



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Sövény Gergely Máté

HÁROMFÁZISÚ INVERTEREK SZABÁLYOZÁSA

Témalaboratórium

KONZULENS

Dr. Divényi Dániel

BUDAPEST, 2019

Tartalomjegyzék

Összefoglaló.....	3
Eszközkészlet.....	4
1. A háromfázisú inverter áramköri modellje.....	5
2. A háromfázisú inverter szabályozástechnikai modellje.....	6
3. Forgó referencia rendszerben történő szabályozás.....	8
4. Tranziens viselkedés javítása.....	10
5. Inverter modell kiértékelése.....	11

Összefoglaló

A témám célja, hogy kutassam és bemutassam a háztartási méretű kiserőművek microgridhez történő csatlakozásának módjait és lehetőségeit. Napjainkban korszerű, elsősorban fotovoltatikus elosztott termelési egységek háromfázisú inverteren keresztül csatlakoznak a 0.4 kV-os elosztóhálózathoz, jellemzően grid-feeding üzemmódban.

Féléves munkám során elkészítettem egy Simulink modellt, mely bemutatja egy háromfázisú inverter működését. A modell bemenetként a mögöttes hálózat pillanatnyi fázisfeszültségeit: $U_{sa}(t)$, $U_{sb}(t)$, $U_{sc}(t)$, valamint az adott időpillanatban elvárt háromfázisú hatásos és meddő teljesítményt kapja meg $P(t)$ illetve $Q(t)$ alakban.

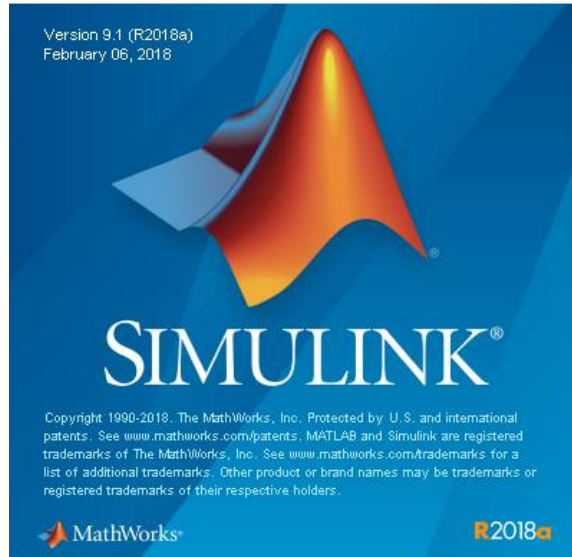
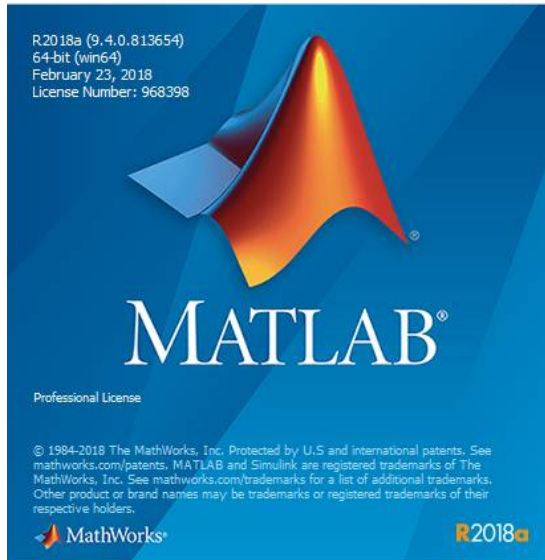
A hálózaton $abc \rightarrow dq$ transzformáció elvégzése után dq forgó referencia szerint végzem a szabályozást. Ennek előnye, hogy az eredendően szinuszos jelkövetési feladat állandó értékű alapjel követésre egyszerűsödik. Az ezt követő inverz transzformáció eredményeként előállnak a modulációs jelek, melyek meghajtják a háromfázisú félhíd kapcsolást.

Következő félévben a hálózati asszimmetria hatását, valamint a zérussorrendű áram visszatáplálásának lehetőségét fogom vizsgálni. Célom a most elkészült modell szabályozási körének kibővítése, mely lehetővé teszi majd a fázisonként függetlenül szabályozható aszimmetrikus visszatáplálást.

Eszközkészlet

Munkám során a MATLAB különböző szolgáltatásait, elsősorban a dinamikus rendszerek modellezésére kifejlesztett Simulink csomagot használtam.

Modell alapú tervezési feladat révén elsősorban az átviteli blokkok és irányított információ útvonalak írják le a rendszer működését, azonban a mögöttes háromfázisú hálózatot a Simscape könyvtár eszközeivel implementáltam. Ez lehetővé teszi, hogy az inverter modell egy Kirchoff-hálózathoz csatlakozzon, melyen a villamos paraméterek dimenzióhelyesen mérhetőek, kiértékelhetőek.



1. A háromfázisú inverter áramköri modellje

A háztartási méretű kiserőművek hálózati csatlakoztatásakor három fő üzemmódot különböztethetünk meg - a microgriden betöltött szereptől függően lehet grid-forming, grid-supporting és grid-feeding.[1] Egy adott inverter implementáció támogathat különböző üzemmódokat, és a 0.4 kV-os mögöttes hálózat állapota alapján lehetséges az automatikus üzemmódváltás is.

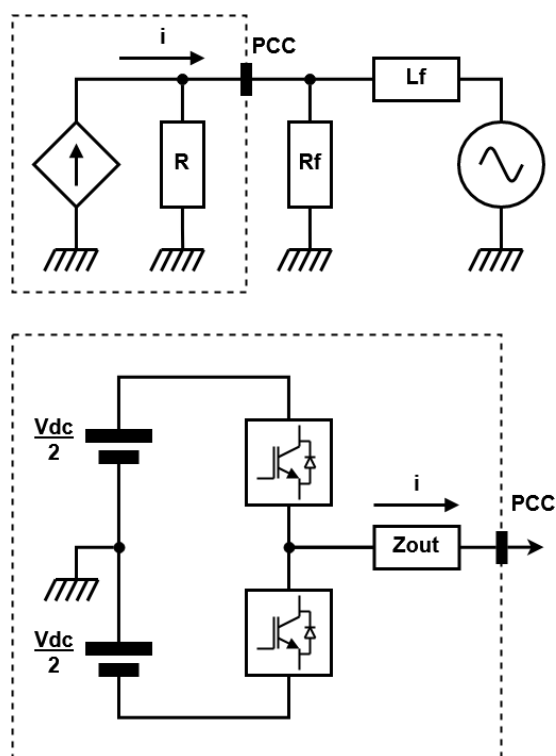
Jelen kutatásom keretei közt a lakóépületeken leggyakrabban telepített - nagyságrendileg 5-10 kW csúcsteljesítményű - napelemes rendszerek csatlakoztatását vizsgálom, mely jellemzően grid-feeding üzemmódban történik.

A grid-feeding üzemmód esetén az inverter üzemi feszültségen lévő 0.4 kV-os háromfázisú hálózathoz csatlakozik. Célja a megtermelt energia hálózatba történő visszatáplálása, eladása. Kimenete valamilyen vezérelt háromfázisú áramforrással modellezhető, mely szinuszos áramot ad ki. Fontos megjegyezni, hogy minden esetben a hálózati frekvenciával tökéletes szinkronban történik a visszatáplálás, ellenkező esetben nem valósulhat meg lüktetésmentes teljesítményátvitel.

A szabályozási feladat tehát a hálózati szinkronizáció, az áramforrások vezérlése, hatásos és meddő alapjel követése.

Hatásfok szempontjából elengedhetetlen, hogy az inverter kimenetét hajtó fél-híd kapcsolóelemeket valamilyen gyors fel- és lefutó éllel rendelkező PWM vezérlőjellel hajtsuk. Ez biztosítja, hogy a teljesítménytranzisztorok minden időpillanatban alacsony disszipációjú munkapontban legyenek. A PWM vivőfrekvenciája és a kimeneti impedancia induktív tagjának megfelelő megválasztása méretezési feladat, mely meghatározza a kimeneti áram hullámosságát.

Ez a továbbiakban teljesítményelektronikai kérdés, mely a szabályozási kör méretezése, hangolása és dinamikai viselkedése szempontjából nem tárgyalandó. A továbbiakban az idő-átlagolt modellt vizsgáljuk, mely a PWM vezérelt félhíd kapcsolást egy effektív feszültségében azonos vezérelt forrással helyettesíti. [2]



Ábra 1: Áramgenerátoros kimenettel modellezett grid-feeding üzemű inverter elvi kapcsolása és a gyakorlatban alkalmazott fél-híd kapcsolású teljesítmény fokozata.

2. A háromfázisú inverter szabályozástechnikai modellje

A szabályozástechnikában szokásos zárt szabályozási kör elemeinek meghatározása az első feladat, ez lesz a felépítendő modell alapja. Célunk a rendszer ki- és bemeneteinek dimenzióhelyes definiálása.



Ábra 2: Zárt szabályozási kör elemei

Háromfázisú kisfeszültségű (KiF) 0.4 kV-os szimmetrikus hálózathoz csatlakozik az inverter valamilyen kimeneti impedancián keresztül. A mögöttes háromfázisú hálózat általánosan három folytonos feszültség-idő függvényvel írható le. Célunk a kimeneti impedancián folyó fázisáramok mindenkor pillanatértékeinek szabályozása annak érdekében, hogy a hálózatba visszatáplált háromfázisú villamos teljesítmény egy külsőleg meghatározott referenciateljesítmény jelet kövessen. Fontos megjegyezni, hogy a jelen topológiájú inverter hatásos és meddő teljesítmény visszatáplálására egyaránt alkalmas, így külön hatásos- és meddő referencia alapjelet definiálunk.

Mért áramköri jellemzők		
A csatlakozási pontban mérhető fázisfeszültségek	$U_{sa}(t), U_{sb}(t), U_{sc}(t)$	[V]
Hálózatba visszatáplált áramok	$i_a(t), i_b(t), i_c(t)$	[A]

Alapjel (referenciajel)		
Hálózatba visszatáplálni kívánt hatásos teljesítmény	$P_{ref}(t)$	[kW]
Hálózatba visszatáplálni kívánt meddő teljesítmény	$Q_{ref}(t)$	[kvar]

Alapjel (származtatott)		
Hálózatba visszatáplálni kívánt fázisáramok	$i_{refa}(t), i_{refb}(t), i_{refc}(t)$	[A]

Beavatkozó jel		
A félhíd kapcsolóelemeket meghajtó modulációs jelek	$m_a(t), m_b(t), m_c(t)$	[%]

Módosított jel		
A félhíd kapcsolóelemek kimeneti feszültsége	$u_a(t), u_b(t), u_c(t)$	[V]

Ez jól láthatóan egy három be- és kimenettel rendelkező rendszer, melynek tetszőleges bemenetekre történő szabályozása műszakilag nem kivitelezhető, azonban egy grid-feeding üzemű háromfázisú inverternek csak jól körülhatárolható hálózati viszonyok mellett kell üzemelnie, egyéb esetekben a kimenetet nagy-impedanciás állapotba vezéreljük és nem történik visszatáplálás.

Az MSZ EN 50160:2001 szabvány a közcélú elosztóhálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemzőire vonatkozó előírásokat tartalmaz. Ezek közül számunkra az legfontosabbak a feszültség nagyságára, frekvenciájára és fázisszögeire vonatkozó megkötések.

1. A fázisfeszültségek effektív értéke $U_f=230\text{ V} \pm 10\%$ tartományban mozoghat.
2. A hálózati frekvencia $f=50\text{ Hz} \pm 2\%$ tartományban mozoghat.
3. A fázisok 120° fokos szöget zárnak be egymással, szimmetrikus rendszert alkotnak.

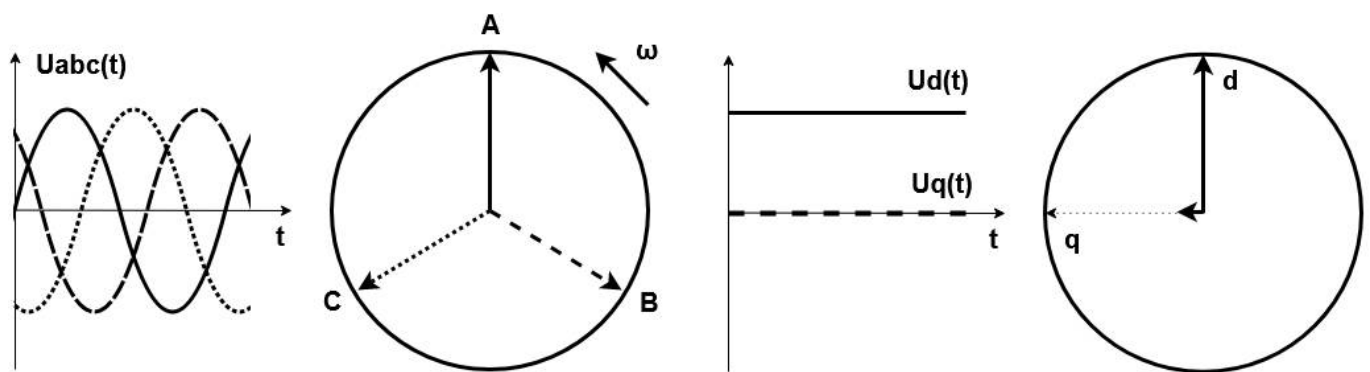
A feni megkötések alapján már elvégezhető a fázisonkénti szabályozási feladat, azonban ez nem triviális.

Szinuszos alapjelkövetési feladatról van szó, mely PI vagy PID szabályzóval nem kompenzálható maradó hiba nélkül. Egyik lehetséges megoldás, hogy az egyfázisú invertereknél elterjedt rezonáns szabályzót használunk, melynek átviteli függvénye ugyan strukturálisan nem stabilis, azonban ismert frekvenciájú szinuszos alapjel követésére alkalmas.[2] Ennek a megközelítésnek a legnagyobb hátránya, hogy bármiféle fázisszögugrás vagy feszültségnagyságbeli zavar hatására nagymértékű kilengéseket okoz, rossz dinamikájú, pontatlan szabályozást eredményez.

Annak érdekében, hogy a inverter által visszatáplált hatásos illetve meddő teljesítmény stabil és pontos legyen, elengedhetetlen, hogy a kimeneti áram és a kapocsfeszültség alapharmonikusainak fázisszögét állandó értéken tartsuk.

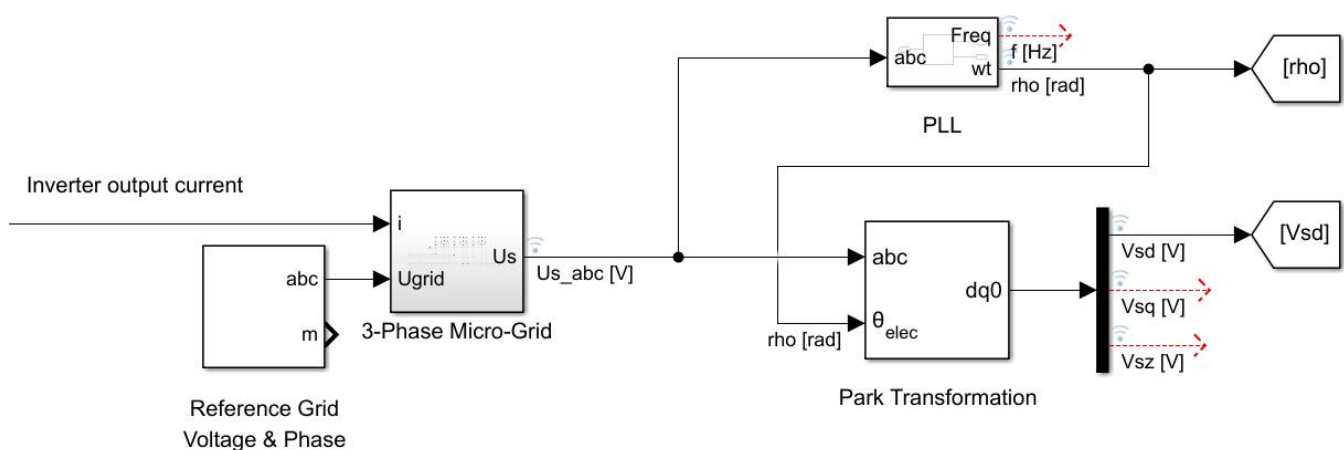
3. Forgó referencia rendszerben történő szabályozás

A legkézenfekvőbb megoldás, hogy a mért fázismennyiségeket és ezzel magát a szabályozási feladatot áthelyezzük dq forgó referencia egységbe. Ezt formálisan a Park-transzformáció teszi lehetővé, mely az időtartománybeli abc fázisjellemzőket dq szinkron forgó referencia szerinti komponensekké transzformálja. Szemléletesen az időben szinuszosan változó fázisjellemzők konstans paraméterré transzformálódnak. Ennek szabályozástechnikai jelentősége van, hiszen az eddig vizsgált szinuszos jelkövetési feladat DC alapjel követésre redukálódik, mely PI vagy PID kompenzátorral maradó hiba nélkül, széles tartományban hangolható dinamikával lekövethető.



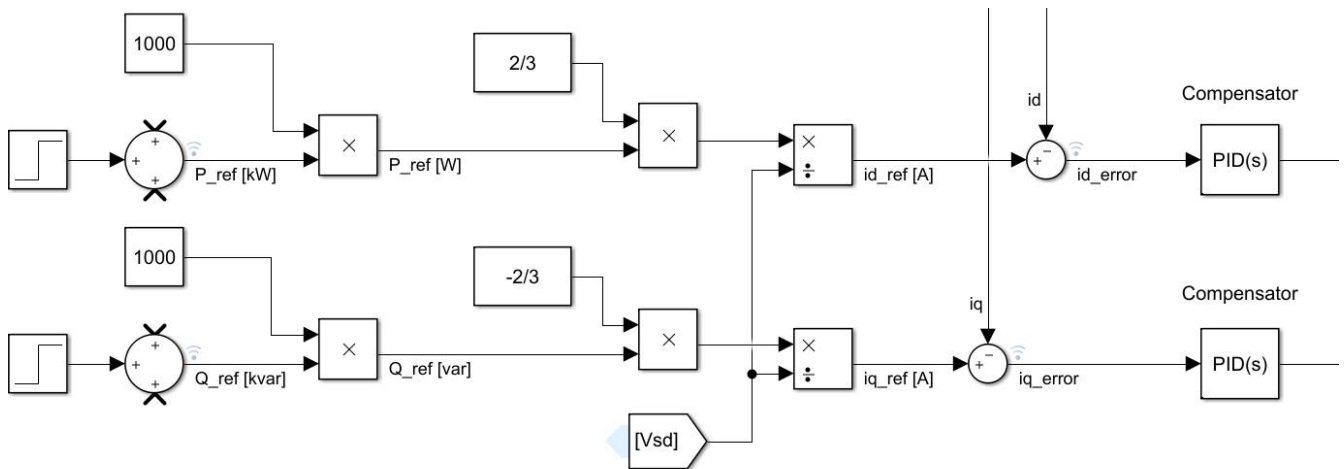
Ábra 3: Szimmetrikus szinuszos fázismennyiségek dq forgó referencia szerint reprezentációja.

A Park-transzformáció elvégzése előtt szükségünk van a forgó koordináta-rendszer körfrekvenciájára, illetve az ennek idő szerinti integráljaként előálló pillanatnyi fázisra. Szemléletesen a háromfázisú hálózatra kell rászinkronizálnunk magát a dq forgó referencia rendszert, ezt egy PLL segítségével tehetjük meg.



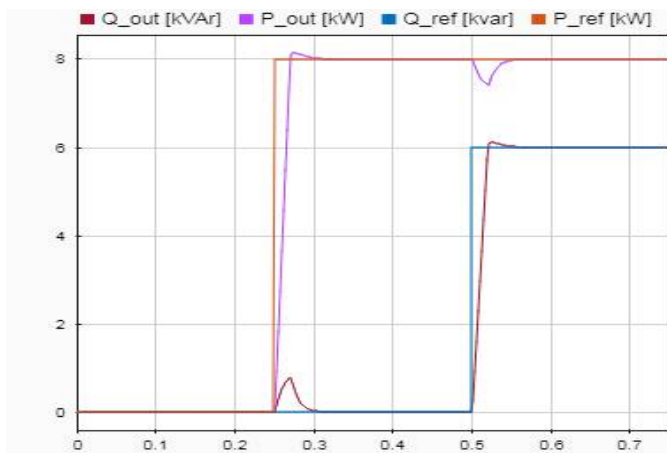
Ábra 4: A Park-transzformáció Simulinkes implementációja a bemenetként kapott három elemű feszültség vektort és a pillanatnyi fázishelyzetet transzformálja d, q és zérus sorrendű komponensekké.

Fontos megjegyezni, hogy a PLL hurokszűrőjének dinamikája közvetlen befolyással lesz a transzformáció eredményeként előálló d és q komponensek tranziensviselkedésére. Ettől függően egy tüske jellegű impulzus a hálózati frekvenciában okozhat kis frekvenciájú hosszan tartó kitérést a dq tartományban, ha a PLL lassan változtatja a frekvenciáját. Ezzel szemben okozhat nagyfrekvenciás exponenciálisan csillapodó oszcillációt is gyors dinamikájú PLL esetén.[2]

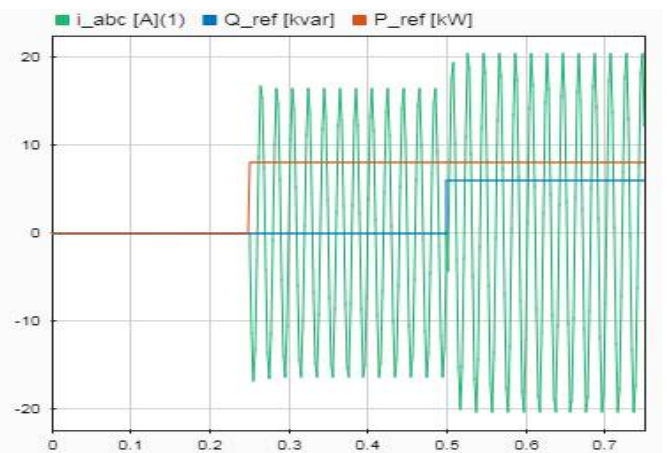


Ábra 5: A háromfázisú meddő- és hatásos teljesítmény alapjelek transzformálása dq referencia szerinti áram alapjelekké.

Feladatunk továbbá a szabályzó alapjeleinek transzformálása. Jelen szabályzási feladatban hatásos és meddő teljesítmény alapjellel dolgozunk, mely a Vsd komponensként reprezentált feszültségamplitúdóval történő osztást követően szemléletesen a fázisban lévő és a fázisra merőleges áramösszetevőknek feleltethető meg. Az inverter grid-feeding üzemmódban működik, tehát a kimenetét vezérelt áramforrásként modellezzük. A szabályzó bemenetén mért hibajel, illetve a különbségképző bemenetén lévő visszacsatolt áram és referencia áram jelek is dimenzióhelyesen dq referencia szerinti áramok. A d és q komponensek jelen topológia szerint egymástól független PI szabályzóval vannak kompenzálva.



Ábra 1: Az inverter kimeneti árama (a fázis) 8 kW és 6 kvar alapjelugrást követően.

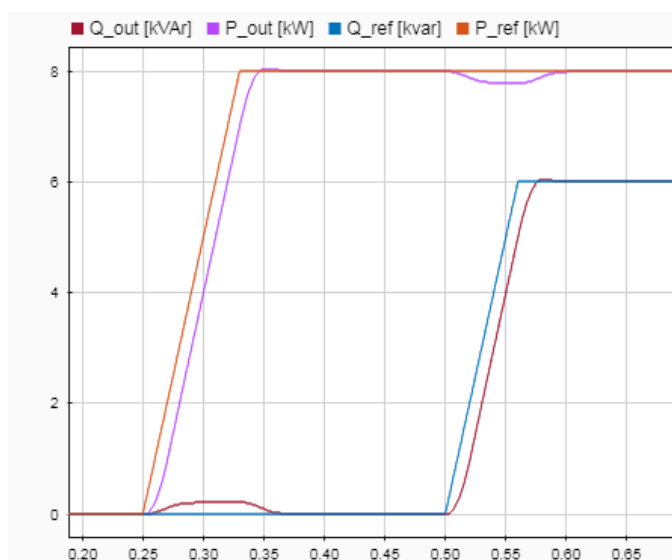


Ábra 2: Az inverter kimeneti teljesítménye 8 kW és 6 kvar alapjelugrást követően.

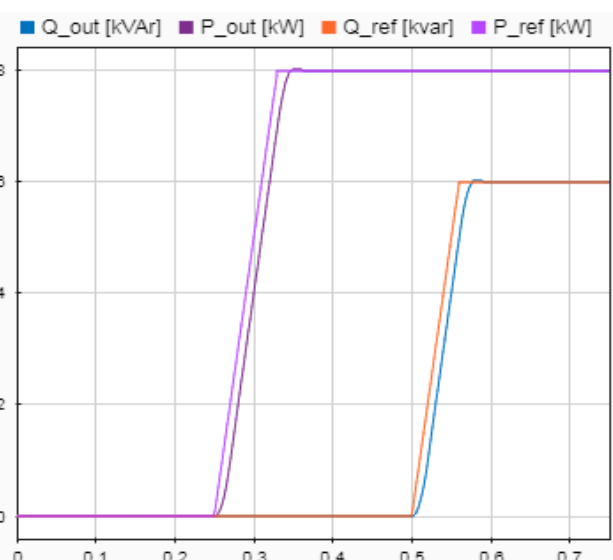
4. Tranziens viselkedés javítása

A tranziensek által okozott és a hálózatba injektált zavarjelek minimalára érdekében a gyakorlatban a teljesítmény alapjelek maximális meredekségét célszerű korlátozni. A további mérések során a hatásos és meddő alapjelek maximális meredeksége rendre ± 100 kW/s illetve ± 100 kvar/s, így az inverter a 10 kW-os maximális teljesítményét 100 ms alatt éri el.

A hatásos teljesítmény alapjel változtatásakor a kimeneten megfigyelhető meddő teljesítmény tranziens, illetve a meddő teljesítmény alapjel változtatásakor a kimeneten megfigyelhető hatásos teljesítmény tranziens a szabályzó jelen struktúrában nem kompenzálható. Ezek elnyomásához decoupling feed-forward szabályzó ágak beiktatása szükséges, melyek segítségével a kimeneti áram d komponense hat a beavatkozó jel q komponensére, valamint a kimeneti áram q komponense hat a beavatkozó jel d komponensére.[2] A modellben a decoupling szabályzó egyszerű arányos taggal tökéletesen kikompenzálja a tranziens keresztbehatast.



Ábra 6: Az inverter kimeneti teljesítménye 8 kW és 6 kvar alapjelugrást követően ± 100 kW/s illetve ± 100 kvar/s élebbesség korláttal.

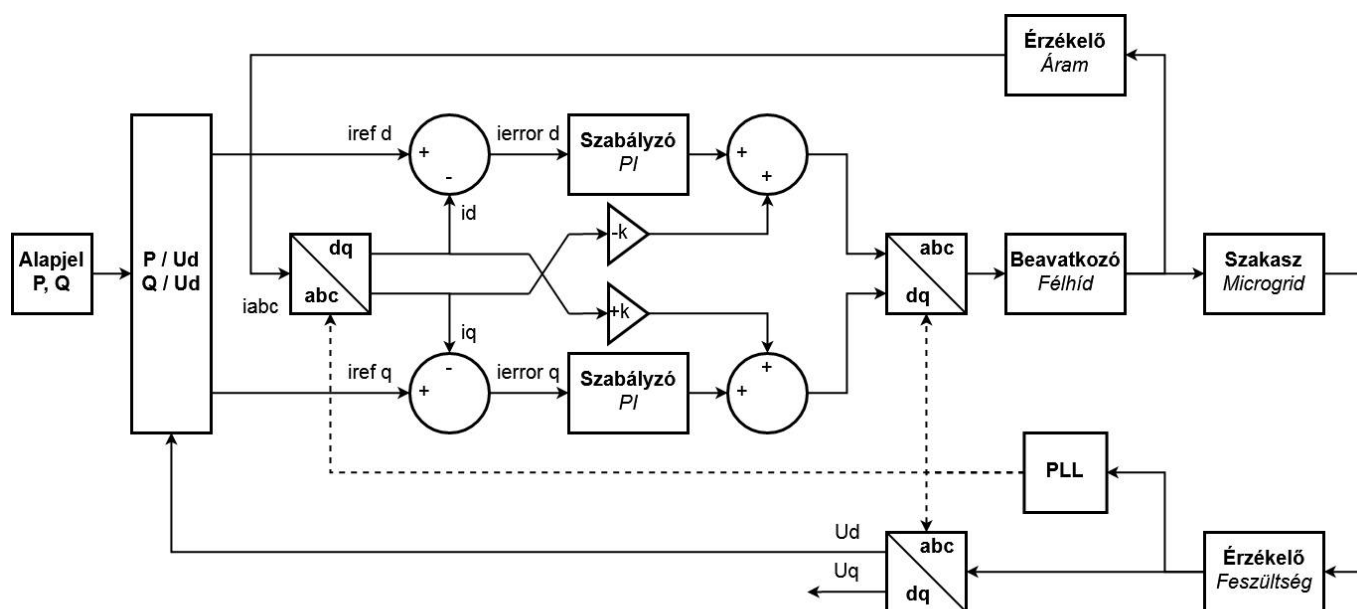


Ábra 7 Decoupling feed-forward segéd szabályzó hatása a kimeneti teljesítmény jelalakjára

$H_{dq}(s) = A_{dq} = 0.22$ és $H_{qd}(s) = A_{qd} = -0.22$ átviteli függvények esetén.

5. Inverter modell kiértékelése

A modellezési feladat során megvalósított inverter alkalmas szimmetrikus visszatáplálásra. A háromfázisú hatásos és meddő teljesítmény alapjeleket jó dinamikával, maradó hiba nélkül követi, állandósult állapotban a visszatáplált áramnak nincs felharmonikus tartalma. A nemkívánatos tranziens viselkedéseket hatékonyan kompenzálja az implementált feed-forward szabályozási ág. Az alapjel élebbességének korlátozása biztosítja a kimeneti áramok minimuma és maximuma közötti monoton, fázisugrás nélküli jelalakot.



Ábra 8: A megvalósított szabályozási folyamat blokkvázlata.

Irodalomjegyzék

- 1: Joan Rocabert, Member, IEEE, Alvaro Luna, Member, IEEE, Frede Blaabjerg, Fellow, IEEE, and Pedro Rodríguez, Senior Member, IEEE, Control of Power Converters in AC Microgrids,
- 2: Amirnaser Yazdani, Reza Iravani, Voltage-Sourced Converters in Power Systems, 2010