

Grid-forming inverter modellek összehasonlító vizsgálata

Sütő Bence, Tóth Balázs, Dr. Divényi Dániel, Dr. Farkas Csaba, Dr. Raisz Dávid

XII. Mechwart András Ifjúsági Találkozó

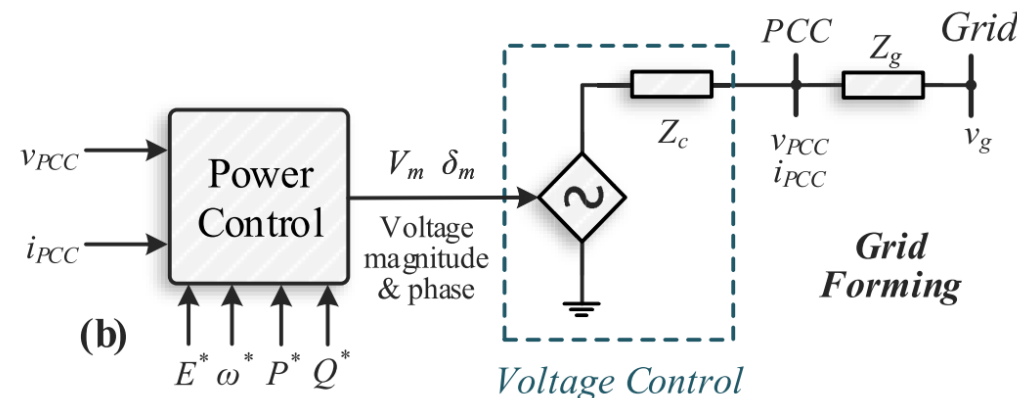
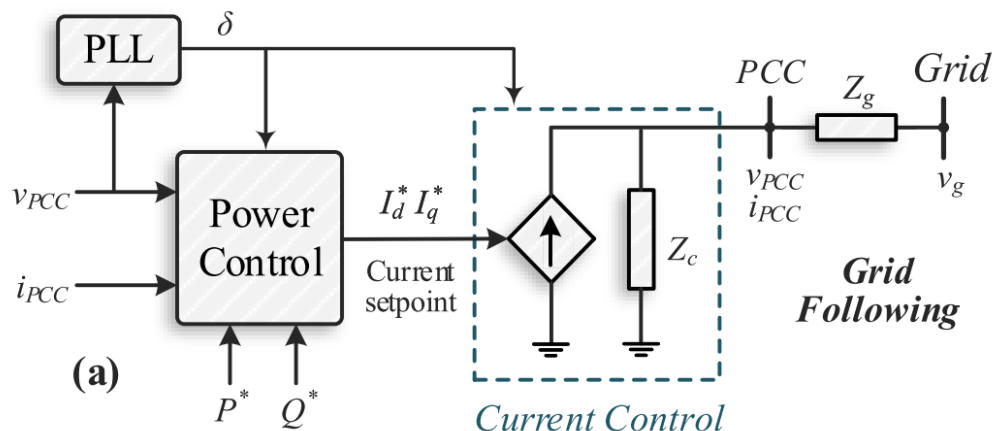
Debrecen, 2022.09.20.

Tartalom



- > Bevezetés – grid-following (GFL) és grid-forming (GFM) konverterek
- > Grid-forming konverterek típusai
- > Hangolástechnika
- > Eredmények
- > Konklúzió

Bevezetés



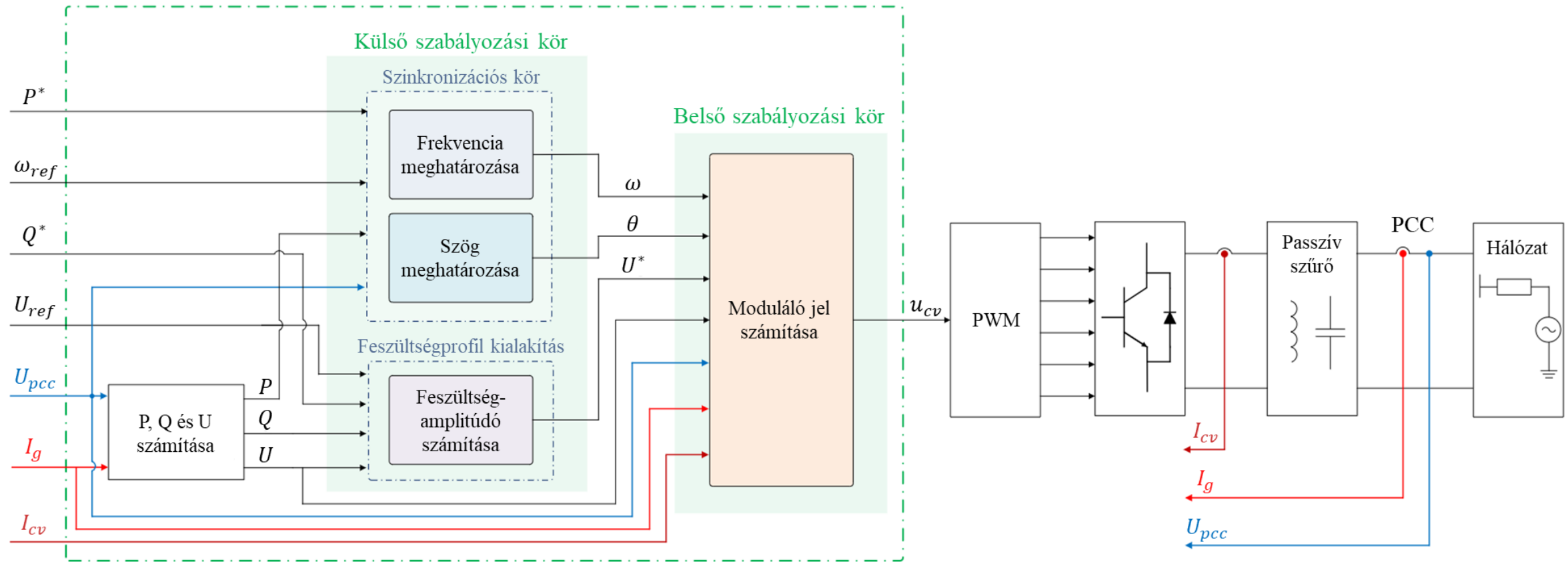
- > Áramgenerátoros – csak külső feszültségjel mellett működik
- > Szinkron üzem – PLL
- > Erős hálózati táppont szükséges

- > Feszültséggenerátoros – nem szükséges külső feszültség
- > Szinkron üzem – teljesítményszabályozási kör
- > Gyenge hálózaton jól működik

Túl sok, közel telepített egység instabil

Grid-forming topológiák

Alapvető felépítés



Vizsgált modellek



- > Elnevezések a P-f szabályozás alapján
- > Sok különböző (?) modell létezik a szakirodalomban
- > Jelen előadásban
 - > Droop szabályozás
 - > VSM kaszkád szabályozás
 - > Szinkronverter
 - > Virtuális oszcillátoralapú szabályozás (VOC)

Modellek egyenletei



| Modell | Hatásosteljesítmény-frekvencia kör | Meddőteljesítmény-feszültség kör |
|--|---|---|
| Droop szabályozás | $\omega = \omega_{ref} + K_p(P^* - P_f)$ | $U^* = U_{ref} + K_q(Q^* - Q_f) - Z_v I_g$ |
| VSM kaszkád szabályozás | $\omega = \frac{1}{sN} [P^* - P + K_\omega(\omega_{ref} - \omega) + K_d(\omega_{PLL} - \omega)]$ | $U^* = U_{ref} + K_q(Q^* - Q_f) - Z_v I_g$ |
| Szinkronverter | $\omega = \frac{1}{sJ} \left[T^* - T_f + D_p(\omega_{ref} - \omega) - sD_f \frac{T_f}{\Psi_f} \right]$ | $\Psi = \frac{1}{sK} [Q^* - Q_f + D_q(U_{ref} - U_f)]$ |
| Virtuális oszcillátoralapú szabályozás | $s\theta = \omega_n - \frac{\kappa_v \kappa_i}{3CU_{cv}^2} (P - P^*)$ | $sU_{cv} = \frac{\xi}{\kappa_v^2} U_{cv} (2U_n^2 - 2U_{cv}^2) - \frac{\kappa_v \kappa_i}{3CU_{cv}} (Q - Q^*)$ |

Paraméterek hangolása

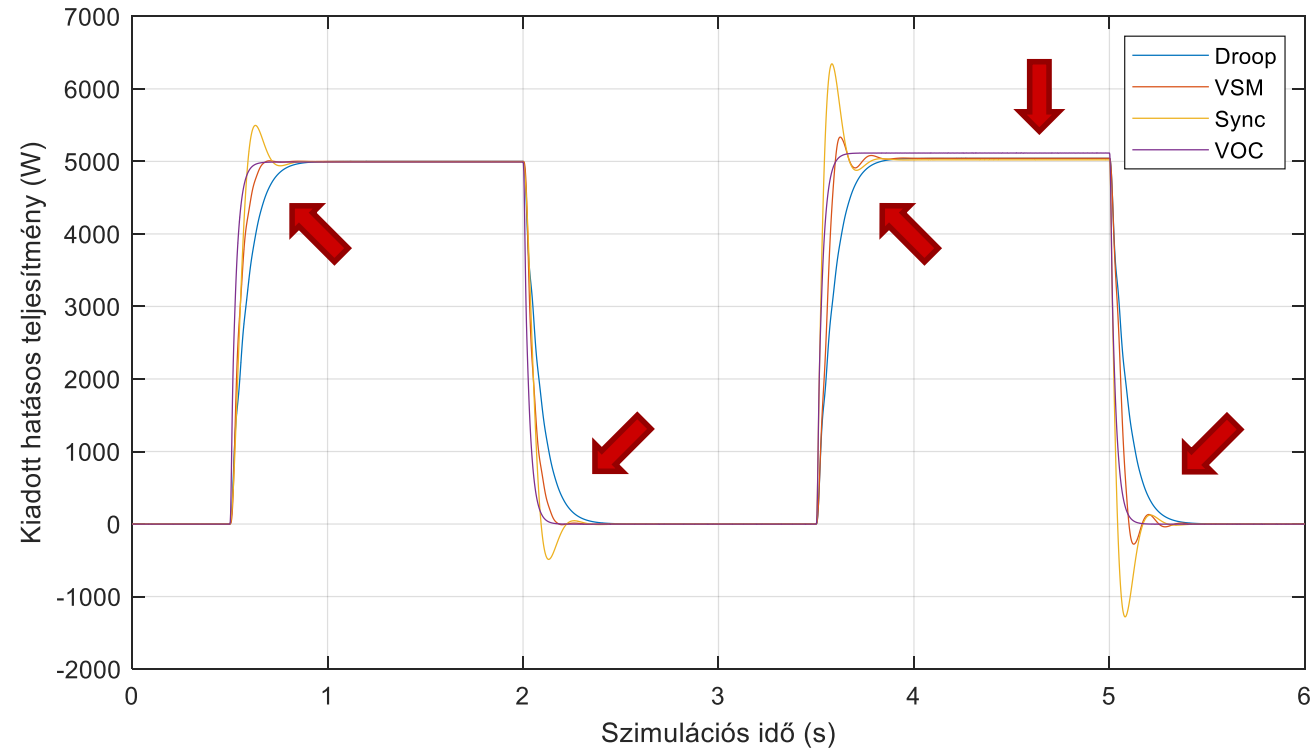
Hangolási algoritmus



- > Állandósult állapotbeli egyezés – droop konstansok hangolása
- > Dinamikus viselkedés egyeztetése
 - > Adott munkapontban linearizált (kisjelű) modell
 - > Póluseloszlás meghatározása
 - > Érzékenységvizsgálat
 - > Kijelölt pólusok (lehetőség szerint) azonos értékre választása
- > Mostani vizsgálatok alapja: VOC modell

Szimulációs eredmények

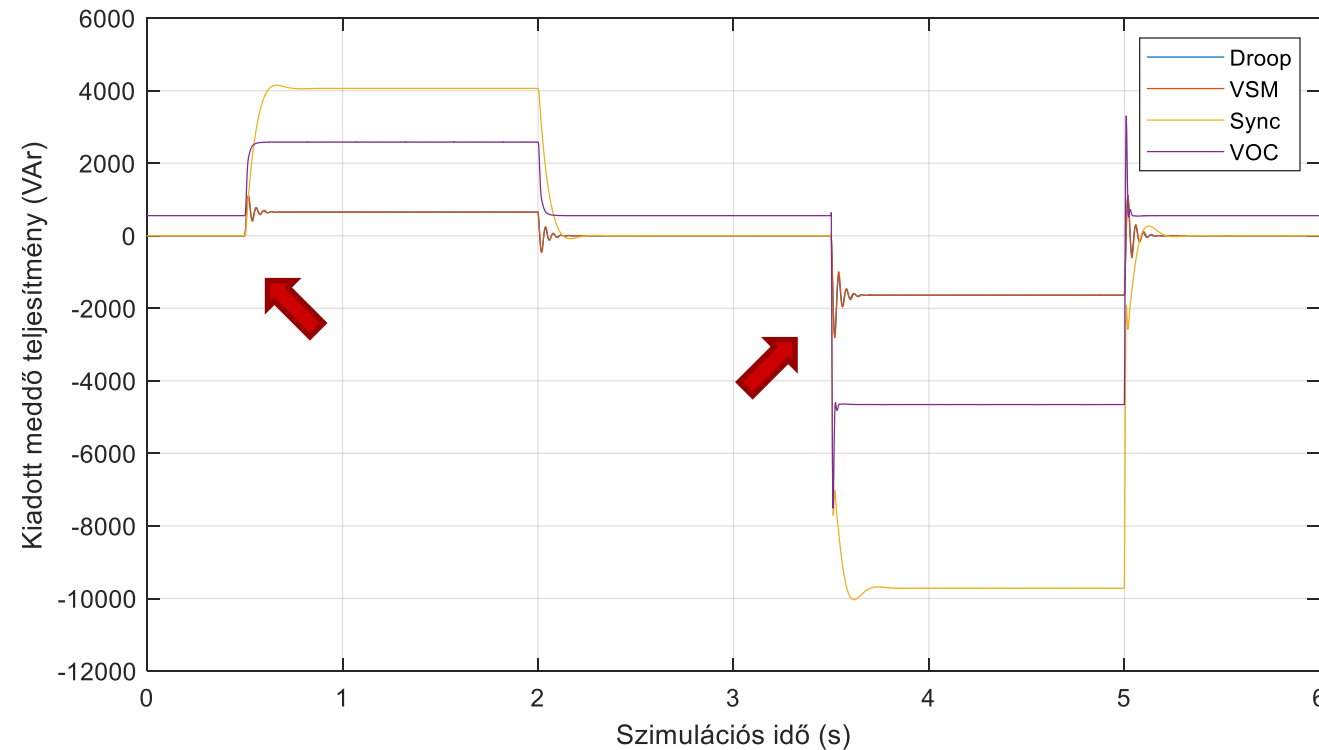
P-f kör vizsgálata



A vizgált GFM modellek válasza 5 kW hatásosteljesítmény-alapjelugrása (0,5 s), illetve 0,2 Hz frekvenciacsökkenésre (3,5 s)

- > Egytárolós viselkedés – droop, VOC
- > Kéttárolós viselkedés – VSM, szinkronverter

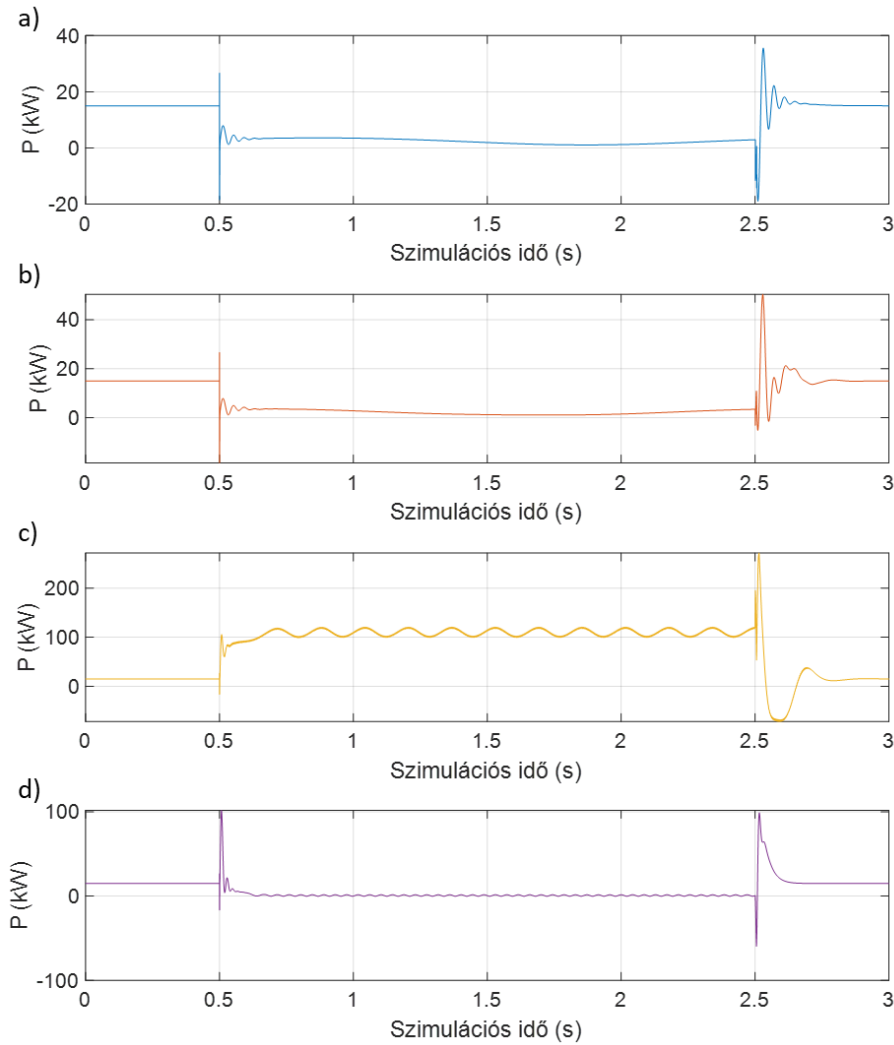
U-Q kör vizsgálata



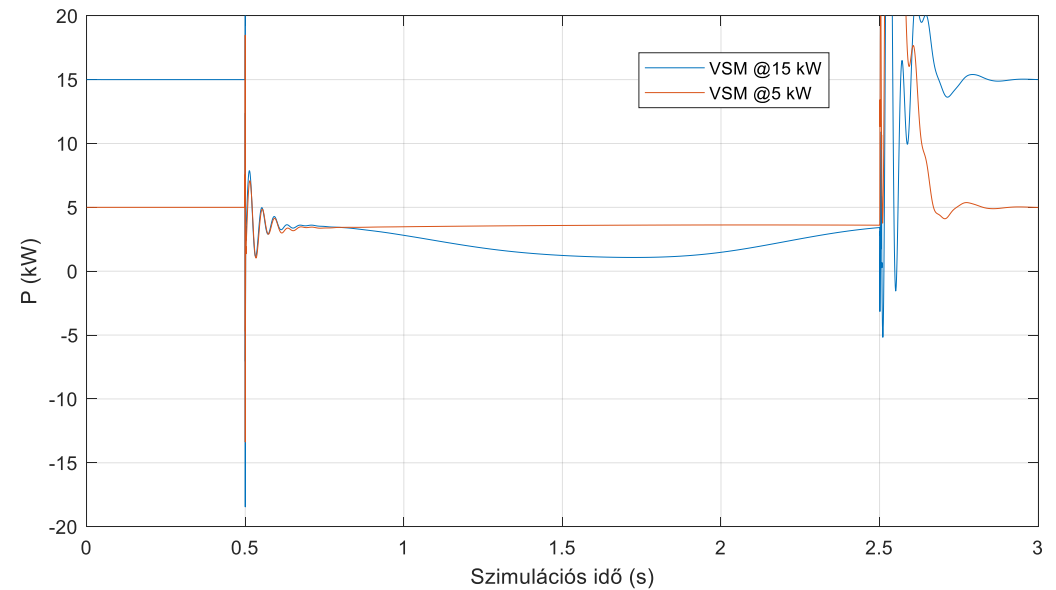
A vizgált GFM modellek válasza 5 kVAr meddőteljesítmény-alapjelugrása (0,5 s), illetve 5% feszültségcsökkenésre (3,5 s)

- > Állandósult meddő eltérés: virtuális impedancia, értelmezési hely
- > VOC reakciója bemenettől függ

GFM konverterek zárlat alatt



- Csak alapmodelleket tesztelünk
- Nincs zárlati áramkorlátozás
- Nincs hálózattámogató célfüggvény
- Zárlati korlátozás eszközei:
 - Áramkorlát
 - Virtuális impedancia
 - Alapjel csökkentése



GFM modellek kiadott hatásos teljesítményének elméleti értéke 15 kW alapjel mellett, háromfázisú zárlat alatt: a) droop, b) VSM kaszkád, c) szinkronverter, d) VOC

Konklúzió



- > A GFL inverterek mellett szükség van GFM inverterekre is
- > A megvalósítandó modell alkalmazásfüggő
 - > A paraméterek nem hangolhatók azonos viselkedésre minden esetben
 - > Azonos hangolás esetén is eltérések tapasztalhatók a válaszjelben
- > További kutatás:
 - > Matching control, mint 5. vizsgálandó modell
 - > Aszimmetria- és harmonikustűrés szimulációban
 - > Hardware-in-the-loop szimulációk

Köszönöm a figyelmet!

Sütő Bence, suto.bence@bme.hu