (1-es és 2-es) motor adatait, valamint egy Siemens AG gyártmányú 1FL6032-2AF21-1AB1 típusú (3-as) motornak a mért paramétereit és számított adatait [6].

3. SZÁMÍTÁSI ALGORITMUS A PM-RE MERŐLEGES ÁRAMMAL

Állandó légrésű, csillapító rudak nélküli, szinuszos mágneses mező-eloszlású PM-SzM számításának a kiinduló névleges adatait a 2. táblázatban láthatjuk két esetre (*számított, **mért adat, ***adatlapról).

2. táblázat: Kiinduló névleges adatok a PM-SzM számításához

		1. motor*	2. motor*	3. Siemens motor
A névleges fázisfeszültség effektív értéke	U_{sN}^{ef}	36 V	72 V	$111 \text{ V}^{***}/\sqrt{3} = 64 \text{ V}$
Névleges tengelyteljesítmény	P_N	1000 W		200 W ^{***}
Névleges betáplálási frekvencia	f_{sN}	196 Hz		200 Hz*
A póluspárok száma	z_p	7		4 ^{**}
Névleges hatásfok	η_N	87 %		77.5%*

Az 1-es és 2-es motornak a hatásfokát nemzetközi szabványok előírásai alapján határoztuk meg [7]. A számítások algoritmusát a 3. táblázatban szemléltetjük.

3. táblázat: A PM szinkron motor számítási algoritmus.

1. Percenkénti fordulatszám: $n_N = \frac{60f_{sN}}{z_p}$	2. Szögsebesség mechanikai szögben: $\Omega_N^{mec} = \frac{2\pi f_{sN}}{z_p}$	3. Szögsebesség villamos szögben: $\Omega_N^{el} = 2\pi f_{sN}$	4. Tengely-nyomaték: $M_N^{arb} = \frac{P_N}{\Omega_N^{mec}}$
5. Az ÁR kapcsolásokon felvett teljesítmény: $P_N^{abs} = \frac{P_N}{\eta_N}$	6. Villamos és mechanikai hatásfok: $\eta_N^{el} = \eta_N^{mec} = \sqrt{\eta_N}$	7. Elektromágneses teljesítmény: $P_N^{em} = \frac{P_N}{\eta_N^{el}}$	8. Ellenőrző képlet: $P_N^{em} = P_N^{abs} \eta_N^{el}$
9. Súrlódási/mechanikai veszteségek: $p_N^{mec} = P_N^{em} - P_N$	10. Villamos (Joule-Lenz) veszteségek: $p_N^{el} = P_N^{abs} - P_N^{em}$	11. Elektromágneses nyomaték: $M_N^{em} = \frac{P_N^{em}}{\Omega_N^{mec}}$	12. Üresjárási nyomaték: $M_N^0 = M_N^{em} - M_N^{arb}$
13. Ellenőrző képlet: $M_N^0 = \frac{p_N^{mec}}{\Omega_N^{mec}}$	14. A statikus üresjárási nyomaték becslése: M_{st}^0	15. A nedves (viszkózus) súrlódási nyomaték a névleges sebességen: $M_v^0 = M_N^0 - M_{st}^0$	16. A nedves (viszkózus) súrlódási együttható: $B_m = \frac{M_v^0}{\Omega_N^{mec}}$
17. A kinetikai rendszer nedves (viszkózus) súrlódási együtthatója: $B_K = k_K B_m$	18. Ellenőrző képlet (S – látszólagos teljesítmény): $P_N^{abs} = 3U_{sN}^{ef} I_{sN}^{ef} \cos \varphi_N < 3U_{sN}^{ef} I_{sN}^{ef} = S_N$, ahonnan az áram korlátja: $(I_{sN}^{ef})_{min} = \frac{P_N^{A-el}}{3U_{sN}^{ef}}$	19. Az áram becslése: $I_{sN}^{ef} > (I_{sN}^{ef})_{min}$	
20. Állórész fázis-ellenállás: $R_s = \frac{p_N^{el}}{3(I_{sN}^{ef})^2}$	21. Teljesítménytényező: $\cos \varphi_N = \frac{p_N^{abs}}{3U_{sN}^{ef} I_{sN}^{ef}}$	22. A fázis-szög szinusza: $\sin \varphi_N = \sqrt{(\cos \varphi_N)^2 - 1}$	23. Az elektromotoros feszültség: $E_{ss}^{ef} = U_{sN}^{ef} \sin \varphi_N$
24. Az állórész háromfázisú inductivitása: $L_s = L_{sd} = L_{sq} = \frac{E_{ss}^{ef}}{\Omega_N^{el} I_{sN}^{ef}}$	25. Az armatúra-visszahatás fluxusa: $\Psi_{ssN}^{ef} = L_s I_{sN}^{ef}$	26. PM-fluxus effektív értéke: $\Psi_{PM}^{ef} = \frac{M_N^{em}}{3z_p I_{sN}^{ef}}$	

<p>27. Pólus feszültség:</p> $E_{PM}^{ef} = \Omega_n^{el} \Psi_{PM}^{ef}$	<p>28. Ohmikus feszültségesés:</p> $\Delta u_s^{ef} = R_s I_s^{ef}$	<p>29. Az armatúra-feszültség direkt összetevője:</p> $U_{sd\theta}^{ef} = E_{ss}^{ef} = -\Omega_N^{el} \Psi_{ssN}^{ef}$
<p>30. Az armatúra-feszültség keresztirányú összetevője:</p> $U_{sq\theta}^{ef} = E_{PM}^{ef} + \Delta u_s^{ef}$		<p>31. Ellenőrző képlet (U_{sN}^{ef} kezdeti adat):</p> $U_{sN}^{ef} = \sqrt{(U_{sd\theta}^{ef})^2 + (U_{sq\theta}^{ef})^2}$

A számításokat ideális esetben ÁÁ-ban szinuszos változókra végeztük el a névleges működési pontban, megőrizve az áramvektor és a PM fluxus merőlegességét. A két motor kiszámított paramétereit és névleges adatait a 4. táblázatban adtuk meg (a Siemens motornál: *számított, **mért adat, ***adatlapról).

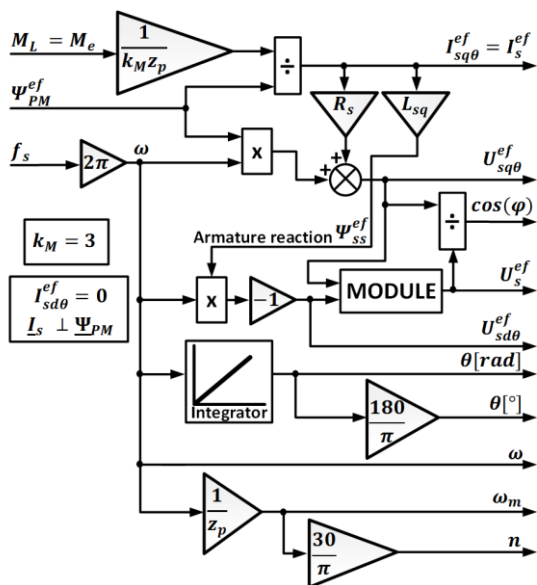
4. táblázat: Kiszámított paraméterek és névleges adatok.

		1. motor*	2. motor*	3. Siemens motor
Állórész-ellenállás	R_s	0.17 Ω	0.717 Ω	5.33 Ω **
Háromfázisú állórész-induktivitás	L_s	0.00112 H	0.0045 H	$L_{sd}=10.19$ mH** $L_{sq}=11.17$ mH**
A PM fluxusának az amplitúdója	Ψ_{PM}^{Max}	0.0342 Wb	0.0684 Wb	0.0615 Wb*
A névleges fázis-áram effektív értéke	I_{sN}^{ef}	12 A	6 A	1.4 A***
Névleges fordulatszám	n_N	1680 ford./perc		3000 ford./perc***
Névleges elektromágneses nyomaték	M_N^{em}	6.094 Nm		0.731 Nm*
Névleges teljesítménytényező	$\cos\varphi_N$	0.89		0.95*

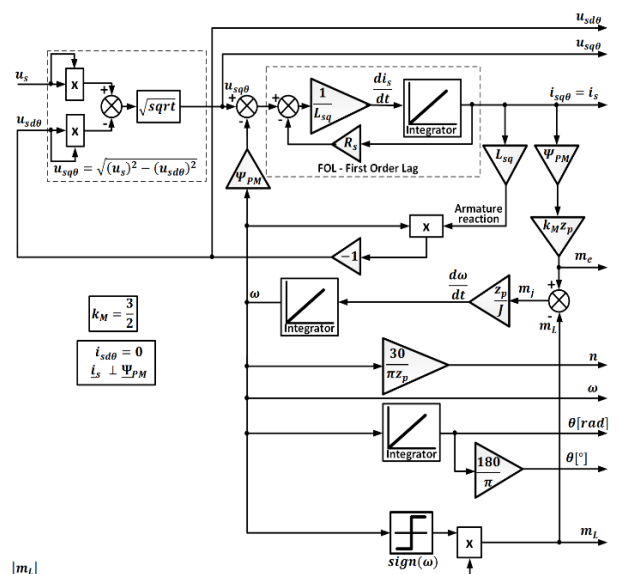
4. EGYSZERŰSÍTETT SZIMULÁCIÓS STRUKTÚRÁK

Mivel a szabályozási struktúrákban több hibalehetőség adódik, első lépésben a szimulálási struktúrákat ajánlatos ideális esetben az egyszerűsített matematikai modellek alapján megszerkeszteni szabályozók nélkül, feltételezve az áram merőlegességét a PM-re az 1. táblázatban bemutatott (1)-(6) alapján.

Az St-SiS statikus szimulálási struktúrában (lásd a 3. ábrát) ÁÁ-ban eltekintünk a deriváltaktól és effektív értékekkel számoltunk. A Dy-SiS dinamikus szimulálási struktúrában (lásd a 4. ábrát), figyelembe véve a deriváltakat is, a változók pillanatértékeinek az amplitudójával dolgozunk, ahogyan a klasszikus Park-féle modellekben szokták. Következésképpen az egyszerűsített (szabályozók nélküli) dinamikus modell kompatibilis az általános egyenleteken alapuló Simulink® motormodellel, melyet az 5. ábrán bemutatott VCI-SiS („Vector Control Ideal”) vektoriális szabályozási struktúrában alkalmaztunk.

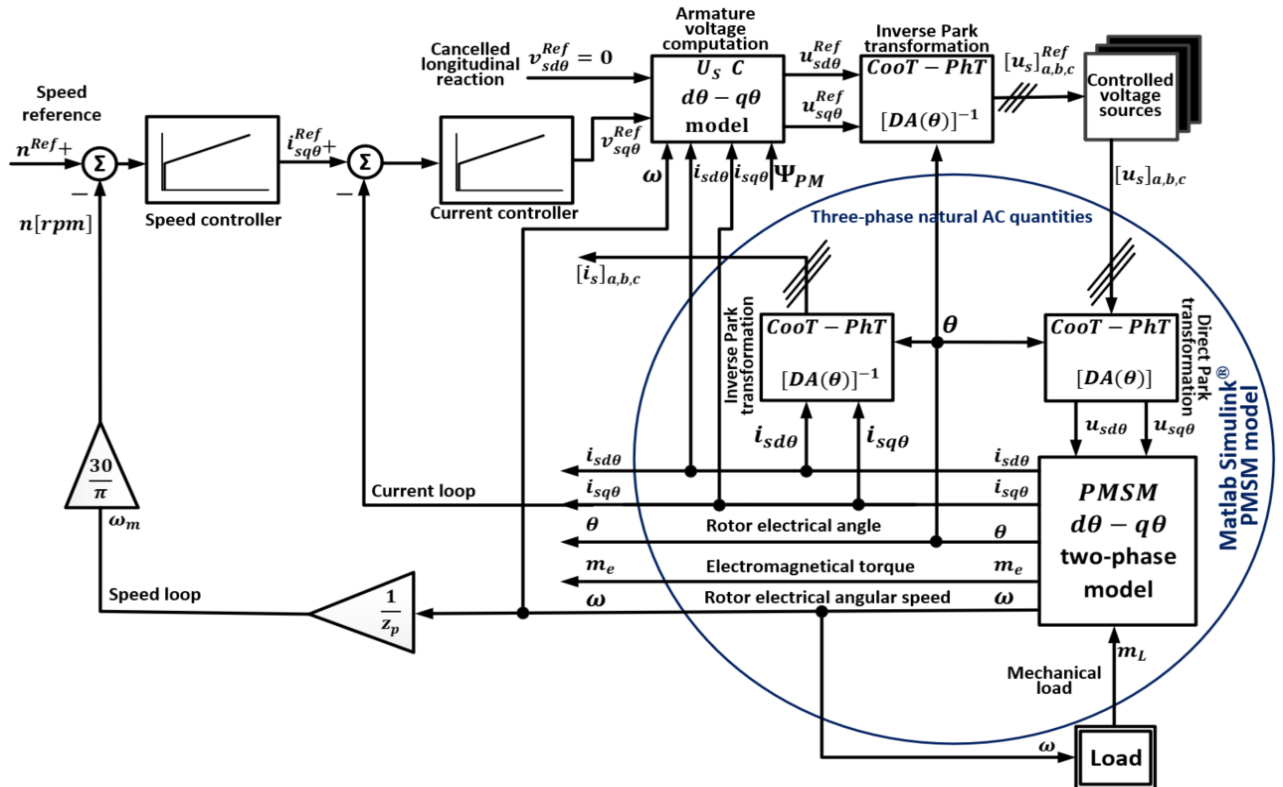


3. ábra. Statikus (ÁÁ) szimulálási struktúra (St-SiS) a PM fluxusra merőleges árammal.



4. ábra. Dinamikus szimulálási struktúra (Dy-SiS) a PM fluxusra merőleges árammal

A VCI-SiS-ben az egyszerűsítés abban áll, hogy motort ideálisan szinuszos feszültséggel tápláljuk, hogy kompatibilisabb legyen a motor számításával, ezért mellőztük az inverter impulzus-szélesség modulációs (ISzM) szaggatását, tehát a motor kapcsait közvetlenül a szabályozási struktúra vezérlési ágában generált háromfázisú modulációs alapjelekkel egyenlő feszültséggel tápláltuk. A háromfázisú PM-SM Simulink® motorblokk tartalmazza a klasszikus rotor-orientált, azaz PM mezőorientált kétfázisú MaMo-n alapuló struktúrát és külső háromfázisú rendszerhez (inverterhez kapcsoláshoz és a vezérlőegységéhez) történő csatlakoztatáshoz szükséges direkt és inverz Park-féle operációs transzformációs blokkokat (CooT-PhT).

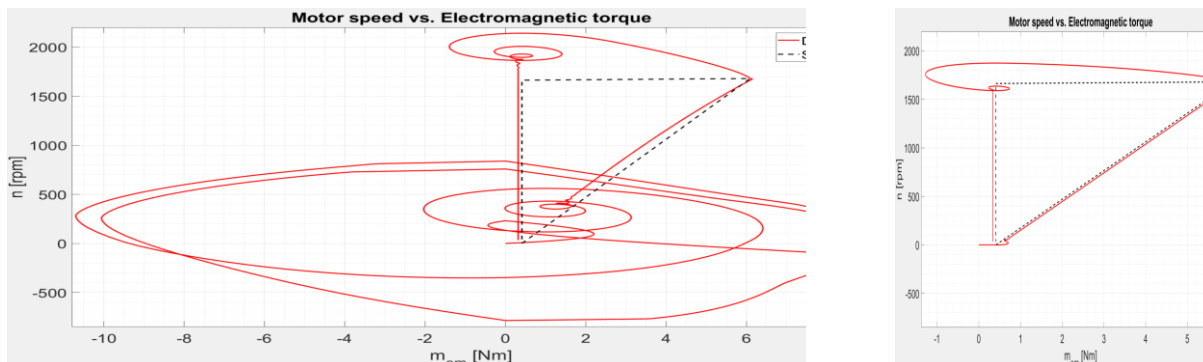


5. ábra. A vektoriálisan szabályozott szinuszosan táplált motor szimulálási struktúrája (VCI-SiS).

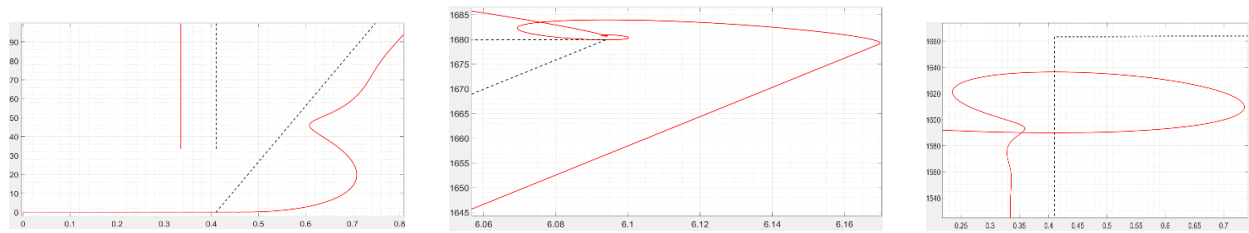
A VCI-SiS tömbvázlatában (5. ábra) HAVH annullálása az $U_s C$ feszültség számítási tömb bemenetén valósítható meg szabályozás nélkül, ahol a $v_{sd\theta} = R_s i_{sd\theta} = 0$ („Cancelled longitudinal armature reaction”).

5. A MOTORADATOK ELLENŐRZÉSE SZIMULÁCIÓVAL

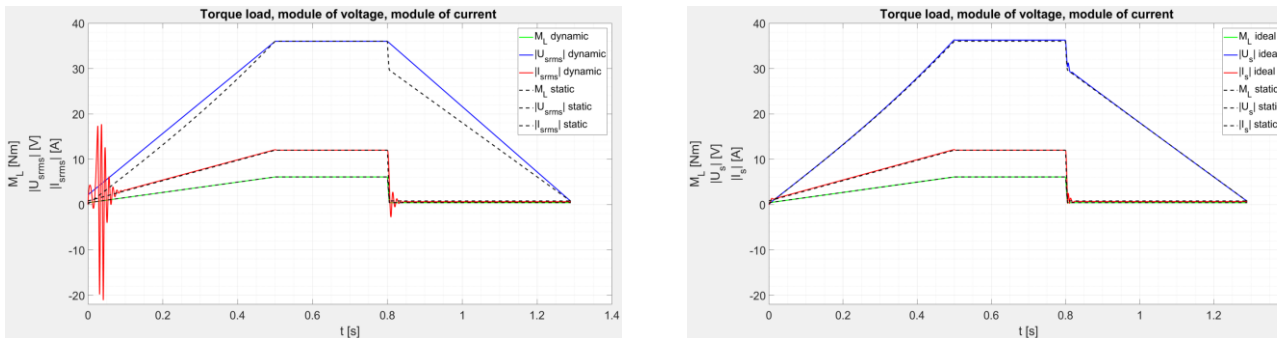
A motor kiszámított névleges adatait és paramétereit a három egyszerűsített struktúra szimulálással ellenőrizhetjük. A 6. - 10. ábrákon az 1-es motor szimulálási eredményeit mutatjuk be. Mindhárom struktúránál bemeneti változó egy rámpafüggvény szerint változó passzív terhelő nyomaték, mely 0.5 s alatt nő fel az 0.41 Nm üresjárási értékről a névlegesre és ÁÁ-ban a névleges EMNy-ot hozza létre a motorban.



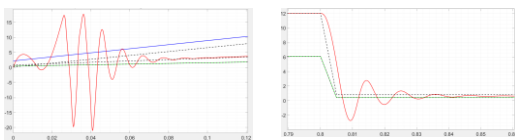
6. ábra. Statikus (fekete szaggatott) St-SiS-vel és dinamikus (piros folytonos) a Dy-SiS-vel (bal oldalt), illetve a VCI-SiS-vel (jobb oldalt) szimulált MJG-k: a fordulatszám az EMNy függvényében.



7. ábra. A VCI-SiS-vel szimulált dinamikus mechanikai jelleggörbe (MJG) kinagyított részletei: indítás (bal oldalt), a névleges üzem elérése (középen), illetve a fékezés üresjárásban (jobb oldalt).



8. ábra. A SiS-vel (fekete szaggatott) és a Dy-SiS-vel (bal oldalt), illetve a VCI-SiS-vel (jobb oldalt) szimulált görbék: a terhelő nyomaték (zöld), az áram (piros) és a feszültség (kék) időbeli lefolyása.



9. ábra. A Dy-SiS-vel szimulált görbék kinagyított részletei: indítás (bal oldalt) és a fékezés üresjárásban (jobb oldalt).



10. ábra. A VCI-SiS-vel szimulált görbék kinagyított részletei: indítás (bal oldalt), illetve 0.8 s után az áram (középen), és a feszültség (jobb oldalt) fékezéskor.

A St-SiS másik bemenete a frekvencia, mely a nulláról nő fel a névleges értékre. A Dy-SiS-nek a másik bemenete a feszültség, mely a küszöb-feszültségről ($R_s I_{SN} = 2.88 \text{ A}$) nő fel a névleges értékre, mindkettő lineárisan rámpafüggvény szerint 0.5 s alatt. Az utóbbi két struktúrában a $J_{Eq} = 0.00107 \text{ kgm}^2$ eredő tehetetlenségi nyomatékkal szimuláltunk. A 0.5-0.8 s intervallumban a motor eléri névleges üzemmódban az ÁÁ-t. A 0.8 s pillanattól a névleges terhelő nyomaték 0.005 s alatt leesik az üresjárási értékre. A teljes szimulációs idő 1.29 s. A Dy-SiS és VCI-SiS szimulációs eredményeit minden ábrában a St-SiS eredményeivel hasonlítottuk össze. A Dy-SiS nagy indítási árama azzal magyarázható, hogy a motor nincs szabályozva.

Mint ahogyan a szimulációs eredményekből következik, mindhárom struktúránál a névleges működési pont változóinak az értéke megfelel az előző számításoknak. Következésképpen a motorszámítások és a két egyszerűsített struktúra megfelel a MATLAB/Simulink® motor tömbben alkalmazott MaMo-nak.

6. KÖVETKEZTETÉSEK

A dolgozatban bemutatott eljárás alapján le lehet ellenőrizni egy adott PM-SzM kísérletileg mért paramétereit és kiszámított adatait, valamint az adatlapon megadott névleges értékek alapján a szimulációban alkalmazott MaMo-k paraméterezésének a helyességét, mely végül szükséges a szabályozási struktúra implementálásához. A következő lépés a vektoriális szabályozási struktúra szimulálása az inverter hordozóhullámos ISzM vezérlésével, illetve térfázoros ISzM-vel (SVM – „Space Vector Modulation”).

A St-SiS-t meg lehet szerkeszteni feszültség bemenettel is a frekvencia helyett, illetve a Dy-SiS-t frekvenciabemenettel a feszültség helyett. Ez utóbbi inkább megfelel a VCI-SiS szimulációs eredményeinek az összehasonlítására, ugyanis így mindkét struktúra a feszültséget a fordulatszámából számolja ki.

IRODALOMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Imecs Maria, Birou I., Jánky P., Kelemen Á.: *High performance control of PM- synchronous servomotors using the MS320C5x processor*, PCIM'97, Nürnberg, Germany, Volume: Intelligent Motion, pp. 157-166.
- [2] Imecs Maria, Birou I., Szabó Cs.: *Modelling and simulation of vector-control strategies for PM-synchronous motors*, Q&A-R 2000, Cluj-Napoca, Tome 2, pp. 151-156.
- [3] Kelemen Arpad, Imecs Maria: *Sisteme de reglare cu orientare după câmp ale mașinilor de current alternativ*, Editura Academiei Române, București, 1989, ISBN 973-27-0032-7.
- [4] Kelemen Árpád, Imecs Mária: *Vector Control of AC Drives, Volume 2: Vector Control of Synchronous Machine Drives*, Écriteure Budapest, Budapest, 1993, ISBN 963-593-140-9
- [5] Imecs Mária, Szabó Cs.: *Permanens-mágneses-forgórészű szinkronmotor*. Terminológia, Magyar nyelvű szakelőadások a 2002-2003-es tanévben, kiadó: EMT, Kolozsvár, 2004, pp. 56-64.
- [6] * * * [Product Details - Industry Mall - Siemens China, SIMOTICS S-1FL6 SERVO MOTOR Manual \(add-furnace.com\)](https://www.add-furnace.com/product-catalog/siemens/simotics-s-1fl6-servo-motor-manual.pdf), <https://www.add-furnace.com/product-catalog/siemens/simotics-s-1fl6-servo-motor-manual.pdf>.
- [7] * * * *International Efficiency Classes, Standard on Efficiency Classes for Low Voltage AC Motors*. IEC/EN 60034-30-1, <https://webstore.iec.ch/publication/136>.