



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Sövény Gergely Máté

# **SPECIÁLIS INVERTER SZABÁLYOZÁSI ELJÁRÁSOK A FESZÜLTSGMINŐSÉG JAVÍTÁSA ÉRDEKÉBEN**

Szakdolgozat

KONZULENS

**Dr. Divényi Dániel**

BUDAPEST, 2020

# 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.

# Abstract

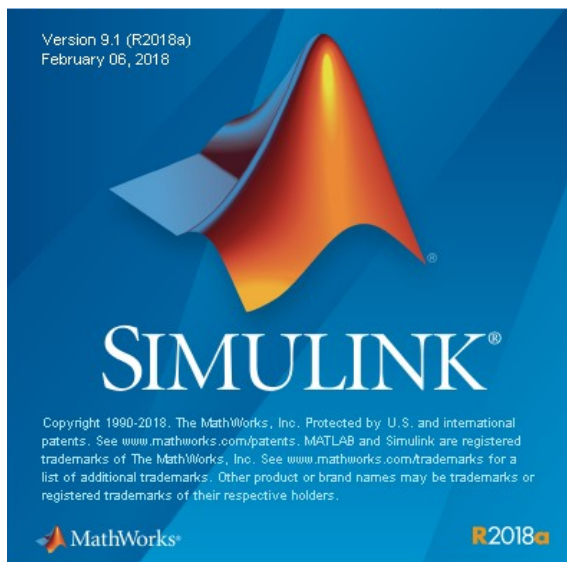
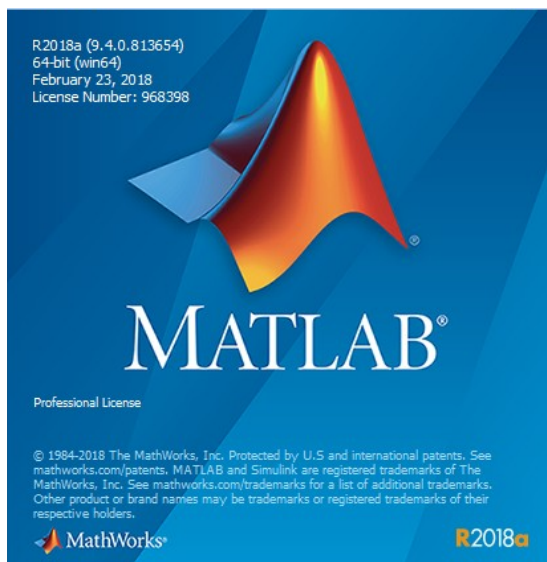
A témám célja, hogy kutassam és bemutassam a háztartási méretű kiserőművek mikrogridhez történő csatlakozásának módjait és lehetőségeit. Napjainkban korszerű, elsősorban fotovoltaikus elosztott termelési egységek inverteren keresztül csatlakoznak a 0.4 kV-os elosztóhálózathoz, jellemzően grid-feeding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

# 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.....	2
Összefoglaló.....	3
Abstract.....	4
Eszközkészlet.....	5
1. Háromfázisú inverter modellje.....	7
A háromfázisú inverter áramköri modellje.....	7
A háromfázisú inverter szabályozástechnikai modellje.....	9
Forgó referencia rendszerben történő szabályozás.....	11
Tranziens viselkedés javítása.....	13
2. Feszültség nagyság szabályozása megosztott termelők segítségével.....	14
Hosszirányú feszültségesés.....	14
Meddő feszültségszabályozás.....	16
3. Feszültség aszimmetria kompenzálása inverterrel.....	19
Feszültségaszimmetria keletkezése.....	19
Aszimmetrikus háromfázisú jelek leírása.....	20
Aszimmetrikus feszültségviszonyok szabályozástechnikai hatása.....	21
Kompenzátor kiválasztása.....	22
Aszimmetrikus alapjelek előállítása.....	23
Kísérlet: Egyfázisú fogyasztó bekapcsolása.....	24
Az aszimmetrikus visszatáplálás DC oldali hatása.....	25
A teljesítményáramlási modellezése.....	27
4. Feszültség harmonikusok aktív szűrése inverterrel.....	30
Harmonikusok forrása.....	30
Harmonikusok rendszáma.....	30
Harmonikusok hatása az elosztott termelőkre.....	32
Periodikus jelek leírása.....	33
Harmonikusok kompenzálása.....	35
A harmonikus komponensek mérése.....	36
Harmonikusok a kiefeszültségű hálózaton.....	37
Forgó referencia értelmezése egyfázisú jelekre.....	37
Nullvezető hatása aszimmetrikus visszatáplálás esetén.....	39
5. Összefoglalás.....	41
Javaslat a fogyasztói és termelői tarifák újragondolására.....	41
Tarifák átszervezése.....	42
Bibliográfia.....	44

# 1. Háromfázisú inverter modellje

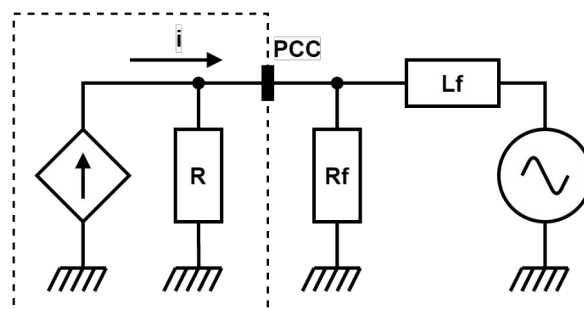
## A háromfázisú inverter áramköri modellje

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.

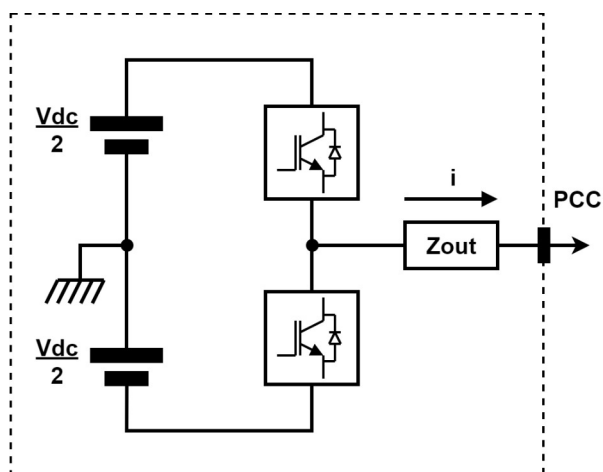


Ábra 1: Áramgenerátoros kimenettel modellezett grid-feeding üzemű inverter elvi kapcsolása

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 teljesítménytranzistorok 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 [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.



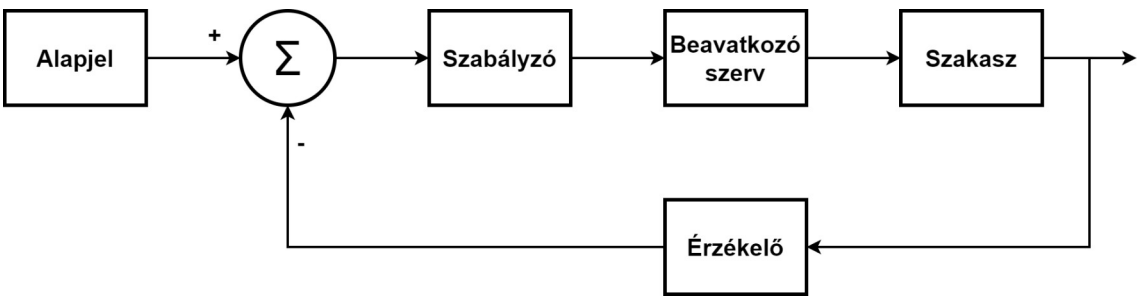
Ábra 2: A grid-feeding üzemű inverter  
gyakorlatban alkalmazott fél-híd kapcsolású  
teljesítmény fokozata.

Az inverter kimenete  $L$  induktív impedancián keresztül csatlakozik a kisfeszültségű hálózathoz, ennek sávkorlátozó hatása hivatott a pulzusszélesség-modulációval hajtott félhíd kapcsolás kétszintű kimenetét folytonos szinuszos jellé alakítani. 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, mely a zárt körű szabályozás során figyelembe kell venni, hiszen a szabályzó egyik visszacsatolt jele maga a csatlakozási pont (PCC) feszültség-idő függvénye.



# 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 folytonos feszültség-idő függvényvel írható le. Célunk a kimeneti impedancián folyó fázisáramok mindenkori 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	Usa(t), Usb(t), Usc(t)	[V]
Hálózatba visszatáplált áramok	ia(t), ib(t), ic(t)	[A]

Alapjel (referenciajel)		
Hálózatba visszatáplálni kívánt hatásos teljesítmény	Pref(t)	[kW]
Hálózatba visszatáplálni kívánt meddő teljesítmény	Qref(t)	[kvar]

Alapjel (származtatott)		
Hálózatba visszatáplálni kívánt fázisáramok	irefa(t), irefb(t), irefc(t)	[A]

Beavatkozó jel		
A félhíd kapcsolóelemeket meghajtó modulációs jelek	ma(t), mb(t), mc(t)	[%]

<b>Módosított jel</b>		
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 megköötések.

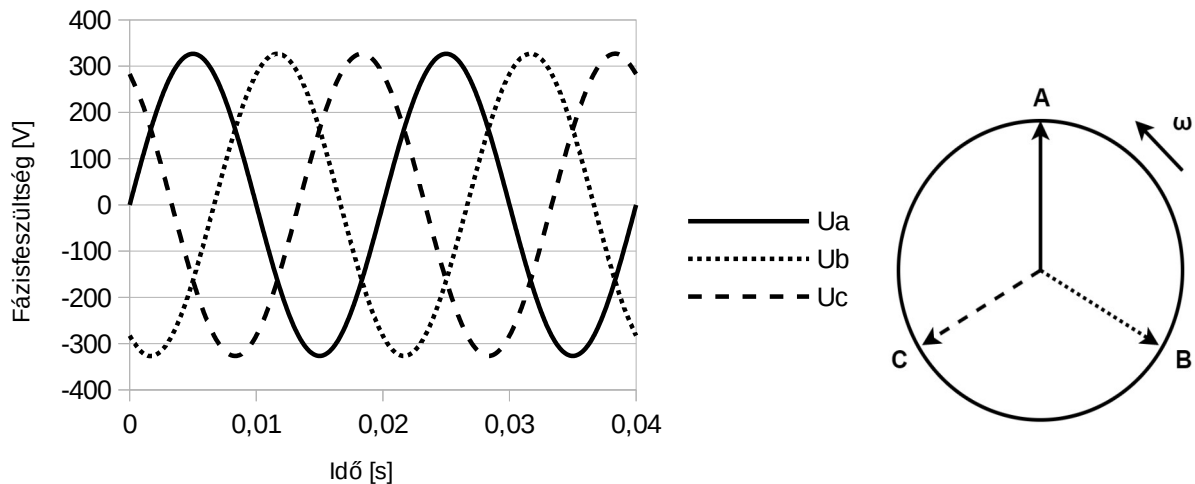
1. A fázisfeszültségek effektív értéke  $U_f = 230 \text{ V} \pm 10\%$  tartományban mozoghat.
2. A hálózati frekvencia  $f = 50 \text{ Hz} \pm 2\%$  tartományban mozoghat.
3. A fázisok  $120^\circ$  fokos szöget zárnak be egymással, szimmetrikus rendszert alkotnak.

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 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. Háromfázisú esetben célravezető és robusztus megoldást ad a forgó referencia szerinti szabályozás.

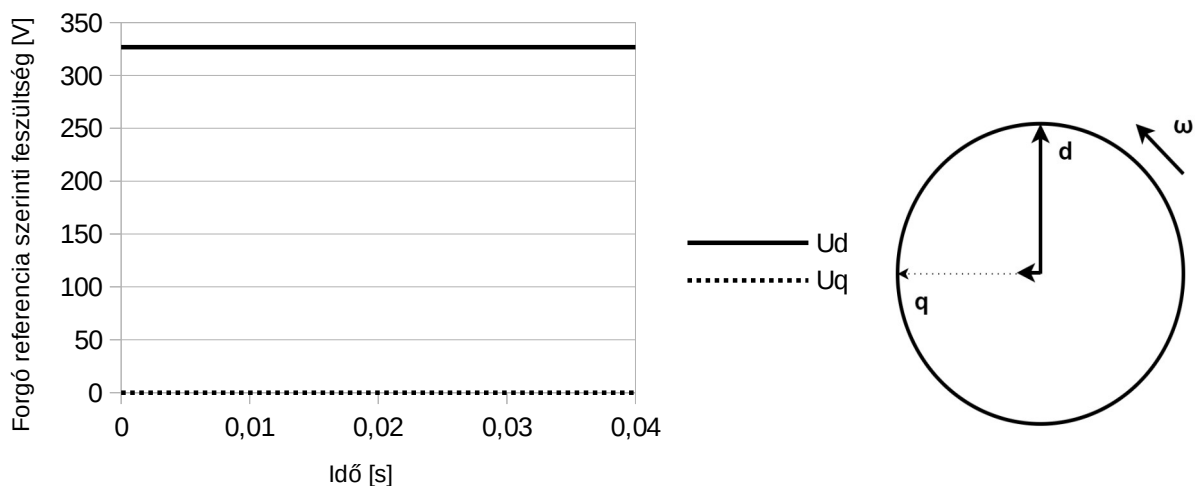
## Forgó referencia rendszerben történő szabályozás

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 fazorábrája.

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.



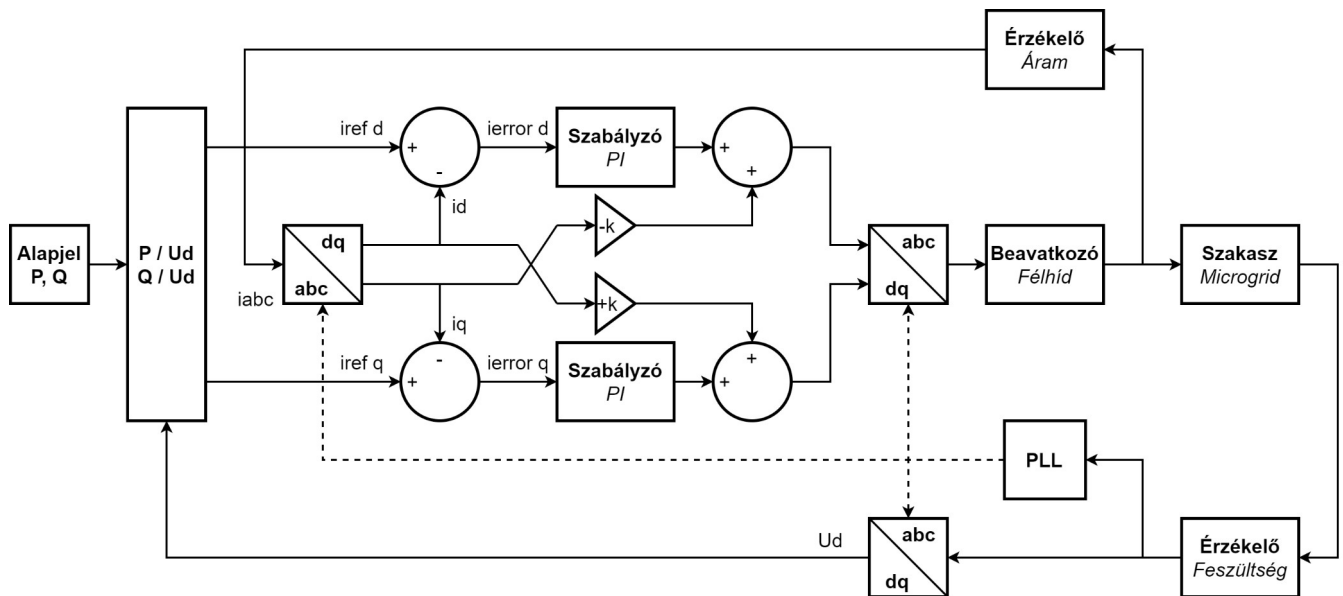
Ábra 5: Háromfázisú szimmetrikus feszültségrendszer forgó dq referencia szerinti leírása. A  $d$  komponens a fázisfeszültségek csúcértékeinek átlaga, míg a  $q$  és  $0$  komponensek szimmetrikus esetben nulla értékűek.

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 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 dq tartományban, ha a PLL lassan változtatja a frekvenciáját. Ezzel szemben okozhat nagyfrekvenciás exponenciálisan csillapodó oszcillációt is gyors dinamikájú PLL esetén [2].

## A szabályzó struktúrája

A szinkronizációt követően megtörténhet a szabályzó alapjeleinek transformálása. 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.



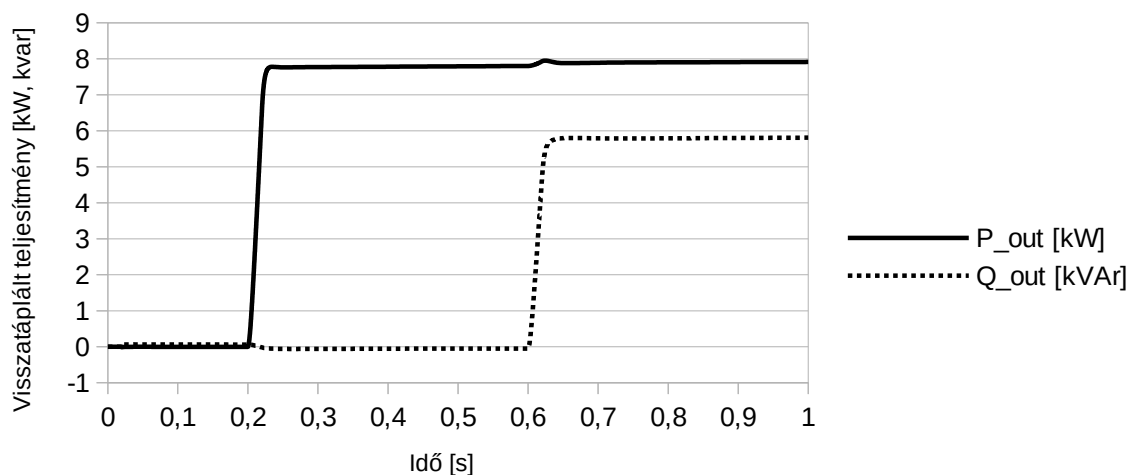
Ábra 6: A hármofázisú inverter modelljének szabályozástechnikai blokkvázlata. A későbbi vizsgálatok alapját ez a modell képezi.

A szabályzó paramétereit a kiindulási modellben 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  $L = 6,9$  mH
- A csatlakozási pont mögöttes impedanciája  $R = 0,5$  Ohm és  $L = 1,25$  mH

## 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 a decoupling feed-forward szabályzó ágak segítségével kompenzálhatóak. 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 ugárs alapjel esetén.

## 2. Feszültség nagyság szabályozása megosztott termelők segítségével

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

Ugyan a kapcsoló üzemi 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 hőszugárzó, hagyományos izzószálas lámpatest, ipari ventilátor vagy egyéb AC motor.

A hálózaton az MSZ EN 50160 szabvány szerint előírt névleges feszültség 321 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 855W és 1155W 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 feszültség-ingadozás, 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 fázisú  $I_m$  meddő áramkomponens a soros induktivitáson okoz feszültségesést [4]. (Induktív fogyasztást feltételezve)

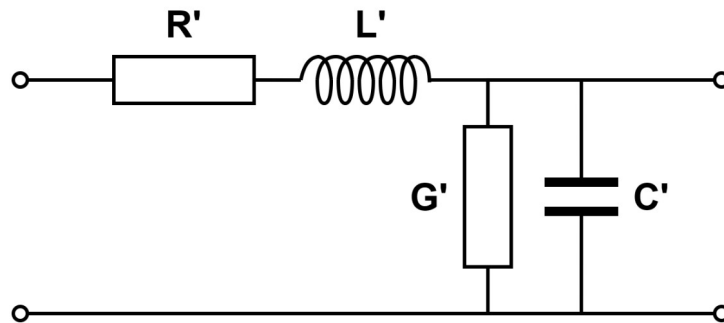
$$\Delta U_h = R * I_w - j \omega * L * I_m$$

*Képlet 1: Hosszirányú feszültségesés képlete. Induktív jellegű áram előjele negatív.*

Jól látható, hogy a csatlakozási pont feszültség nagysága 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.

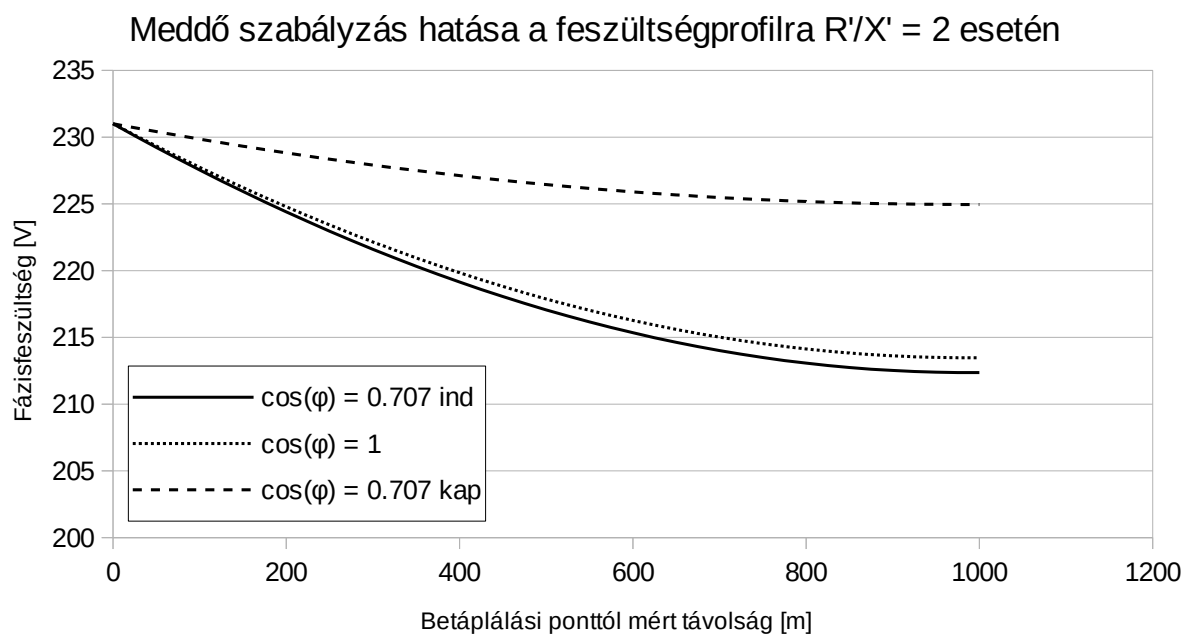
## Meddő feszültségszabályozás

A hálózati mögöttes impedancia jellegétől függően a hatásos és meddő teljesítményviszonyok határozzák meg a feszültségprofilt. A vizsgálatok során az átláthatóság kedvéért elhanyagoljuk a távvezeték  $G'$  és  $C'$  paramétereit. Ez a relatív kis kiterjedésű KiF hálózatrészek esetén nem okoz jelentős hibát, hiszen ilyenkor az  $R'$  és  $L'$  paraméterek dominálnak.



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

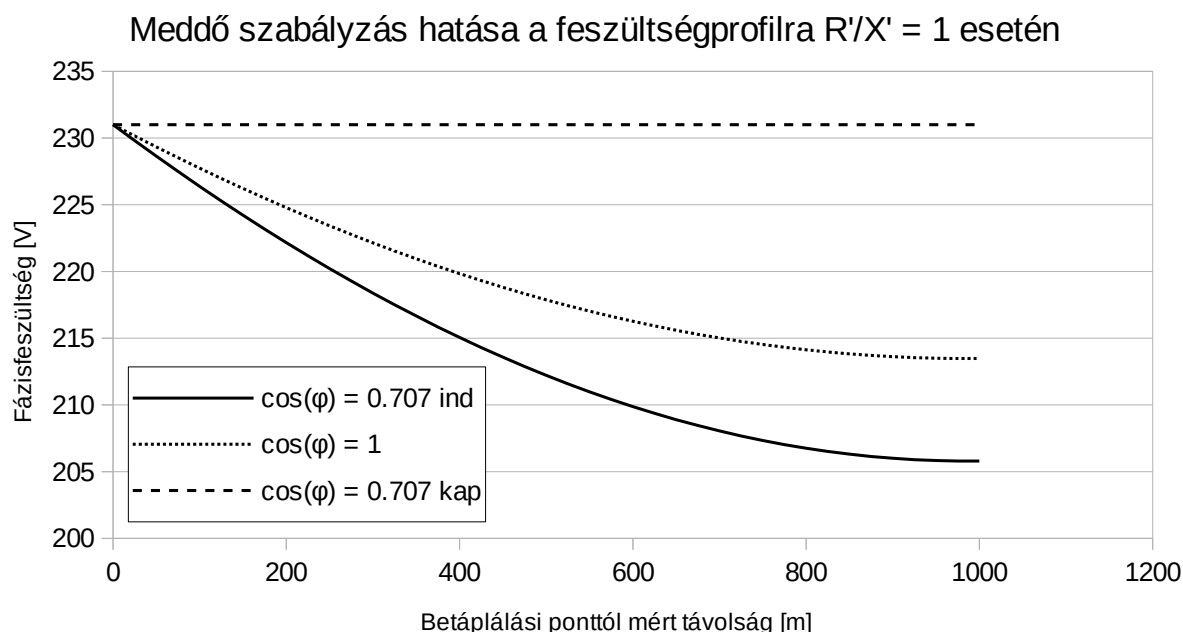
Amennyiben a hálózat impedanciája inkább rezisztív, azaz  $R' > L'$ , akkor jól látható, hogy a meddő áramkomponensek által okozott feszültségesés kis mértékű lesz. Ebben az esetben a hatásos teljesítmény áramlás fogja döntően meghatározni a feszültségviszonyokat, a meddő szabályozás így kevésbé hatásos.



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]. Szükség valamilyen külső parancsra, mely jelzi az invertereknek a hálózat pillanatnyi meddő teljesítmény igényét. A csatlakozási pontnál mérhető hálózati jellemzők alapján is dönthetne úgy az inverter, hogy szükség van meddő visszatáplálásra, ez esetben azonban biztosítani kell azt, hogy a mikrogridre csatlakozott inverterek ne egymás ellen dolgozzanak.

### 3. Feszültség aszimmetria kompenzálása inverterrel

#### Feszültségaszimmetria keletkezése

A háromfázisú kiefeszültségű elosztóhálózaton a fogyasztók nagy része egyfázisú, ezért a hálózaton feszültségaszimmetria alakulhat ki az egyes fázisok között. A helyzetet nehezíti, hogy a kiefeszültségű 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 táplálják rá a zárlatra.

Kiegyenlítettlen fogyasztásból vagy termelésből eredő feszültségaszimmetria azonban kompenzálható háromfázisú inverter segítségével, hiszen a kiefeszültségű 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.

## Aszimmetrikus háromfázisú jelek leírása

A szinuszos jelek álló referencia szerinti időtartománybeli leírása a mérnöki gyakorlatban megszokott módon a következőképpen tehető meg:

$$u_a = A_a * \sin(2\pi f_0 t)$$

$$u_b = A_b * \sin\left(2\pi f_0 t - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$u_c = A_c * \sin\left(2\pi f_0 t + \frac{2}{3}\pi\right)$$

Szimmetrikus szinkron rendszerek leírása esetén azonban a sokkal kézenfekvőbb Park transzformációból levezethető dq0 komponenseket érdemes vizsgálni. A forgóreferencia szerinti leírás nem hordoz többletinformációt, csupán szemléletesebben mutatja az aszimmetria illetve fázishiba jelenlétét.

$$u_d = \frac{2}{3} * \left( u_a * \cos(\theta) + u_b * \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + u_c * \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right)$$

$$u_q = \frac{2}{3} * \left( u_a * \sin(\theta) + u_b * \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + u_c * \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right)$$

$$u_z = \frac{2}{3} * \left( \frac{u_a}{2} + \frac{u_b}{2} + \frac{u_c}{2} \right)$$

$$\theta = \theta(t) = \omega * t + \delta_A$$

Ahol  $\theta$  a forgó és az álló koordináta-rendszer közötti szög,  $\delta_A$  pedig a forgó koordináta-rendszer  $d$  tengelyének a fázissal bezárt szöge.

A  $d$  és  $q$  komponensek kifejtése kissé hosszadalmas, trigonometrikus összefüggéseken keresztül vezethető le, azonban bővebb levezetés nélkül is látszik, hogy jellegre valamilyen  $\sin^2(x)$  alakot követnek, azaz a hálózati frekvencia kétszeresével lengő szinuszos tagra és valamilyen konstans ofszetre bonthatók.

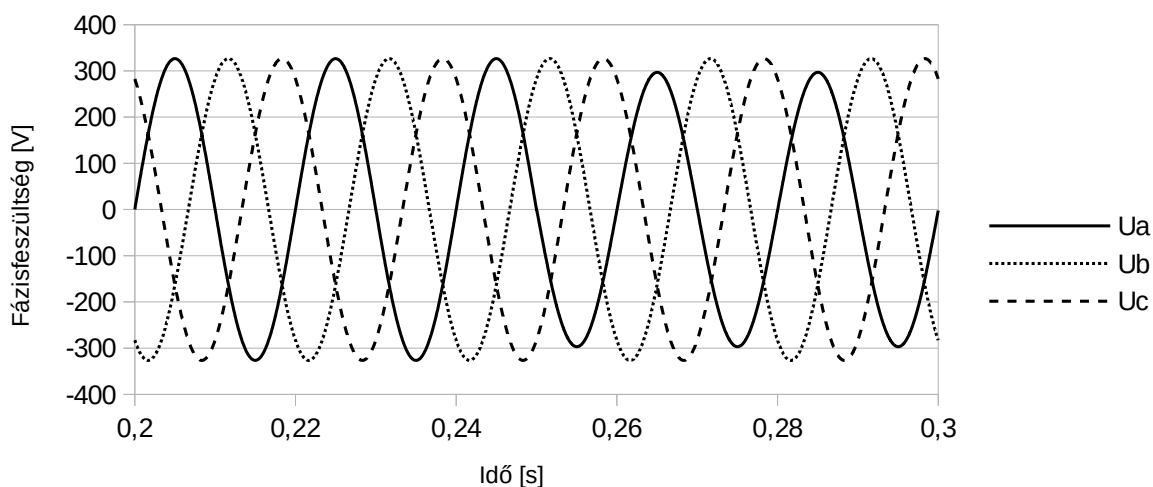
A  $0$  komponens kifejtése egyszerűbb, itt a behelyettesítést követően azonnal látható, hogy a három fázis feszültségét leíró időfüggvény átlaga lesz.

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

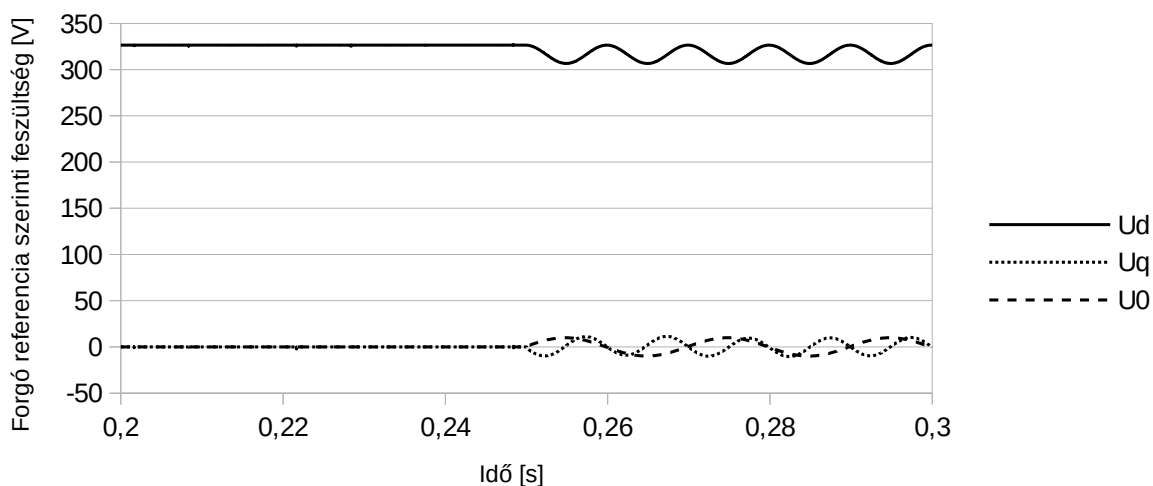
$$u_z = \frac{A_a * \sin(2\pi f_0 t) + A_b * \sin(2\pi f_0 t - 2/3\pi) + A_c * \sin(2\pi f_0 t + 2/3\pi)}{3}$$

Ebből adódik, hogy a  $0$  komponensben csak a hálózati feszültségben jelenlévő frekvenciakomponensek jelenhetnek meg.

Az inverter topológiai felépítése nem változik, szabályozástechnikai szempontból azonban változnak az inverterrel szemben támasztott elvárásaink. Aszimmetrikus esetben a 0 tagban megjelenik egy hálózati frekvenciával azonos körfrekvenciájú szinuszos komponens, míg az d és q komponensekben egyaránt egy-egy kétszeres frekvenciájú lengés jelenik meg. A szabályzó feladata a dq0 tartományban megjelenő lengések követésére gyors dinamikájú követése.



Ábra 11: Fázisfeszültségek alakulása ez egyfázisú fogyasztó bekapcsolását követően.



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

## Kompenzátor hangolása

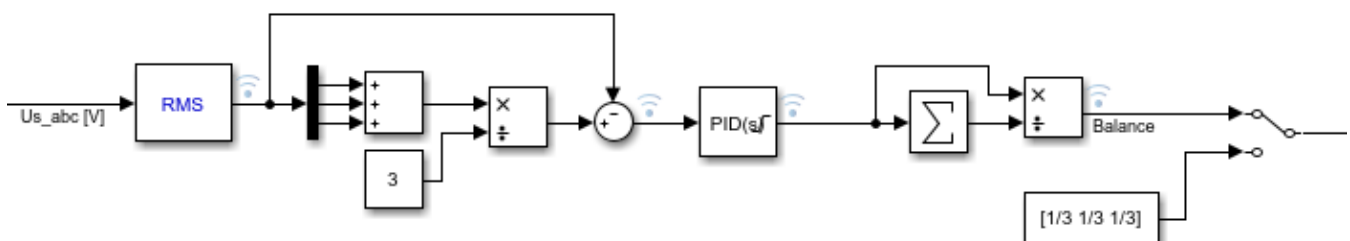
Szimmetrikus hálózati viszonyok mellett dq0 tartományban PI szabályzóval implementált soros kompenzátor jól tudta az ugrást követően a konstans jeleket követni, maradó hiba nélkül megvalósítható volt a dq0 forgó referencia szerinti szabályzás.

Aszimmetrikus hálózati üzemben azonban a PI szabályzó már nem kielégítő, hiszen lassú dinamikája miatt az 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 maradó hiba. Ennek kiküszöbölése rezonáns szabályzó használatával lehetséges, azonban jelen vizsgálatok során megfelelő működést biztosít a PID szabályzó kismértékű aszimmetria esetén.

## 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 referencijeleket most már nem szimmetrikus háromfázisú áramokat kap. Célunk, hogy a kisebb feszültségű fázisba a többihez képest nagyobb áramot, ezáltal nagyobb teljesítményt tápláljunk vissza.

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



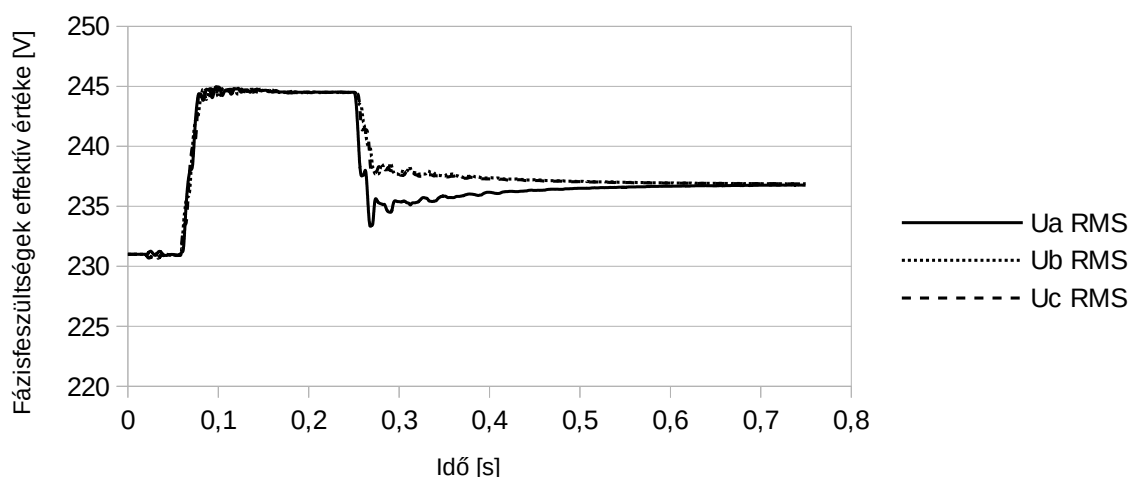
Ábra 13: Az aszimmetrikus alapjelek előállításáért felelős alrendszer implementációja.

Az alrendszer kiszámolja a három fázisfeszültség RMS értékének átlagát, majd amelyik fázisnak nagyobb az átlaghoz képest a feszültsége, annak csökkenti a hatásos teljesítményét, amelyiknek pedig kisebb a feszültsége, annak növeli a teljesítmény alapjelét. A szabályzó egyszerű PI taggal implementálható, fontos azonban hogy a három kimenet összege minden esetben egy legyen, ezzel biztosítva, hogy összesen a három fázis összteljesítménye megegyezik az eredeti háromfázisú teljesítmény alapijellel.

Az előálló három teljesítmény alapjelet a fázisfeszültséggel leosztva megkapjuk a visszatáplálendő áramok amplitúdóját. Ahhoz, hogy ebből háromfázisú áram időfüggvényét kapjunk, szükségünk van egy háromfázisú jelgenerátorra, mely fázishelyesen szinkron jár a hálózattal. A jelforrás kimenetét felszorozzuk a korábban kiszámolt áram amplitúdó értékekkel, és az előálló háromfázisú áramvektort egyszerű dq0 transzformációt követően rácsatolhatjuk a szabályzó alapjel bemenetére.

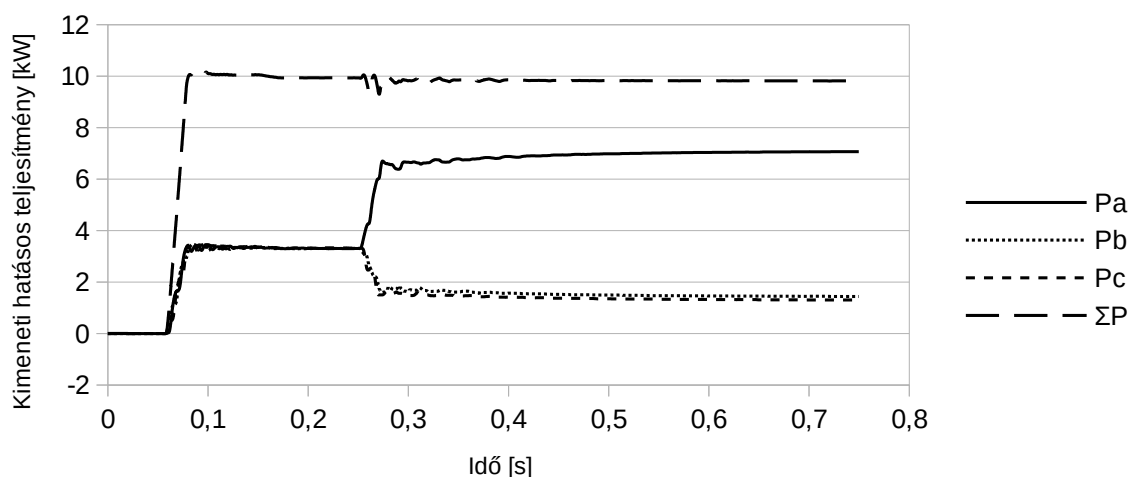
## Egyfázisú fogyasztó bekapcsolása

A következő szimulációban 231 V effektív fázisfeszültségű 1  $\Omega$ -os rezisztív forrásimpedanciával modellezett gyenge kiefeszültségű hálózaton végzünk 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  $\Omega$ -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 14: 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 15: 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.

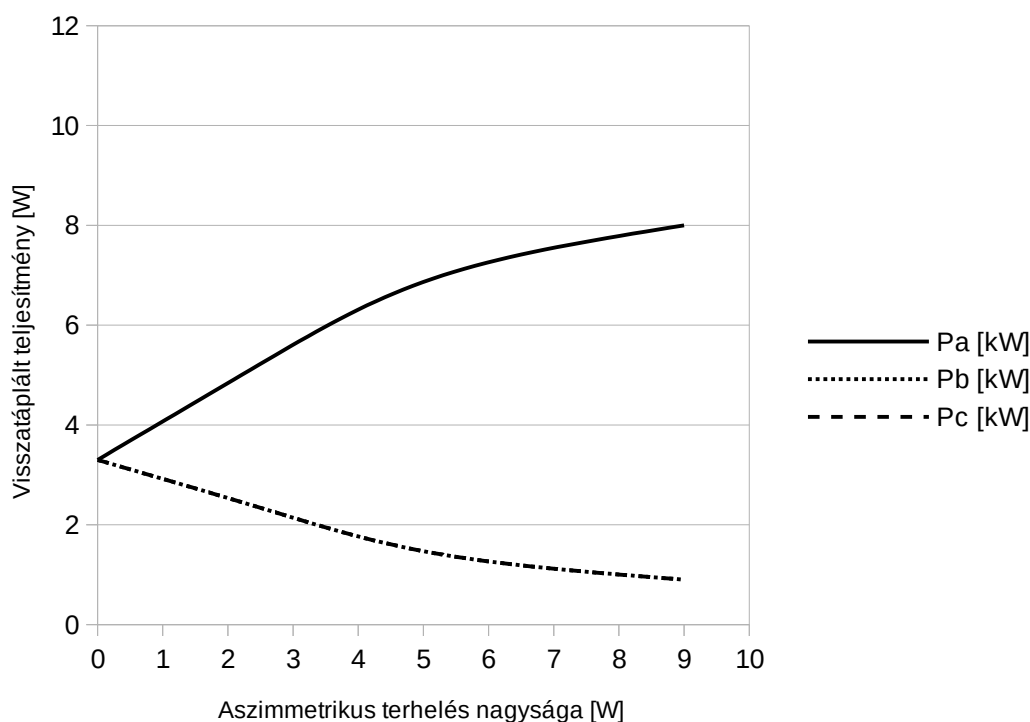
Vegyünk egy mikrogrid hálózatrészt példaként, ahol egyfázisú és háromfázisú invertereken keresztül csatlakozó fotovoltaiikus termelő egyaránt jelen vannak. Egy felhős délutánon a termelők visszatáplálás erősen ingadozhat, néhány másodpercen belül a névleges teljesítmény 25 %-áról 100 %-ra ugorhat a hálózatra 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.

## Az aszimmetrikus visszatáplálás DC oldali hatása

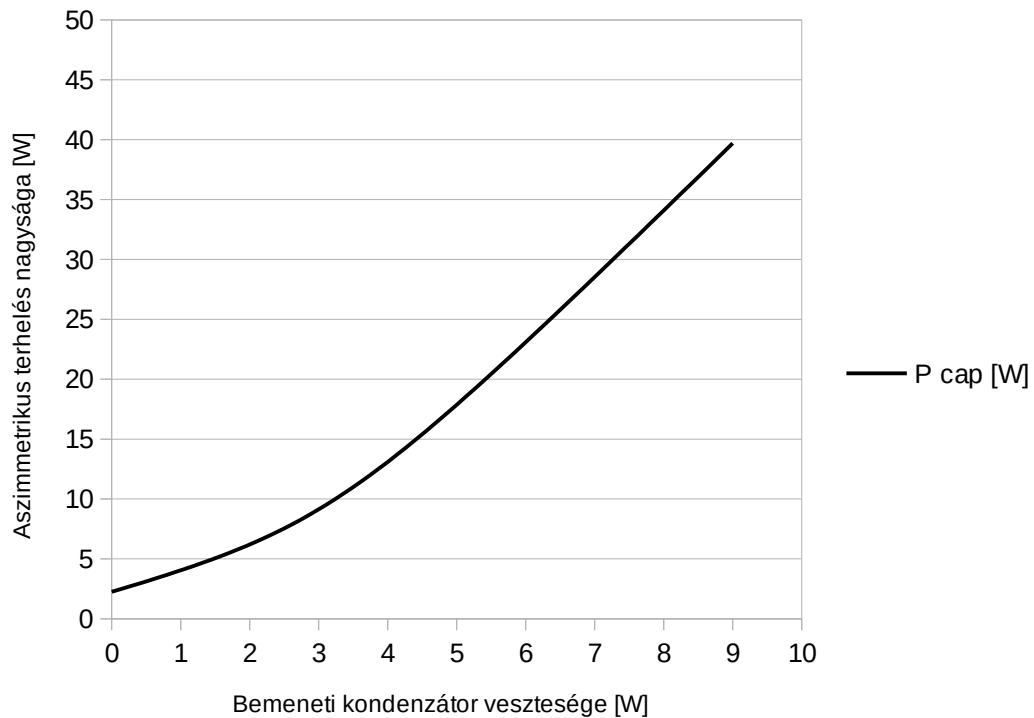
Azt láttuk, hogy a félhíd kapcsolású inverter topológia alkalmas aszimmetrikus visszatáplálásra, azonban méretezési szempontból felül kell vizsgálni korábbi feltevéseinket. Az aszimmetrikus visszatáplálásból eredő, időben lüktető teljesítményáramlás hatására az alkatrészek terhelése növekszik, termikus 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  $ESR = 100...600 \text{ m}\Omega$ , a rajta keletkező wattos veszteség  $P = I_{RMS}^2 * ESR$ .

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]	I <sub>c</sub> 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







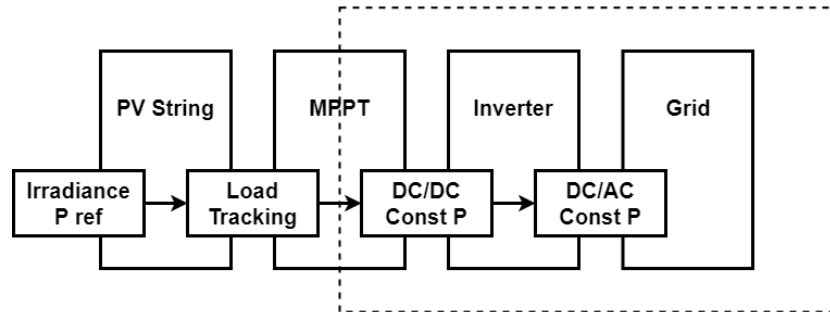
Jól látható, hogy a két DC oldali bemeneti kondenzátorban keletkező 80 W-os hőveszteség nem csak az inverter hatásfokát rontja, hanem az elektrolit kondenzátorok várható élettartamát is csökkentik.

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 a kapacitással fordítottan arányos.

A nagyobb kapacitású kondenzátor nagyobb felületéből adódóan termikus szempontból előnyösebb, a kisebb hőmérséklet emelkedés hosszabb várható élettartamot eredményez. Villamos szempontból fontos megjegyezni, hogy a nagyobb kapacitásnak köszönhetően kisebb lesz a kondenzátor feszültségének hullámossága, ezáltal a félhíd kapcsolások DC bemeneti feszültsége stabilabb lesz, ennek köszönhetően csökken a háromfázisú hálózatba táplált áram felharmonikus tartalma is.

## A teljesítményáramlási modellezése

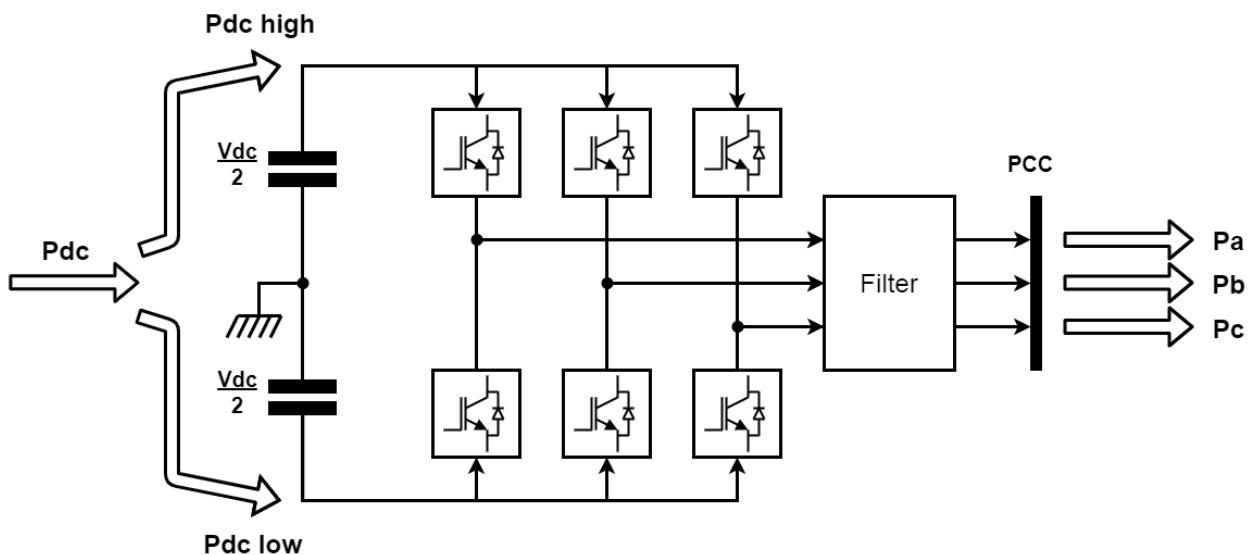
HMKE Inverter célja, hogy a megtermelt energiát AC villamos energiává alakítsa, mely közvetlenül felhasználható vagy értékesíthető. A PV sztringből maximális DC villamos teljesítmény felvételét MPPT vezérlő teszi lehetővé, ezt követően DC-DC átalakítással előállítjuk az inverter fokozat 800 V-os bemeneti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



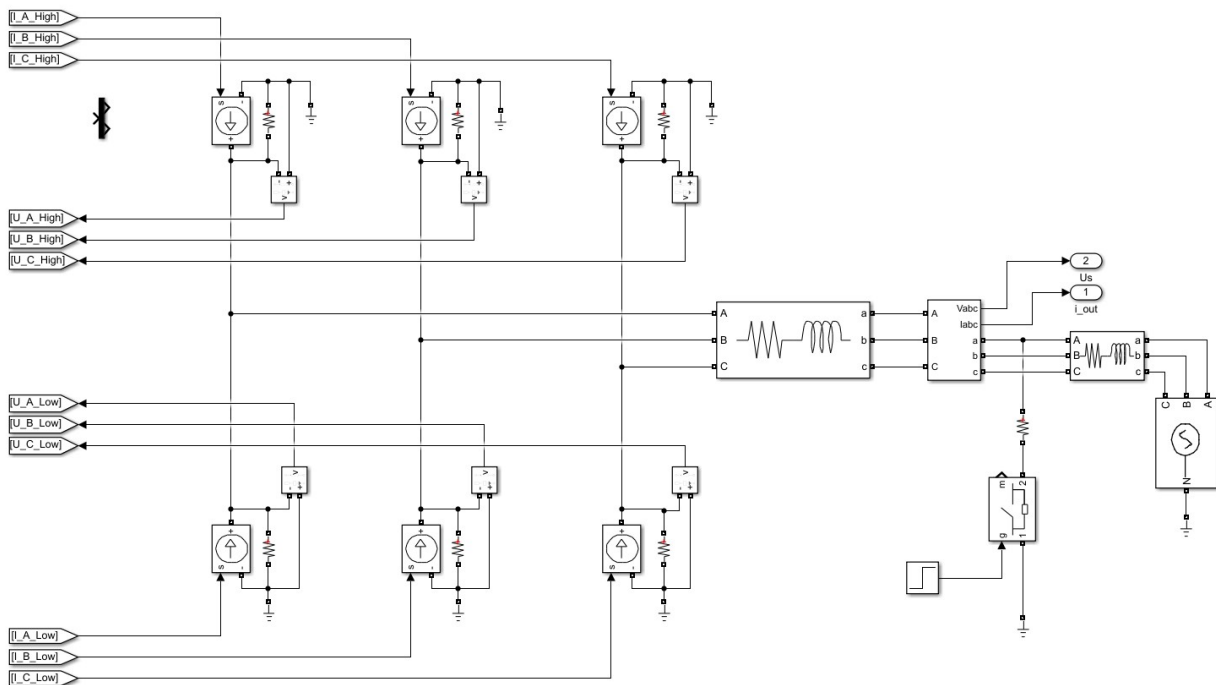
Ábra 16: Tipikus háztartási méretű PV rendszer funkcionális felépítése.

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

$$P_{dc} = P_{dc\ high} + P_{dc\ low} = P_a + P_b + P_c.$$

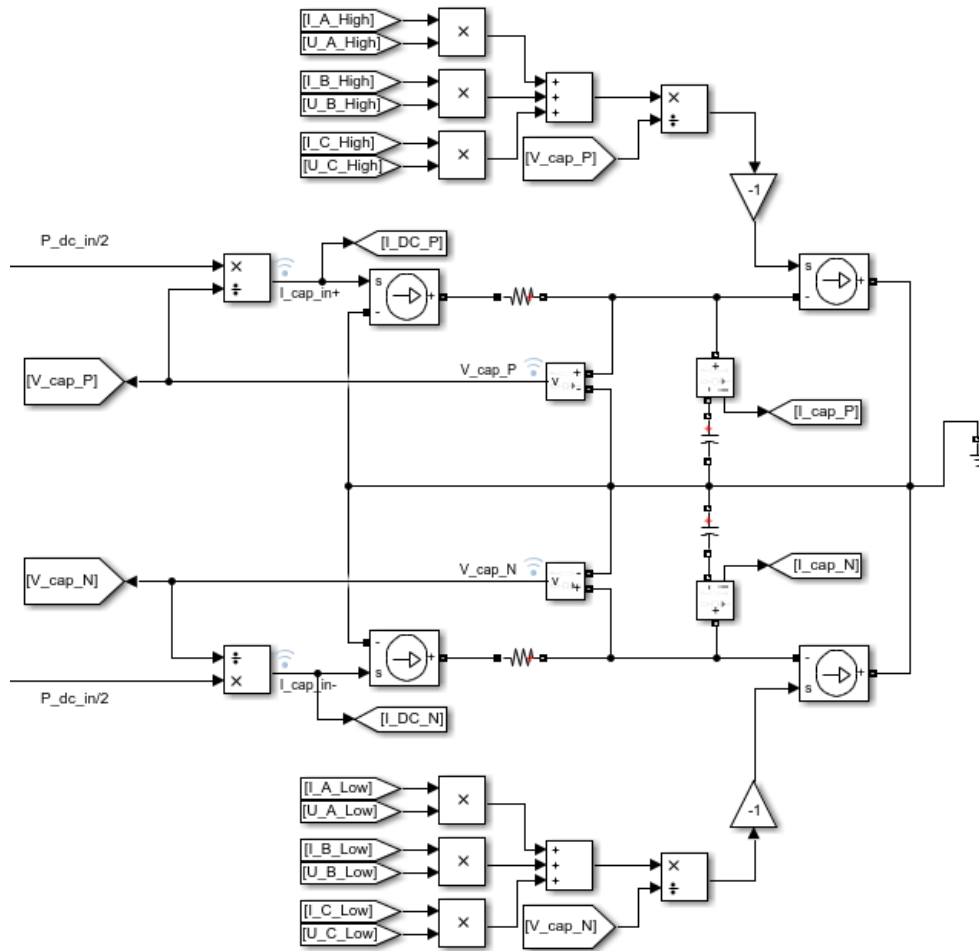


Ábra 17: Teljesítményáramlás az inverterben.



Ábra 18: A háromfázisú félhíd kapcsolás vezérelt áramforrással megvalósított átlagolt modellje.

A  $P(t) = U(t) \cdot I(t)$  egyenlet alapján kiszámítható a hat modellezett félvezető kapcsolóelem pillanatnyi teljesítménye. Ezt a pillanatnyi teljesítményt kell kivenni a DC oldali kondenzátorokból, vagy közvetlenül a DC oldali betáplálásból [6]. A magas oldali három kapcsolóelem teljesítményét a  $C_{DC\_P}$  kondenzátorból, az alacsony oldali három kapcsolóelem teljesítményét pedig a  $C_{DC\_N}$  kondenzátorból.



Ábra 19: A DC bemeneti kondenzátorok töltése és kisütése vezérelt áramforrásokkal megvalósított teljesítményforrással történik.

A DC oldalt áramforrással terheljük, a DC oldali áramkörben ez modellezi a fél-híd kapcsolásokat.

$$I_{Cap\ Pout}(t) = \frac{P_{A\ High}(t) + P_{B\ High}(t) + P_{C\ High}(t)}{U_{Cap\ P}(t)} ; \quad I_{Cap\ Nout}(t) = \frac{P_{A\ Low}(t) + P_{B\ Low}(t) + P_{C\ Low}(t)}{U_{Cap\ N}(t)}$$

Ezzel analóg módon az inverter DC oldali bejövő teljesítménye szintén vezérelt áramforrásként van modellezve, ezzel táplálva a bemeneti kondenzátort, valamint a félhíd kapcsolást.

$$I_{Cap\ Pin}(t) = \frac{P_{DCinP}(t)}{U_{Cap\ P}(t)} ; \quad I_{Cap\ Nin}(t) = \frac{P_{DCinN}(t)}{U_{Cap\ N}(t)}$$

## 4. Feszültség harmonikusok aktív szűrése inverterrel

THD < 8%

### Harmonikusok forrása

A tápfeszültség jelalakjának torzulását nemlináris fogyasztók, valamint az ellátási útban található transzformátorok vasmagjának telítődéséből adódó nemlináris karakterisztika okozza.

- Transzformátorok és forgógépek telítődése
- Villamos hajtások (fázishasítás)
- Világítástechnika (LED, neon fénycső , kompakt fénycső)
- Egyenirányítók
- Kapcsolóüzemű tápegységek

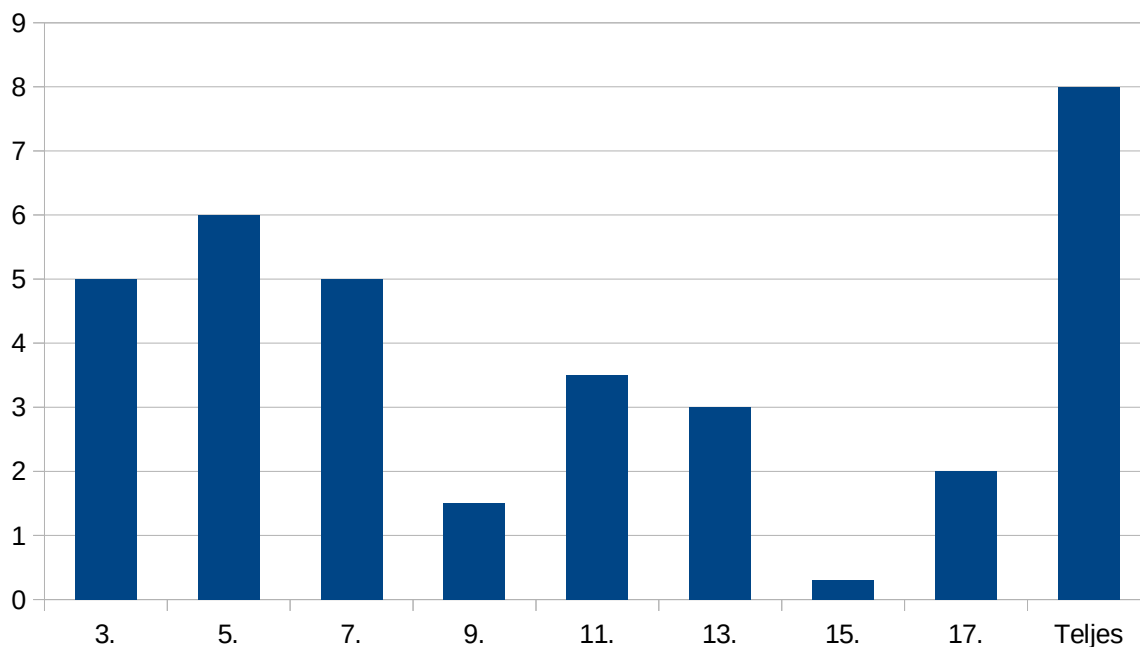
Fontos megjegyezni, hogy ezen hálózati elemek nem feltétlen szimmetrikusan vételeznek a három fázisból (kisfeszültségen jellemzően egyfázisú fogyasztók kapcsolódnak), ezért harmonikus kompenzáció esetén mindenképpen fázisonkénti és harmonikus komponensenkénti kompenzációra van szükség.

Fontos megjegyezni, hogy egyre több olyan eszközt használunk meg nagymértékű harmonikus áramot vételez, gondoljunk számítógép tápegységekre, hagyományos helyett ledes izzókra, stb.

### Harmonikusok rendszáma

A közcélú villamos energia elosztó hálózaton a harmonikusok keletkezése a hálózati elemek és fogyasztók nemlineáris mivoltából következik. Egyaránt megjelennek páros és páratlan rendszámú harmonikusok.

MSZ EN 50160: A tápfeszültség THD értéke (beleértve az összes felharmonikust a 40-es rendszámig) nem lehet 8%-nál nagyobb.



Ábra 20: Páratlan harmonikusok megengedett mértéke az alapharmonikus amplitudójához viszonyítva, százalékban kifejezve.

A gyakorlatban jellemző, bizonyos felharmonikusok dominálnak a hálózaton, ezek esetleges kompenzációja szükséges lehet. Jellemzően a páratlan rendszámú harmonikusok amplitúdója a legnagyobb, ezek maximális értékét a szabvány elő is írja. (EN 61000-3-2)

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

Páros rendszámú felharmonikusok sokkal kevésbé jellemzőek a közcélú elosztóhálózaton, hiszen ezek keletkezéséhez valamilyen fél-periódus jellegű asszimetriára van szükség, pl. Egyenkomponens a transzformátor tápfeszültségében. Hibamentes állapotban a páros rendszámú harmonikusok mértéke elhanyagolható. [7]

Az MSZ EN 50160 ad felső korlátot a páros rendszámú felharmonikusok megengedett mértékére, a szabvány szerint

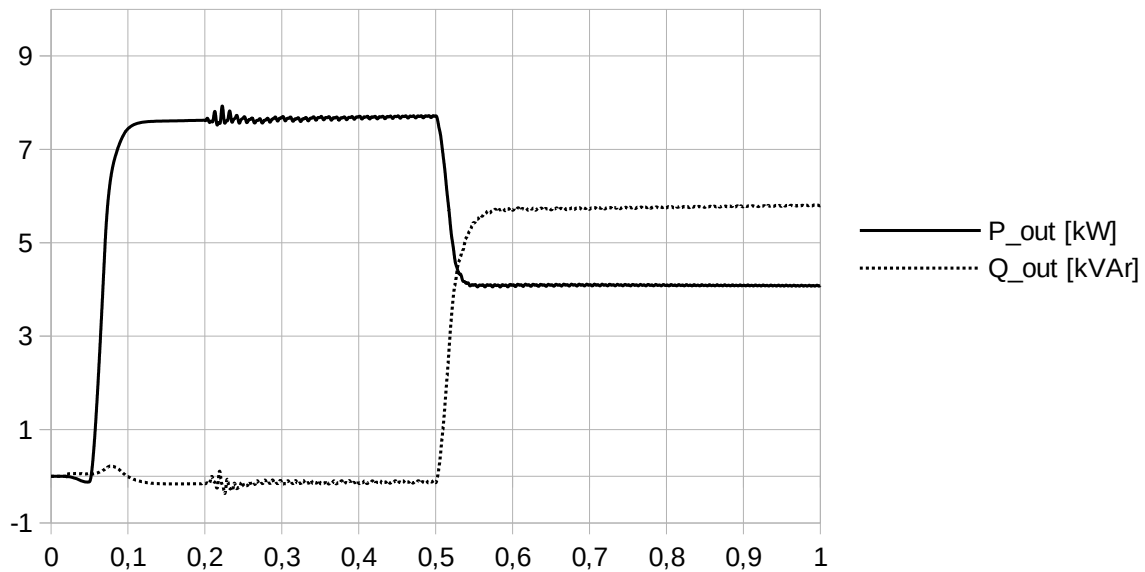
Harmonikus rendszáma	2.	4.	6.-24.
Megengedett feszültség [%]	2	1	0,5

## Harmonikusok hatása az elosztott termelőkre

Egyszerű dq0 szabályzóval vezérelt háromfázisú invererek instabillá válhatnak, ha a csatlakozási ponton nagymértékű feszültségharmonikus mérhető. Ennek oka, hogy a dq0 transzformációt követően az 50 Hz-en szinkron forgó kordinátarendszerben kifejezett d, q, 0 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 megjegyezni, 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 az MSZ EN 50160-ban előírt 8%-os mértéket.

Az inverter hatásos- és meddő teljesítménye



Ábra 21: Harmonikus hatása a kimeneti teljesítményre

További dolgok

## Periodikus jelek leírása

A csatlakozási pont feszültség-idő függvénye ideális esetben egy 231V 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 gyakorlatban a csatlakozási feszültség-idő függvény közvetlenül mérhető mennyiség, a periodikus hiba becslésére a frekvenciatartománybeli jelanalízis eszközei adnak lehetőséget, az aperiodikus hibakomponens pedig a kettő különbségeként állítható elő.

$$U_{PCC} = U_1 + U_{Error}^{Periodic} + U_{Error}^{Aperiodic}$$

$$U_1 = \sin(1 * \omega_0 t + \phi_1)$$

$$U_{Error}^{Periodic} = \sum_{i=1}^{\infty} \sin(i \omega_0 t + \phi_{a,i})$$

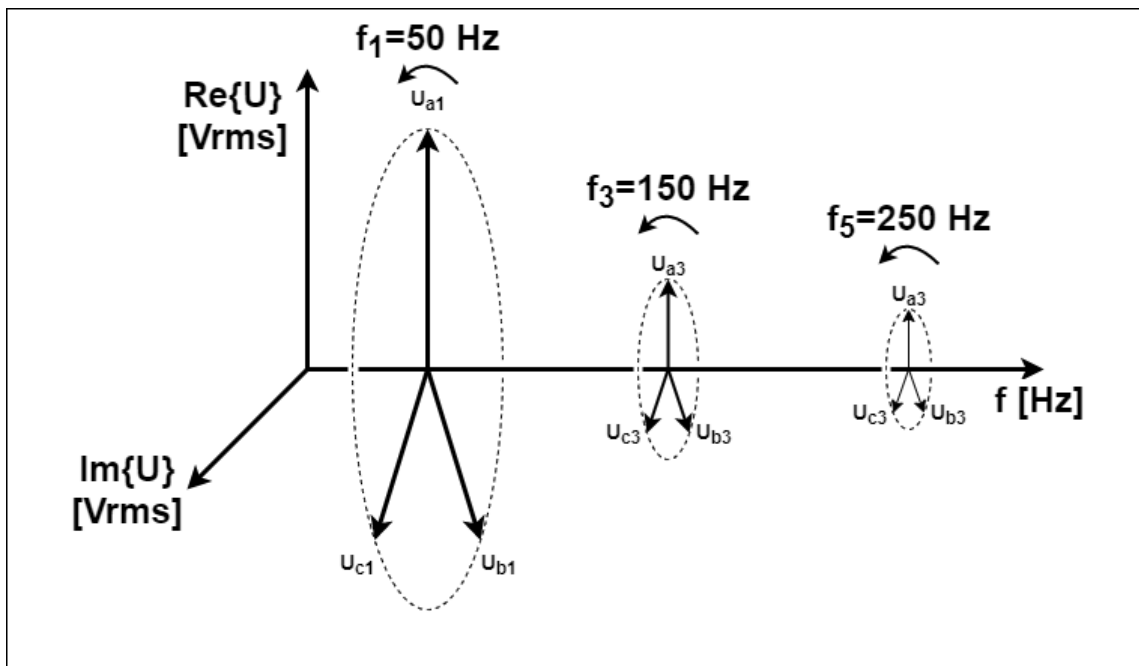
$$U_{Error}^{Aperiodic} = U_{PCC} - U_1 - U_{Error}^{Periodic}$$

Az aperiodikus komponensek lehetnek valamilyen sztochasztikus, zaj jellegű- vagy valamilyen tranzienst okozta jelek. A zaj amplitúdója jellemzően alacsony, nem okoz problémát szabályozási szempontból. Ezzel szemben például egy feszültségletörést észlelni kell és beavatkozást igényel az invertertől, hiszen a jelenlegi szabályozás szerint a kisfeszültségű inverter nem táplálhat rá a hibára, azaz a hibaesemény észlelését követően azonnal le kell csatlakozni a hálózatról.

Normális üzemben az inverter feladata, hogy gyorsan és megbízhatóan meghatározza az alapharmonikus feszültségét és fázisát, a szabályzó algoritmus erre rászinkronizálva állít elő modulációs jeleket, melynek eredményeként fázishelyes szinuszos áramot táplál vissza a hálózatba.

Felharmonikus kompenzálásra alkalmas inverter esetén a feladat azzal bővül, hogy nem csak az alapharmonikusra, hanem a kompenzálni kíván felharmonikusokra is rá kell szinkronizálni a szabályzót. A visszatáplált áram a felharmonikusok esetén a feszültség jelalakkal ellentétes fázisban történik, ezzel elérve, hogy a csatlakozási ponton mérhető harmonikus komponens amplitúdója csökkenjen.



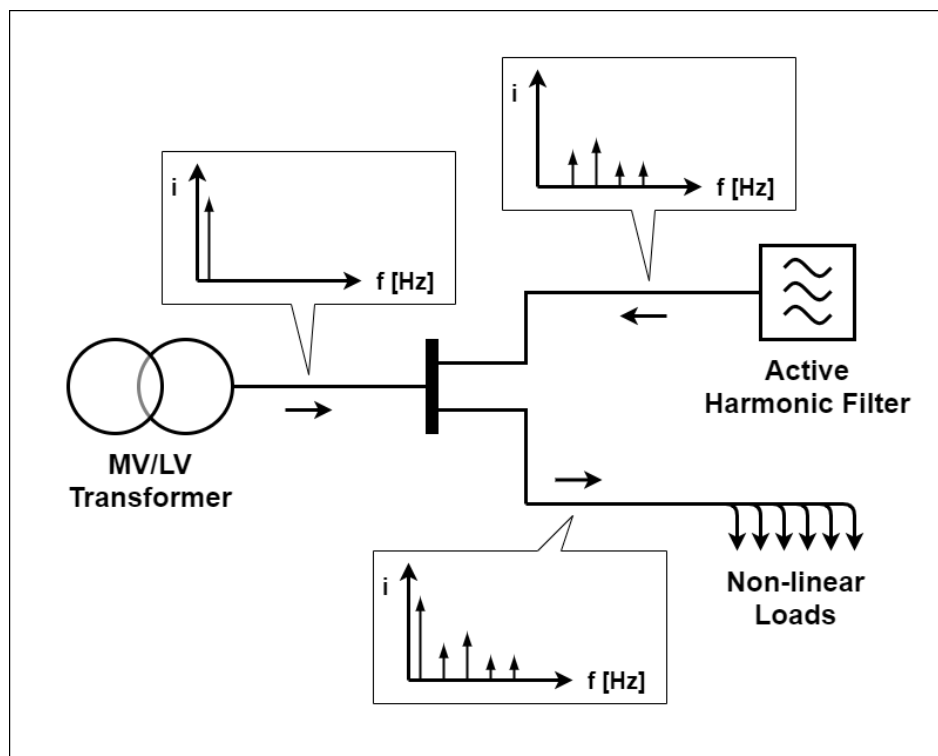


Ábra 22: A háromfázisú csatlakozási pont feszültségének fazoros frekvenciatartománybeli felosztása.

## Harmonikusok kompenzálása

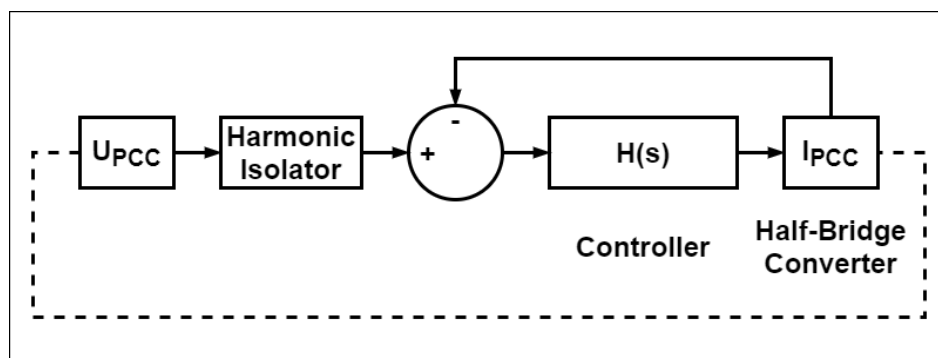
Klasszikusan a hálózaton megjelenő harmonikusokat különböző szűrő áramkörök segítségével lehet csillapítani. Ezek közül a leggyakrabban alkalmazott megoldás a sönt ágba kapcsolt LC rezgőkör. Előnye, hogy egy kiválasztott frekvenciakomponens számára alacsony impedanciás utat biztosít a föld felé, ezzel megakadályozva terjedését. Hátránya azonban, hogy egy LC tag csak egy adott frekvenciakomponens elnyomására alkalmas, így adott esetben több párhuzamosan kapócsolt szűrő ágra van szükség.

Aktív felharmonikus szűrés esetén a rendszer a feszültségharmonikusok mértékéből következtet a felharmonikus áramok nagyságára, és ezekkel azonos nagyságú, ellentétes fázisú áramot táplál vissza a hálózatra.



Ábra 23: Nemlineáris fogyasztók által keltett felharmonikusok kompenzálása aktív harmonikus szűrővel. A sönt ágban csatlakozó szűrőnek köszönhetően a hálózatrész tápoldaláról vizsgálva tisztán lineárisnak látszik a fogyasztó, nem a tepponting nem jutnak el a harmonikus komponensek.

Topológiáját tekintve itt is fél-híd kapcsolású feszültséginverterről van szó, az egyetlen különbség, hogy ebben az esetben a szabályzóalgorithmus feladata, hogy a mintavételezett és mért feszültség-idő függvényből megállapítsa az egyes harmonikus komponensek nagyságát és az alapharmonikushoz képest mért fázisát. Ezt követően történik a dq0 tartománybeli szabályzás és állnak elő a beavatkozójelek, melyek hajtják a félvezető fél-híd kapcsolást.



Ábra 24: Aktív harmonikus szűrő funkcionális blokkvázata.

Fontos, hogy valós időben, minimális késleltetéssel rendelkezésre álljon az adott harmonikus komponensek amplitúdónagysága és fázisszöge. Késleltetés holtidőt visz a rendszerbe, ezáltal rontja a szabályzó dinamikáját, szélsőséges esetben instabillá válhat a rendszer.

## A harmonikus komponensek mérése

A frekvenciakomponensek amplitúdójának és fázisának gyors és pontos meghatározása szükséges a szűrő működéséhez. Egy periódusnyi mozgó ablakos mintavételezés segítségével minden időpillanatban az előző 20 ms-os ablakon kell elvégezni a Fourier transzformációt. Eredményként megkapjuk az adott komponens amplitúdó-időfüggvényét és fázis-idő függvényét. Szinuszos állanósult állapotban ezek a függvények időben konstans értékűek, a valóságban azonban számunkra kell rövid idejű tranziensekkel és aperiodikus zavarjelekkel. A transzformáció adott időablakból dolgozik, nem képes ezeket a zavarjeleket megkülönböztetni a ténylegesen periodikus komponensektől, ezért célszerű a transzformáció kimeneteként kapott komplex amplitúdó függvényt mozgóablakosan átlagolni.

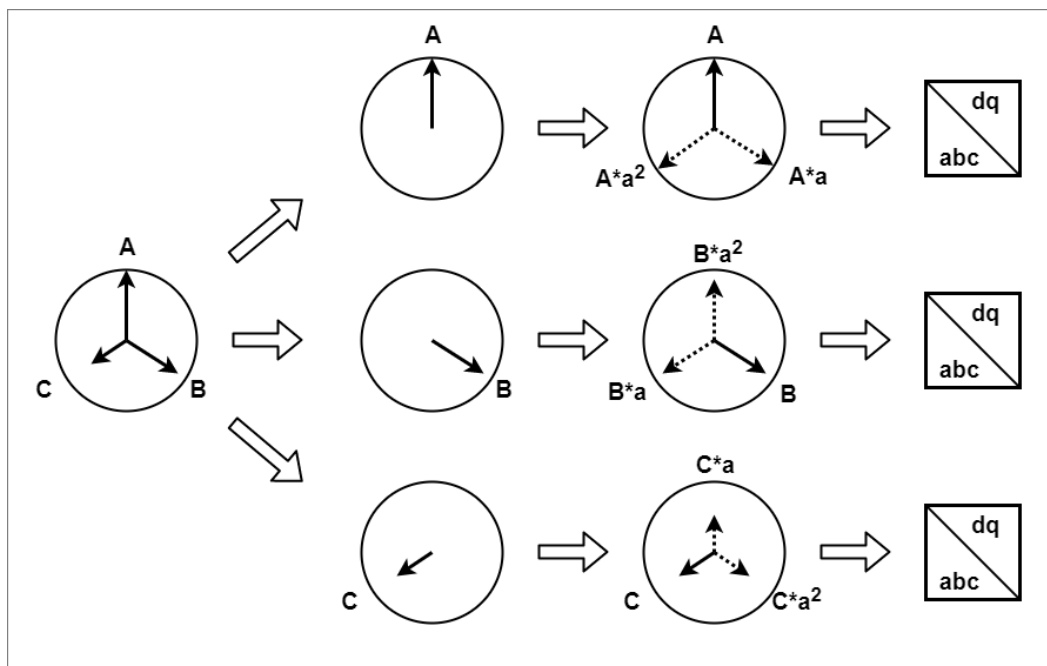
## Harmonikusok a kisfeszültségű hálózaton

A közcélú kisfeszültségű hálózatra nagyon sok egyfázisú fogyasztó kapcsolódik, így a háromfázisú feszültség-szimmetria nem feltétlenül teljesül. Az 50 Hz-es alapharmonikus feszültség és áramok vizsgálata esetén támaszkodhatunk statisztikai módszerekre, mely alapján a fogyasztás nagyjából egyenlően oszlik meg a fázisok között, hiszen az egyes fázisokra kapcsolt fogyasztók jellege és száma közel azonos. A felharmonikusok esetén azonban sokkal nagyobb bizonytalansággal kell számolnunk, hiszen semmi nem garantálja azt, hogy azonos típusú és mennyiségű fogyasztó lesz bekapcsolva minden fázisban egy adott időpillanatban. Egy irodaépület légkondicionálás egymagában okozhat 100-200% harmonikus torzítást az áram jelalakban, mely a táppont teljesítményétől függően okozhat akár 5-10%-os THD értéket a feszültség jelalakban.

## Forgó referencia értelmezése egyfázisú jelekre

Aszimmetrikus esetben a Park-transzformáció eredményeként kapott dq0 komponensek nem állandó értékűek, így a forgó referenciarendszer elveszti szabályozástechnikai előnyét, hiszen már nem állandó értékű jelek követése a feladat.

Ennek feloldása érdekében bevezetjük az egy fázisú dq0 transzformációt, mely a komplexamplitudóval értelmezett fázismennyiséget kiterjeszti háromfázisú szimmetrikus vektorrendszerre és ezt követően már elvégezhető a transzformáció, és a dq0 referencia szerinti szabályozás.



Ábra 25: Aszimmetrikus háromfázisú vektorrendszer fázisonkénti dq0 transzformációja.

Az inverz transzformációt követően előálló modulációs jeleket fázisonként szummázzuk és így áll elő a félhíd kapcsolás vezérlése.

$$a = e^{j\frac{-2}{3}\pi}$$

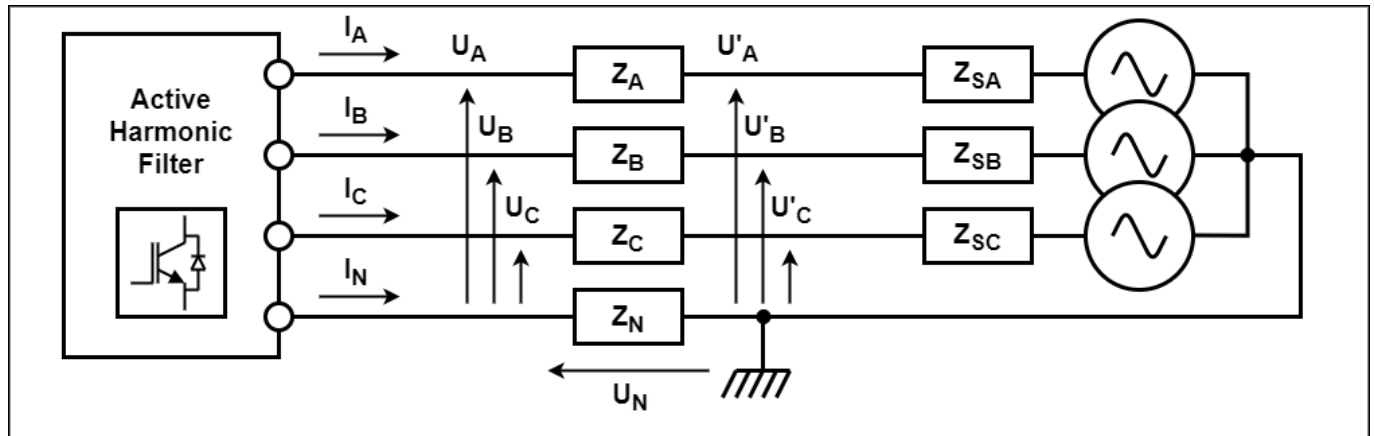
$$a^2 = e^{j\frac{2}{3}\pi}$$

$$a^3 = 1$$

*Képlet 1: A 120°-os és 240°-os forgatáshoz  
használt a és a<sup>2</sup> komplex segédváltozók  
definíciója.*

## Nullvezető hatása aszimmetrikus visszatáplálás esetén

Kisfeszültségű csatlakozási pontok jellemzően TN rendszerűek, azaz a KöF/KiF transzformátor szekunder oldalának csillagpontja közvetlenül földelt, ide csatlakoznak az N és PE vezetők. Korszerű kisfeszültségű hálózaton a három vázisvezető, a nullvezető és a védővezető keresztmetszete megegyezik, ebből adódóan a hosszegységre eső ellenállásuk és induktivitásuk is azonos lesz.

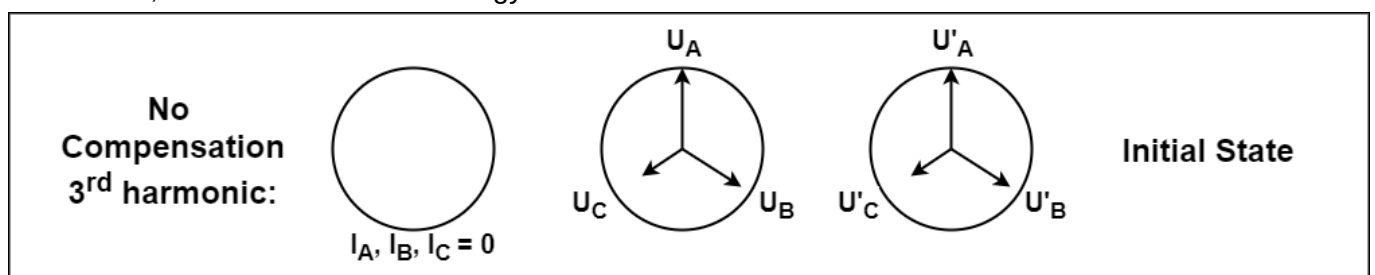


Lineáris rendszerről van szó, tehát használható a szuperpozíció módszere az vizsgálatkor. Az invertert csillagba kapcsolt háromfázisú vezérelt áramforrásként modellezzük, az áramforrások közös pontja a nullvezetőhöz kapcsolódik. A mögöttes hálózatot hármfázisú Thevenin helyettesítő képpel modellezzük.

Amikor aszimmetrikus áramot talál vissza az inverter az egyik fázisba, akkor az áram útja a nulvezetőn keresztül zárul, hiszen ha a modellben dezaktivizáljuk az összes forrást, azaz az áramforrásokat szakadással, a feszültségforrásokat pedig rövidzárral helyettesítjük, akkor azonnal látszik, hogy az áramkör egyetlen hurokra egyszerűsödik.

A  $Z_N$  impedancián folyó áram  $U_N = -I_N \cdot Z_N$  feszültségemelkedést okoz, azaz az aszimmetrikus áram hatására a PCC-nél mérhető fázisfeszültségek mind megváltoznak, az árammal táplált fázis feszültsége nő, míg a másik kettő csökken, a csillagpont feszültségének emelkedése (feszorábrát tekintve eltolódása) figyelhető meg.

A  $Z_A$ ,  $Z_B$ ,  $Z_C$  és  $Z_N$  impedanciák egy hosszú vezeték impedanciáját reprezentálják, mely összeköti az invertert a feszültségforrással modellezett KöF/KiF transzformátorral. Amennyiben szétbontjuk ezeket a koncentrált paramétereket, és a vezeték egyes vezetékszakaszait 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.





## 5. Összefoglalás

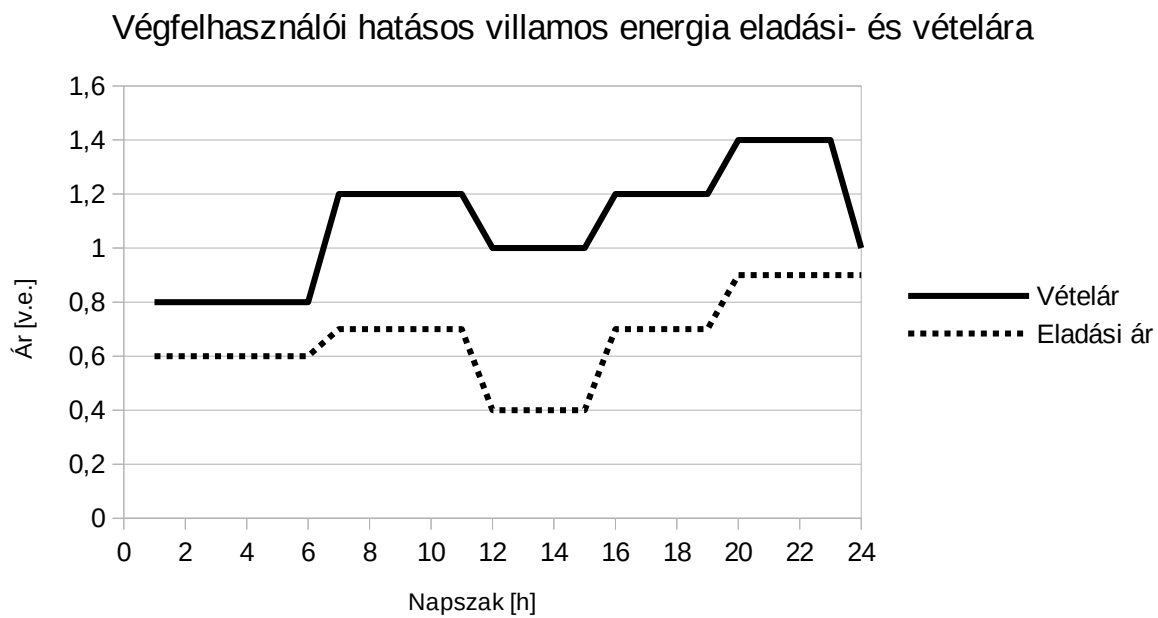
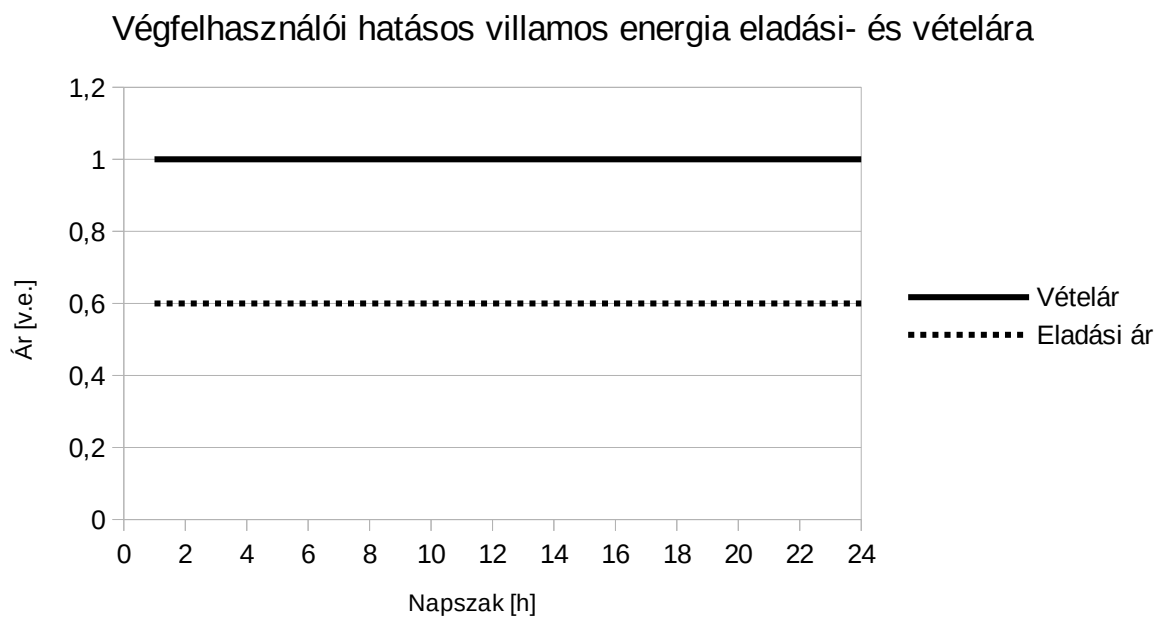
### Javaslat a fogyasztói és termelői tarifák újragondolására

- Csúcsidős tarifák: (t) [Ft/kWh]
- Meddő vétel/Eladás, csúcsidős tarifák
- Aszimmetrikus and visszatáplált hatásos teljesítmény/meddő teljesítmény
- Harmonikus visszatáplálás Ft/kWh

Az egyértelmű, hogy a jövő okos villamosenergia hálózata okos lesz, azonban annak érdekében, hogy ezek az okos eszközök elterjedjenek szükség van a piaci motiváló erők újragondolására. Jelenleg egy lakossági fogyasztó bármelyik időpillanatban 32 Ft/kWh áron tudja megvásárolni a villamos energiát, amennyiben rendelkezik saját kiserőművel, akkor a megtermelt többlet energiát 14 Ft/kWh áron tudja eladni. Azért van szükség az eladási és vételár közötti jelentős különbségre, mert a villamos energiának is van kezelési költsége, ha például egy olyan napszakban adjuk el a megtermelt többlet energiát, amikor a környéken senki sem fogyaszt, akkor azt el kell szállítani, adott esetben megnövekedő rendszerhasználatot, hálózati veszteséget és rendszerbiztonsági kockázatot okozva ezzel. Előnyös hatása az árkülönbségnek, hogy motiválja a termelőket az energiatárolásra, amennyiben a háztartás el tudja tárolni a megtermelt energiát, akkor később azt elhasználni előnyösebb, mint a közcélú hálózatról vételezni.



## Tarifák átszervezése





# Bibliografía

## Bibliografía

- 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
- 3: Dung H Pham; Gregory Hunter; Li Li; Jianguo Zhu, Feedforward decoupling control method in grid-interfaced inverter,
- 4: Siddalinga.S.Nuchhi; Raghavendra.B.Sali; Dr.Shekhappa G. Ankaliki, Effect Of Reactive Power Compensation On Voltage Profile, 2013
- 5: SINTEF Energy Research, Average model of PWM converter, 2012
- 6: Julio Barros, Matilde de Apráiz and Ramón I. Diego, Analysis of second order harmonic voltages in power systems, 2007