

Hálózatra visszatápláló háztartási méretű kiserőmű villamos jelalak formáló hatásának vizsgálata a lakossági villamos hálózaton

Kovács Attila¹, Somogyiné Molnár Judit²

¹Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Miskolci Egyetem, 3515 Miskolc-Egyetemváros, Miskolc, Magyarország, e-mail: attila.kovacs@zf.com

²Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Miskolci Egyetem, 3515 Miskolc-Egyetemváros, Miskolc, Magyarország, e-mail: judit.somogyine@uni-miskolc.hu

Absztrakt: Egy családi ház tetőszerkezetére telepített, hálózatra visszatápláló 5,1 kWp teljesítményű kiserőmű villamos hálózati jelalak formáló hatását vizsgáltuk. A lakossági hálózati analízis során megmértük a villamos energia minőségét több lehetséges esetben, terhelt és terheletlen állapotban is. A vizsgálatokból kiderült, hogy a kiserőmű invertere megfelel a hálózatra visszatáplált villamos energia minőségi feltételének és még javít is az áramszolgáltatótól vételezett villamos energia minőségén. Azonban az otthonokban használt elektronikus eszközöknek és berendezéseknek a harmonikus szűrésével célszerű foglalkozni és keresniük kell a megoldást az általuk kibocsájtott, magas áramharmonikus torzítást okozó felharmonikusok kiszűrésére. Erre lehetne egy megoldás a villamos fogyasztásmérővel összekapcsolt, fázisjavító aktív harmonikus szűrő berendezés használata a családi otthonokban is. A jövőben további analízisekre és kísérletekre lesz szükség, hogy megállapítsuk a magas villamos hálózati harmonikus torzítások milyen hatással lehetnek az elektronikus berendezések működésére, például a napelemes rendszerek invertereire.

Kulcsszavak: háztartási méretű kiserőmű, napelemes rendszer, harmonikus torzítás, aktív szűrő

1 Bevezetés

Napjaink egyik jelentős műszaki kihívása az egyre nagyobb mértékben automatizált műszaki és informatikai eszközeink, berendezéseink megóvása a káros villamos hálózati zavaroktól és azok következményeitől. Ilyen zavarok lehetnek a hálózaton jelenlévő villamos transziensek, vagyis a felharmonikusok. A hálózati felharmonikusok kialakulásában és az áram torzításában jelentős szerepet játszanak, vagyis potenciális harmonikus zavarforrások a modern tápegységek, világítástechnikai LED [1, 2] és az információtechnológiai berendezések (pl. számítógépek, monitorok, nyomtatók stb.), de ide sorolhatóak a kapcsolóüzemű tranzisztorokkal megvalósított teljesítményelektronikai berendezések (pl. frekvencia-váltók) [3] és a manapság egyre jobban elterjedő elektromos autók töltői is. A harmonikusok lehetséges forrásai és azok hatásai széles spektrumok között változnak, de ezek közül talán a harmonikusok jelenlétének legjellemzőbb indikátora az egyes villamos gépek és nullavezetők túlmelegedése, megszakítók indokolatlan lekapcsolása és a skin hatás [4]. A napjainkban egyre népszerűbb háztartási méretű kiserőművek (HMKE) villamos hálózati zavarainak vizsgálata is szükségszerű a következmények megelőzése érdekében. Egy egri családi ház tetőszerkezetére telepített, hálózatra visszatápláló 5,1 kWp teljesítményű kiserőmű villamos hálózati jelalak formáló hatását vizsgáltuk. A lakossági hálózat analízis során megmértük a villamos energia minőségét három lehetséges esetben: a napelem inverterének 3x400V kimenetein a közcélú hálózatba történő betáplálása esetén, a közcélú hálózatra történő 3x400V csatlakozási pontokon a napelem lekapcsolt állapotában, valamint ugyanitt annak használatával. Az analízis során a terheléses mérés - a mérés előtt még csak vélhetően - nagy hálózati jelformáló hatású mikrohullámú sütővel történt. Később ez bizonyítást is nyert. A kiserőmű csúcsteljesítménye a mérés időpontjában a napsütés intenzitásának függvényében 3,05 és 4,46 kWp között változott. A mérést HT PQA824 típusú hálózat analízátorral végeztük el [5]. Az analízátor főbb jellemzői: regisztrálás MIN/MAX/AVG, feszültség anomáliák észlelése, felharmonikus analízis, patch elemzés, villogás analízis, nagysebességű feszültség transziensek rögzítése 5,5 μ s-tól, bekapcsolási áramok rögzítése. A műszer paraméterezése a magyarországi forgalmazó által készített használati útmutató [6] alapján, míg a rögzített adatok kiolvasása a HT Italia Topview 2.2.2.3 verziójú szoftverével történt [7]. A mérési eredmények jobb átláthatósága érdekében a mért értékeket tartalmazó táblázatokon kívül az adatok grafikusán is megjelenítésre kerülnek.

2 Hálózat analízis

A hálózat analízis célja, hogy megvizsgáljuk a villamos hálózatunkat egyrészt, hogy milyen a beérkező villamos energia minősége másrészt, milyen hatással vannak rá az egyes megújuló energiaforrások és fogyasztók. Az 1. ábrán látható a

mérésről készített felvétel és a családi ház villamos elosztószekrényére való kapcsolódás. A mérés PQA824 1 és 3 fázisú hálózat analizátorral történt. A mérő csatlakozások installálásánál elengedhetetlen, hogy az RST fázisokra megegyező sorrendben csatlakoztassuk az áramváltókat és a feszültségmérőket, illetve TN-S 5 vezetékes rendszert és 3P+N+PE hálózat típust kell beállítani a műszeren. Az analízis során pillanatfelvételek készültek a mért értékekről grafikus és táblázatos formában is, melyek a TopView kiolvasó és mérési adatelemző szoftver segítségével a laptopon rögzítésre kerültek. A mérést nappali, száraz, napfényes, nyári 27°C-os kültéri hőmérsékleten végeztük el. A 2. ábra a napelem pillanatnyi teljesítményét mutatja, illetve grafikonon is láthatjuk a villamos kimeneti teljesítmény csúcsokat (kWp) az adott napon. A ZeverCloud szoftver segítségével többféle adatot is kiolvashatunk, de ezek a mostani mérések szempontjából nem relevánsak. A 3. ábra a Topview hálózat analizátor paraméterező és adatkiolvasó szoftverének felhasználói felületét mutatja, itt lehet beállítani az egyes műveleteket. A hálózati analízist elvégeztük fogyasztó (konyhai berendezés) üzemelése alatt, napelemes betáplálás esetén és anélkül is. Mindkét esetben közel azonos 15-25% volt a teljes harmonikus torzítás (Total Harmonics Distortion - THD), ami magas az IEEE 519-2022 és MSZ EN 61000-3-12 szabványok szerinti 5%-hoz képest, ez az érték érzékeny berendezések esetén már csak 3,5%. A szabvány az egyes vegyes lineáris és nem-lineáris villamos fogyasztók esetében az áram teljes harmonikus torzításának a megengedett maximális szintjét a teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítása (Total Current Demand Distortion - TDD), értékével adja meg, amely a közös villamos hálózati csatlakozási pont (Point of Common Coupling – PCC) zárlati áramának I_{SC} és az adott eszköz terhelő áramának I_L az arányától függ. Ha ez az arány <20 , akkor 5%, viszont $50 > 100$ közötti arány esetén már 12%. A TDD 100%-os terhelésen megegyezik a THD(I)-vel. A páratlan harmonikusok szabvány által megengedett torzítása a 11. rendig, frekvencia értékenként 4%. Amennyiben egy háztartási eszköz maximális hálózati áram terhelését viszonyítjuk az adott villamos elosztóhálózat zárlati áramához, akkor beláthatjuk, hogy az elenyésző része lesz annak, így célszerű lehet a szabvány szerinti 5%-ot tovább csökkenteni, így kapjuk meg a 3,5%-ot. A THD teljes harmonikus torzítás megértéséhez definiálnunk kell a harmonikusokat. A harmonikusok olyan szinuszos feszültségek vagy áramok, amelyek frekvenciája többszöröse annak az alapfrekvenciának, amelyre a villamos hálózatot tervezték (50 Hz). Torzított feszültség-hullám esetén a spektrum a torzítás jellegére jellemző harmonikus frekvenciákat tartalmaz. Az alapfrekvencia a spektrum azon összetevője, amelyre a hálózat működését tervezték. Általában ez a spektrum első és legnagyobb összetevője. A legelterjedtebb torzítás mutatók az egyedi és a teljes harmonikus torzítás. Az (1) egyenlet megadja az adott harmonikus feszültség amplitúdójának az arányát az alapharmonikus nagyságához viszonyítva. A (2) egyenlet a teljes harmonikus torzítást (THD) írja le, azaz az összes jelenlévő harmonikus feszültség effektív értékeinek az összegét viszonyítja az alapharmonikus feszültség effektív értékéhez. Az egyenletekből egyszerű számolásokkal meghatározhatóak az egyes torzítások értékei [8].

$$D_h = \frac{U_h}{U_1} \quad (1)$$

$$\text{THD}_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h}}{U_1} \quad (2)$$

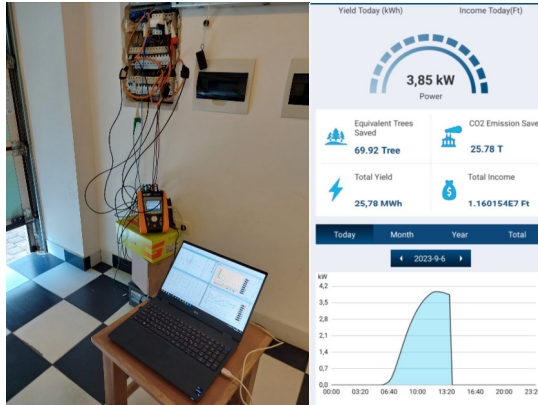
ahol,

U_h = h-adik rendszámú felharmonikus feszültség effektív értéke,

U_1 = alapharmonikus feszültség effektív értéke,

D_h = egyedi harmonikus torzítás,

THD_U = teljes harmonikus torzítás.



1.ábra

2.ábra

A hálózat analízis eszközei

A napelem pillanatnyi teljesítménye



3.ábra

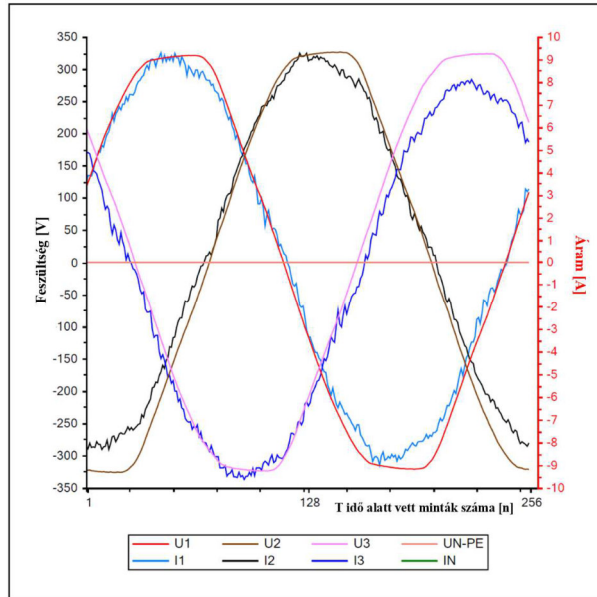
Topview paraméterező és adatkiolvásó szoftver

2.1 A napelem inverterének vizsgálata

Első lépésben a napelem invertere került analízisre. A vizsgálat során fontos a villamoshálózati-analizátor áramváltóit megfelelő áramirányba fordítani a mérendő inverter visszatápláláskori áramiránynak (csomópontból kifelé mutató áramirány) megfelelően, ami ellentétes a vételezés áramirányával. Ezzel elkerüljük a spektrum analízis során a negatív amplitúdókat az alapharmonikus (50 Hz) esetén. Csak visszatáplálás esetén, a napelem kimeneti áramát vizsgálva, a mérési eredmények alapján felvett 1. táblázat Mérés I. oszlopában látható, hogy az inverter nullavezető árama 0 A, a fázisáramok pedig közel szimmetrikusak (~6 A) voltak. Az áram felharmonikus összetevőit jellemző teljes harmonikus torzítás 3,2% volt. A mérési eredmények természetesen grafikonokon is megjeleníthetőek. A 4. ábra mutatja a mérés során egy T periódus idő alatt vett, 256 minta feszültség és áram értékeit. Megfigyelhető, hogy a hullámformák csak enyhén torzultak, ezért az áram szinusza is csekély mértékben tartalmaz felharmonikusokat. Az áram spektruma az 5. ábrán látható, az 1. alap (50 Hz) harmonikus amplitúdója 100%, de tartalmaz kevesebb, mint 5% mértékben 3. (150 Hz), 5. (250 Hz) és 7. (350 Hz) felharmonikusokat is. Az 1. táblázat, Mérés I. oszlopa segítségével le tudjuk olvasni a berendezésünk látszólagos (S) 4,42 kVA, meddő (Q) -0,02 kVAr és hatásos (P) 4,42 kW teljesítményeit is. A mérési eredmények ismeretében elmondhatjuk, hogy ez egy jó műszaki minőségű inverter, hiszen csak csekély mértékben torzítja a lakossági villamos hálózat szinuszos jelalakját.

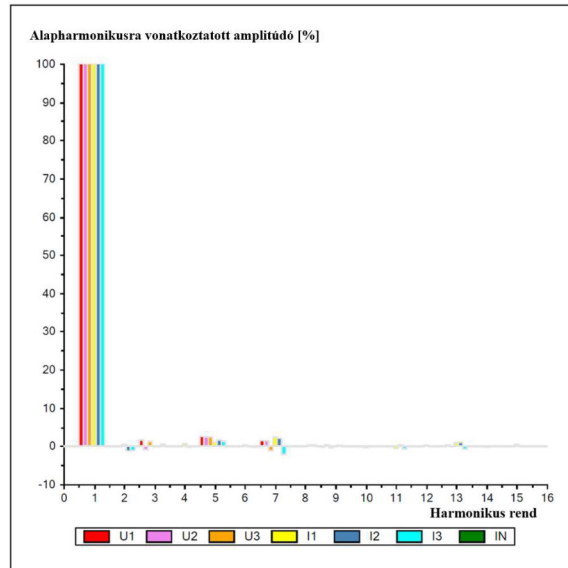
1.táblázat
Mérési eredmények I.

	Mérés I.			Mérés II.			Mérés III.			Mérés IV.		
	Fázis 1.	Fázis 2.	Fázis 3.	Fázis 1.	Fázis 2.	Fázis 3.	Fázis 1.	Fázis 2.	Fázis 3.	Fázis 1.	Fázis 2.	Fázis 3.
U [V]	236	239	237	237	234	238	232	236	232	233	236	234
I [A]	6,3	6,2	6,2	2,1	1,0	1,7	12,1	0,5	7,8	5,0	1,1	0,5
THD(I) [%]	3,1	3,3	3,2	15,6	21,2	11,7	13,0	28,8	23,8	13,3	10,4	41,0
Inull [A]	0,00			1,60			10,31			3,51		
S [kVA]	4,42			1,02			4,7			1,35		
Q [KVAr]	-0,02			0,31			-0,99			-0,26		
P [kW]	4,42			0,97			4,59			1,32		



4.ábra

Az inverter kimeneti feszültség és áram hullámformái

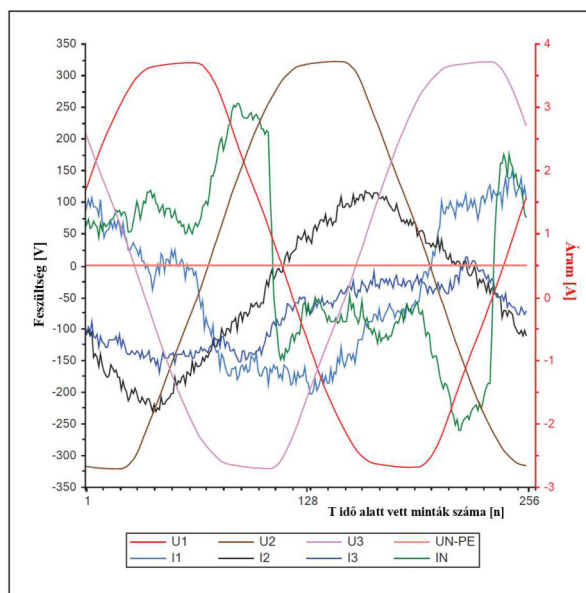


5.ábra

Az inverter kimeneti áramharmonikus összetevői a frekvencia tartományban

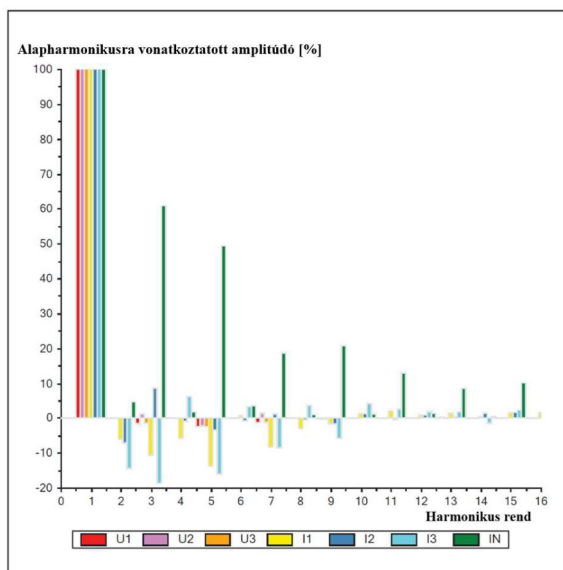
2.2 Hálózat vizsgálata lekapcsolt inverter esetén

A napelemet lekapcsolva, a helyes áramirány érdekében az áramváltókat megfordítva, gyakorlatilag csak az alaphálózatot mérve, 1 kW villamos teljesítményfelvétel esetén a teljes harmonikus torzítás 15-21% között volt fázistól függően, a nullavezető árama a fázisáramokhoz képest pedig közel 100% nagyságú (1,6 A). Ebben az esetben nagyobb, szimmetrikus terheléssel is meg kell majd vizsgálni a hálózatot, mert a magas nullavezető áram az aszimmetrikus terhelés miatt következett be. A mérés során a T idő alatt vett minták feszültség és áram értékeit a 6. ábra mutatja. Az áram hullámformák igen nagy mértékben torzultak, ezért az áram szinusz hullámformájának a harmonikus tartalma is kiemelkedő. Az áram spektruma a 7. ábrán látható, az 1. alap (50 Hz) harmonikus amplitúdója 100%, de még a 15. (750 Hz) is több mint 10% a nullavezető áramának tekintetében. Az 1. táblázat, Mérés II. oszlopa segítségével ki tudjuk értékelni a hálózatról felvett teljesítmények jellegét és nagyságát. Látszólagos teljesítmény (S) 1,02 kVA, meddő teljesítmény (Q) 0,31 kVAr és hatásos (P) 0,97 kW. Az eredmények ismeretében elmondhatjuk, hogy a mért lakossági villamos hálózat villamosenergia minőségi szempontból nagymértékben harmonikusokkal szennyezett, szinuszos jelalakja erősen torzult.



6.ábra

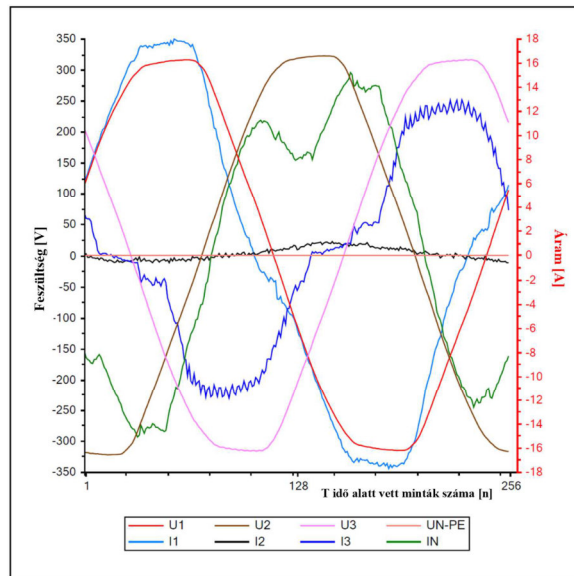
A villamos hálózat feszültség és áram hullámformái lekapcsolt inverter esetén



7.ábra

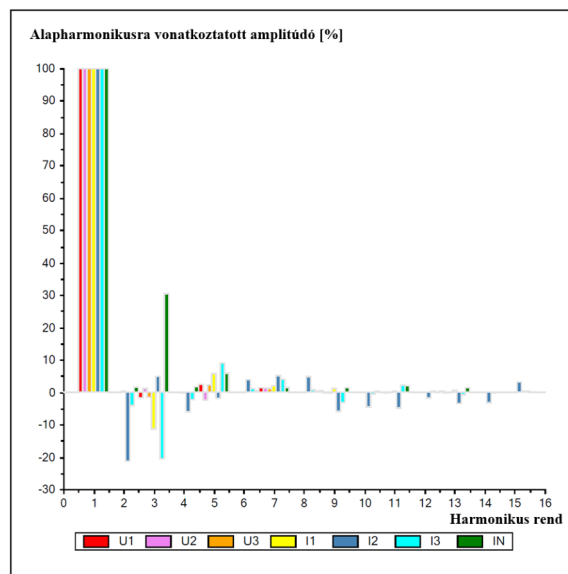
A villamos hálózat áramharmonikus összetevői a frekvencia tartományban lekapcsolt inverter esetén

A villamos hálózatot lekapcsolt inverterrel, terhelés esetén is megvizsgáltuk. A fogyasztó egy háztartási egyfázisú mikrohullámú sütő volt, 900 W melegítési teljesítményre beállítva. Az 1. táblázat, Mérés III. oszlopa segítségével a teljesítmény értékeiből látható, hogy a hálózatról felvett pillanatnyi hatásos teljesítmény értéke megemelkedett 4,59 kW-ra míg készülék nélkül ez csak 0,97 kW volt. Tehát meglepésztő az ilyen berendezéseken a felhasználó által beállítható teljesítmény érték, mert annak a többszöröse is lehet a maximális teljesítmény felvételük. Szintén látható a mért értékek között, hogy a nullavezető árama az aszimmetrikus terhelés miatt 10,31 A lett, ami előrevetíti az eddig leírtak alapján, hogy az áram szinuszhulláma torzulást fog szenvedni és emiatt megnövekszik majd a harmonikus tartalom. A teljes harmonikus torzulás az I3 áram esetében 23,76%, aminek jelalak változása jól látható a 8. ábrán a kék színnel jelzett görbén. Az áram harmonikus összetevői a 9. ábrán láthatóak, különösen a 3. harmonikusok nagysága magas az I3 és a nullavezető áramánál. Az I2 áramhoz tartozó fázison nagyon kicsi volt a terhelés (0,5 A), ezért ez az elemzés szempontjából nem releváns.



8.ábra

A villamos hálózat feszültség és áram hullámformái lekapcsolt inverter és bekapcsolt mikrohullámú sütő esetén



9.ábra

A villamos hálózat áramharmonikus összetevői a frekvencia tartományban lekapcsolt inverter és bekapcsolt mikrohullámú sütő esetén

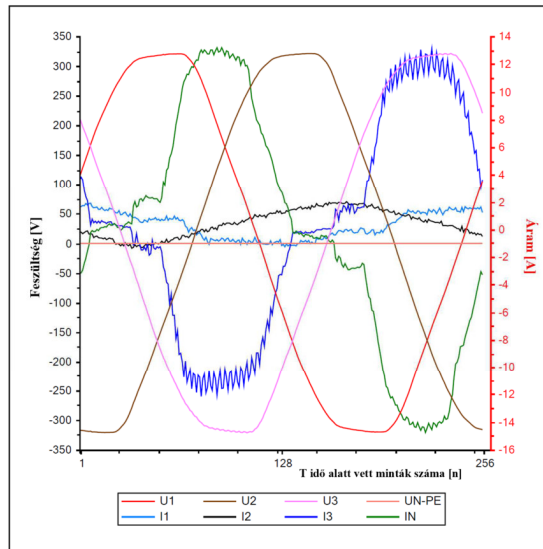
2.3 Hálózat vizsgálata bekapcsolt inverterrel

A napelemet a hálózatra kapcsolva, annak kimeneti szinuszhullám jele összeadódik a hálózat jelével (szuperpozíció), ezért módosulnak a mérési ponton a harmonikus komponensek. Az 1. táblázat Mérés IV. oszlopa alapján a pillanatnyi hatásos teljesítményfelvétel 1,32 kW volt, de mivel teljesen aszimmetrikus volt a terhelés, ezért a harmonikus torzítás is erőteljesebb lett, az 1. fázis esetében elérte a 13,3%-ot. Meg kell említeni, hogy csak a hálózaton ugyanezen a fázison az áram THD 15,6%, míg csak napelem esetében 3,1% volt, így a kettő átlaga 9,35%, ami közel áll a mért 13,3%-os eredményhez. A különbség a villamos hálózat a fogyasztás jellege és nagysága miatti állandó változásából adódik, hiszen a mérések nem ugyanabban az időpillanatban történtek. A 3. fázison a THD 41,8%, sajnos ezt a mérést meg kell ismételni, mert a mérés durva hibát tartalmazhat - vélhetően az analízátor mintavételezése miatt - ugyanis a többi mérés átlagaitól való eltérés mértéke 49%. Végezetül vizsgáljuk meg ebben az esetben is, hogy a hálózatra kapcsolt ugyanazon mikrohullámú sütő milyen változásokat okoz a hálózaton. A 12. ábrán látható, hogy a sütőnek továbbra is meg van az igen erős jelátalakító hatása. Az áram hullámformája szinte teljesen megegyezik a 8. ábrán látható, lekapcsolt inverter esetével, így a spektrumuk is közel azonos. A szinuszhullám „fésűsözöttsége” a sütő kapcsolási frekvenciájával egyezik meg. Egy T periódus idő, vagyis 20 ms alatt több alkalommal is ki/bekapcsol a sütő invertere. Ez a mérés alátámasztja azt a gyakorlati problémát is, hogy megoldást kell találni nemcsak az ipari berendezések, hanem a háztartási eszközök esetén is a villamos energia minőségének a megtartására, a káros hatások kiszűrésére. A mérés számszerűsített értékeit a 2. táblázat tartalmazza.

2.táblázat

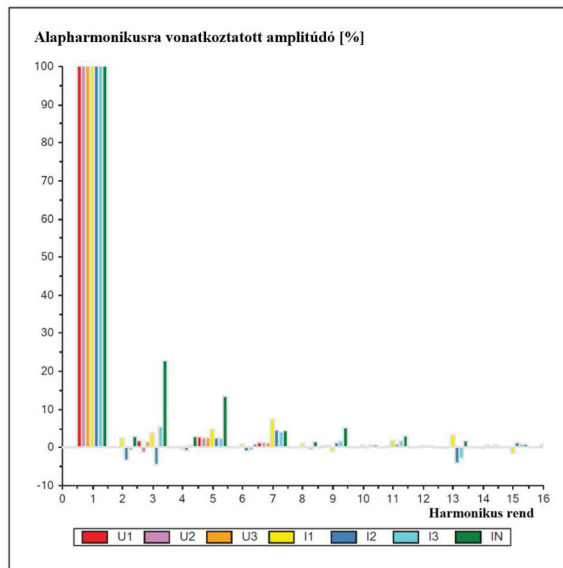
Mérési eredmények II.

	Mérés V.		
	Fázis 1.	Fázis 2.	Fázis 3.
U [V]	235	235	235
I [A]	1,0	1,1	7,5
THD(I) [%]	22,7	13,3	28,9
Inull [A]	8,37		
S [kVA]	2		
Q [KVA _r]	-0,57		
P [kW]	1,92		



12.ábra

A villamos hálózat feszültség és áram hullámformái üzemelő inverter és bekapcsolt mikrohullámú sütő esetén



11.ábra

A villamos hálózat áramharmonikus összetevői a frekvencia tartományban üzemelő inverter esetén

Összefoglalás

A vizsgálatokból kiderült, hogy a vizsgált háztartási méretű kiserőmű invertere megfelel a hálózatra visszatáplált villamos energia minőségi feltételének és még javít is az áramszolgáltatótól vételezett villamos energia minőségén, hiszen a harmonikusok a szuperpozíció elvén összeadódnak, amely az aktív felharmonikus szűrésnek elve [8, 9]. Azonban az otthonokban használt elektronikus eszközöknek és berendezéseknek a harmonikus szűrésével célszerű foglalkozni és keresnünk kell a megoldást az általuk kibocsájtott, nagy áram szinuszhullám torzítást okozó felharmonikusok kiszűrésére. Erre lehetne egy megoldás a villamos fogyasztásmérővel összekapcsolt, fázisjavító aktív harmonikus szűrő berendezés használata a családi otthonokban is. A jövőben további analízisekre és kísérletekre lesz szükség, hogy megállapítsuk a magas villamos hálózati harmonikus torzítások milyen hatással lehetnek az elektronikus berendezések működésére, például a napelemes rendszerek invertereire. A sokkal pontosabb analízisek elkészítéséhez a megújuló energiaforrást tartalmazó villamos hálózat esetén mind a vételezett, mind a visszatáplált villamos energia pillanatnyi mennyiségét és minőségét egy adott időben kell mérni, hogy egyértelműen eldönthető legyen az áram iránya, hogy a mérés időpontjában vételeztünk, vagy visszatápláltunk. Ebben ugyan segít az áram spektruma, hiszen az alapharmonikusra vonatkoztatott negatív amplitúdót a 180° -os fázis eltolódás okozza és ellentétes áramirányt jelez, de mivel a mérések nem ugyanabban az időpillanatban történnek, ezért a villamos hálózat jellemzőinek folyamatos változása miatt a mérési eredmények egzaktnak nem összevethetőek, így a ki- és bekapcsolt inverterrel történt mérések csak közelítő eredményt adtak, hiszen lehet az egyik mérés során vételeztünk, viszont a másikon már visszatápláltunk. A hálózat harmonikus szennyezettsége sem állandó, ezért a hálózati villamos energia minőségi mutatókból nem vonhatóak le egyértelmű következtetések. Nem tudni pontosan mennyire változtatja meg a hálózat szinuszhullámának alakját, ha egy berendezést a hálózatra rá-, vagy lekapcsolunk. Így ezek az adatok egy matematikai modell felállításához nem elegendők. Ezért a méréseket meg kell ismételni két hálózat analizátorral történő egyidejű méréssel, az egyik az inverter kimeneti jelalakjait analizálja, a másik pedig a hálózat betáplálási pontjait. Ezzel a módszerrel remélhetőleg sikerül majd detektálni a hálózati tranziensek esetlegesen az inverterre, de akár az egyes berendezések működésére gyakorolt közvetlen hatásait is.

Irodalom jegyzék

- [1] VLED.hu (2019.04.01.). Mit jelent a THD a LED tápegységeken?
<https://www.vled.hu/blog/mit-jelent-a-thd-a-led-tapegységeken>
- [2] Uddin, S., Shareef, H., Mohamed, A. (2013). Power quality performance of energy-efficient low-wattage LED lamps. *Measurement*, 46(10), 3783–3795.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.07.022>
- [3] Tarnik, I. (2008). Villamos hálózati zavarok. Jegyzet.
<https://www.muszeroldal.hu/measurenotes/tarnikcikk.pdf>
- [4] Chapman, D. (2001). Villamosenergia-minőség - Harmonikusok források és hatások. Alkalmazási segédlet, European Copper Institute
<https://www.muszeroldal.hu/measurenotes/harmonikusok.pdf>
- [5] Rapas Kft.: Hálózat analízátorok PQA400-PQA823-824, Budapest 2023
<https://rapas.hu/analizator/analizator-pdfs/pqa823-824.pdf>
- [6] Rapas Kft.: Használati útmutató PQA400-PQA823-824, Budapest 2007
- [7] HT Italia: Management software Topview, 2012
<https://www.ht-instruments.com/en/accessories/topview/>
- [8] Kiss, J. (2020). Aktív felharmonikus szűrők alkalmazásának lehetőségei.
<https://www.muszaki-magazin.hu/2020/01/29/aktiv-felharmonikus-szurok-alkalmazasanak-lehetosegei/>
- [9] Grady, W.M., Samotyj, M.J., Noyola, A.H. (1991). Minimizing network harmonic voltage distortion with an active power line conditioner. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6(4), 1690-1697.
<https://doi.org/10.1109/61.97708>.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/97708>