SZÉCHENYI EGYETEM
UNIVERSITY OF GYŐR

2021.9.23.

Állandó mágneses szinkron motor sebességérzékelő nélküli irányítása csúszómód-megfigyelő alkalmazásával

Készítette: Bakonyi Antal

Témavezető: Horváth Krisztián – egyetemi tanársegéd

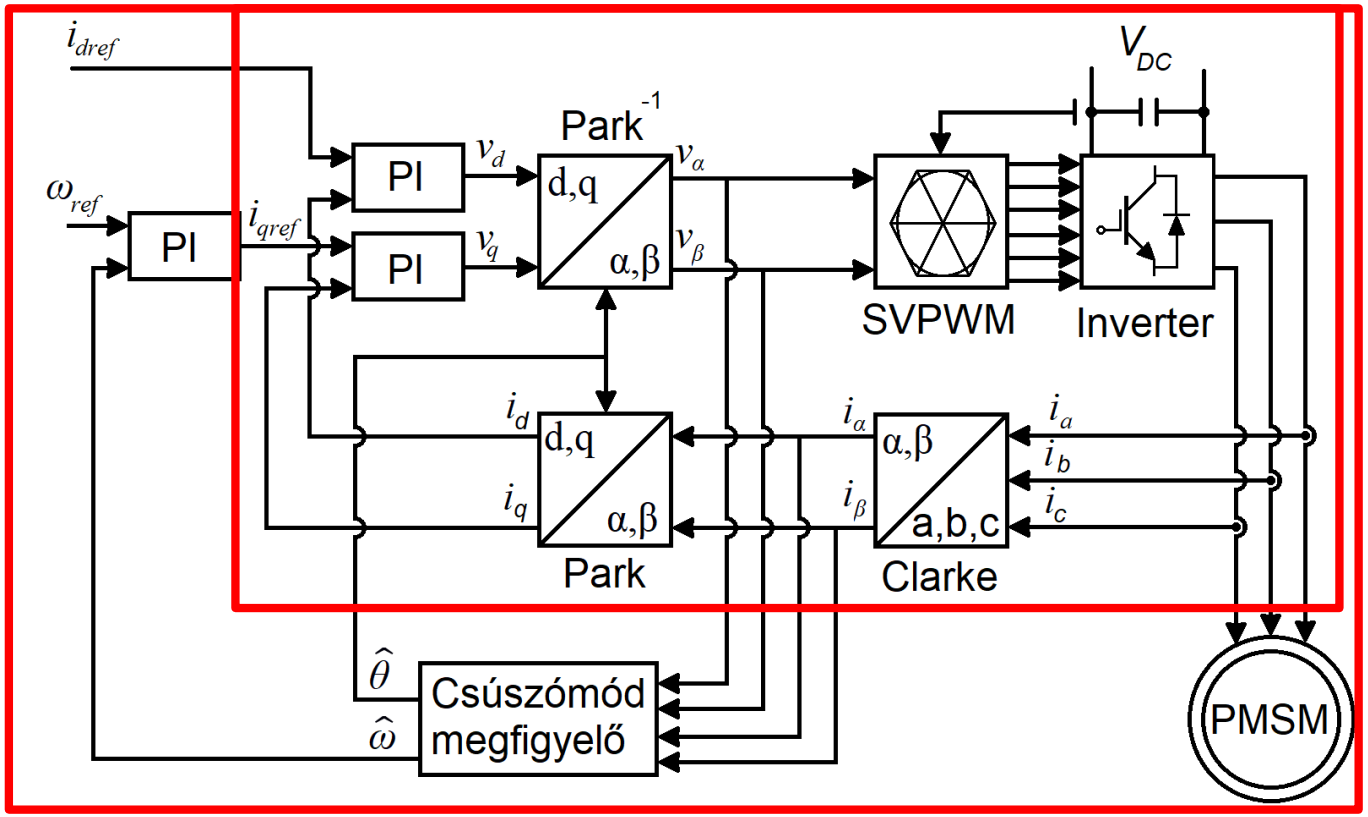
67. VÁNDORGYŰLÉS
KONFERENCIA ÉS KIÁLLÍTÁS

Diplomaterv pályázat 2021

Állapotmegfigyelők tervezésének motivációja

- Pozíció- vagy sebességérzékelő szenzor elhagyhatósága
  - Költségcsökkentés
  - Pozíció - vagy sebességérzékelő szenzor meghibásodási lehetőségének elkerülése
- Digitális iker tervezése (Digital twin)
  - Pozíció- vagy sebességérzékelő szenzor meghibásodása esetén jelzés, rendezett leállás vagy átkapcsolás sensorless üzemmódba

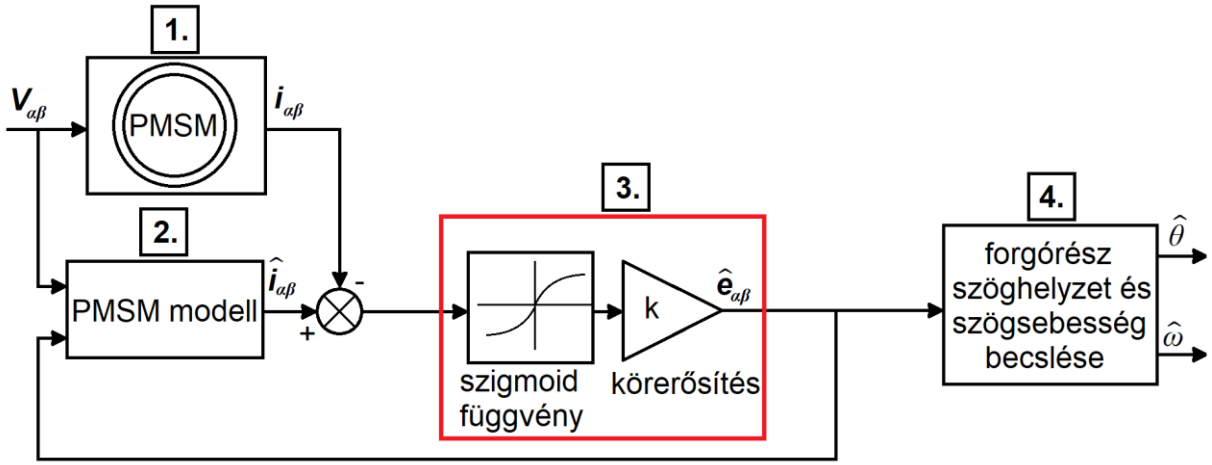
Állandó mágneses szinkron gépek mezőorientált hajtásszabályozási elvének ismertetése



1. ábra: Állandó mágneses szinkron gép mezőorientált hajtásszabályozásának elvi blokkvázlata

Ahol: -PMSM – permanent magnetic synchronous machine –állandó mágneses szinkron gép;
-SMO – sliding mode observer- csúszómód megfigyelő;
-SV PWM – space vector pulse width modulation – térvektor impulzus szélesség moduláció.

Csúszómód megfigyelők működése



2. ábra: A hagyományos felépítésű csúszómód áram megfigyelő elvi blokkvázlata

Az állandó mágneses szinkron gép állapottér-reprezentációs leírása:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{i_s} = \begin{bmatrix} -R_s/L_s & 0 \\ 0 & -R_s/L_s \end{bmatrix}\mathbf{i_s} + \begin{bmatrix} 1/L_s & 0 \\ 0 & 1/L_s \end{bmatrix}(\mathbf{v_s} - \mathbf{e_s});$$

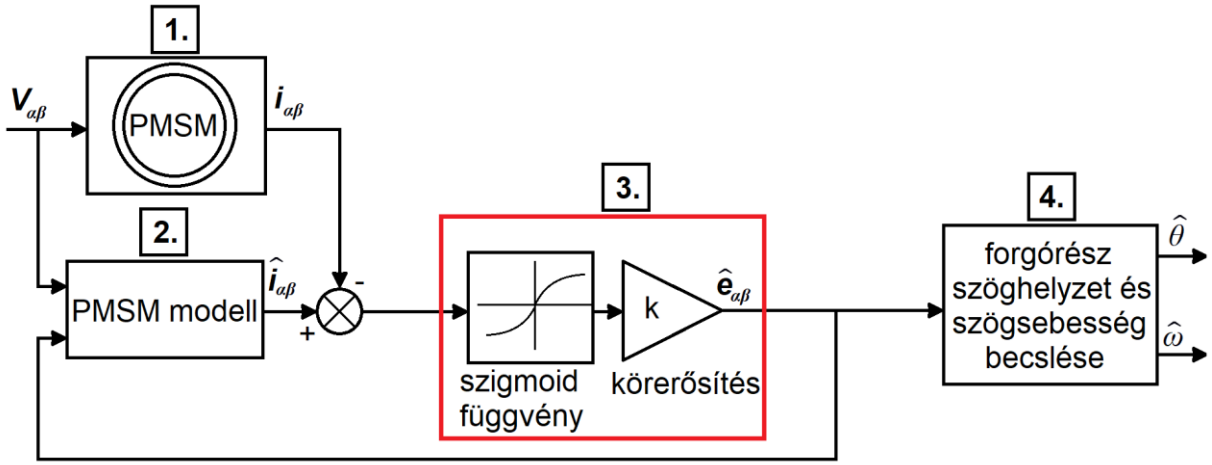
ahol: ω_r - a rotor szögsebessége és a póluspárszám szorzata;
λ_m - az állandó mágnes fluxusa;
R_s - az állórész ellenállás;
L_s - az állórész induktivitás;
$\mathbf{v}_{\boldsymbol{\alpha\beta}}$ - a fázisfeszültségek vektor;
$\mathbf{i}_{\boldsymbol{\alpha\beta}}$ - a fázisáramok vektor;
$\mathbf{e}_{\boldsymbol{\alpha\beta}}$ - az elektromotoros erők (Back EMF) vektora;

$$\mathbf{v}_{\boldsymbol{\alpha\beta}} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}; \qquad \mathbf{i}_{\boldsymbol{\alpha\beta}} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix};$$

$$\hat{\mathbf{i}}_{\boldsymbol{\alpha\beta}} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix}$$ - a becsült áram vektor;

$$\mathbf{e}_{\boldsymbol{\alpha\beta}} = \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \omega_r \lambda_m \begin{bmatrix} -sin(\theta_r) \\ cos(\theta_r) \end{bmatrix}.$$

Csúszómód megfigyelők működése



2. ábra: A hagyományos felépítésű csúszómód áram megfigyelő elvi blokkvázlata

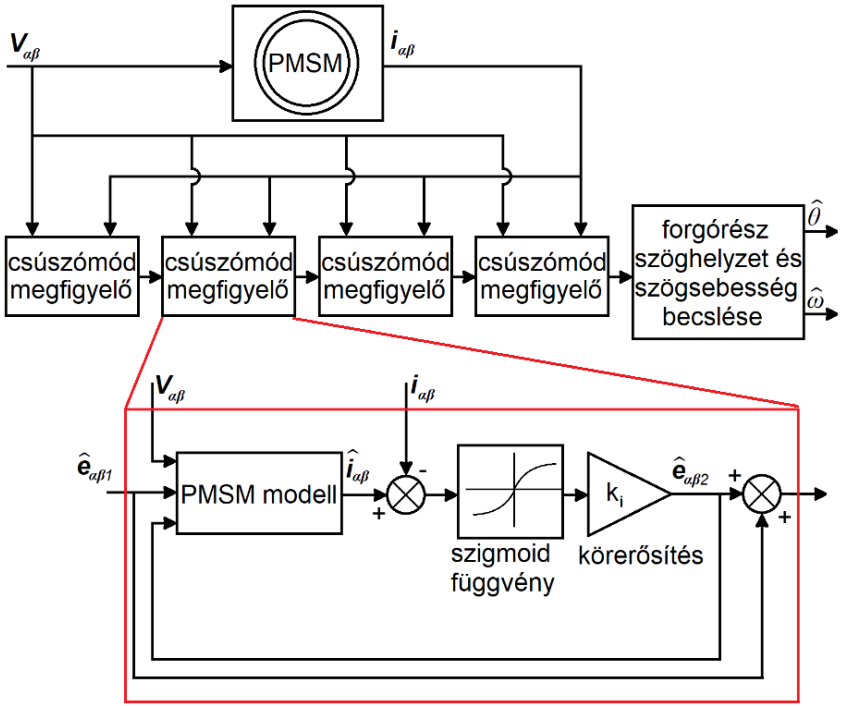
Az elektromos szöghelyzet becsléséhez használt összefüggés:

$$\hat{\theta}_r = -arctan\left(\frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta}\right);$$

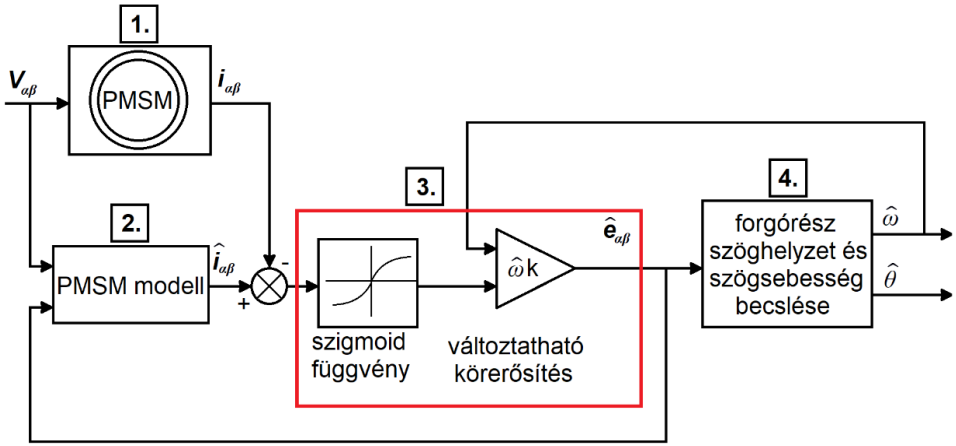
ahol: $\hat{\theta}_r$ - a becsült elektromos pozíció;

$\hat{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{\alpha\beta}} = \begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix}$ - a becsült back EMF vektor.

Csúszómód megfigyelők felépítése



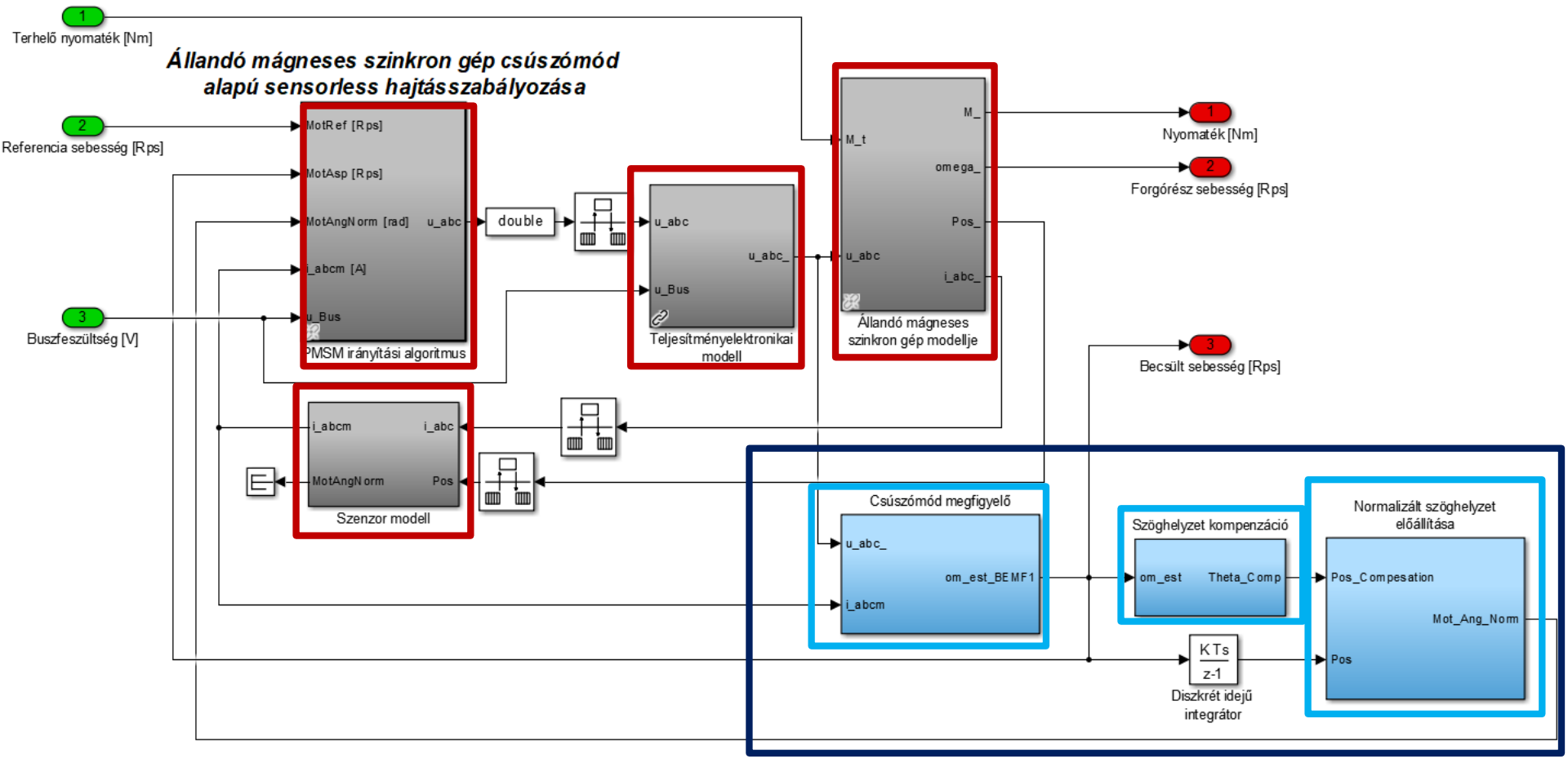
3. ábra: Iteratív felépítésű csúszómód megfigyelő



4. ábra: Adaptív körerősítésű csúszómód megfigyelő

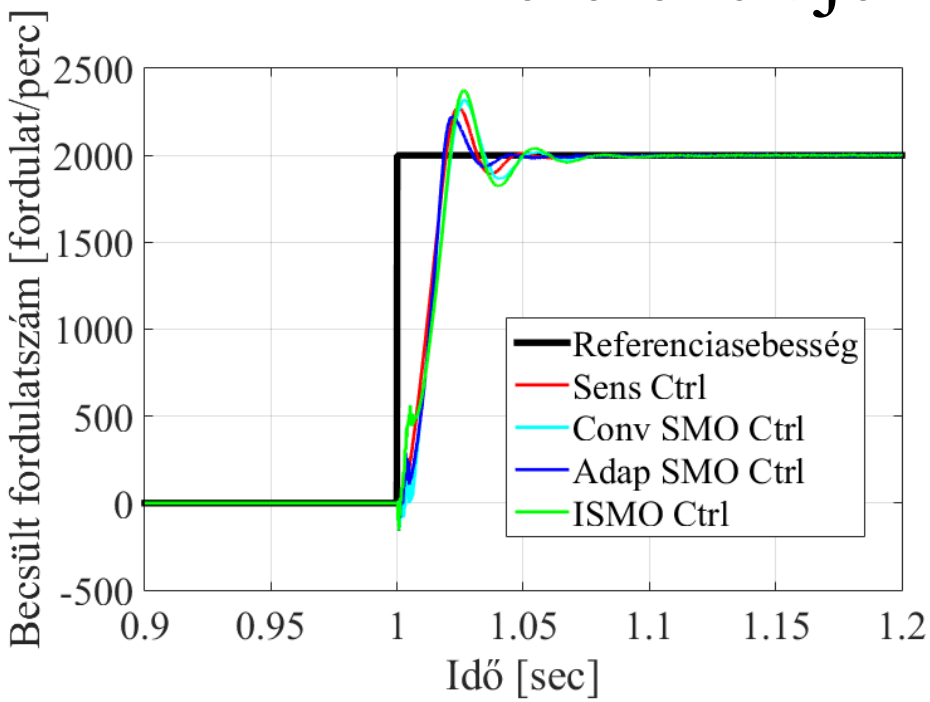
Szimulációs eredmények

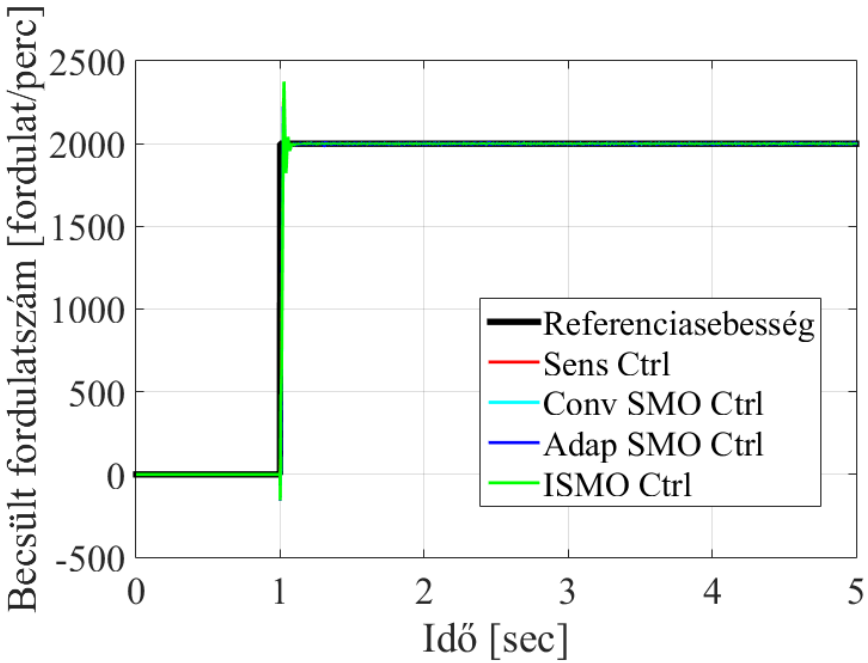
A tervezett sensorless hajtásszabályozás ismertetése



5. ábra: A csúszómód megfigyelővel megvalósított hajtásszabályozási kör felsőszintű blokkvázlata Simulinkben

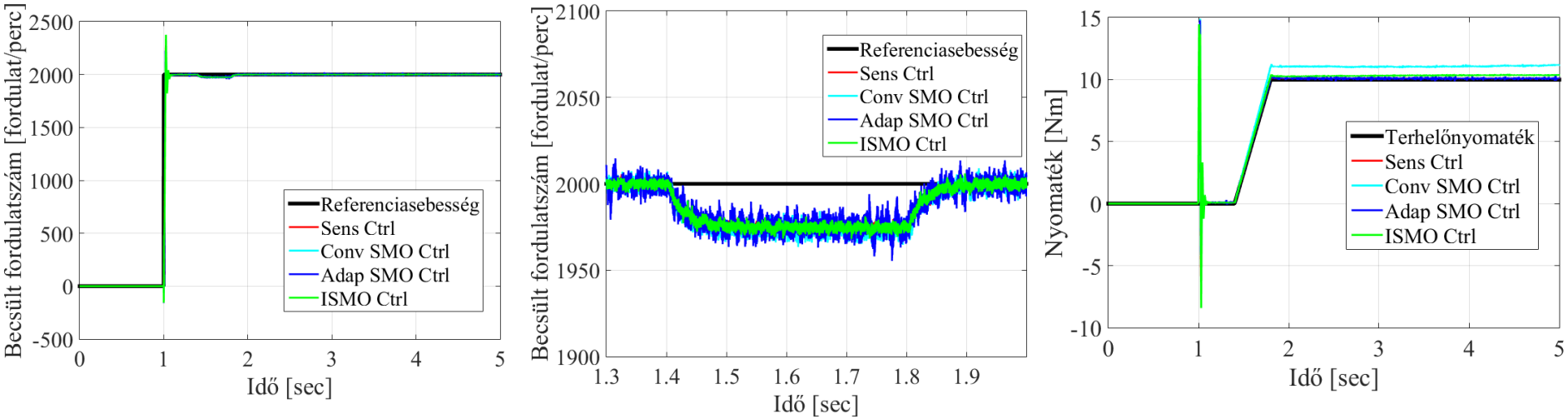
Csúszómód megfigyelőkkel megvalósított hajtásszabályozások összehasonlítása sebesség referenciajel követése során





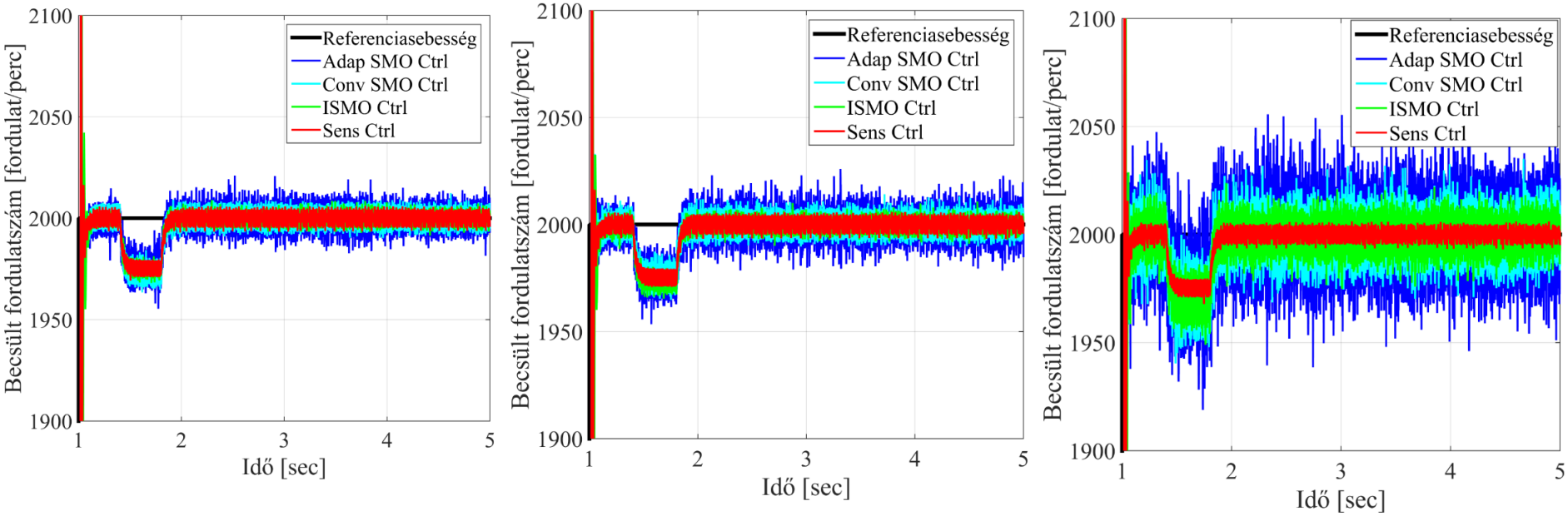
6. ábra: Hajtásszabályozások összehasonlítása adott sebességreferenciajel lekövetése során terheletlen esetben

Csúszómód megfigyelőkkel megvalósított hajtásszabályozások összehasonlítása sebesség referenciajel követése során



7. ábra: Hajtásszabályozások összehasonlítása adott sebességreferenciajel lekövetése során névleges terhelőnyomaték mellett (baloldali ábra, középső ábra), valamint a hajtásszabályozások által becsült nyomatékainak alakulása (jobboldali ábra)

Csúszómód megfigyelőkkel megvalósított hajtásszabályozások összehasonlítása sebesség referenciajel követése során



8. ábra: Csúszómód megfigyelővel megvalósított hajtásszabályozások összehasonlítása a mért áram zajterhelése mellett:

- A fázisáramok zaj terhelése nélkül (baloldali ábra)
- A fázisáramok 10^{-5} A^2 varianciájú fehérzaj terhelésével (középső ábra)
- A fázisáramok $5*10^{-5}$ A^2 varianciájú fehérzaj terhelésével (jobboldali ábra)

(CKSR 6-NP árammérő adatlapján* írt zajának nagyjából másfélszerese)

Csúszómód megfigyelőkkel megvalósított hajtásszabályozások összehasonlítása sebesség referenciajel követése során

Definiálva a sebességreferenciától való eltérés négyzetes középértékét:

$$\varepsilon_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{N}\left(\omega_r - \omega_{est}\right)^2}$$

N - a vizsgált minták száma;

ω_r - a referencia szögsebesség értéke

ω_{est} - a csúszómód megfigyelő által becsült szögsebesség értéke

Fehérzaj varianciája [A^2]	0	10^{-5}	$5*10^{-5}$
Sens Ctrl ε_{RMS} [fordulat/perc]	2,126	2,129	2,122
Conv SMO Ctrl ε_{RMS} [fordulat/perc]	2,8663	3,268	7,584
Adap SMO Ctrl ε_{RMS} [fordulat/perc]	4,444	5,461	13,310
ISMO Ctrl ε_{RMS} [fordulat/perc]	1,959	2,114	5,27

1. táblázat: Az eltérések négyzetes középérteinek összehasonlítása

Eredmények összefoglalása

- Csúszómód megfigyelőkkel megvalósított hajtásszabályozások sebesség referenciajel követése nyomaték terhelés, valamint a fázisáramok zajterhelése mellett

- Az összehasonlítás során az iteratív felépítésű csúszómód megfigyelővel megvalósított hajtásszabályozás során voltak a legkisebb négyzetes hibajelek

Kitekintés

- További tervek:
  - Paraméterérzékenységi vizsgálat során (pl: Morris módszer) a csúszómód megfigyelők robusztusságának vizsgálata
    - A fázisáramok zajterhelése mellett további paraméterekkel: fázisellenállás, fázisinduktivitás, állandó mágneses fluxus, stb.
  - A szimulációs eredmények validálása méréssel

Felhasznált irodalom

- Qiao, Z., Shi, T., Wang, Y., Yan, Y., Xia, C., He, X.: *New Sliding-Mode Observer for Position Sensorless Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor,* IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60., Iss. 2., (2013), pp. 710-719.

- Kim, H., Son, J., Lee, J.: *A High-Speed Sliding-Mode Observer for the Sensorless Speed Control of a PMSM,* IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol., 58., Iss. 9., (2011), pp. 4069-4077.

- Korondi P.: *Csúszómód-szabályozás a teljesítményelektronikában és mechatronikában,* Akadémiai Kiadó, Budapest (2017)

- Kuslits M.: *Állandómágneses szinkrongépek modellalapú irányításfejlesztése,* Publio Kiadó Kft., Győr (2016), p. 96.

- Kazerooni, M., Hamidifar, S., Kar, N. C.: *Analytical modelling and parametric sensitivity analysis for the PMSM steady-state performance prediction,* IET Electric Power Application, Vol., 7., Iss. 9., pp. 586-596., 2013

- Liang, D., Li, J., Qu, R.: *Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Machine Based on Second Order Sliding-Mode Observer with Online Resistance Estimation*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53., Iss. 4., pp. 3672-3682., 2017

- Kim, H., Son, J., Lee, J.: *A High-Speed Sliding-Mode Observer for the Sensorless Speed Control of a PMSM,* IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol., 58., Iss. 9., pp. 4069-4077., 2011

Felhasznált irodalom

- Lee, H., Lee, J.: *Design of Iterative Sliding Mode Observer for Sensorless PMSM Control*, IEEE Transactions on Control System Technology, Vol.: 21, Issue: 4, pp. 1394-1399., 2013

- Kyslan, K., Slapák, V., Petro, V., Marcinek, A., Durovsky, F.: *Speed Sensorless Control of PMSM with Unscented Kalman Filter and Initial Rotor Alignment*, 2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), The High Tatras, Slovakia, pp. 373-378. 24-26 Sept. 2019

- Kyslan, K., Slapák, V., Fedák, V., Durovsky, F., Horváth, K.: *Design of Load Torque and Mechanical Speed Estimator of PMSM with Unscented Kalman Filter - An Engineering Guide*, 2017 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), Dubrovnik, pp. 297-302. 04-06 Oct. 2017

- Árammérő szenzorok adatlapja:

- CKSR 6-NP - https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/cksr_series.pdf

- ACS712 - https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf

Köszönöm a figyelmet!

Csúszómód megfigyelők működése

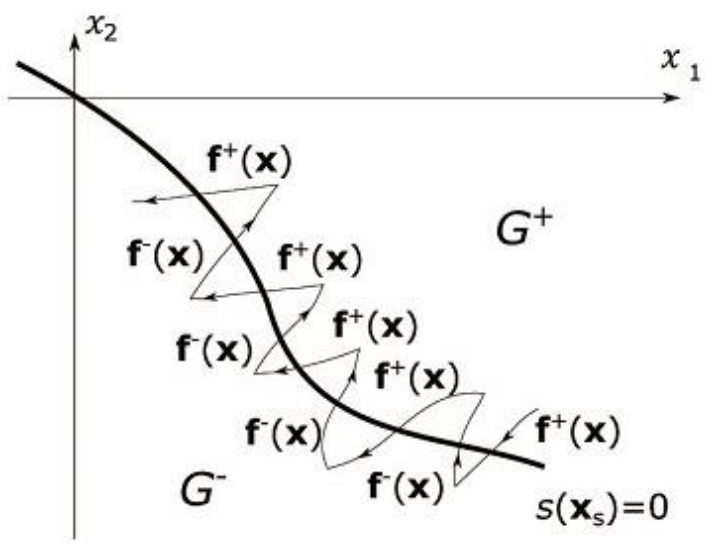
A csúszófelület definiálása:

$S(\mathbf{X}) = H(\widehat{\mathbf{i}_\mathbf{s}} - \mathbf{i}_\mathbf{s}) = \mathbf{0}$;

ahol:

$\widehat{\mathbf{i}_\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \widehat{i_\alpha} \\ \widehat{i_\beta} \end{bmatrix}$ - a becsült áramvektor;

*S(***X***)* - a csúszófelülettől mért előjeles távolság skalárfüggvénye.



4. ábra: Trajektória a csúszófelület mentén

A csúszómódot elérve:

$$\dot{S}(\mathbf{X}) = S(\mathbf{X}) = \mathbf{0}$$

Fenti egyenlőség esetén, az alábbi azonosság teljesül:

$$\mathbf{e}_\mathbf{s} \cong \hat{\mathbf{e}}_\mathbf{s} = k \cdot H\left(\widehat{\mathbf{i}_\mathbf{s}} - \mathbf{i}_\mathbf{s}\right);$$

ahol:

H – a szigmoid függvény;
k – a csúszómód megfigyelő; hangolható hurokerősítése;

$\hat{\mathbf{e}}_\mathbf{s} = \begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix}$ - a becsült back EMF vektor;

$$H(x) = \left[\frac{2}{1 + e^{-ax}}\right] - 1;$$

ahol:

a – a szigmoid függvény hangolható,

Paraméter megnevezése	Jelölés	Érték	Mértékegység
Állórész ellenállása	R_s	1	[Ω]
Állórész induktivitása	L_s	0.006	[H]
Póluspárszám	N	2	[-]
Másodrendű tehetetlenségi nyomaték	J	0.001	[kgm^2]
Állandómágnes fluxusa	λ_m	0.2	[Wb]
Névleges teljesítmény	P_r	2.1	[kW]
névleges fordulatszám	n_r	2000	[rpm]
névleges nyomaték	T_r	10	[Nm]
névleges áram	I_r	16.5	[A]
lineáris csillapítási tényező	D	0.0004	[Nm·s/rad]