



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Sövény Gergely Máté

# **HÁROMFÁZISÚ INVERTEREK SZABÁLYOZÁSA**

Önálló laboratórium

KONZULENS

**Dr. Divényi Dániel**

BUDAPEST, 2020

# Tartalomjegyzék

Összefoglaló.....	3
Eszközkészlet.....	4
1. Aszimmetrikus háromfázisú rendszer.....	5
Feszültségaszimmetria keletkezése.....	5
Aszimmetrikus háromfázisú jelek leírása.....	6
Aszimmetrikus feszültségviszonyok szabályozástechnikai hatása.....	7
Kompenzátor kiválasztása.....	8
Aszimmetrikus alapjelek előállítása.....	9
Egyfázisú fogyasztó bekapcsolása.....	10
2. Teljesítményáramlás modellezése.....	11
Energiamegmaradás.....	11
A teljesítményáramlási modell felépítése.....	12
Az inverter bekapcsolása.....	14
Az aszimmetrikus visszatáplálás DC oldali hatása.....	15
3. Összegzés.....	17

# Összefoglaló

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

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

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

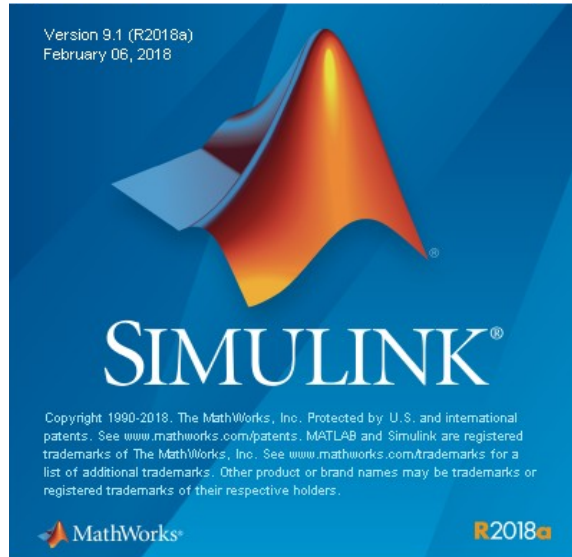
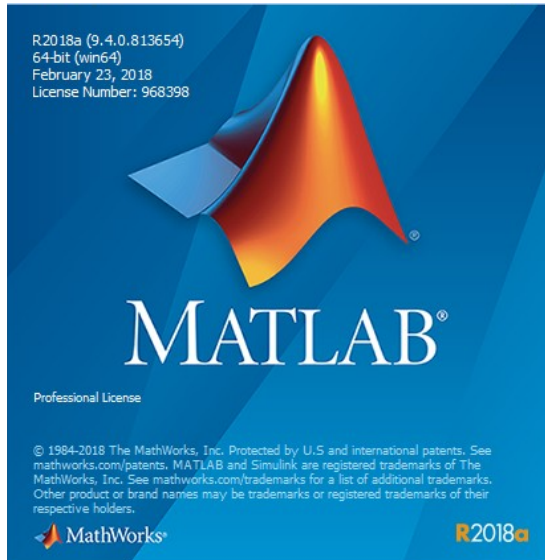
Ebben a félévben kibővítettem ezt a modellt, hogy alkalmas legyen fázisonként függetlenül szabályozható teljesítmény-alapjelek követésére, melynek célja, hogy az inverter képes legyen a kisfeszültségű elosztóhálózaton megjelenő esetleges feszültségaszimmetria kompenzálására.

Céлом volt továbbá az inverter korábban ideális feszültségforrással modellezett DC oldalán jelentkező villamos jelenségek bővebb vizsgálata, különös tekintettel a bemeneti kondenzátor termikus terhelésére és feszültségviszonyaira.

# Eszközkeszlet

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 Kirchhoff-hálózathoz csatlakozzon, melyen a villamos paraméterek dimenzióhelyesen mérhetőek, kiértékelhetőek.



# 1. Aszimmetrikus háromfázisú rendszer

## Feszültségaszimmetria keletkezése

A háromfázisú kisfeszültségű elosztóhálózaton a fogyasztók nagy része egyfázisú, ezért gyenge hálózatokon 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 táplál rá a zárlatra.

Kiegyenlítetlen fogyasztásból vagy termelésből eredő feszültségaszimmetria azonban kompenzálható háromfázisú inverter segítségével, hiszen a kisfeszültségű hálózat dominánsan rezisztív impedanciaviszonyai mellett 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 sokkal kézenfekvőbb a Park transzformációból levezethető dq0 komponenseket 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  $d(t)$  és  $q(t)$  komponensek kifejtése kissé hosszadalmas, trigonometrikus összefüggéseken keresztül vezethető le, bővebb levezetés nélkül látszik, hogy jellegre valamilyen  $\sin^2(x)$  alakot követnek, azaz a hálózati frekvencia kétszeresével lengő szinuszos tagra és valamilyen konstans offsetre bonthatók.

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

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

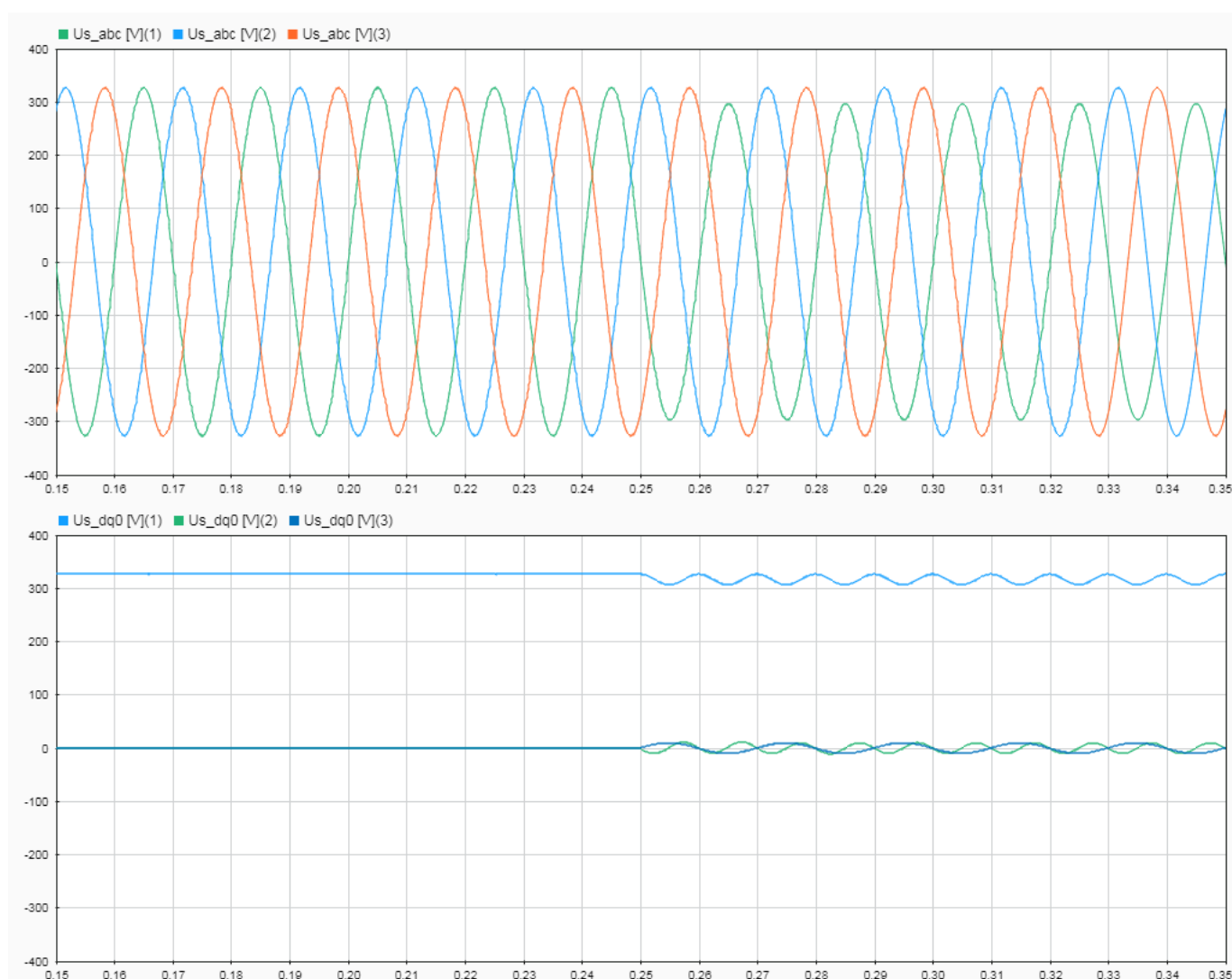
$$u_z = \frac{A_a * \sin(2 \pi f_0 t) + A_b * \sin(2 \pi f_0 t - 2/3 \pi) + A_c * \sin(2 \pi f_0 t + 2/3 \pi)}{3}$$

Ebből adódik, hogy a  $z(t)$  komponensben csak a hálózati feszültségben jelenlévő frekvenciakomponensek jelenhetnek meg.

## Aszimmetrikus feszültségviszonyok szabályozástechnikai hatása

Az inverter topológiai felépítése nem változik, szabályozástechnikai szempontból azonban változnak az inverterrel szemben támasztott elvárásaink. Szimmetrikus feszültségviszonyok mellett állandósult állapotban a szinuszos fázisfeszültségek dq0 transzformációt követően amplitúdóval arányos  $u_d$  valamint nulla értékű  $u_q$  és  $u_z$  konstans értékű komponensekre bonthatóak.

Ezzel szemben aszimmetrikus esetben az  $u_z(t)$  tagban megjelenik egy hálózati frekvenciával azonos körfrekvenciájú szinuszos komponens, míg az  $u_d(t)$  és  $u_q(t)$  komponensekben egyaránt egy-egy kétszeres frekvenciájú lengés jelenik meg.



Ábra 1: Fázismennyiségek álló referencia szerint, valamint dq0 forgó referencia szerinti reprezentációja szimmetrikus és aszimmetrikus hálózati viszonyok mellett. Kapcsolás  $t=0,25$  időpillanatban.

## Kompenzátor kiválasztása

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.

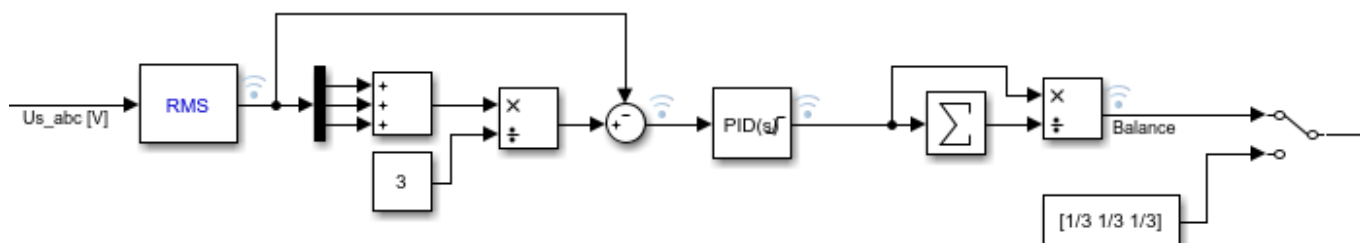
Aszimmetrikus hálózati üzemben azonban a PI szabályzó már nem kielégítő, hiszen lassú dinamikája miatt az időben szinuszosan változó jelek követésére már nem alkalmas. Kismértékű aszimmetria esetén kielégítőnek bizonyulhat egy derivált taggal kiegészített PID szabályzó, mely megfelelő hangolás esetén jó dinamikával követi az alapjelet, azonban mindenképpen megjelenik valamilyen kis mértékű maradó hiba, ami aszimmetrikus meddő teljesítményt okoz. Ennek kiküszöbölése rezonáns szabályzó használatával lehetséges, azonban fél éves munkám során ezt nem implementáltam, a PID szabályzó pontatlanságából adódó 1-5%-os relatív hiba mellett is jól bemutatathatóak az aszimmetrikus visszatáplálásban rejlő lehetőségek.



## Aszimmetrikus alapjelek előállítása

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

Egy segéd szabályzó 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.

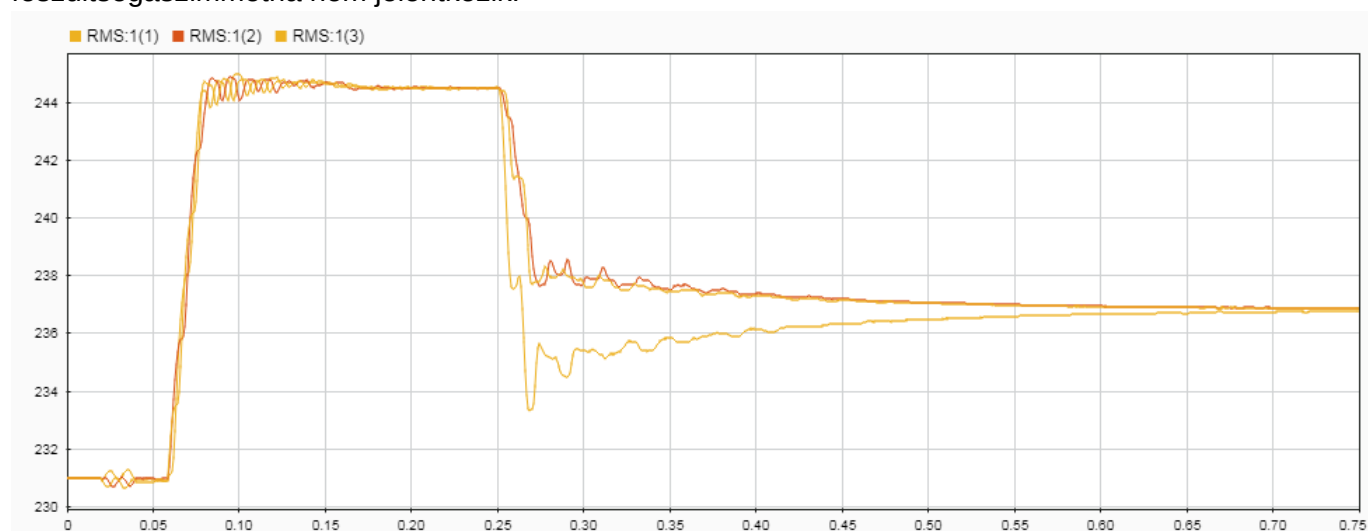


Az alrendszer kiszámolja a három fázisfeszültség RMS értékének átlagát, majd amelyik fázisnak nagyobb az átlaghoz képest a feszültsége, annak csökkenti a hatásos teljesítményét, amelyiknek pedig kisebb a feszültsége, annak növeli a teljesítmény alapjelét. A szabályzó egyszerű PI taggal implementálható,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

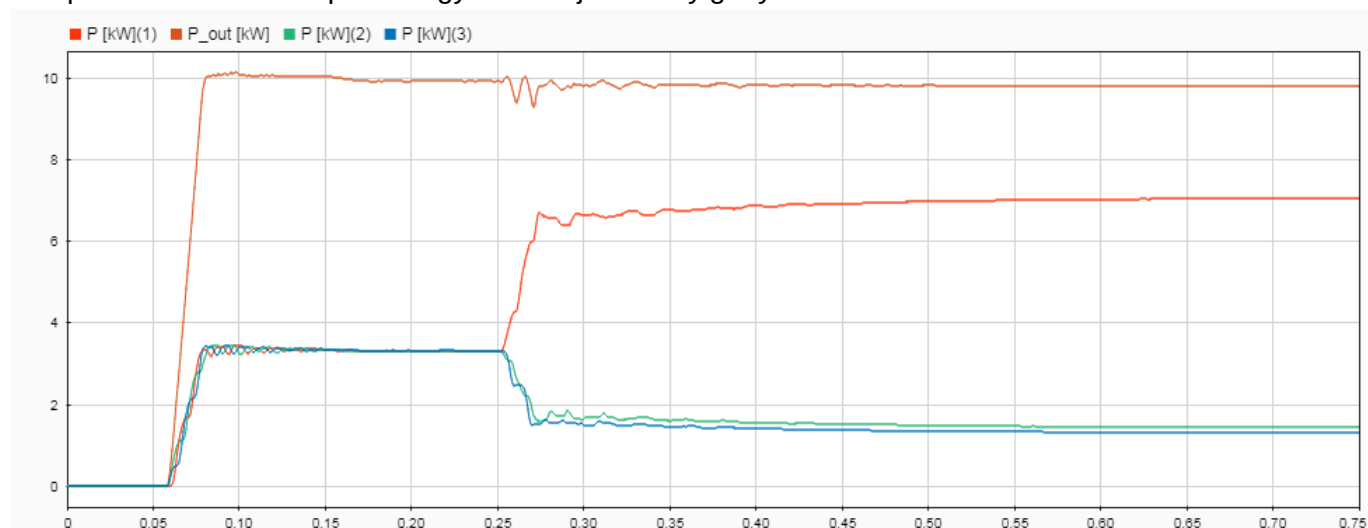
Az előálló három teljesítmény alapjelet a fázisfeszültséggel leosztva megkapjuk a visszatáplálandó áramok amplitúdóját. Ahhoz, hogy ebből háromfázisú áram időfüggvényét kapjunk, szükségünk van egy háromfázisú jelgenerátorra, mely fázishelyesen szinkron jár a hálózattal. A jelforrás kimenetét felszorozzuk 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 kisfeszültségű 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.



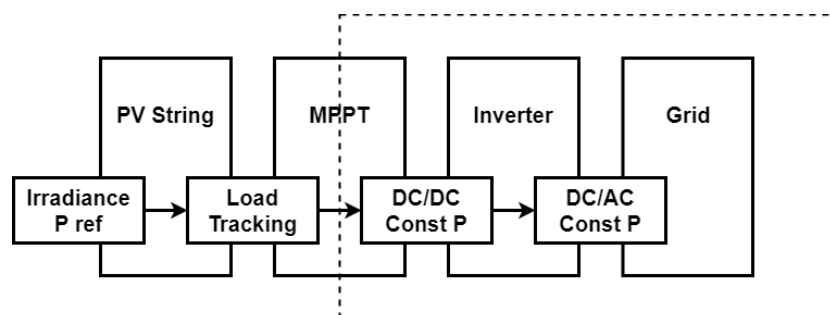
Jól látszik, hogy ugyan egyfázisú terhelést kapcsoltunk a hálózatra, mégis mindhárom fázis feszültsége beesik. Ez azért van, mert az inverter gyorsan reagálva az A fázis feszültségesésére lecsökkenti a B és C fázisokba visszatáplált hatásos teljesítményt annak érdekében, hogy az A fázisba táplálva kompenzálhassa a bekapcsolt fogyasztó teljesítményigényét.



## 2. Teljesítményáramlás modellezése

### Energiamegmaradás

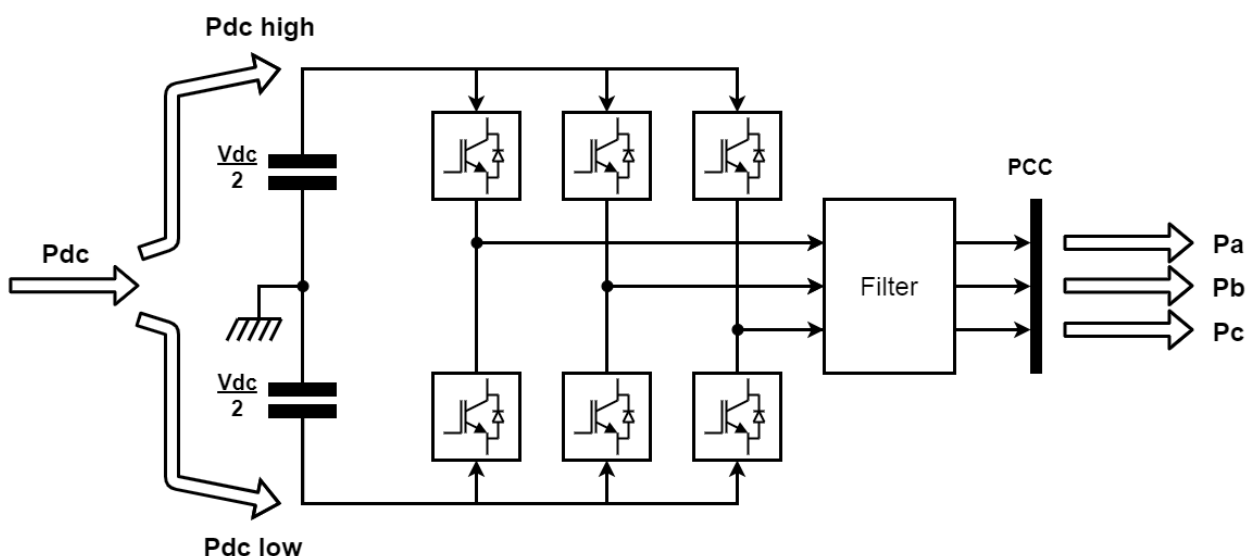
HMKE Inverter célja, hogy a megtermelt energiát AC villamos energiává alakítsa, mely közvetlenül felhasználható vagy értékesíthető. A PV sztringből maximális DC villamos teljesítmény felvételét MPPT vezérlő teszi lehetővé, ezt követően DC-DC átalakítással előállítjuk az inverter fokozat 800 V-os bemeneti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



Ábra 2: Tipikus háztartási méretű PV rendszer funkcionális felépítése.

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

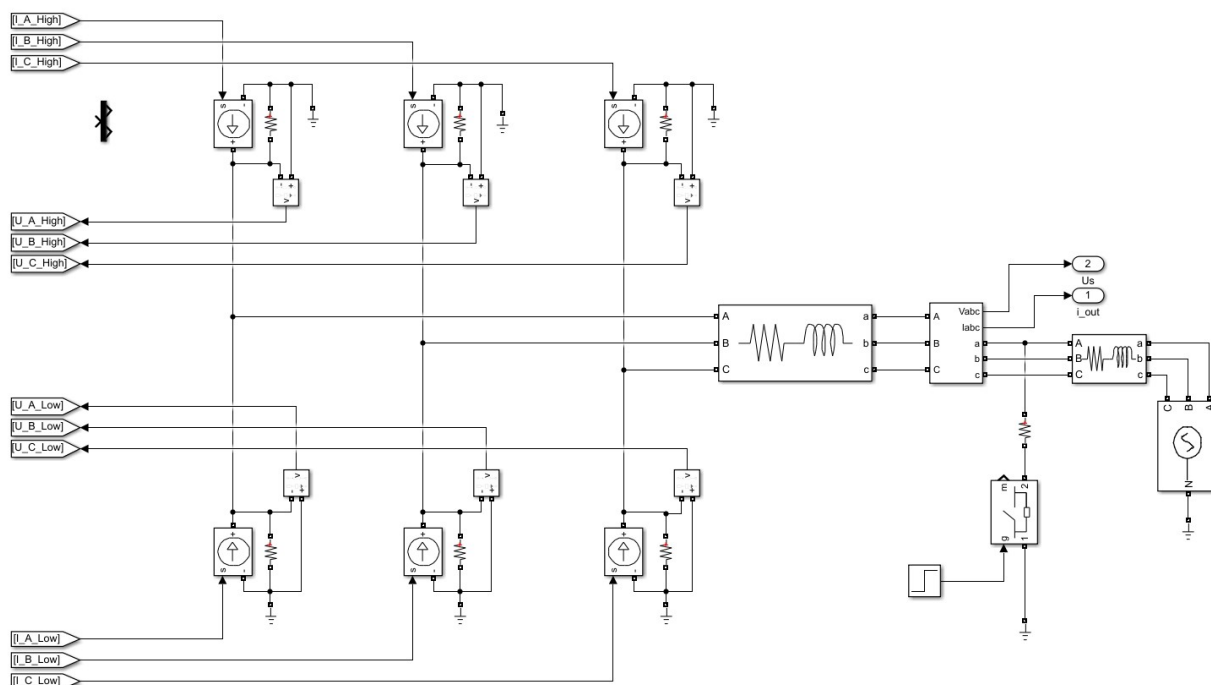
$$P_{dc} = P_{dc\ high} + P_{dc\ low} = P_a + P_b + P_c.$$



Ábra 3: Teljesítményáramlás az inverterben.

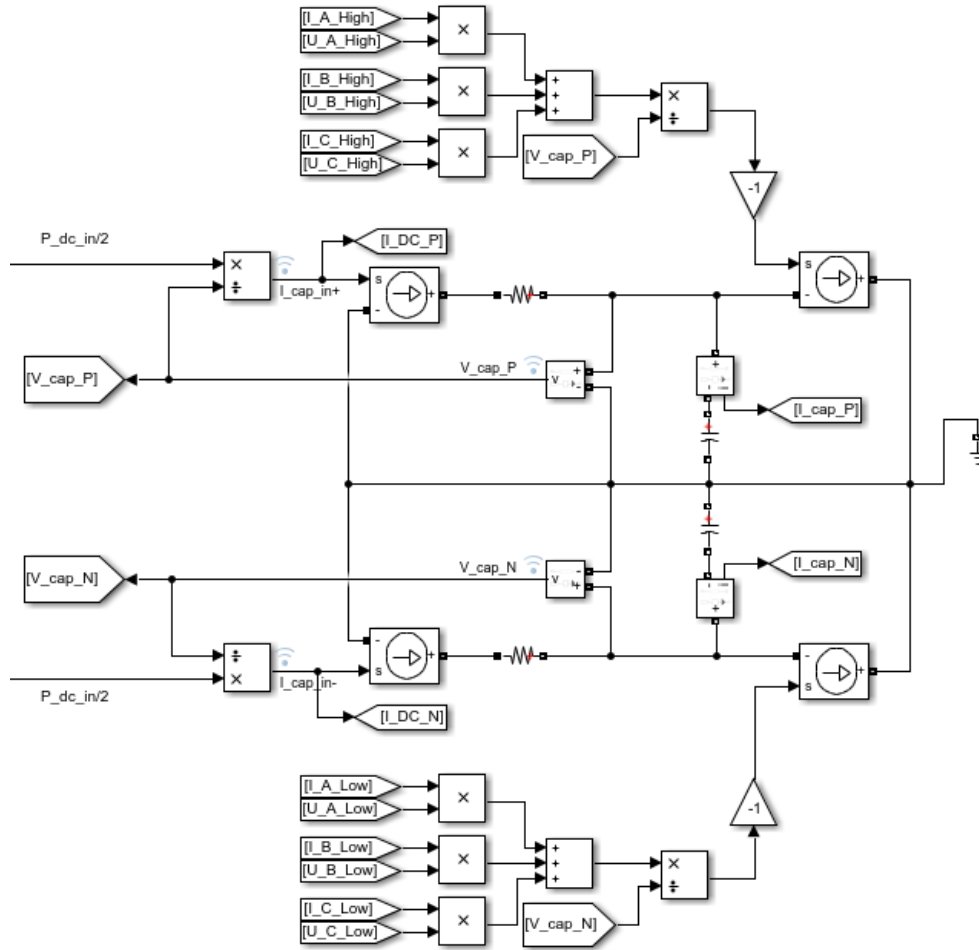
## A teljesítményáramlási modell felépítése

Modellezési szempontból előnyös az inverter átlagolt modelljét (average model) vizsgálni, hiszen a nagyfrekvenciás PWM vezérlőjelekkel hajtott félvezetők szimulációja számításigényes feladat. A félhíd kapcsolás megvalósítását ezért diszkrét vezérelhető áramforrásokkal végeztem.



Ábra 4: 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. A magas oldali három kapcsolóelem teljesítményét a C\_DC\_P kondenzátorból, az alacsony oldali három kapcsolóelem teljesítményét pedig a C\_DC\_N kondenzátorból.



Ábra 5: 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.

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

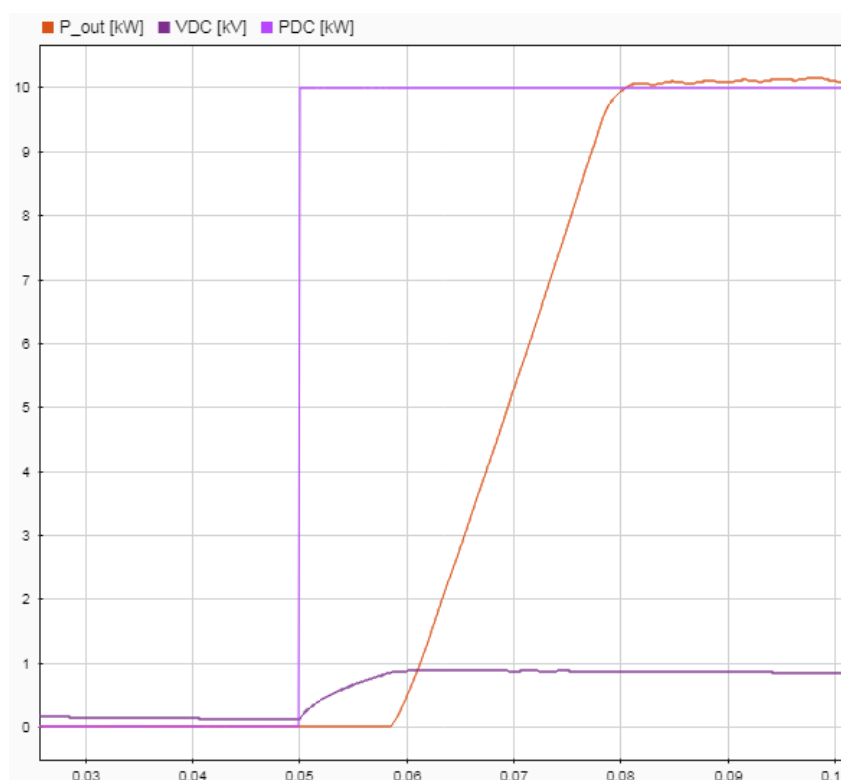
Ezzel analóg módon az inverter DC oldali bejövő teljesítménye szintén vezérelt áramforrásként van modellezve, ezzel táplálva a bemeneti kondenzátort, valamint a félhíd kapcsolást.

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

## Az inverter bekapcsolása

Az inverter teljesítmény referenciajele tehát a PV sztringhez kapcsolódó MPPT vezérlő kimeneti teljesítménye. Csak teljesítmény egyensúly esetén valósul meg, hogy a bemeneti kondenzátorok feszültsége állandó, ekkor a fázisokba visszatáplált hatásos teljesítmények összege megegyezik a DC oldalon betáplált pillanatnyi teljesítménnyel. Magas feszültségtűrés és méreti korlátok miatt viszonylag kis kapacitású kondenzátorokról beszélünk, ezért kiegyenlítőtel teljesítményviszonyok mellett néhány milliszekundum alatt a megengedett határ fölé emelkedhet a kondenzátor feszültsége.

A szabályzó feladata tehát, hogy úgy vezérelje a háromfázisú visszatáplálást, hogy a bemeneti kondenzátor minden időpillanatban a névleges működési feszültségtartományban maradjon. A modellben 470  $\mu\text{F}$  kapacitású, 500 V maximális feszültségre méretezett elektrolit kondenzátorokat használtam. Bekapcsoláskor a DC oldalon betáplált 10 kW-os teljesítményugrás hatására hirtelen elkezd nőni a kondenzátorok feszültsége. Beáramló teljesítményt érzékelve a háromfázisú visszatáplálás elindul, ezzel kialakítva a korábban tárgyalt teljesítmény egyensúlyt. A szabályzó feladata, hogy a DC kondenzátorok feszültsége lehetőség szerint minden időpillanatban  $2 \cdot 400 \text{ V} = 800 \text{ V}$  legyen. A vizsgált példában a teljesítményugrást követően 890 V-os maximális feszültséget ért el a két kondenzátor összesen, az ezt követő 100 ms alatt áll be ez az érték az elvárt 800 V-ra. A grafikonon is jól megfigyelhető, hogy a DC oldalon betáplált 10 kW-hoz képest a háromfázisú teljesítmény kicsit nagyobb, ez teszi lehetővé, hogy idővel visszacsökkenjen a kondenzátor feszültsége a névleges 400 V-ra.



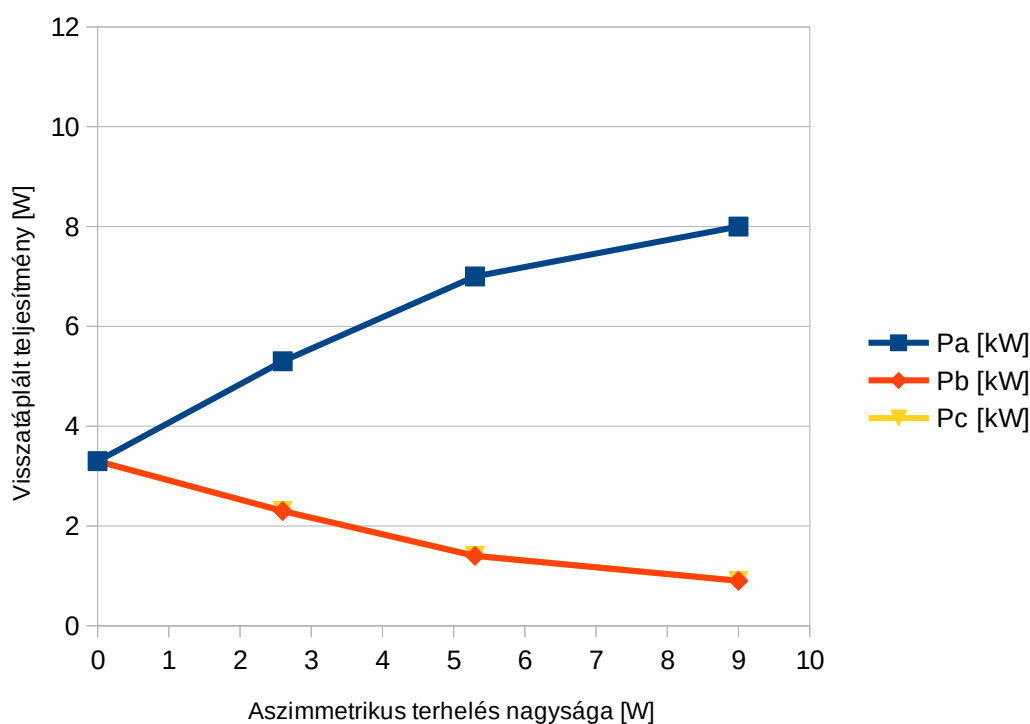
Ábra 6: Bemeneti kondenzátorok feszültségének alakulása 10 kW-os DC teljesítményugrás hatására.

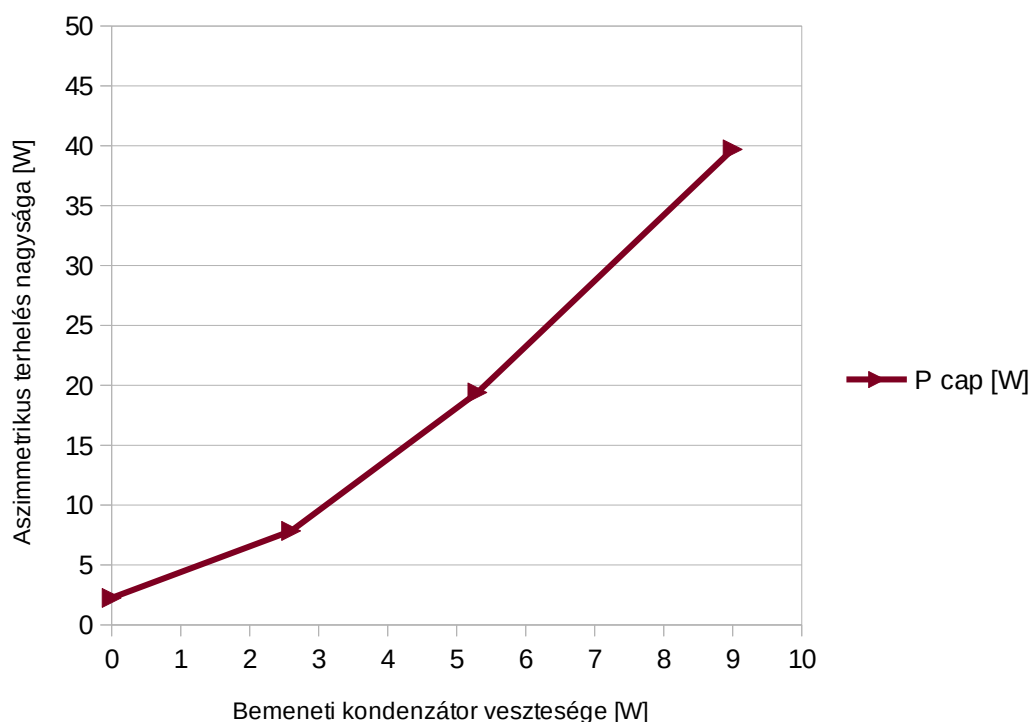
## Az aszimmetrikus visszatáplálás DC oldali hatása

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	0.9	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.



### 3. Összegzés

A modell működése alapján kijelenthető, hogy a hálózati aszimmetria kompenzálásának hatékony eszköze lehet egy háromfázisú inverter, azonban a passzív elemek és a félvezetők nagyobb igénybevétele miatt méretezési és szabályozási szempontból is további vizsgálatokat igényel.

A megnövekedő villamos és termikus terhelés miatt csökkenhet az élettartama, valamint nagyobb kimeneti áramra kell méretezni a félvezető kapcsolóelemeket is, ezért az ilyen típusú inverter mindenképpen drágább is lesz.

Jelenleg szerződéses keretek között csak villamos energia vételezés illetve eladás történik a fogyasztó (termelő) és az áramszolgáltató között. Új tarifatípusok létrehozásával ösztönözve azonban elképzelhető lenne, hogy bizonyos feszültségminőség-javítási feladatokat is átvállaljanak a háztartási méretű kiserőművek.