



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Sövény Gergely Máté

INVERTER SZABÁLYOZÁSI ELJÁRÁS KIALAKÍTÁSA FESZÜLTSGMINŐSÉG JAVÍTÁSÁRA

KONZULENS

Dr. Divényi Dániel

BUDAPEST, 2020



TANSZÉKVEZETŐ

SZAKDOLGOZAT FELADAT

Sövény Gergely Máté

szigorló villamosmérnök hallgató részére

Inverter szabályozási eljárás kialakítása feszültségminőség javítására

A megújuló penetrációnövekedésével közcélú elosztóhálózaton a szolgáltatás minősége és megbízhatósága javítására újfajta inverterszabályozási eljárásokra és hálózati tarifa kialakításra van szükség. Az újgenerációs smart grid eszközök alkalmazásával a kisfeszültségű hálózat szenzorozottsága várhatóan jelentősen növekszik, s így a ténylegesen beépíthető megújuló teljesítmény és a hálózatfejlesztési beruházások szükségessége mérésrel alátámasztott műszaki indokokkal kerülhet meghatározásra.

A hallgató feladata a kisfeszültségre inverteren keresztül csatlakozó háztartási méretű kiserőművek hatásának vizsgálata:

- Ismertesse a feszültségminőségi problémák típusait, súlyosságát és indokolja meg azok javításának szükségességét.
- Szimulációs vizsgálaton keresztül mutassa be az inverterek feszültségminőség javítást lehetővé tevő speciális szabályozási eljárásokat, elsősorban
 - a feszültségaszimmetria csökkentésének lehetőségét
 - a feszültség harmonikustartalmának (THD) csökkentését
- A vizsgálatok során térjen ki a speciális szabályozás miatt az inverterekben fellépő többlet terhelés hatására, a passzív- és félvezető elemek méretezési kérdéseire és ezek költségvonzatára.
- Adjon javaslatot a energiapiaci tarifák esetleges újraszervezésére, mely piaci alapon motiválja majd a termelőket a feszültségminőség javítására valamint a valósídejú adatszolgáltatásra.

Tanszéki konzulens: Dr. Divényi Dániel, egyetemi adjunktus

Budapest, 2020. október 9.

Dr. Ladányi József
egyetemi docens
tanszékvezető

Hallgatói nyilatkozat

Alulírott Sövény Gergely Máté, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző, cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2020.12.01.



.....

Sövény Gergely Máté

Összefoglaló

A témám célja, hogy kutassam és bemutassam a háztartási méretű kiserőművek mikrogridhez történő csatlakozásának módjait és lehetőségeit. Napjainkban korszerű, elsősorban fotovoltaikus elosztott termelési egységek inverteren keresztül csatlakoznak a 0,4 kV-os elosztóhálózathoz, jellemzően grid-feeding üzemmódban.

Olyan speciális szabályozási eljárásokat vizsgállok, melyek lehetővé teszik, hogy az inverter a megtermelt energia a hálózatba történő visszatáplálása mellett különböző feszültségminőségi jellemzők javítására is alkalmas legyen. Meddő teljesítmény visszatáplálásával szabályozható az inverter környezetében a közcélú hálózat feszültségprofilja, aszimmetrikus visszatáplálással kompenzálható az egyfázisú fogyasztók nemkívánatos hatása és aktív harmonikus szűrőként is üzemelhet egy háromfázisú inverter. Mindezen funkciók egyidejű implementálására van szükség ahhoz, hogy az elosztott termelők beépített teljesítményének részaránya tovább növekedhessen a hálózaton.

A dolgozaton keresztül bemutatom egy általános háromfázisú grid-feeding inverter működését, majd ezt a modellt fogom kiegészíteni egy aszimmetrikus visszatáplálást lehetővé tevő szabályzóval. Végül bemutatom az aktív harmonikus-szűrés párhuzamos szabályozóágakkal megvalósított modelljét. A dolgozat célja, hogy az inverter konkrét szabályozási módjait bemutassam, a mikrogridre gyakorolt hatás bemutatására szimulációt nem végeztem, az erre vonatkozó következtetések elméleti úton valamint a feldolgozott releváns szakirodalom alapján születtek.

Abstract

The aim of this thesis is to research and present the opportunities of connecting smart residential-scale power generators. Solar installation and most other distributed generators connect to the 0.4 kV microgrid via an inverter in grid-feeding mode.

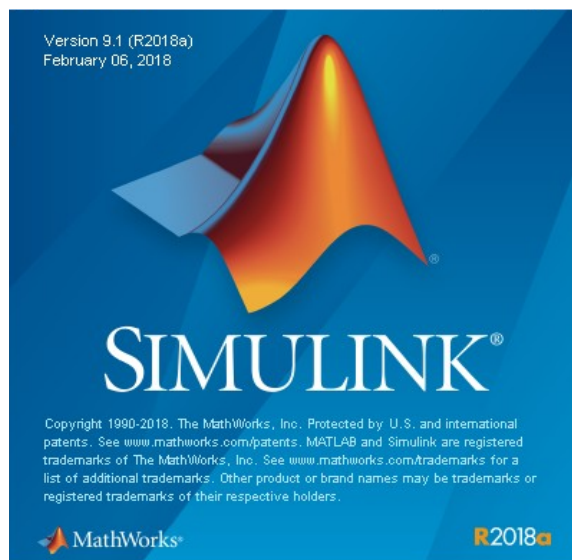
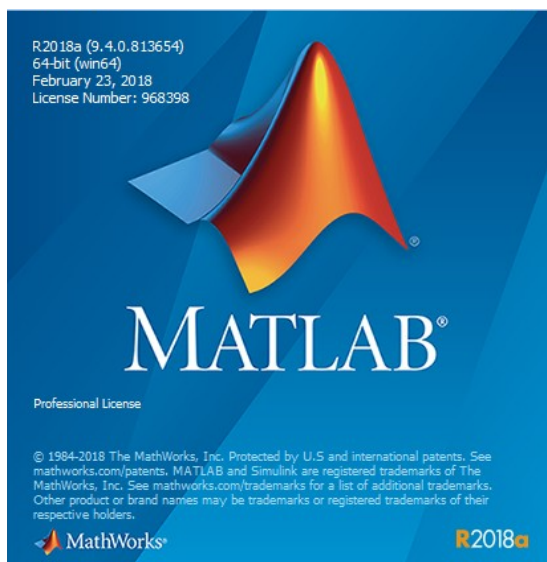
I am investigating special control methods that allow smart grid-tie inverters to not only inject power into the grid, but also to improve the power quality of the microgrid. Through reactive power compensation, distributed generators can improve the voltage profile of the microgrid, using controlled asymmetrical feed-in they can counteract the voltage imbalance caused by single-phase loads, while three-phase inverters can also function as active harmonic filters. The simultaneous implementation of these function is key in order to allow farther penetration of renewable energy sources on the grid.

Through this thesis I present a generic three-phase grid feeding inverter model, then I extend its control algorithm to allow for controlled asymmetrical feed-in. Lastly I present a method of implementing an active harmonic filter using parallel control branches. The aim is to present the control algorithms of the inverter through a simulated model. All conclusions regarding the effect on the microgrid is based on theoretical research and first principal based simple calculations, the simulation of an example microgrid is not part of this thesis.

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.



Tartalomjegyzék

Hallgatói nyilatkozat.....	3
Összefoglaló.....	4
Abstract.....	5
Eszközkészlet.....	6
1. Háromfázisú inverter modellje.....	8
1.1. A háromfázisú inverter áramköri modellje.....	8
1.2. A háromfázisú inverter szabályozástechnikai modellje.....	10
1.3. Forgó referencia rendszerben történő szabályozás.....	12
1.4. A szabályzó struktúrája.....	14
1.5. Tranziens viselkedés.....	15
2. Feszültségprofil szabályozása megosztott termelők segítségével.....	16
2.1. Meddő feszültségszabályozás.....	17
3. Feszültség aszimmetria kompenzálása inverterrel.....	19
3.1. Aszimmetrikus háromfázisú jelek leírása.....	20
3.2. Aszimmetrikus visszatáplálás megvalósítása.....	22
3.3. Aszimmetrikus alapjelek előállítása.....	24
3.4. Egyfázisú fogyasztó bekapcsolása.....	26
3.5. Az aszimmetrikus teljesítményáramlási modellezése.....	28
3.6. Az aszimmetrikus visszatáplálás DC oldali hatása.....	30
4. Feszültség harmonikusok aktív szűrése inverterrel.....	33
4.1. Harmonikusok rendszáma.....	33
4.2. Harmonikusok hatása az elosztott termelőkre.....	35
4.3. A harmonikus hiba leírása.....	36
4.4. Harmonikusok kompenzálása.....	37
4.5. Forgó referencia értelmezése egyfázisú jelekre.....	39
4.6. Nullvezető hatása aszimmetrikus kompenzáció esetén.....	40
4.7. Harmonikus kompenzálás szimulációs eredménye.....	42
5. Az okos inverterek elterjedésének piaci korlátai.....	46
6. Összefoglalás.....	48
Bibliográfia.....	49
Függelékek.....	50

1. Háromfázisú inverter modellje

1.1. A háromfázisú inverter áramköri modellje

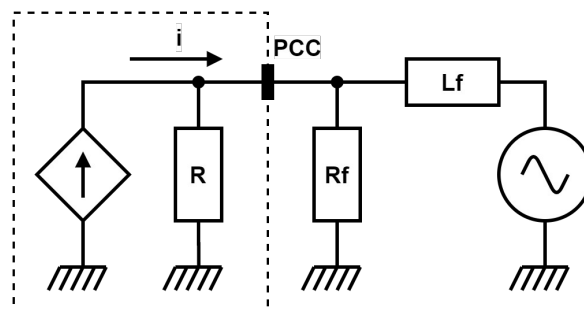
A háztartási méretű kiserőművek hálózati csatlakoztatásakor három fő üzemmódot különböztethetünk meg - a mikrogriden betöltött szereptől függően lehet grid-forming, grid-supporting és grid-feeding [1]. Egy adott inverter megvalósítás támogathat különböző üzemmódokat, és a 0,4 kV-os mögöttes hálózat állapota 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. Az inverter vezérelt háromfázisú áramforrással modellezhető, mely szinuszos áramot ad ki.

Fontos megjegyezni, hogy minden esetben a hálózati frekvenciával szinkronban történik a visszatáplálás, ellenkező esetben nem valósulhat meg lüktetésmentes teljesítményátvitel.

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

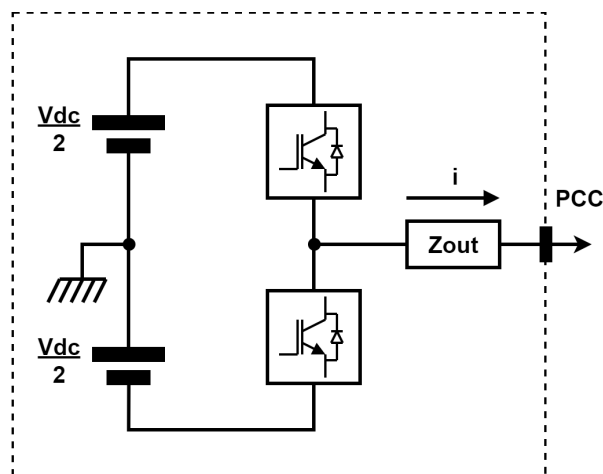


Ábra 1: Áramgenerátoros kimenettel modellezett grid-feeding üzemű inverter elvi kapcsolása

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 érdekes, hiszen több nagyságrenddel nagyobb frekvencián történik [2]. A vizsgálatok során tehát egy háromfázisú averaged-model invertert használunk, azaz a félhíd kapcsolást modellező vezérelt forrás közvetlenül a szabályzó kimenetként előálló modulációs jelekkel van meghajtva. Ennek modellezése kevésbé számításigényes feladat, ezért szabályozástechnikai vizsgálatok során célravezetőbb, mint a teljes PWM vezérelt nemlineáris félhídkapcsolást vizsgálnánk.

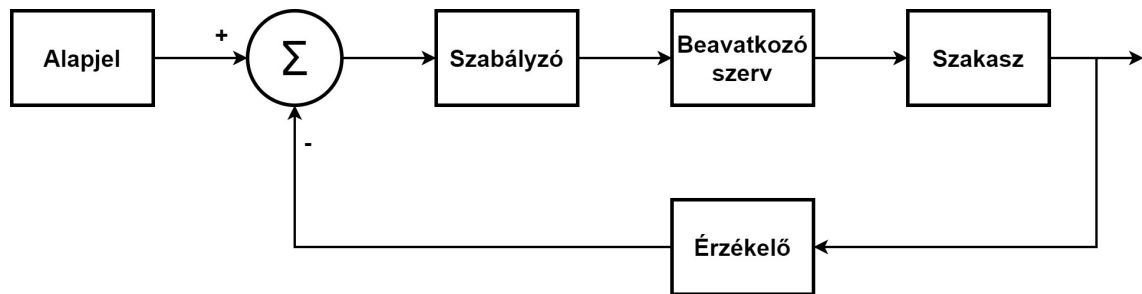


Ábra 2: A grid-feeding üzemű inverter
gyakorlatban alkalmazott fél-híd kapcsolású
teljesítmény fokozata.

Az inverter kimenete L induktív impedancián keresztül csatlakozik a kisfeszültségű hálózathoz, ennek sávkorlátozó hatása hivatott a pulzusszélesség-modulációval hajtott félhíd kapcsolás kétszintű kimenetét szűrni. Az averaged-modellben ugyan folytonos a kimeneti feszültség, azonban a csatoló induktivitás teszi lehetővé, hogy mögöttes hálózathoz ne mereven csatlakozzon az inverter. Az induktivitás továbbá fáziskésleltetést okoz a kimeneten, melyet a zárt körű szabályozás során figyelembe kell venni, hiszen a szabályzó egyik visszacsatolt jele maga a csatlakozási pont (PCC) feszültség-idő függvénye.

1.2. 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 3: 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 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	$U_a(t), U_b(t), U_c(t)$	[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]

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

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

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 megköötések.

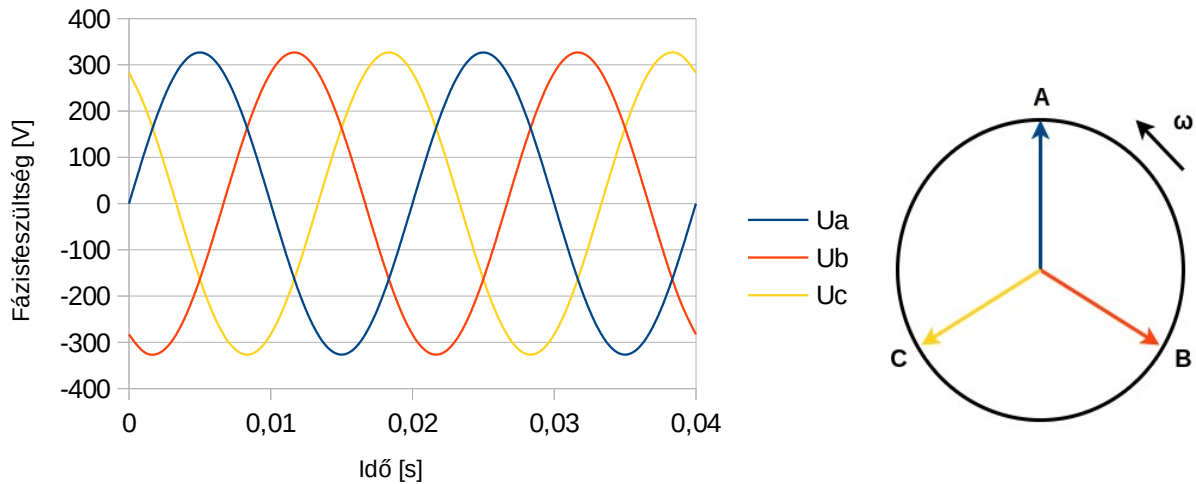
1. A fázisfeszültségek effektív értéke $U_f=230\text{ V} \pm 10\%$ tartományban mozoghat.
2. A hálózati frekvencia $f=50\text{ Hz} \pm 2\%$ tartományban mozoghat.
3. A fázisok 120° fokos szöget zárnak be egymással, szimmetrikus rendszert alkotnak.

A feni megköötések 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 okozhat. Annak érdekében, hogy az inverter által visszatáplált hatásos illetve meddő teljesítmény stabil és pontos legyen, elengedhetetlen, hogy a kimeneti áram és a kapocsfeszültség alapharmonikusainak fázisszögét állandó értéken tartsuk. Háromfázisú esetben célravezető és robusztus megoldást ad a forgó referencia szerinti szabályozás.

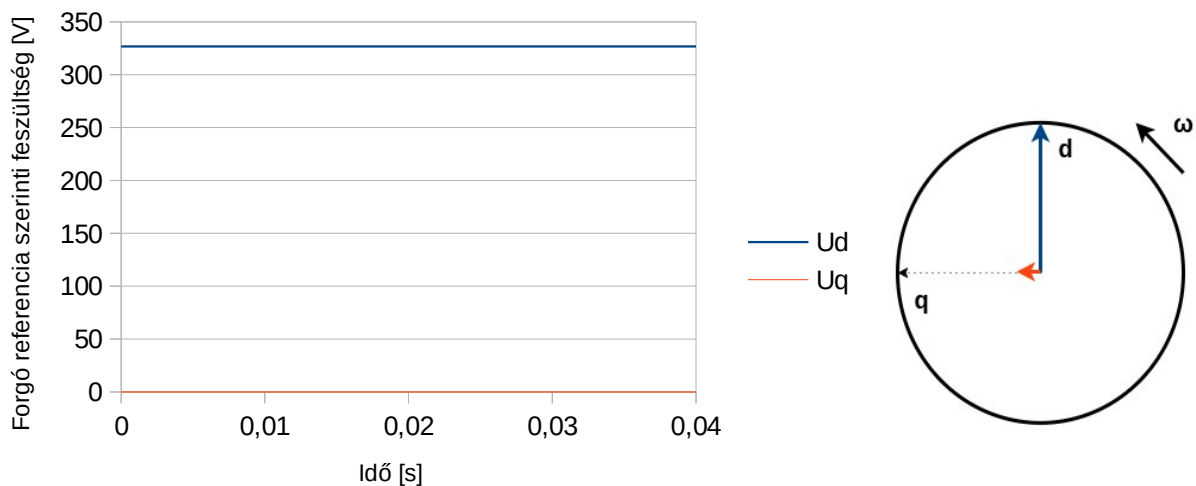
1.3. Forgó referencia rendszerben történő szabályozás

A legkézenfekvőbb megoldás, hogy a mért fázismennyiségeket és ezzel magát a szabályozási feladatot áthelyezzük dq forgó referencia rendszerbe. Ezt formálisan a Park-transzformáció teszi lehetővé, mely az időtartománybeli abc fázisjellemzőket dq0 szinkron forgó referencia szerinti komponensekké transzformálja.



Ábra 4: Háromfázisú szimmetrikus feszültségrendszer időfüggvénye és fázorábrája.

Szemléletesen az időben szinuszosan változó fázisjellemzők konstans értékű jelekké transzformálódnak. Ennek szabályozástechnikai jelentősége van, hiszen az eddig vizsgált szinuszos jelkövetési feladat DC alapjel követésre redukálódik, mely PI kompenzátorral maradó hiba nélkül, széles tartományban hangolható dinamikával lekövethető [2].



Ábra 5: A szültségrendszer forgó referencia szerinti leírása. A d komponens a fázisfeszültségek átlaga, míg a q és 0 komponensek szimmetrikus esetben nulla értékűek.

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 fáziszárt hurok (PLL) segítségével tehetjük meg.

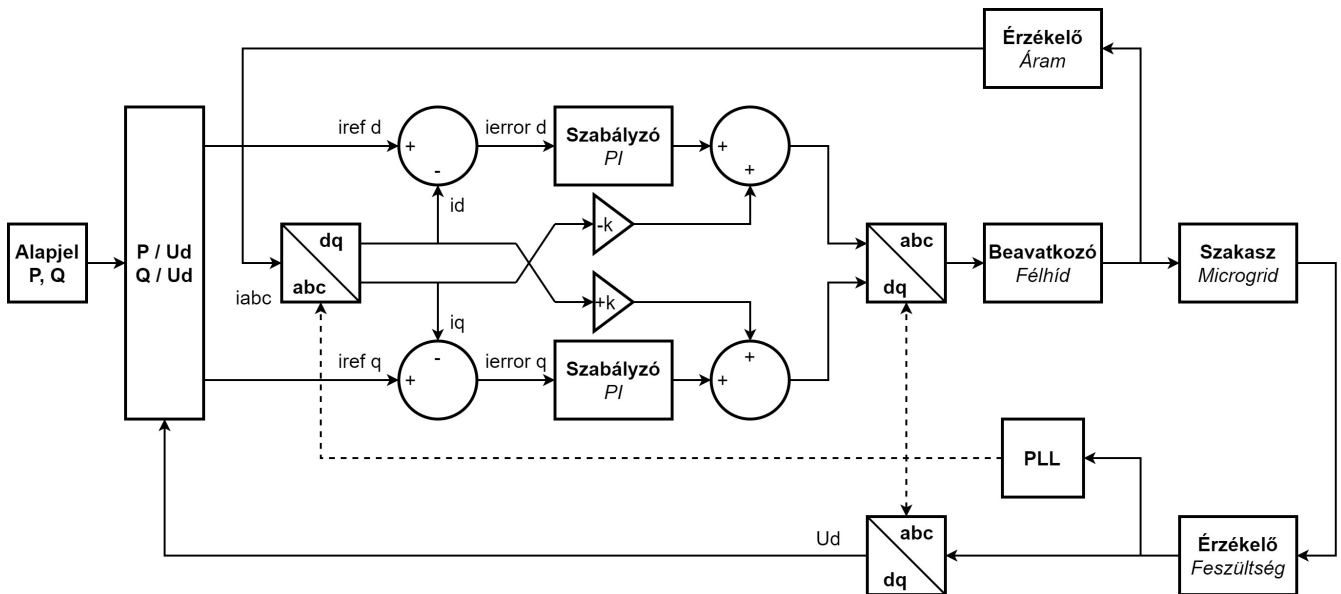
Fontos megjegyezni, hogy a PLL hurokszűrőjének dinamikája közvetlen befolyással lesz a transzformáció eredményeként előálló d és q komponensek tranziensviselkedésére. Ettől függően egy tüske jellegű impulzus a hálózati frekvenciában okozhat kis frekvenciájú hosszan tartó kitérést a dq0 tartományban, ha a PLL lassan változtatja a frekvenciáját. Ezzel szemben okozhat nagyfrekvenciás exponenciálisan csillapodó oszcillációt is gyors dinamikájú PLL esetén [2].

A modellben a Simulink háromfázisú PLL alapértelmezett hangolási paramétereit használom, melyek a következők:

- Hurokszűrő paraméterei $P = 180$, $I = 3200$ és $D = 1$
- Kimenet változásának maximális sebessége 12 Hz/s
- Frekvenciaváltozás sávkorlátja 25 Hz

1.4. A szabályzó struktúrája

A szinkronizációt követően szükség van a szabályzó alapjeleinek transzformálása. Jelen szabályzási feladatban hatásos és meddő teljesítmény alapjellel dolgozunk, melyek a feszültségamplitúdóval történő osztást követően szemléletesen a fázisban lévő és a fázisra merőleges áramösszetevőknek feleltethető meg. A szabályzó bemenetén mért hibajel, illetve a különbségképző bemenetén lévő visszacsatolt áram és referencia áram jelek is dimenzióhelyesen forgó referencia szerinti áramok. A d és q komponensek jelen topológia szerint egymástól független PI szabályzóval vannak kompenzálva, míg a modulációs jel zérus komponense konstans nulla értékű.



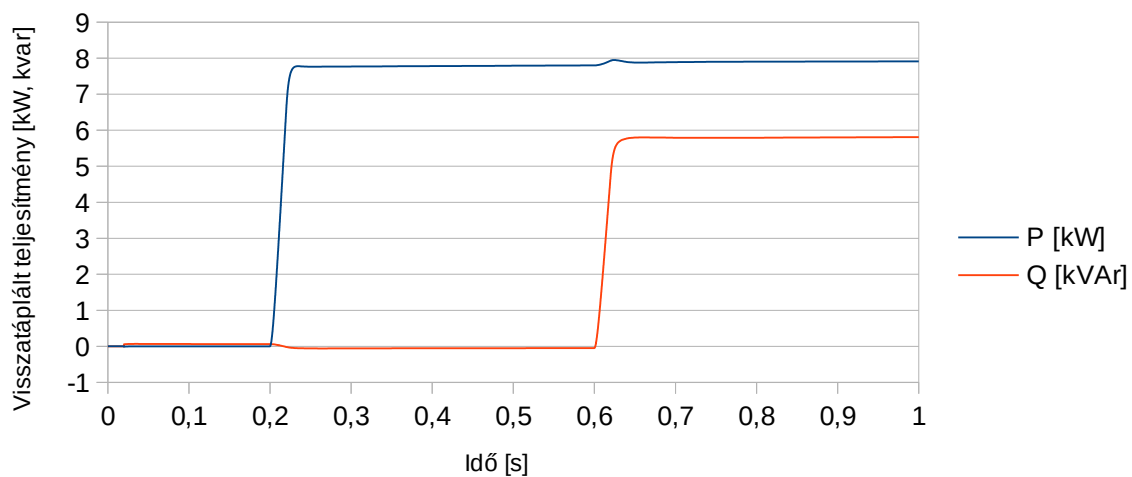
Ábra 6: A háromfázisú inverter modelljének szabályozástechnikai blokkvázlata. A későbbi vizsgálatok alapját ez a modell képezi.

A szabályzó paramétereit az ugrás alapjelre adott válasz jellege alapján hangoltam. A modell és a mögöttes hálózat kiindulási paraméterei a következők:

- A d és q ágak szabályzóinak paraméterei $P = 0,1$ és $I = 0,2$
- A decoupling ág arányos tagja $k = 0,22$
- A félhíd kimenete és a csatlakozás közötti induktivitás $L = 6,9 \text{ mH}$
- A csatlakozási pont mögöttes impedanciája $R = 0,5 \text{ Ohm}$ és $L = 1,25 \text{ mH}$

1.5. Tranziens viselkedés

A hatásos teljesítmény alapjel változtatásakor a kimeneten megjelenő meddő teljesítmény tranziens, illetve a meddő teljesítmény alapjel változtatásakor a kimeneten megfigyelhető hatásos teljesítmény tranziens a szabályzó jelen struktúrában decoupling feed-forward szabályzó ágak segítségével kompenzáltam. A decoupling szabályzó lényege, hogy a kimeneti áram d komponense hat a beavatkozó jel q komponensére, valamint a kimeneti áram q komponense hat a beavatkozó jel d komponensére [2] [3]. A modellben a decoupling szabályzó egyszerű arányos taggal jól kikompensálja a tranziens keresztbehataást.



Ábra 7: A modell kimeneti hatásos- és meddő teljesítménye ugrás alapjel esetén.

A további vizsgálatok során a most felépített modellt vettem alapul, ezt bővítem ki az egyes feszültségminőség javítási funkciók vizsgálata során.

2. Feszültségprofil szabályozása megosztott termelők segítségével

A kisfeszültségű hálózaton a csatlakozási ponton mérhető fázisfeszültségek effektív értékének nagysága kiemelten fontos feszültségminőségi jellemző, hiszen a csatlakoztatott fogyasztók működését közvetlenül befolyásolhatja.

Ugyan a kapcsoló üzemű táppal ellátott eszközök esetén a tápfeszültség általában nem befolyásolja sem az eszköz működését, sem annak hatásfokát, a fogyasztók jelentős része azonban továbbra is lineáris tápegységgel rendelkezik, vagy közvetlenül csatlakozik a hálózathoz. Ilyen eszköz lehet egy elektromos sütő- vagy főzőlap, elektromos hősugárzó, hagyományos izzószálas lámpatest, ipari ventilátor vagy egyéb AC motor.

A hálózaton az MSZ EN 50160 szabvány szerint előírt névleges feszültség 231 V \pm 10% tűréssel. Az ennél szigorúbb, a gyakorlatban alkalmazott garantált szolgáltatási szerződésben foglalt \pm 7,5%-os tűrés esetén 213 V és 248 V közé esik a csatlakozási pont mindenkor effektív feszültsége. Ez egy 1 kW névleges teljesítményű rezisztív fogyasztó esetén 855 W és 1155 W közötti teljesítménytartományt eredményez, mely \pm 15,5 %-os teljesítménytűrést jelent. Ez alapján jól látható, hogy érdemes lehetőség szerint minél stabilabban, és minél közelebb tartani a fogyasztók csatlakozási pontját a névleges feszültséghez. Ebben nagy szerepe van az elosztott termelőknek, hiszen a fogyasztás helyén, illetve annak közvetlen közelében adnak beavatkozási lehetőséget.

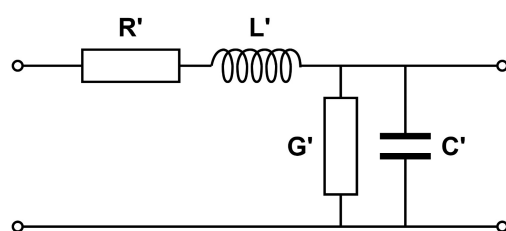
Nagy kiterjedésű gyenge hálózatokon jellemző nagy napi feszültségingadozás, ennek oka, hogy a hosszirányú feszültségesés alapján a feszültséggel azonos fázisban folyó áramkomponens I_w a soros rezisztív komponensen okoz feszültségesést, míg az erre merőleges fázorú I_m meddő áramkomponens a soros induktivitáson okoz feszültségesést [4]. (Induktív fogyasztást feltételezve)

$$\Delta U_h = R * I_w - j \omega * L * I_m \quad (1)$$

Jól látható, hogy a csatlakozási pont feszültsége nagyban függ a betápláló KöF/KiF transzformátortól vett távolságtól, valamint az aktuális fogyasztási viszonyoktól. Napi csúcsfogyasztási időszakban csökken a feszültség, míg völgyidőszakban (például hajnalban) megnövekszik az.

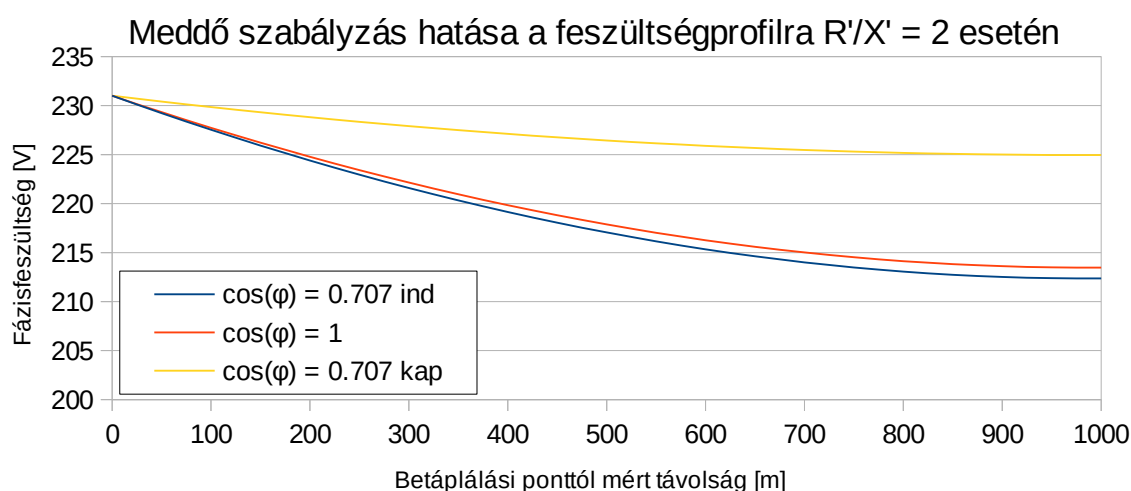
2.1. Meddő feszültségszabályozás

A hálózati mögöttes impedancia jellegétől függően a hatásos és meddő teljesítményviszonyok határozzák meg a feszültségprofilt. A vizsgálatok során az átláthatóság kedvéért elhanyagoljuk a távvezeték hosszegységre vonatkozó konduktanciáját és kapacitását. Ez a relatív kis kiterjedésű KiF hálózatrészek esetén nem okoz jelentős hibát, hiszen ilyenkor a rezisztív és az induktív paraméterek dominálnak.



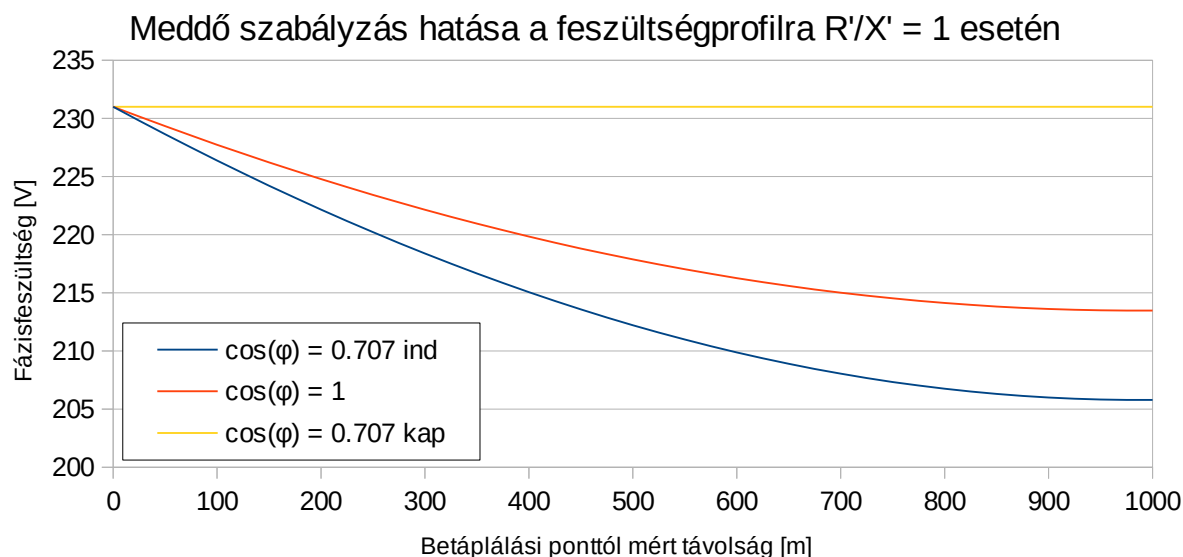
Ábra 8: Távvezetékmodell, koncentrált paraméteres helyettesítőképe. A meddő szabályozás vizsgálata során a G' és C' paramétereket elhanyagoljuk.

Amennyiben a hálózat impedanciája inkább rezisztív, azaz $R' > L'$, akkor jól látható, hogy a meddő áramkomponensek által okozott feszültségesés kis mértékű lesz. Ebben az esetben a hatásos teljesítmény áramlás fogja döntően meghatározni a feszültségviszonyokat, a meddő szabályozás így kevésbé hatásos.



Ábra 9: Egy utca feszültségprofilja $S = 1$ kVA névleges fázisonkénti fogyasztást feltételezve különböző $\cos(\varphi)$ paraméterek esetén. $R' = 0,2 \Omega/\text{km}$; $X' = 0,1 \Omega/\text{km}$

Amennyiben azonban $R' \approx L'$, akkor a hatásos és meddő teljesítményáramlás is jelentős feszültségváltozást eredményez. Ebben az esetben a meddő szabályozás a feszültség szabályozás igen hatásos eszköze tud lenni.



Ábra 10: Egy utca feszültségprofilja $S = 1$ kVA névleges fázisonkénti fogyasztást feltételezve különböző $\cos(\varphi)$ paraméterek esetén. $R' = 0,2 \Omega/\text{km}$; $X' = 0,2 \Omega/\text{km}$

A vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy inverterrel megvalósított meddő szabályozás jó lehetőség lehet a mikrogrid feszültségprofiljának szabályozására, azonban ennek autonóm implementálása nehezen megvalósítható [5].

Az egyik lehetőség, hogy elosztott szenzoradatok alapján valamilyen központosított döntéshozó egység állítja elő a szabályozási parancsot, mely jelzi az invertereknek a hálózat pillanatnyi meddő teljesítmény igényét. Ennek hátránya, hogy megbízható valós idejű szenzoradatokra van szükség a döntés meghozásához, valamint biztosítani kell az inverterek és a központ közötti kommunikációt.

A másik lehetőség, hogy a csatlakozási pontnál mérhető hálózati jellemzők alapján döntenek az inverterek önállóan. Egyrészt mérhetik az aktuális fázisfeszültségek nagyságát, másrészt különböző impulzisinjektálási eljárások segítségével becsülhetőek a mögöttes hálózat impedanciaviszonyai [6]. Ez alapján dönthet úgy az inverter, hogy szükség van meddő visszatáplálásra, illetve az aktuális impedanciaviszonyok mellett hatásos lehet a meddő visszatáplálás a feszültségprofil javítására. Autonóm beavatkozás esetén fontos, hogy szigorúan korlátozni kell egy inverter maximális beavatkozási erejét, ezzel biztosítva, hogy egy esetleges meghibásodás vagy hibás döntés hatására létrejött beavatkozás ne sodorhassa veszélybe a mikrogrid stabilitását.

3. Feszültség aszimmetria kompenzálása inverterrel

A kisfeszültségű elosztóhálózaton a fogyasztók nagy része egyfázisú, ezért a hálózaton feszültségaszimmetria alakulhat ki az egyes fázisok között. A helyzetet nehezíti, hogy a kisfeszültségű hálózathoz kapcsolódó háztartási méretű kiserőművek jelentős része szintén egyfázisú csatlakozással rendelkezik. Ennek következtében kialakulhatnak olyan gyorsan változó feszültség aszimmetriaviszonyok, melyek a hálózaton az egyes fázisokban feszültségingadozást valamint megnövekedett veszteségeket okoznak.

Hálózati hibából eredő aszimmetria is előfordulhat különböző zárlatok vagy meghibásodások esetén, azonban ezek hatása nem kompenzálható inverterrel, hiszen a jelenleg érvényben levő szabályozások szerint a közcélú hálózatra kapcsolódó elosztott termelőnek automatikusan észlelnie kell az ilyen jellegű hibákat és le kell kapcsolódnia a hálózatról, ezzel biztosítva, hogy nem táplálnak rá a zárlatra.

Kiegyenlítettlen fogyasztásból vagy termelésből eredő feszültségaszimmetria azonban kompenzálható háromfázisú inverter segítségével, hiszen a kisfeszültségű hálózaton a visszatáplált hatásos teljesítmény feszültségemelkedést eredményez a csatlakozási pontban.

Teljesítmény visszatáplálás szempontjából három, független egyfázisú inverternek tekinthető a rendszer, szabályozási köre azonban továbbra is a már korábban ismertetett szinkron forgó dq0 referencia szerinti kompenzáción alapszik. Célja ebben az esetben a DC oldalról befolyó megtermelt villamos teljesítmény szétosztása a három fázis között olyan módon, hogy a visszatáplálás hatására az aszimmetria mértéke csökkenjen, azaz a fázisfeszültségek effektív értékei minél közelebb kerüljenek egymáshoz.

3.1. Aszimmetrikus háromfázisú jelek leírása

Az fázismennyiségek és a forgó-referencia szerinti komponensek közötti átjárást a már korábban említett Park-transzformáció teszi lehetővé. Annak érdekében, hogy lássuk az aszimmetria pontos hatását, algebrai úton vizsgáljuk meg a transzformációt. Definíció szerint a Park transzformáció:

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{2}{3} * \left(u_a * \cos(\theta) + u_b * \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + u_c * \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \\ u_q &= \frac{2}{3} * \left(u_a * \sin(\theta) + u_b * \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + u_c * \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \\ \theta &= \theta(t) = \omega * t + \delta_A \end{aligned} \quad (2)$$

Ahol

θ	<i>a forgó és az álló koordináta-rendszer közötti szög ,</i>
δ_A	<i>a forgó koordináta-rendszer d tengelyének A fázissal bezárt szöge,</i>
u_a, u_b, u_c	<i>a fázisfeszültség-idő függvények,</i>
u_d, u_q, u_z	<i>a transzformáció eredményeként kapott forgó referencia szerinti komponensek.</i>

A d és q komponensek kifejtése kissé hosszadalmas, trigonometrikus összefüggéseken keresztül vezethető le, azonban bővebb levezetés nélkül is látszik, hogy u_d és u_q komponensek jellegre valamilyen $\sin(2x)$ alakot követnek, hiszen szinuszos időfüggvények vannak szorozva a forgó referencia-rendszer azonos frekvenciájú szinuszos illetve koszinuszos merőleges vetületeivel. Így tehát az u_d és u_q komponensek a hálózati frekvencia kétszeresével lengő szinuszos tagra és valamilyen konstans ofszetre bonthatók.

A zérus komponens kifejtése egyszerűbb, itt a behelyettesítést követően azonnal látható, hogy a három fázis feszültségét leíró időfüggvény átlaga lesz. Ebből adódik, hogy a zérus komponensben csak a hálózati feszültségben jelenlévő frekvenciakomponensek jelenhetnek meg.

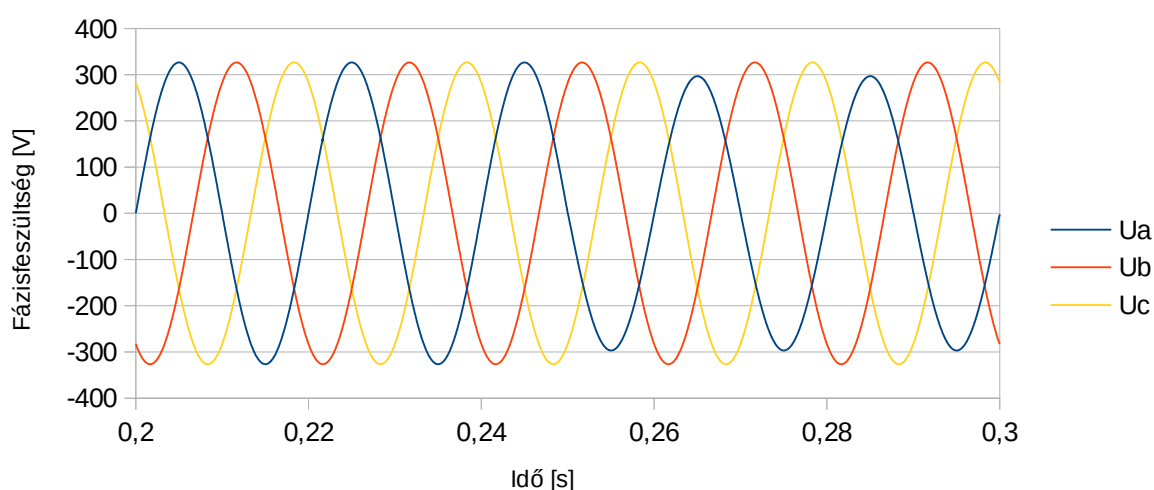
Ez alapján a zérus komponens kifejtése tisztán szinuszos szimmetrikus fázisfeszültségeket feltételezve a következő alakot ölti:

$$u_z = \frac{2}{3} * \left(\frac{A_a * \sin(2\pi f_0 t)}{2} + \frac{A_b * \sin(2\pi f_0 t - 2/3\pi)}{2} + \frac{A_c * \sin(2\pi f_0 t + 2/3\pi)}{2} \right)$$
$$u_z = \frac{A_a * \sin(2\pi f_0 t) + A_b * \sin(2\pi f_0 t - 2/3\pi) + A_c * \sin(2\pi f_0 t + 2/3\pi)}{3} \quad (3)$$

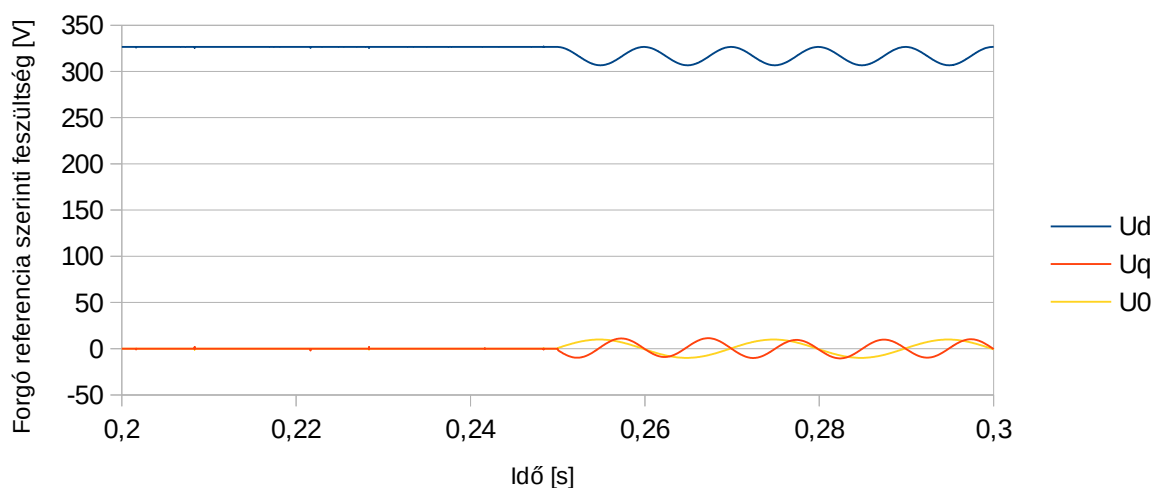
Ez alapján az látszik, hogy minél nagyobb a feszültség aszimmetria mértéke a csatlakozási ponton, annál nagyobb lesz a lengés amplitúdója a forgó-referencia szerinti komponensekben. Ezeknek a periodikus lengéseknek a gyors és pontos követése lesz a szabályzó feladata.

3.2. Aszimmetrikus visszatáplálás megvalósítása

Az inverter felépítése csak annyiban változik, hogy szükség van a zérus komponens kompenzálására is, így be kell egy harmadik szabályzó ágot, szabályozástechnikai szempontból azonban változnak az inverterrel szemben támasztott elvárásaink. Aszimmetrikus esetben a követendő jelek már nem konstans értékűek, hiszen az algebrai levezetés alapján láttuk, hogy a zérus tagban megjelenik egy hálózati frekvenciával azonos körfrekvenciájú szinuszos komponens, míg az d és q komponensekben egyaránt egy-egy kétszeres frekvenciájú lengés. A szabályzó feladata a $dq0$ tartományban megjelenő lengések követésére gyors dinamikájú és pontos követése.



Ábra 11: Fázisfeszültségek alakulása az egyfázisú fogyasztó bekapcsolását követően.



Ábra 12: A forgó referencia szerinti d , q és 0 komponensekben az egyfázisú fogyasztó hatására megjelenő szinuszos lengés.

Szimmetrikus hálózati viszonyok mellett $dq0$ tartományban PI szabályzóval implementált soros kompenzátor jól tudta az ugrást követően a konstans jeleket követni, maradó hiba nélkül megvalósítható volt a $dq0$ forgó referencia szerinti szabályzás.

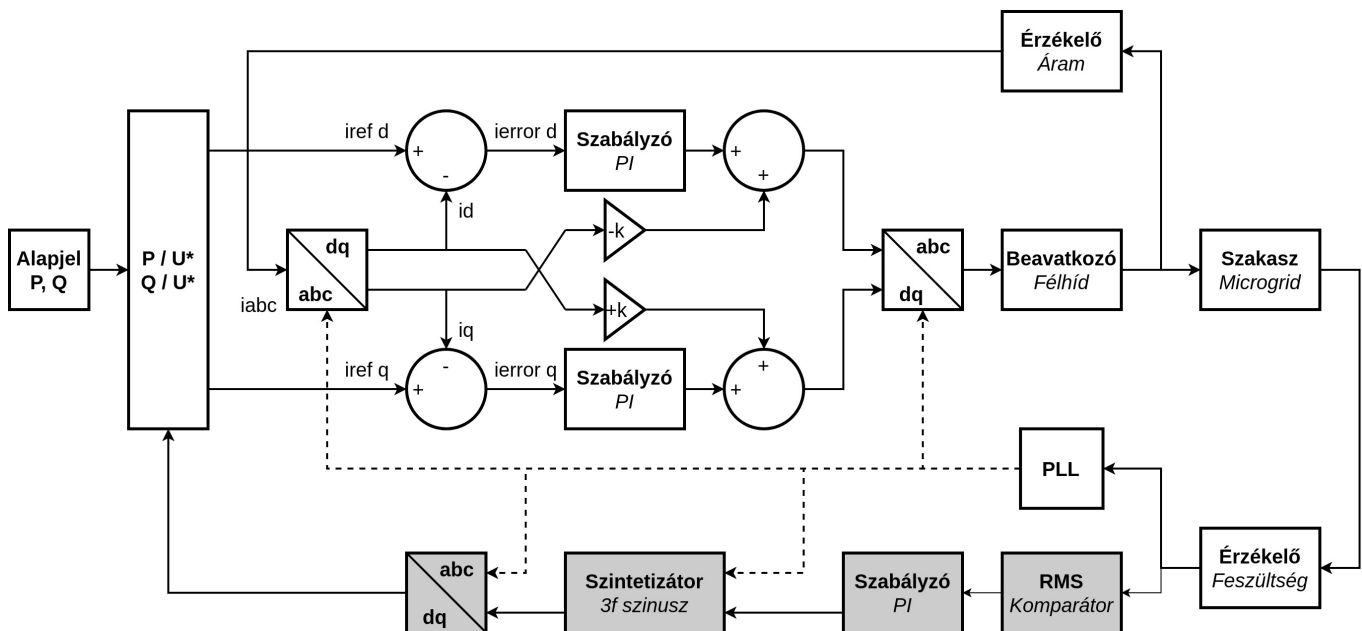
Aszimmetrikus hálózati üzemben azonban a PI szabályzó már nem kielégítő, hiszen időben szinuszosan változó jelek maradó hiba nélküli követésére már nem alkalmas. Kismértékű aszimmetria esetén kielégítő lehet egy derivált taggal kiegészített PID szabályzó, mely megfelelő hangolás esetén jó dinamikával követi az alapjelet, azonban mindenképpen megjelenik valamilyen kis mértékű pontatlanság. Ennek kiküszöbölése rezonáns szabályzó használatával lehetséges, azonban jelen demonstrációs vizsgálatok során megfelelő működést biztosít a PID szabályzó.

3.3. Aszimmetrikus alapjelek előállítása

A szabályzó ezúttal már nem csak egy hatásos teljesítmény alapjelet kap, hiszen a hatásos teljesítmény fázisok közti megoszlása is lényeges. A dq0 tartományban implementált szabályzó továbbra is a kimeneti áramértékére szabályoz, azonban a referencijelként most már nem szimmetrikus háromfázisú áramokat kap. Célunk, hogy a kisebb feszültségű fázisba a többihez képest nagyobb áramot, ezáltal nagyobb teljesítményt tápláljunk vissza.

Ha egyszerre aszimmetria kompenzálásra és meddő feszültség szabályozásra is használjuk az invertert, akkor célszerűen nem csak a hatásos teljesítmény megoszlását kell fázisonként szabályozni, hanem a meddő teljesítménytét is. Ebben az esetben a fázisfeszültségek közötti szögek aszimmetriája alapján lehet következtetni arra, hogy az adott fázisban a feszültségesést milyen arányban okozta hatásos- illetve meddő teljesítményáramlás, azonban ebben a dolgozatban ezt nem vizsgálom.

Egy segéd szabályzót hoztam létre, mely a háromfázisú teljesítmény alapjelet felosztja az egyes fázisokba táplálandó hatásos teljesítmény alapjelre. Ennek a szabályzónak a feladata, hogy a hatásos teljesítmény fázisok közötti elosztásával elérje, hogy a csatlakozási ponton mérhető feszültségaszimmetria minimális legyen.



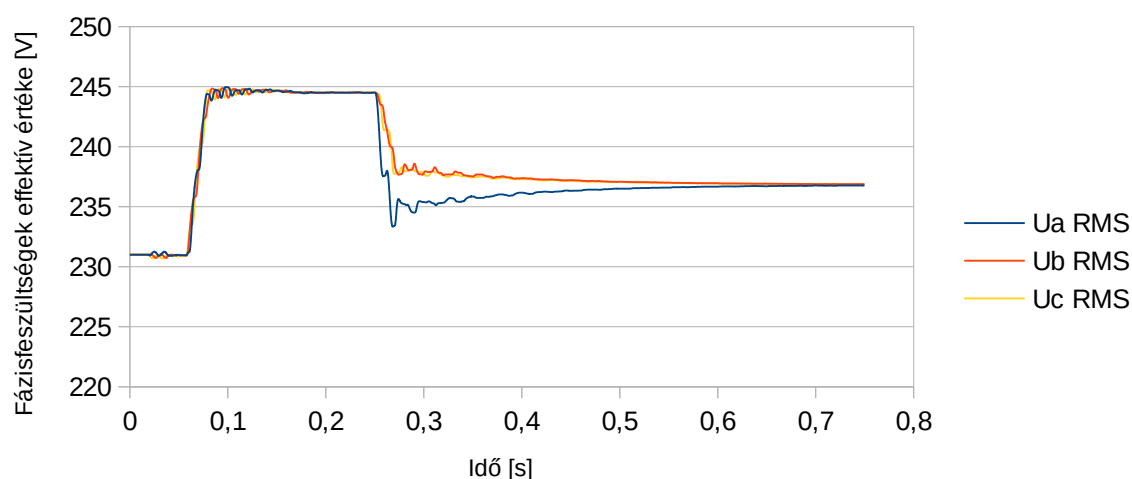
Ábra 13: A kibővített szabályzási blokkvázlat, melyen az aszimmetriát kompenzáló szabályzó csak az alapjelek előállításáért felelős.

Az alrendszer először kiszámolja a három fázisfeszültség RMS értékének átlagát, majd amelyik fázisnak nagyobb az átlaghoz képest a feszültsége, annak csökkenti a hatásos teljesítményét, amelyiknek pedig

3.4. Egyfázisú fogyasztó bekapcsolása

Az inverter aszimmetrikus visszatáplálását egy egyszerű példán keresztül mutatom be, mely alapján jól látszik, hogy az inverter nem csak állandósult állapotban képes szimmetrizálni a csatlakozási pont feszültségét, hanem gyors tranzienst jellegű hálózati változások követésére is alkalmas.

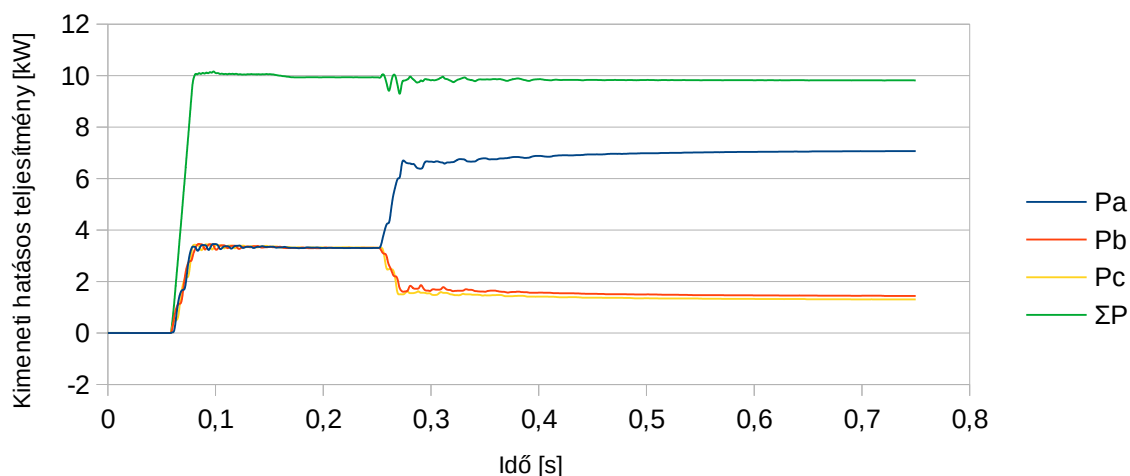
A következő szimulációban 231 V effektív fázisfeszültségű 1 Ω -os rezisztív forrásimpedanciával modellezett gyenge kisfeszültségű hálózaton végzünk az aszimmetrikus terheléses vizsgálatot. A terheletlen hálózatba 10 kW hatásos teljesítményt táplál be az inverter szimmetrikusan, melynek hatására mindhárom fázis feszültsége megemelkedik. A $t = 0.25$ sec időpillanatban az inverter csatlakozási pontjánál bekapcsol egy 10 Ω -os egyfázisú rezisztív fogyasztó, ennek hatására az A fázisban 10 V-os feszültségesés következik be. A szabályzási kör erre reagálva az eddig fázisonként 3,3 kW-os szimmetrikus visszatáplálás helyett az A fázisba 6,5 kW-ot, míg a B és C fázisokba 1,75 kW-ot kezd el visszatáplálni. A háromfázisú hatásos teljesítmény továbbra is 10 kW, azonban az aszimmetrikus visszatáplálásnak köszönhetően elértük, hogy a csatlakozási pontnál állandósult állapotban feszültségaszimmetria nem jelentkezik.



Ábra 15: A csatlakozási pont fázisainak effektív feszültsége az egyfázisú fogyasztó bekapcsolását követően.

Jól látszik, hogy ugyan egyfázisú terhelést kapcsoltunk a hálózatra, mégis mindhárom fázis feszültsége beesik. Ez azért van, mert az inverter a feszültségesésre gyorsan reagálva lecsökkenti a b és c fázisokba visszatáplált hatásos teljesítményt annak érdekében, hogy az a fázisba táplálva kompenzálhassa a

bekapcsolt fogyasztó teljesítményigényét. Ebben az esetben feltételezzük, hogy a fogyasztó jellemzően rezisztív jellegű, azaz teljesítmény tényezője közel 1.



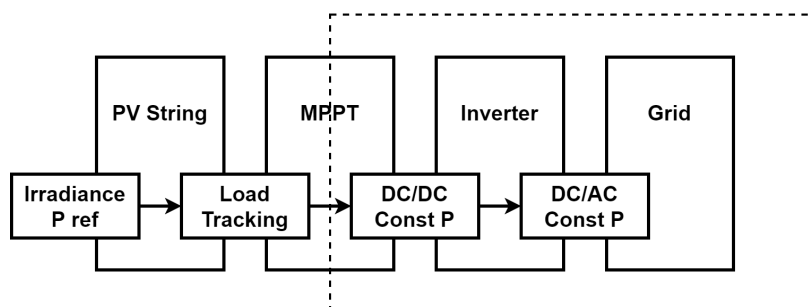
Ábra 16: A visszatáplált hatásos teljesítmény fázisonkénti megoszlása az egyfázisú fogyasztó bekapcsolását követően.

Az inverter kimeneti teljesítményén látszik, hogy a beavatkozás gyors, tranziens jellegű kapcsolás esetén is stabil és egy hálózati periódus elteltével már visszatáplálja az egyfázisú fogyasztó teljesítményigényének körülbelül 95%-át a megfelelő fázisba. Egyfázisú fogyasztók aszimmetrizáló hatásának csökkentése az egyik fontos felhasználási lehetősége ennek a szabályozási eljárásnak, azonban ennél még fontosabb lehet, hogy a rendszer képes egyfázisú termelők aszimmetrikus visszatáplálását is kompenzálni.

Vegyünk egy mikrogrid hálózatrészt példaként, ahol egyfázisú és háromfázisú invertereken keresztül csatlakozó fotovoltaiikus termelő egyaránt jelen vannak. Egy felhős délutánon a termelők visszatáplálás erősen ingadozhat, néhány másodpercen belül a névleges teljesítmény 25 %-áról 100 %-ra ugorhat a hálózatra csatlakozó inverterek teljesítménye. A szimmetriaviszonyok szempontjából a háromfázisú inverterek nem okoznak problémát, azonban ha a hálózatrészre sok egyfázisú inverter csatlakozik, akkor nagymértékű és kiszámíthatatlanul ingadozó aszimmetria jelenik meg a hálózaton. Ha csak néhány aszimmetrikus visszatáplálásra alkalmas okos háromfázisú invertert elhelyezünk a hálózaton, akkor az aszimmetria mértéke – és az ebből adódó megnövekedett veszteségek jelentősen csökkenthetők.

3.5. Az aszimmetrikus teljesítményáramlási modellezése

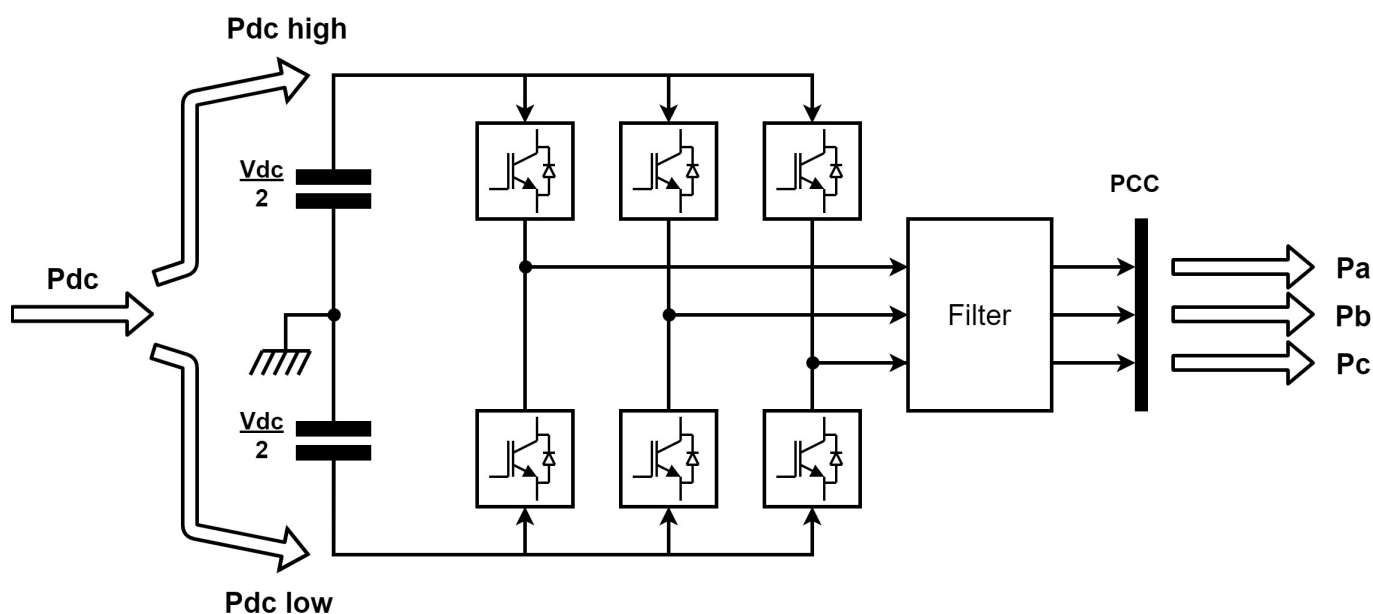
HMKE Inverter célja, hogy a megtermelt energiát AC villamos energiává alakítsa, mely közvetlenül felhasználható vagy értékesíthető. A PV sztringből maximális DC villamos teljesítmény felvételét MPPT vezérlő teszi lehetővé, ezt követően DC-DC átalakítással előállítjuk az inverter fokozat 800 V-os bemeneti feszültséget.



Ábra 17: Tipikus háztartási méretű PV rendszer funkcionális felépítése.

Teljesítményáramlás szempontjából az átalakítás minden lépésénél teljesül az energiamegmaradás törvénye, veszteségmentes esetben tehát teljesül az alábbi összefüggés:

$$P_{dc} = P_{dc\ high} + P_{dc\ low} = P_a + P_b + P_c. \quad (4)$$



Ábra 18: Teljesítményáramlás a háromfázisú fél-híd kapcsoláson keresztül.

A $P(t) = U(t) \cdot I(t)$ egyenlet alapján kiszámítható a hat modellezett félvezető kapcsolóelem pillanatnyi teljesítménye. Ezen pillanatnyi teljesítmények összegét kell kivenni a DC oldali kondenzátorokból, vagy közvetlenül a DC oldali betáplálásból [7], mégpedig a magas oldali három kapcsolóelem teljesítményét a magas oldali kondenzátorból, az alacsony oldali három kapcsolóelem teljesítményét pedig a alacsony oldali kondenzátorból. Ennek formális leírását adják az alábbi egyenletek:

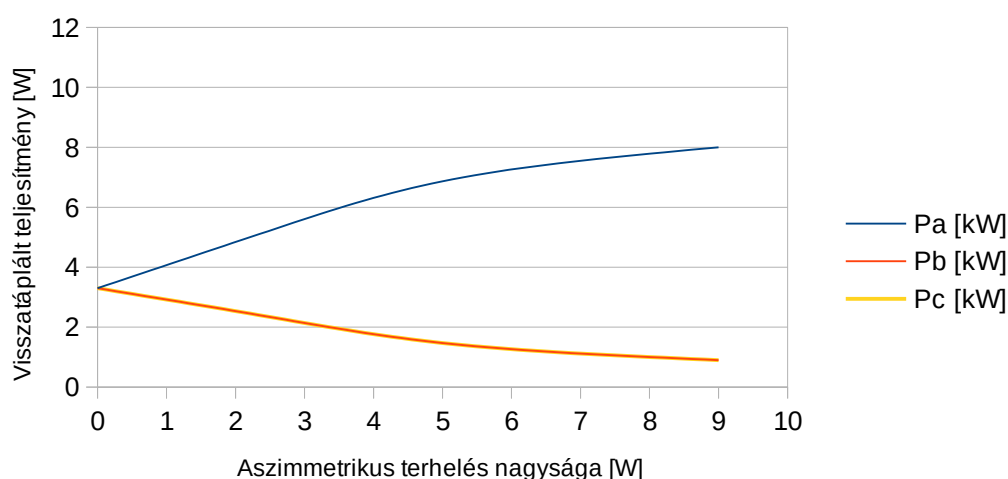
$$I_{CapP}(t) = \frac{P_{AHigh}(t) + P_{BHigh}(t) + P_{CHigh}(t)}{U_{CapP}(t)} - \frac{P_{DCinP}(t)}{U_{CapP}(t)}$$

$$I_{CapN}(t) = \frac{P_{ALow}(t) + P_{BLow}(t) + P_{CLow}(t)}{U_{CapN}(t)} - \frac{P_{DCinN}(t)}{U_{CapN}(t)} \quad (5)$$

Ez alapján már modellezhető, illetve kiszámolható az egyes elemek termikus igénybevétele különböző munkapontokban, tehát elvégezhető a kondenzátorok és félvezető elemek méretezése.

3.6. Az aszimmetrikus visszatáplálás DC oldali hatása

Azt láttuk, hogy a félhíd kapcsolású inverter topológia alkalmas aszimmetrikus visszatáplálásra, azonban méretezési szempontból felül kell vizsgálni korábbi feltevéseinket. Az aszimmetrikus visszatáplálásból eredő, időben lüktető teljesítményáramlás hatására az alkatrészek terhelése növekszik, termikus szempontból nagyobb igénybevételnek vannak kitéve. Élettartam szempontjából legkritikusabbak a DC oldali kondenzátorok. Egy tipikus 500 V maximum DC feszültségre méretezett 470 uF kapacitású elektrolit kondenzátor ekvivalens soros ellenállása (ESR) 100 mΩ és 600 mΩ közé esik, a rajta keletkező wattos veszteség pedig $P = I_{RMS}^2 * ESR$.

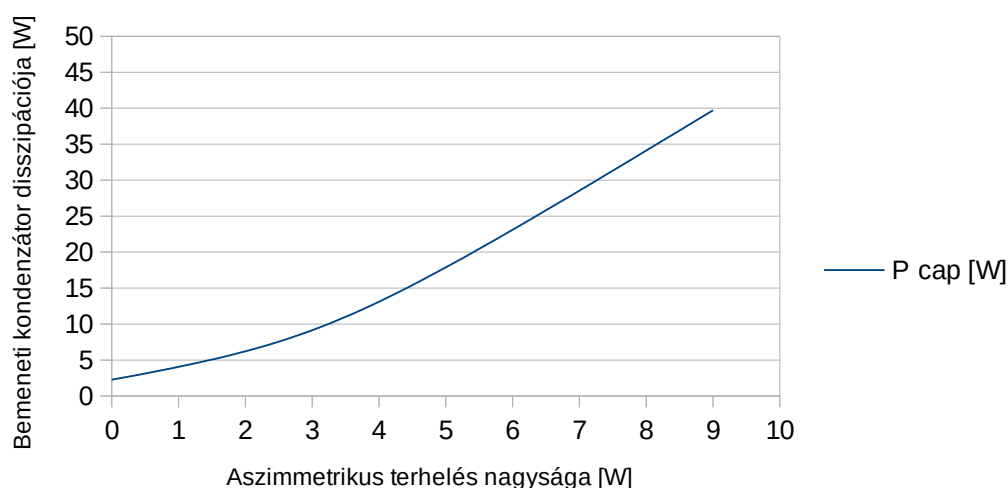


Ábra 19: A három fázis teljesítményviszonyának alakulása az egyfázisú terhelés nagysága függvényében.

A vizsgálat során az a fázisra kapcsolt wattos terhelés okozza az aszimmetriát, minél nagyobb terhelést modellezünk, a feszültség kompenzációnak köszönhetően annál nagyobb lesz az a fázisba táplált hatásos teljesítmény. Szélsőséges esetben egyfázisú inverterként működik a rendszer, ekkor lényegileg csak az a fázisba történik visszatáplálás. A továbbiakban $ESR = 250 \text{ m}\Omega$ értékkel számolunk.

Terhelés [kW]	Pa [kW]	Pb [kW]	Pc [kW]	IC RMS [A]	P cap [W]
0	3,3	3,3	3,3	3,0	2,25
2,6	5,3	2,3	2,3	5,6	7,84
5,3	7,0	1,4	1,4	8,8	19,4
9	8,0	0,9	5,0	12,6	39,7

Jól látható, hogy a két DC oldali bemeneti kondenzátorban keletkező összesen 80 W-os hőveszteség nem csak az inverter hatásfokát rontja, hanem az elektrolit kondenzátorok várható élettartamát is csökkenti.



Ábra 20: A DC oldali puffer kondenzátor disszipációjának alakulása az aszimmetrikus terhelés függvényében.

A névleges 10 kW hatásos teljesítmény egy fázisba történő visszatáplálása esetén a bemeneti teljesítmény 0,8 %-a már a bemeneti kondenzátorokon hőveszteséggé alakul, míg szimmetrikus visszatáplálás esetén ez a veszteség mindössze 0,045 %.

A kondenzátor kapacitásának növelésével csökkenthető ez a veszteség, hiszen az elektrolit kondenzátorok esetében az ekvivalens soros ellenállás jellemzően a kapacitással fordítottan arányos. A nagyobb kapacitású kondenzátor nagyobb felületéből adódóan termikus szempontból előnyösebb lehet, hiszen a kisebb hőmérséklet emelkedés hosszabb várható élettartamot eredményez, azonban alkatrész költsége és helyigénye nagyobb.

Villamos szempontból fontos megjegyezni, hogy a nagyobb kapacitás hatására kisebb lesz a kondenzátor feszültségének hullámossága, ezáltal a félhíd kapcsolások DC bemeneti feszültsége is stabilabb lesz, ennek köszönhetően csökken a háromfázisú hálózatba táplált áram felharmonikus tartalma is.

Szimuláció alapján kijelenthető, hogy a háromfázisú inverterek aszimmetrikus szabályozásában rejlő eddig kiaknázatlan lehetőségek hatékony megoldást biztosíthatnak az egyik legfontosabb feszültségminőségi paraméter javítására. Az aszimmetrikus munkapontokban megnövekedett villamos és termikus igénybevételek miatt azonban drágábbak lesznek ezek az inverterek. Elterjedésükhöz elengedhetetlen, hogy piaciilag motivált legyen a termelő a drágább inverter telepítésére. Ennek egyik módja lehet, hogy az eddig megszokott körülbelül 15 Ft/kWh helyett egy ennél magasabb összeget kapjon

abban az esetben, ha képes a pillanatnyi feszültségviszonyok szerint a megfelelő fázisba visszatáplálni a megtermelt többlet villamos energiát.

4. Feszültség harmonikusok aktív szűrése inverterrel

A közcélú hálózaton a csatlakozási pont feszültség jelalakjának torzulását nemlineáris fogyasztók, valamint az ellátási útban található transzformátorok vasmagjának telítődéséből adódó nemlineáris átviteli karakterisztika okozza. A napjainkban egyre elterjedtebb kapcsoló üzemű tápegységek szintén felharmonikusokkal szennyezik a hálózatot. A legfontosabb harmonikus források a következő csoportokba sorolhatóak [8]:

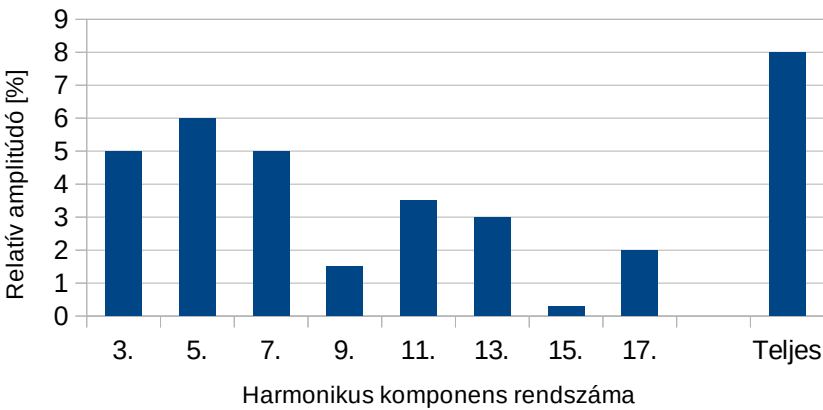
- Transzformátorok és forgógépek
- Villamos hajtások (frekvenciaváltós vagy fázishasításos)
- Világítástechnika (LED, neon fénycső, kompakt fénycső)
- Egyenirányítók
- Kapcsolóüzemű tápegységek
- Kisülési jelenségek

4.1. Harmonikusok rendszáma

A hálózaton egyaránt megjelennek páros és páratlan rendszámú harmonikusok is. Az MSZ EN 50160 szabvány szerint a tápfeszültség teljes harmonikus torzítása (THD), beleértve az összes felharmonikust a 40-es rendszámig nem lehet nagyobb 8 %-nál.

A gyakorlatban jellemző, hogy bizonyos felharmonikusok dominálnak a hálózaton, ezek kompenzációja szükséges lehet annak érdekében, hogy a megengedett határérték alatt tartsuk az adott komponens amplitúdóját. Jellemzően a páratlan rendszámú harmonikusok amplitúdója a legnagyobb, ezek maximális értékét az EN 61000-3-2 szabvány elő is írja.

Harmonikus rendszáma	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.	17.	Teljes
Megengedett feszültség [%]	5	6	5	1,5	3,5	3	0,3	2	8



Ábra 21: Páratlan harmonikusok megengedett mértéke az alapharmonikus amplitúdójához viszonyítva, százalékban kifejezve.

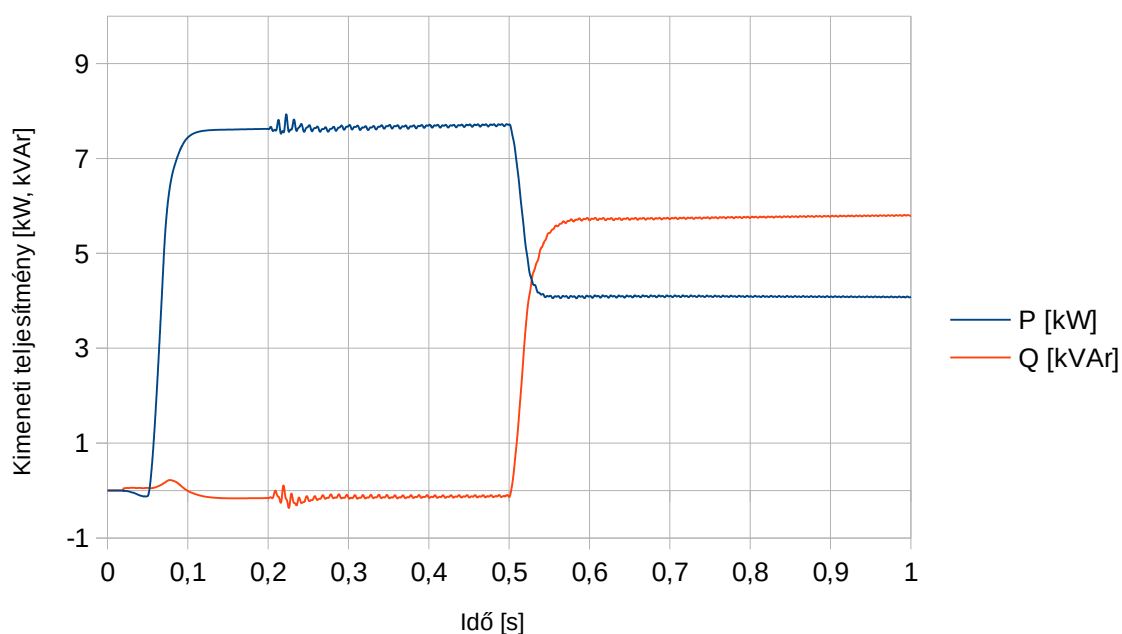
A páros rendszámú felharmonikusok sokkal kevésbé jellemzőek, hiszen ezek keletkezéséhez valamilyen fél-periódus jellegű aszimmetriára van szükség, például egyenfeszültség komponens egy transzformátor tápfeszültségében. Hibamentes hálózati működés esetén a páros rendszámú harmonikusok mértéke általában alacsony [9], azonban a szabvány ezekre is ad felső korlátot.

Harmonikus rendszáma	2.	4.	6.-24.
Megengedett feszültség [%]	2	1	0,5

4.2. Harmonikusok hatása az elosztott termelőkre

Egyszerű dq0 szabályzóval vezérelt háromfázisú inverterek instabillá válhatnak, ha a csatlakozási ponton nagymértékű feszültség-harmonikus mérhető [10]. Ennek oka, hogy a dq0 transzformációt követően az 50 Hz-en szinkron forgó koordináta-rendszerben kifejezett d, q és zérus komponensek nem konstans értékűek lesznek állandósult állapotban, hiszen a magasabb frekvenciás komponensek itt is megjelennek. Ezt a PI vagy PID szabályzó a hangolási paramétereiktől függően felerősítheti, ezzel további harmonikusokat juttathat a kisfeszültségű hálózatra. Fontos, hogy hiába méreteznek jól egy szabályzót a megengedett felharmonikus viszonyokra, a valóságban semmi sem garantálja azt, hogy egy csatlakozási ponton nem haladja meg a harmonikus tartalom a szabványban előírt 8 %-os mértéket, ezért a vizsgálandó modell stabilitását célszerű szélsőséges harmonikus körülmények között is ellenőrizni.

Az alábbi vizsgálatban a korábban modellezett inverter kimeneti teljesítményében okoz zavart a $t = 0,2$ másodperc időpillanatban bekapcsolt UTHD = 6% mértékű harmadik harmonikust betápláló forrás.



Ábra 22: Harmonikus forrás bekapcsolásának hatása a kimeneti teljesítményre.

Megfigyelhető, hogy jelen hálózati paraméterek mellett a rendszer stabilis maradt, azonban kimeneti teljesítményében megjelenik egy nem kívánt nagyfrekvenciás lengés.

4.3. A harmonikus hiba leírása

A csatlakozási pont feszültsége ideális esetben egy 231 V effektív feszültségű 50 Hz-es szinuszosan váltakozó jel lenne, azonban ez a gyakorlatban sosem valósul meg. Minden esetben adódnak hozzá periodikus és aperiodikus komponensek, ezek összegeként áll elő a tényleges jelalak.

A csatlakozási feszültség-idő függvény közvetlenül mérhető mennyiség, ezt bontjuk alapharmonikusra, valamint periodikus- és aperiodikus hiba komponensekre. Az alapharmonikus és a periodikus hiba becslésére a frekvenciatartománybeli jelanalízis eszközei adnak lehetőséget.

$$\begin{aligned}u_{PCC} &= u_1 + u_p + u_{Ap} \\ u_1 &= \sin(1 * \omega_0 t + \phi_1) \\ u_p &= \sum_{i=1}^{\infty} A_i * \sin(i \omega_0 t + \phi_{a,i}) \\ u_{Ap} &= u_{PCC} - u_1 - u_p\end{aligned}\tag{6}$$

Ahol

- u_{PCC} a csatlakozási pont feszültség-idő függvénye,
- u_1 az alapharmonikus időfüggvénye,
- u_p az összes felharmonikust tartalmazó kompenzálandó periodikus hiba időfüggvénye,
- u_{Ap} a zajt, mérési hibákat és egyéb aperiodikus tranzienseket leíró időfüggvény.

Az u_{Ap} aperiodikus komponens lehet valamilyen sztochasztikus, zaj jellegű- vagy valamilyen tranziens esemény okozta jel. A zaj amplitúdója jellemzően alacsony, ezért nem okoz problémát szabályozási szempontból. Ezzel szemben például egy tranziens vagy feszültségletörést jól detektálható esemény, mely adott esetben beavatkozást igényel.

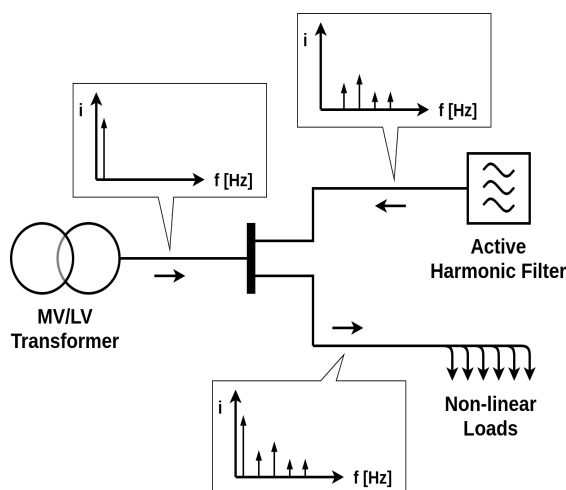
A jelenlegi szabályozás szerint a kisfeszültségű inverter nem táplálhat rá a hibára, azaz a hibaesemény észlelését követően azonnal le kell csatlakozni a hálózatról.

A harmonikus szűrő célja, hogy mindhárom fázisban elérje, hogy a harmonikusok mértéke közel nulla értékű legyen, azaz az u_p periodikus hiba időfüggvénye minden időpillanatban nulla értékű legyen.

4.4. Harmonikusok kompenzálása

Klasszikusan a hálózaton megjelenő harmonikusokat különböző passzív szűrő áramkörök segítségével lehet csillapítani. Ezek közül az egyik leggyakrabban alkalmazott megoldás a sönt ágba kapcsolt LC rezgőkör, melynek előnye, hogy egy kiválasztott frekvenciakomponens számára alacsony impedanciás utat biztosít a nullvezető felé, ezzel megakadályozva annak terjedését a hálózaton. Hátránya azonban, hogy egy LC tag csak egy adott frekvenciakomponens elnyomására alkalmas, így adott esetben több párhuzamosan kapcsolt szűrő ágra lehet szükség. További hátrány, hogy nagy méretű és viszonylag drága eszközről van szó, ezért csak igen indokolt esetben kerül telepítésre.

Ezzel szemben egy aktív felharmonikus szűrő a feszültség harmonikusok mértékéből következtet a felharmonikus áramok nagyságára, és ezekkel azonos nagyságú, ellentétes fázisú áramot táplál vissza a hálózatba. A módszer legnagyobb előnye, hogy rugalmas, azaz tetszőleges rendszámú harmonikus komponens kompenzálására alkalmas.



Ábra 23: Nemlineáris fogyasztók által keltett felharmonikusok kompenzálása aktív harmonikus szűrővel. Az aktív szűrőnek köszönhetően a hálózatrész tápoldaláról vizsgálva tisztán lineárisnak látszik, a tápponting nem jutnak el a harmonikus komponensek.

Aktív harmonikus szűrő lehet önálló készülék is, azonban sokkal célszerűbb ezt a feladatot átruházni a hálózaton amúgy is jelenlévő inverterrel kapcsolódó elosztott termelőkre. Felépítése szempontjából a két készülék ugyanúgy fél-híd kapcsolású feszültség inverter, az eltérés mindössze a szabályozási algoritmus jellegére korlátozódik.

Egy hagyományos inverter feladata, hogy gyorsan és megbízhatóan meghatározza az alapharmonikus feszültségét és fázisát, a szabályzó algoritmus erre rászinkronizálva állítja elő a félhíd kapcsolásokat hajtó

modulációs jeleket, melynek eredményeként megtörténhet a fázishelyes szinuszos áram visszatáplálása. Ezzel szemben egy felharmonikus kompenzálásra alkalmas inverter esetén a feladat azzal bővül, hogy nem csak az alapharmonikusra, hanem a kompenzálni kíván felharmonikusokra is rá kell szinkronizálni egy-egy szabályzóágot. A visszatáplált áram a felharmonikusok esetén a feszültségjelalakkal ellentétes fázisban történik, ezzel elérve, hogy a csatlakozási ponton mérhető harmonikus komponensek amplitúdója csökkenjen.

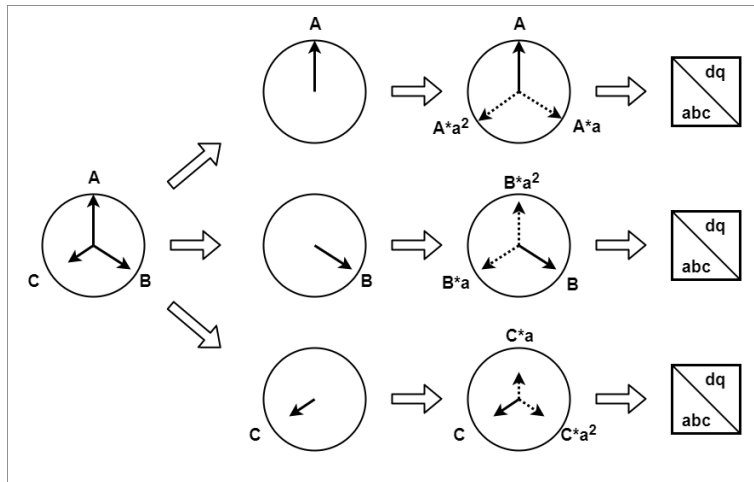
A modellben a mért feszültség-idő függvényt felbontom az egyes harmonikus komponensekre, ezek nagyságát és az alapharmonikushoz képest mért fázisát határozom meg. Ezt követően végzem az egyes komponensek dq0 tartománybeli kompenzálását. Minden komponenst a saját frekvenciájára szinkronizált forgó-referenciába transzformálva egyszerű PI szabályzóval kompenzálom, végül az inverz-transzformációból eredményeként kapott modulációs jelkomponensek szummájaként áll elő a beavatkozójel, mely meghajtja a fél-híd kapcsolást.

A frekvenciakomponensek amplitúdójának és fázisának gyors és pontos meghatározása egy periódusnyi mozgó ablakos Fourier transzformációt használok, mely minden időpillanatban az előző 20 ms-os ablakra kiszámolja a csatlakozási pont feszültségének spektrumát. A kapott eredmény az egyes komponensek pillanatnyi amplitúdója és fázisa. Állandósult állapotban ezek a függvények időben konstans értékűek, a valóságban azonban számolnunk kell rövid idejű tranziensekkel és aperiodikus zavarjelekkel. A transzformáció adott időablakból dolgozik, tehát nem képes ezeket a zavarjeleket megkülönböztetni a ténylegesen periodikus komponensektől, ezért ezek elnyomása érdekében érdemes a transzformáció kimeneteként kapott komplex amplitúdó függvényt mozgóablakosan átlagolni.

4.5. Forgó referencia értelmezése egyfázisú jelekre

A közcélú kisfeszültségű hálózatra nagyon sok egyfázisú fogyasztó kapcsolódik, így a háromfázisú feszültség szimmetriája nem feltétlenül teljesül. Az 50 Hz-es alapharmonikus feszültség és áramok vizsgálata estén támaszkodhatunk statisztikai módszerekre, mely alapján a fogyasztás nagyjából egyenlően oszlik meg a fázisok között. A felharmonikusok vizsgálata esetén azonban sokkal nagyobb bizonytalansággal kell számolnunk, hiszen semmi nem garantálja azt, hogy azonos harmonikus karakterisztikájú és mennyiségű fogyasztó lesz bekapcsolva minden fázisban egy adott időpillanatban.

Már korábban láttuk, hogy aszimmetrikus esetben a Park-transzformáció eredményeként kapott dq0 komponensek nem állandó értékűek, így a forgó referencia-rendszer elveszti szabályozástechnikai előnyét, hiszen már nem állandó értékű jelek követése a feladat. Ennek feloldása érdekében bevezethetjük az egyfázisú dq0 transzformációt, mely az egyfázisú komplex amplitúdóval értelmezett fázismennyiséget kiterjeszti háromfázisú szimmetrikus vektorrendszerekké, melyeken már elvégezhető a transzformáció. Az eredményként kapott állandó értékű dq0 komponenseken már elvégezhető a forgó-referencia szerinti szabályozás.



Ábra 24: Aszimmetrikus háromfázisú vektorrendszer fázisonkénti dq0 transzformációja, melynek eredményeként állandósult állapotban állandó értékű d, q és zérus komponenseket kapunk.

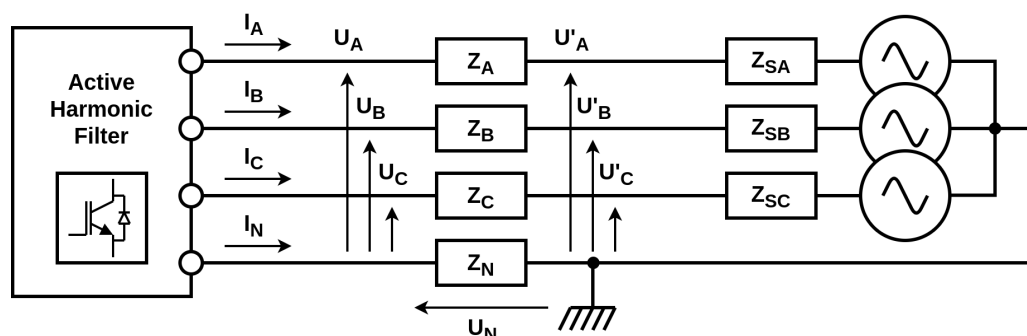
Ahol a 120°-os és 240°-os forgatáshoz használt a és a^2 komplex segédváltozók definíciója:

$$\begin{aligned} a &= e^{j\frac{2}{3}\pi} \\ a^2 &= e^{j\frac{4}{3}\pi} \\ a^3 &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

4.6. Nullvezető hatása aszimmetrikus kompenzáció esetén

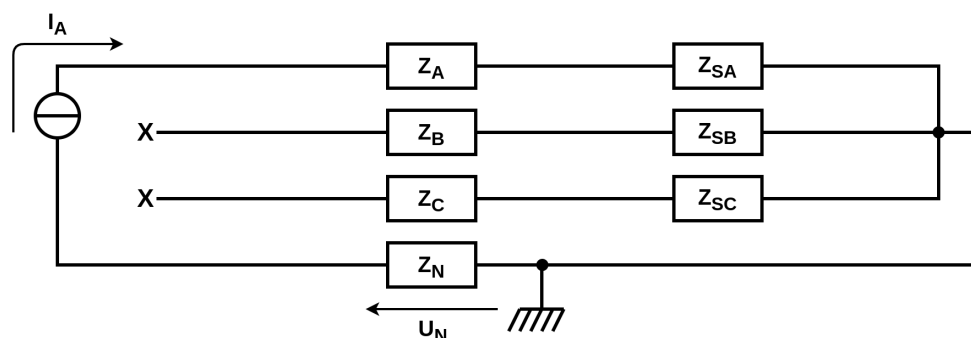
A harmonikus kompenzációt fázisonként végezzük, ennek ellenére az egyes fázisokba visszatáplált áramok hatással vannak a többi fázis feszültségére, mert a nullvezető impedanciája nem elhanyagolható. Korszerű kisfeszültségű hálózaton a három fázisvezető, a nullvezető és a védővezető keresztmetszete megegyezik, ebből adódóan a hosszegységre eső ellenállásuk és induktivitásuk is jó közelítéssel azonos lesz.

A vizsgálat során a mögöttes hálózat jó közelítéssel lineáris rendszernek tekinthető, tehát használható a szuperpozíció módszere. Az invertert csillagba kapcsolt háromfázisú vezérelt áramforrásként modellezzük, ahol áramforrások közös pontja a nullvezetőhöz kapcsolódik. A mögöttes hálózatot háromfázisú Thevenin helyettesítő képpel modellezzük.



Ábra 25: A nullvezető hatásának vizsgálatakor használt lineáris modell.

Amikor áramot táplál vissza az inverter az egyik fázisba, akkor az áram útja a nullvezetőn keresztül zárul, hiszen a modellben deaktivizáljuk az összes többi forrást, azaz az áramforrásokat szakadással, a feszültségforrásokat pedig rövidzárral helyettesítjük. Látszik, hogy az áramkör egyetlen hurokra egyszerűsödik.



Ábra 26: Az a fázisba visszatáplált áram útja a nullvezetőn keresztül.

A Z_N impedancián folyó áram $U_N = -I_N \cdot Z_N$ feszültségemelkedést okoz, azaz az aszimmetrikus áram hatására a csatlakozási pontnál mérhető fázisfeszültségek mind megváltoznak. Az árammal táplált fázis

feszültsége nő, míg a másik kettőé csökken. Fazoros ábrázolás esetén szemléletesen a csillagpont eltolódásáról beszélünk.

A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy ha egy egyfázisú nemlineáris fogyasztó hatására a másik két fázisban is megjelennek a kibocsájtott harmonikus komponensek ellentétes előjellel. A példát megfordítva látszik, hogy ha egy egyfázisú aktív harmonikus szűrőt kapcsolunk valamelyik fázisra, akkor az adott fázis feszültségében mérhető harmonikus komponensek elnyomásakor valójában azokat csak átterheljük a másik két fázisra.

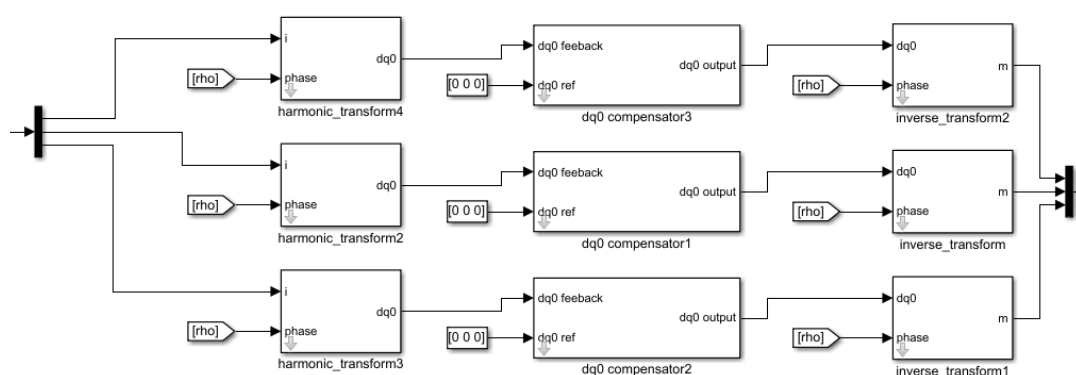
A vizsgálatok során az egyszerűség kedvéért elhanyagoltam a távvezeték hosszegységre vonatkozó konduktanciáját és kapacitását, valamint a földelés hatását.

A Z_A , Z_B , Z_C és Z_N impedanciák egy hosszú vezeték impedanciáját reprezentálják, mely összeköti az invertert a feszültségforrással és belső impedanciával modellezett KöF/KiF transzformátorral. Amennyiben szétbontjuk ezeket a koncentrált paramétereket, és a vezeték egyes szakaszait külön vizsgáljuk, akkor látható, hogy a különböző pontokba csatlakozó fogyasztók különböző mértékben fogják érzékelni a csillagpont eltolódását, ez invertertől távolodva egyre kisebb mértékű lesz a hatás.

4.7. Harmonikus kompenzálás szimulációs eredménye

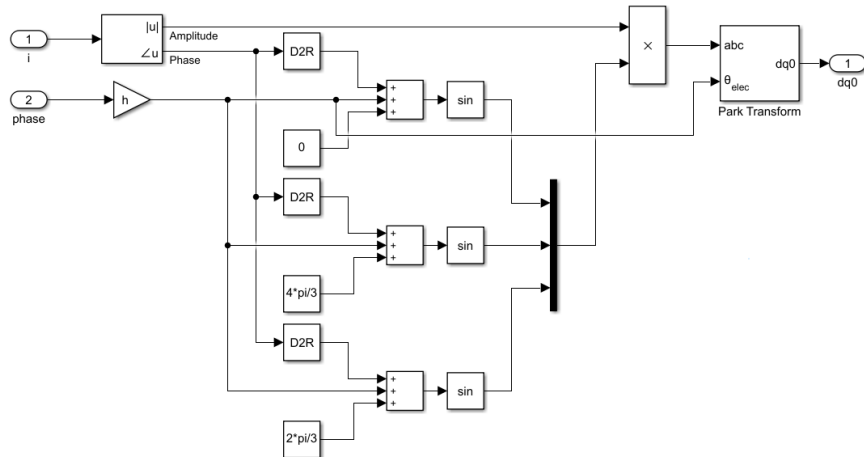
A modellben az alapharmonikus frekvencián történő visszatáplálás mellett a harmadik harmonikus kompenzálására hoztam létre egy szabályzóágat. Ha több komponenst is kompenzálni szeretnénk, akkor ugyan ilyen felépítésű szabályzó ágak párhuzamos kapcsolásával ez könnyen megtehető, akár az adott komponens frekvenciájához optimalizált szabályzási paraméterekkel. Én csak a harmadik harmonikusra korlátoztam a modellezést, mert a Simulink solver futásideje rohamosan romlik a modell komplexitásának növelésével.

A gyakorlatban egy inverter szabályzója tisztán szoftveres algoritmus, melynek számítási erőforrás igénye lineárisan növekszik a párhuzamos szabályzóágak számának növelésével, tehát egy beágyazott processzoros környezetben is könnyedén megvalósítható egy akár 10-20 komponens kompenzálására alkalmas algoritmus.



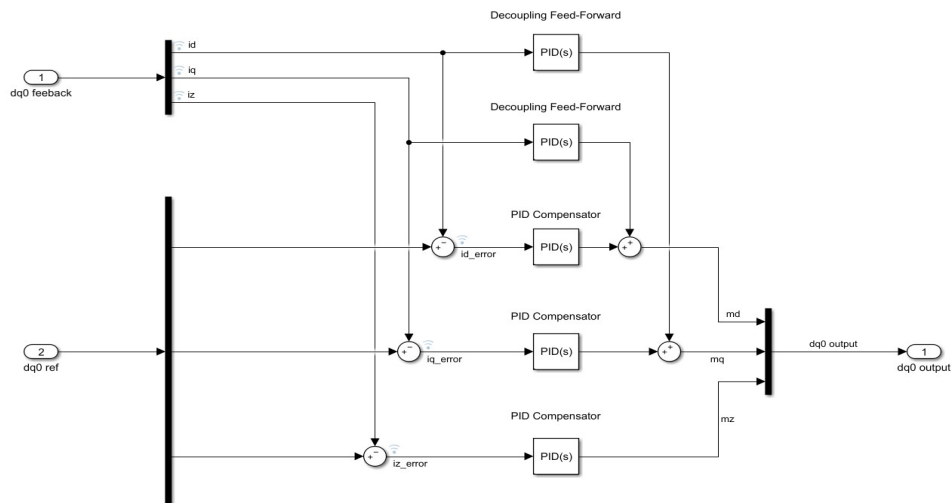
Ábra 27: A fázisonkénti harmadik harmonikus kompenzálás magas szintű blokkvázlata.

A harmonikus transzformációt végző blokkban implementáltam az egyfázisú jelre értelmezett dq0 transzformációt. A rendszer bemenetként az adott fázis feszültségének pillanatértékét, valamint az alapharmonikus pillanatnyi fázisszögét kapja. Fourier transzformációt követően kiszámolja a harmadik harmonikus komponens amplitúdóját és fázisszögét, majd ebből szintetizál egy háromfázisú szimmetrikus feszültségjelet, melyen elvégzi a forgó-referencia szerinti transzformációt.



Ábra 28: Az egyfázisú Part-transzformáció Simulink implementációja.

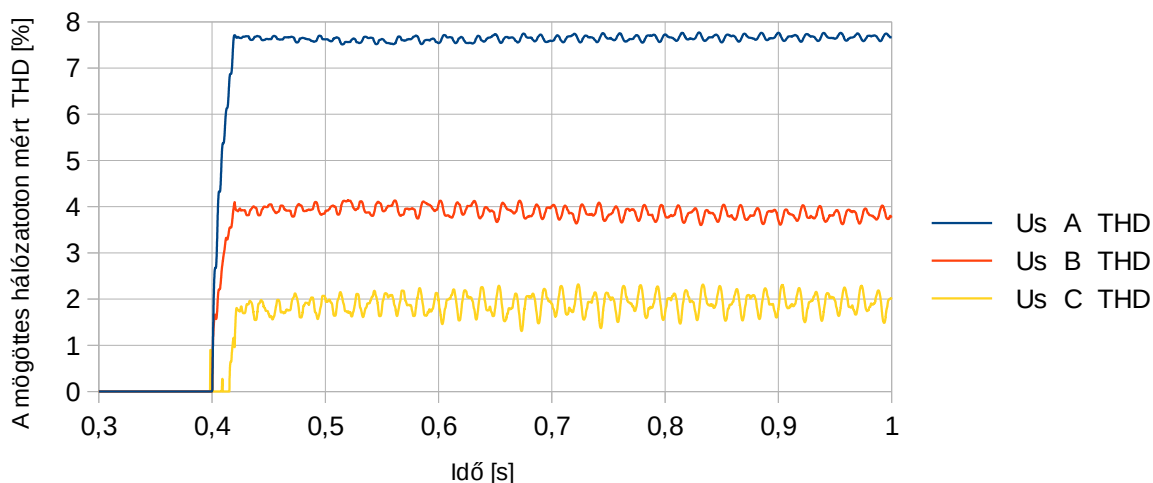
Az előálló d, q és zérus komponenseken az alapharmonikus kompenzálásakor használt szabályzó struktúrát használok fel újra. Az egyetlen különbség, hogy a követendő alapjel ebben az esetben konstans nulla értékű, hiszen a szabályzás célja az, hogy a csatlakozási pont feszültségében az adott frekvenciakomponens amplitúdója a nullához közeledjen. A PI kompenzátor hangolása során arra törekedtem, hogy a szabályzó minél gyorsabban csökkentse a csatlakozási ponton mérhető THD értéket anélkül, hogy hirtelen változó harmonikus viszonyok mellett instabillá válna.



Ábra 29: A harmadik harmonikust kompenzáló forgó-referencia szerinti PID kompenzátor implementációja $P=0,6$ $I=5$, $D=0$ és $K=0,22$ paraméterekkel.

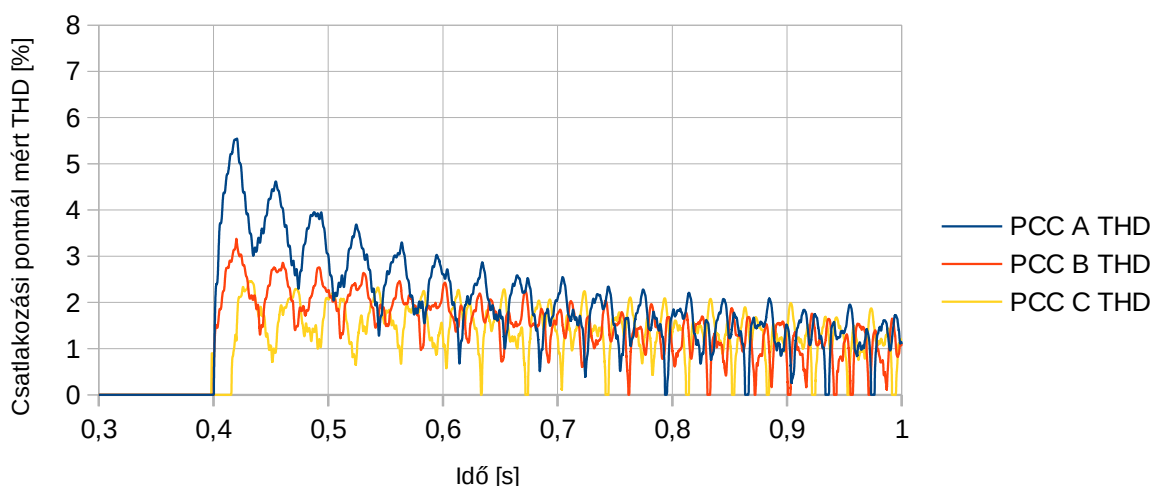
Az inverz transzformációt követően előálló modulációs jeleket egyszerűen fázisonként összeadom az alapharmonikus kompenzátor modulációs jeleivel.

A szimulációban az inverter 8 kW hatásos teljesítményt táplál vissza, amikor $t = 0,4$ másodperc időpillanatban a mögöttes hálózatot modellező Thevenin forráshoz hozzákapcsolok egy aszimmetrikus harmonikus forrást. Ennek hatására az a fázisban 7,6 %, míg a b és c fázisokban 4 % illetve 2 % értékre emelkedik a teljes harmonikus torzítás.



Ábra 30: A mögöttes hálózatot modellező forrás feszültségében mérhető fázisonkénti THD érték alakulása.

Ezt érzékelve az inverter elkezd 150 Hz frekvenciájú szinuszos áramot visszatáplálni a hálózatba annak érdekében, hogy a csatlakozási pontjában mérhető harmadik harmonikus feszültség értéke minden fázisban közel nulla értékű legyen.



Ábra 31: Az inverter csatlakozási pontján mérhető THD érték.

A szimuláció alapján látszik, hogy az inverter a harmonikus forrás bekapcsolását követően körülbelül fél másodperc alatt képes 2 % alá szorítani a csatlakozási pontján mérhető THD értéket. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a mikrogriden az inverter közelében a hálózathoz csatlakozó fogyasztók jelentősen csökkentett mértékben érzékelik a harmonikus forrás által kibocsájtott zavart.

Fontos kiemelni, hogy az erősen aszimmetrikus harmonikus viszonyokat sikerült teljesen szimmetrikussá kompenzálni, mely különösen fontos lehet a háromfázisú fogyasztók és termelők működése szempontjából.

5. Az okos inverterek elterjedésének piaci korlátai

A dolgozatban bemutatott szabályozási eljárások hatékony eszközei lehetnek a feszültségminőség javítására. Az elosztott termelők, mint feszültségminőségi beavatkozó egységek legnagyobb előnye, hogy elhelyezkedésük alapján elosztottak, tehát az esetleges zavarforrások-, illetve a megvédeni kívánt fogyasztók közvetlen közelében képesek beavatkozni. Széleskörű elterjedése kulcsfontosságú annak érdekében, hogy tovább növekedhessen a megújuló energiaforrások és háztartási méretű kiserőművek penetrációja. Okos fogyasztók és termelők elterjedése teszi majd lehetővé, hogy a közcélú villamos energia hálózat megbízhatósága és hatékonysága növekedhessen.

Elterjedésüket azonban nehezíti, hogy különböző üzemmódokban megnövekedett villamos terhelésnek vannak kitéve a különböző alkatrészeik – elsősorban a félvezető kapcsolóelemek és a DC oldali kondenzátorok. Egy ugyanúgy 10 kW névleges teljesítményű hagyományos inverterhez képest mindenképpen drágább készülékekről beszélünk. Annak érdekében, hogy ezek okos eszközök elterjedjenek, szükség van a piaci motiváló erők újragondolására.

A villamosenergia-piac jelenlegi rugalmatlan árszabása helyett át kell térni a valós kereslet-kínálat alapú működésre. Az elosztott termelőket például motiválhatjuk energiatárolók telepítésére csúcsidős tarifák bevezetésével. Fontos továbbá, hogy ne csak a vételezett vagy megtermelt hatásos teljesítmény legyen értékesíthető, hanem lehessen szabadon adni és venni meddő-, harmonikus- és aszimmetria kompenzációs kapacitást is. Az ipari fogyasztók esetén már ma is komoly büntetések szabnak ki azokra, akik rossz teljesítménytényezővel vételeznek, ezzel ösztönözve őket a megfelelő meddő kompenzációra. A szigorú szabályozás érthető, műszakilag valóban fontos a megfelelő meddő teljesítményviszonyok fenntartása, azonban a büntetés mint motivációs eszköz nem megfelelő. Legyen lehetősége az ipari fogyasztónak meddő kompenzációs kapacitást vásárolnia az adott mikrogriden tevékenykedő egyéb piaci szereplőktől, ne kelljen feltétlenül saját kompenzációt telepítenie.

Olyan okos fogyasztásmérőkre van szükség, melyek képesek valós idejűleg mérni a hatásos és meddő teljesítmény áramlását, a fogyasztás fázisonkénti megoszlását és a fogyasztó által vételezett harmonikus áramok mértékét is. A fogyasztó ne csak az elfogyasztott hatásos teljesítményért fizessen Ft/kWh alapon, hanem fizessen külön a vételezett harmonikus áramért Ft/Ah alapon akár harmonikus komponensenként külön áron.

Az alábbi táblázatban foglaltam össze néhány lehetséges tarifát. Fontos, hogy az vételi- és eladási ár időpont és helyfüggő változók, melyek konkrét pillanatértékeit az adott mikrogrid kereslet-kínálat viszonyai határozzák meg.

Tétel megnevezése	Mértékegység
Hatásos teljesítmény az a fázisból	Ft/kWh
Hatásos teljesítmény a b fázisból	Ft/kWh
Hatásos teljesítmény a c fázisból	Ft/kWh
Meddő teljesítmény	Ft/kvarh
Harmadik harmonikus áram	Ft/A _{3h}
Ötödik harmonikus áram	Ft/A _{5h}

Ekkor egy készülék üzemeltetési költsége nem csak a hatásos teljesítményfelvételtől függ majd, például egy harmonikus kompenzált tápegységgel ellátott világítótest esetén kevesebb harmonikus áram fogyasztást kell majd fizetni. A különböző készülékeket nem csak energiasztályokba (A++, A+, A, B ...) hanem harmonikus-osztályokba is be kell sorolni. Egy A++ energiasztályú izzó üzemeltetése adott esetben lehet drágább, mint egy ugyan több energiát fogyasztó B energiasztályú lámpatesté, ha utóbbinak harmonikus-osztálya jobb. Ez motiválja a fogyasztót, hogy olyan készüléket válasszon, ami nem csak energiatakarékos, hanem az általa okozott hálózati zavar mértéke is alacsony. Ezek ugyan valószínűleg drágábbak - hiszen tápegységük bonyolultabb - azonban hosszú távon megtérülnek.

A fogyasztókhoz hasonlóan a termelőkre is hatással lesz az újragondolt tarifarendszer, például egy feszültségminőség javítására alkalmas okos inverterrel csatlakozó termelő a kialakult piaci árak alapján dönthet úgy, hogy egy adott napszakban a megtermelt hatásos teljesítményt nem az alapharmonikus frekvencián táplálja vissza, hanem inkább valamelyik erős felharmonikus komponens kompenzálására használja azt.

A cél, hogy úgy lehessen gazdaságilag motiválni az okos eszközök terjedését, hogy az nem lehetetleníti el a már meglévő készülékek használatát. Egy hagyományos inverter továbbra is el tudná adni a megtermelt többlet energiát, azonban egy okos inverter nagyobb profitot érhet el azzal, hogy egy adott időpillanatban inkább harmonikus kompenzál, vagy abba a fázisba táplálja vissza az energiát, ahol a nagyobb a fogyasztás miatt magasabb az eladási ár.

6. Összefoglalás

Témám célja az volt hogy megismerjek, modellezek és bemutassak olyan szabályozási eljárásokat, melyek javítani tudják a mikrogrid különböző feszültségminőségi jellemzőit. Irodalomkutatásom során megismerkedtem a háromfázisú inverterek szabályozástechnikájával, ez alapján készítettem el egy forgó referencia szerinti szabályzóval megvalósított modellt. Ezt használtam kiindulási alapként az aszimmetrikus visszatáplálás és a felharmonikus kompenzáció vizsgálatokhoz. Mindkét esetben ígéretes eredmények születtek, mely alapján kijelenthető, hogy az inverter alkalmas és hatékony eszköz lehet a lokális feszültségminőségi jellemzők befolyásolására.

Az aszimmetrikus fogyasztók hatásának kompenzálásakor a modell képes volt teljesen szimmetrikus feszültségviszonyokat kialakítani a csatlakozási pontjánál, ráadásul gyors dinamikájú szabályzó algoritmusának köszönhetően néhány tized másodperc alatt elérte ezt.

Az aktív harmonikus szűrés vizsgálatokhoz a példahálózatot egy erős harmadik harmonikus komponenssel terheltem, ráadásul fázisonként aszimmetrikusan. Az erre kapcsolódó aktív harmonikus szűrővel kiegészített inverter, 10 kW háromfázisú hatásos teljesítmény táplált vissza a hálózatra, emelet pedig képes volt kevesebb mint fél másodperc alatt 2 % alá szorítani a csatlakozási pontnál mérhető feszültség jelalakok teljes harmonikus torzítását (THD).

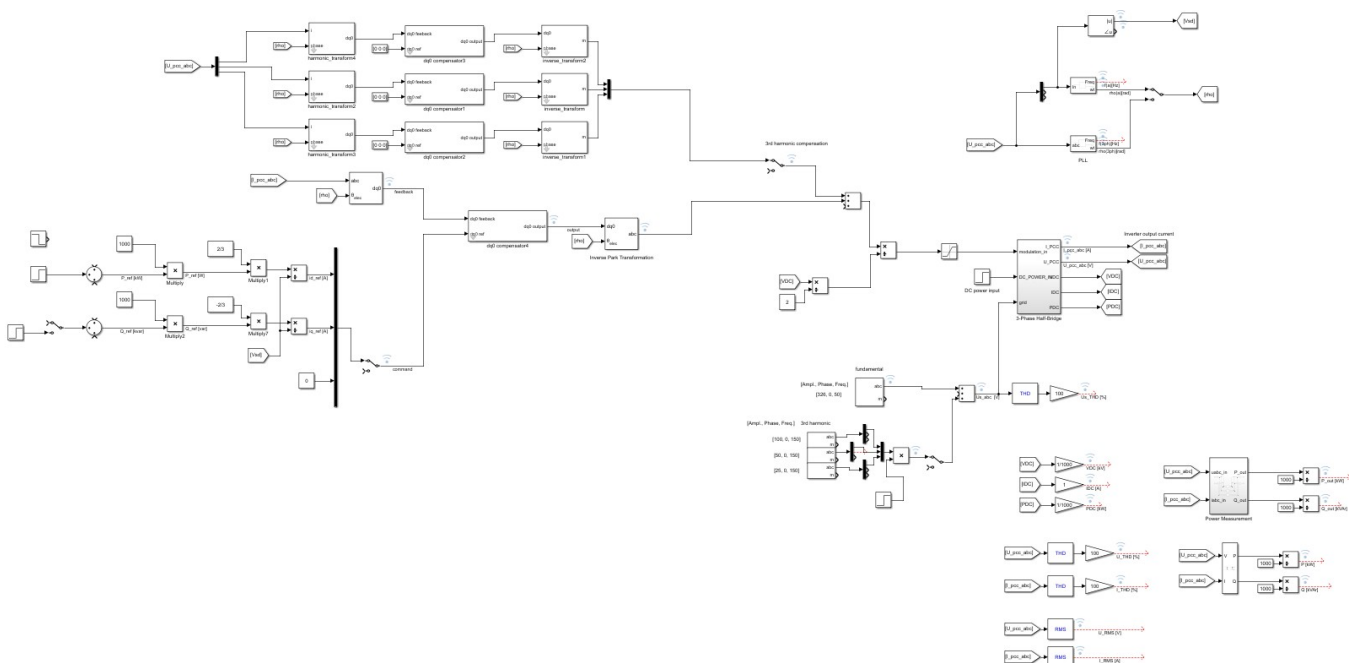
Ezek az eredmények azonban egyelőre azonban csak kutatási célt szolgálnak, hiszen évtizedek telhetnek el, mire a villamosenergia-piac érettsége lehetővé teszi majd, hogy ténylegesen elterjedjen a feszültségminőség javítására alkalmas inverterek a hálózaton.

Bibliográfia

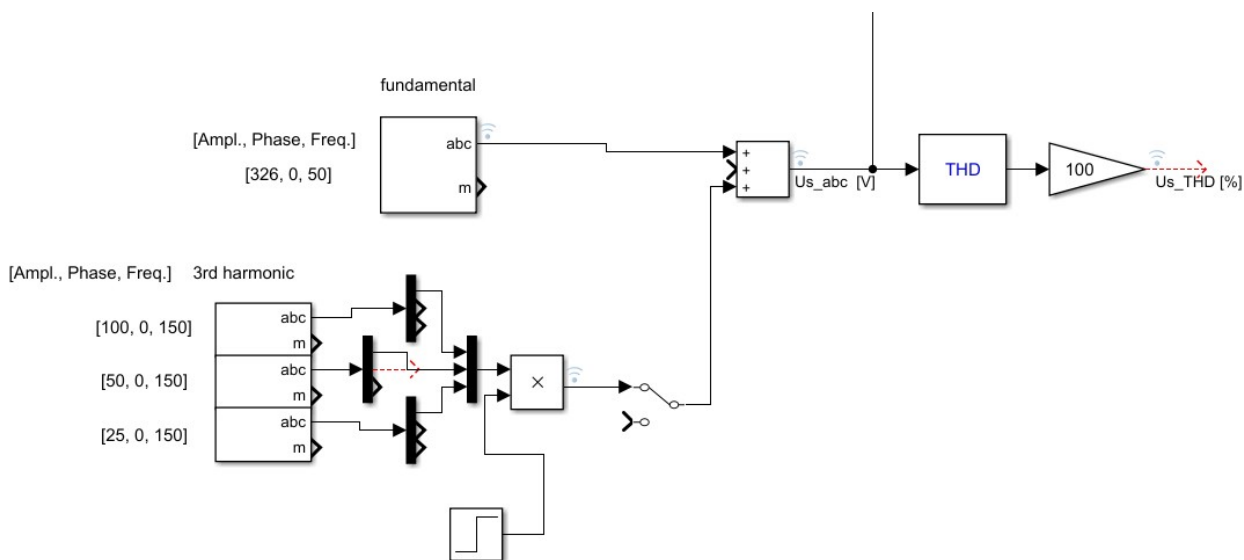
- [1] Joan Rocabert, Alvaro Luna, Frede Blaabjerg, Pedro Rodríguez: *Control of Power Converters in AC Microgrids* (2012)
- [2] Amirnaser Yazdani, Reza Iravani: *Voltage-Sourced Converters in Power Systems* (2010)
- [3] Dung H Pham, Gregory Hunter, Li Li, Jianguo Zhu: *Feedforward decoupling control method in grid-interfaced inverter* (2014)
- [4] Siddalinga S. Nuchhi, Raghavendra B. Sali, Dr. Shekhappa G. Ankaliki: *Effect Of Reactive Power Compensation On Voltage Profile* (2013)
- [5] Claudio Valenzuela, Pablo Vela, José Espinoza: *A reactive power compensation method for a smart grid connected inverter using a residential PV System* (2017)
- [6] Surena Neshvad, Symeon Chatzinotas, Jürgen Sachau: *Online Determination of Grid Impedance Spectrum through Pseudo-Random Excitation of a Pulse Width Modulator* (2014)
- [7] SINTEF Energy Research: *Average model of PWM converter* (2012)
- [8] Imtiaz Ahmed, Mir Zayed Shames, Md. Muksudul Alam: *An Overview of Harmonic Sources in Power System* (2013)
- [9] Julio Barros, Matilde de Apráiz and Ramón I. Diego: *Analysis of second order harmonic voltages in power systems* (2007)
- [10] Xiongfei Wang, Frede Blaabjerg, Weimin Wu: *Modeling and Analysis of Harmonic Stability in an AC Power-Electronics-Based Power System* (2014)

Függelékek

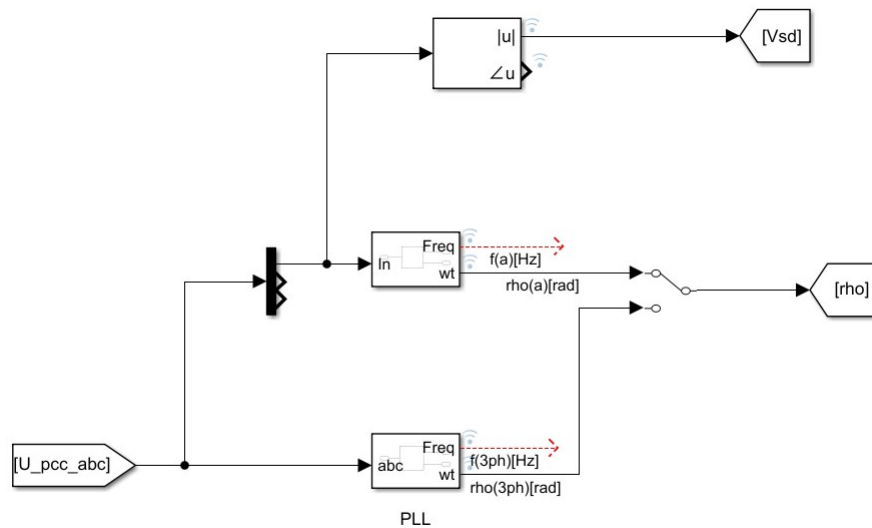
Paraméter neve	Paraméter értéke	Paraméter magyarázata
[P I D]	[0,5 6 0]	A harmadik harmonikus kompenzátorának paraméterei
[P I D]	[0,2 0,1 0]	Az alapharmonikus kompenzátorának paraméterei
[kp ki kd]	[180, 3200, 1]	A pll hurokszűrőjének paraméterei
L	0,00069	A kimeneti RL szűrő induktív tagja
Lf	0,000125	A mögöttes hálózat induktivitása
R	0.005	A kimeneti RL szűrő rezisztív tagja
Rf	0,5	A mögöttes hálózat ellenállása
ron	0,00088	A modellezett félvezetők ellenállása vezető állapotban
Vs	325	Mögöttes hálózat feszültség amplitúdója



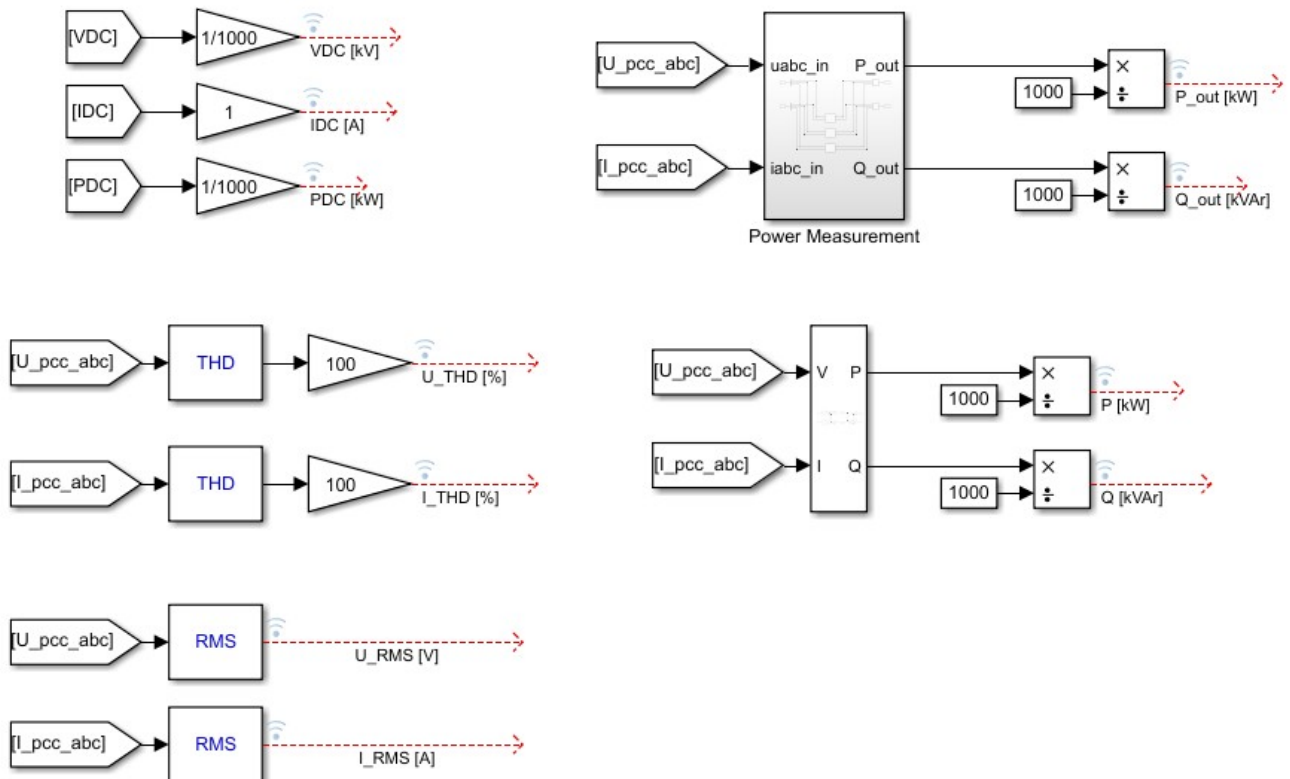
Függelék 1: A modell különböző részegységeinek elhelyezkedése.



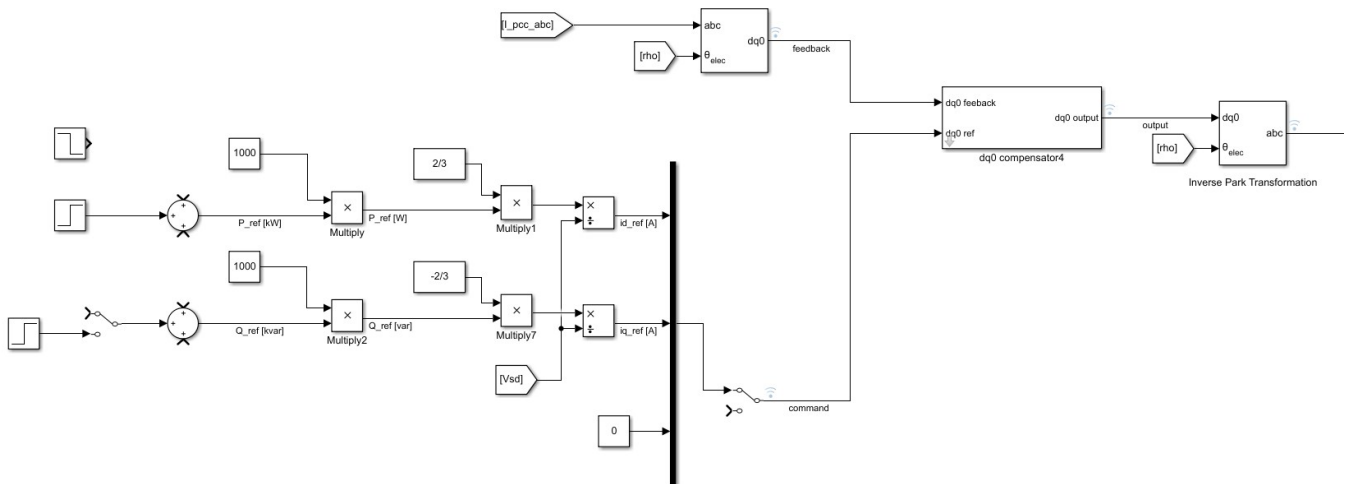
Függelék 2: A mögöttes hálózatot modellező Thevenin forrás feszültségjelét előállító rendszer.



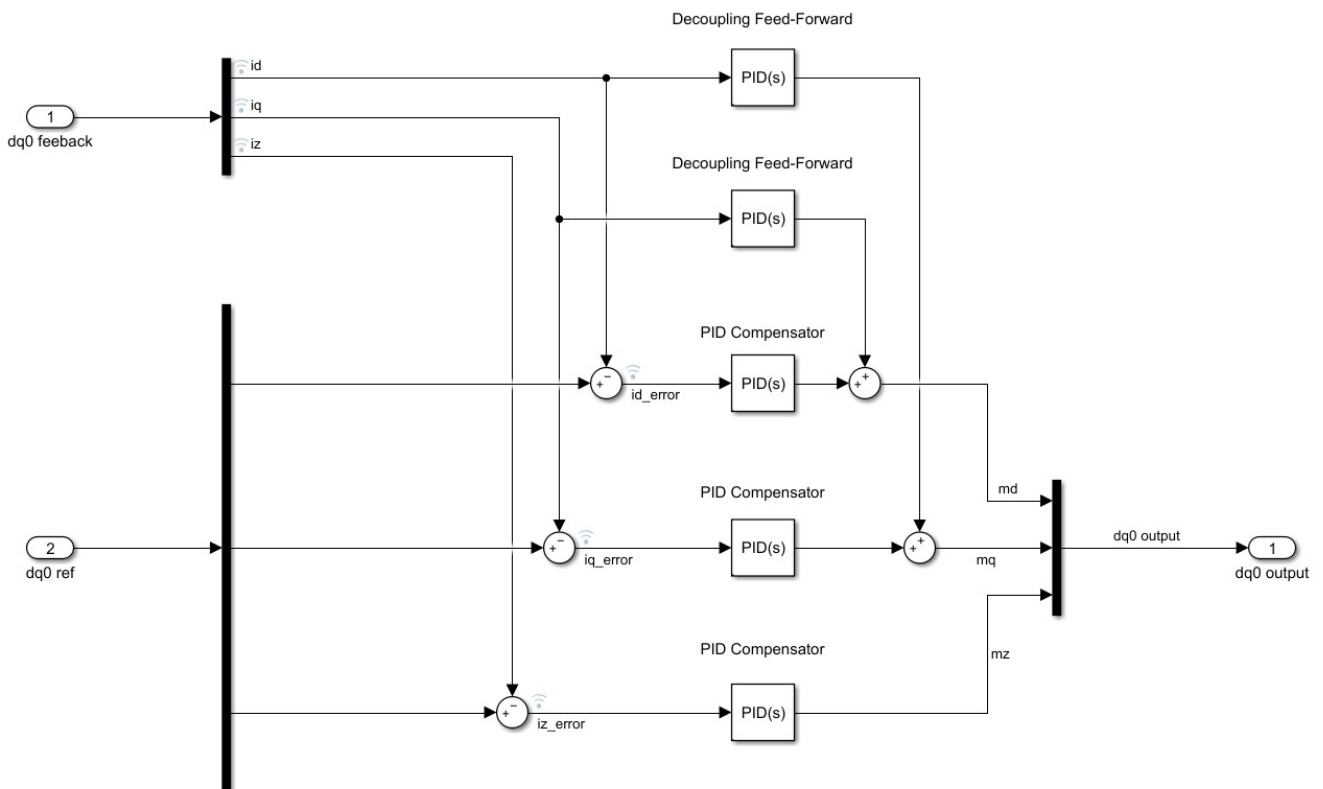
Függelék 3: Az alapharmonikus hálózati szinkronizációt végző PLL háromfázisú és egyfázisú változata.



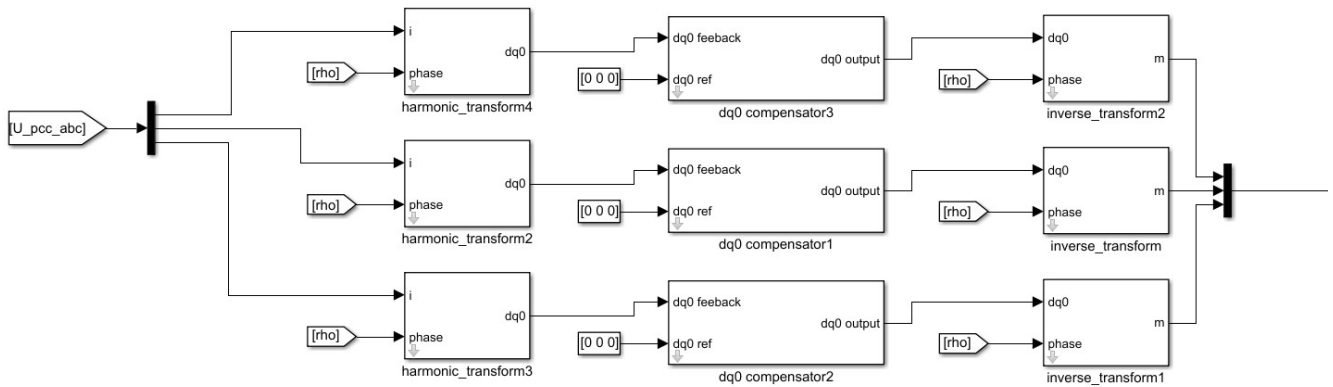
Függelék 4: A Data Inspector-ban vizsgált legfontosabb kimeneti jelek.



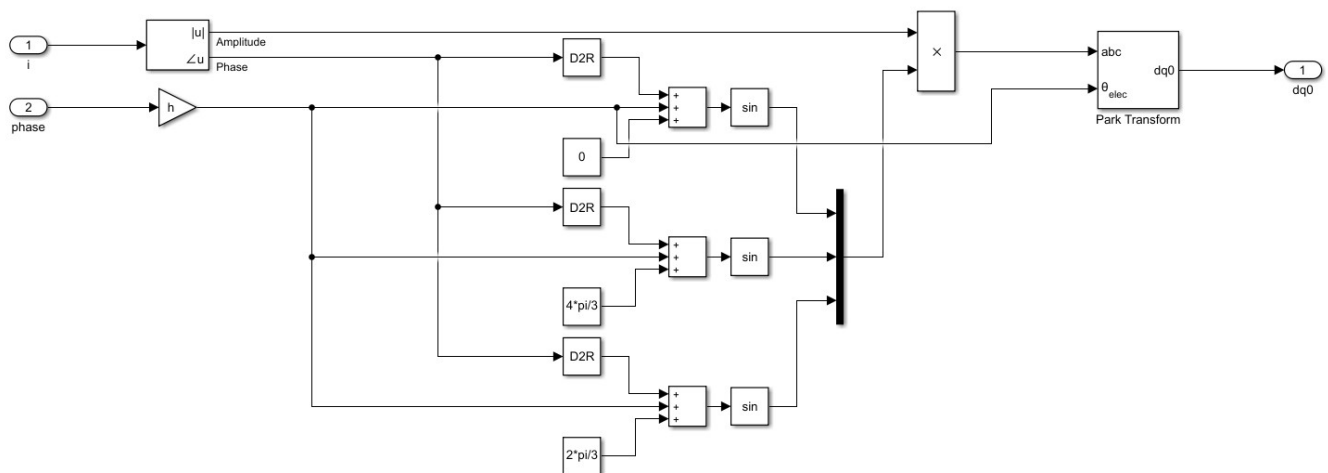
Függelék 5: A teljesítmény alapjelek előállítása és az alapharmonikus kompenzátor felépítése.



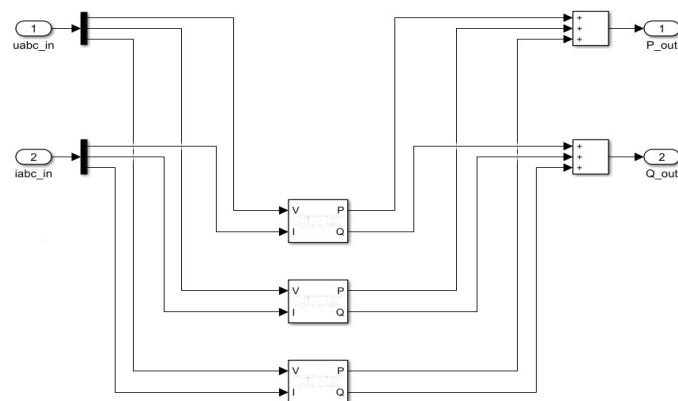
Függelék 6: Az alapharmonikus visszatáplálásra használt decoupling feed-forward szabályzóval kiegészített forgó referencia szerinti kompenzátor felépítése.



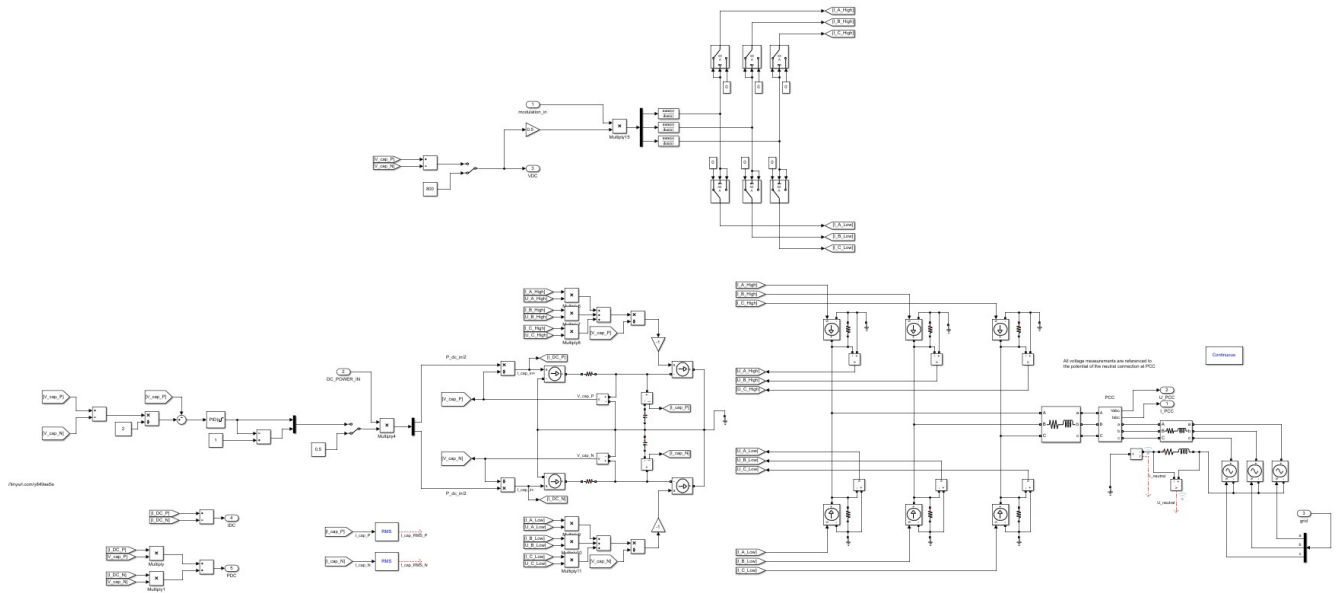
Függelék 7: A harmadik harmonikus komponenst fázisonként kompenzáló szabályzó felépítése.



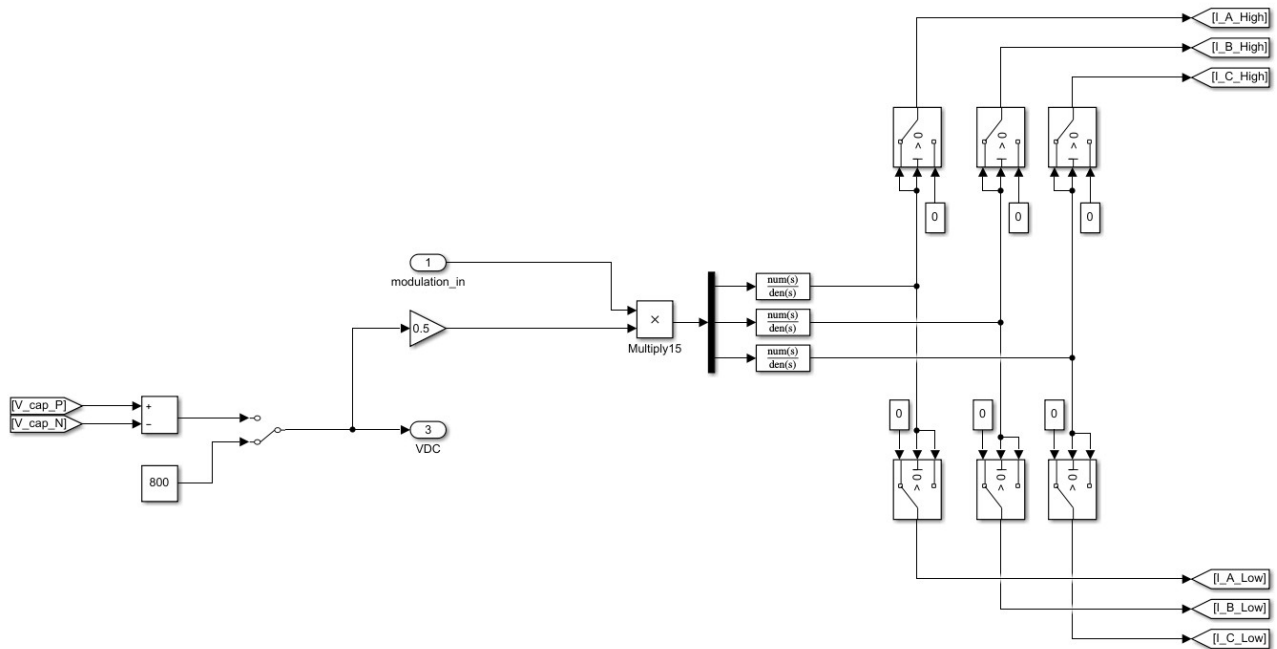
Függelék 8: A harmadik harmonikus komponenst szintetizáló „harmonic_transform” nevű alrendszer.



Függelék 9: Háromfázisú teljesítmény mérését végző rendszer.



Függelék 10: A "3-Phase Half-Bridge" alrendszer felépítése, mely magába foglalja az összes Simscape-es Kirchhoff jellegű hálózati szimulációt.



Függelék 11: A háromfázisú modulációs jelek felbontása gyűjtőjelekre.

