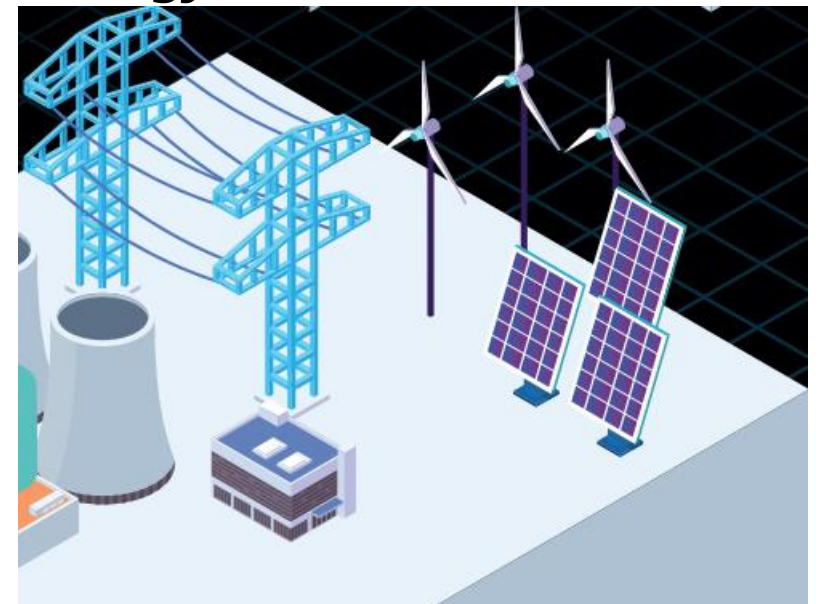


Konverter-alapú lineáris rendszerdinamika vizsgálata

Szirbik Bence, Dr. Raisz Dávid
MAIT Konferencia, Szeged
2021.09.21.

- > Átalakuló villamosenergia-rendszer
 - > Digitalizáció
 - > Újfajta termelőegységek elterjedése

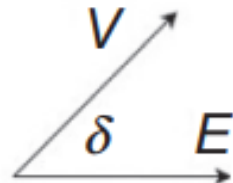
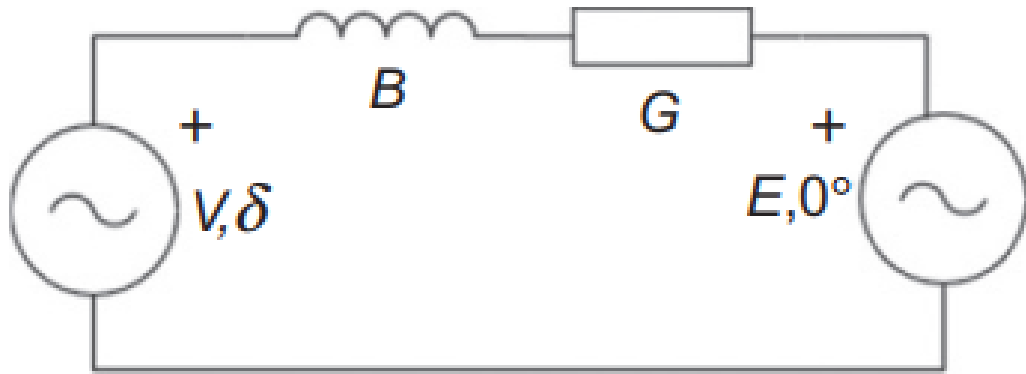
- > Teljesítményelektronikai(TE) átalakítók nagy számú megjelenése közvetlen hálózati csatlakozással
 - > Decentralizáltság
 - > Újfajta szabályozási módszerek (többféle)
 - > Grid-feeding (following) → Supporting (fix I)
 - > Grid-forming → Sustaining (fix U)
 - > Virtuális inercia (VSM) → Lineáris rendszerdinamika





Lineáris rendszerdinamika elméleti bevezetése

Linear Swing Dynamics (LSD)



Lengési egyenletek:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} (P_{ref} - P - D \cdot \dot{\delta})$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_n$$

$$P = V^2 G - EV(B \cdot \sin\delta + G \cdot \cos\delta)$$

$$P = BEV \cdot \sin\delta = \frac{EV}{X} \cdot \sin\delta$$

Lengési egyenlet linearizálása

> Nemlineáris

> Lineáris

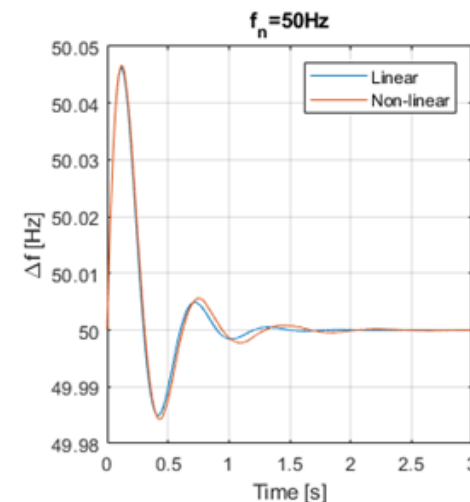
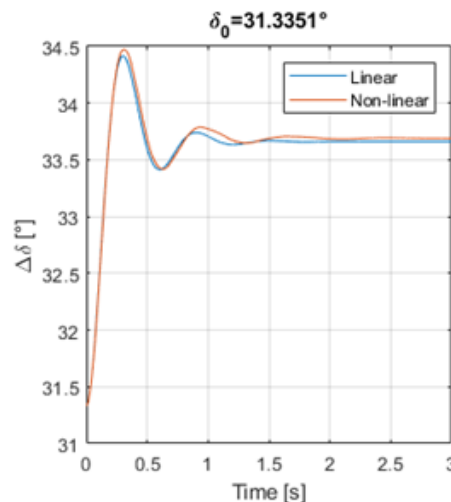
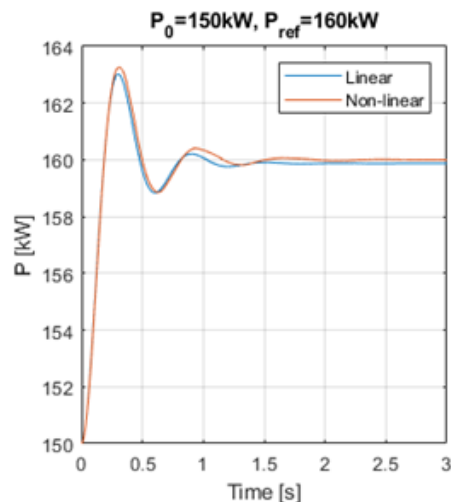
> Munkapontfüggő

> Munkapont körül ad jó megoldást

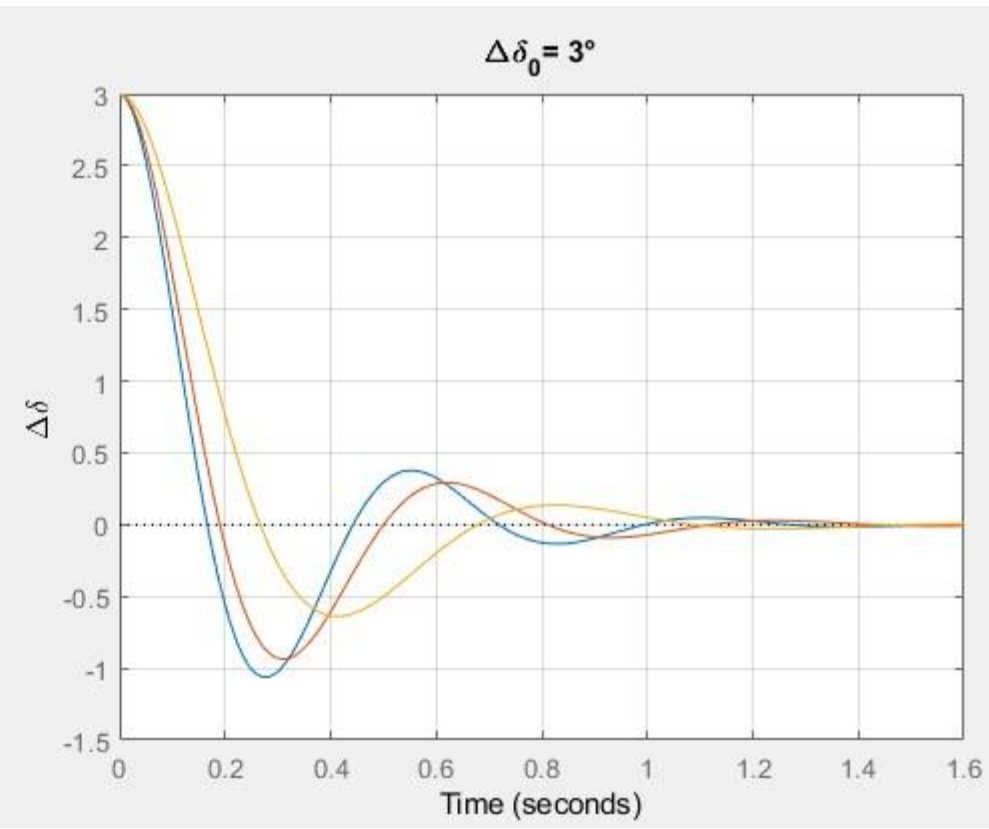
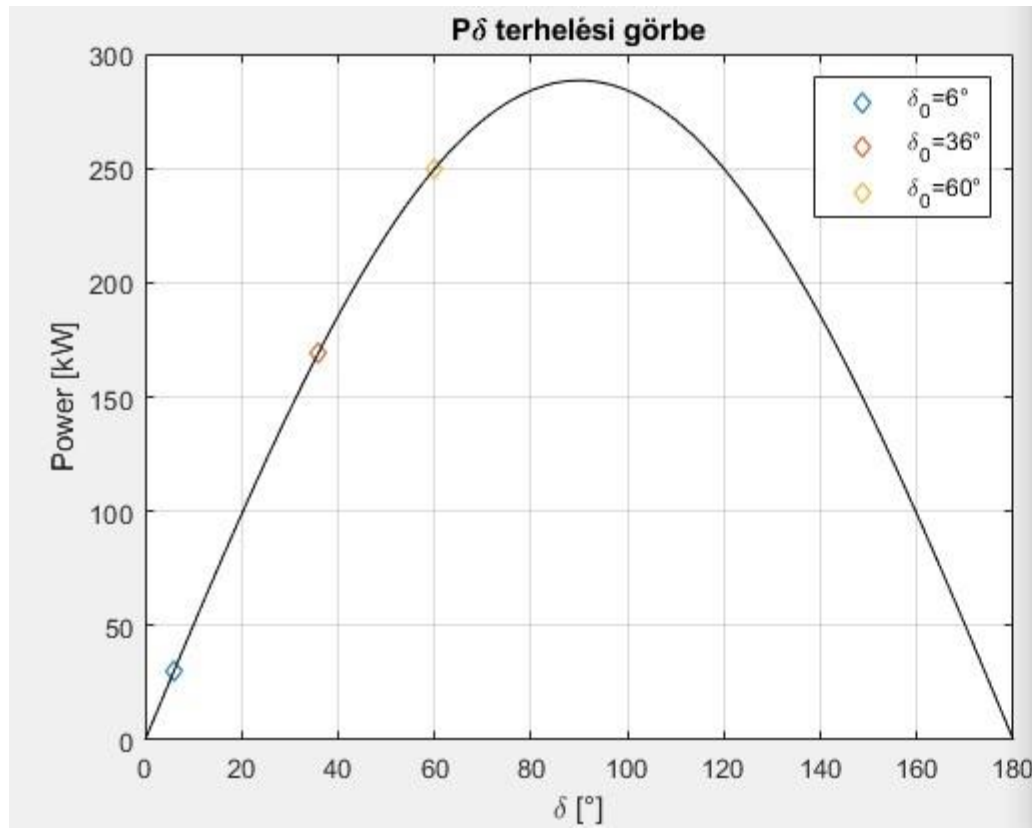
> Kisjelű közelítés

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{EV}{MX} \sin\delta & -\frac{D}{M} \omega \\ \frac{1}{M} & -\frac{1}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ \omega_n \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{M} \\ -\frac{EV}{MX} \cos\delta_0 & -\frac{1}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{M} \\ \frac{1}{M} & -\frac{1}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{ref} \\ \Delta\omega_n \end{bmatrix}$$



Linearizált lengési egyenlet megoldása



LSD bevezetése

- > Lineárizált lengési egyenlet továbbfejlesztése / kiterjesztése
- > Cél: egységes dinamikai viselkedés a teljes tartományban
 - > Egyértelmű stabilitási korlátok nagyszámú inverters termelő esetén is
 - > Sajátértékekkel jellemezhető!

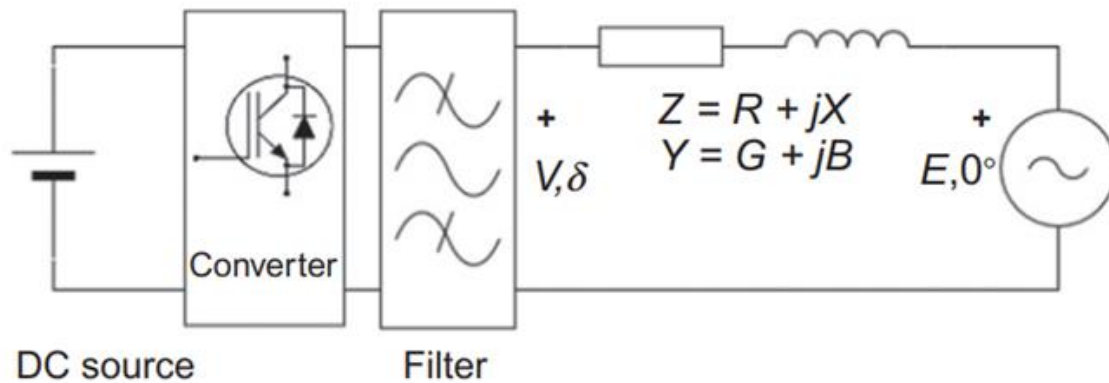
$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{EV}{MX} \cos \delta_0 & -\frac{D}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix}$$

- > Lineárizált lengési egyenlet továbbfejlesztése / kiterjesztése
- > Cél:
 - > Egységes dinamikai viselkedés a teljes működési tartományban
 - > sajátérték kifejezésében ne szerepeljen se P , se δ_0 .
- > Több módszer létezik
 - > Feszültség alapú megközelítés
 - > Adaptív inercia paraméterekkel
 - > Delta-alapú LSD
 - > Adott állandó sajátértékek

$$\lambda_{1,2} = -\frac{D}{2M} \pm \sqrt{\left(\frac{D}{2M}\right)^2 + \frac{EV}{MX} \cdot \cos\delta_0}$$

$$\lambda_{1,2} = -\gamma \pm j\sqrt{\Omega}$$

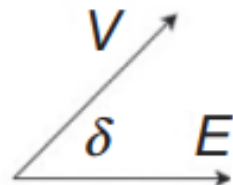
Egygépes rendszer dinamikai egyenletei



Lengési egyenletek:

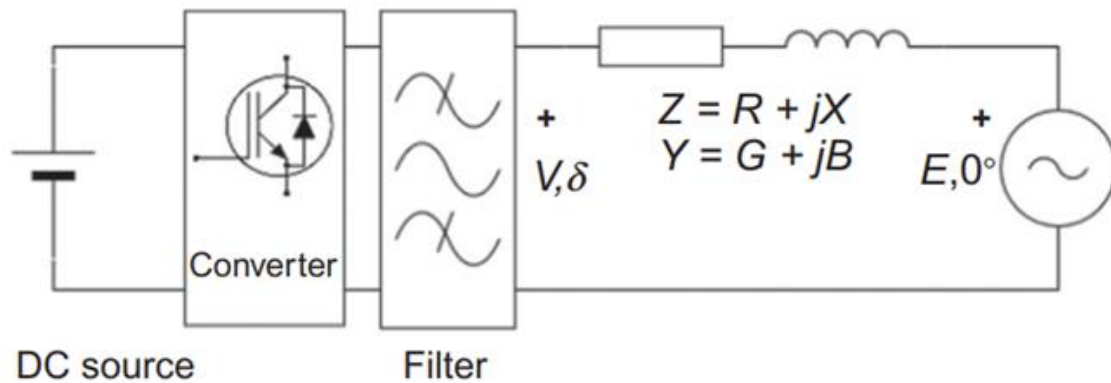
$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} (P_{ref} - P - D \cdot \dot{\delta})$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_n$$



$$P = BEV \cdot \sin\delta = \frac{E \cdot V}{X} \cdot \sin\delta$$

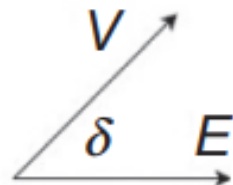
Egygépes rendszer dinamikai egyenletei



$$\dot{\omega} = (\gamma^2 + \Omega)(\delta_{ref} - \delta) - 2\gamma\dot{\delta}$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_n$$

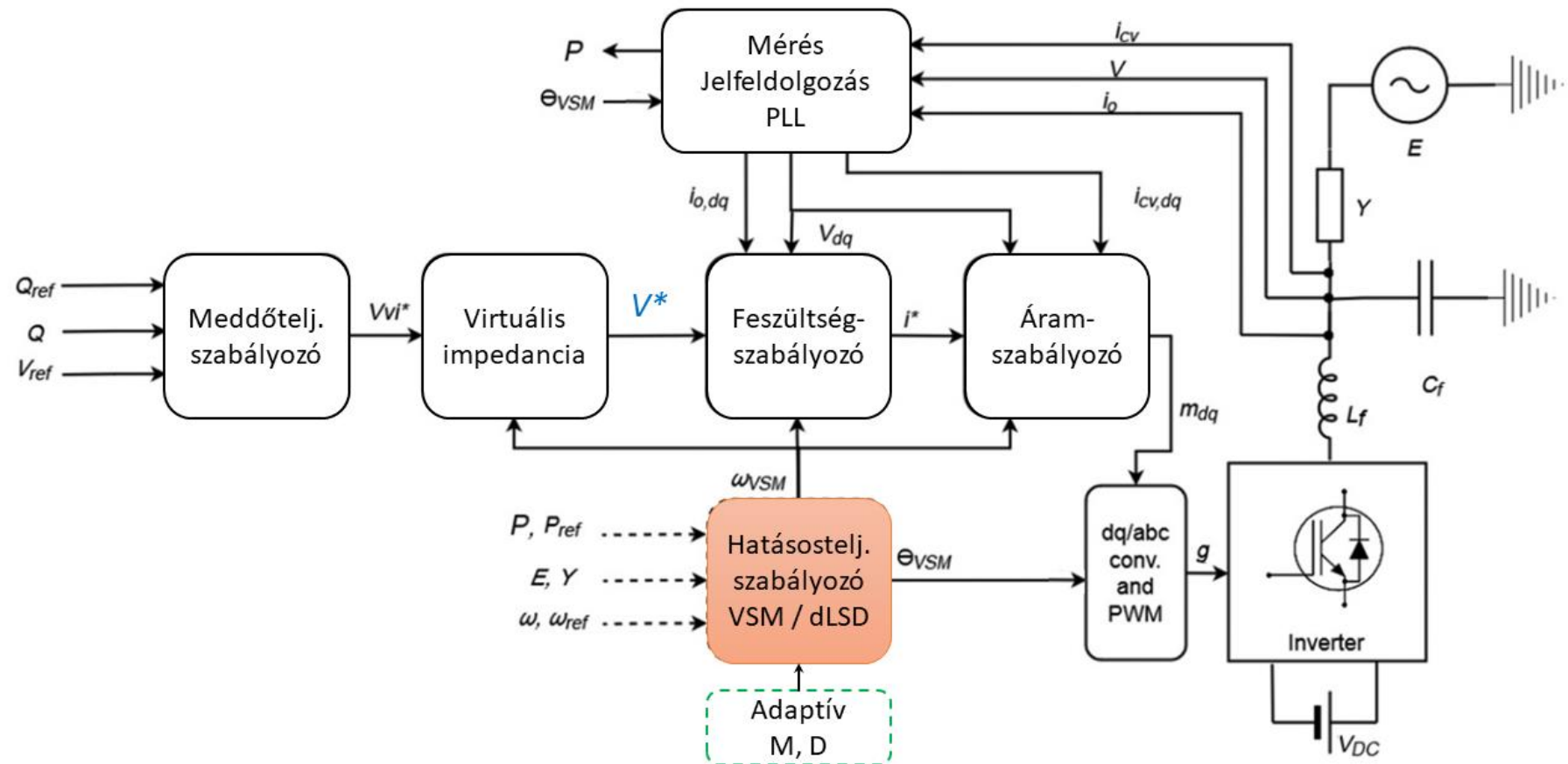
delta alapú lengési egyenlet



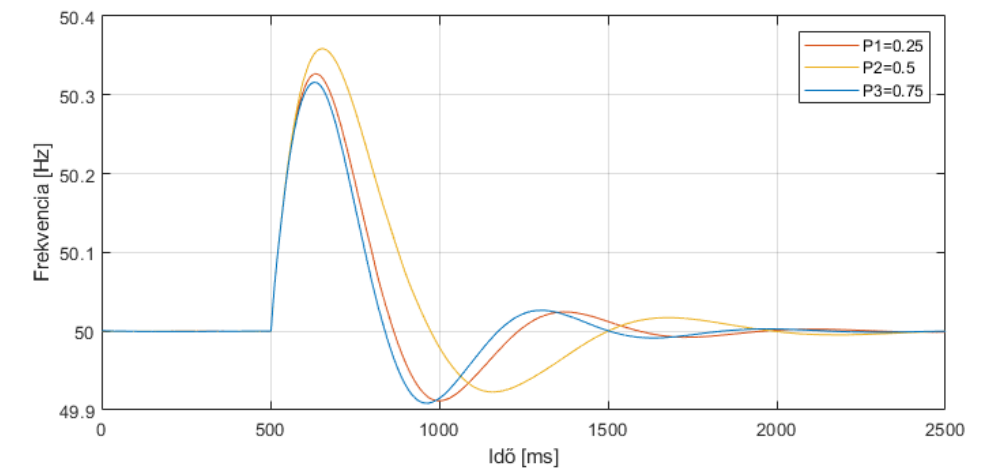
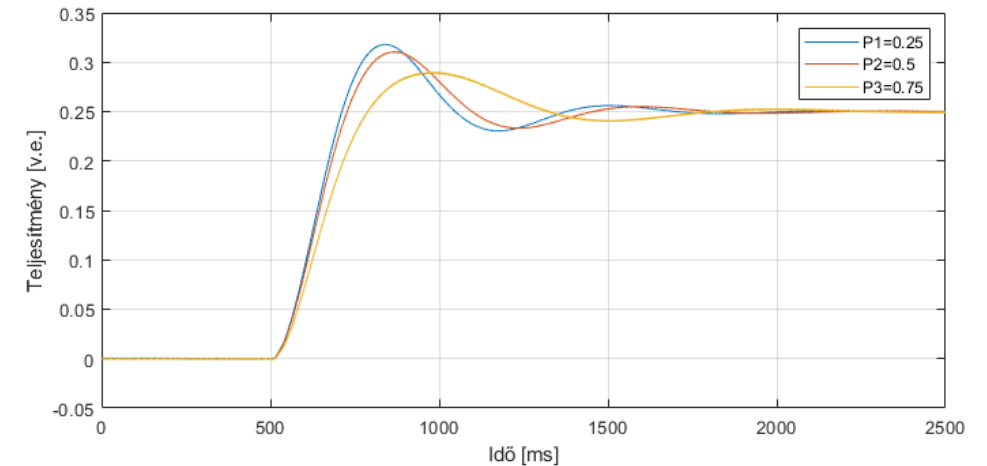
$$P = BEV \cdot \sin\delta = \frac{E \cdot V}{X} \cdot \sin\delta$$

LSD implementálása inverter szabályozásba

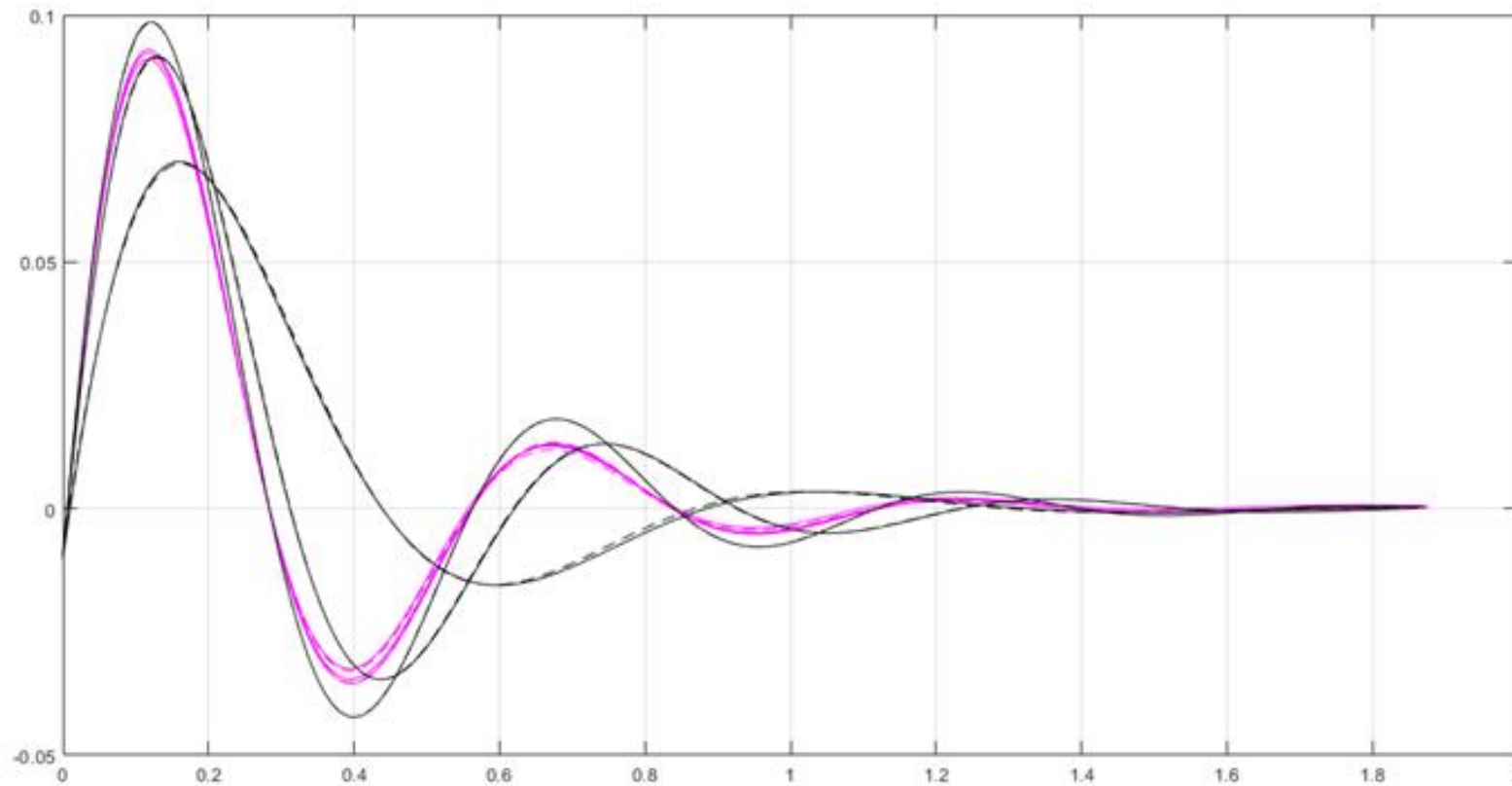
> Kaszkád rendszerű felépítés



- > Teljesítmény-alapjel ugrások
 - > 0→25%, 25→50%, 50→75%

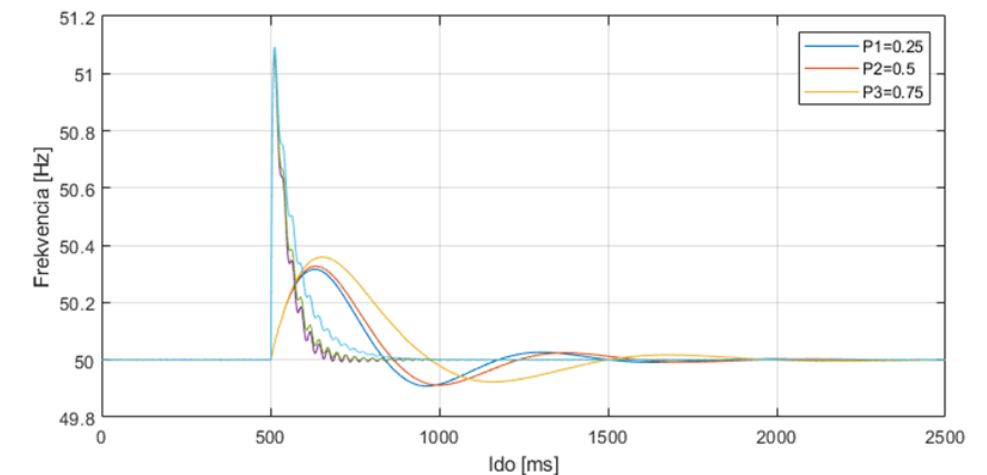
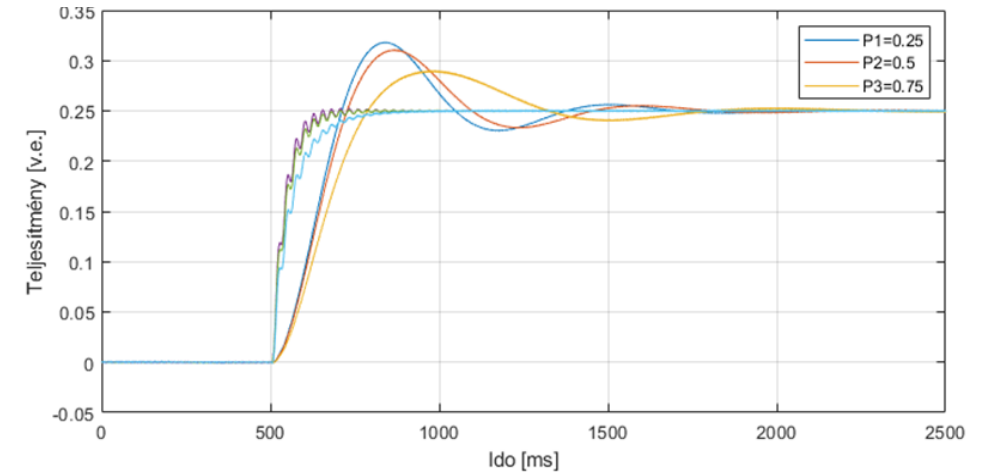


Szakirodalmi példa



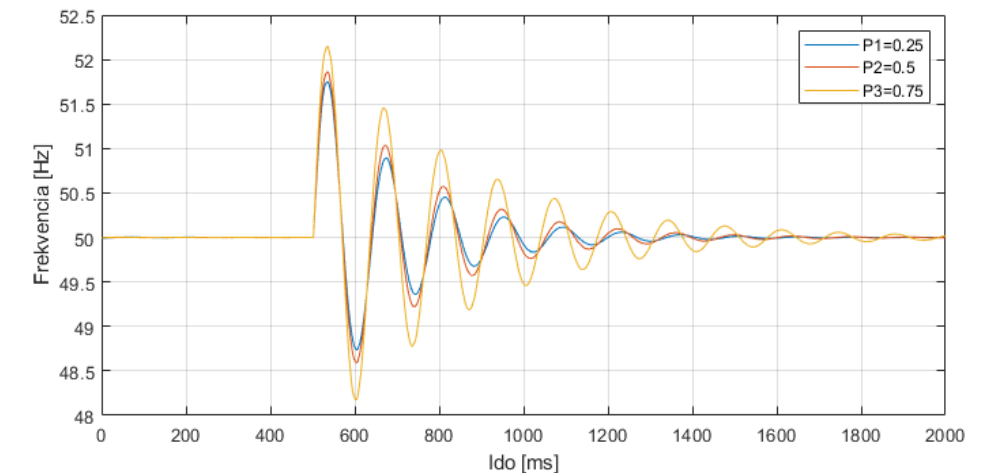
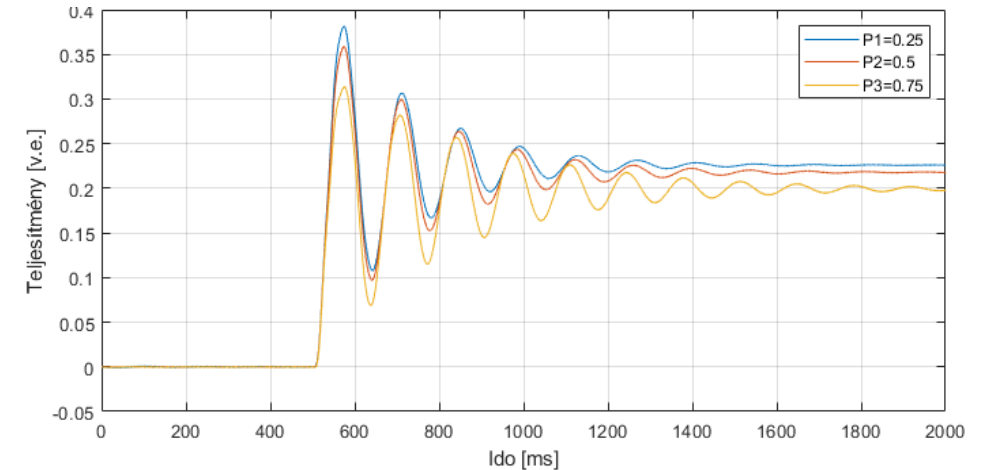
Adaptív LSD módszer

- > M és D paraméterek online változtatása
- > Teljesítmény-alapjel ugrások
 - > 0→25%, 25→50%, 50→75%
- > Lengések jobban hasonlítanak egymásra
 - > Összességében még nem jobbak
 - > Plusz rezgés a jeleken (visszacsatolások miatt)
 - > Pontosabb hangolás szükséges!



Delta-alapú LSD módszer

- > Lengési egyelet újradefiniálása!
- > Teljesítmény-alapjel ugrások
 - > 0→25%, 25→50%, 50→75%
 - > Alapjelkövetés nem pontos rögtön.
- > Lengések jobban hasonlítanak egymásra
 - > Frekvenciában már job
 - > Amplitúdóban még túl nagy
 - > Pontosabb hangolás szükséges!



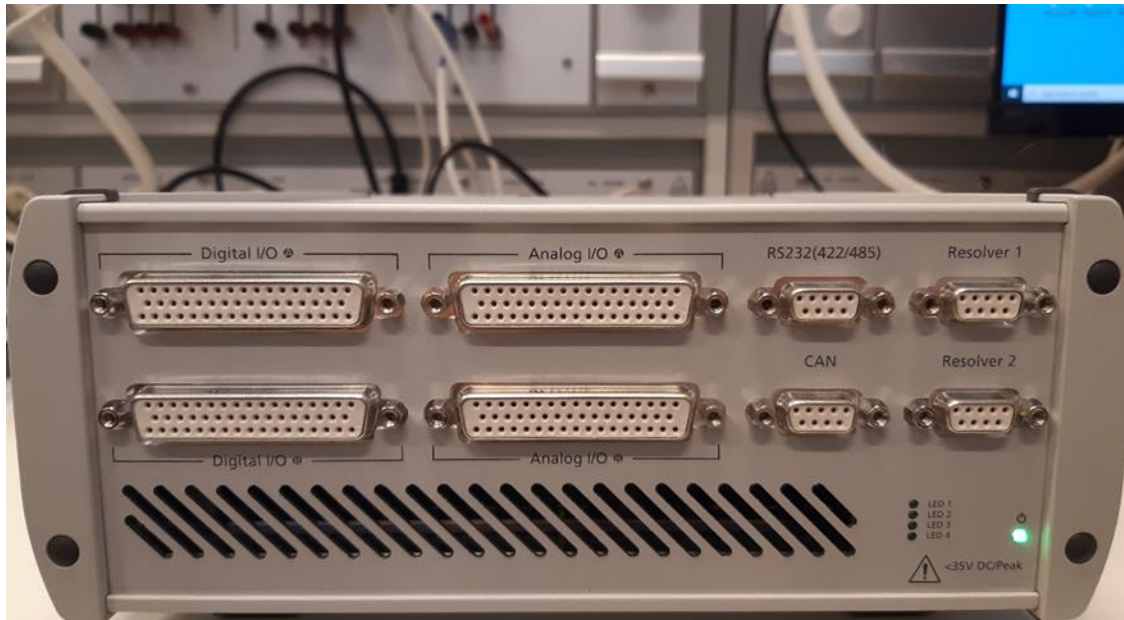
Hardveres megvalósítás

Power Hardware-In-the-Loop tesztek

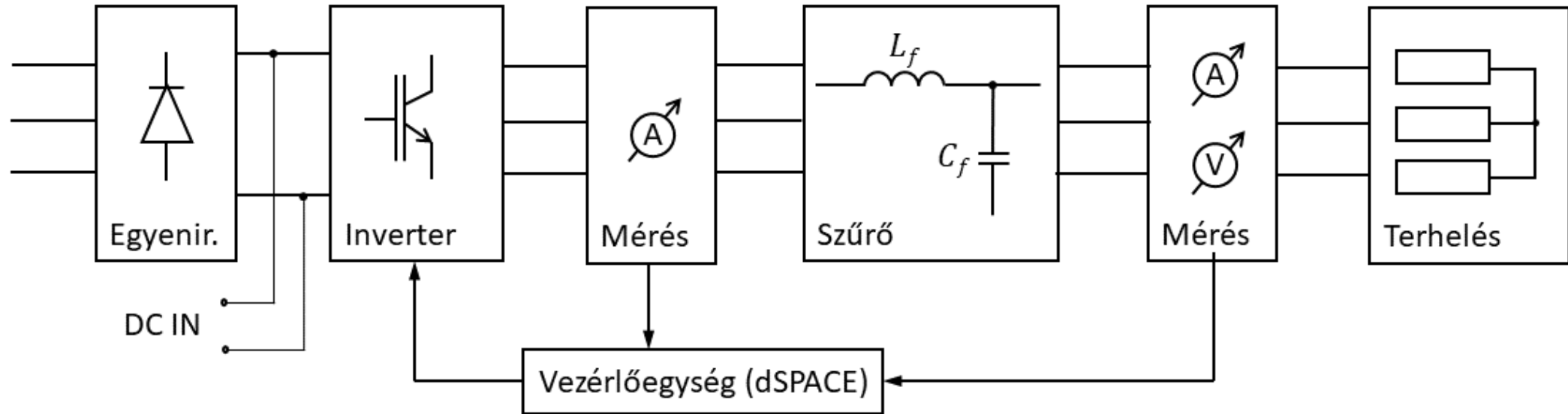
Labor eszközei

- > dSPACE MicroLabBox
 - > High-end FPGA
 - > 100+ csatorna (AIO, DIO)

- > Danfoss frekvenciaváltók
 - > 3, 5.5, 11kW
 - > Fejlesztői vezérlőkártyákkal



Kapcsolási rajz



> Szoftver (elmélet)

Grid-feeding modell tesztelése

Grid-forming modell

Darco-féle VSM modell

LSD modellek tesztelése

rapid-
prototyping

> Hardver (gyakorlat)

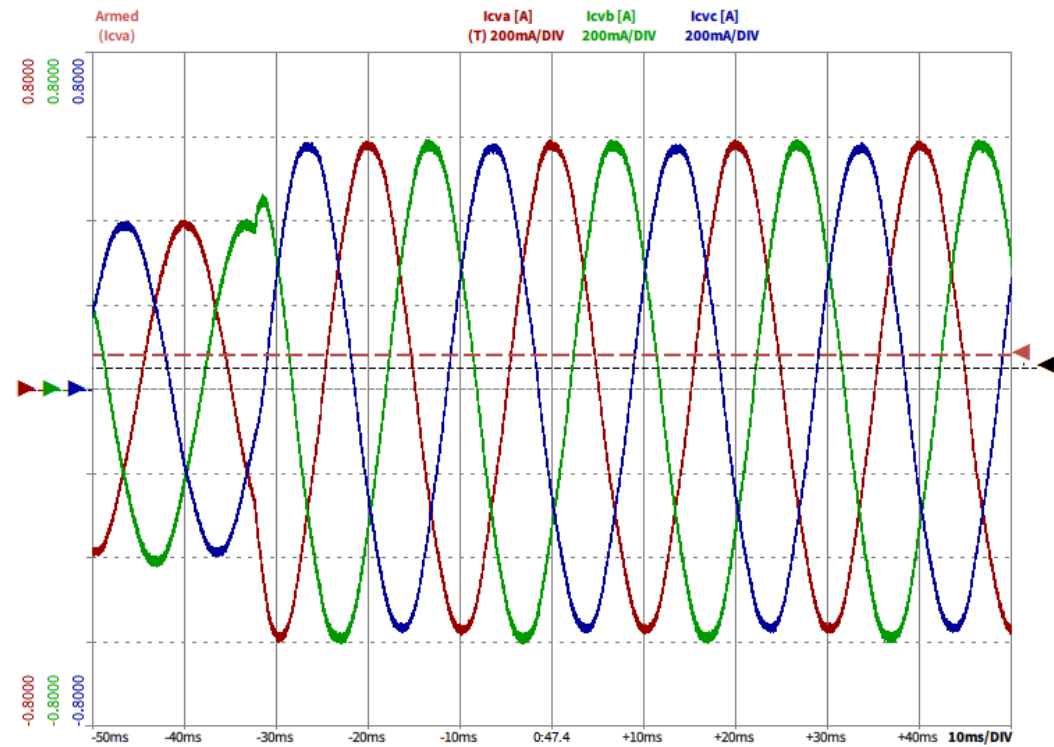
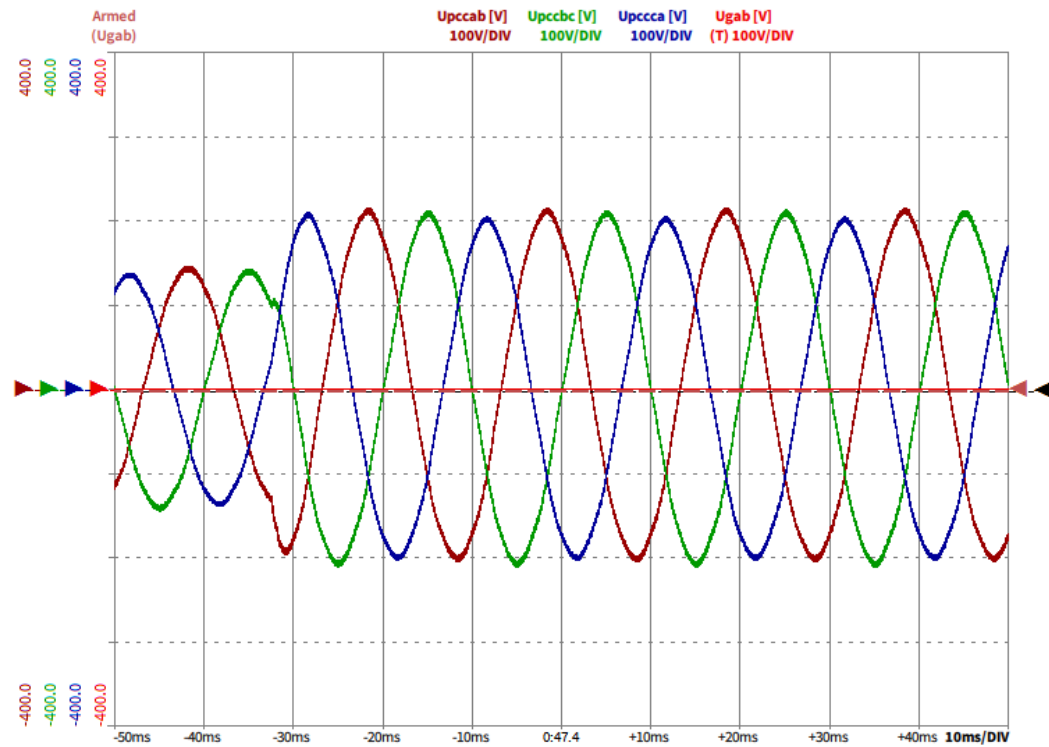
Inverter, vezérlő beüzemelése

Kábelezés és szenzorok felszerelése

Hálózati csatlakozás megoldása

Több inverter összekapcsolása

Mérési eredmények



Köszönjük a figyelmet!

Szirbik Bence

Dr. Raisz Dávid