



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék

Csondor Bálint

Napelemek telepítésének hatása a kisfeszültségű hálózatok felharmonikus viselkedésére

A felharmonikus áramok szögeinek változása

TDK dolgozat

KONZULENS

Dr. Hartmann Bálint

BUDAPEST

2016

Összefoglaló

Napjainkban már Magyarországon is egyre több napelemes rendszer található a kiefeszültségű hálózaton. A háztartási méretű kiserőművek (HMKE) elterjedése köszönhető az energiatudatosságnak, a fenntartható fejlődésnek, illetve az Európai Unió előírásainak, melyek alapján 2020-ig szeretnék elérni, hogy 20%-kal csökkenjenek az üvegházhatást okozó gázok az 1990-es szinthez képest, 20%-ra növekedjen a megújuló energiaforrások részaránya és 20%-kal növekedjen az energiahatékonyság. Ennek okán az Európai Unió is nagymértékű támogatást biztosít hazánk számára, ezzel elősegítve a napelemes rendszerek terjedését.

A napelemes rendszerek azonban túlzott elterjedésükkel különböző problémákat okozhatnak a hálózaton. Ilyen problémát jelent pl. a hálózat megemelkedett üzemi feszültsége. Különösen a déli órákban, amikor a hálózaton napelemes rendszerek nélkül is magas a feszültség, - hiszen a fogyasztók kevesebb teljesítményt vesznek fel - ezt a napelemes rendszerek még tovább növelik. A napelemes rendszerek számának növekedésével párhuzamosan megfordul a teljesítményáramlás iránya a hálózaton. A korábbi évtizedekben kialakult és megszokott centralizált termeléssel ellentétben már nem a kiefeszültségű hálózat jelenti a hálózat azon részét, melyen a teljesítményt felveszik a fogyasztók, hanem már ez a hálózatrész is energiát állít elő és teljesítményt táplál a közepfeszültségű hálózat felé.

A napelemes panelek félvezető technológiával egyenáramot képesek előállítani. Ahhoz, hogy ezt az energiát otthonaikban, otthoni eszközeinkhez könnyedén fel tudjuk használni, át kell alakítani váltakozó árammá. Ehhez az átalakításhoz szükség van az úgynevezett inverterre. A manapság forgalomban lévő inverterek működéséből adódóan azonban ezek az eszközök az átalakítás során úgynevezett felharmonikusokkal szennyezik a hálózatot. A felharmonikusok az alapjelről (50 Hz-es szinuszos alakú jel) eltérő frekvenciájú szinuszos alakú jelek. Ezen eltérő frekvenciájú jelek, illetve az alapjel (alapharmonikus) szuperpozíciójából valamilyen torz jel jelenik meg a hálózaton, ez pedig különböző problémákhoz vezethet. Azonban nem csak a jel alakja torzul, hanem a jel fázis helyzete, szöge is. Ez természetesen függ az egyes felharmonikus fázisszögétől. Az egyes inverterek, illetve maguk az egyes háztartási eszközök felharmonikusai képesek lehetnek akár (eltérő szögek révén) egymást kioltani. A napelemes rendszerek így képesek lehetnek egyfajta felharmonikus minőség javítására is a hálózaton.

Dolgozatomban a fent említett felharmonikus szögeket, illetve azok hatásait vizsgálom a kiefeszültségű hálózatra. Munkám során négy napelemes penetrációt különböztetek meg. 0%, 25% 50% és 75%-os penetrációt. A 0%-os penetrációt nem csak amiatt érdemes vizsgálni, hogy a felépített hálózat megállja-e a helyét a valóságban, megfelel-e szabványokban rögzítetteknek, hanem amiatt is mert így megvizsgálható a fogyasztók napelemes rendszerek nélküli felharmonikus viszonyai is, hiszen a mai modern elektronikus eszközök nagymértékben képesek szennyezni felharmonikusan a hálózatot.

Abstract

Nowadays, there is more and more solar system of the low voltage grid in Hungary. The reason behind the fast spread of the home solar electric system is energy awareness, sustainable development and European Union regulations, including the objective to decline the greenhouse effect gases with 20%, increasing the renewable energy sources with 20 % and improving in energy efficiency with 20%. So that, The European Union is a huge supporter of the alternative energy application is Hungary.

However, the too much solar system cause problems on the grid. For example, the increased operating voltage. Especially around noon, when there is a raised voltage in addition the solar system. By increasing the number of the solar panels in parallel the performance flow's direction will be changed. Now, we have a new, opposite situation, there is not only a centralized production, now this grid item can give energy to the whole grid.

The solar plans produce direct current. To be able to utilize this direct current at home we have to transform it to alternating current with the help of the inverter. Even though, inverters have disadvantages because of the harmonic pollution. Inverter's harmonics have different sinus frequency signs than 50 Hz. The difference between the signs cause problem, because not only the sign will change, but the phase sign position and angle as well, depending on the harmonic phase angles. The inverters and household equipment's harmonic are able to cancel out each other, so they can increase the grid in addition.

In my thesis, I monitor the phase angles and its effects for the low voltage grid. I divide four solar panel penetration 0%, 25%, 50% and 75%. 0% penetration has very interesting information not only because of the grid attribution, but to monitor customer's situation without solar systems, because the household equipment are able to make a huge pollution to the grid.

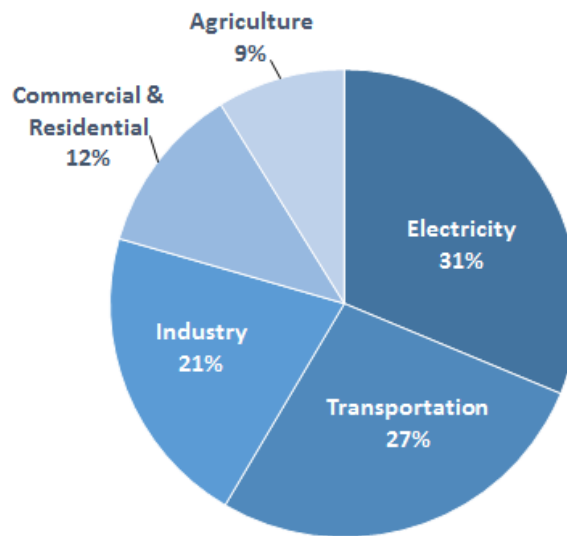
Tartalomjegyzék

Összefoglaló.....	i
Abstract.....	ii
Tartalomjegyzék.....	iii
1 Bevezetés.....	5
1.1 Törvényi előírások, irányelvek [1].....	6
1.2 Megújuló energiaforrások arányának változása	6
1.3 A hálózaton megjelenő változások	7
2 Harmonikusok.....	9
2.1 Fourier-transzformáció [7].....	9
2.2 Harmonikusok definíciója [9].....	10
2.3 Harmonikusok keletkezése [9].....	11
2.4 Harmonikusok terjedése [9].....	14
2.5 Felharmonikus szögek.....	15
2.6 Felharmonikusok által okozott problémák [10].....	16
2.7 Hálózati harmonikus források	16
2.7.1 Fogyasztók [9].....	16
2.7.2 Napelemes rendszer invertere	17
3 A felépített hálózat.....	19
3.1 Neplan.....	19
3.2 Transzformátor	19
3.3 Hálózat topológia	20
3.4 Fogyasztók.....	21
3.5 Napelem – Inverter.....	24
4 Szimuláció	28
4.1 A felharmonikus szögek számítása a programban.....	28
4.2 Egy inverter hatása a felharmonikus szögekre a távolság és teljesítmény függvényében.....	31
4.2.1 Fogyasztói felharmonikus mentes eset.....	31
4.2.2 Fogyasztói felharmonikusokkal vizsgált eset.....	32

4.3	0%-os PV penetráció 24 órás vizsgálata	36
4.3.1	Loadflow szimuláció	36
4.3.2	Harmonikus szimuláció	37
4.4	25%-os PV penetráció 24 órás vizsgálata	39
4.4.1	Az inverterek hatása napsütéses napokon.....	39
4.4.2	Az inverterek hatása felhős napokon	42
4.5	50%-os PV penetráció 24 órás vizsgálata	45
4.5.1	Az inverterek hatása napsütéses napokon.....	45
4.5.2	Az inverterek hatása felhős napokon	48
4.6	75%-os PV penetráció 24 órás vizsgálata	51
4.6.1	Az inverterek hatása napsütéses napokon.....	51
5	Eredmények	53
6	Irodalomjegyzék.....	58

1 Bevezetés

Sajnálatos módon az utóbbi években, évtizedekben az emberiség a fejlődés érdekében figyelmen kívül hagyta környezetét, hatalmas károkat okozva abban. Természetesen ez a folyamat hosszú távon nem tartható fent, hisz nem tehetjük tönkre élőhelyünket, bolygónkat. Számos törvény, szabályozás született, hogy minél hatékonyabban óvjuk a természetet, visszaszorítsuk az üvegházeffektust. Az Amerikai Egyesült Államokban az üvegházeffektus kialakulásának mintegy egyharmadát teszik ki az villamos energia előállításából származó környezetszennyező gázok. [1]



1. ábra: Az üvegház kialakulásának okai az USA-ban [2]

Ennek köszönhetően napjaink energiatermelésében egyre nagyobb szerepet játszanak a megújuló energiaforrások. Ezen források előállítása, illetve az energiatermelés folyamata jelentősen csökkentik a környezetszennyező gázok mennyiségét. A megújuló energiaforrások közé sorolhatjuk többek között a nap-, a víz-, a szél-, a geotermikus- és a biotermikus energiát. A lakossági energiatermelés számára a napenergiát hasznosító napelemes rendszerek jelenthetnek megoldást. Ezen rendszerek előnye, hogy a többi forráshoz viszonyítva alacsony költséggel, egyszerű telepítéssel állnak rendelkezésre. Egy családi házra is könnyedén telepíthetőek és fedezhetik a család energiafogyasztását.

1.1 Törvényi előírások, irányelvek [1]

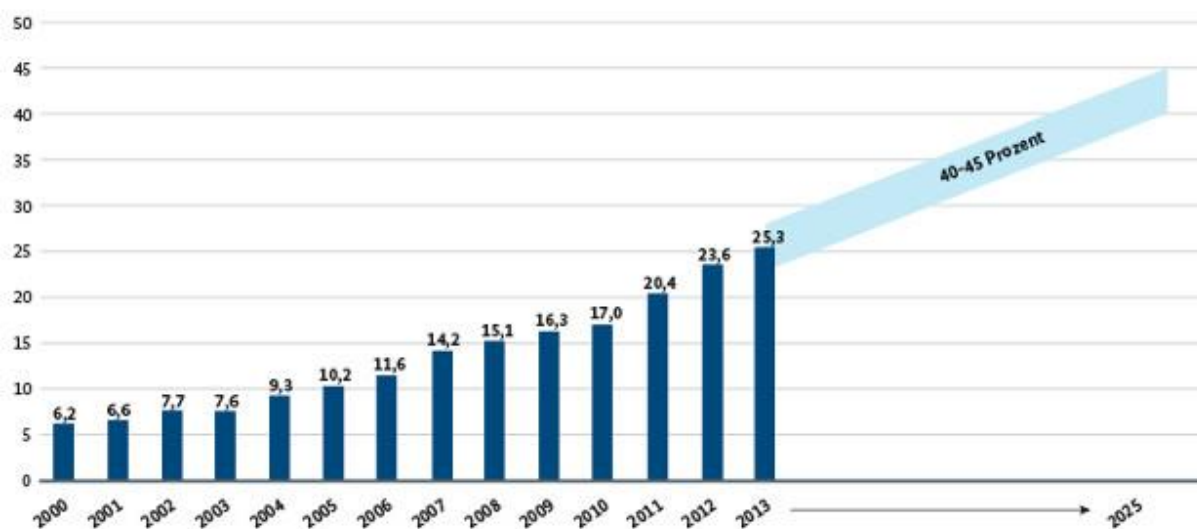
Az Európai Unió már 1997-ben az úgynevezett Fehér Könyvben elkötelezte magát a megújuló energia mellett. Az utóbbi években azonban jelentős változás történt az energetikában. A 2012-ben kitört palagáz-forradalom hatására olcsó palagáz lepte el az amerikai energiapiacot, melynek hatására Európába került az Amerikában feleslegessé vált alacsony áru szén. 2014-ben a kőolaj világpiaci ára megfeleződött, amely több kőolaj-exportra támaszkodó ország bevételeit lecsökkentette, illetve a palagázra is negatív hatással volt. A folyamatok hatására, illetve a fosszilis energiahordozóktól való kisebb függőség miatt és a környezetünk védelme érdekében az Európai Unió a megújulók részarányának növelését tűzte ki céljául. 2007-ben elfogadta az Európai Unió Energia és Klíma Csomagot, melyben kitűzte, hogy 2020-ig szeretné, hogy

- 20%-kal csökkenjenek az üvegházhatást okozó gázok az 1990-es szinthez képest,
- 20%-ra növekedjen a megújuló energiaforrások részaránya,
- 20%-kal növekedjen az energiahatékonyság.

A 2009/28/EK Európai Uniói irányelv Magyarország számára 2020-ig 13%-ot határozott meg, mint elérendő arányt a megújuló energiaforrásokra vonatkozóan. [3] Az Uniói célok eléréséhez a tagállamok saját cselekvési tervet fektettek le. Magyarország 14,65%-os arányt tűzött ki a Nemzeti Cselekvési Tervében.

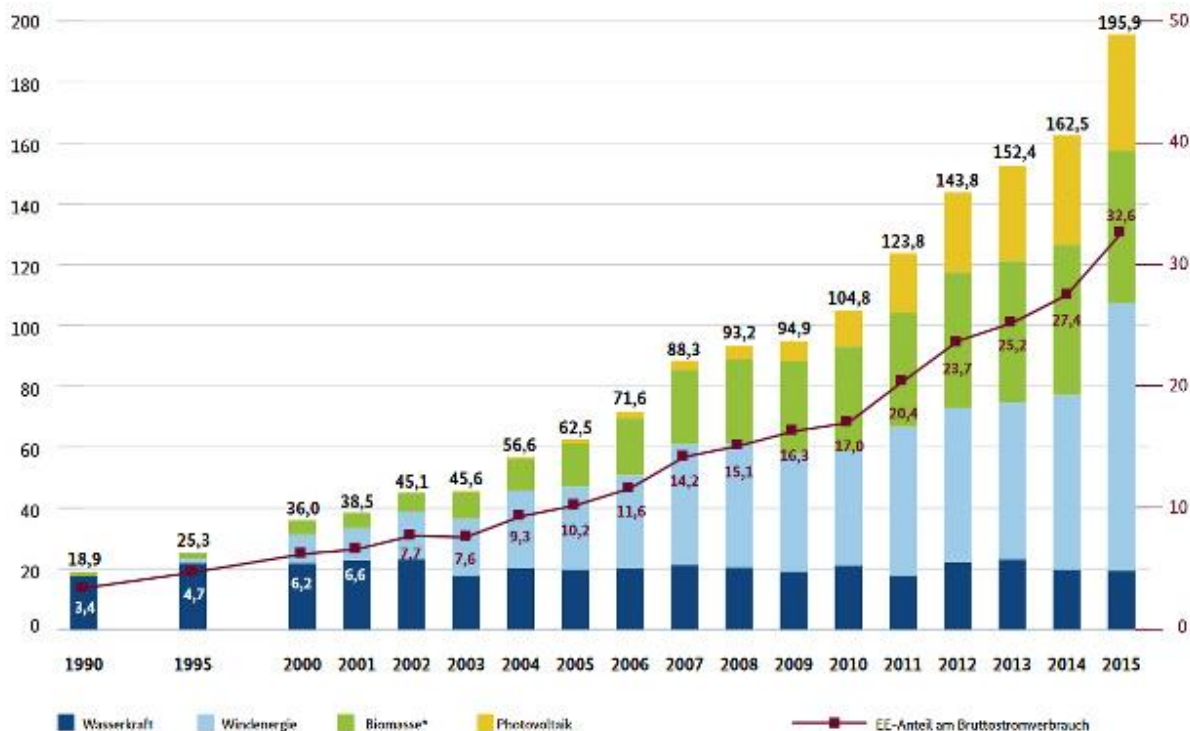
1.2 Megújuló energiaforrások arányának változása

Magyarország mai villamos energia-rendszere a XX. század második felében alakult ki. Ebben az időben a centralizált termelés volt a fő irányvonal, azaz kevés, nagyméretű erőművel látták el a fogyasztókat. Az idő haladtával - különösképp a megújuló energiaforrások megjelenésével - ez a kép változóban van. A jelenlegi helyzetet tekintve országunkban még mindig erősen centralizált a termelés, kevés a megújuló energiaforrás. (kevesebb, mint 10% [4]) Ha a jövőt, illetve a németországi példát tekintjük, jól látható, hogy a megújuló energiatermelés egyre nagyobb teret nyer magának. (2. ábra)



2. ábra: A megújuló energiaforrások részarányának változása Németországban [5]

Az ábra adatai alapján kijelenthető, hogy Németországban tíz éven belül a termelés majdnem fele megújuló energiaforrásokból fog származni.



3. ábra: A megújuló energiaforrás fajtáinak változása [6]

Németországban a 2016-os adatok alapján (3. ábra), kb. 10%-át teszi ki a megújuló energiatermelés mennyiségének a napenergia termelés. Az ábrán az értékek Mrd kWh-ban láthatóak. Az előrejelzések alapján tíz éven belül az összertermelés legalább 20%-át fogja kitenni ezen energiaforrásokból származó termelés.

Azért is fontos, hogy kiemeljük a napelemes termelőegységeket, mert az általuk megtermelt energia egyenáramú, így annak hálózatba való táplálásához egy átalakítóra van szükség, amely az egyenáramot váltakozó árammá alakítja. Ezt az átalakítót inverternek nevezzük. Azonban az inverterek úgynevezett felharmonikusokkal szennyezik a hálózatot.

1.3 A hálózaton megjelenő változások

Az inverterek mellett a háztartásokban használt különböző elektronikus eszközök is képesek nagymértékben torzítani a hálózat felharmonikus viszonyait. Az utóbbi években, évtizedekben egyre jobban terjednek az energiatakarékos, illetve bonyolult elektronikával rendelkező eszközök. A régi eszközök, izzók cseréjével, kapcsolóüzemű tápok illetve a napelemes rendszerek terjedésével a hálózat felharmonikusban egyre erősebben szennyezetté válik. Ez a szennyezettség különböző problémákat okozhat. Természetesen bizonyos mértékig ez a probléma elenyésző, illetve nem kell teljesen kizárni a szinuszos jelalaktól eltérő áramalakat felvevő berendezéseket. A szabványokban pontos leírások találhatóak, hogy adott eszköz mekkora felharmonikus áramot injektálhat a hálózatba, illetve a háztartások csatlakozási pontjain mekkora felharmonikus feszültség

torzítás megengedett. A nagy számban elterjedő napelemes rendszerek azonban még nagyobb mértékben torzíthatják a hálózat jelalakját, így érdemes ezekkel együtt vizsgálni a hálózatot, hogy egy összetett képet kaphassunk.

Bár Magyarországon még nem szentelnek akkora figyelmet a problémának, mint Nyugat-Európában, azonban mi sem feledkezhetünk meg róla. Az idő előrehaladtával a szabályozások következményeként, illetve a nagymértékű támogatásnak, melyet az Európai Unió biztosít hazánk számára, Magyarországon is egyre több napelemes rendszer lesz található a kisfeszültségű hálózaton.

2 Harmonikusok

2.1 Fourier-transzformáció [7]

Periodikus jelek felbonthatóak különböző frekvenciájú, fázisú és amplitúdójú szinuszos és koszinuszos jelek összegére, ahol a tagok az alapharmonikus egész számú többszörösei szerint periodikusak. Fourier tételét alkalmazva a mérnöki valós alak a következő:

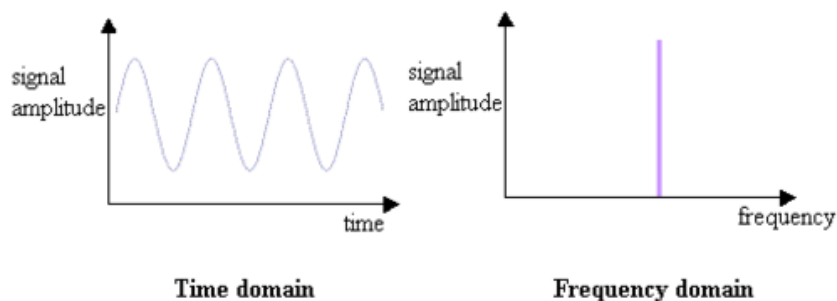
$$i(t) = I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} I_k \cos(h\omega_1 t + \rho_k) \quad (1)$$

A fenti egyenletben a jelölések jelentése:

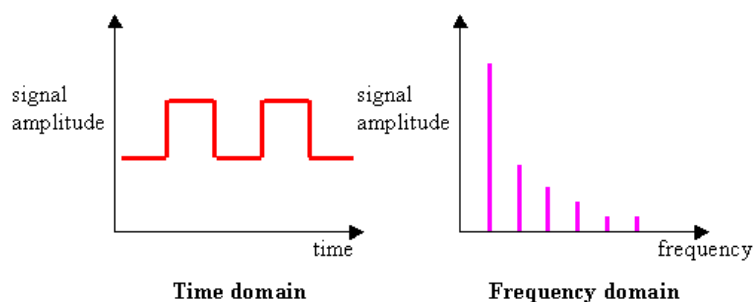
- I_0 állandó (egyen) összetevő
- I_0 h. harmonikus csúcsértéke
- ρ_k h. harmonikus kezdőfázisa
- h harmonikus rendszáma
- $\omega_1 = 2\pi f$ alapharmonikus körfrekvenciája (ahol $f = 50$ Hz)

Fourier sorfejtéssel tehát lehetőségünk nyílik az adott jelet időtartomány mellett frekvenciatartományban is vizsgálni. A sorfejtett jel tartalmazza az egyes összetevők amplitúdóját (rendszerint decibelben) és kezdőfázisát az adott körfrekvencián. Az 50 Hz-nél nagyobb harmonikusokat felharmonikusnak nevezzük.

Az alábbi példák mutatják a szinuszos- és négyszögjel Fourier-transzformáltját:



4. ábra: Szinuszos jel idő- és frekvenciatartományban [8]



5. ábra: Négyszögjel idő- és frekvenciatartományban [8]

2.2 Harmonikusok definíciója [9]

Az úgynevezett nemlineáris fogyasztók (lásd: 3.1 fejezet) esetén láthatjuk, hogy szinuszos feszültség esetén szinuszos jelaktól eltérő jelalakú áramot vehetnek fel a fogyasztók. Ebben az esetben ezt a jelet felbonthatjuk több szinuszos jel szuperpozíciójára. Míg tisztán szinuszos jel esetén a spektrum egyetlen tagot tartalmaz az alapharmonikus körfrekvencián, addig különböző jelek, különböző komponenseket tartalmazhatnak.

A hálózati vizsgálatok szempontjából a periodikus időfüggvények fontosabb jellemzői és terminológiái:

ω_1	az alapharmonikus körfrekvencia
$\omega_h = h * \omega_1$	a harmonikus komponens körfrekvenciája
$h = \frac{\omega_h}{\omega_1}$	harmonikus rendszám
$h < 1$	szubharmonikus
$h > 1$	felharmonikus
$h = 2, 3, 4, \dots$	harmonikus
$h \neq 2, 3, 4, \dots$	közbenső harmonikus

A teljes harmonikus torzítás (THD) megmutatja számunkra, hogy az adott periodikus jel a felharmonikusoknak köszönhetően milyen mértékben torzul, változik az alapharmonikushoz képest, milyen mértékben tér el a tiszta szinuszos jeltől. A THD jól jellemzi a fogyasztó nemlinearitását.

A teljes harmonikus torzulás (THD) a feszültségre (2) és áramra (3):

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} * 100\% \quad (2)$$

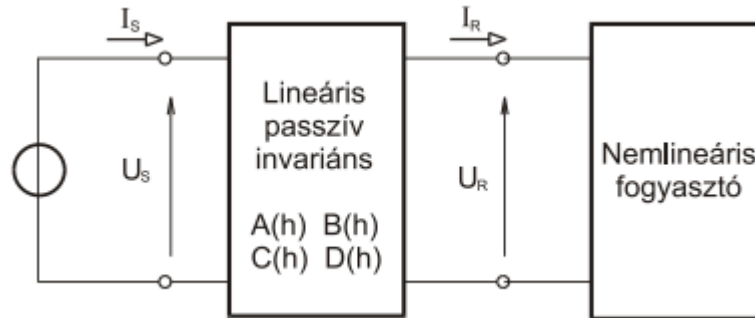
$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} * 100\% \quad (3)$$

Az előbbi összefüggésekben az 1 index az alapharmonikust jelenti, a h index a harmonikus rendszámot. A THD értéke a feszültség esetén egyértelmű és a százalékban kifejezett mérőszámok összehasonlíthatók a különböző feszültség szinteken. Ugyanakkor az áram esetében a százalékos érték sokszor félrevezető lehet az alapharmonikus tényleges értéke nélkül. Ezért itt célszerűbb a THDi dimenziális értékét használni, vagy valamilyen adott áramra végezni a vonatkoztatást (pl. a transzformátor névleges áramára).

2.3 Harmonikusok keletkezése [9]

Nemlineáris fogyasztók harmonikus áramai következtében harmonikus feszültségesés, feszültségtorzulás jön létre a hálózaton. A feszültségben megjelenő, az alapharmonikustól eltérő frekvenciájú komponensek eltorzítják a szinuszos jel alakját.

Tápláljuk ideális szinuszos feszültséggenerátorral a 6. ábra lineáris hálózatát, amelyre egy nemlineáris terhelés csatlakozik.



6. ábra: a harmonikus torzulás keletkezése [9]

A h -adik rendszámra felírva az állandósult energiaátvitel egyenletét a 6. ábra jelöléseit alkalmazva:

$$U_s(h) = A(h) * U_R(h) + B(h) * I_R(h) \quad (4)$$

$$I_s(h) = C(h) * U_R(h) + D(h) * I_R(h) \quad (5)$$

ahol $A(h)$, $B(h)$, $C(h)$, $D(h)$ a lineáris hálózat h -adik rendszámú négyfólus paraméterei. Ha a lineáris hálózatrész egyetlen, l hosszúságú távvezeték, az A , B , C , D állandókra felírható:

$$A(h) = chy(h) * l \quad (6)$$

$$B(h) = Z_0(h)shy(h) * l \quad (7)$$

$$C(h) = \frac{1}{Z_0(h)} shy(h) * l \quad (8)$$

$$D(h) = chy(h) * l \quad (9)$$

ahol $\gamma(h)$ a h -adik rendszámú komplex terjedési együttható, $Z_0(h)$ a h -adik rendszámú komplex hullámimpedancia.

Az egyenletet $U_R(h)$ -ra rendezve:

$$U_R(h) = \frac{1}{A(h)} * U_s(h) - \frac{B(h)}{A(h)} * I_R(h) \quad (10)$$

A nemlineáris terhelésre feltételezzük, hogy:

állandósult állapotban az $u_R(\omega t)$ feszültség periodikus

$$u_R(\omega t) = u_R(\omega t \pm 2\pi) \quad (11)$$

és Fourier sorba fejthető

$$u_R(\omega t) = \frac{U_R(0)}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} \operatorname{Re}[|\widehat{U}_R(h)| * e^{j\varphi(h)} * e^{jh\omega t}] \quad (12)$$

ahol

$$\widehat{U}_R(h) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U_R(\omega t) * e^{-jh\omega t} d\omega t \quad (13)$$

az $U_R(\omega t)$ függvényhez tartozik egy "g" függvénykapcsolattal meghatározott

$$i_R(\omega t) = g[U_R(\omega t)] \quad (14)$$

periodikus áram, amely Fourier sorba fejthető

$$i(\omega t) = i_R(\omega t \pm 2\pi) \quad (15)$$

$$i_R(\omega t) = \frac{i_R(0)}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} \operatorname{Re}[|\widehat{I}_R(h)| * e^{j\varphi(h)} * e^{jh\omega t}] \quad (16)$$

$$\widehat{I}_R(h) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i_R(\omega t) * e^{-jh\omega t} d\omega t \quad (17)$$

További feltétel: az $u_R(\omega t)$ feszültség differenciális megváltozásaihoz tartozó differenciális áramváltozások $i_R(\omega t)$ -ben korlátosak legyenek $u_R(\omega t)$ elegendően nagy tartományában.

Ekkor

$$\widehat{I}_R(h) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g[u_R(\omega t)] * e^{-jh\omega t} d\omega t \quad (18)$$

Behelyettesítve $u_R(\omega t)$ -t

$$\widehat{I}_R(h) = f_{h,n}[\widehat{U}_R(n)] \quad (19)$$

ahol az $\widehat{U}_R(n)$ $n=0-\infty$ -ig szummázandó egy rögzített h áramfelharmonikusra (h rögzített és $n=0, 1, 2, \dots$).

Tehát a fenti egyenlet értelmében a h -adik rendszámú áram létrehozásában az $f_{h,n}$ függvénykapcsolattal jellemzett módon részt vesz valamennyi, az u_R feszültségben meglévő n -edik rendszámú komponens. Például egy adott nemlineáris terhelés 5. harmonikus áramát – ha a vizsgált munkapont környezetében linearizálható a rendszer – az $f_{5,n}$ függvénykapcsolatnak megfelelő módon az

$$f_{5,0}[\widehat{U}_R(0)] + f_{5,1}[\widehat{U}_R(1)] + f_{5,2}[\widehat{U}_R(2)] + f_{5,3}[\widehat{U}_R(3)] + \dots + f_{5,n}[\widehat{U}_R(n)] \quad (20)$$

feszültségek hozzák létre.

Tehát, ha az u_R feszültség csak alapharmonikust tartalmazna, akkor $\widehat{I}_R(h) = f_{h,1}[\widehat{U}_R(1)]$ vagyis tiszta szinuszos feszültségről táplálva a nemlineáris fogyasztót, fellép a h -adik rendszámú áram a nemlineáris karakterisztika következményeképpen. A felharmonikus áramok tehát a nemlinearitás következményei és az impedancia viszonyok olyanok, hogy a nemlineáris fogyasztók által keltett felharmonikus áramok áramgenerátoros jellegűnek tekinthetők.

A lineáris hálózat teljes feszültségtorzulását a szuperpozíció tétel alkalmazásával nyerhetjük a rendszámokénti feszültségtorzulás eredőjeként. Ha felharmonikus szűrést nem alkalmazunk, a hálózaton át záródó áram ($I_R^H(h)$) megegyezik a nemlineáris fogyasztó által keltett ($I_R(h)$) harmonikus árammal: $(I_R^H(h)) = (I_R(h))$ és a hálózat h -adik harmonikus feszültségtorzulása:

$$U_H(h) = I_R(h) * Z_H(h) \quad (23)$$

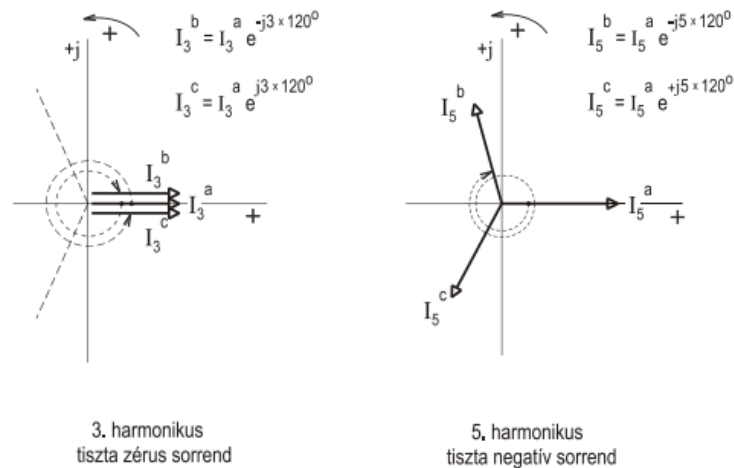
ahol $Z_H(h)$ a hálózatnak a felharmonikus mérési impedanciája.

A feszültségtorzulást okozó felharmonikus áramok általános esetben aszimmetrikusak, ezért rendszámoként lehetnek pozitív, negatív és zérus sorrendűek. A sorrendi áramok a hálózat sorrendi impedanciáin záródva pozitív, negatív és zérus sorrendű feszültségeséseket hoznak létre, amelyekből a hálózat egyes csomópontjaiban az ismert transzformációs mátrix alkalmazásával rendszámoként előállíthatók a felharmonikus fázis feszültségesések.

Általános esetben ismerni kell tehát a feszültségtorzulás meghatározásához a sorrendi felharmonikus áramokat, valamint a hálózat pozitív, negatív és zérus sorrendű felharmonikus impedanciáit.

2.4 Harmonikusok terjedése [9]

A nemlineáris fogyasztók által keltett harmonikus áramok nagysága arányos az alapharmonikus áram nagyságával. A háromfázisú rendszerben a harmonikusok is háromfázisú mennyiségek, csak a rendszámnak megfelelő frekvenciával. Ugyanúgy ábrázolhatók a forgó koordinátarendszerben, mint az alapharmonikus fázorok és a fáziskövetési sorrend a forgásirányban meghatározza a harmonikus szimmetrikus összetevőket, illetve az alapharmonikusokra használt számítási módszereket. Ahogy a 7. ábra is mutatja, a 3. harmonikus zérus, míg az 5. harmonikus negatív sorrendű.



7. ábra: a harmonikusok szimmetrikus összetevőkre bontása

A h-adik harmonikusra:

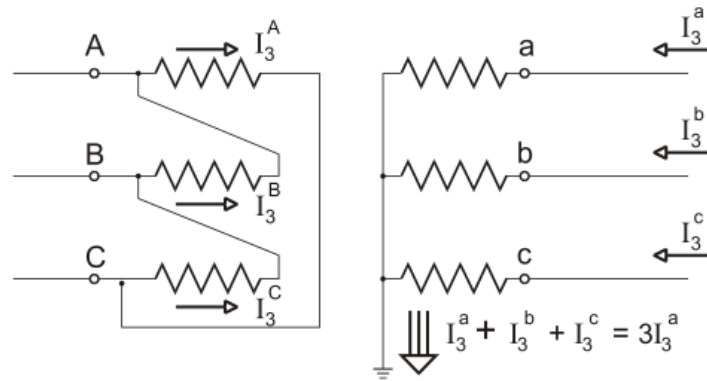
$$I_b^h(h) = I_a^h(h) * e^{-j120^\circ} \text{ és } I_c^h(h) = I_a^h(h) * e^{-j240^\circ} \quad (24)$$

Általánosítva a harmonikusokra a fentieket, a szimmetrikus háromfázisú harmonikusok pozitív, negatív és zérus sorrendű követési sorrendje rendszám szerint a következő:

- zérus sorrendű harmonikusok $h=3n$
- pozitív sorrendű harmonikusok $h=3n+1$
- negatív sorrendű harmonikusok $h=3n-1$

ahol h a felharmonikus rendszám.

A harmonikusok terjedését befolyásolják a transzformátorok kapcsolási csoportjai, illetve a hálózat földelése. A közép/kisfeszültségű transzformátorok delta/földelt csillag kapcsolásúak (D/yn). A zérus sorrendű jelleű harmadik harmonikus a kisfeszültségű oldalról gerjeszti a transzformátort és a közép- és nagyfeszültségű delta tekercsben ki tud alakulni a zérus sorrendű ellengerjesztés. Ez a folyamat a 8. ábra alapján megfigyelhető. Így a közép- és nagyfeszültségű tekercs mintegy rövidzárt alkot a szimmetrikus, tehát zérus sorrendű 3. harmonikusra. A transzformátor kisfeszültségű oldalán a csillagpontban keresztül a nullavezető illetve a földelő vezető a fázisáram harmadik harmonikus tartalmának háromszorosát vezeti. Az is belátható, hogy a transzformátor tekercsvesztése is jelentősen megnövekszik a 3. harmonikus többlet áram következtében.



8. ábra: harmadik harmonikus áramok záródása Dyn transzformátoron

A szimmetrikus 5. harmonikus áram negatív sorrendű és áthatol a középvezettségű hálózat felé (ennek következtében a középvezettségű hálózaton a domináns feszültségtorzulást az 5. harmonikus okozza). Természetesen ez az áram is többletvesztéseget okoz a transzformátorban.

A hálózati elemek L-C karakterisztikája miatt a hálózat kiemelhet, illetve elnyomhat bizonyos frekvenciákat. Ennek következtében előfordulhat, hogy a bejutottnál nagyobb áramok folyhatnak a hálózat egyes elemein.

2.5 Felharmonikus szögek

A harmonikus áramokat szimmetrikus esetben elég az egyfázisú helyettesítéssel számolni: A h-adik harmonikus áram pozitív, negatív vagy zérus sorrendű a $3n+1$; $3n-1$; $3n$ szabálynak megfelelően. Az egyszerű áttekinthetőség érdekében a továbbiakban szimmetrikus esetet (fogyasztó és hálózat feltételezünk). Az áramok összegzése rendszámonként a

$$\operatorname{Re}[I_h] = \sum_i \operatorname{Re}[I_h^i], \operatorname{Im}[I_h] = \sum_i \operatorname{Im}[I_h^i] \quad (24)$$

$$\operatorname{Re}[I_h^i] = \sum_i i_h^i \cos \varphi_h^i, \operatorname{Im}[I_h^i] = \sum_i i_h^i \sin \varphi_h^i \quad (25)$$

$$\varphi_h = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}[I_h]}{\operatorname{Re}[I_h]} \quad (26)$$

összefüggések szerint történik, ahol

i az i-edik fogyasztót jelenti,

φ_h szög az i-edik fogyasztó h-adik harmonikus áramának szöge a h-adik harmonikus feszültséghez képest.

Az áraminvertereknél az alapharmonikus áramhoz köthetjük a felharmonikus áram szögeltolását. Így például ha az alapharmonikus áram φ szöggel késik a feszültséghez képest, a h-adik harmonikus áram jó közelítéssel $h \cdot \varphi$ szöggel lesz eltolva.

Dolgozatomban megvizsgáltam a napelemes rendszereket tartalmazó kisfeszültségű hálózat felharmonikus áramait. A felharmonikus fázorokat ebben az esetben tekinthetjük vektornak, hiszen állandósult állapotban a feszültséghez képest mindig ugyanakkora szöget zárnak be. Vektoralgebrából jól ismert, ha két azonos hosszúságú, de ellentétes irányú vektor összegződik, akkor azok eredője zérus. Ennek értelmében tehát előfordulhat a hálózaton, hogy két felharmonikus áramforrásból származó felharmonikus áramok csökkentik az eredő felharmonikus áram mértékét, akár annulálhatják is egymást.

2.6 Felharmonikusok által okozott problémák [10]

A felharmonikusok különböző hibákat, hibás működést eredményezhetnek a hálózaton.

- Hálózati rezonancia egyes harmonikus rendszámokon, ami feszültség- illetve áram- túligénybevételt okozhat
- Hálózati elemek túlterhelődése, túlmelegedése (kábelek, transzformátorok)
- Téves védelmi működések (pl. bekapcsolási áramlökésre transzformátor differenciálvédelem működés)
- Postai vonalak zavarása (a légvezetékekben folyó zérus sorrendű harmonikus áramok a postai vezetékbe történő átindukálása következtében)
- Gyújtásszögvezérelt berendezések hibás vezérlése

Fentiek közül a kommunális kiefeszültségű hálózatokon elsősorban a melegedés, többletveszteségek, biztosítók kiolvadás, kismegszakító-leoldás, a hálózati rezonancia és a gyújtásszögvezérelt berendezések hibás üzeme jelentenek veszélyt.

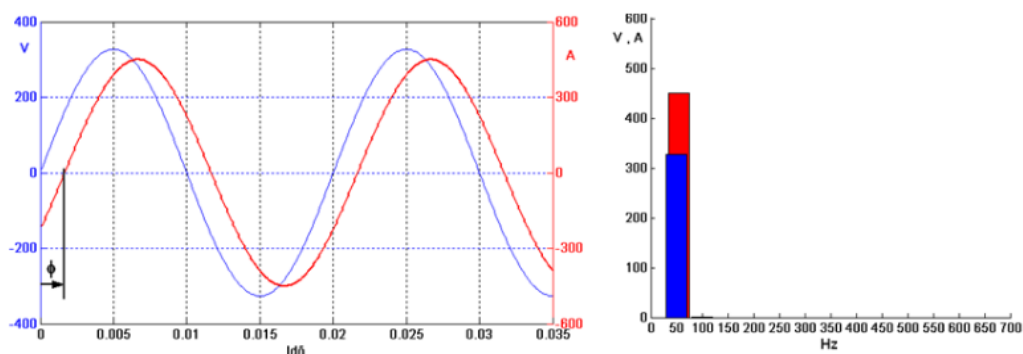
2.7 Hálózati harmonikus források

2.7.1 Fogyasztók [9]

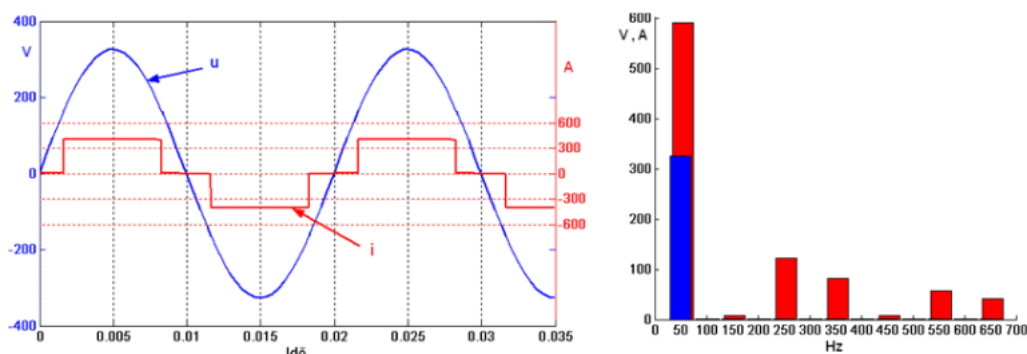
Az első fejezetben láthattuk, hogy a termelés az elmúlt évtizedekben jelentős változáson ment keresztül, s ez a változás folytatódik a következő évtizedekben is. Az energiatermelés mellett jelentős változás lépett fel a fogyasztók esetében is. Elég csak arra gondolnunk, hogy milyen elektronikai arzenál áll rendelkezésünkre manapság otthonainkban.

A szinuszos feszültségű hálózatra kapcsolt fogyasztók felvehetnek szinuszos, illetve attól eltérő alakú áramot is. Napjainkban egy háztartásban vegyesen található ilyen fogyasztók. Az ellenállás jellegű fogyasztók szinuszos feszültség hatására szinuszos alakú áramot vesznek fel. Ilyen eszközök pl. a hagyományos vasaló, izzólámpa stb. Nem lineáris fogyasztónak nevezzük azokat az eszközöket, melyek esetén a hálózati frekvenciától eltérő komponensek is megjelennek. Ilyen fogyasztók pl. LED izzók, számítógépek, inverterek. Tehát a fentiek alapján a fogyasztókat két nagy csoportba sorolhatjuk:

- Lineáris fogyasztók
- Nemlineáris fogyasztók



9. ábra: Lineáris fogyasztó idő- és frekvenciatartományban



10. ábra: Nemlineáris fogyasztó idő- és frekvenciatartományban

A diagramokon láthatóak a lineáris (9. ábra) és nemlineáris (10. ábra) fogyasztók feszültség- és áramdiagramjai az idő- és frekvenciatartományban. Fourier-transzformáció segítségével vihetők át jeleink az időtartományból a frekvenciatartományba és fordítva. Az ábrák jól szemléltetik, hogy a fent leírt módon, a lineáris fogyasztók esetén a hálózati feszültség frekvenciájával azonos frekvenciájú áramot vesz fel a fogyasztó. Nemlineáris fogyasztók esetén a hálózati feszültség frekvenciájától eltérő komponensek is megjelennek.

Napjainkban a nemlineáris fogyasztók rendkívüli módon elterjedtek. Mind az ipari, mind a kisfeszültségű hálózatokon. Ez annak köszönhető, hogy azon eszközök, melyek valamilyen összetettebb elektronikát használnak, ebbe a csoportba sorolhatók. Néhány példa a nemlineáris fogyasztókra:

- Időben állandó: telítődő vasmagot tartalmazó fogyasztók, információtechnológiai berendezések, kompakt fénycsővek és egyéb nem izzószálas világítótestek.
- Lassan változó: fényerő-szabályozós lámpák, fénymásolók, tirisztorral szabályozott berendezések, információtechnológiai berendezések, mikrohullámú sütők, egyéb energiatakarékos háztartási villamos berendezések, stb.
- Gyorsan változó: fordulatszám szabályozott villamos hajtások, impulzusszélesség modulált inverteres hajtások (a terhelési ciklustól függ a besorolás), hegesztőberendezések.

2.7.2 Napelemes rendszer invertere

A napelemes rendszert négy főbb alkotóelemre lehet felosztani. A tetőkön lévő tetőszerkezetre telepített paneleket nevezzük napelemeknek. Több típusú napelem is telepíthető, ilyenek az amorf, a mono- és polikristályos szilíciumból készült napelemek. Napjainkban leggyakrabban kedvező élettartamuk és áruk miatt polikristályos napelemet használnak a gyakorlatban. A panel biztonsági okokból egy DC csatlakozó dobozon keresztül csatlakozik az inverterhez. Az inverter alakítja át a napelem által megtermelt egyenáramot váltakozó árammá. Az egyenáram váltóárammá konvertálása miatt felharmonikus áramok jönnek létre, hiszen az inverter által kiadott áram jelalakja nem tisztán szinuszos alakú. Az inverter AC csatlakozó dobozon csatlakozik a hálózathoz.

Nem véletlenül nevezik az invertert a napelemes rendszer lelkének. Mindamellet, hogy átalakítja az egyenáramot váltóárammá és szinkronizálja a hálózattal, számos egyéb funkcióval is rendelkezik. Beállíthatjuk a hálózatba visszatermelt energia mennyiségét (W), minőségét, pl.: teljesítmény tényezőjét ($\cos \phi$), feszültségét (V), frekvenciáját (Hz). Továbbá beállíthatjuk a kívánt időintervallumot, amikor a

hálózatra szeretnénk táplálni. Egyes inverter fajtáknál lehetőségünk nyílik internetes kapcsolaton keresztül felügyelni a rendszert, szabályozni a termelést.

Az első invertertípusok jellemzően galvanikus leválasztásúak voltak, tehát tartalmaztak egy transzformátort. A jobb hatásfok elérésének érdekében az idő előrehaladtával megjelentek a transzformátor nélküli inverterek. Napjainkban többnyire ezen típusok használatosak, hisz hatásfokuk eléri a 97-99%-ot, élettartamuk pedig a 20 évet. Az élettartam fontos, mivel elvárjuk inverterünktől, hogy a napelemes panel élethosszával nagyjából megegyező ideig legyen képes működni.

3 A felépített hálózat

3.1 Neplan

Egy modern villamosenergia-rendszer rendkívül összetett, bonyolult felépítésű. Ahhoz, hogy eredményesen lehessen vizsgálni, tervezni és különböző szimulációkat futtatni a rendszeren, különböző módszerekre, eszközökre van szükség. A modern technikának köszönhetően kézi számítások helyett sokkal gyorsabb, illetve pontosabb számításokat végezhetünk. A szoftverek segítségével mindemellett, hogy lerövidül a számítási és tervezési idő, lehetőségünk van valós időben vizsgálni a rendszert. Dolgozatomhoz a svájci Neplan AG cég által fejlesztett Neplan szoftverrel dolgoztam. Hazánkban, illetve világszerte az iparban nagy számban használják a szoftvert, gyorsan tanulható, könnyen kezelhető felületének köszönhetően. Számos modul tartalmaz, mint pl. villamos, gáz, víz. A legújabb verzióban beépítve találhatóak az úgynevezett Distributed Generation típusú termelő egységek, melyek segítségével könnyed módon felépíthetőek és szimulálhatóak a megújuló energiaforrásokat tartalmazó hálózati modellek. Továbbá a legújabb verzióban már lehetőség van felhő alapú szolgáltatás igénybevételére. Egy internetböngésző segítségével bárholnan elérhetjük és dolgozhatunk aktuális projektünkön.

A dolgozatban szereplő vizsgálatomhoz a Neplan 5.3.3 verziót használtam. A program számos számítási módot kínál, az egyszerű loadflow számítástól kezdve a harmonikus számításokon keresztül, a beruházási számításokig. Munkám során a loadflow és harmonikus számítás módokat használtam. A program nem ad lehetőséget időbeli változás követésére. Ennek érdekében óránkénti szimulációra volt szükségem.

3.2 Transzformátor

A körzet transzformátorául egy, a valóságban is használatos, külön a modern követelményeknek megfelelő, a megújuló energiatermelés miatt kialakuló decentralizált hálózathoz tervezett Siemens FITformer® REG (Regulated Distribution Transformer) transzformátort választottam. A transzformátor feszültség alatt szabályozható. A megcsapolás $\pm 2,5\%$ és $\pm 5\%$ -nál található. További adatok az alábbi táblázatban szerepelnek. [11]

Névleges teljesítmény	Áttétel	Drop	Kapcsolási csoport	Vasvesztés	Tekercsvesztés
400 kVA	21/0,4	4 %	Dy5	430 W	3 900 W

1. táblázat: A transzformátor adatai

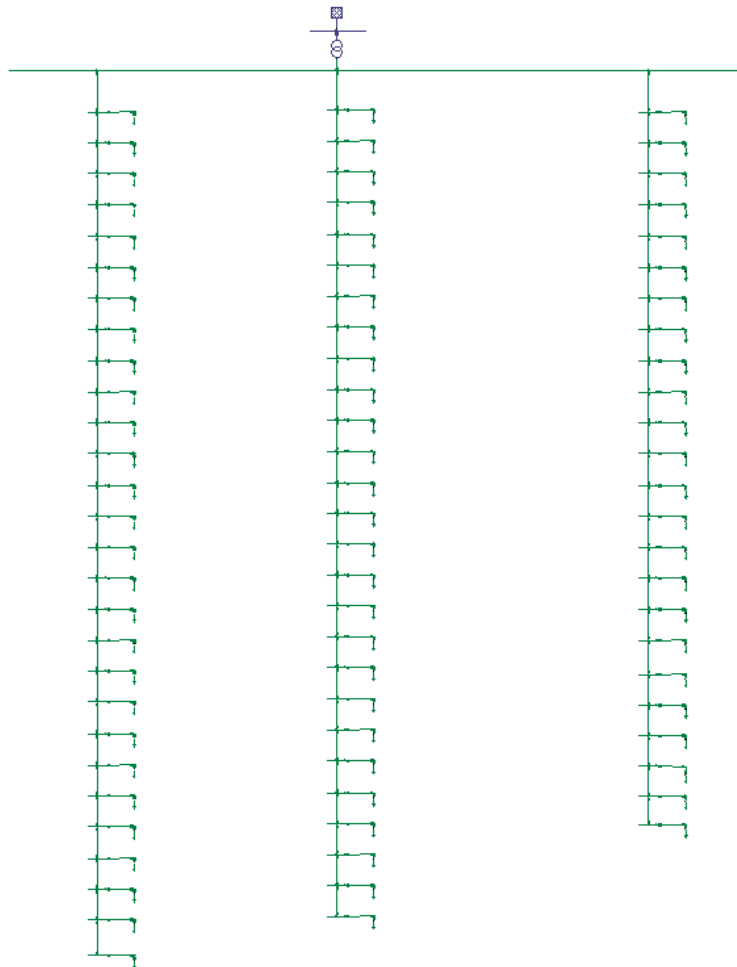
3.3 Hálózat topológia

A hálózat felépítésénél célom volt a valósághoz minél közelítőbb felépítést megvalósítani, továbbá olyan hálózatot szerettem volna építeni, melyen az egyes hibalehetőségek előfordulása valószínűsíthető. A kifeszültségű hálózat esetén háromfázisú légvezetékes szabadvezetékkel feltételeztem, amely tartalmazza a PEN vezetőt is. A hálózat három különböző hosszúságú levélelemből épül fel. Mindhárom elem közvetlenül a transzformátor 0,4 kV-os gyűjtősínjére csatlakozik. Az egyes csatlakozási pontok egymástól 30 méterre helyezkednek el, 95 mm²-es alumínium vezetékkel kapcsolódnak egymáshoz. Ez megfelel a terhelés követelményeinek.

A terhelések 10 méter hosszúságú 16 mm²-es alumínium kábellel kapcsolódnak a csatlakozási pontokhoz. Összesen 80 db terhelést tartalmaz a hálózat. A vezetékek paramétereit a 2. táblázat tartalmazza.

Név	R(1) [Ohm/km]	X(1) [Ohm/km]	R(0) [Ohm/km]	X(0) [Ohm/km]
Al 95 mm²	0,3644	0,316	0,71329	0,918
Al 16 mm²	2,105	0,355	4,2	1,005

2. táblázat: A vezetékek paramétereit



11. ábra: A hálózat topológiája

3.4 Fogyasztók

A fogyasztók modellezésére valós, mért adatokból dolgoztam. Harmonikus modellezés során a szoftver nem enged időbeli szimulációt, ezért negyedórás mérési eredmények alapján határoztam meg a fogyasztók óránkénti teljesítményfelvételét. Ezt követően óránként új szimulációkat futtattam. A mérés alapján 240 db fogyasztót választottam ki véletlenszerűen. A fogyasztókat hármasával csoportosítottam, s a programban egy terhelésként vettem fel. A terhelésekhez 3 fázisú csatlakozást állítottam be.

Egy mai háztartás harmonikus modellezése összetett feladat. Minden egyes eszközöz különböző jelalakú áramokat vesz fel. Dolgozatomban az egyes háztartási eszközöket (pl.: számítógép, TV...) külön modellezve alkottam meg az egyes háztartás csoportokat. Az egyes eszközök páratlan harmonikus áramai jól közelíthetők az alábbi képlettel [12]:

$$I_h = \frac{I_1}{h^\alpha} \quad (23)$$

A h a harmonikus rendszámot, az α pedig az egyes eszközökre meghatározott súlyozást jelöli.

Tanulmány [12] alapján megkülönböztettem 11 darab különböző háztartási eszközt, amelyeknek alapharmonikusai, illetve α -juk rendelkezésemre állt.

Továbbá rendelkezésemre álltak a 13. harmonikusig az egyes áramokhoz tartozó szögek is. Az inverterek esetén azonban csak a 9. felharmonikusig álltak rendelkezésemre mérési adatok, így dolgozatomban emiatt a 9. felharmonikusig vizsgáltam az egyes eszközöket. Minden eszközt úgy tekintettem, hogy ugyanakkora felharmonikus áramot ad le, ugyanakkora szöggel. Ezen adatokból kiszámoltam a további páratlan felharmonikusokat. Az értékek az alábbi táblázatban láthatóak:

	α	I_1 [A]	Szög [°]	I_3 [A]	Szög [°]	I_5 [A]	Szög [°]	I_7 [A]	Szög [°]	I_9 [A]	Szög [°]
Kompakt fénycső	0,60	0,150	0	0,078	80	0,057	150	0,047	235	0,040	250
PC	0,65	0,880	0	0,431	10	0,309	20	0,248	35	0,211	110
LCD monitor	0,66	0,340	0	0,165	35	0,118	65	0,094	120	0,080	180
Laptop	0,41	0,680	0	0,433	55	0,352	110	0,306	170	0,276	240
LCD HD TV	2,58	2,580	0	0,167	25	0,047	215	0,020	240	0,011	165
CRTTV	0,46	0,570	0	0,344	10	0,272	20	0,233	25	0,207	35
Mikro. sütő	1,32	10,49	0	2,460	45	1,254	295	0,804	145	0,577	65
Hűtő.	1,99	1,270	0	0,143	230	0,052	175	0,026	35	0,016	5
Mosógép	0,83	3,360	0	1,350	165	0,883	20	0,668	130	0,542	340
Szárító	0,9	4,300	0	1,600	295	1,010	10	0,746	90	0,595	165
Kazán	2,12	4,820	0	0,469	200	0,159	80	0,078	140	0,046	330

3. táblázat: Háztartási eszközök felharmonikus áramai

A 3. táblázat értékei alapján létrehoztam hat különböző háztartási csoportot. Az egyes háztartások az eszközök különböző kombinációjából épülnek fel, különböző mértékű teljesítményt vesznek fel a hálózathoz. Ahhoz, hogy az eszközök hatását összesítve vizsgálhassam egy adott háztartásban, algebrai alakra hoztam a fenti táblázat értékeit, majd összegeztem őket az adott háztartásra. Ezt követően visszaalakítottam trigonometrikus alakra. Ebből kifolyólag az egyes háztartások felharmonikusai mindig ugyanakkora szöggel rendelkeznek.

Az első fogyasztói „csoport” csak egy hűtőszekrényt tartalmaz, amely 150 W-ot vesz fel a hálózathoz. A második fogyasztói csoport a hűtő mellett egy kazánnal is rendelkezik, melyek összfelhasználása kb. 650 W. A harmadik fogyasztói csoportban a hűtő és kazán mellett egy számítógép LCD monitorral, egy CRT TV, egy laptop és 4 darab kompakt fénycső található, megközelítőleg 1000 W fogyasztással. A negyedik fogyasztói csoport kb. 2000 W-ot vesz fel a hálózathoz, egy kazánt, egy PC-t LCD monitorral, egy laptopot, egy CRT TV-t, egy mikrohullámú sütőt, egy hűtőt és 6 darab kompakt fénycsövet tartalmaz. Az ötödik fogyasztói csoport egy kazán, egy PC LCD monitorral, egy laptop, egy mikrohullámú sütő, egy hűtő és 8 darab kompakt fénycső mellett 2 darab LCD TV-vel rendelkezik. Összesen 3000 W körüli a pillanatnyi felvett teljesítmény. Az utolsó fogyasztói csoport az ötödik háztartáshoz képest kiegészül egy PC-vel és LCD monitorral, illetve üzemel egy mosógép és egy szárítógép is. Így kb. 4000 W lett a felvett teljesítmény. [12]

	Fogyasztó I.	Fogyasztó II.	Fogyasztó III.	Fogyasztó IV.	Fogyasztó V.	Fogyasztó VI.
Kompakt fénycső			4 db	8 db	8 db	8 db
PC			1 db	1 db	1 db	2 db
LCD monitor			1 db	1 db	1 db	2 db
Laptop			1 db	1 db	1 db	1 db
LCD HD TV					2 db	2 db
CRT TV			1 db	1 db		
Mikro. sütő				1 db	1 db	1 db
Hűtő.	1 db	1 db	1 db	1 db	1 db	1 db
Mosógép						1 db
Szárítógép						1 db
Kazán		1 db	1 db	1 db	1 db	1 db
Összesen	150 W	650 W	1000 W	2000 W	3000 W	4000 W

4. táblázat: Háztartási modellek fogyasztása

Ahhoz, hogy a programban fel tudjam használni az alábbi profilokat, százalékos értékben vittem be az adatokat. Természetesen az egyes háztartások eltérő teljesítményfelvétellel rendelkeznek. Ez okból kifolyólag az egyes terheléseket besoroltam a hat háztartás valamelyikéhez. Azt, hogy az egyes terhelések melyik csoportba tartoznak a 6 és 7 óra között felvett teljesítményük alapján határoztam meg. Ebben az időszakban átlagos mondható a terhelésfelvétel az egész napi terhelést nézve, tehát ezzel elkerültem, hogy minimális vagy

maximális fogyasztás alapján kerüljenek be a terhelések az egyes csoportokba. A nap folyamán nem változtattam a terhelések harmonikus csoportjait. Fontos megjegyezni, hogy a programban egy terhelés 3 fogyasztót tartalmaz, emiatt háromszoros értékekkel számolva az alábbi táblázat alapján soroltam be a terheléseket:

Minimum	Háztartás	Maximum
	Háztartás I. (450 W)	< 900 W
901 W <	Háztartás II. (1950 W)	< 2400 W
2400 W <	Háztartás III. (3000 W)	< 4500 W
4501 W <	Háztartás IV. (6000 W)	<7500 W
7501 W <	Háztartás V (9000 W)	< 10500 W
10501 W <	Háztartás VI. (12000 W)	

5. táblázat: Háztartások csoportosítása

A háztartások áram felharmonikusait és szögeit a 6. táblázat értékei alapján definiáltam. Ezt követően megvizsgáltam, hogy az egyes háztartásokra vetített százalékos érték megfelel-e a szabványban előírtaknak. A szabvány az egyes eszközökre határozza meg a felharmonikus értékeket. Az adott háztartás többfajta elektronikus eszközzel is rendelkezik. Ezek különböző eszközök, így különböző osztályba is tartozhatnak. Mivel különböző áramfelvétel jellemezte minden egyes terhelésemet, így az egyes eszközök helyett magát a háztartást vizsgáltam. Ha a háztartás megfelel a szabványban rögzített áram értéknek, akkor a háztartás egyes eszközeinek is meg kell felelnie. A szabvány [13] szerinti A osztály szerint vizsgáltam a háztartásokat. Ahogy korábban már szerepelt a D osztály értékei nem haladhatják meg az A osztály értékeit, illetve a B osztály értékei magasabbak. Tehát, ha egy eszköz megfelel az A osztálynak, akkor megfelel a B osztálynak is. A C osztályban százalékosan adja meg az értékeket, amely megfelelt a 6. táblázatnak. Minden háztartás esetén a maximális hatásos teljesítményfelvételtől számoltam ki az áram effektív értékét. Pl.: Háztartás I. esetén a maximális felvett hatásos teljesítmény 900 W lehetett. Mivel ez három fogyasztót jelent $\cos \phi=0,95$ -ös érték mellett, ezért egy fogyasztónál a teljes áram effektív értéke a hatásos és meddő komponens is figyelembe véve, fázisonként 0,46 A. Ekkor tehát a harmadik harmonikus értékét úgy kaptam meg, hogy az áram effektív értékének a táblázat első sorában szereplő 7,76%-os értékét vettem. Ez a maximális, 900W-os esetben 0,035 A volt. A szabvány A osztálya a harmadik harmonikus esetén 2,3 A-t enged meg, tehát a százalékos értékeken nem kellett változtatnom, hiszen a 2,3 A egy eszközre vonatkozik, míg ebben az esetben maga a háztartás által felvett áram harmadik harmonikusa sem haladja meg a 2,3 A-t. A többi háztartás esetén is ezzel az eljárással végeztem az értékek meghatározását. A Háztartás VI.-nál nem volt felső korlát a fogyasztókra. A legnagyobb teljesítményfelvétel 36,887 kW volt. Ebben a háztartási modellben 21 fogyasztót különböztettem meg. A legnagyobb fogyasztás esetén se haladta meg az összesített áramfelvétel jelentősen a szabványban egy eszközre rögzített értékeket.

Háztartás	I ₃	Szög [°]	I ₅	Szög [°]	I ₇	Szög [°]	I ₉	Szög [°]
Háztartás I. (450 W)	7,76%	230	2,81%	175	1,44%	35	0,87%	5
Háztartás II. (1950 W)	6,87%	207	1,87%	98	0,87%	120	0,68%	339
Háztartás III. (3000 W)	5,84%	43	6,06%	74	1,91%	105	0,98%	218
Háztartás IV. (6000 W)	9,44%	51	1,36%	322	3,49%	151	0,76%	40
Háztartás IV (9000 W)	8,29%	53	0,96%	256	3,38%	165	0,12%	224
Háztartás VI. (12000 W)	4,31%	49	3,08%	19	4,80%	139	0,77%	225

6. táblázat: Háztartások áram felharmonikusai

3.5 Napelem – Inverter

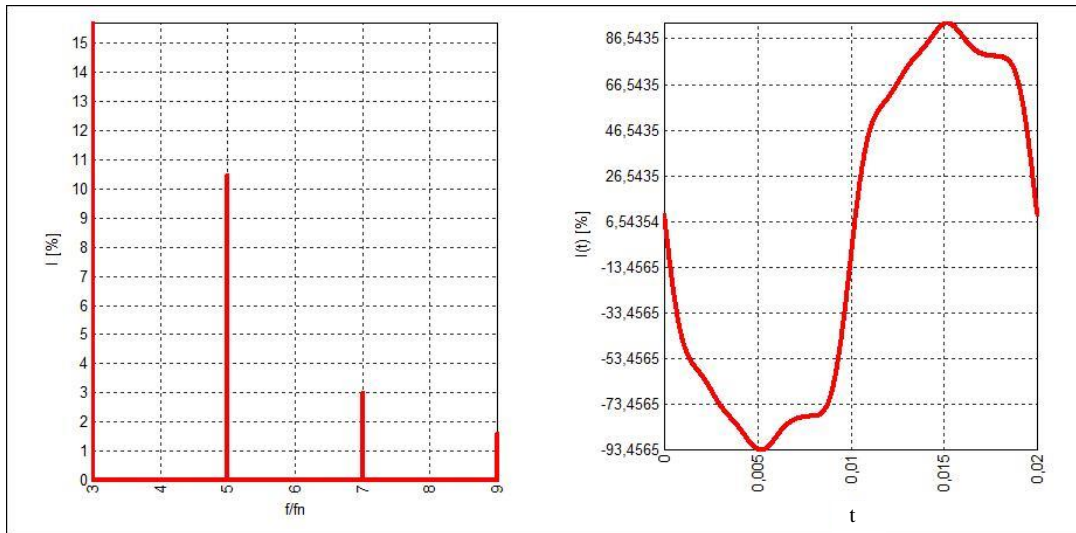
A napelemes rendszerek hálózatra termelt teljesítményéért, illetve annak felharmonikus tartalmáért a már bemutatott módon az inverter a felelős. Ennél fogva a felharmonikus szimulációk esetén az inverterrel foglalkoztam. Magyarországon a különböző szabályozások következtében optimális esetben jellemzően az éves energia fogyasztást 90%-ban lefedő napelemes rendszereket telepítenek. Az ország időjárási és éghajlati viszonyait figyelembe véve 1 kWp teljesítményű napelemes rendszer kb. 1100 kWh energiát termel évente. Tehát az éves fogyasztást elosztva 1100-zal, majd a kapott eredményt megszorozva 0,9-del megkapjuk a telepítendő napelemes rendszer nagyságát kWp-ben. Természetesen ehhez rendelkezésre kell állnia a megfelelő nagyságú felületnek. (Tetőn, egyéb helyen.) Emellett a fenti számítási módszer déli tájolás esetén optimális. Feltételeztem, hogy a szimulálandó transzformátorkörzetben rendelkezésre áll a megfelelő terület a napelemek számára, illetve déli tájolású vagy azzal ekvivalens méretű rendszert telepíttek.

A fenti számítási módszer értelmében tehát a negyedórás mérési eredményekből kiszámoltam az éves fogyasztást a fogyasztóknál, majd ennek függvényében határoztam meg a napelemes rendszer méretét az egyes terhelésekhez. Mivel a terhelések három egyfázisú fogyasztót jelentenek, így a napelemes rendszereket is úgy méreteztem, hogy mind a három fogyasztó rendelkezik egy-egy napelemes rendszerrel, s ez a három rendszer jelent a modellben egy napelemes rendszert. Ennek okán az invertereket háromfázisra csatlakoztattam $\cos \phi=1$ -es teljesítménytényezővel. Dolgozatomban egy tanulmány [14] mérési adatait használtam fel, mind a felharmonikus értékekre, mind a szögekre.

5 kW alatti rendszerek rendszerint egy fázison csatlakoznak a hálózatra, míg 5 kW felett 3 fázison kell csatlakoztatni a termelő egységeket. [15] A mérési adatokból [16] kiderül, hogy az inverterek által kibocsátott felharmonikus áramokra nincs nagy jelentőséggel az éppen aktuális teljesítményleadás. Természetesen az áramok nagyságára igen, de egymáshoz viszonyított értékükben nincs jelentős változás. Dolgozatomban tehát nem változtattam a napi teljesítményváltozásnak megfelelően a harmonikus áramok egymáshoz viszonyított értékeit. A tanulmány a 9. harmonikusig tartalmaz mérési adatokat inverterekre. Munkám során két inverter típust különböztettem meg. Egy egyfázisút (Inverter I.) és egy háromfázisú invertert (Inverter III.).

I_3	Szög [°]	I_5	Szög [°]	I_7	Szög [°]	I_9	Szög [°]
15,7%	174,4	10,5%	184,8	3%	202,2	1,6%	168,8

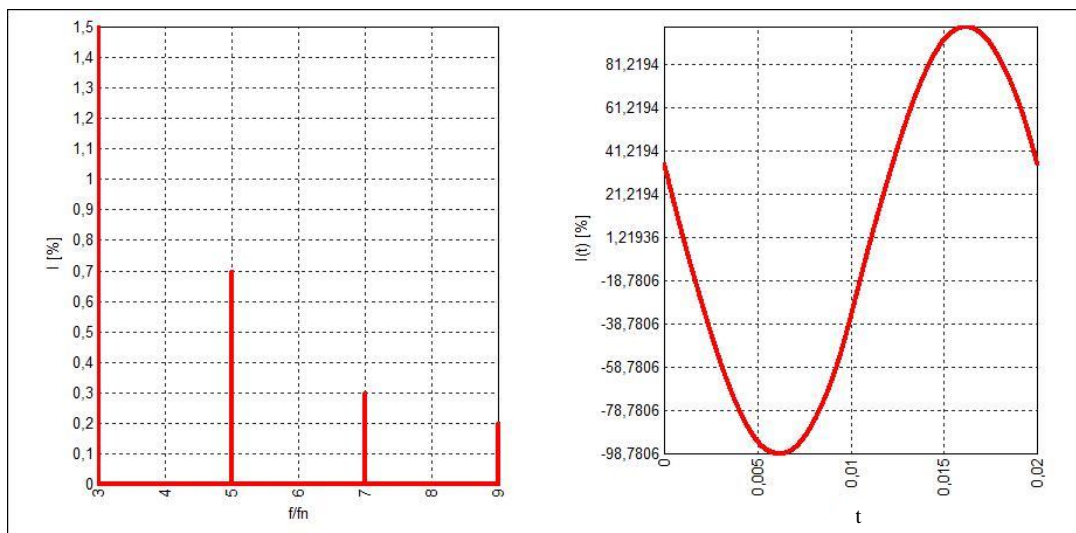
7. táblázat: Inverter II. felharmonikus áramai és szögei



12. ábra: Inverter II. áram diagramja az frekvencia- és időtartományban

I_3	Szög [°]	I_5	Szög [°]	I_7	Szög [°]	I_9	Szög [°]
1,5%	159,9	0,7%	171,2	0,3%	155,5	0,2%	159,3

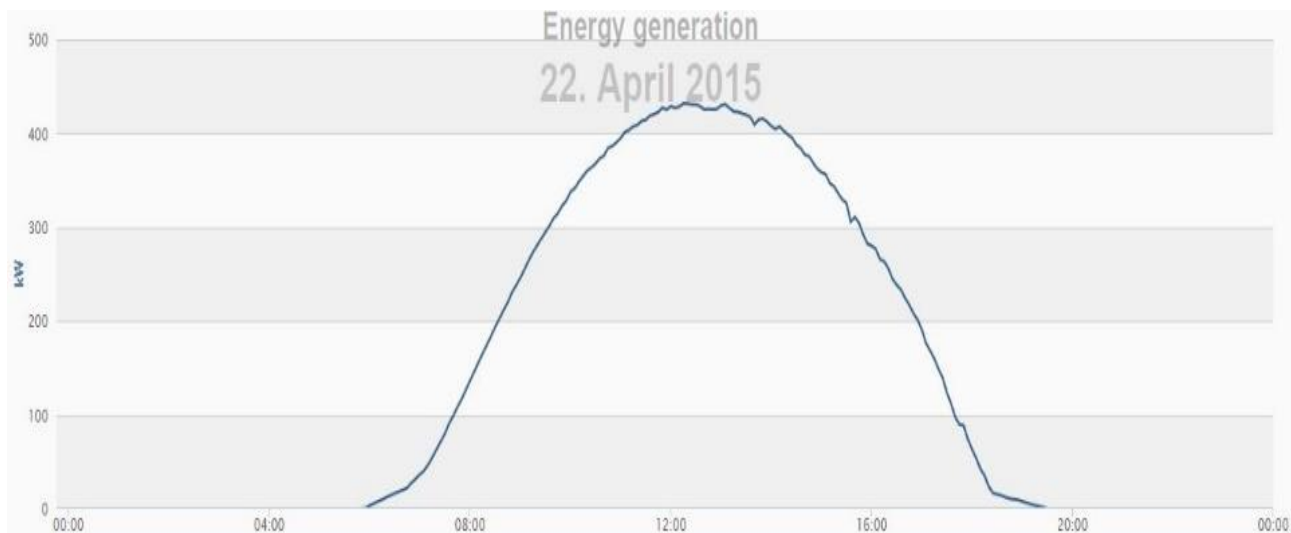
8. táblázat: Inverter III. felharmonikus áramai és szögei



13. ábra: Inverter III. áram diagramja az frekvencia- és időtartományban

Az értékek és a diagramok alapján belátható, hogy az egyes inverterek idődiagramjai valamelyest torzultak a felharmonikusoknak köszönhetően. Belátható az is, hogy ennek ellenére egy darab inverter nem okoz jelentős felharmonikus torzítást a hálózaton. Természetesen nagyobb penetráció esetén akár jelentős hatást érhetnek el.

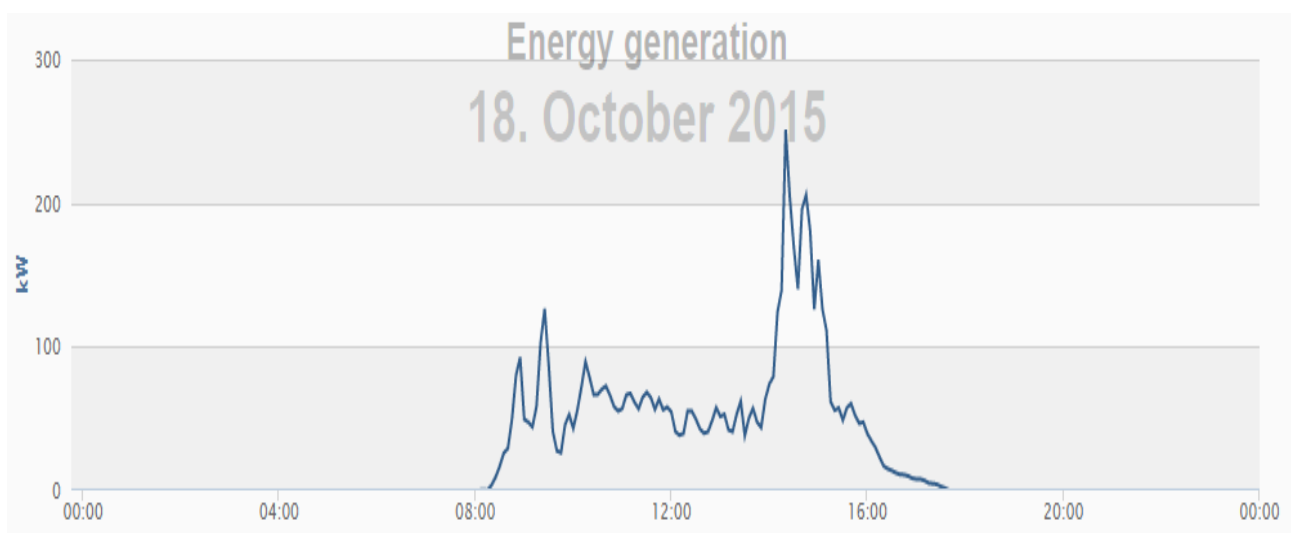
A napelemes rendszer teljesítmény leadásához egy valóságos, Kisteleken működő 505,09 kWp napelemes erőmű adatait vettem alapul. Két napot választottam ki. 2015. április 22-én a mérési adatok alapján napsütéses nap volt, melyen az erőmű az egyik legmagasabb teljesítményt táplálta vissza az egész éves viszonylatban. A másik nap 2015. október 18-ra esett. A napelemes rendszer görbéje, illetve az Országos Meteorológiai Intézet jelentése szerint is egészen délután két óráig borult, felhős idő volt.



14. ábra: Napelem rendszer profilja napsütéses napon

6:30	7:30	8:30	9:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30	17:30	18:30
0,033	0,159	0,383	0,487	0,583	0,820	0,853	0,831	0,768	0,645	0,472	0,245	0,031

9. táblázat: Napelemes profil szorzói napsütéses napon



15. ábra: Napelem rendszer profilja felhős napon

6:30	7:30	8:30	9:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30	17:30	18:30
0,00	0,00	0,03	0,17	0,13	0,14	0,10	0,08	0,32	0,10	0,03	0,01	0,00

10. táblázat: Napelemes profil szorzói felhős napon

A görbe alapján meghatároztam szorzókat minden egyes órára s ezek alapján állítottam be az inverter teljesítmény leadását a szimulációban. (0-6 és 20-24 óra között nem történt teljesítmény leadás egyik esetben sem, így ezen adatokat nem tartalmazza a táblázat.) Mivel a hálózati modellemben a felvett teljesítmény a fogyasztás óránkénti átlagolásából kaptam, így a napelem leadott teljesítményénél minden óra esetén mindig az adott óra felénél olvastam le a diagramot. Tehát amikor a szimulációban pl. 9-10 óra közötti időintervallumot vizsgáltam, akkor a napelemes rendszerek teljesítmény leadását napsütéses időjárás esetén a délelőtt fél tízes szorzó (0,487), felhős időjárás esetén (0,17) alapján állítottam be.

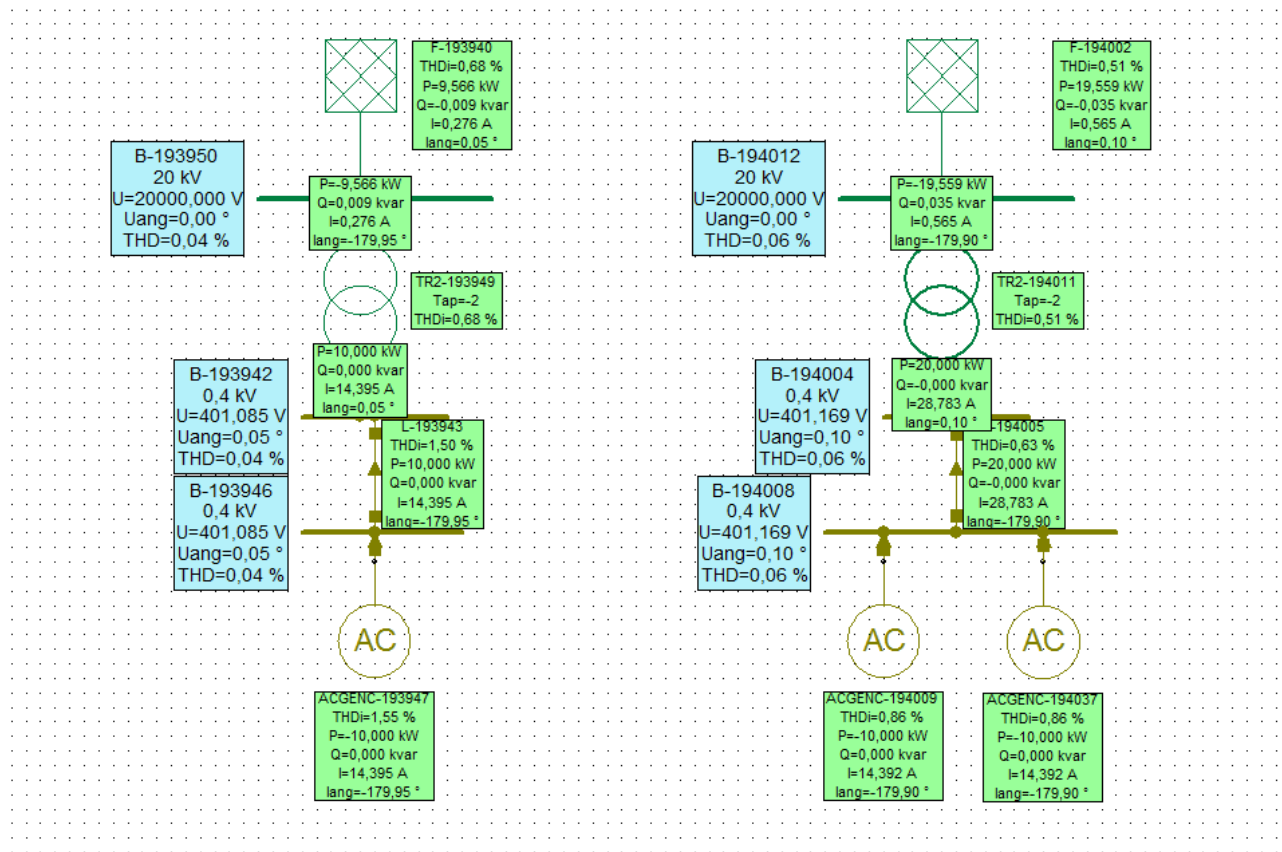
4 Szimuláció

A szimulációk során megvizsgáltam, hogy milyen mértékű torzítást okoznak a napelemes rendszer inverterei a hálózat áramára, hogyan változnak az egyes felharmonikus áramok szögei. Minden elrendezés harmonikus szimulációja előtt futtattam egy loadflow szimulációt, hogy megbizonyosodjak afelől, hogy a hálózat feszültség és áram értékei a MSZ EN 50160 szabványban [17] (továbbiakban: szabvány) előírt határokon belül vannak-e. Ha mindent rendben találtam, akkor futtattam csak a harmonikus szimulációkat. Természetesen nem szabad megfeledkezni a fogyasztók eszközeinek harmonikus torzításáról sem, így 0%-os PV penetráció esetén is megvizsgáltam a felharmonikus viszonyokat. A napelemes rendszer karakterisztikájából adódóan 6-19 óra között nem történik teljesítmény leadás, így 0% penetrációt leszámítva ezt az időszakot nem vizsgáltam.

4.1 A felharmonikus szögek számítása a programban

Ahhoz, hogy a hálózatszámító szoftver által kapott eredményeket ki tudjam értékelni, szükséges volt a program működésének, számítási módjának megismerése. A dolgozat szempontjából a legfontosabb kérdés, hogy az egyes felharmonikus áram szögeket mihez viszonyítja a program. Mivel a szoftver kézikönyve erről nem ad tájékoztatást, így ennek megállapítására a legjobb megoldásnak egy nagyon egyszerű próba hálózat felépítése bizonyult.

Két elrendezést vizsgáltam. Az első a napelemes - a fentebb már említett - Dyn5 típusú transzformátoron keresztül csatlakozott a mögöttes hálózatra. A második elrendezés esetén csatlakoztattam egy másik napelemes rendszert a gyűjtősínre. A transzformátor kiefeszültségű gyűjtősíne után elhelyeztem egy elhanyagolható impedanciájú vezetékét. Villamos paramétereit úgy állítottam, hogy a modellezés szempontjából ne jelentsen változást, a vezetékszakasznak csak a program szempontjából volt jelentősége, ugyanis csak így tudtam vizsgálni az egyes felharmonikus áramokat. A szoftver a harmonikus szimulációk eredmény táblázatában nem jeleníti meg az alapharmonikus szögeket, de a vizsgálat szempontjából erre nincs is szükség. A vezetékek esetében a program megkülönböztet I1 és I2 áramokat, illetve I1 és I2 szögeket. Az áramok értéke nem különbözik, a szögek pedig 180° -kal térnek el egymástól. Ez abból fakad, hogy a program a vezetéken megkülönböztet a vezetéken befolyó (I1) illetve kifolyó (I2) áramokat, így azok egymáshoz képest értelemszerűen 180° -kal vannak eltolva. Természetesen ugyanarról az áramról van szó, csak ellentétes referencia irányt megválasztva.



16. ábra: A próbahálózatok elrendezési

A 16. ábra első (bal oldali) elrendezés esetén a 11. táblázatban láthatóak a bevitt adatok és eredmények. Minden felharmonikus szögére igaz, hogy ha az inverter szögét ϕ -nek jelöljük, akkor a vezetéken folyó árama ϕ^*h+180 képlettel megkapható. Fentebb már említettem, hogy a vezetéken befolyó és kifolyó áramokat a program megkülönbözteti. A képletben szereplő 180° -os elforgatás pont emiatt szükséges.

Felharmonikusok	Inverter I. szöge [°]	Vezetéken folyó áram szöge [°]
3. felharmonikus	82,6	67,8
5. felharmonikus	71,3	176,5
7. felharmonikus	61,2	248,4
9. felharmonikus	18,5	-13,5

11. táblázat: Az első (bal) elrendezés adatai

A második esetben két napelemes rendszer - ahogy az a 16. ábra esetén látható - ugyanakkora teljesítményt táplál a hálózatba. A felharmonikus hálózatba táplált felharmonikus áramok nagysága is megegyezik, egyedül ezek szögeiben van eltérés. A könnyed megértés miatt az azonos rendszámú felharmonikusok szögei 90° -kal térnek el egymástól.

Felharmonikusok	Inverter I. áram szöge [°]	Inverter II. áram szöge [°]	Vezetéken folyó áram szöge [°]
3. felharmonikus	0	90	135
5. felharmonikus	10	100	-85
7. felharmonikus	70	70	-50
9. felharmonikus	110	110	90

12. táblázat: A második (jobb) elrendezés adatai

Ha a két áramvektor eredőjének szögét tekintjük, akkor beláthatjuk, hogy ismételten igaz az előbbi ϕ^*h+180 összefüggés. Pl.: A 3. felharmonikus esetében a felharmonikus áramok eredője 45° . Ha ezt a 45° -ot helyettesítem be a ϕ helyére, akkor ismételten igaz lesz az összefüggés. Ebből levonható az a következtetés, hogy a program a 0° -hoz méri az egyes szögek mértékeit. Ez a referencia pont pedig a mögöttes hálózat szögét jelenti. Abban az esetben, ha 0 A a felharmonikus áram értéke, akkor a szoftver automatikus -90° -os szöggel jelenik meg az eredményekben. Ha ilyen eset fordult elő, az külön jeleztem a dolgozatban.

A szoftverben csak felharmonikus áramforrásokat definiálhatunk, amely nem tükrözi teljes mértékben egy valós inverter működését. A program azonban nem ad lehetőség felharmonikus feszültségforrás megadására. Ez a módszer nem modellezi pontosan a valós fizikai működést, mert az inverter visszahat a feszültségre, kis mértékben pontatlan a szimuláció. Ez azonban nem jelent akkora eltérést, hogy a kapott eredményeket ne tekinthessük jó közelítésnek.

4.2 Egy inverter hatása a felharmonikus szögekre a távolság és teljesítmény függvényében

Ebben az esetben megvizsgáltam, hogy a háromfázisú és egyfázisú inverterek különböző távolságra elhelyezve milyen hatással vannak a felharmonikus áramok szögeire. A szimulációk során először megvizsgáltam, hogy a hálózat felharmonikus mentes, azaz a fogyasztók nem injektálnak a hálózatba felharmonikus áramokat, akkor hogyan fognak változni a felharmonikus áramok szögei a távolság függvényében. Ezt követően hasonló szimulációt futtattam, de már figyelemmel kísértem a terhelések felharmonikus áramait is. A szimulációkat a 12-13 óra közti időszakra futtattam, hiszen itt a legjelentősebb az inverterek teljesítmény visszatáplálása, tehát ebben az időintervallumban képesek leginkább befolyásolni a hálózat szögeit. A vizsgálatot elvégeztem mind a három inverter típusra. Az invertereknek 0-10 kW-ig - 2 kW-tal növelve szimulációnként - fix teljesítményt adtam meg.

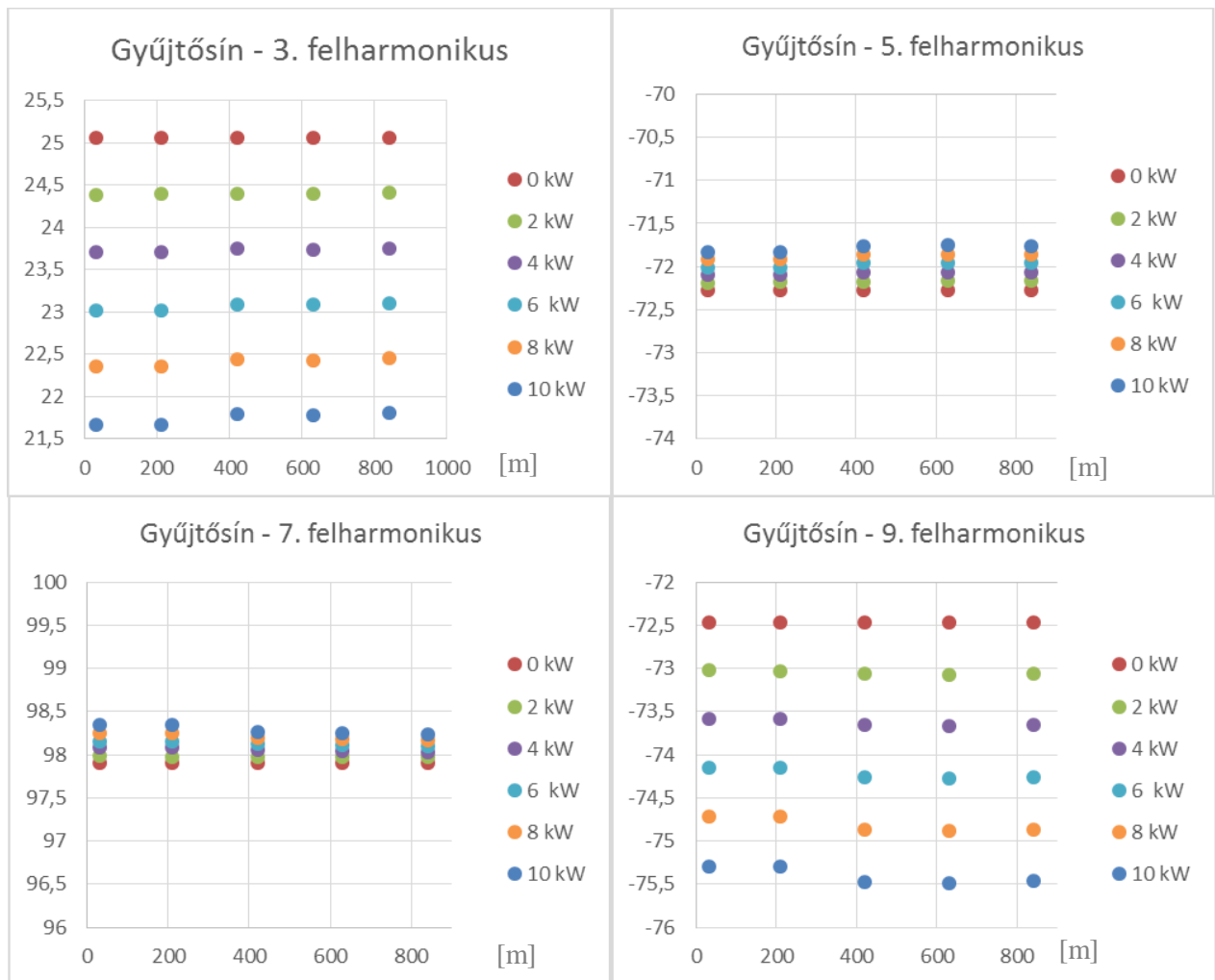
4.2.1 Fogyasztói felharmonikus mentes eset

Mivel ebben az esetben a fogyasztók nem vesznek fel felharmonikus áramokat és ebből következően nem is táplálnak felharmonikus áramokat a hálózatba, az inverterek által a hálózatba táplált felharmonikus áramok a transzformátoron keresztül visszaáramlanak a mögöttes hálózatba. Ennek következményeképpen a hálózaton található felharmonikus áramok szögei meg fognak egyezni az inverterek felharmonikus áramainak szögével. A teljesítmény változtatása ezt nem fogja befolyásolni. Ha egyre közelebb helyeztem el az invertert a transzformátorhoz, akkor bizonyos mérési pontok szögei 0° -ra adódtak. Ez nyilvánvaló, hiszen pl. ha az inverter a transzformátor kisméretű gyűjtősinéhez legközelebbi vezeték szakaszra kapcsolódik, akkor a felharmonikus áramok egyből a mögöttes hálózat irányába folynak, nem érintik a többi mérési pontot, emiatt 0° -ra adódik ezen mérési pontok szöge.

4.2.2 Fogyasztói felharmonikusokkal vizsgált eset

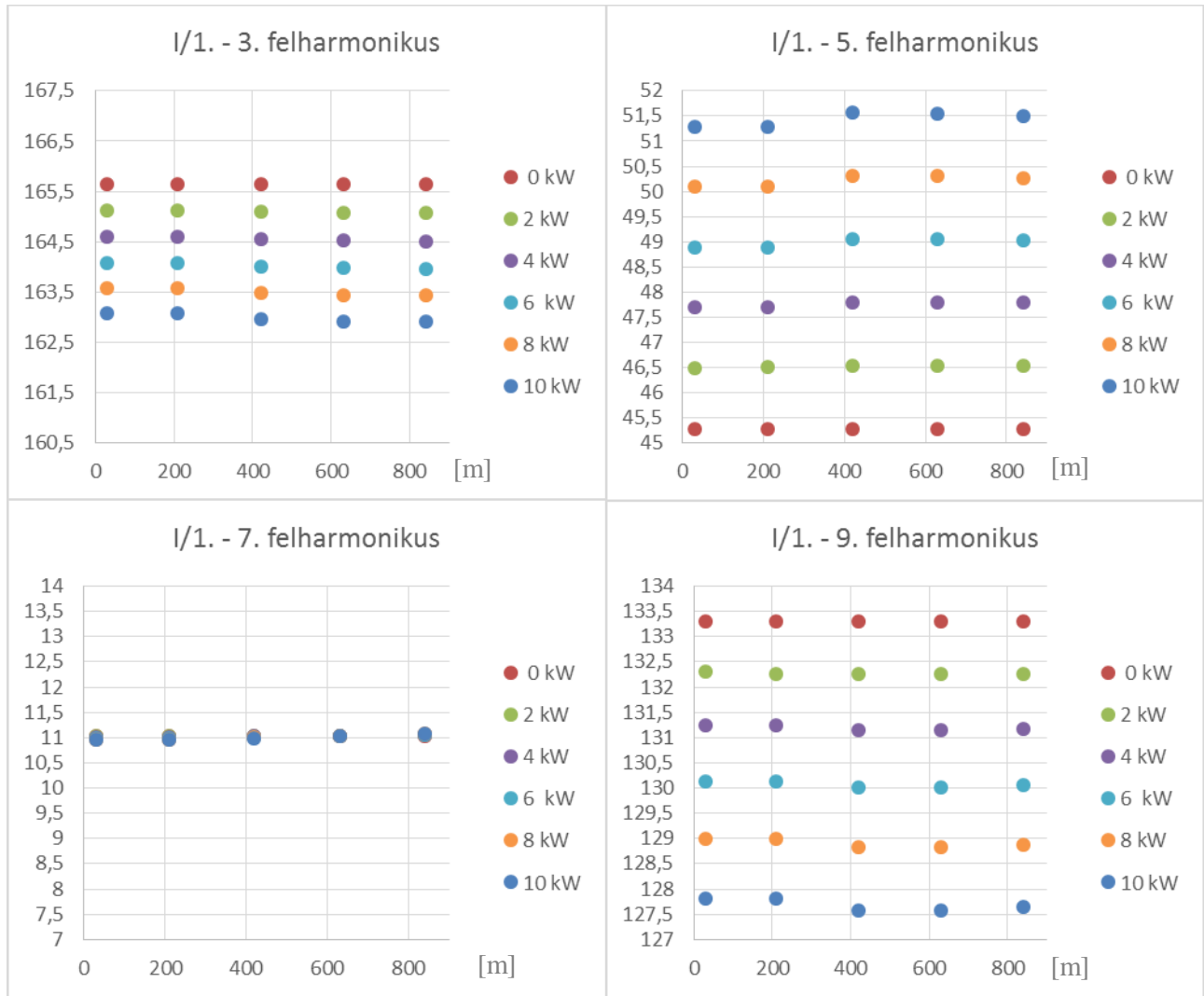
4.2.2.1 Inverter III. hatása

Ebben az esetben már az egyes fogyasztók, terhelések is injektálnak felharmonikus áramokat a hálózatba. A hálózatot a háromfázisú inverter változtatásával (elhelyezés és teljesítmény) vizsgáltam. A grafikonokon (17. ábra) látható, hogy egy darab inverter elhelyezése nem jelent jelentős változást a gyűjtősín felharmonikus áramainak szögeire. Konstans teljesítménybetáplálás esetén szinte nem is változik a felharmonikusok szöge a távolság függvényében. Adott villamos távolság mellett növelve a teljesítménybetáplálást látható, hogy a 3. és 9. felharmonikus áramok szögei kb. $2,5\text{-}3^\circ$ -ot változtak. Az 5. és 7. felharmonikus kb. $0,5^\circ$ -ot változott a teljesítmény betáplálás növelésével.



17. ábra: Gyűjtősín felharmonikus áram szögeinek változása az Inverter III. hatására

A fentiek függvényében megvizsgáltam, hogyan változnak az első mérési pont felharmonikus áramainak szögei. A diagramokról (18. ábra) hasonló konklúzió vonható le, mint a gyűjtősín esetén. Ha az inverter teljesítményét nem változtattam, csak a helyét a leágazáson, akkor a mérési pont szögére nem volt jelentős hatással. Ha a teljesítménybetáplálás nagyságát módosítottam, de az inverter elhelyezését nem, akkor a harmadik felharmonikus szögei kb. $2,5\text{-}3^\circ$ -kal változtak, míg az 5. és 9. felharmonikusé ennél jelentősebben, kb. 6° -kal.



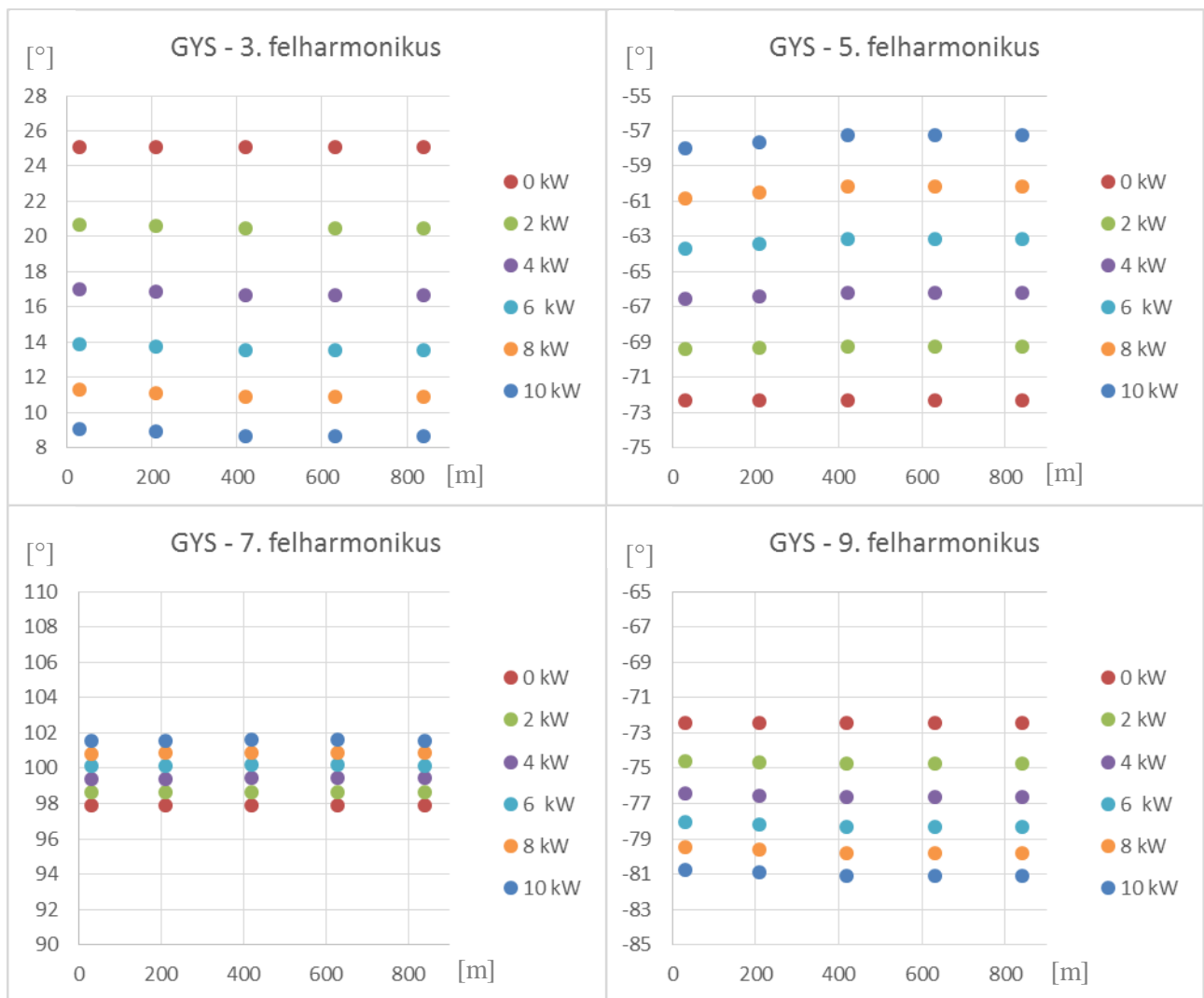
18. ábra: I/1. mérési pont felharmonikus áram szögeinek változása az Inverter III. hatására

További szimulációs eredményeket nem jelenítettem meg a dolgozatban, ugyanis, ha másik leágazáson helyeztem el az invertert, - hasonló módon, ahogy tettem azt az első leágazás esetében – a felharmonikus áramai hasonló hatással voltak a hálózatrész felharmonikus szögeire. Továbbá nem jelenítettem meg más leágazás mérési pontjait sem, ugyanis azokra nem volt hatással az egy darab inverter.

4.2.2.2 Inverter I. hatása

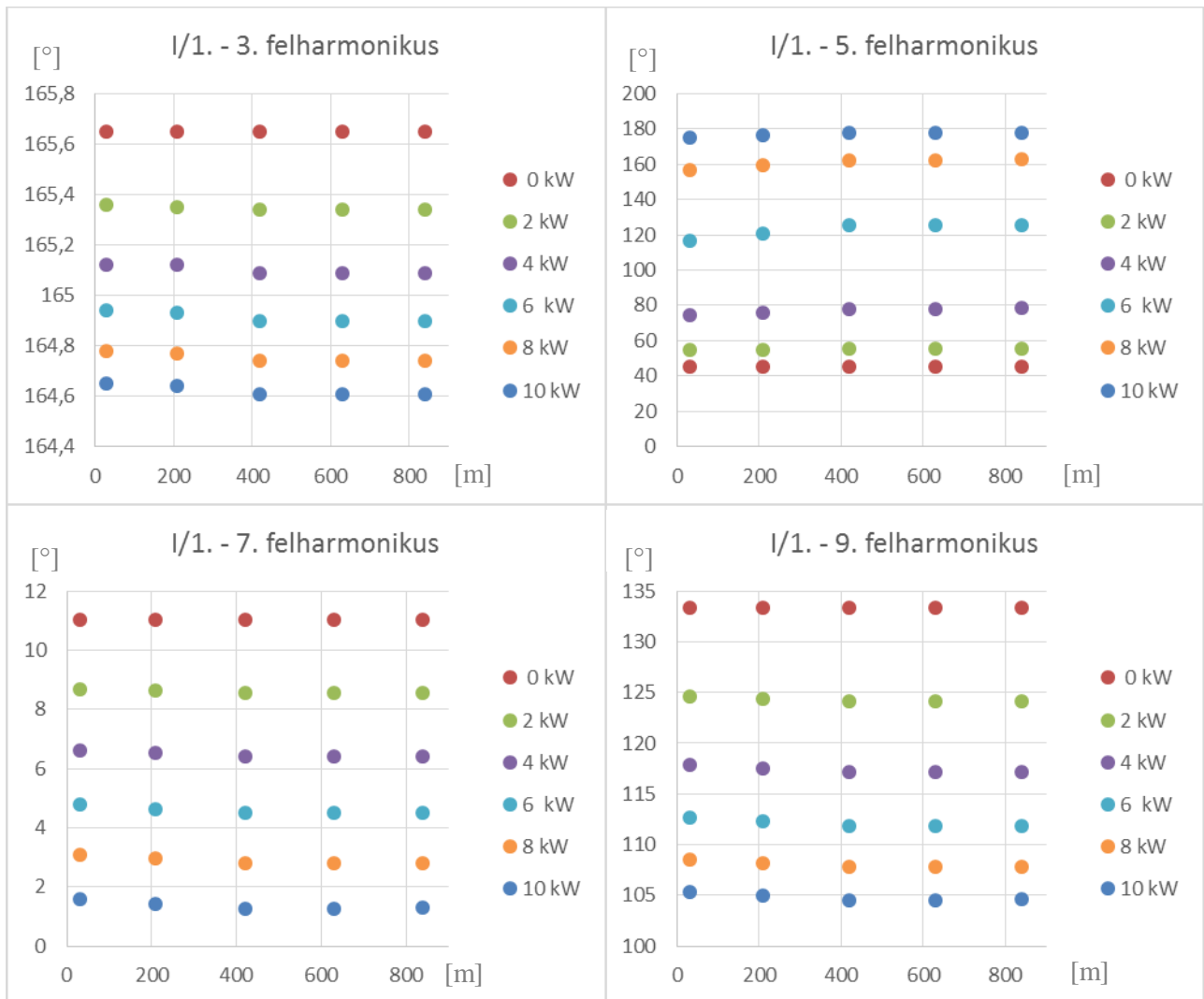
Az 5.3.3-as fejezet vizsgálatával azonos vizsgálatot végeztem, azzal a különbséggel, hogy az Inverter III. helyett az Inverter I.-t, azaz az egyik egyfázisú inverter pozícióját, illetve teljesítmény leadását változtattam. Fontos megjegyezni, hogy az Inverter I. ugyan egyfázisú, de ahogy a „Napelem – Inverter” részben is szerepelt, megfelelő átskálázás után háromfázisúan csatlakoztattam. A 12. ábra és 8. táblázat alapján láthatjuk, hogy ez az inverter jelentősebb felharmonikus áramokat táplál a hálózatba. Nyilvánvalóan, minél nagyobb az áram értéke, annál nagyobb hatást, változást tud kelteni a hálózat felharmonikus áramainak szögéinél.

Az előző vizsgálatot követően - a vártak megfelelően – látható, hogy az inverter elhelyezésének távolsága azonos teljesítmény betáplálás esetén nincs jelentős befolyással a transzformátor ksfeszültségű gyűjtősínének felharmonikus áramainak szögére. Láthattuk, hogy az Inverter III. esetében 2-3°-kal változott a gyűjtősín felharmonikus áramainak szöge, addig az Inverter I. esetében ez már sokkal jelentősebb. A 3. és 5. felharmonikus esetében ez kb. 15° is lehet a napelemes rendszer nélküli esethez képest. A 7. felharmonikus esetén kb. 4°-os, míg a 9. felharmonikus esetén kb. 8°-os eltérés a jellemző.



19. ábra: Gyűjtősín felharmonikus áram szögének változása az Inverter I. hatására

Az első leágazás első mérési pontját (I/1.) vizsgálva ellenben az Inverter III. esethez képest jóval nagyobb eltérések jöttek létre a teljesítmény betáplálás növelésével. Az inverter távolságának növelésével a szögek, ismételten nem változtak jelentősen. A 3. felharmonikus esetén nem olyan jelentős a változás, maximum 1° . A 7. felharmonikus esetén már nagyobb, kb. 10° -os eltérésről beszélhetünk a teljesítmény növelésének hatására. A 9. felharmonikus vizsgálata során az eltérés kb. 20° -nak adódott. A legnagyobb eltérés az 5. felharmonikusnál található, közelítőleg 135° -ot figyeltem meg. Ez az eredmény fakadhat az egyfázisú inverter háromfázisú csatlakoztatásából is.



20. ábra: I/1. mérési pont felharmonikus áram szögeinek változása az Inverter I. hatására

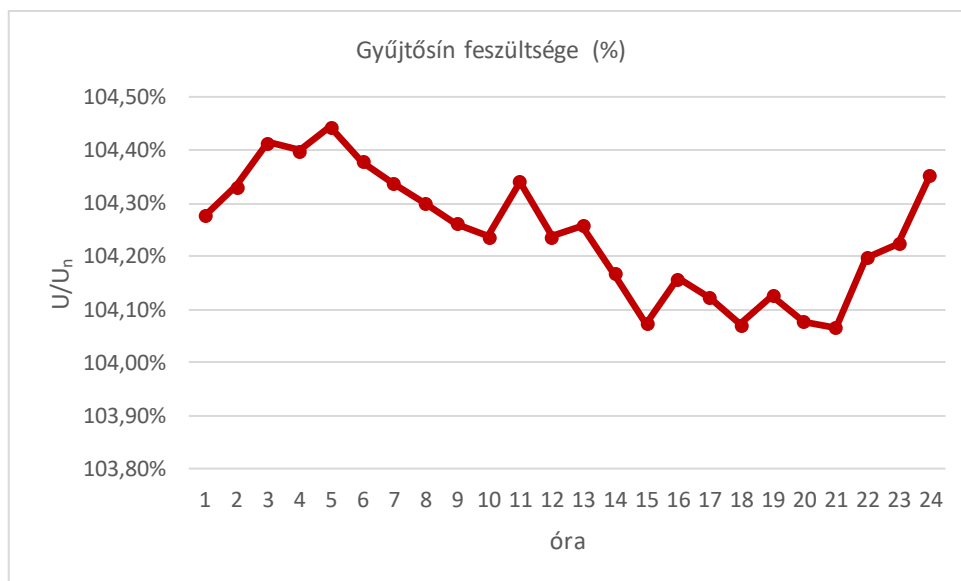
4.3 0%-os PV penetráció 24 órás vizsgálata

Első lépésként napelemes rendszerek nélkül vizsgáltam a hálózatot. A számítást azért volt szükséges elvégezni, hogy megvizsgálhassam, hogy hogyan alakulnak a feszültségviszonyok, megfelelő-e a felépített hálózat, illetve felharmonikus értékek is a szabvány előíráson belül vannak-e. Továbbá megvizsgáltam, hogy a transzformátort szükséges-e terhelés alatt szabályozni.

4.3.1 Loadflow szimuláció

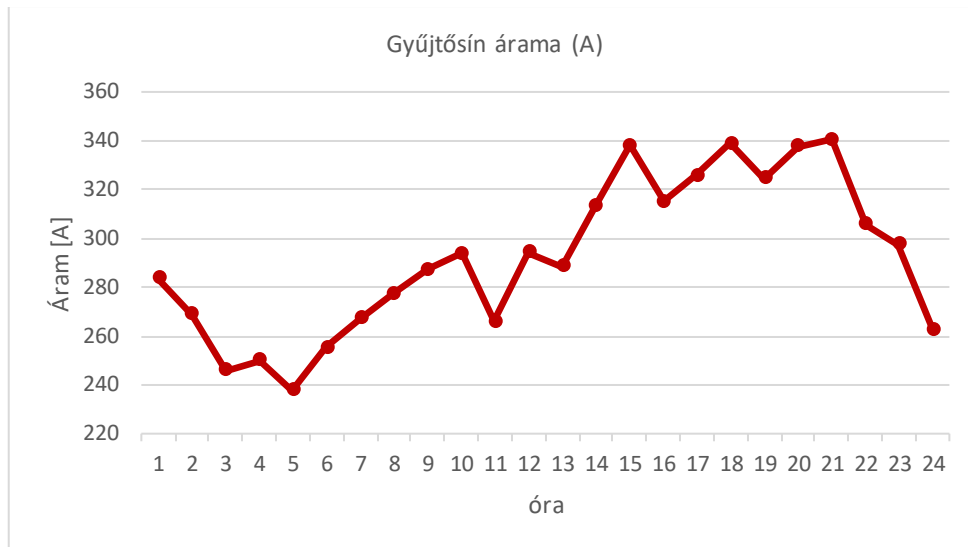
A szimulációk eredményeképpen elmondható, hogy transzformátort ebben az esetben nem szükséges terhelés alatt szabályozni. A megcsapolást „-2”-es állásba állítva, az egész nap folyamán megfeleltek a hálózat feszültségértékei a szabványban rögzítetteknek.

Mivel a 0%-os PV penetráció nem tartalmaz napelemes rendszert, így a hálózat feszültségértékei a transzformátornál a legmagasabbak, míg a leágazások végén a legalacsonyabbak. A 21. ábra alapján látható, hogy a transzformátor kismegfeszítésű gyűjtősínén mért feszültségértékek nem haladták meg a szabvány értékeit. Ugyanez elmondható a végpontokra is. Megállapítható, hogy az első végpont feszültsége 14-15 óra között a legalacsonyabb, 378,554 V (94,64%). A második végpont legalacsonyabb feszültsége szintén 14-15 óra között jelentkezik 385,1 V-tal (96,28%). A harmadik végpont legalacsonyabb feszültsége 381,121 V (95,28%) 17-18 óra között.



21. ábra: Kismegfeszítésű gyűjtősín feszültsége 0%-os PV penetráció esetén

A gyűjtősín áram értékeit vizsgálva látható a napi terhelési görbe. A vártaknak megfelelően egyfajta inverzét képi a feszültséggörbének. Jól látható a görbe alapján, hogy a csúcspotyosztás az esti, míg a legalacsonyabb fogyasztás a hajnali órákra tehető.



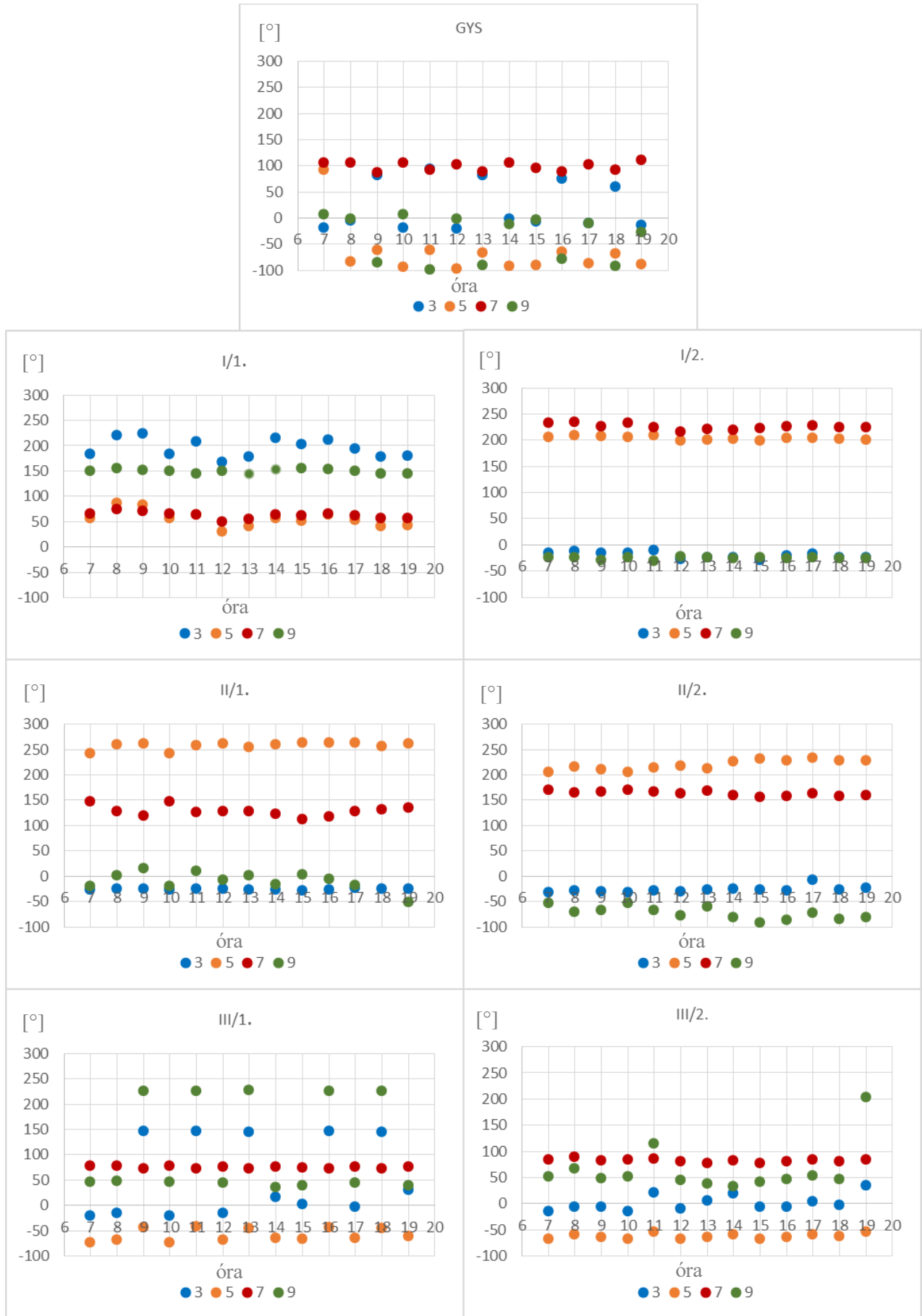
22. ábra: Kiszűrés nélküli gyűjtősín árama 0%-os PV penetráció esetén

Összességében tehát megállapítható, hogy a hálózat alkalmas egy valós kiszűrés nélküli transzformátor körzet modellezésére, elegendő a szabványban megállapított feszültség minőség előírásoknak.

4.3.2 Harmonikus szimuláció

Harmonikus szimulációt is egy napos időintervallumra futtattam. Ahogy már a fentiekben említettem, ez azért volt fontos, hogy megvizsgálhassam az egyes terhelések harmonikus viselkedését. Napelemes rendszerek nélkül is jelentős felharmonikus áramok jelenhetnek meg a hálózaton a fogyasztók különböző elektronikus eszközei révén, ennek megfelelően a felharmonikus szögek is változnak a nap folyamán. A szimuláció minden egyes vezetékszakaszt vizsgált. Az eredmények megjelenítésénél törekedtem az átláthatóbb eredmény megjelenítésre, így a leágazások, első és felezőpontjához tartozó vezetékszakaszát jelenítettem meg táblázatos formában. Jelölésük értelemszerűen, pl.: I/1. az első leágazás első pontjához tartozó vezetékszakasz, I/2. az első leágazás középpontjához tartozó vezetékdarab. Továbbá az eredményeknél megjelenik GYS névvel a transzformátor kiszűrés nélküli gyűjtősíne is. Az eredmények bemutatásánál szorítottam a megértést minél inkább elősegítő magyarázó ábrák megjelenítésére.

A fogyasztóktól származó felharmonikus szennyezés a szabvány előírásain belül maradt, tehát a hálózat felharmonikus szempontból is tovább vizsgálható. A 23. ábra mutatja a felharmonikus szögek változásait a nap folyamán. Megfigyelhető, hogy az egyes felharmonikus szögek leágazásonként más-más értéket vesznek fel. Látható, hogy a III. leágazás felharmonikus áramainak szögei közt a legnagyobb a szórás a nap folyamán. Nem szabad megelégedni, hogy az egyes terhelések 6 különböző csoportba lettek beosztva. Az azonos csoportba tartozó terhelések a nap folyamán mindvégig azonos szögekkel injektálnak felharmonikus áramokat a hálózatba. Ez hasonlóképp igaz az inverterekre is. Ebből kifolyólag érdemes úgy felfogni a vizsgálatot, mint egy „worst case”, legrosszabb eset vizsgálata. A szögek ennek ellenére változtak, hiszen pl. ha egy nagyobb csoportba tartozó fogyasztó teljesítményfelvétele lecsökken, akkor az általa betáplált felharmonikus áramok is kisebbek lesznek. Tehát a szögek számításába is kisebb súllyal számít bele. Nem szabad megelégedni az értékek vizsgálatával, hogy a felharmonikus szögek 360°-onként periodikusak, így pl. a $-90^\circ = 270^\circ$.



23. ábra: 0%-os PV penetráció felharmonikus áramainak szögei a mérési pontokon

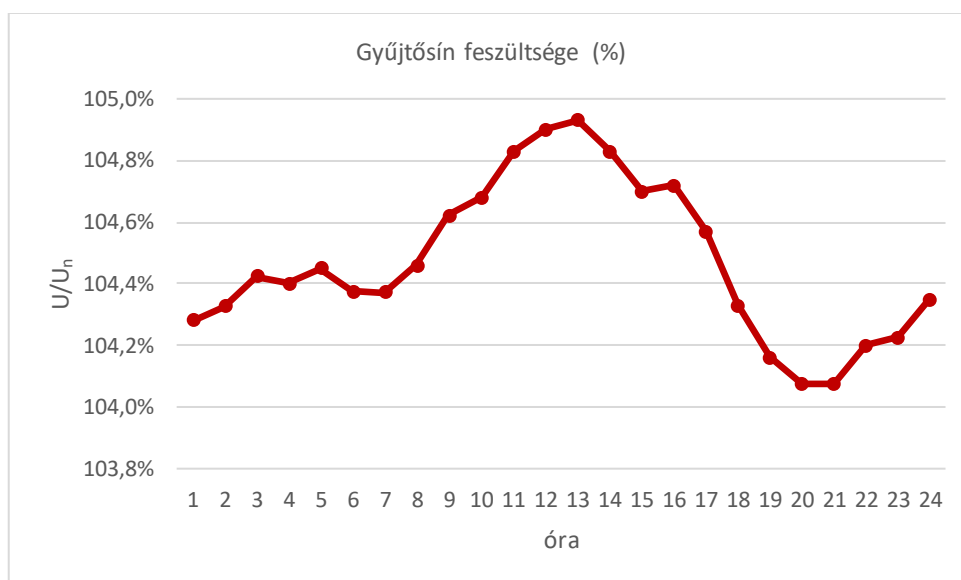
4.4 25%-os PV penetráció 24 órás vizsgálata

25%-os penetráció munkám során azt jelentette, hogy minden negyedik háztartás rendelkezett hálózati méretű kiserőművel. A napelemes rendszerek méretezését már korábban részletezett módon tettem meg. Ezt követően háromfázisú invertereket csatlakoztattam (Inverter III.) a hálózatra. A vizsgálatot elvégeztem napsütéses napra és felhős napra is.

4.4.1 Az inverterek hatása napsütéses napokon

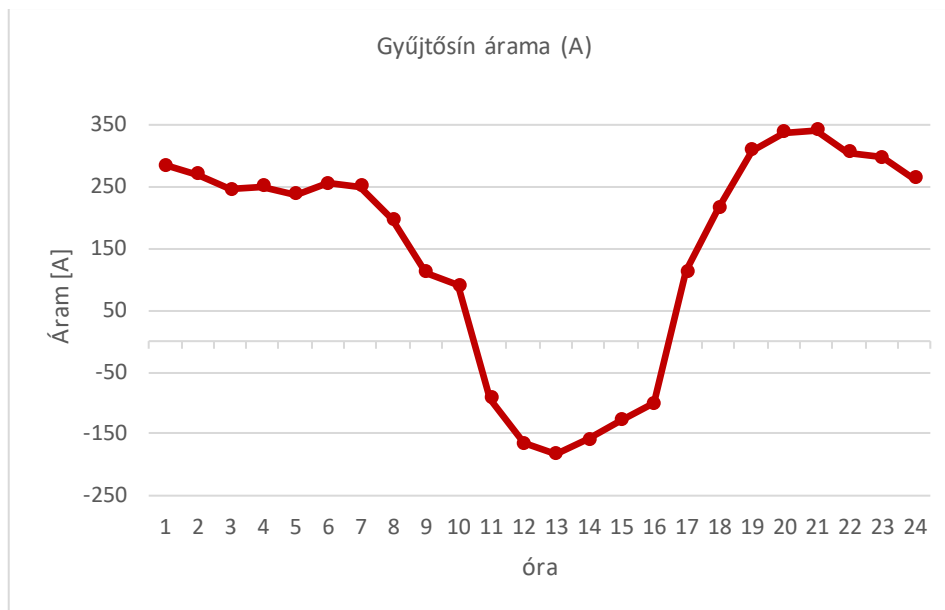
4.4.1.1 Loadflowszimuláció

A napelemes rendszer működési ideje miatt csak 6 és 19 óra között vizsgáltam a rendszert, hiszen az azon kívüli intervallumban nem történik változás, mert az inverter nem táplál vissza a hálózatba és a transzformátor megcsapolását sem kellett állítanom. A napelemes rendszerek termelése miatt megemelkedett a feszültség az inverterek csatlakozási pontján. Ez az egészhálózat feszültség szintjét megemelte. Az emelkedés azonban nem volt olyan mértékű, hogy a transzformátor megcsapolásán változtatni kellett volna.



24. ábra: Kisfeszültségű gyűjtősín feszültsége 25%-os PV penetráció esetén napsütéses napon

A 24. ábrán látható a gyűjtősín feszültségének alakulása a nap folyamán. Ha összevetjük a 0%-os PV penetráció gyűjtősínen megjelenő feszültséggel, megfigyelhető, hogy a 4-5 óra között jelentkező maximum a maga 417,6 V-jával (104,45%) 25% PV penetráció esetén messze elmarad a csúcserkékektől. Jól látható, hogy a gyűjtősín feszültségének maximuma a dél, illetve az azt követő egy-két órában jelentkezik. Ez nem csoda, hiszen a napelemes rendszer invertere ekkor táplálja be a legnagyobb teljesítményt a hálózatba. A 25. ábrán megfigyelhető, hogy megfordul a teljesítmény áramlásának iránya. A transzformátoron keresztül kisfeszültségű oldalról a közepfeszültségű oldalra áramlik a teljesítmény.



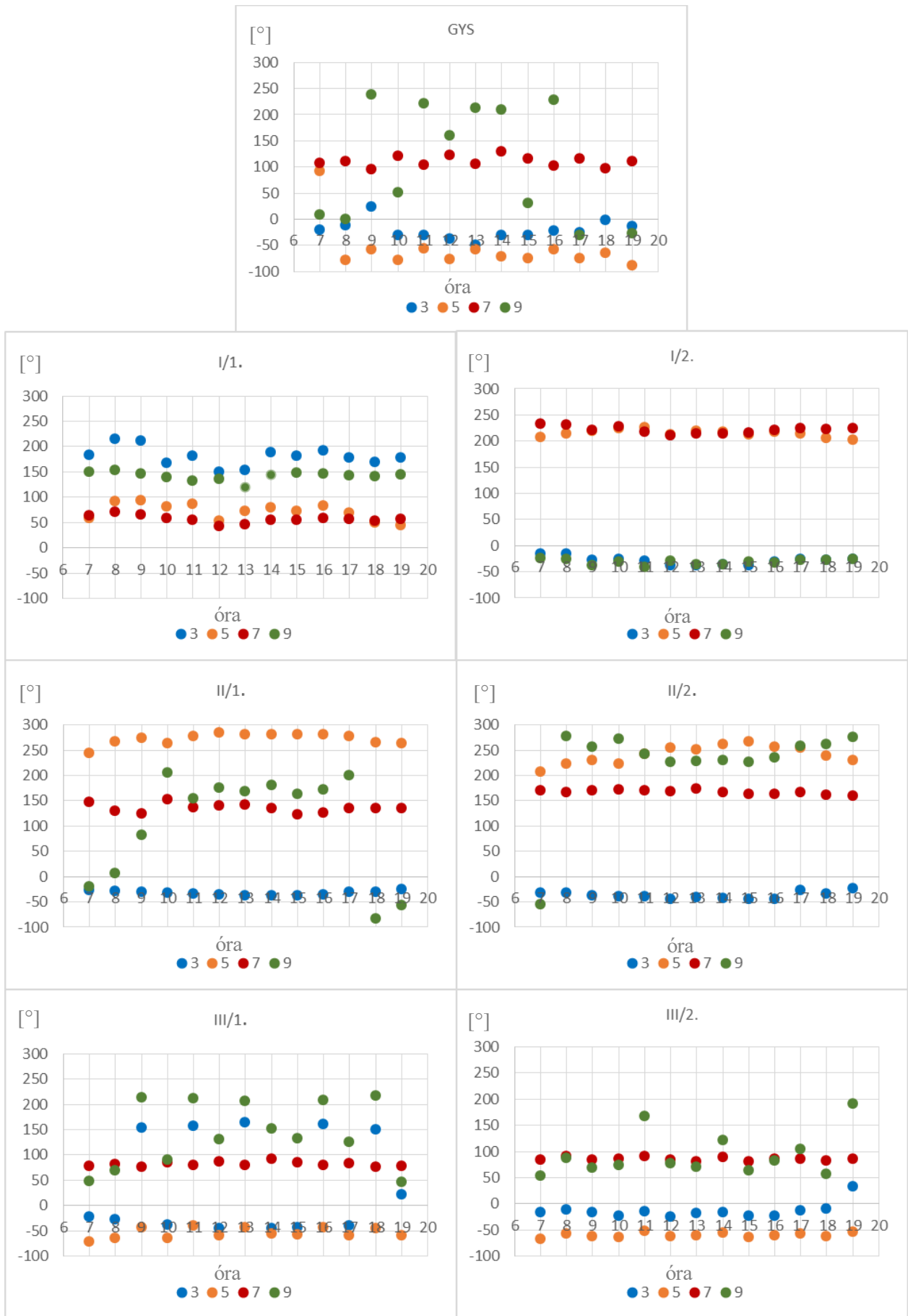
25. ábra: Kisfeszültségű gyűjtősín árama 25%-os PV penetráció esetén napsütéses napon

A fentiek értelmében 25%-os penetrációt is megengedhetünk a hálózaton, hiszen a napelemes rendszerek nem változtattak olyan mértékben a hálózat feszültség és áramértékein, hogy az a szabványelőírásen kívül essen.

4.4.1.2 Harmonikus szimuláció

A szimulációk futtatását követően minden egyes felharmonikus értéket megvizsgáltam, hogy megfelel-e a MSZ EN 50160 szabványban rögzített értékeknek. Ezt követően megvizsgáltam, hogy a vizsgált csatlakozási pontok THD-ja mekkora, illetve milyen változás következett be a 0%-os PV penetrációhoz képest. Az egyes felharmonikus feszültségértékek minden esetben megfeleltek a szabványban rögzítetteknek. A csatlakozási pontok THD értéke mindvégig 8% alatt maradt.

Ha összehasonlítjuk a 25%-os PV penetráció szögeinek változását (26. ábra) a 0%-os penetrációval (23. ábra), akkor megfigyelhetjük, hogy a legnagyobb változás a 9. felharmonikus szögeiben történik. A legszembetűnőbb változás a II. leágazásnál található. Azokban az órákban emelkedik meg leginkább a felharmonikus áramok szögének értéke, melyekben a napelemes rendszer a legnagyobb teljesítményt táplálja vissza a hálózatba. Ha a III. leágazást tekintem, ott is a 9. felharmonikus szögeinek értéke változik a legszembetűnőbben. A többi felharmonikus áram szögeinek értéke is változik a nap folyamán, azonban nem olyan jelentős mértékben, mint azt a 9. felharmonikus szögei tették. A transzformátor kisfeszültségű oldalán található gyűjtősínt vizsgálva megállapítottam, hogy a napelemes rendszerek hatására csökkent a harmadik felharmonikus áram szögeinek a szórása. Sokkal egyenletesebb karakterisztika látható. A 9. felharmonikus értékei a napelemes rendszerek működési idejében jelentősen eltérnek a 0%-os penetrációhoz képest. Az is megfigyelhető, hogy a III. leágazás szögei nagyban befolyásolják a gyűjtősín szögeinek értékét. Ez abból ered, hogy a III. leágazáson elhelyezésre kerül egy viszonylag nagy teljesítményű inverter, mely nagyobb teljesítményt képes a hálózatba táplálni, így a leágazás áramai is megnöttek, melynek következtében a felharmonikusok is. A gyűjtősín áramában így tehát nagyobb súllyal szerepelnek.



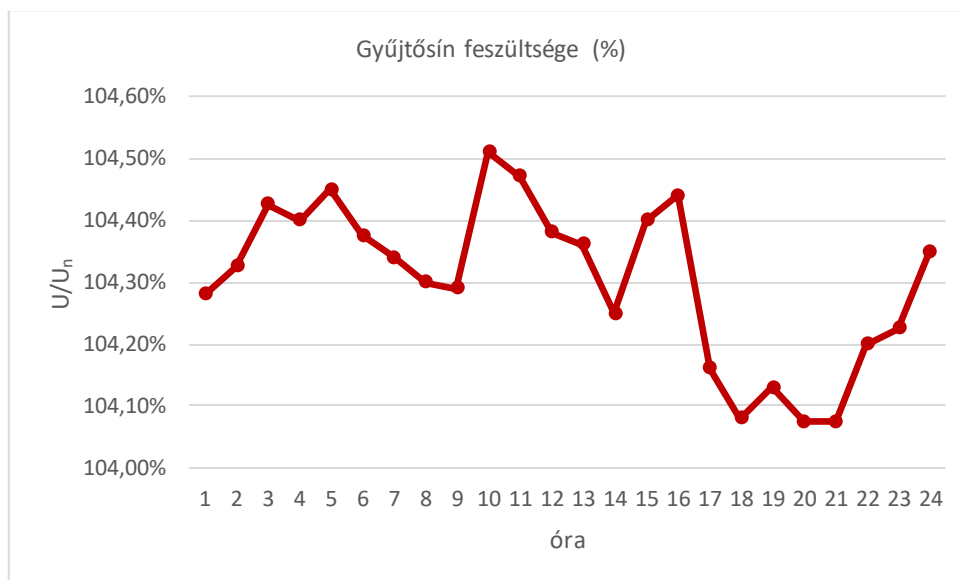
26. ábra: 25%-os PV penetráció felharmonikus áramainak szögei a mérési pontokon napsütéses napon

4.4.2 Az inverterek hatása felhős napokon

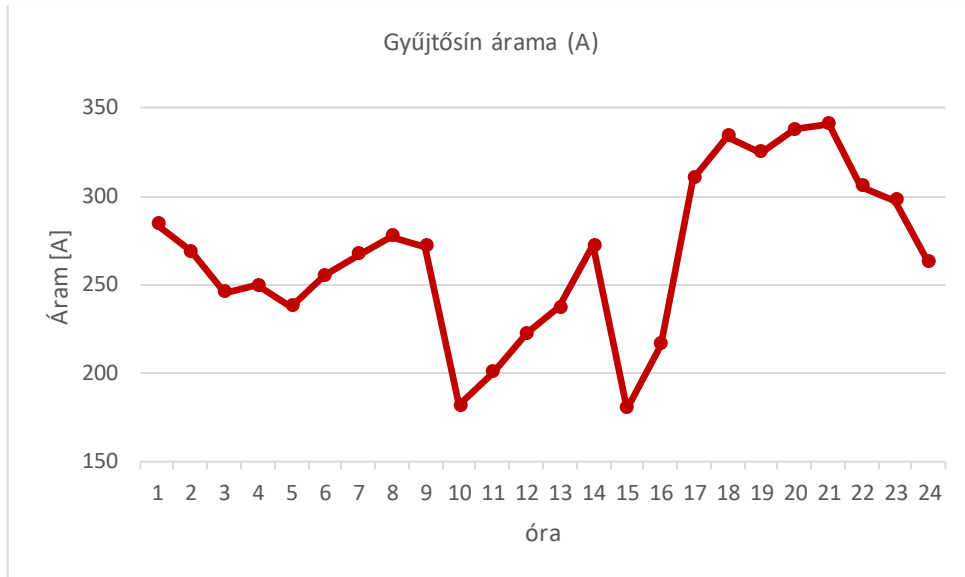
Az előző részben láthattuk, hogy hogyan alakulnak a felharmonikus áramok szögei a hálózaton egy tiszta, felhőmentes, napsütéses napon. gyakran előfordul azonban, hogy az időjárási viszonyok miatt a napelemes rendszer kevesebb teljesítményt tud leadni. Különböző időjárási tényezők befolyásolják a panelek teljesítmény leadását. Ilyen tényezők lehetnek a nap besugárzása, a szél, a hőmérséklet. A napelemek esetén a legnagyobb problémát az árnyékolás jelenti. Erre a leggyakoribb példa a felhő megjelenése az égbolton. Ettől lecsökken a besugárzott energia mennyisége, mely természetesen magával vonja a hőmérséklet csökkenést is. Ebben a fejezetben megvizsgáltam, hogy milyen hatással lehet a hálózat felharmonikus áramainak szögére egy felhős nap. A napelemes karakterisztikán (10. táblázat), látható, hogy a napelemes rendszerek 8 és 18 óra között táplálnak teljesítményt a hálózatba, tehát a változás szempontjából elegendő ezt az időintervallumot vizsgálni.

4.4.2.1 Loadflow szimuláció

A napelemes rendszerek kevesebb teljesítményt tápláltak be hálózatba, így a hálózatra gyakorolt hatásuk is kisebb volt. Várható volt, hogy a feszültség és áram értékek a szabvány értékeknek megfelelnek majd, hisz azonos penetráció esetén nagyobb teljesítménybetáplálásnál is megfeleltek.



27. ábra: Kisfeszültségű gyűjtősín feszültsége 25%-os PV penetráció esetén napsütéses felhős napon

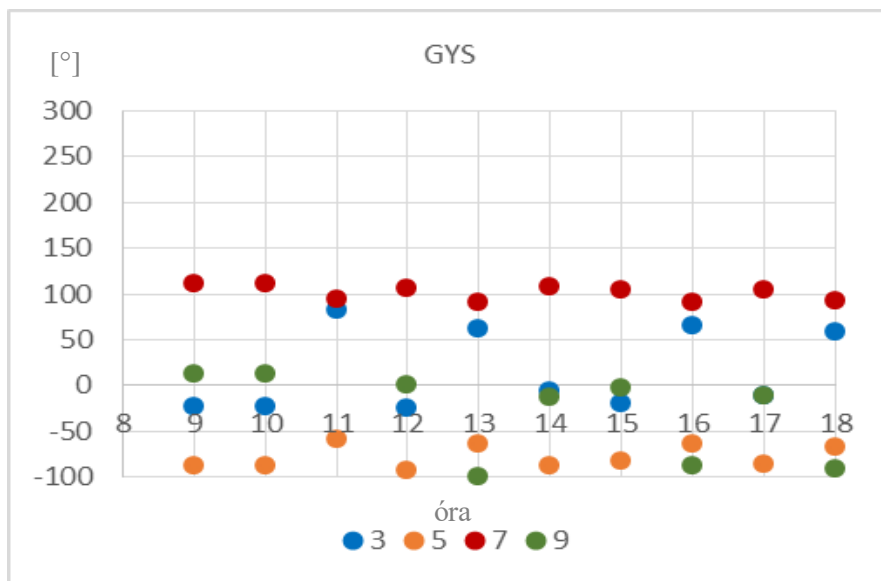


28. ábra: Kisfeszültségű gyűjtősín árama 25%-os PV penetráció esetén felhős napon

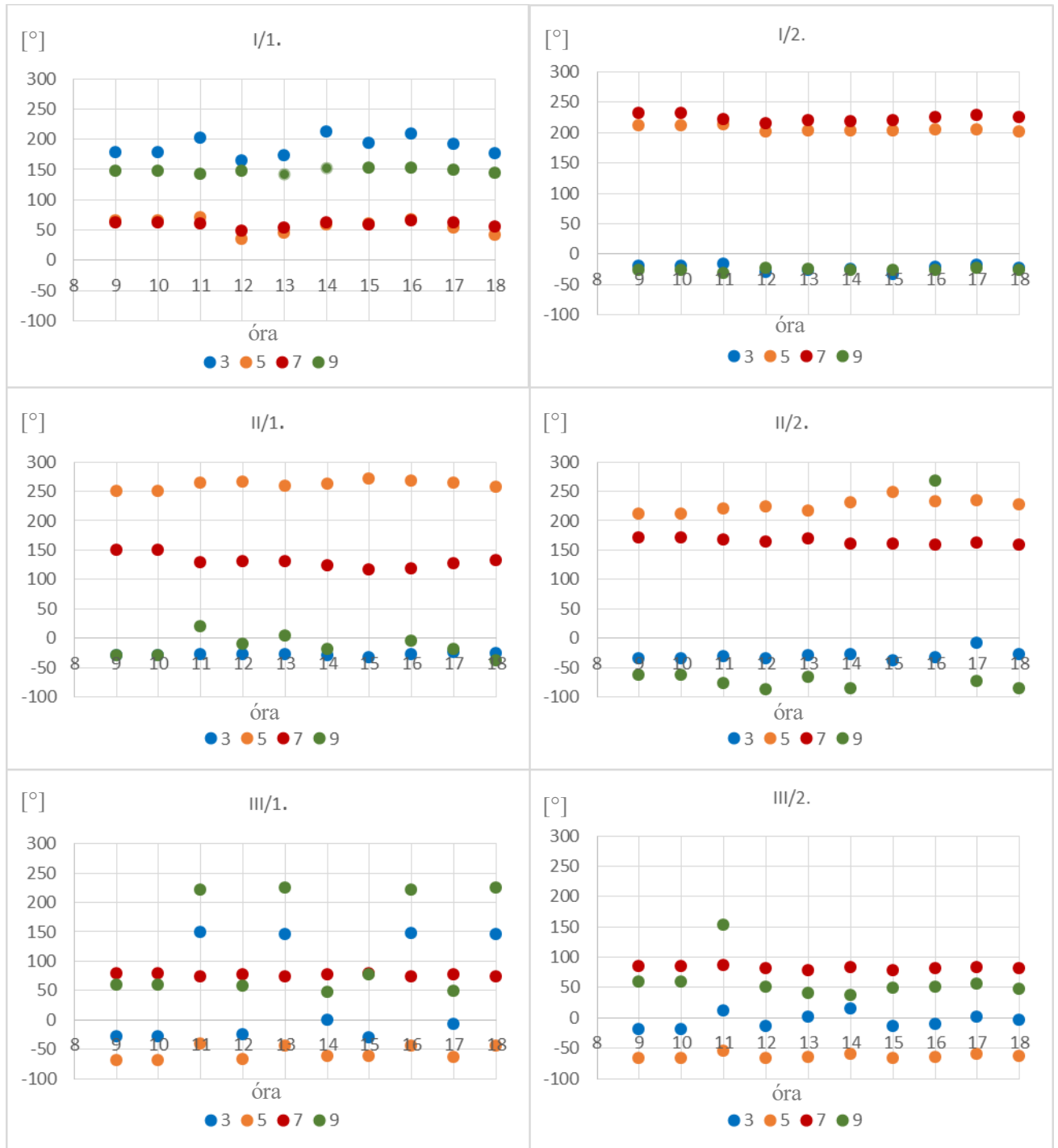
Az ábrákon (27. ábra, 28. ábra) látható, hogy a napelemes rendszer karakterisztikájának megfelelően megjelenik egy csúcs a feszültség karakterisztikában 9 és 10 óra között, illetve 14-15 óra között. Az áram karakterisztika értelemszerűen ennek az inverzét képezi. Tehát a két karakterisztikán egyértelműen megfigyelhető az időjárás változása. A diagramokról könnyedén leolvasható, hogy ez az elrendezés megfelelt a szabvány előírásainak.

4.4.2.2 Harmonikus szimuláció

Ahogy a feszültség esetében, úgy a felharmonikusokat illetően is teljesült a szabvány előírása, azaz a hálózat alkalmas volt felhős nap szimulációjára 25%-os PV penetráció mellett.



29. ábra: 25%-os PV penetráció felharmonikus áramainak szögei a transzformátor kisfeszültségű oldalán felhős napon



30. ábra: 25%-os PV penetráció felharmonikus áramainak szögei a mérési pontokon felhős napon

Ha összehasonlítjuk a felhős nap adatait, az eddigi vizsgálatokkal, akkor látható, hogy a teljesítményáramlás a transzformátor kiszűrésű gyűjtősínén nem változott meg jelentős mértékben a 0%-os penetrációhoz képest. Ebből kifolyólag nem meglepő, hogy a felharmonikus szögek között (30. ábra) sincsen jelentős különbség a felhős nap, illetve 0%-os PV penetráció (23. ábra) esetében.

4.5 50%-os PV penetráció 24 órás vizsgálata

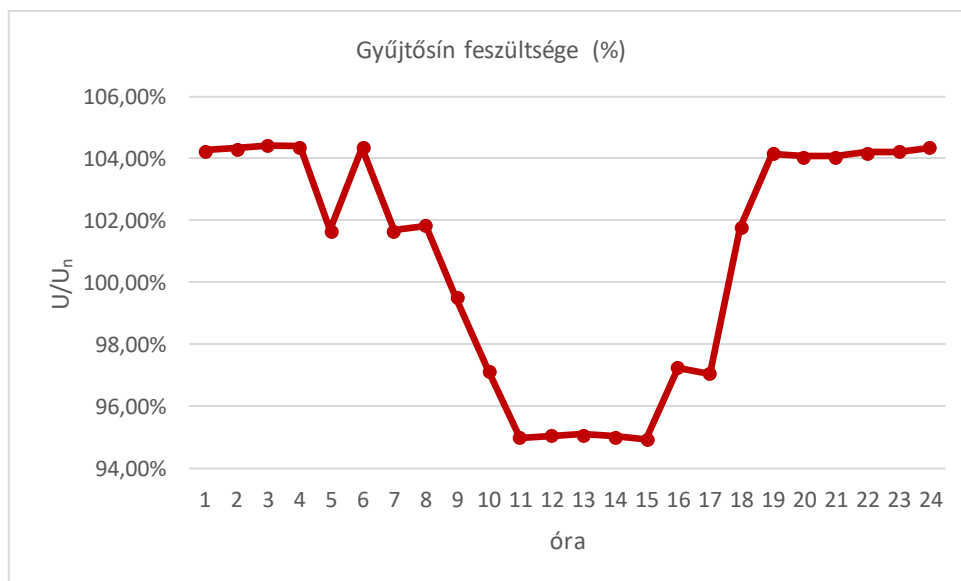
50%-os penetráció alkalmával - az előzőekhez analóg módon – minden második háztartás rendelkezett a hálózatra csatlakoztatott napelemes rendszerrel. A vizsgálat során ismételten háromfázisú invertereket (Inverter III.) csatlakoztattam a csatlakozási pontokra. Ezt követően ugyancsak futtattam loadflow és harmonikus szimulációkat napsütéses és felhős napokra is.

4.5.1 Az inverterek hatása napsütéses napokon

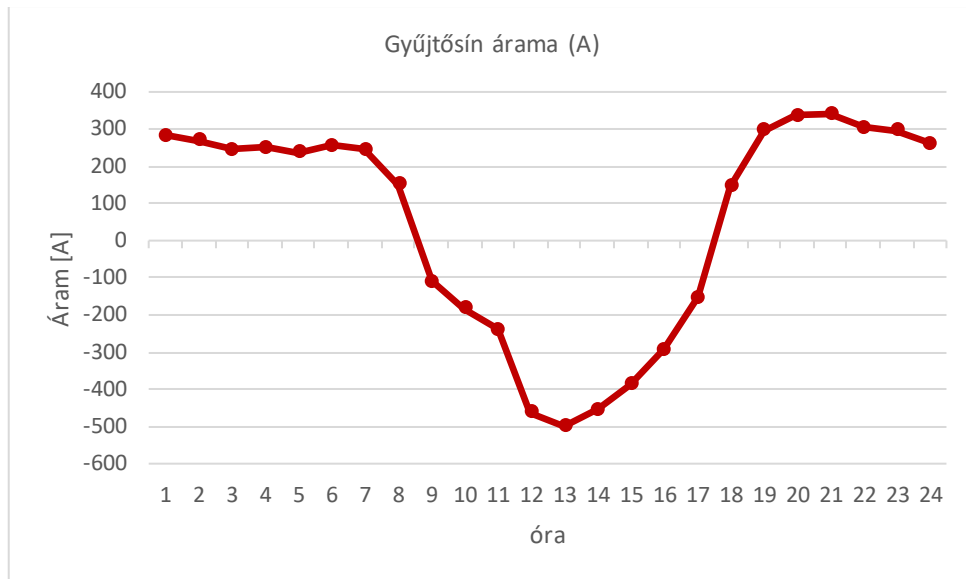
4.5.1.1 Loadflowszimuláció

A nagyszámban megjelenő napelemes rendszerek olyannyira megemelték a feszültség értékeket, hogy a transzformátort terhelés alatt szabályozhatóra kellett cserélnem. Ha nem tennék, a napelemek által okozott feszültségemelkedés túllépné a szabványban meghatározott értékeket. Ha a megcsapolást állítanánk oly módon, hogy a napelemek miatti feszültségemelkedés ne legyen túl magas, akkor pedig az éjszakai órákban nem lenne eleget a hálózat feszültsége a szabványnak, ugyanis túl alacsony lenne.

A feszültség diagramon (31. ábra) jól látható, hogy a transzformátor 4-5 óra közti intervallumot kivéve - amikor az inverterek nem tápláltak a hálózatban -, azaz este 7 óra és reggel 6 óra között a „-2”-es megcsapolásban maradt. 4-5 óra között „-1”-es megcsapolásra váltott. Továbbá, amikor a napelemes rendszerek már képesek voltak nagyobb teljesítményt leadni a hálózat felé, - 9-16 óra közti időintervallumban - akkor „2”-es megcsapolásra váltott a transzformátor.



31. ábra: Kiszűrésű gyűjtősín feszültsége 50%-os PV penetráció esetén napsütéses napon



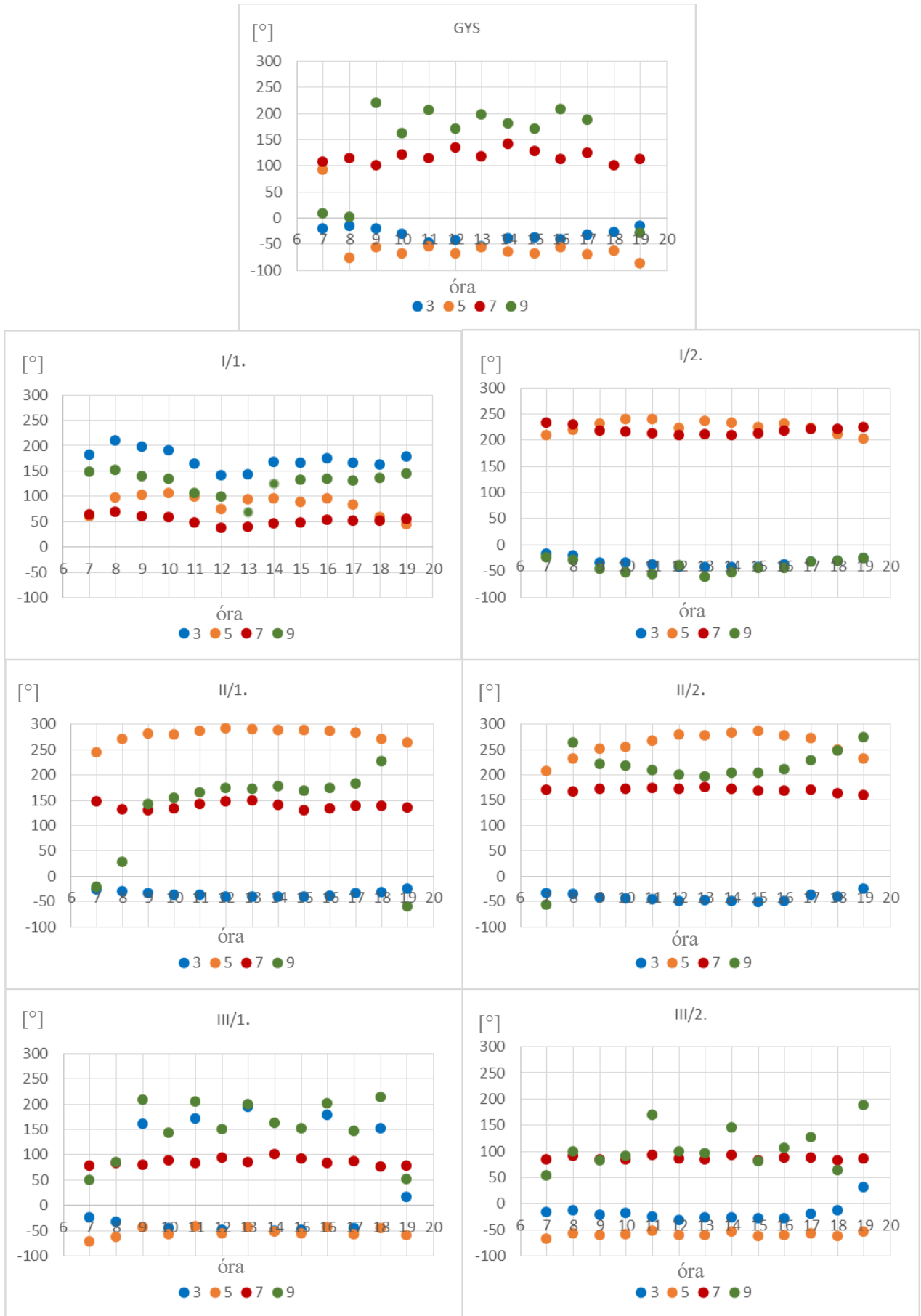
32. ábra: Kisfeszültségű gyűjtősín árama 50%-os PV penetráció esetén napsütéses napon

A 25%-os PV penetrációhoz hasonlóan ebben az esetben is megfordul az áramlás iránya, azonban 50%-os PV penetráció esetén már a 8-17 óra közötti időintervallumban mindvégig jelen van. Ebben az időszakban az áramgörbe jellege felveszi a napelemes rendszerekre jellemző haranggörbe alakot. További problémát jelenthet, hogy a transzformátor néveleges áramát megközelítik a 12 és 13 óra közti értékek. Az inverterek által betáplált jelentős teljesítmény miatt megváltozik a feszültségesés is. Már nem a transzformátor kisfeszültségű oldalán lesz a legmagasabb a feszültség értéke, hanem előfordul, hogy a végpontok feszültsége magasabb.

4.5.1.2 Harmonikus szimuláció

A harmonikus szimuláció futtatása után ismételten ellenőriztem az egyes csatlakozási pontok THD értékeit, illetve az egyes felharmonikus feszültség értékeket. Az értékek a szabvány előírása alatt maradtak. A loadflow szimuláció, illetve a harmonikus szimuláció eredményei alapján folytathattam a szimulációt.

A szimuláció eredményeit a 33. ábra szemlélteti. Ha megvizsgáljuk az I. leágazás mérési pontjaira kapott adatokat és összehasonlítjuk a 25%-os napsütéses PV penetráció értékeivel (26. ábra), látható, hogy jellegre megegyezik a két görbe, csak nagyon kis eltérés tapasztalható a szögek között. A II. leágazás esetén már nagyobb eltéréseket figyelhetünk meg, de a görbék jellege még így is hasonló a két különböző penetrációban. A legnagyobb eltérés a 9. felharmonikus szögeiben található. Látható, hogy már nem csak a déli órákban, hanem az azt megelőző, illetve a későbbi időpontokban is hasonló szögek jelennek meg. Mivel az inverterek azonos szöggel táplálnak felharmonikus áramokat a hálózatba, így az említett jelenség annak köszönhető, hogy ezekben az órákban a napelemes rendszerekből származó teljesítmény és vele együtt pedig a felharmonikus áramok szögei lesznek a dominánsak. A transzformátor kisfeszültségű oldalának felharmonikus áram szögét vizsgálva megállapítottam, hogy a 3., 5., és 7. felharmonikus értékei esetében sokkal kisebb változásról beszélhetünk, mint a 9. felharmonikus esetében. A 9. felharmonikus értékeiben ismét jelentős szerepet játszanak a III. leágazás értékei. Jelentős eltérést mutatnak a 25%-os PV penetrációhoz képest.



33. ábra: 50%-os PV penetráció felharmonikus áramainak szögei a mérési pontokon napsütéses napon

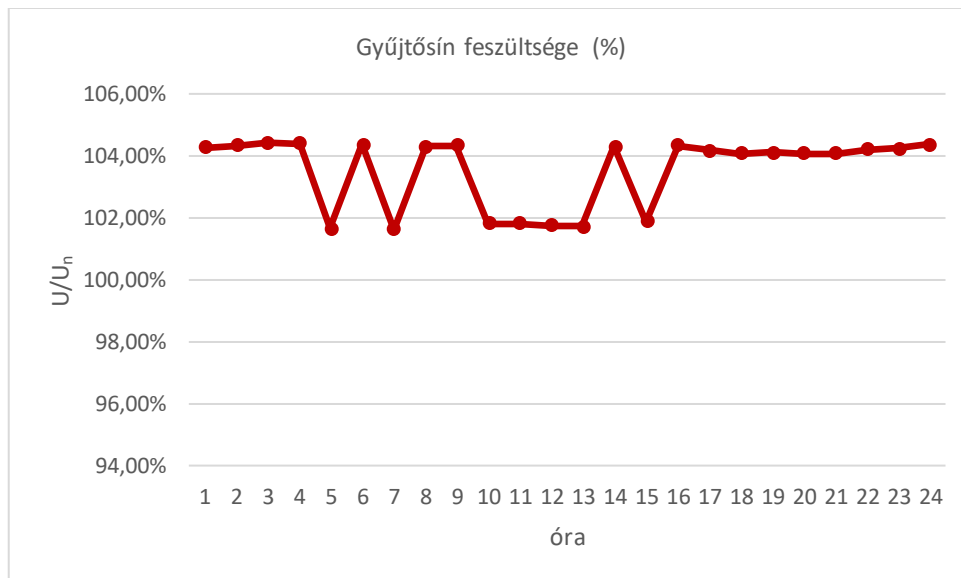
4.5.2 Az inverterek hatása felhős napokon

A napsütéses napot követően megvizsgáltam milyen hatással van a felhős nap a transzformátorkörzetre 50%-os PV penetráció esetén, miként tudják megváltoztatni a felharmonikus áramszőgeket a rosszabb időjárási körülmények ilyen mértékű penetráció mellett. A 25%-os PV penetrációval megegyező módon a felhős napra meghatározott napelemes karakterisztika alapján, 8 és 18 óra között vizsgáltam a hálózatot.

4.5.2.1 Loadflowszimuláció

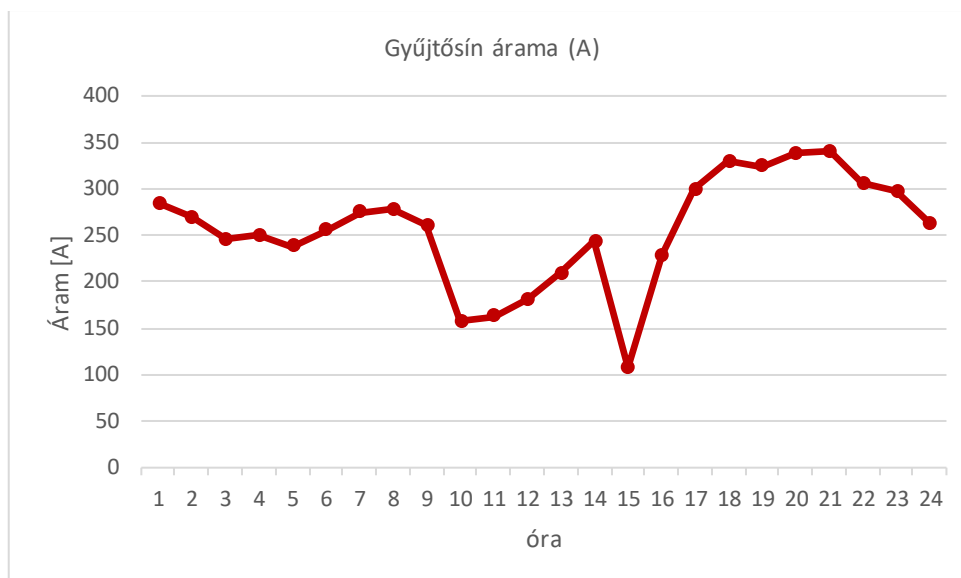
A napsütéses naphoz hasonlóan a transzformátor terhelés alatt szabályozható volt. Ebben az esetben ezt nem a szélsőséges feszültség értékek kívánták meg, - ahogy az a napsütéses nap esetén történt - hanem mivel napsütéses napon szükséges ezen transzformátor alkalmazása, evidens, hogy felhős napon is ez a transzformátor marad. (Az elosztó engedélyes rendszerint több évtized után cseréli a transzformátorát, nem napról-napra az időjárási körülményekhez mérten.)

Az hálózat értékei megfeleltek az elvártaknak, nem haladták meg a szabvány előírásait. Ez várható volt, hiszen a napelemes rendszerek jóval kisebb teljesítményt tápláltak be a hálózatba, így ha napsütéses napon megfelelt a hálózat, feltételezhető volt, hogy felhős napon is meg fog.



34. ábra: Kisfeszültségű gyűjtősín feszültsége 50%-os PV penetráció esetén felhős napon

A 34. ábra jól mutatja, hogy kisebb volt a terhelés mértéke, így a transzformátort sem kellett a teljes fokozatszabályzási tartományon szabályozni, elegendő volt „-1”-es és „-2”-es fokozatban működtetni.



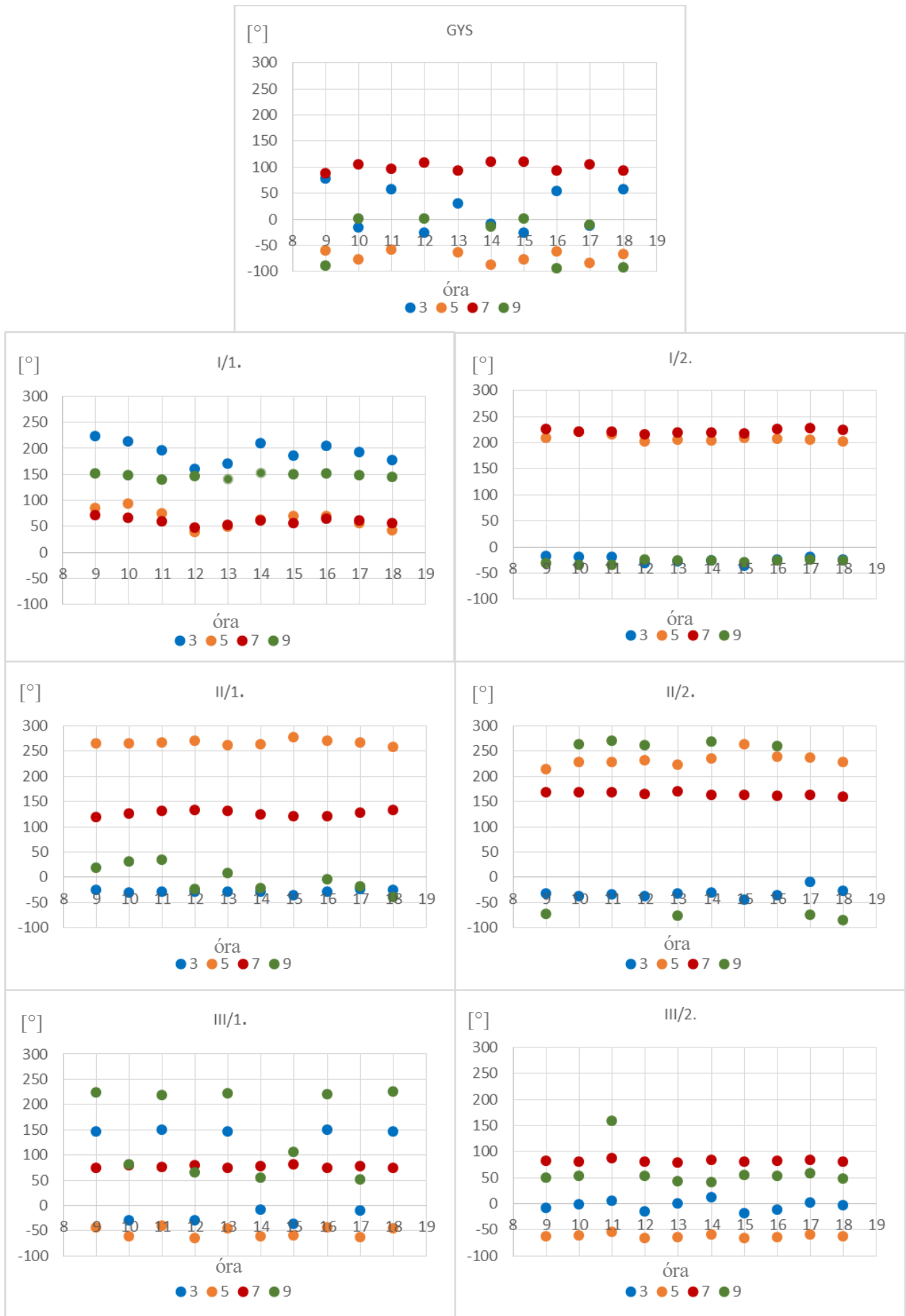
35. ábra: Kisfeszültségű gyűjtősín árama 50%-os PV penetráció esetén felhős napon

A gyűjtősín áram diagramján (35. ábra) jól látható a napelemes rendszerek hatása. A napelemes karakterisztikában 9 és 10 óra között növekedés, illetve 2 és 3 óra között szintén jelentős növekedés látható. Ez tökéletesen megjelenik a diagramon is, két negatív csúcs formájában. 25%-os PV penetráció esetén is már érzékelhető volt az időjárás befolyásolása a hálózatra, ez az 50%-os esetről már sokkal jelentősebben jelentkezett.

4.5.2.2 Harmonikus szimuláció

A szimuláció eredményeiből a vártnak megfelelően ismét alkalmas volt a hálózat, hogy valóságghűen modellezzen egy kisfeszültségű hálózatrészt. A THD értékek, illetve az egyes felharmonikus értékei a szabványban előírtaknak megfeleltek.

Először a felhős időben meghatározott értékeket a napsütéses időben (36. ábra) kapott értékekkel hasonlítottam össze (33. ábra). Látható, hogy a 25%-os esethez hasonlóan felhős időben a szögek szórása nagyobb (ez alól a 9. felharmonikus kivételt képez.), mint napsütéses időben. Tehát a napelemes rendszerek nem fejtettek ki olyan jelentős hatást, mint napsütéses idő esetén. Bár csekély a napelemes inverterek hatása, de észrevehető a 0%-os penetrációhoz képest. (23. ábra) A napelemes karakterisztikában a 14 és 15 óra közti időszakban a legmagasabb a megtermelt energia mennyisége. Ez megjelenik a felharmonikus szögek esetében is. Ha ezt az időintervallumot vizsgáljuk, látható, hogy itt a legjelentősebb a változás, a III. leágazás esetében a legszembetűnőbb. 0%-os penetráció esetén a 9. felharmonikus értéke 34° -ra adódott, még 50%-os penetráció esetén felhős időben 105° -ra. Ez az időintervallum a 3. felharmonikus esetén 1° -ról -37° -ra való változást jelentett.



36. ábra: 50%-os PV penetráció felharmonikus áramainak szögei a mérési pontokon felhős napon

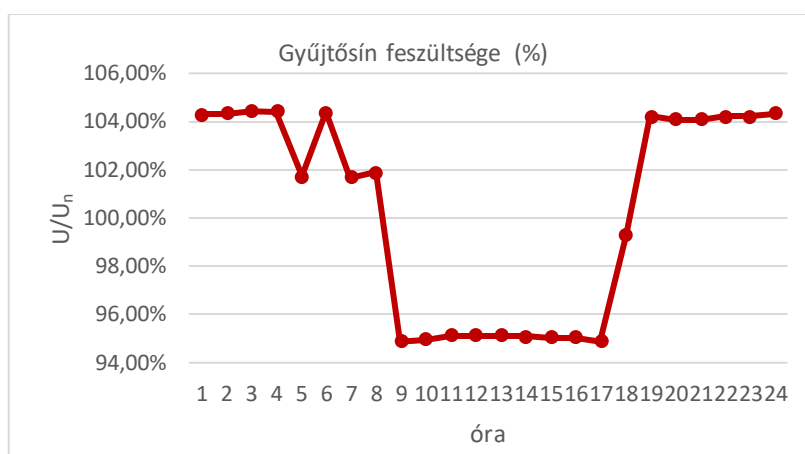
4.6 75%-os PV penetráció 24 órás vizsgálata

75%-os PV penetráció azt jelentette, hogy négy háztartásból három rendelkezik az éves fogyasztását fedező méretű napelemes rendszerrel. A szimuláció során ismét a háromfázisú invertert (Inverter III.) használtam fel a modell invertereként.

4.6.1 Az inverterek hatása napsütéses napokon

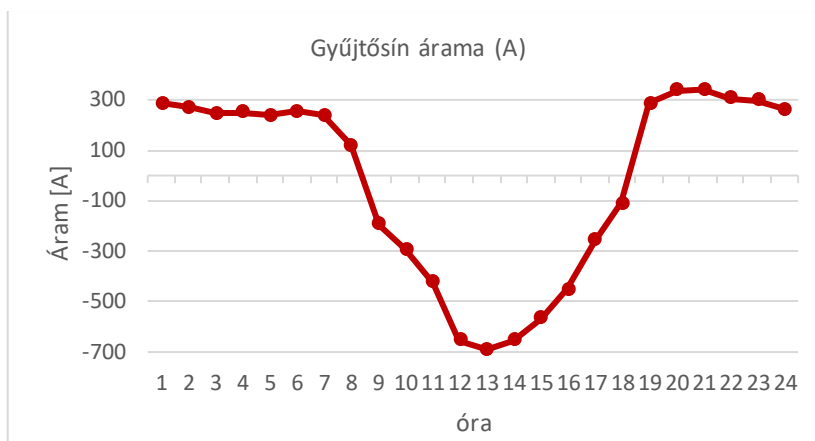
4.6.1.1 Loadflow szimuláció

Az inverterek által a hálózatra táplált teljesítmény miatt 50%-os PV penetráció esetén elegendő volt a transzformátornak 9-16 óra közti időintervallumban a „2”-es megcsapolásra váltani. 75%-os PV penetráció esetén ez előbb megjelenik és tovább is húzódik. A transzformátor 8 órától 17 óráig a „2”-es megcsapolásban üzemel.



37. ábra: Kisfeszültségű gyűjtősín feszültsége 75%-os PV penetráció esetén

75%-os PV penetráció esetében is megfordul a teljesítmény áramlása, 8 órától 18 óráig figyelhető meg a fordított áramlási irány. Mivel a fogyasztói magatartás nem változott, ellenben a napelemes rendszerek száma jelentősen megnövekedett, így még több feleslegessé vált teljesítmény jelent meg a hálózaton. Ebben az esetben még az 50%-os PV penetrációhoz képest is jóval nagyobb áramértékek folytak át a transzformátoron. Ezek az áramértékek olyan nagyok voltak, hogy több, mint 20 %-kal meghaladták a transzformátor névleges áramát. Tehát ez a penetráció nem engedhető meg ilyen feltételek mellett.



38. ábra: Kisfeszültségű gyűjtősín árama 75%-os PV penetráció esetén

4.6.1.2 Felharmonikus szimulációk

75%-os PV penetráció esetén olyan felharmonikus feszültségek alakulhatnak ki az egyes csatlakozási pontokon, melyek meghaladják szabvány által előírt értékeket. [18] Tehát felharmonikus szempontból sem felelt meg a hálózat a 75%-os penetrációnak

4.6.1.3 Következmények

A fentiek értelmében 75% feletti PV penetráció esetén annyira megnőhetnek a transzformátorkörzet feszültség értékei, hogy valamilyen szabályozási módszerrel csökkenteni kell az inverterek által a hálózatba táplált teljesítményt. Ez megoldást jelenthetne az ilyen magas számú penetráció mellett fellépő felharmonikus problémákra is. Mindezek mellett nem valószínűsíthető, hogy Magyarországon az elkövetkező években vagy akár évtizedekben ilyen robbanásszerű növekedés következzen be a napelemes rendszerek területén. A technika fejlődésével ilyen időtávlatban elterjedhetnek az energiatárolót tartalmazó napelemes rendszerek, amelyek más hatással lennének a vizsgált hálózat terhelési és felharmonikus viszonyaira. Továbbá a villamos energia fogyasztók szokásai, eszközei is változhatnak, amely hasonlóképpen az akkumulátorokhoz, megváltoztatnák a hálózat terhelési és felharmonikus viszonyait is.

Felhős időben megfelelt volna a hálózat a szabvány előírásainak, hiszen a napelemes rendszerek jóval kevesebb teljesítményt tápláltak volna a hálózatba. Azt azonban nem lehet garantálni, hogy egy éves időszakban ne forduljanak elő olyan időszakok, melyeken a napelemes rendszerek ne a napsütéses esetben vizsgáltak szerint injektáltak volna teljesítményt a hálózatba.

5 Eredmények

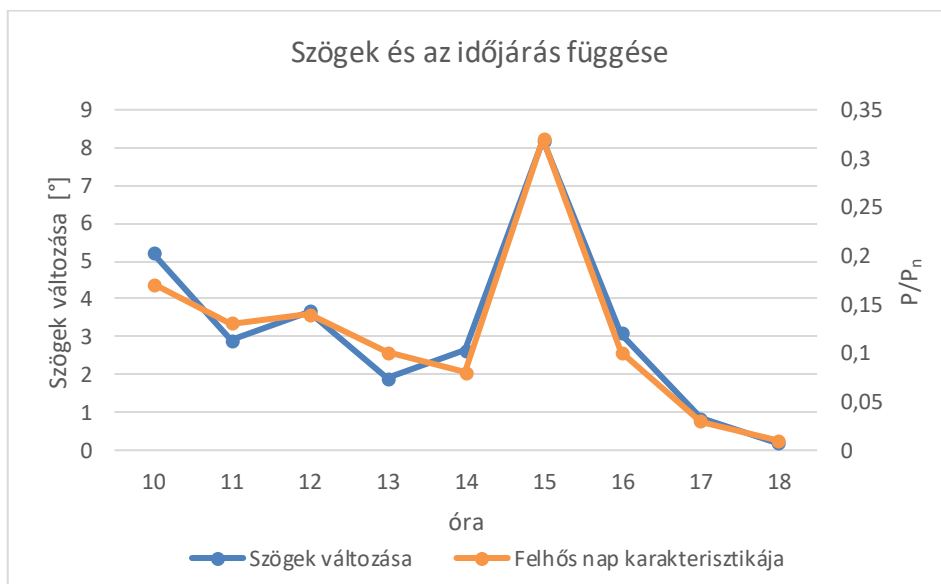
Az napelemes rendszerek első vizsgálatakor arra voltam kíváncsi, hogy vajon egy darab napelemes rendszer milyen hatással lehet a kiefeszültségű hálózat harmonikus szögeire. Természetesen ez függ a rendszer által a hálózatra táplált teljesítménytől. Minél nagyobb teljesítményt, s vele ekvivalens módon áramot táplál az inverter a hálózatra, annál nagyobbak lesznek a felharmonikus áramok értékei is. Ennek következményeképpen egyre jobban meghatározóak lehetnek a hálózat felharmonikus szögeiben. A vizsgálatot a 12 és 13 óra közötti időintervallumban végeztem, hiszen ekkora adják le a napelemes rendszerek a legnagyobb teljesítményt, tehát ekkor van a legjelentősebb hatásuk a hálózatra. Ez az időintervallum nem a napelemes rendszerek miatt volt fontos – hisz azok paramétereit változtattam -, hanem fogyasztók által kialakított viszonyok miatt. Összességében megállapítottam, hogy a napelemes rendszer egy adott csatlakozási ponton elhelyezkedve, növelve a teljesítményét, képes az egyes felharmonikus szögek nagyságának komoly változtatására. A teljesítmény növelését 0-10 kW-os intervallumon végeztem el. Két típusú invertert csatlakoztattam. Az egyik egy fázisú inverter felharmonikus adataival csatlakozó háromfázisú inverter volt. Ez a valóságban úgy fogható fel, hogy adott csatlakozási ponton mind a három fázisra ugyanolyan egyfázisú invertert kapcsolok. Ez a szimulációs modell szempontjából volt szükséges. Az egyfázisú inverter felharmonikus áramszögének változása felharmonikustól függően elérte akár a 120°-os változást is.

A háromfázisú inverter szögei változásában nem volt ilyen jelentős eltérés, maximum 6°-ot változott a teljesítmény változtatásával a szögek értéke. Ha a távolságot változtattam az egyes leágazásokon, akkor azt tapasztaltam, hogy a távolság függvényében azonos teljesítménybetáplálás mellett csak pár fokot változott a felharmonikus áramszög. A fentiek eredményeképpen a szimuláció további részében a háromfázisú inverter hatását vizsgáltam, mert túl nagyra ítéltam a 135°-os változást. Ez az eredmény fakadhat az egyfázisú inverter háromfázisú csatlakoztatásából is.

A hálózat vizsgálata szempontjából fontos volt, hogy tanulmányozzam, hogy napelemes rendszerek nélkül, a fogyasztók elektronikus eszközeinek hatására milyen felharmonikus áramszögek alakulnak ki a hálózaton. A vizsgálatot 1 napra (24 órára) végeztem el, mivel minden egyes elektronikus eszköz, legyen az egy televízió vagy egy számítógép, más-más szöggel injektál felharmonikus áramokat a hálózatba. Ez azért volt szükséges, mert a nap folyamán más-más eszközöket működtetünk a háztartásokban. Hétköznapiakon, amikor az emberek többsége nem tartózkodik otthonában, tipikus villamos fogyasztó egység lehet a hűtő, a kazán és egyéb olyan elektronikus eszközök, melyek függetlenül működnek attól, hogy otthon tartózkodunk-e. A reggeli, illetve esti órákban az emberek többsége felkapcsolja lakásában a világítást, bekapcsolja a televízióját, vagy éppen számítógépén böngészik az interneten. A megépített modell próbálta ezeket a hatásokat figyelembe venni. Összességében mégis felfogható egy „worst case” – legrosszabb eset szimulációjának, hiszen az egyes eszközök, illetve a napelemes rendszerek is adott felharmonikus áramszögeket injektáltak a hálózatba. Ebből a szimulációból kapott eredményeket hasonlítottam a többi esethez, hiszen így érzékelhető a legjobban a napelemes rendszerek változása.

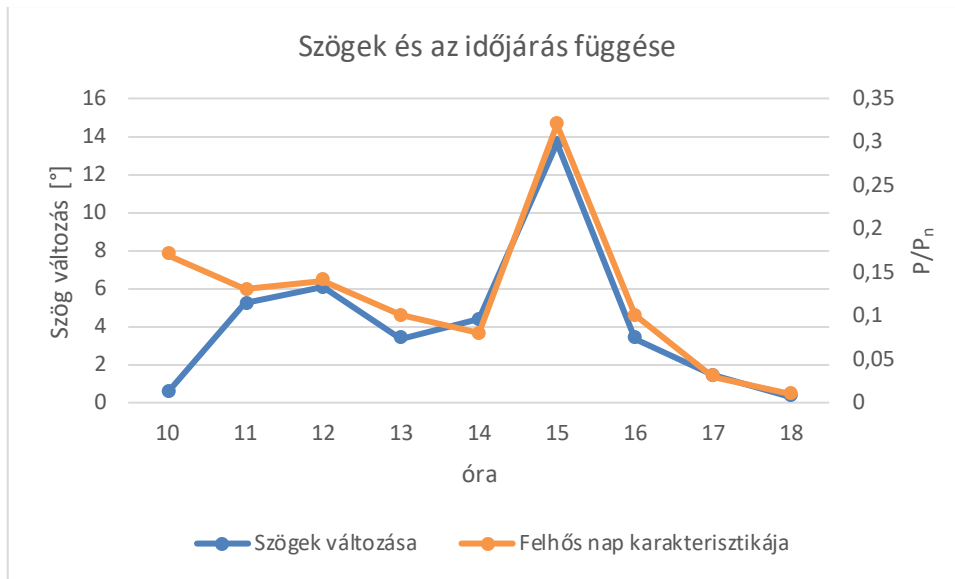
Szimulációt futtattam, hogy megvizsgáljam, milyen hatással van egy darab inverter a hálózatra, ha különböző pontokon helyezem el, illetve különböző teljesítményt táplál be. A távolság változtatásával nem változtak a szögek jelentős mértékben. A teljesítmény változtatásával azonban már észlelhető volt a változás, egyes mérési pontokon $3-4^\circ$ -ot is változott a 3. és 9. felharmonikus áram szögének a nagysága. Ez a jelenség azért állt fent, mert a háromfázisú zérus sorrendű felharmonikusok (3. és 9. felharmonikus) összegződnek.

Ezt követően megvizsgáltam, hogy különböző penetrációjú napelemes rendszerrel rendelkező hálózat milyen változásokon megy keresztül 0%-os penetrációhoz képest, ha napsütéses, vagy ha felhős napon vizsgáljuk. Felhős idő esetén a napelemes rendszerek nem képesek olyan jelentős mennyiségű teljesítményt táplálni a hálózatba, mint napsütéses időben. A napelemes rendszer felhős időben felhasznált karakterisztikájában ugrások találhatók. Ez azt jelentette, hogy a felhős nap ellenére volt olyan időszak, amikor előbújt a nap, mely következtében az inverter is nagyobb teljesítményt táplált a hálózatba. Ezek az ugrások megjelennek a hálózat felharmonikus szögeiben is. Ha a 0%-os penetrációhoz képest vizsgáltam a változás mértékét úgy, hogy az egyes órákban a különböző penetrációkban számított értékek különbségét vettem. Pl. 13 és 14 óra között a 25%-os penetráció értékeiből kivontam a 0%-os penetráció értékeit. Azokban az időszakokban, amikor a nap előbújt, a felharmonikus szögek különbsége is megnőtt. Ez látható 39. ábra alapján is. A 7. felharmonikus szögeit 25%-os PV penetrációt tekintve, jól látható, hogy a felharmonikus szögek változásai követik az időjárás változását. A többi felharmonikus esetében nem figyelhető meg ilyen jelenség.



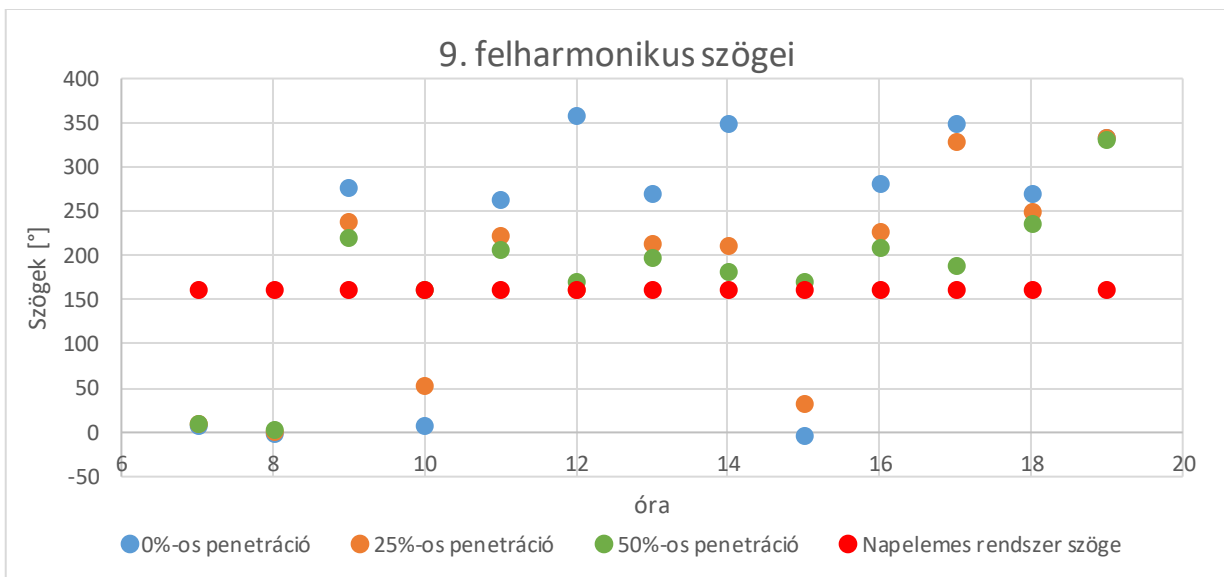
39. ábra: A szögek függése az időjárástól 25%-os PV penetráció mellett felhős napon

Ez a jelenség 50%-os penetrációnál is megfigyelhető. A szögek változásának mértéke követte az időjárás változását. Ha megnézzük a szögek értékeit (40. ábra), látható, hogy dupla akkora penetráció esetén az egyes szögek különbsége is dupla akkorát változott.



40. ábra: A szögek függése az időjárástól 50%-os PV penetráció mellett felhős napon

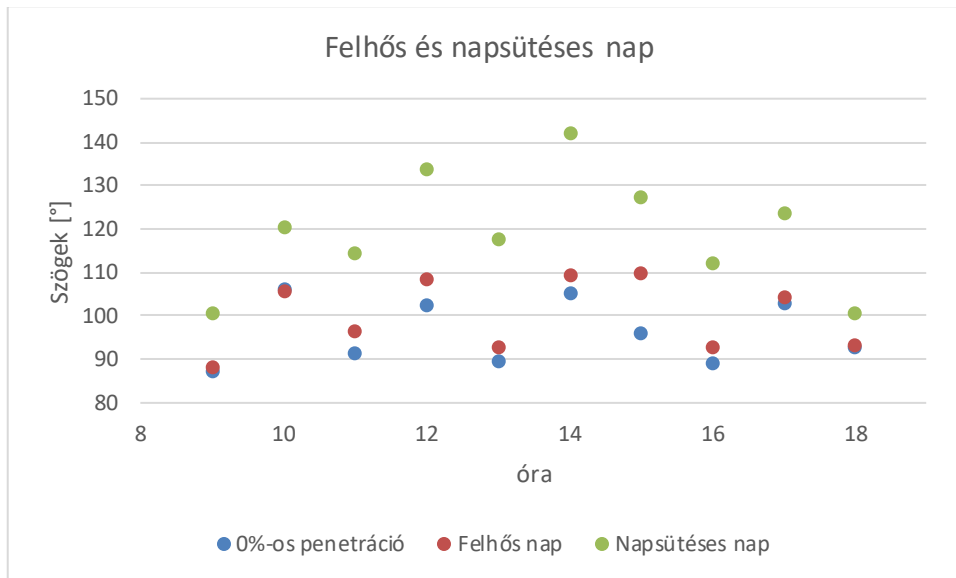
Napsütéses napon már sokkal jelentősebb változás következett be a 25%-os, illetve az 50%-os penetráció esetén is a 0%-os penetrációhoz képest. A hálózat felharmonikus áramok szögei sokkal inkább függetlenedtek a fogyasztói magatartástól. A napelemes rendszerek felharmonikusai lettek a dominánsak.



41. ábra: Napsütéses időben a felharmonikusok változása

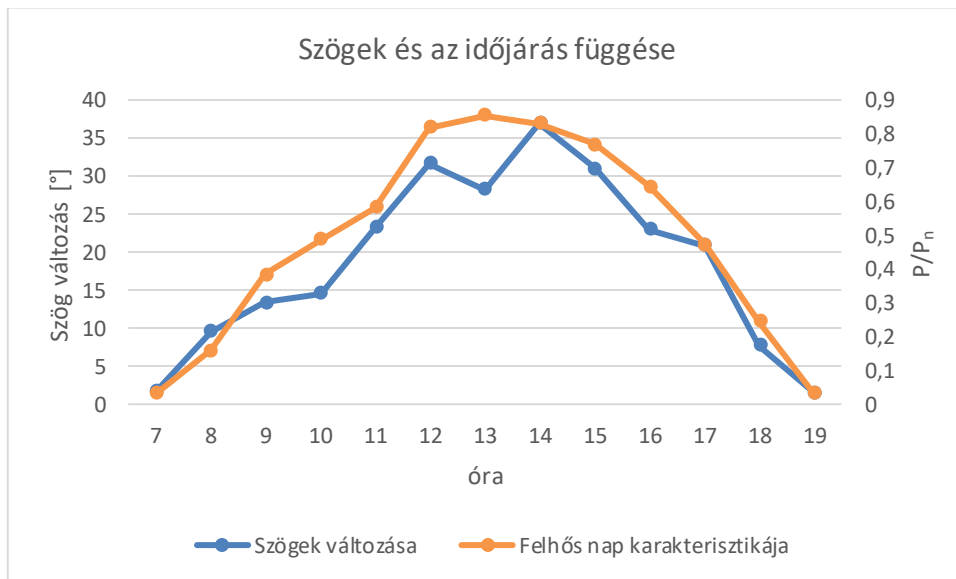
A 41. ábra segítségével összehasonlítottam a 9. felharmonikus áram szögeit a gyűjtősíni mérőponton. Pirossal jelöltem az Inverter III. 159,9 °-os szögét, kékkel a napelemes rendszer nélküli állapotot. Látható, hogy azokban az órákban, amikor a napelemes rendszer a karakterisztikájából adódóan kevés teljesítményt táplál be, akkor a szögek a három penetráció esetén szinte azonosak (8, 9, 18 és 19 óra). Látható az is, hogy a déli órákban sokkal inkább a napelemes inverter felharmonikus szögeihez állnak közelebb a 25%-os és 50%-os penetráció szögei. Tehát a déli órákban a napelemes rendszer felharmonikus szögei határozzák meg a hálózat felharmonikus szögeit.

Az egyes penetrációk felhős és napos napjait összehasonlítva (42. ábra) megállapítottam, hogy az időjárás hatására megnőnek a szögek a vizsgált órákban. A 25%-os penetráció esetében ez nem olyan jelentős a 0%-os penetrációhoz képest, bár jól látható, hogy akkor van a legnagyobb eltérés, amikor a napelemes rendszer a legnagyobb teljesítményt táplálja be. Az 50%-os penetrációt vizsgálva látható, hogy ez azonban nem azt jelenti, hogy ilyenkor lesz a legnagyobb a szög értéke, hiszen függ a 0%-os penetrációtól is, azaz a fogyasztók harmonikus viselkedésétől.



42. ábra: 7. felharmonikusok alakulása a gyűjtősínen

Felhős nap esetén már bemutatásra került, hogy hogyan változnak a szögek az időjárás függvényében. Hasonlóképp igaz ez napsütéses napra.



43. ábra: A szögek függése az időjárástól 50%-os PV penetráció mellett napsütéses napon

Összességében tehát megállapítható, hogy a napelemes rendszerek komoly hatást képesek kifejteni egy kisméretű hálózat felharmonikus áram szögeire. Minél több napelemes rendszer található a hálózaton, annál erőteljesebben jelenhet meg ez a hatás. Természetesen nem a napelemes rendszerek darabszámától, hanem az általuk betáplált teljesítménytől függ a szögek változása. Ennek köszönhetően felhős napokon minimális a szögek változása, hiszen a betáplált teljesítmény is minimális. Minél nagyobb teljesítményt táplálunk a hálózatba a napelemek által, annál jelentősebb a hatás. A gyűjtősín esetében legnagyobb változás a 3. és 9. felharmonikus esetében volt tapasztalható.

6 Irodalomjegyzék

- [1] M. Kékes és G. Lipcsei, „Az EU 20/20/20-as vállalásainak helyzete,” 2015.
- [2] „EPA,” 2012. [Online]. Available: <http://www2.epa.gov/carbon-pollution-standards/learn-about-carbon-pollution-power-plants>. [Hozzáférés dátuma: 20. március 2015.].
- [3] Energia Klub, „Az Európai Unió és a megújuló energia,” [Online]. Available: http://energiaklub.hu/sites/default/files/ek_sajto_hatter__megujulok_eu.pdf. [Hozzáférés dátuma: 14 Február 2016].
- [4] Nemzeti Fejlesztési Minisztérium, „Megújuló Energia Hasznosítási Cselekvési Terv,” [Online]. Available: <http://www.umvp.eu/files/Meg%C3%BAjul%C3%B3%20Energia%20Haszn%C3%ADt%C3%A1si%20Cselekv%C3%A9si%20Terv.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 14 Február 2016].
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. [Online]. Available: <http://bmwi.de/DE/Themen/Energie/Erneuerbare-Energien/erneuerbare-energien-auf-einen-blick,did=673762.html>. [Hozzáférés dátuma: 14 Február 2016].
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. [Online]. Available: <http://bmwi.de/DE/Themen/Energie/Erneuerbare-Energien/erneuerbare-energien-auf-einen-blick,did=645884.html>. [Hozzáférés dátuma: 14 Február 2016].
- [7] Zsid G. , *Háztartási fogyasztók felharmonikus áramtermelésének vizsgálata*.
- [8] [Online]. Available: <http://homepages.which.net/~paul.hills/Radio/RadioBody.html>.
- [9] Hartmann. B., Kiss P., Dr. Dán A., *Hálózati áramellátás és feszültségminőség*, 2011.
- [10] Dr. Dán A., *Villamosenergia-minőség növelt rézkeresztmetszettel*, Magyar Rézpiac Központ.
- [11] Siemens AG. [Online]. Available: <http://www.energy.siemens.com/mx/pool/hq/power-transmission/Transformers/Distribution%20Transformers/fitformer-reg/fit-former-reg-adaptable-distribution-transformer.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 06. Március 2016.].
- [12] Alexandre B. Nassif, Jing Yong, Wilsun Xu és C.Y. Chung, „Indices for comparative assessment of the harmonic effect of different home appliances,” EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER, 2012.
- [13] S. Spies, „IEC/EN 61000-3-2 - auf einen Blick,” [Online]. Available: www.spitzenberger.de/download.ashx?Weblink=1025. [Hozzáférés dátuma: 7 Április 2016].
- [14] E. C. Aprilla, „Modelling of Photovoltaic (PV) Inverter for Power Quality Studies,” 2012.
- [15] „Fronius International,” [Online]. Available: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-3644CF23-7F98455E/fronius_international/hs.xml/83_34637_DEU_HTML.htm. [Hozzáférés dátuma: 07 Március 2016].

- [16] „Enerix.de,” [Online]. Available: http://enerix.de/fileadmin/user_upload/produkte/Speicher/SE_CER_Conformity_VDE-AR-N_4105_Fronius_Symo_Hybrid_5_0-3-S_DE.pdf. [Hozzáférés dátuma: 07 Március 2016].
- [17] *MSZ EN 50160*.
- [18] Csondor B., "Napelemek telepítésének hatása a kisfeszültségű hálózatok felharmonikus viselkedésére" VI. Mechwart András Ifjúsági Találkozó, 2016.
- [19] Horváth V. és Zádori Z., Villamos mozdonyok műszaki leírása és kezelési utasítása a mozdonyvezetők részére, Budapest: Közdok, 1983..
- [20] Dr. Dán A, Tersztyánszky. T. és Varjú. Gy., Villamosenergia minőség, Budapest: Invest-Marketing Kft., 2006.
- [21] Dr Dán A. és Varjú. Gy., „Felharmonikus szűrés és alapharmonikus meddőteljesítmény kompenzáció. Alkalmazás a nagyvasúti villamos vontatási alállomásban,” *Elektrotechnika*, %1. kötet, összesen: %210-11, pp. 394-404, 1988.
- [22] „Fronius International,” 20 Március 2016. [Online]. Available: http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-369ED20B-ED561074/fronius_deutschland/SE_CER_Conformity_VDE_AR_N_4105_Fronius_Symo_10.0_3_M__20.0_3_M_DE_337984_snapshot.pdf.
- [23] Csondor B., *Napelemek telepítésének hatása a kisfeszültségű hálózatok felharmonikus viselkedésére*, 2016.
- [24] S. Spitzenberger, „IEC/EN 61000-3-2 - auf einen Blick,” [Online]. Available: www.spitzenberger.de/download.ashx?Weblink=1025. [Hozzáférés dátuma: 7 április 2016].

