



ÓBUDAI EGYETEM

Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Villamosenergetikai Intézet

SZAKDOLGOZAT



ÓE-KVK

Hallgató neve:

Varga Attila

2021.

Hallgató törzskönyvi száma:

T007481/FI12904/K

Kötelezően választható tantárgycsoport: Energetikai informatika modul



SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Varga Attila

Szaktervezési szám: SZD21090213452001

Törzskönyvi szám: T007481/FI12904/K

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: villamosmérnöki (magyar nyelven)

Specializáció: Villamosenergetikai specializáció

A dolgozat címe: Meddőteljesítmény kompenzálás

A dolgozat címe angolul: Reactive power compensation

A feladat részletezése: 1. A meddőenergia kompenzálás általános bemutatása
2. A napelemes rendszerek által okozott problémák a fázisjavításban bemutatása
3. Egy valós ipari környezetben felmerülő probléma megoldási lehetőségei
4. Egyéb megoldások, jövőbetekintés

Intézményi konzulens neve: Morva György Ádám

A kiadott téma elévülési határideje: -

Beadási határidő: 2021. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2021. 11. 29.

P.H

.....
Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom:

.....
belső konzulens

.....
külső konzulens



HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2021. 12. 09.

.....
hallgató aláírása

Tartalom

1.	Tartalmi összefoglaló	3
2.	Content summary	4
3.	Bevezetés.....	5
3.1.	Villamosságtani háttér	5
3.2.	Gazdasági háttér.....	7
3.3.	Meddőenergia kompenzálás.....	7
3.4.	Meddőenergia kompenzáló berendezés általános alkotóelemeinek bemutatása	9
4.	Napelemes betáplálás hatásai a hálózaton.....	11
4.1.	Napenergia felhasználása.....	11
4.2.	Napelemes rendszer működése	11
4.3.	A meddőenergia kompenzálás szempontjából fontos kihatások	12
4.4.	Teljesítményviszonyok napelemes rendszer telepítése után meddőkompenzálás szempontjából.....	13
5.	Bevásárlóközpont meddőenergia kompenzálása napelemes rendszer telepítése után	16
5.1.	Esettanulmány	16
5.2.	Az üzemben lévő meddőenergia kompenzáló berendezés bemutatása.....	16
5.3.	Előzetes villamoshálózati analízis	17
5.4.	Az előzetes hálózati analízis mérési eredményei.....	19
5.4.1.	Feszültségek:	19
5.4.2.	Aszimmetria:	20
5.4.3.	Áramok:	20
5.4.4.	Teljesítmények:	20
5.4.5.	A fogyasztási adatok összefoglalása:	21

5.4.6.	Felharmonikusok vizsgálata:	21
5.4.7.	A méréssorozathoz tartozó diagrammok	22
5.4.8.	Az előzetes mérés kiértékelése, összegzése	27
5.5.	A napelemes rendszer telepítése utáni mérés.....	27
5.6.	A második hálózati analízis mérési eredményei	28
5.6.1.	Feszültségek:	29
5.6.2.	Aszimmetria:	29
5.6.3.	Áramok:	29
5.6.4.	Teljesítmények:	29
5.6.5.	A fogyasztási adatok összefoglalása:	30
5.6.6.	Felharmonikusok vizsgálata:	30
5.6.7.	A méréssorozathoz tartozó diagrammok	32
5.6.8.	A második mérés kiértékelése, összegzése.....	36
5.7.	A két mérés eredményeinek összehasonlítása	37
5.8.	A bevásárlóközpont új meddőenergia kompenzáló berendezésének típusának kiválasztása és méretezése	39
5.9.	Az új meddőenergia kompenzáló berendezés megtérülése	42
5.10.	Egyéb műszaki megoldások.....	43
5.10.1.	Meddőenergia kompenzálás aktív harmonikus szűrő berendezésekkel	43
5.10.2.	Meddőenergia kompenzálás napelemes inverterekkel	44
6.	Összefoglalás.....	44
7.	Irodalomjegyzék.....	45

1. TARTALMI ÖSSZEFOGLALÓ

Szakdolgozatom témájának a meddőenergia kompenzálást választottam, mellyel a gyakornoki munkám során részletesebben is megismerkedhettem. A villamosenergia ellátásnak ez egy nagyon fontos része mind a termelői, elosztói és fogyasztói oldalról tekintve. Az elmúlt években a fogyasztói berendezések jelentős technikai fejlődésen mentek keresztül, amely komoly kihívást jelentettek a fázisjavítás terén is, ami folyamatosan próbálja követni ezt a gyors változást. A termelői oldalon szintén nagy innovációk figyelhetőek meg, leginkább a megújuló energiaforrások költséghatékonnyá válásából fakadóan, ezek közül hazánkban leginkább a területi adottságai miatt legnépszerűbbnek a napelemes rendszerek mondhatóak. A fotovoltaiikus rendszerek fogyasztókhoz való telepítése negatív hatással lehet a meddőenergia kompenzálásra.

A dolgozatom első fejezetében összefoglalom elméleti alapon a meddőenergia kompenzálást. A villamosságtani hatterén keresztül bemutatom, hogy a ma használt villamos berendezések és eszközök jelentős többségének szüksége van a működéshez meddőenergiára és milyen hatással van az elosztói hálózatra, ami miatt érdemes ezt az energiát minél közelebb a felhasználás helyéhez megtermelni. Röviden ismertetem a meddőenergia szabályozás gazdasági hátterét, amivel rábírják a fogyasztókat, hogy tartsák bizonyos szinteken belül a közcélú hálózathoz vételezett induktív és kapacitív jellegű energiájukat. Majd bemutatom a hagyományos meddőenergia kompenzálás műszaki megoldásait és a kisfeszültségen működő berendezések felépítését.

A második részben a napelemes rendszerek kisfeszültségű hálózatokra gyakorolt hatásait vizsgáltam, ezen belül is a villamos betáplálás módját, feszültség és energiaminőség változásait, valamint a felharmonikusok jelenlétét. Az inverter által betáplált, a közcélú hálózathoz vételezett és a fázisjavító berendezés által megtermelt energiák szoros kapcsolatát részleteztem.

A harmadik fejezetben egy esettanulmányon keresztül szeretném a konkrétan felmerülő műszaki problémáknak a megoldásával foglalkozni. Egy valós létesítmény napelemes rendszerrel való fejlesztésének köszönhetően a témát körüljárva, a villamoshálózati analízisektől kezdődően a műszaki megoldásig. Továbbá számításokat végzek a beruházás megtérüléséről, illetve más megoldást jelenthető technológiákat is ismertetek.

2. CONTENT SUMMARY

I chose infertile energy compensation as the topic of my thesis, which I was able to get acquainted with in more detail during my internship. This is a very important part of the electricity supply, both from the producer, distribution and consumer side. In recent years, consumer equipment has undergone significant technical developments, which have also posed a serious challenge in the field of phase repair, which is constantly trying to follow this rapid change. On the producer side, great innovations can also be observed, mainly due to the cost impact of renewable energy sources, among which solar systems are the most popular in Hungary due to their territorial conditions. The installation of photovoltaic systems to consumers can have a negative impact on infertile energy compensation.

In the first chapter of my thesis, I summarize the compensation of infertile energy on a theoretical basis. Through the electrical hatter, I present how the vast majority of the electrical equipment and equipment used today needs infertile energy for operation and its impact on the distribution network, which makes it worthwhile to produce this energy as close as possible to the place of use. I will briefly describe the economic background of infertile energy regulation, which is used to persuade consumers to keep their inductive and capacitive energy from the public grid within certain levels. I will present the technical solutions for conventional reactive energy compensation and the construction of low voltage equipment.

In the second part, I examined the effects of solar systems on low voltage networks, including the mode of electrical input, changes in voltage and energy quality, and the presence of harmonics. I detailed the close relationship between the energy supplied by the inverter, taken from the public network and generated by the phase repair equipment.

In the third chapter, I would like to deal with the technical problems that arise specifically through a case study. Thanks to the development of a real-world facility with a solar system, the topic is explored, from electrical network analyses to technical solutions. I also make calculations about the return on investment and other technologies that can be solved.

3. BEVEZETÉS

3.1. Villamosságtani háttér

A villamos energia eljuttatása a fogyasztókig a közcélú villamos energia hálózaton történik. Az elosztóhálózat fizikai korlátjai adottak, ezért törekszünk arra, hogy a lehető legkisebb veszteséggel juttassuk el az energiát a felhasználási területre. Az elosztóhálózaton keletkező veszteséget a hővé átalakult villamos energiát értjük. A veszteségi teljesítmény négyzetesen arányos az átfolyó áramok nagyságával.

$$P_v = I^2 \cdot R$$

A felmerülő problémát a képletből következtetve két módon orvosolhatjuk. Az egyik, hogy csökkentjük a hálózat ellenállását. Ezt leginkább a vezeték és kábelhálózatok bővítését jelenti, de ez nagyon költséges és időben hosszadalmas folyamat a megfelelő tervezés és kivitelezések miatt. A másik megoldás, hogy csökkentjük az áramok nagyságát, ezt több oldalról is megközelíthetjük. A legkézenfekvőbb növelni a feszültséget ám ez a már kiépített rendszerek korlátjaiba ütközik, csökkentjük tehát az áram nagyságát a meddőenergiák minél közelebb az elfogyasztás helyéhez való megtermelésével.

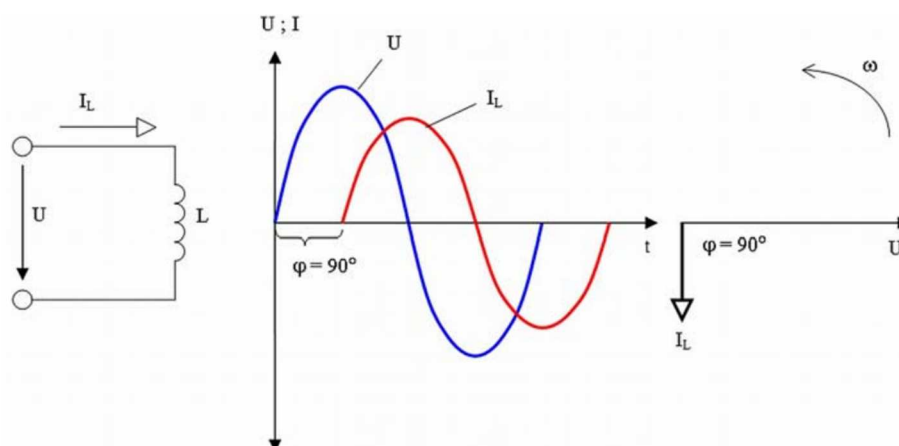
Szinte minden ma használt fogyasztónak látszólagos teljesítményfelvétele van. Ennek két összetevője közül a hatásos teljesítmény fogyasztóhoz való szállítása szükségszerű, de a meddőteli teljesítmény esetében lehetőségünk van kompenzálásra.

$$S = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I$$

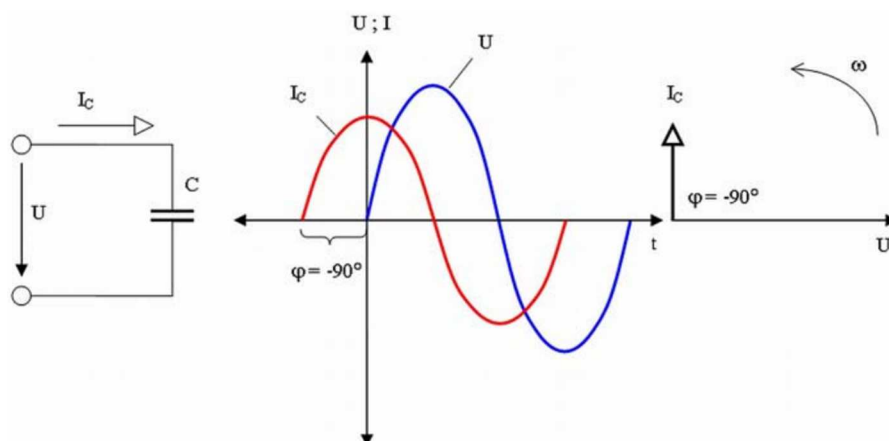
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

A meddőenergiát alapvetően két típusra bontjuk aszerint, hogy a feszültséghez képest az áram hány fokos szöget zár be. Induktív reaktancia esetében a feszültség és az áram nincsenek fázisban, az áram ideális esetben késik 90°-ot a feszültséghez képest. Ezt a jelenséget a tekercs kezdeti állapotban szakadásként való működése, végtelen nagynak tekinthető reaktanciája okozza. A kivezetéseire kapcsolt feszültség hatására megindul a mágneses tér felépítése mellyel időben párhuzamosan csökken a tekercs reaktanciája. A folyamatot az áram csak késve tudja követni.

Tisztán kapacitív reaktancia esetében a feszültség késik 90° -ot az áramhoz képest. Az ideálisnak tekinthető kondenzátorra feszültséget kapcsolva kezdeti állapotban rövidzárként viselkedik. Az átfolyó áram hatására a fegyverzetek közti töltések átrendeződése megindul, amely potenciálkülönbséget hoz létre. Ehhez a folyamathoz is idő szükséges, tehát a feszültség csak késve tudja követni az áramot.



1. ábra: Induktív reaktancia a váltakozó áramú áramkörben.



2. ábra: Kapacitív reaktancia a váltakozó áramú áramkörben.

Ezek egy hálózatban való alkalmazásával létrehozhatunk olyan áramköröket, amelyben a feltöltött kondenzátorok kisülésével biztosítjuk a tekercsek mágneses terének felépítéséhez szükséges energiát és a leépülő mágneses tér hatására visszatöltődnek a kondenzátorok. Állandósult állapotban a két áramköri elem egymásnak adja át a meddőenergiát.

3.2. Gazdasági háttér

A fogyasztókat ösztönözni kell arra, hogy a meddőenergiát ne a villamos hálózatról vételezzék ezzel jelentősen terhelve az elosztóhálózatot és csökkentve az üzembiztonságot, hanem termeljék meg saját maguknak. A villamos energia szolgáltatók lakossági árszabás esetében nem számolnak fel külön díjat, nem lakossági fogyasztók részére úgynevezett elosztói meddő energia díjat számolnak fel. A díjszabást a 10/2016. (XI. 14.) MEKH rendelet szabályozza. Kisfeszültségű csatlakozás esetében a közcélú hálózatról vételezett (induktív) meddő energia a hatásos villamos energiához viszonyított 25%-ot meg nem haladó aránynál díjmentes. Ezt az arányt a teljes elszámolási időszakra vizsgálják. Középfeszültségű csatlakozás esetében ez az arány 30% míg nagyfeszültségű csatlakozásnál 40%. Betáplált (kapacitív) meddőenergiánál nincs tolerancia határérték megadva.

3.3. Meddőenergia kompenzálás

A meddőenergia kompenzálásnak több módja is van, amely mindig az adott hálózati kép és a helyszín adta lehetőségek szerint valósul meg.

Amennyiben ismert egy adott villamos berendezés teljesítmény adatai, megvalósíthatunk egyedi kompenzálást. Ez olyan megoldás, ahol egyetlen fogyasztó meddőenergia igényét fedezi a vele párhuzamosan kapcsolt kondenzátor ritkább esetben söntfajta. Olyan esetekben célszerű ezt alkalmazni, amikor a fogyasztó meddőenergia igénye közel állandó, ilyenek például: transzformátorok, szinkron gépek.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Az egyedi kompenzálásnak több előnye is van. Műszaki megvalósítást tekintve ez a legegyszerűbb, sok esetben nem igényel külön a hálózatba kapcsoláshoz eszközt ezáltal a legolcsóbb megoldás is egyben. A belső hálózat csak nagyon rövid szakaszon történik meddőenergia szállítás.

Hátrányai, hogy bonyolultabb fogyasztói csoportoknál több tervezést igényel, ezáltal a megvalósítás és karbantartás is hosszadalmasabb, illetve olyan villamos berendezéseknél nem szerencsés az alkalmazása, ahol változó terhelés lép fel.

Az egyedi kompenzálás hátrányainak megoldására csoportos kompenzációt alkalmazunk. Több fogyasztó együttes meddőenergia igényének biztosítása a cél, amelynek telepítési helyét még mindig aránylag a fogyasztókhoz közel szeretnénk kialakítani a transzformátor felől érkező vezeték és kábelhálózat tehermentesítése érdekében, ebből adódóan ott érdemes leginkább alkalmazni, ahol ez nagy távolságot jelent.

Előnye, hogy nem feltétlenül szükséges a kompenzálandó fogyasztói csoport teljes meddőenergia igényére méretezni, amennyiben azok nem egyidejűleg működnek. A megvalósítás egy leágazáson történik ezáltal a telepítési és karbantartási munkálatok is leegyszerűsödnek.

A megoldás hátránya, hogy a fogyasztói csoport nem együttes működtetése esetén az egyes kompenzáló egységek hálózatba kapcsolását már nem lehet egyéb eszközök használata nélkül megvalósítani. A berendezés a többi alkatrész beépítésével ezáltal drágul, így annak meghibásodási lehetőségei és karbantartási igénye is növekszik.

Központi kompenzálás során a teljes üzem meddőteljesítmény igényét a fő elosztóhelységben biztosítjuk. A berendezést az elosztó fő gyűjtősínjére kapcsoljuk ezáltal biztosított, hogy nem marad olyan fogyasztói meddőenergia igény, amelyet a közcélú villamoselosztó hálózathoz kellene vételezni.

Ezt az alkalmazási módot akár teljesen eltérő fogyasztók esetében is használhatjuk, ugyanis a kompenzálás ezeknek a gépeknek az együttes teljesítményfelvételére történik. Gazdaságilag ennél a megvalósításnál lehetünk biztosak abban, hogy a villamos hálózathoz vételezett meddőenergia arány a hatásos fogyasztáshoz viszonyítva olyan mértékű marad, hogy az ne jelentkezzen a szolgáltató felé fizetendő díjként a villanyszámlán.

A központi fázisjavítás hátránya, hogy a berendezés és a fogyasztók közötti vezeték és kábelhálózat egyáltalán nem mentesül a többlet terhelést jelentő áramoktól, a vezetékek keresztmetszetét és a túláram védelmek méretét is ennek megfelelően nagyobbra kell méretezni. A megfelelő meddőenergia kompenzálás érdekében a berendezés sok más elemet is tartalmaz a kondenzátorokon és söntfójtókon kívül, melyeket a következő fejezetben mutatom be.

3.4. Meddőenergia kompenzáló berendezés általános alkotóelemeinek bemutatása

Kondenzátor: Az iparban használt speciális kivitelű, háromfázisú, delta kapcsolással beköthető kondenzátorok a legelterjedtebbek. Kialakításukat tekintve hengeres testűek úgynevezett serlegkondenzátorok a lehető legnagyobb teljesítmény/térfogat sűrűség érdekében. A legfőbb jellemzőik a működési feszültség szintjük és névleges teljesítményük. A kondenzátorok hálózatról való lecsatlakoztatása után a lekapcsolás pillanatától függően valamekkora töltéssel fognak rendelkezni. A kis veszteségi teljesítményükből fakadóan nagyon sokáig képesek ezt a töltést megtartani, ami a hálózatba visszakapcsolásuk során nem kívánt zavarokat okozhatnak. A probléma megoldására kisütő ellenállásokat alkalmaznak, ami a tárolt töltést hővé alakítja.

Söntfojtó: A kapacitív meddőteljesítmények kompenzálására hagyományosan söntfojtókat alkalmaznak. Az elrendezésük szintén háromfázisú, vasmagon elhelyezett réz tekercseléssel megvalósított induktivitások. A söntfojtók rendkívül nagy hőveszteségük miatt elhelyezésük nagy odafigyelést igényel, a megfelelő hűtés érdekében ventilátorokkal kell biztosítani a légáramlatot. A túlmelegedés megakadályozására továbbá hővédelemmel is el vannak látva, ami típustól függően körülbelül 130°C-nál biztosítja a söntfojtó hálózatról való leválasztását. Aránylag drága előállítási költségei és a kapacitív/hatásos energiafogyasztás 0%-os fizetési kötelezettségéből adódóan jellemző rájuk az adott fogyasztói csoporthoz mérten a túlméretezettség. A cél teljesítménytényező rendszerint érdemesebb kondenzátorfokozatok ki és bekapcsolásával megvalósítani.

Mágneskapcsoló: Az állandóan változó terhelés (gyakori ki és bekapcsolás), az aránylag nagy teljesítményű kondenzátor és söntfojtók (nagy áramfelvétel) és vezérelhetőség érdekében mágneskapcsolókat alkalmaznak az elemek hálózatra kapcsolására. A kondenzátorok kapcsolását a mágneskapcsoló segédérintkezői teszik lehetővé, amely a főérintkező előtt záródva előtölti a kondenzátort. Az előtöltés hatására jelentősen csökken a bekapcsolás során fellépő áramerősség.

Tirisztoros kapcsoló: Dinamikusan változó terhelések (prések, hegesztőgépek, liftek, daruk, stb.) esetén felmerül a probléma, hogy hagyományos mágneskapcsolóval nem tudunk kellően gyors működési időt létrehozni. A tirisztoros kapcsolók bekapcsolási áramlökéstől mentesen, ezzel növelve a kondenzátorok élettartamát, akár 40ms alatt képesek kapcsolni.

Áramváltó: A kompenzálni kívánt hálózat fő vezetéken vagy sínszakaszán mérnünk kell az átfolyó áramokat. A legtöbb helyen ma már elkerülik a primer tekercses másnéven primer sínes áramváltókat a körülményes beépítésük miatt. A sínre vagy kábelre fűzhető kivitelek közül zárt és bontható is alkalmazható. A nyitható áramváltók nagy előnye, hogy a mérendő sín vagy kábelszakasz megbontása nélkül felhelyezhető. A szekunder oldali kimeneti áram lehet 1A illetve 5A. Szimmetrikus terhelés esetén a költséghatékonyság szempontjából csak egy áramváltót szoktak alkalmazni. Példaként megemlíteném, hogy kis mértékű aszimmetria esetén is amennyiben a leginduktívabb fázisvezetőn van elhelyezve az áramváltó és a berendezés ebből számolja a kompenzációhoz szükséges hálózatra csatlakoztatandó kondenzátor teljesítményt, a három fázis teljesítményösszege akár kapacitív irányba is átbillenhet. Ilyen esetben a fogyasztó akár kapacitív meddőenergia díjat is fizethet a szolgáltató felé anélkül, hogy kapacitív jellegű fogyasztói berendezést üzemeltetne.

Torlófojtó: A kondenzátorok reaktanciája erősen frekvenciafüggő. Alacsony frekvencia esetén szakadásként, nagy frekvencia esetén rövidzárként működnek, ezért kiemelt fontosságú, hogy a kondenzátorokat védjük a felharmonikus áramokkal szemben. A torlófojtók fizikailag egy vastesten elhelyezkedő három független tekercs összesen hat kivezetéssel. Elrendezésük a mágneskapcsoló és a kondenzátor közé sorosan valósul meg. A létrehozott soros LC kör rezonancia frekvencia alatt kapacitív, felette induktív jelleget mutat. A legfőbb paraméter, ami jellemzi a fojtási tényező más néven csillapítási tényező. Gazdasági szempontból háromféle fojtási tényező alakult ki amelyet az iparban használnak, ezek a következők: 5,67% - 210Hz; 7% - 189Hz; 14% - 133,6Hz. Alkalmazásuk jelentősen megnövelheti a kondenzátorok élettartamát.

Vezérlő automatika: Speciálisan a meddőenergia kompenzációra fejlesztett készülék. Feladata, hogy a beállított úgynevezett „cél $\cos\varphi$ ”-n tartsa a teljesítménytényezőt. Általában ez az érték induktív 0,98 a megengedett még díjmentesen vételezhető induktív/hatásos energiafogyasztás aránya miatt. Az eszköz a feszültség és áram bemenetei segítségével kiszámolja az aktuális teljesítménytényezőt és a szükséges meddőteljesítményt. Kimenetein pedig amelyek lehetnek relés vagy félvezetős kivitellűek, a mágneskapcsolókat vagy a tirisztoros kapcsoló egységeket működteti. A korszerű automatikák ma már számos paraméterezési lehetőséget nyújtanak és sok berendezést védő funkcióval el vannak látva.

Többek között az áram harmonikus tartalmát is képesek mérni, melynek túl magas értékénél a kondenzátorokat védve nem kapcsolják a hálózatra.

4. NAPELEMES BETÁPLÁLÁS HATÁSAI A HÁLÓZATON

4.1. Napenergia felhasználása

Napjainkban az egyik legmeghatározóbb megújuló energiaforrást a nap energiája jelenti. A napelemek egyre nagyobb hatásfokának és egyre olcsóbb előállítási költségének köszönhetően belátható időn belül megtérülhet egy napelemes rendszer kiépítése. Ipari fogyasztók esetében, ahol a villamosenergia árát a versenypiac határozza meg, jelenleg még gyorsabb megtérüléssel lehet számolni a lakossági fogyasztóhoz viszonyítva. A gyors megtérülés és az előrejelzések szerint egyre növekvő energia árak következtében sok vállalat dönt úgy, hogy beruház napelemes rendszer kiépítésére.

A napelemek dinamikus elterjedése jelentősen befolyásolja a hálózat tervezésének és üzemeltetésének témakörét. Számos olyan hatásuk van a hálózatra, amelyek további számításokat és tervezést igényelnek.

4.2. Napelemes rendszer működése

„A napelem működése a fényelektromos jelenségen alapul, azaz a nap sugárzási energiáját közvetlenül alakítja villamos energiává mechanikai vagy termikus beavatkozás nélkül. A napelemek félvezető anyagból készülnek, leggyakrabban szilíciumból. A tiszta félvezető alapanyagon egy p típusú és egy n típusú réteget hoznak létre adalékolással. A két réteg határán kialakul a p-n átmenet, amit a töltéshordozók a rákapcsolt megfelelő polaritású feszültség hatására képesek átlépni. Ha a félvezetőt fény éri, akkor a sugárzást alkotó fotonok energiája készíti a töltéshordozókat az energialepcső leküzdésére. Tehát az elnyelt sugárzás közvetlenül villamos töltéseket hoz létre az anyagban, melyet a kialakított villamos tér szétválaszt és az így keletkezett áram a külső kontaktusokon keresztül elvezethető. A napelem cellák kimeneti feszültsége körülbelül 0,6 V szobahőmérsékleten és terhelésmentes esetben. Amint a napsugárzás melegíti a cellát, valamint nagyobb áramok folynak rajta, akkor a cella feszültsége lecsökken. Ezen okból kifolyólag a napelem cellák általában sorosan össze vannak kapcsolva, ezzel növelve a kimeneti feszültséget. A sorba kapcsolt cellák gyakran párhuzamosan is vannak kötve, így a kimeneti áram lesz nagyobb. Ezt a soros és párhuzamos

elektromos kapcsolatot, továbbá a cellák védelmét a környezeti hatásoktól valósítja meg a napelemes rendszer központi egysége, a napelem modul. A napelem modulok által előállított elektromos áram egyenáram, ezért a villamos hálózatba történő visszatáplálás biztosítása érdekében szükség van egy olyan eszközre, amely ezt az egyenáramot az áramszolgáltatók szigorú elvárásainak megfelelő minőségű váltakozó árammá alakítja. Ezt az áramirányítós eszközt nevezzük inverternek.” [\[1.\]](#)

Az inverterek nem képesek tökéletes szinuszos áramot előállítani, tekintve, hogy ezt teljesítményelektronika segítségével teszik. Az inverterek áramminőségére vonatkozó előírásokat az IEC 61727 szabvány tartalmazza. Az inverter által kibocsátott névleges áramértékhez viszonyított áramtorzulás nem haladhatja meg az 5%-ot. A szabvány kiter az egyenáram betáplálásának mértékére is, ezt szintén a névleges áramértékhez viszonyított arány határozza meg, ami ebben az esetben 1%. A hálózatba táplált áram az inverter működéséből adódóan nem csak alapharmonikust tartalmaz. A felharmonikusok pedig komoly problémát okozhatnak a meddőenergia kompenzáló berendezésekben ezért nagy körültekintést igényel együttes alkalmazásuk.

4.3. A meddőenergia kompenzálás szempontjából fontos kihatások

A napelemes rendszereknél egyik legtöbbet említett hálózatra gyakorolt hatás a feszültség szint ingadozása. A feszültségváltozás értékét több tényező befolyásolja: a napelemek száma, a napfény intenzitásának változékonysága, hosszú távvezetéken való elhelyezés. A hálózati feszültség névleges értékétől nagyobb feszültséget hosszabb ideig többnyire akkor mérhettünk amikor a betápláló transzformátor alacsony kiterheltség mellett üzemelt. Ebből következik, hogy a transzformátorról üzemelő berendezéseknek nem volt jelentős áramfelvétele ezáltal kompenzálendő meddőteltjesítmény sem volt. A túlméretezett napelemes rendszerek termelés alatt olyan szinten megemelhetik a tápponti feszültség szintet, amely a kondenzátortelepek belső szigetelésének öregedését meggyorsíthatja.

A kondenzátorok felharmonikus tűrése nagyon csekély. Jellemzően a régebbi inverterek tartalmaztak transzformátort, ami a galvanikus leválasztás mellett jótékony hatással volt a harmonikus tartalomra is. A jobb hatásfok és az alacsonyabb gyártási költségek miatt nem építenek transzformátort az inverterbe. Itt fontosnak tartom megemlíteni, hogy elsősorban nem

az inverter a felelős a hálózaton folyó harmonikus áramok jelenléteért, többnyire a nemlineáris fogyasztók keltik őket.

Egyre több gyártónál elérhető olyan inverter mellyen sok más funkció mellett lehetővé teszik a teljesítménytényező paramétereizhetőségét egy adott tartományon belül. Későbbiekben részletesen kitérek ennek a funkciónak a hasznosságára, mint egy lehetséges meddőenergia kompenzációs mód. Ha olyan invertert alkalmaznak, amelyben nem elérhető a teljesítménytényező állításának lehetősége, vagy a nagyobb hatásos teljesítmény betáplálásának reményében nem is használják ki ezt a funkciót, akkor tekinthetjük úgy, hogy a betáplált áram a feszültséggel fázisban van.

A későbbiekben olyan eseteket fogok kitárgyalni, amely során feltételezzük, hogy a meglévő meddőenergia kompenzáló berendezés annak üzembehelyezése óta rendszeres karbantartás mellett megfelelően működött, majd a hálózatra napelem rendszert telepítünk és annak bekötési pontjától függően a meglévő fázisjavító berendezés miként tud tovább üzemelni.

4.4. Teljesítményviszonyok napelemes rendszer telepítése után meddőkompenzációs szempontjából

Szaktervezésem ezen részében azokat az eseteket fogom kitárgyalni, amelyek során a napelemes rendszer betáplálását a kisméretű hálózaton különböző pontokban valósítjuk meg.

Első esetben a meddőenergia kompenzáló berendezés áramváltója az elszámolási mérési pont és a napelemes rendszer betáplálási pontja után helyezkedik el.

Ebben az esetben a fázisjavítás szempontjából egyoldali betáplálásról beszélhetünk. Amennyiben termel a napelem, de a pillanatnyi fogyasztói teljesítmény meghaladja az inverter által betáplált teljesítményt, jelentősen megnövekedhet a közcélú hálózathoz vételezett induktív meddő/hatásos fogyasztási arány. A problémát az jelenti, hogy a fogyasztók meddőenergia igényüket továbbra is hálózathoz vételezik. Az előzetesen méretezett fázisjavító berendezés nem rendelkezik elegendő vagy éppen kellően kis kondenzátor fokozattal, melyeknek hálózatra kapcsolásával ismét elérhetnénk a cél teljesítménytényezőt, illetve 25% alá szoríthatnánk az

induktív meddő energia/hatásos energia fogyasztási arányt. Ennek következtében olyan arányú meddőenergia fogyasztás jön létre, amely jelentkezik a villanyszámlán.

Amennyiben a napelemes rendszer több hatásos energiát termel, mint amennyit az adott pillanatban a berendezések elfogyasztanak, visszatáplálásról beszélünk. Visszatáplálás esetén a jelenlegi szabályozásnak köszönhetően nem számol fel a szolgáltató külön díjat arra a meddőenergiára, amelyet a közcélú hálózathoz vételez a fogyasztó. A fent említett hálózati kép esetében a meddőenergia kompenzáló berendezés viszont azt látja, hogy a szokásos meddőenergia és hatásos energia fogyasztás van jelen, ennek megfelelően kompenzál. Ilyen esetben a meddőenergia díjtól nem kell tartani, de a hálózathoz terhelő áramok csökkentése érdekében érdemes a fázisjavítót üzemeltetni.

Második esetben a meddőenergia kompenzáló berendezés áramváltója az elszámolási mérési pont és a napelemes rendszer betáplálási pontja között helyezkedik el.

A villamos elosztóhelységeket rendszerint a későbbi bővíthetőség érdekében túlméretezik. A napelemes rendszer betáplálását egy szabad leágazásra kötik be, ez többnyire fogyasztóknak szánt leágazás lenne, de a kivitelezési költségek csökkentése érdekében napelemes rendszer telepítéséhez is felhasználják. Ebben az esetben a fázisjavítás szempontjából kétoldali betáplálásról beszélhetünk. Itt is elmondható, hogy amennyiben villamos energiát termel a napelem, de a hatásos teljesítmény igény egy részét még mindig a hálózat biztosítja tehát még nem beszélhetünk visszatáplálásról a villamos hálózatba, jelentősen megnövekedhet a hálózathoz vételezett induktív meddő/hatásos energiák aránya. A meddőenergia kompenzáló berendezés nem elegendő, illetve kis fokozatának hiányának veszélye itt is fent áll, emellett számításba kell venni az áramváltó által mért jelet. Amennyiben az áramváltó primer oldali áramához mérten csupán néhány százaléka a hálózat felől folyó áramerősség a szekunder oldali jel olyan mértékben lecsökkenhet, hogy az nem éri el azt a minimum értéket, amellyel az automatika megfelelő biztonsággal tud kompenzáló fokozatokat kapcsolni.

Visszatáplálás esetében a hálózaton üzemelő berendezések elfogyasztott hatásos energiáján felül a napelemes rendszer a villamos elosztóhálózatba is képes energiát juttatni. A meddőenergiákat a fogyasztók továbbra is a hálózathoz vételezik. Ebben az esetben is igaz, hogy a szolgáltató nem számol fel a meddőenergia fogyasztás után díjat. A fázisjavító

berendezés működését ebben az esetben jelentősen meghatározza az automatikájának a típusa, illetve annak beállításai. Azokon az automatikákon amelyen létezik energiairány beállítási lehetőség, azokon gyakorlatilag visszatápláláskor kikapcsolhatjuk a kompenzálást. Ez fogyasztó számára a fázisjavító berendezés rövidebb működtetését jelentheti, amellyel növekedhet akár a karbantartási periódusidő. A meddőenergia biztosítását teljes egészében így az erőműveknek, illetve az elosztóhálózaton működő kompenzáló egységeknek kell átvállalnia.

5. BEVÁSÁRLÓKÖZPONT MEDDŐENERGIA KOMPENZÁLÁSA NAPELEMES RENDSZER TELEPÍTÉSE UTÁN

5.1. Esettanulmány

Szakmai gyakorlatom helyéül szolgáló cég által, lehetőségem nyílt az adott témakört jobban megismerni egy konkrét példán keresztül. Egy nemzetközi viszonylatban is nagynak számító bevásárlóközpontokat üzemeltető cég keresett meg minket azzal kapcsolatban, hogy a jövőben szeretnék kihasználni az épületek kínálta hatalmas tetőket. Néhány berendezésen kívül mint például légkezelő technológiák, a felület teljesen üresen állt, ezért adódott a lehetőség, hogy az épületnek saját napelemes rendszere létesüljön. A tervek alapján a beruházó cég több bevásárlóközpont tetején szándékozott napelemes rendszert kiépíteni, ezért az üzemeltető céggel közösen egyeztetve arra a döntésre jutottak, hogy ilyen mértékű beruházásnál érdemes a meglévő villamos hálózatot alaposan felmérni.

A meddőenergia kompenzálásra szakosodott céget, melynél dolgozom a megfelelő fázisjavítás kialakításával bízták meg. A jelentős mértékű beépíteni kívánt napelemek összteljesítménye miatt a meddőkompenzálás mellett a villamosenergia minőségének ellenőrzését is elvégeztük. A kiépítést megelőző néhány hónappal olyan hálózati mérést végeztünk el, mellyel a bevásárlóközpont fogyasztási szokásait, a meglévő meddőenergia kompenzáló berendezés működését, illetve a villamosenergia minőségét is vizsgáltuk az összehasonlíthatóság érdekében.

5.2. Az üzemben lévő meddőenergia kompenzáló berendezés bemutatása

A bevásárlóközpont meddőenergia kompenzálását egy Hunyadi Heka típusú fázisjavító berendezés látja el. A berendezés rendszeres karbantartásából ismert, hogy névleges teljesítményét képes leadni, a mérés ideje alatt nem tartalmazott olyan kapacitáscsökkent kondenzátort, illetve megfelelően működött. A berendezés paraméterei a következő táblázatban látható.

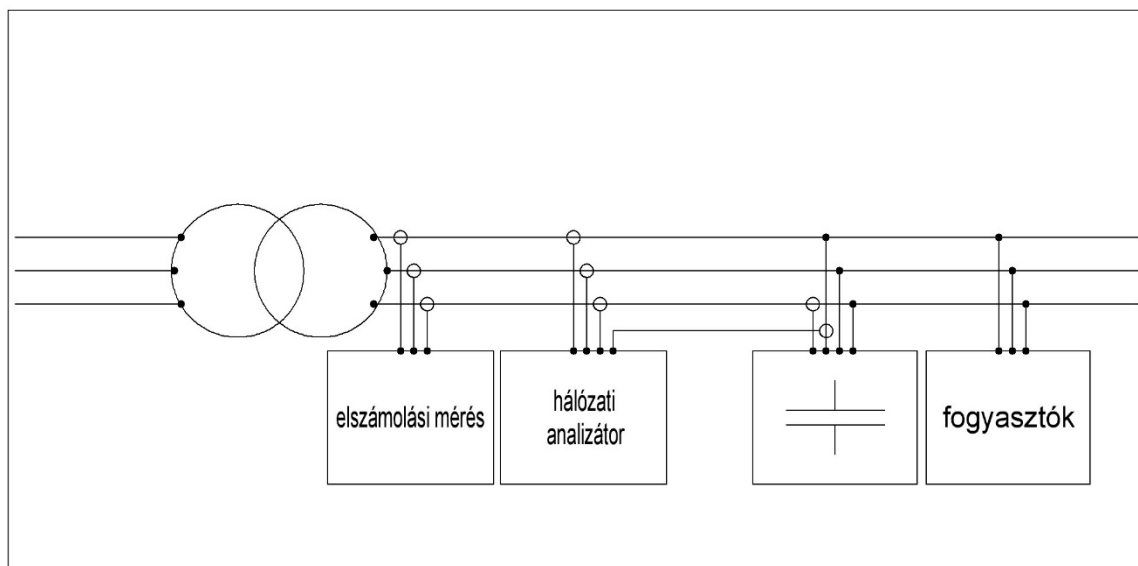
berendezés típusa	Hunyadi Heka
gyártási száma	1934
névleges teljesítménye	145kvar
fojtózotttsági tényező p%	0% (nem fojtózott)

fokozatok teljesítménye	10kvar; 10kvar; 25kvar; 50kvar; 50kvar
automatika típusa	Janitza Prophi
kondenzátorok típusa	Elektronikon MKPg
Mágnescapcsolók típusa	Benedikt & Jäger
beállított $\cos\varphi$	0,98
elért $\cos\varphi$	0,98
áramváltó típusa	1600A/5A
kondenzátor kisütési idő	40 másodperc
termosztát hűtés	30°C
termosztát védelem	50°C
fázisjavító leágazás túláram védelem	3x315A késés olvadóbiztosító
betápláló vezeték típusa	3x240mm ² Cu

5.3. Előzetes villamoshálózati analízis

Az általunk használt Hioki 3196 típusú háromfázisú ipari villamoshálózati analizátor műszer. A műszer méri a hálózati feszültségek és áramának tranzienseit, feszültségeséseket, feszültségemelkedéseket, feszültség kimaradásokat és a frekvenciaingadozásokat és a harmonikus analízisét méri az 50 harmonikusig egyen- és váltóáramnál. Az analizátor lehetővé teszi az összes elektromos mennyiség RMS értékének háromfázisú mérését váltóáramú rendszereknél. A fenti paramétereket egyidejűleg méri az MSZ EN 50160 szabványnak megfelelően. A műszernek köszönhetően olyan fogyasztási viszonyokat is megállapíthatunk, amelyre a hagyományos villamos fogyasztásmérő nem képes. A negyed óránként eltárolt adataiból csak az időintervallumra vonatkoztatott átlagolt teljesítményeket lehet megállapítani, amelyből a gyors változásokat nem lehet látni.

A hálózati mérés felhelyezését a bevásárlóközpont épületén kívül elhelyezett transzformátorház kiefeszültségű oldalán végeztük el. A mérési pont kiválasztása célszerűen úgy lett kiválasztva, hogy a transzformátorról üzemelő összes fogyasztói berendezés áramfelvételét rögzítsük.



3. ábra: Az előzetes hálózati analízis elhelyezését szemléltető ábra

Az alkalmazott mérőműszer rendelkezik egy úgynevezett eseményrögzítési funkcióval. A mérési időtartam alatt a beállított átlagolási időnek megfelelően a műszer rögzíti a mérendő mennyiségek átlagos értékeit, valamint az átlagolási időnek megfelelő periódusokon belüli minimális és maximális értékeket. Emellett lehetőség van arra, hogy bizonyos előre beállított határértékek túllépése esetén a mérőműszer eltárolja az esemény bekövetkeztének környezetében rögzített áram és feszültség jelalakokat. A jegyzőkönyvben elsősorban ezeket értjük események alatt.

A regisztrálható események száma mérésenként limitálva van az alkalmazott mérőműszer típusának megfelelően, a mérőműszerben található memória méretétől függetlenül (Jellemzően 1000 darab jelalak rögzítésére van lehetőség mérésenként).

A hálózati analízátort a mérési pontnak megfelelően és az alkalmazott mérőeszközök típusának ismeretében paraméterezni kell. A betáplálás védelméül szolgáló Merlin Gerin Masterpact M20 N1 2000A névleges áramú háromfázisú megszakító ismeretében, amelyen $I_r=1x$ szorzó került beállításra, valamint a réz sín fizikai méreteiből adódóan kiválasztásra került a Hioki CT9667-02 flexibilis áramváltó. A feszültség mérését a fázisvezető sínekre rögzített krokodilcsipeszekkel valósítottuk meg. A műszeren továbbá beállítottuk a mérési ponthoz igazított eseményrögzítési funkciókat többek között az MSZ EN 50160-as szabvány által definiált feszültség felharmonikus tartalmára vonatkozó határértékeket. Az említett szabvány kis és közép feszültségű hálózati csatlakozási pont esetében határértékeket definiál a

feszültség felharmonikus tartalmára vonatkozóan. A megadott határértékeknek az egy hetes összefüggő mérési időszak 95%-ában kell eleget tennie a mért adatoknak. Az egyes felharmonikusok esetében a határokat az alábbi táblázat tartalmazza:

Az egyes felharmonikus feszültségek Un százalékában megadott értékei a csatlakozási pontokban, 25-ös rendszámig:

Páratlan felharmonikusok				Páros felharmonikusok	
3-nak nem többszöröse		3-nak többszöröse			
Rendszám h	Relatív feszültség	Rendszám h	Relatív feszültség	Rendszám h	Relatív feszültség
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
11	3,5%	15	0,5%	6 - 24	0,5%
13	3%	21	0,5%		
17	2%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25					
MEGJEGYZÉS: 25-nél nagyobb felharmonikus rendszámra nincsenek értékek, mivel azok általában kicsik és a rezonanciahatások miatt nagyon kiszámíthatatlanok.					

A fentiek mellett a feszültség teljes felharmonikus torzításának 8% alatt kell lenni (beleértve az összes felharmonikust a 40-es rendszámig).

5.4. Az előzetes hálózati analízis mérési eredményei

A méréssorozat kiértékelése

5.4.1. Feszültségek:

Átlag érték	Minimális érték	Maximális érték	A mérési időszak 5%-ában meghaladott érték
236.2 V	231.3 V	241.3 V	239.04 V

A feszültség változása nem jelentős (1. diagram), a feszültség értékek a regisztrálás alatt a szabványban megadott tűréshatáron belül voltak. A mérés során olyan esemény, amely a szabványban megengedett értékeket túllépte volna nem történt.

5.4.2. Aszimmetria:

Átlag érték	A mérési időszak 5%-ában meghaladott érték
0.29 %	0.36 %

A feszültség negatív sorrendű aszimmetriájának értéke megfelelt a szabványban előírtaknak.

5.4.3. Áramok:

Fázisáramok mérése:

Átlag érték	A minimális áramfelvétel	A maximális áramfelvétel	A fázisáramok közötti átlagos aszimmetria
268.2 A	140.7 A	398 A	4.06%

A mért áramok időbeni változásait a 3. diagramon mutatjuk be.

5.4.4. Teljesítmények:

Hatásos teljesítmény (5.diagram):

Átlag érték	A maximális igénybevett teljesítmény	A minimális igénybevett teljesítmény
186.26 kW	258.1 kW	98.7 kW

Meddő teljesítmény (5.diagram):

Átlag érték	A maximális meddőteljesítmény	A minimális meddőteljesítmény
35.04 kvar	52.9 kvar	18.1 kvar

A terhelési adatok összefoglalása:

A mérés során a maximális hatásos teljesítmény 258.1 kW	A maximális meddőteljesítmény 52.9 kvar
--	--

A terhelési adatokat az 5. diagramon ábráztuk.

5.4.5. A fogyasztási adatok összefoglalása:

A mérés során mért hatásos energiafogyasztás	Az induktív meddő energiafogyasztás	A kapacitív meddő energiafogyasztás
31074.97 kWh	5846 kvarh	0 kvarh

Induktív meddő/hatásos fogyasztás aránya	Kapacitív meddő/hatásos fogyasztás aránya
18.81%	0%

Az induktív meddő/hatásos energiafogyasztás aránya nem haladja meg a közép feszültségű vételezés esetén, a szolgáltató által meghatározott 30 %-ot. A fogyasztási adatok igazolják, hogy a fázisjavító berendezés megfelelően kompenzálta a fellépő meddőteltjesítményeket.

5.4.6. Felharmonikusok vizsgálata:

Feszültség:

Az átlagos teljes feszültség torzítás (THD)	A mérési időszak 5%-ában meghaladott érték
1.52%	1.93 %

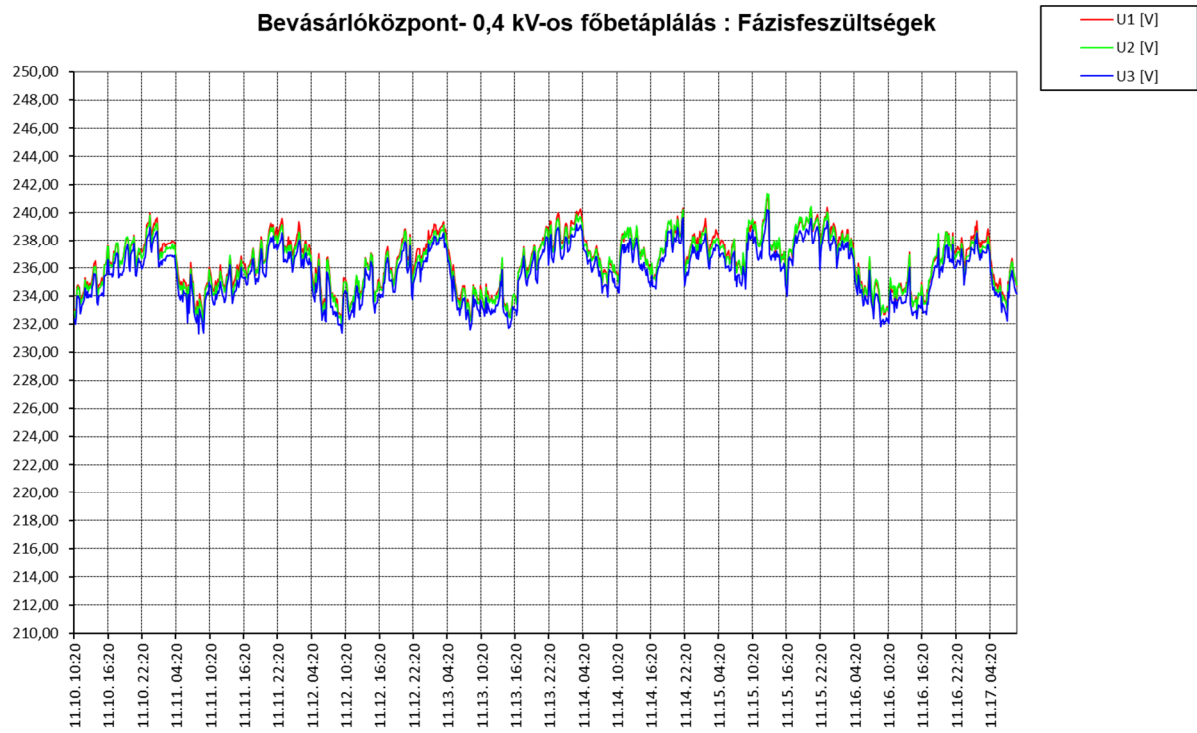
Áram:

Az átlagos áram felharmonikus tartalom	A mérési időszak 5%-ában meghaladott érték
5.26%	6.71%

A hálózaton mért feszültség felharmonikusok értékei az MSZ EN 50160-as szabványban foglalt határértékeket sem a teljes harmonikus torzítás, sem az egyedi felharmonikus torzítások szempontjából sem lépték túl. Az említett szabvány az elosztóhálózati csatlakozási ponton szolgáltatandó villamosenergia minőségét írja le, kis- és közép feszültségű csatlakozás esetén. A benne foglalt határértékek a létesítmény hálózati csatlakozási pontjára vonatkoznak, azonban a mérési ponton kapott eredmények minősítésére is jó kiindulási alapot

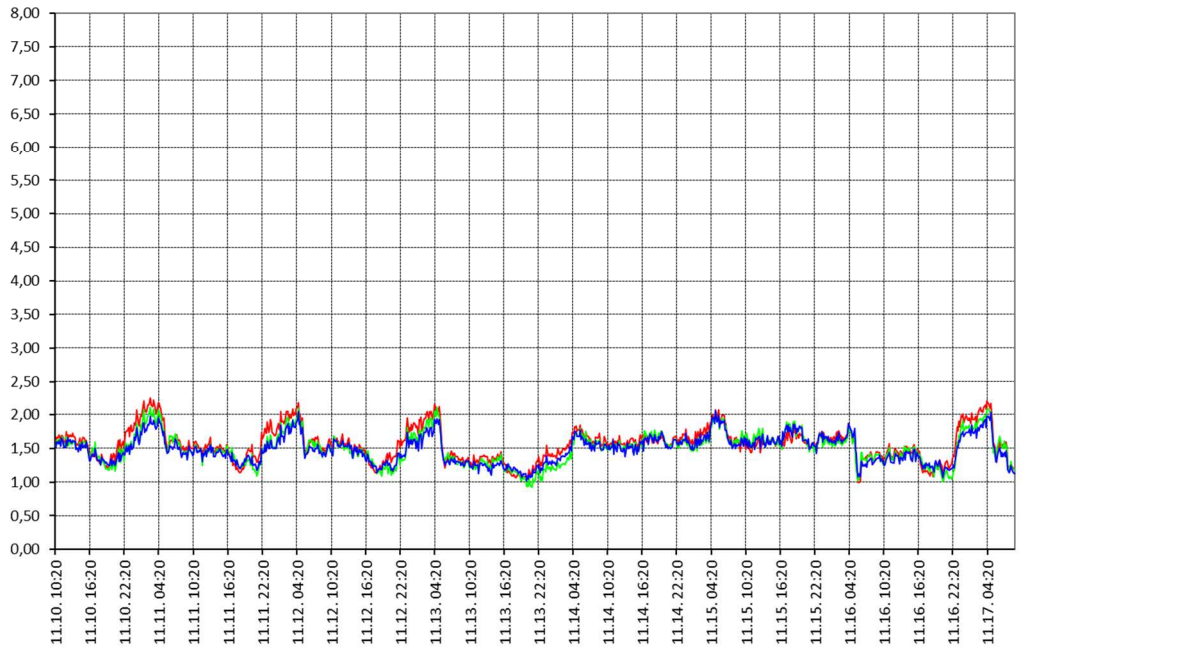
adnak. A feszültség teljes felharmonikus tartalmának a szabvány értelmében 8% alatt kell lennie az egy hetes mérési időszak 95%-ában (2. diagram).

5.4.7. A méréssorozathoz tartozó diagrammok



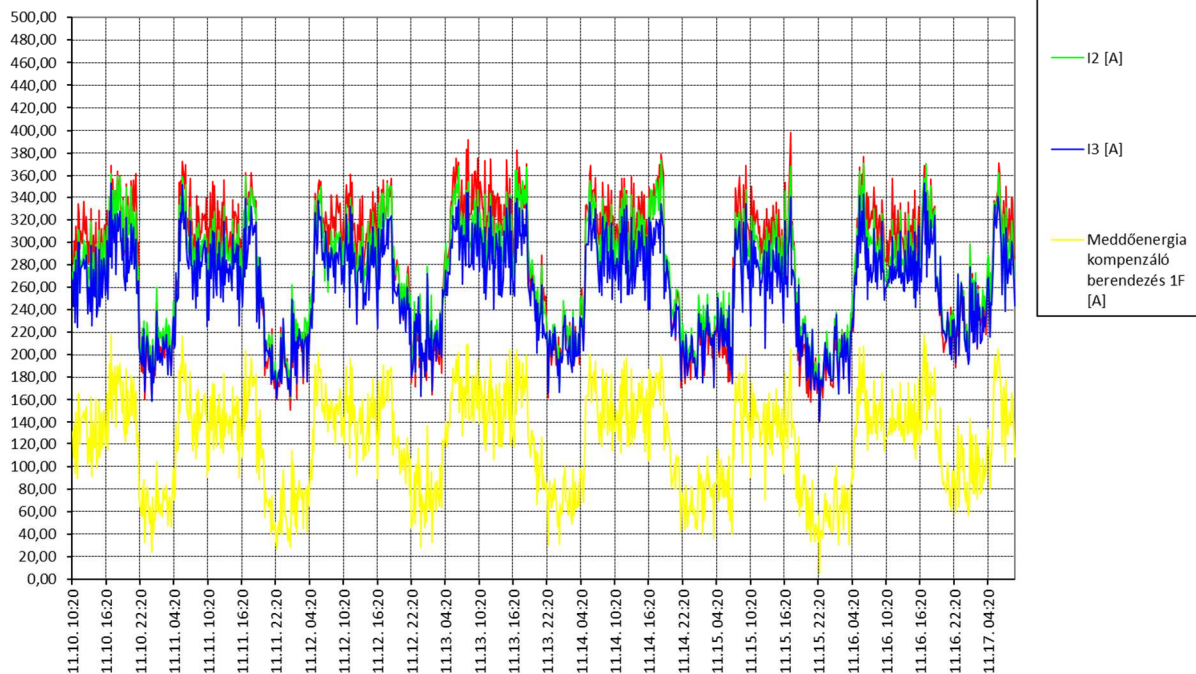
1. diagram: fázisfeszültségek effektív értékei

**Bevásárlóközpont- 0,4 kV-os főbetáplálás : Fázisfeszültségek
harmonikus torzítása**



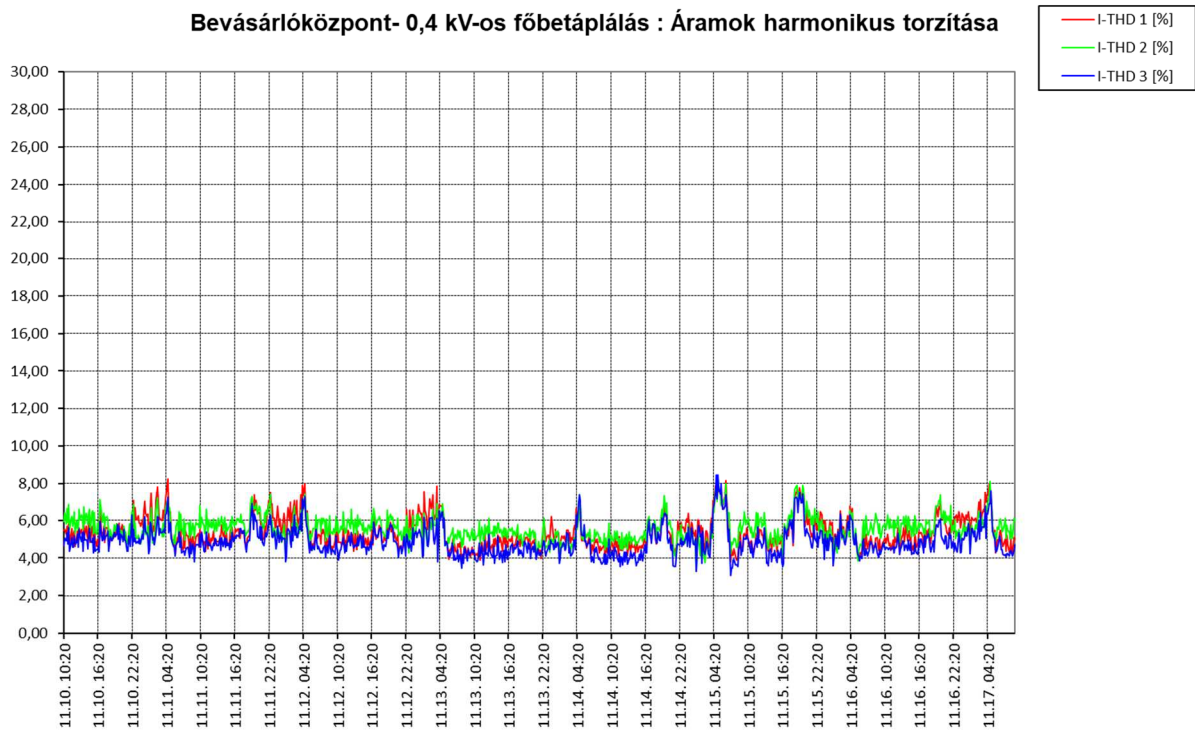
2. diagram: fázisfeszültségek teljes harmonikus torzítása

Bevásárlóközpont- 0,4 kV-os főbetáplálás : Áramok



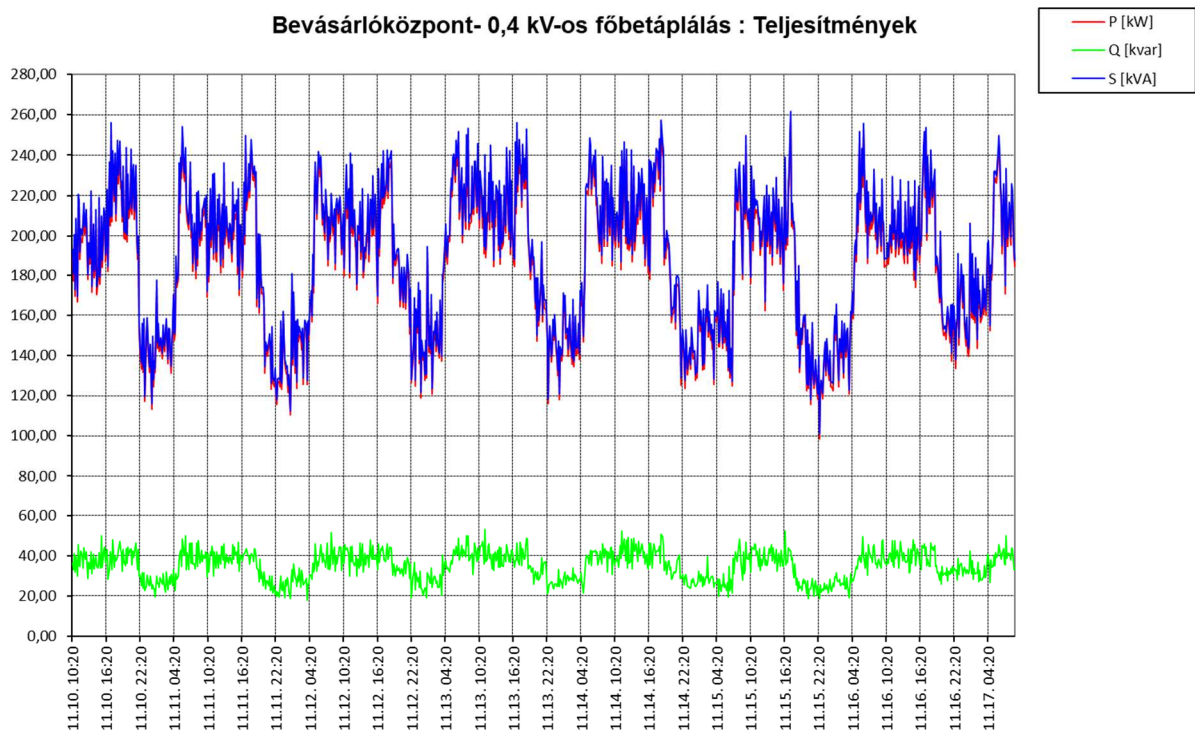
3. diagram: áramok effektív értékei

Bevásárlóközpont- 0,4 kV-os főbetáplálás : Áramok harmonikus torzítása

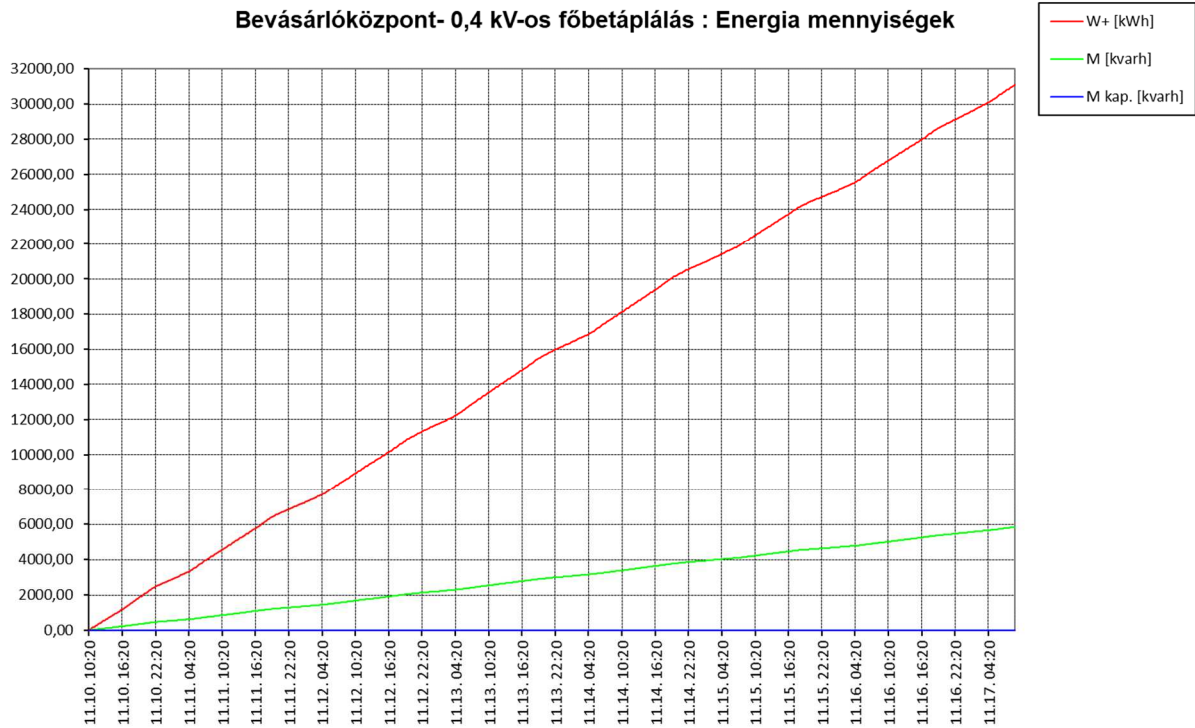


4. diagram: áramok teljes harmonikus torzítása

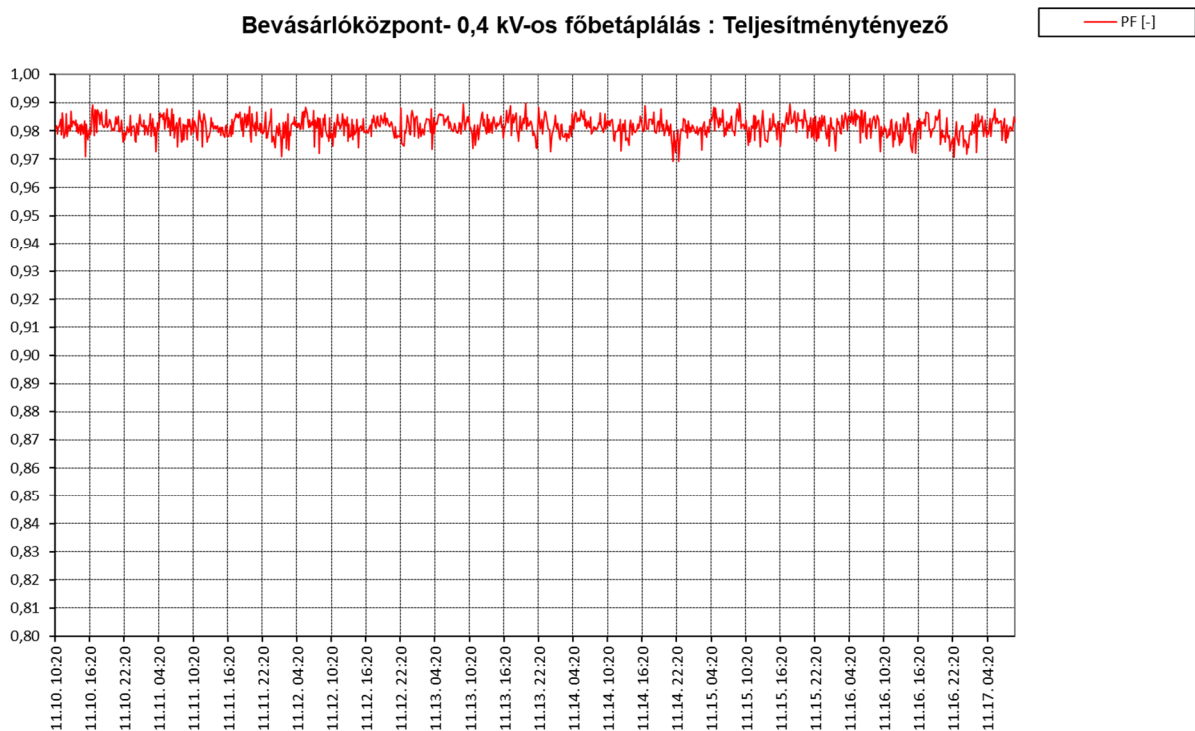
Bevásárlóközpont- 0,4 kV-os főbetáplálás : Teljesítmények



5. diagram: teljesítmények

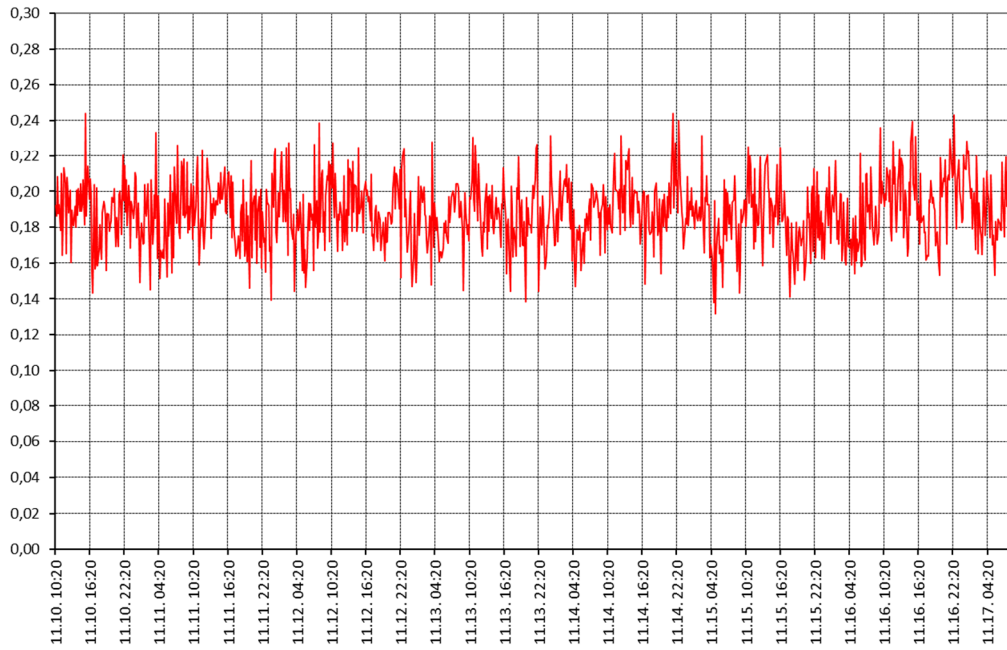


6. diagram: energia mennyiségek



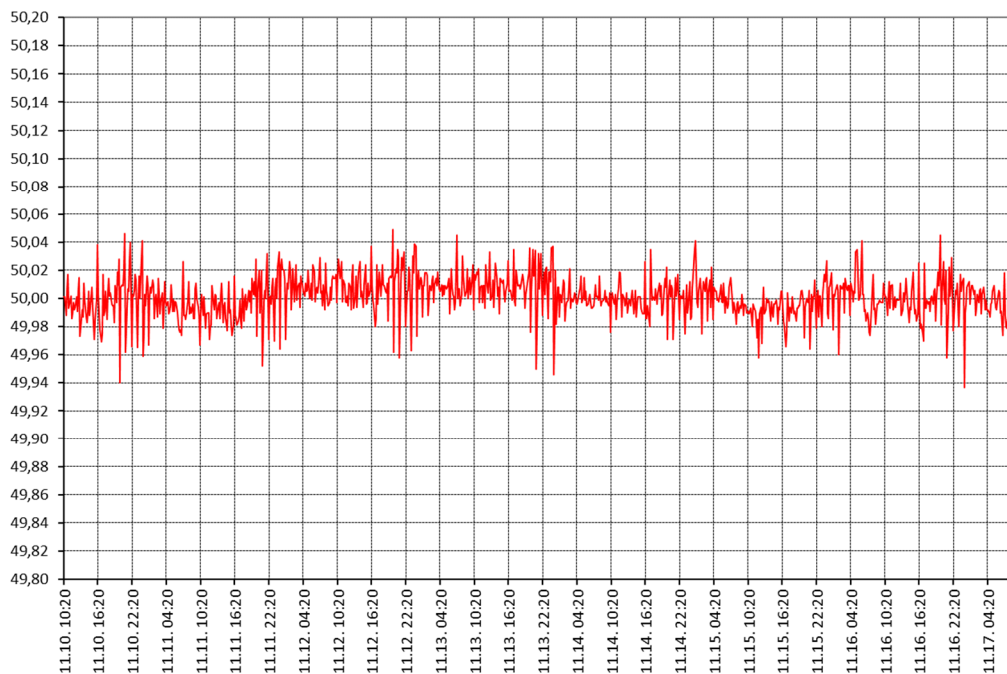
7. diagram: teljesítménytényező

Bevásárlóközpont- 0,4 kV-os főbetáplálás : Meddő- és határos teljesítmények aránya



8. diagram: meddő és határos teljesítmények aránya

Bevásárlóközpont- 0,4 kV-os főbetáplálás : Frekvencia



9. diagram: frekvencia

5.4.8. Az előzetes mérés kiértékelése, összegzése

A mérés végrehajtása sikeresen lezajlott. A mérés időtartama 1 hét volt, ezért kellő mennyiségű adatunk áll rendelkezésre a napelemes rendszer telepítése utáni mérés összehasonlításához.

A feszültség változása nem jelentős. A feszültségre vonatkozó teljes felharmonikus torzítás, illetve egyedi felharmonikus torzítás szabvány által előírt határértékein belül maradt. Az áram harmonikus tartalma arányaiban szintén alacsonynak mondható. Az áram felharmonikus torzítás értékének értelmezése során mindig figyelembe kell venni, hogy az alapharmonikus áram értéke a viszonyítási alap. Ez azt jelenti, hogy nagyon alacsony fázisáramok esetében az THD_I értéke akár rendkívül magas is lehet.

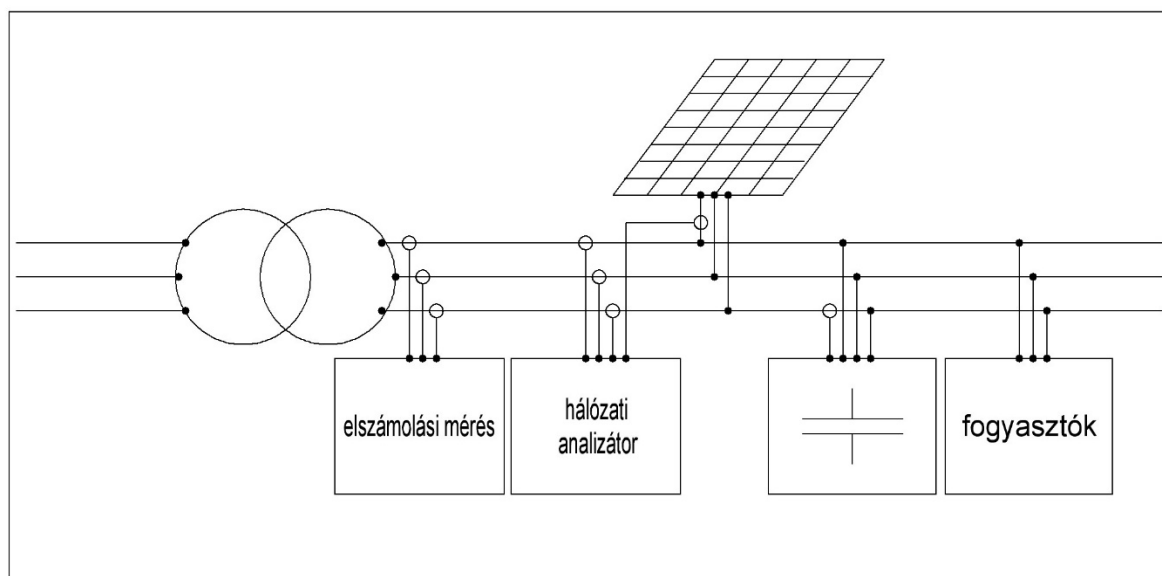
$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} * 100 [\%] \quad 3.4.8. \text{ képlet}$$

A teljesítménygörbéken jól látható, hogy a helyszínen üzemelő meddőenergia kompenzáló berendezés jól működik, a teljesítménytényező diagrammon látható, hogy a berendezés automatikáján beállított $\cos\varphi$ értéket tudta tartani. Kapacitív meddőenergia fogyasztás a mérés során nem volt. Az induktív meddőenergia/ hatásos energia fogyasztások aránya a MEKH rendeletben előírt határértéken belül maradt. Az előzetes mérés alapján a villanyszámlán nem merül fel meddőenergia díj fizetési kötelezettség, a hálózaton működő fázisjavító berendezés paraméterei megfelelnek a hálózati viszonyoknak. A jelenlegi üzemi viszonyok és rendszeres karbantartás mellett a fázisjavító ellátja feladatát.

5.5. A napelemes rendszer telepítése utáni mérés

A bevásárlóközpont épületének tetejére 180kW teljesítményű napelemes rendszer telepítése után újabb hálózati analízisre került sor. A méréssel nem csak a megváltozott teljesítményviszonyokat van módunk megismerni, hanem az előzetes méréssel összehasonlítva az energiaminőségben történt esetleges változásokat is megfigyelhetjük. A mérés elsődleges célja a helyszínen üzemelő meddőenergia kompenzáló berendezés megfelelőségének ellenőrzése a megváltozott hálózati viszonyok következtében.

A méréshez ezúttal egy Hioki PQ3198-as típusú hálózati analizátort használtunk. Az előzetes mérésnél használt mérőműszerhez képest a mérés szempontjából jelentős különbség nincs, ezért a mért értékek összehasonlíthatóság szempontjából megfelelnek.



4. ábra: A második hálózati analízis elhelyezését szemléltető ábra

A hálózati analizátort a mérési pontnak megfelelően és az alkalmazott mérőeszközök típusának ismeretében paramétereztük. A transzformátor felőli betápláló rézsínekre Hioki CT9667-02 típusú flexibilis áramváltókat helyeztünk fel, a mérőműszer negyedik csatornáján egy Hioki 9669 1000A típusú áramváltót alkalmaztunk. A feszültség mérését a fázisvezető sínekre rögzített krokodilcsipeszekkel valósítottuk meg. A műszeren továbbá beállítottuk a mérési ponthoz igazított eseményrögzítési funkciókat többek között az MSZ EN 50160-as szabvány által definiált feszültség felharmonikus tartalmára vonatkozó határértékeket. A napelemes rendszer betáplálási pontját a 0,4kV-os gyűjtősínrendszerhez csatlakoztatták. A sínekre csatlakozó 240mm² szigetelt réz három vezeték közül egyen mértük a negyedik csatornán az inverter által hálózatba betáplált áram értékét.

5.6. A második hálózati analízis mérési eredményei

A méréssorozat kiértékelése

5.6.1. Feszültségek:

Átlag érték	Minimális érték	Maximális érték	A mérési időszak 5%-ában meghaladott érték
235,19 V	229.8 V	240.9 V	238,59 V

A feszültség változása nem jelentős (10. diagram), a feszültség értékek a regisztrálás alatt a szabványban megadott tűréshatáron belül voltak. A mérés során olyan esemény, amely a szabványban megengedett értékeket túllépte volna nem történt.

5.6.2. Aszimmetria:

Átlag érték	A mérési időszak 5%-ában meghaladott érték
0,27 %	0,36 %

A feszültség negatív sorrendű aszimmetriájának értéke megfelelt a szabványban előírtaknak.

5.6.3. Áramok:

Fázisáramok mérése:

Átlag érték	A minimális áramfelvétel	A maximális áramfelvétel	A fázisáramok közötti átlagos aszimmetria
221,42 A	35,9 A	434 A	5,65%

Napelemes betáplálás 1 fázisának árama:

Átlag érték	A maximális áramfelvétel
70,73 A	246,4 A

A mért áramok időbeni változásait a 12. diagramon mutatjuk be.

5.6.4. Teljesítmények:

Hatásos teljesítmény (14.diagram):

Átlag érték	A maximális igénybevett teljesítmény	A minimális igénybevett teljesítmény
148,29 kW	275,4 kW	25,6 kW

Meddő teljesítmény (14.diagram):

Átlag érték	A maximális meddőteljesítmény	A minimális meddőteljesítmény
35,99 kvar	67,5 kvar	1 kvar

A terhelési adatok összefoglalása:

A mérés során a maximális hatásos teljesítmény	A maximális meddőteljesítmény
275,4 kW	67,5 kvar

A terhelési adatokat az 14. diagramon ábrázoltuk.

5.6.5. A fogyasztási adatok összefoglalása:

A mérés során mért hatásos energiafogyasztás	Az induktív meddő energiafogyasztás	A kapacitív meddő energiafogyasztás
35898,8 kWh	8741,59 kvarh	-28,44 kvarh

Induktív meddő/hatásos fogyasztás aránya	Kapacitív meddő/hatásos fogyasztás aránya
24,35%	0%

Az inverter által betáplált hatásos teljesítmény eredményeképpen az induktív meddő/hatásos fogyasztás aránya megnőtt. A 4. ábrán bemutatott elrendezésből kifolyólag a fázisjavító berendezés áramváltója a hálózaton úgy helyezkedik el, hogy a napelemes rendszer által betáplált energiát és a transzformátor felől érkező energiát egyoldali betáplálásként méri, ezáltal nem a közcélú hálózathoz vételezett teljesítményarányoknak megfelelően kompenzál.

5.6.6. Felharmonikusok vizsgálata:

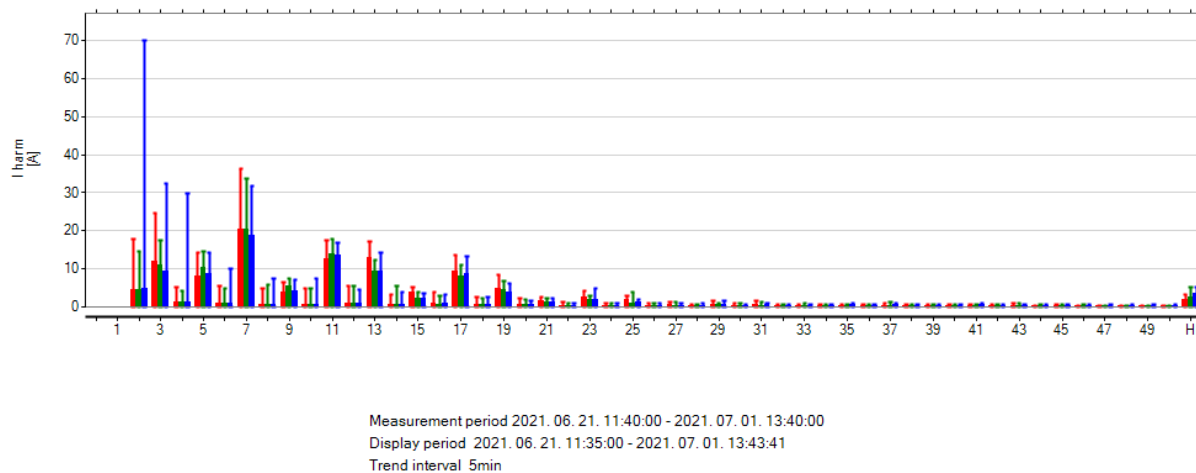
Feszültség:

Az átlagos teljes feszültség torzítás (THD)	A mérési időszak 5%-ában meghaladott érték
1,84%	2,18%

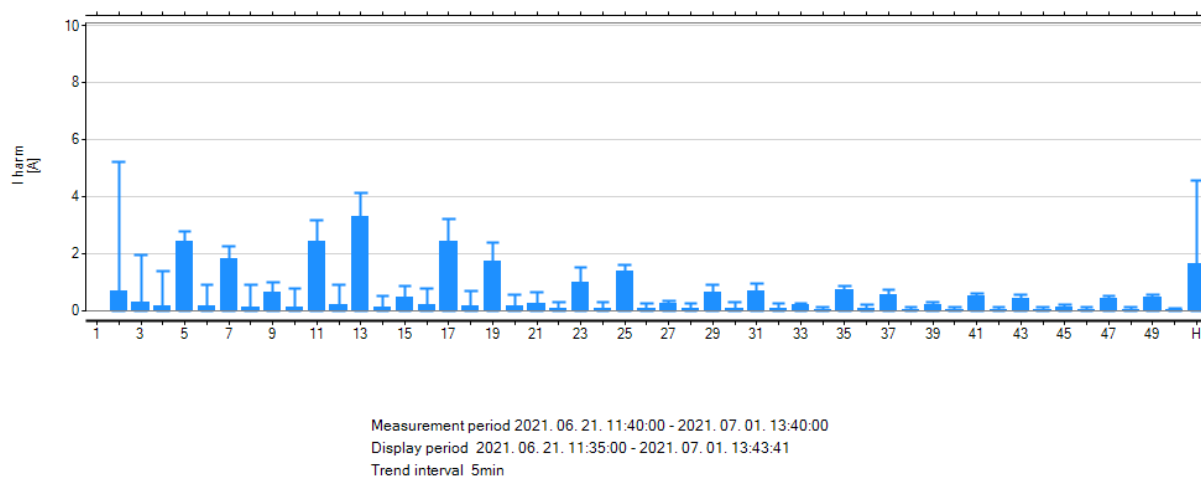
Áram:

Az átlagos áram felharmonikus tartalom	A mérési időszak 5%-ában meghaladott érték
7,87%	15,48%

Megjegyzések a felharmonikus tartalommal kapcsolatban:

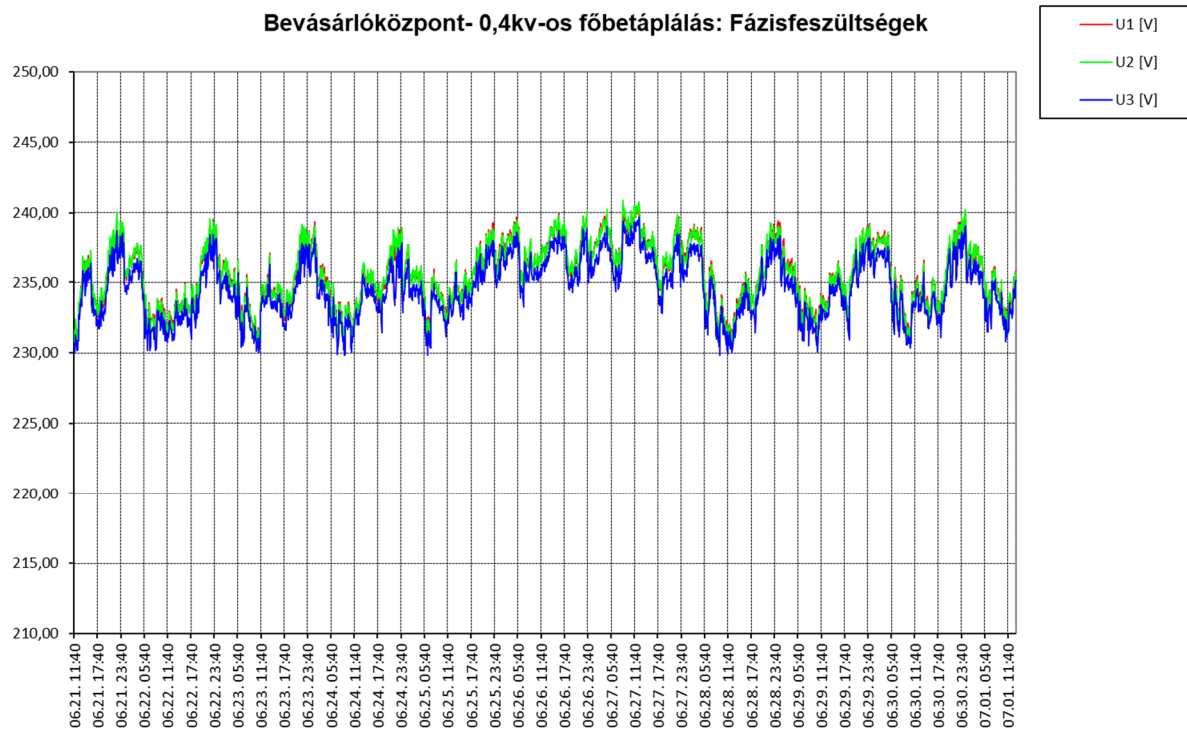


5. ábra: A mérés során fellépő felharmonikus áramok átlagolt és maximum értékei.

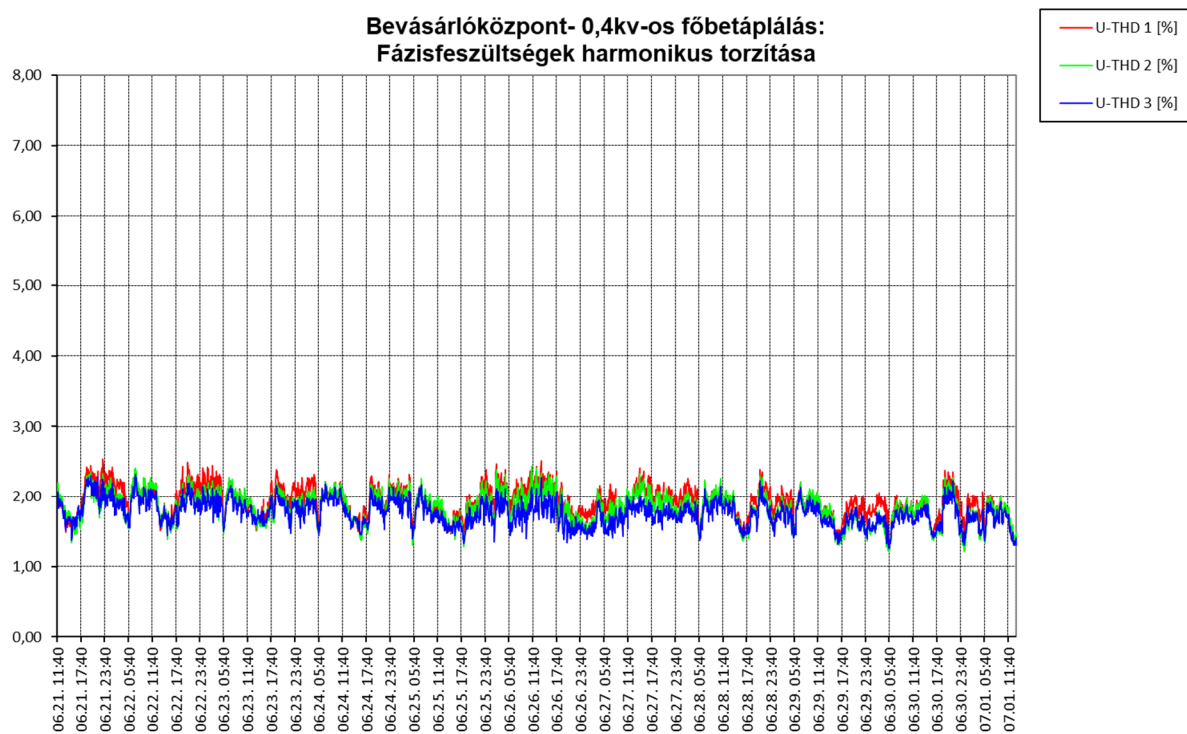


6. ábra: A napelemes betáplálás egy fázisán fellépő felharmonikus áramok átlagolt és maximum értékei.

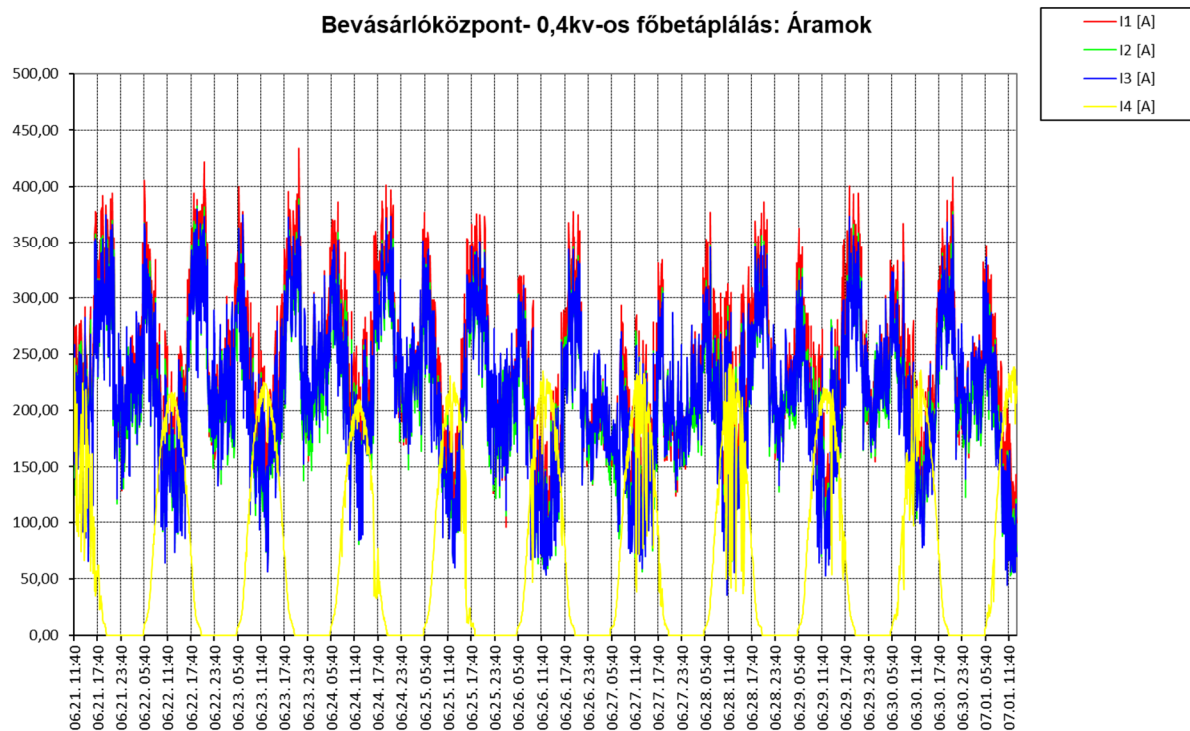
5.6.7. A méréssorozathoz tartozó diagrammok



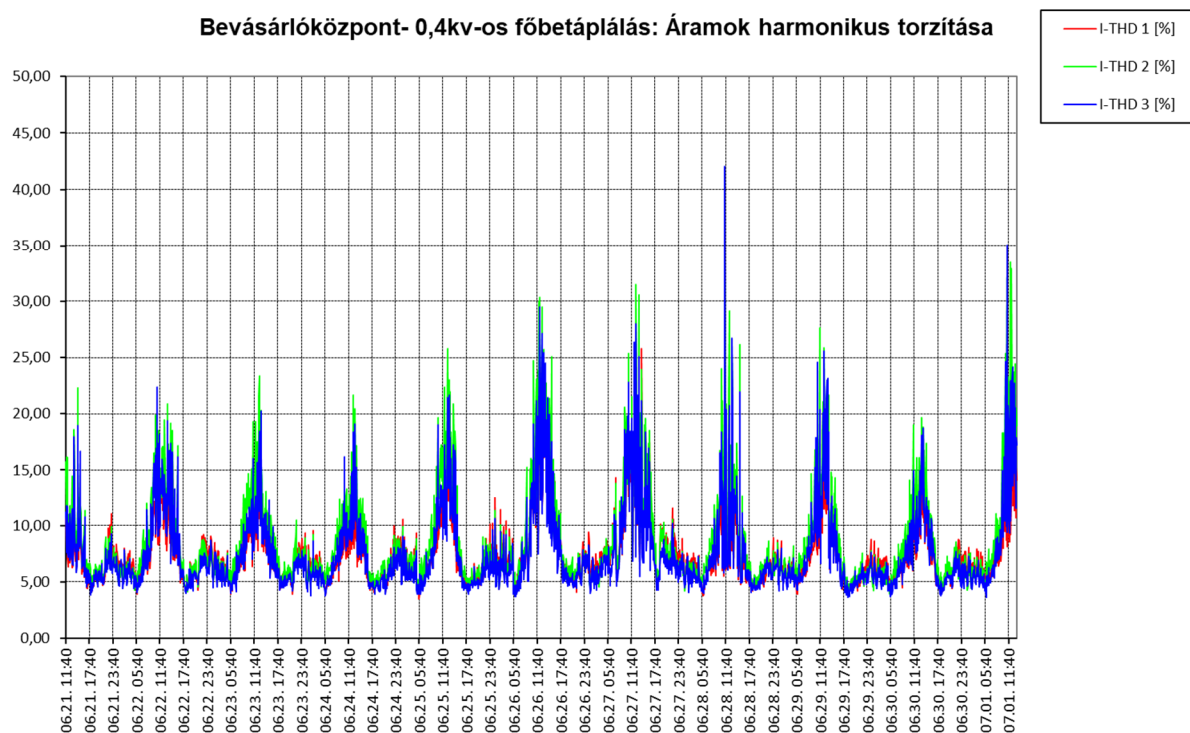
10. diagram: fázisfeszültségek effektív értékei



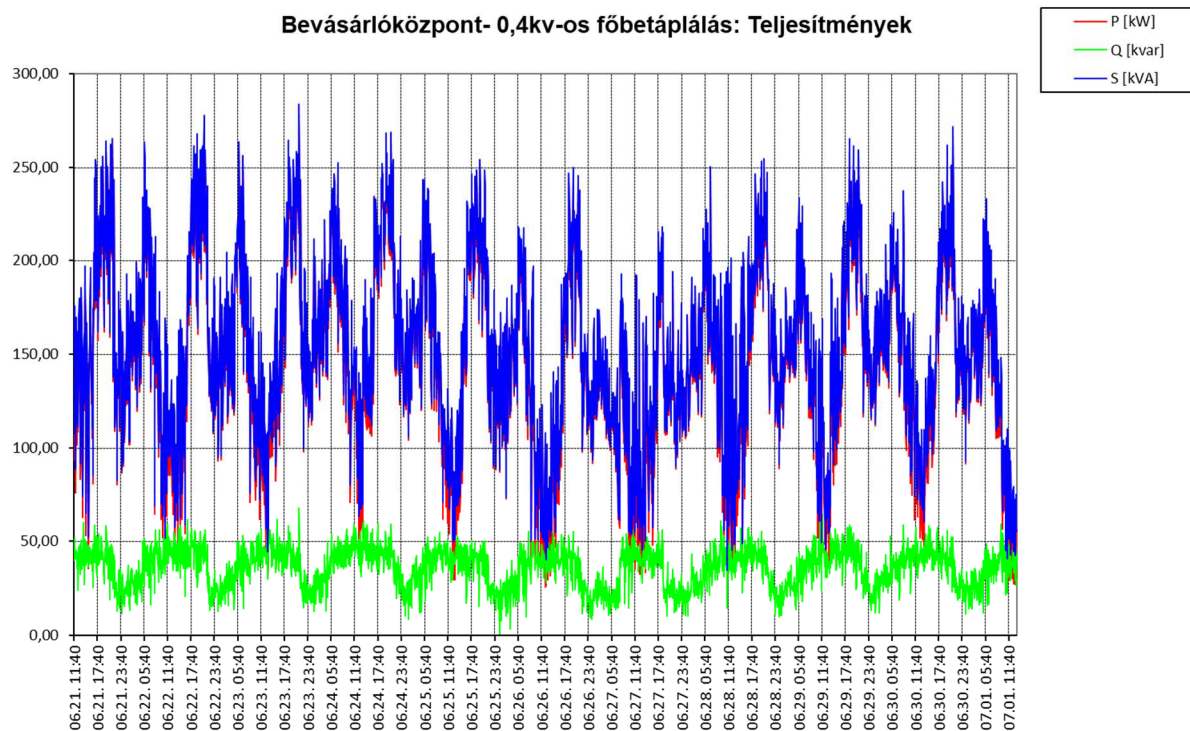
11. diagram: fázisfeszültségek teljes harmonikus torzítása



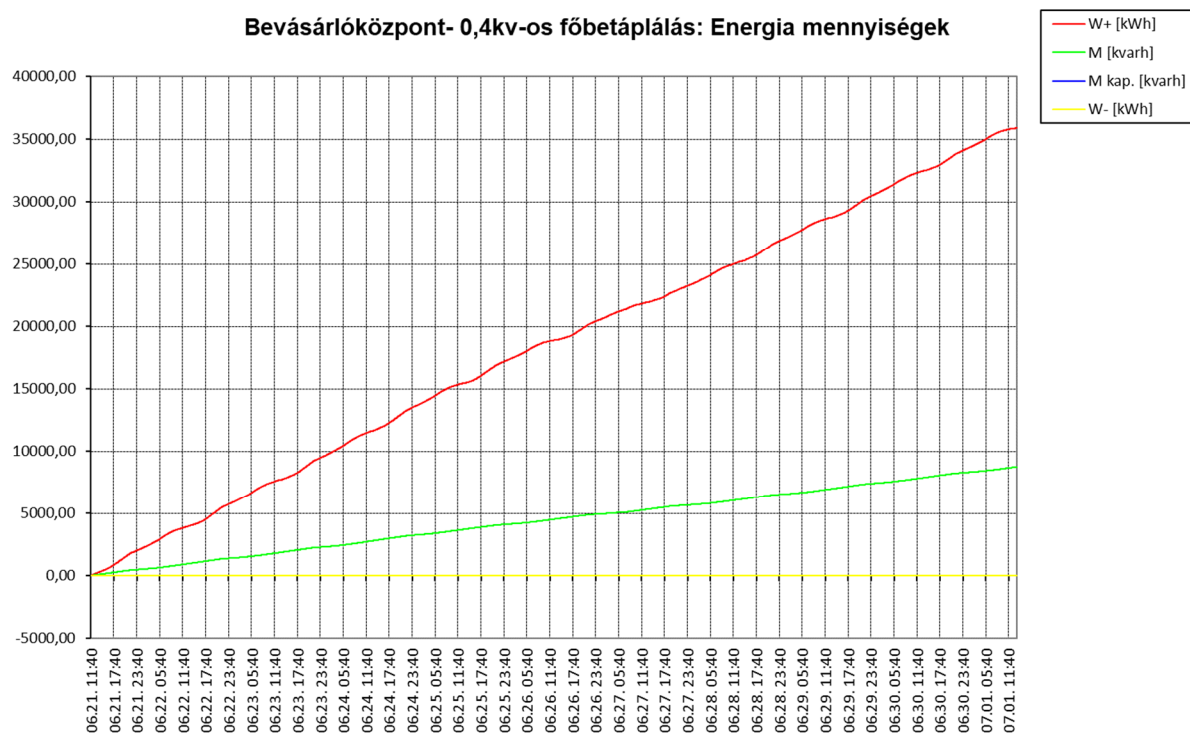
12. diagram: áramok effektív értékei



13. diagram: áramok teljes harmonikus torzítása

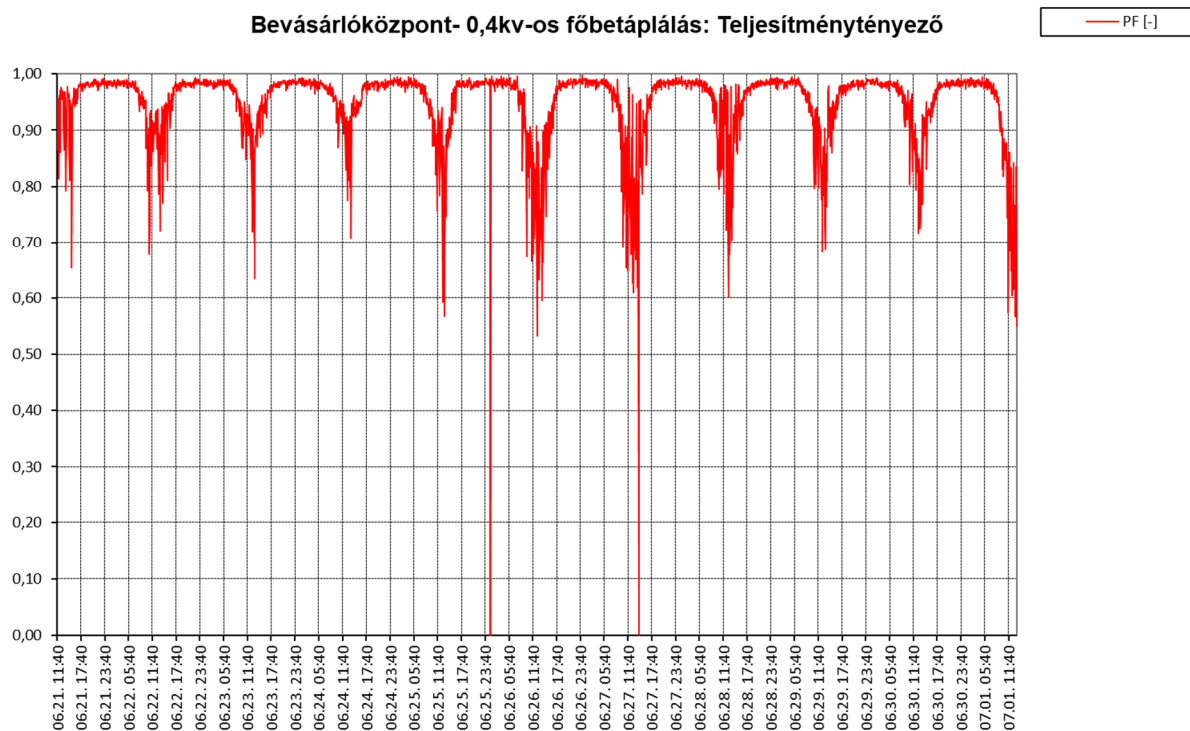


14. diagram: teljesítmények



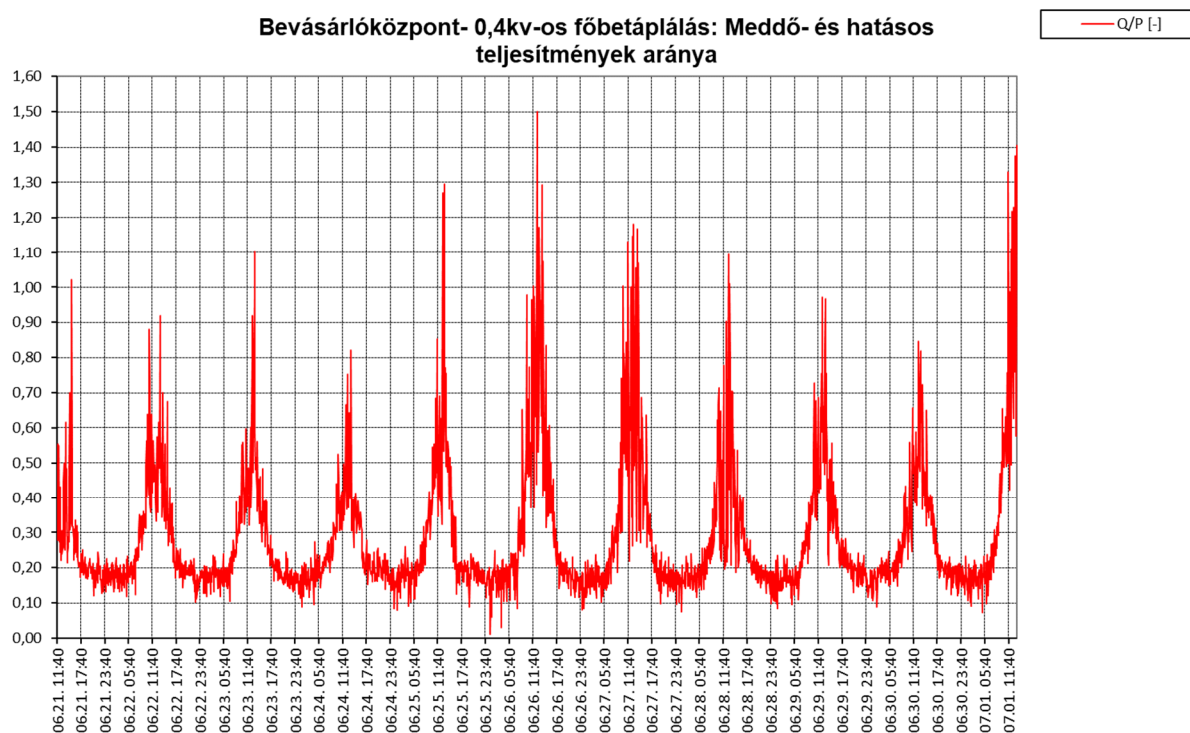
15. diagram: energia mennyiségek

Bevásárlóközpont- 0,4kv-os főbetáplálás: Teljesítménytényező

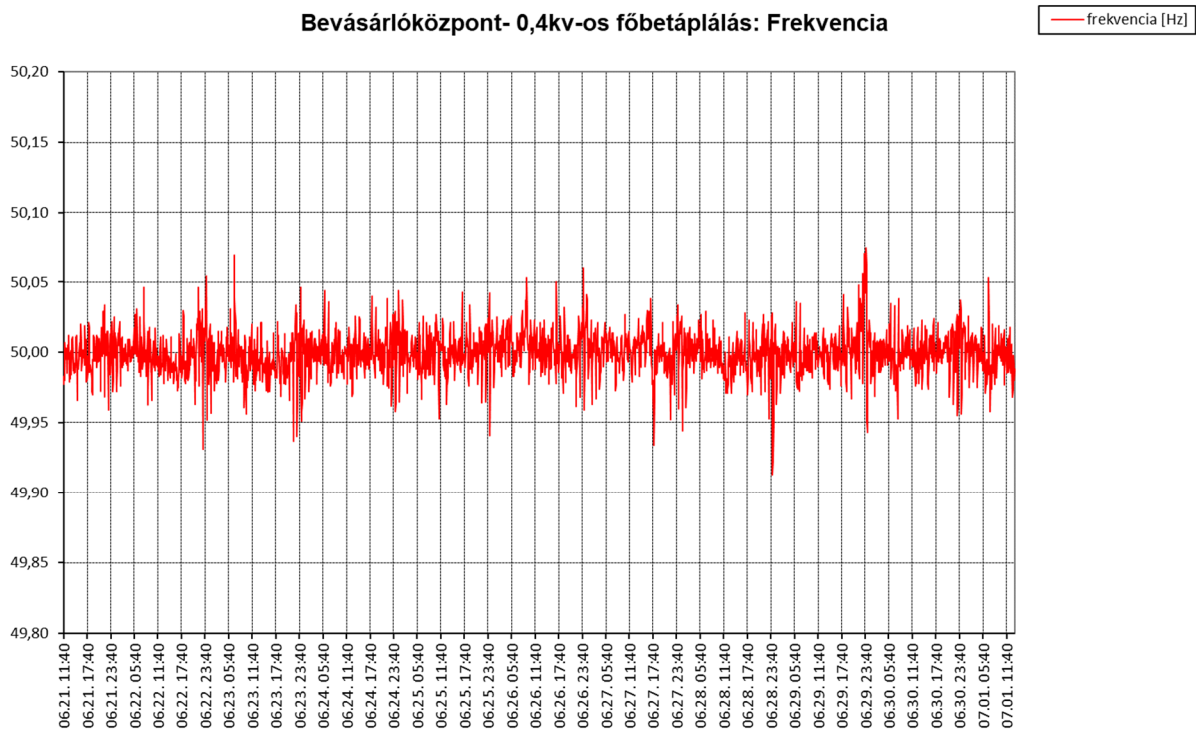


16. diagram: teljesítménytényező

Bevásárlóközpont- 0,4kv-os főbetáplálás: Meddő- és hatásos teljesítmények aránya



17. diagram: meddő és hatásos teljesítmények aránya



18. diagram: frekvencia

5.6.8. A második mérés kiértékelése, összegzése

A mérés végrehajtása sikeresen lezajlott. A mérés időtartama 1 hét volt, ezért kellő mennyiségű adatunk áll rendelkezésre a két mérés eredményeinek összehasonlítására.

A fejlesztésnek köszönhetően a legjelentősebb változást a hatásos energiafogyasztásban mértük. A közcélú villamoshálózathoz vételezett hatásos teljesítmény jelentősen lecsökkent.

A feszültség változása nem jelentős. A feszültségre vonatkozó teljes felharmonikus torzítás, illetve egyedi felharmonikus torzítás szabvány által előírt határértékein belül maradt. Az áram harmonikus tartalma megnövekedett, a mérés során az THD_I értéke elérte a 42%-ot is, azonban ennek az adatnak az értelmezésekor figyelembe kell venni, hogy az áram effektív értéke jelentős mértékben csökkent. A 3.4.8. képlet alapján az áramban harmonikus tartalmát amper dimenzióban jó közelítéssel kiszámítottam az alapharmonikus értékének felhasználásával. Ezzel a módszerrel megközelítőleg helyes értéket kaptam. Az áram harmonikus tartalma a mérés során elérte a 26,7A értéket.

A negyedik csatornán mért inverteres betáplálás egy fázisának áramgörbéjén jól látható a napelemek nap sugarával bezárt szögének változásával arányos teljesítményváltozás. A napelemek termelését a felhőátvonulások rendkívül gyorsan csökkentik, ez a meddőenergia

kompenzáló berendezésekre jelentős hatással van, ugyanis a közcélú hálózat felől érkező energiák aránya is hasonlóan gyorsan fog változni.

A fogyasztói oldalon továbbá olyan új berendezések kerültek beüzemelésre amelyeknek gyorsan változó meddőenergia igényét a hagyományos mágneskapcsolóval működtetett fázisjavító berendezés nem képes kompenzálni. Feltehetően ennek hatására kialakultak olyan időpillanatok amelynek során a nagy meddőenergiaigény, melyet a fázisjavító berendezés több kondenzátor fokozatával is kompenzált, hirtelen megszűnt. A mágneskapcsolókkal működtetett kondenzátor fokozatok hálózatról való lekapcsolása az érzékelés pillanatától az automatika és a mágneskapcsoló működési idejének hosszával egyenlő. A gyorsan változó terhelések esetén tirisztoros fázisjavító alkalmazása javasolt.

5.7. A két mérés eredményeinek összehasonlítása

Az összehasonlíthatóság érdekében ugyanakkora intervallumon vizsgáltam meg az energiafogyasztási adatokat. A bevásárlóközpont energiafogyasztási szokásait a hétvégi időszak szignifikánsan nem befolyásolta, ezért a szombatra és vasárnapra eső mérési időszakokat is felhasználtam a számításomhoz. A használt időintervallum 6 nap 22 óra 40 perc.

A bevásárlóközpont energiafogyasztási adatai a két mérés során, azonos nagyságú időintervallum alatt.

Hatásos energiafogyasztás:

Az előzetes mérés során mért hatásos energiafogyasztás 31074.97 kWh	A második mérés során mért hatásos energiafogyasztás 24862.6 kWh
--	---

Induktív meddő energiafogyasztás:

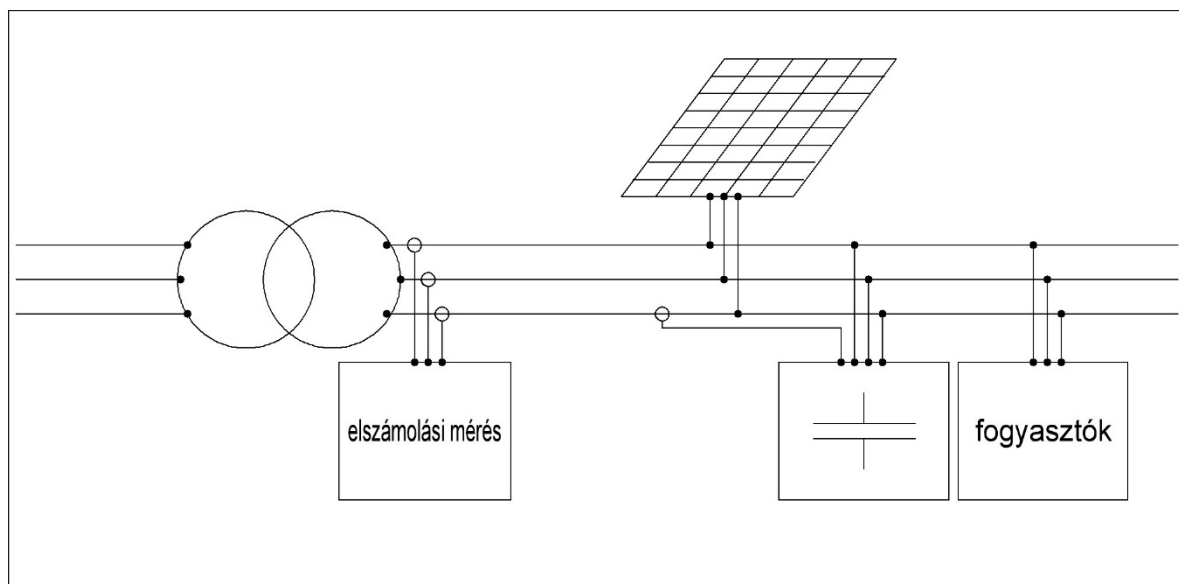
Az előzetes mérés során mért induktív meddő energiafogyasztás 5994.85 kvarh	A második mérés során mért induktív meddő energiafogyasztás 5846 kvarh
--	---

Kapacitív meddő energiafogyasztás:

Az előzetes mérés során mért kapacitív meddő energiafogyasztás 0 kvarh	A második mérés során mért kapacitív meddő energiafogyasztás 20.4 kvarh
---	--

A napelemes rendszer betáplálásának hatására olyan időszakok jöttek létre amelyek során akár nagyobb meddőteljesítmény igény volt mint hatásos teljesítmény a hálózathoz. A problémát jól szemlélteti a második méréshez tartozó 16. és 17. diagrammok. Az adatok értelmezésekor figyelembe kell vennünk, hogy a hálózaton továbbra is működött a 1934-es gyártási számú meddőenergia kompenzáló berendezés.

A fázisjavító berendezés megfelelő működését több tényező is hátráltatja. Az előzetes felmérés alapján a berendezés időszakosan a teljes teljesítményét kihasználja, ez azt jelenti, hogy nem rendelkezik kellő mennyiségű tartalékkal. Újabb fogyasztói bővülés esetén, illetve a kondenzátorok öregedése, kapacitáscsökkenése esetén már nem lenne képes tartani a beállított 0,98-as teljesítménytényezőt. A másik problémát az jelenti, hogy a jelentősen lecsökkent hálózathoz vételezett hatásos energia megváltoztatta az induktív meddő/hatásos teljesítmények arányát melynek kompenzálására már nem rendelkezik további kondenzátor egységekkel. A harmadik problémát pedig a felhőátvonulások okozta gyors energiaáramlás változás okozza, ami a fázisjavító automatikáját is gyors reagálásra készítetné, de a hagyományos mágneskapcsolós megoldás az ilyen rövid kapcsolási időt nem teszi lehetővé. A negyedik nehézséget a fázisjavító áramváltójának elhelyezkedése okozza. A napelemes rendszer betáplálási pontját a fázisjavító áramváltója és a betápláló transzformátor közé szerelték, így a fázisjavító úgy érzékeli, hogy a beállított paramétereket, teljesítményarányokat tartani tudja hasonlóképpen az első hálózati méréshez. Így a fázisjavító nem méri a napelem által lecsökkentett hatásos teljesítményt. A probléma megoldását az áramváltó áthelyezése jelenti a napelemes betáplálási pont elé a 7. ábrán bemutatott módon.



7. ábra: Fázisjavító berendezés áramváltójának helyes elhelyezése

5.8. A bevásárlóközpont új meddőenergia kompenzáló berendezésének típusának kiválasztása és méretezése

A bevásárlóközpontban jelenleg üzemelő 1934-es gyártási számú fázisjavító berendezés nem alkalmas a megfelelő meddőenergia kompenzáció megvalósítására. A berendezés szekrényének méretei nem teszik lehetővé a további teljesítménybővítést, ezért a jelenlegi berendezés helyére újat kell beüzemelni. Az új fázisjavító méretezésénél figyelembe kell venni, hogy a mérések alatt a régi fázisjavító üzemelt, ezért akár annak névleges teljesítményével egyenértékű meddőtelsítmény többlettel kell számolni.

A hálózaton az újabb fogyasztói berendezések által és a fejlesztések többségét jelentő napelemes rendszer által együttesen létrehozott gyorsan változó terhelési viszonyok miatt nem elegendő a hagyományos berendezésekben alkalmazott mágneskapcsolók használata. Tirisztoros kapcsolók a dinamikus változó terheléshez és a kapcsolási gyakorisághoz megfelelő megoldást nyújt. A félvezetős kapcsolókészülékkel szemben támasztott legfőbb követelmény az, hogy alkalmas legyen feszültség minimumnál a kondenzátor hálózatra kapcsolására, ennek oka a tranziens áramok csökkentése.

A fázisjavító berendezéssel szemben támasztott fontos követelmény a hosszú élettartam. A megfelelő védelem nélkül ellátott kondenzátorokat a feszültségszint emelkedésének jelensége, a gyakori kapcsolás és a felharmonikus áramok jelenléte is

veszélyeztetni. Ez ellen a kapcsolóberendezés és a kondenzátor közé sorosan beépített torlófojtóval védekezünk. Tirisztoros kapcsolóval ellátott berendezések esetén javasolt a 14%-os fojtási tényezővel rendelkező torlófojtók alkalmazása.

A torlófojtók feszültségemelő hatása miatt nem alkalmazhatóak a 400V-os kondenzátorok. A kondenzátorok kapcsain fellépő feszültség kiszámítására %-ban megadott fojtása esetén a következő képlet alkalmazható.

$$U_C = \frac{U_N}{1 - \frac{p}{100\%}}$$

¹

Az általunk alkalmazni kívánt 14%-os fojtási tényező eredményeképp a kondenzátorra eső feszültség 465V. Olyan kondenzátort kell választani, amely ezzel egyenértékű vagy lehetőleg nagyobb feszültség szintet képes legyen tartósan elviselni.

A meddőenergia kompenzáló berendezések szükséges beépítendő teljesítmény számításánál az elmúlt években többnyire olyan módszert alkalmaztak, amelynek során a mérési adatokra hagyatkozva a maximálisan fellépő hatásos teljesítményből és az induktív meddő/hatásos energiafogyasztási arányok felhasználásával számoltak. A napelemes rendszer beépítése következtében azonban ez a módszer nem alkalmazható. Amennyiben a transzformátoron fellépő teljesítményekre és fogyasztott energiaviszonyokra hagyatkozunk, nem garantált, hogy a valós fellépő maximális hatásos teljesítménnyel számolunk. A másik esetben, ha rendelkezünk az inverter betáplálási pontja után mért adatokkal, ismert lesz a maximálisan fellépő hatásos teljesítmény, de az energiafogyasztási arányok, amelyeket szeretnénk a 10/2016. (XI. 14.) MEKH rendeletnek megfelelő százalékos arányok között tartani torzulnak a napelemes betáplálás függvényében. Ezért olyan módszert alkalmazok mellyel a fellépő legnagyobb meddőteljesítményre méretezem a fázisjavító összteljesítményét tekintettel arra a tényre, hogy az inverter által betáplált energia akár közel nullára csökkentheti a közcélú hálózathoz vételezett hatásos energiát és ezzel jelentősen elrontva az energiaarányokat,

¹ U_N = hálózat névleges feszültsége

U_C = kondenzátor kapcsain fellépő feszültség

p = fojtási tényező

hozzáadva a mérés ideje alatt üzemelő berendezés teljesítményének egy részét ezzel kellő mennyiségű tartalékot képezve a várható későbbi fogyasztói bővülésekre.

Az elszámolási mérést végző villamos fogyasztásmérő az alapharmonikus áram és alapharmonikus feszültségből számított energiafogyasztási adatokat rögzíti. Az általunk használt hálózati analízátor segítségével meg tudjuk állapítani az alapharmonikus villamos paraméterekből a teljesítményeket, ezzel el tudjuk kerülni, hogy nagyobb összteljesítményű berendezést méretezzünk, mint ami szükséges. A másik fontos szempont a berendezés kondenzátor fokozatkiosztásának megfelelő kiválasztása. Amennyiben csak azokra az adatokra hagyatkozunk, amelyekbe a felharmonikusok is beletartoznak olyan torzított fokozatkiosztást fogunk választani, amellyel nem valósítható meg az optimális meddőenergia kompenzálás.

Az alapharmonikus áramból számított fellépő legnagyobb induktív meddőteliesség 74,94 kvar volt. A régi berendezés névleges teljesítményét szükségtelen teljes egészében az új berendezés teljesítményéhez hozzáadni, hiszen a napelemes betáplálási pont után elhelyezkedő áramváltó miatt nem a kompenzálendő teljesítményviszonyokat látta a fázisjavító.

Az előzetes mérés során fellépő átlagolt hatásos teljesítmény 196,26kW volt, ezt az értéket a 180kW-os napelemes rendszer 21%-al le tudta csökkenteni amely a második mérés során 148,29kW érték volt, ezért a korábbi mérés során fellépő meddőteliességeket legalább ekkora aránnyal kell csökkenteni. Az mérések során fellépő átlagolt meddőteliességet úgy tudjuk a legbiztosabban 21%-al csökkenteni, ha a fellépő legnagyobb meddőteliesség 21%-os csökkentésére méretezzük további fokozatokat ez a fellépő 67,5kvar esetében 14,175kvart jelent. Az új berendezés névleges teljesítményét a számítás és a korábbi berendezés teljesítményének figyelembevételével 175kvar-ban határoztam meg, mellyel kellően nagy tartalékot is képeztem.

A gyorsan változó terhelés és a napelemes betáplálás hatására a fázisjavító berendezés kezdőfokozatát a korábbiéhoz képest kisebbre választottam. A hálózat sajátosságából fakadóan gyors, kis mértékű, finom szabályozás szükséges. Az eddig általánosságban alkalmazott módszer, miszerint a kezdőfokozatot elegendő a névleges teljesítmény 10%-hoz igazítani az ilyen esetekben már nem feltétlenül állja meg a helyét. A modern automatikák már tudnak eltérő teljesítményű kondenzátorokat is kezelni ezért nem szükséges minden kondenzátorfokozatot

egységteljesítményűre választani. Az új berendezés kondenzátor fokozatkiosztása: 6,25kvar; 6,25kvar; 12,5kvar; 25kvar; 25kvar; 25kvar; 25kvar; 25kvar; 25kvar.

5.9. Az új meddőenergia kompenzáló berendezés megtérülése

A projekt megtérülésének számítása során a bevásárlóközpont meddőenergia igényén becsléssel állapítom meg, olyan mért adatok hiányában ahol a meddőenergia kompenzáló berendezés nem üzemel. Ebből kifolyólag az alább feltüntetett számítások csupán tájékoztató jellegűek abból a célból, hogy nagyságrendileg mennyi idő elteltével számíthatunk a beruházás megtérülésére.

A számításhoz az előzetes mérés adatait használtam fel, melynek során még nem helyezték üzembe a napelemes rendszert, ezáltal a hálózati analízátorral mért közcélú hálózathoz lekötött hatásos teljesítmény 10 perces átlagaiból és egy általános bevásárlóközpontban üzemelő fogyasztói berendezések összességében jó közelítéssel 0,7-es teljesítménytényezője felhasználásával kiszámítom az épület meddőteli teljesítmény igényét.

$$Q = \frac{P}{\cos \varphi} - P$$

A fenti képlet alkalmazásával a megkaptam a becsült 10 perces átlagolási idővel egy hét meddőteli teljesítmény adatait. Az így kapott értékek valóságosnak tűnnek annak tekintetében, hogy az üzemelő fázisjavító berendezés a beépített összteljesítményét figyelembe véve könnyedén tudta kompenzálni ezt az értéket. A meddőteli teljesítményértékeket tekintve, hogy 10 perces átlagok hattal elosztva energia dimenziójú értéket kapunk kvarh mértékegységben. Az adatokat összegezve pedig megkaptam a bevásárlóközpont 1 hét alatt felhasznált becsült meddőenergiája fogyasztását.

Az energiafogyasztási arányokat a napelemes rendszer beüzemelése utáni adatokból számítottam figyelembe véve, hogy az inverter által betáplált teljesítmény jelentősen lecsökkentette a közcélú hálózathoz vételezett hatásos energiát.

A táblázatban feltüntetett %-ban megadott értékek a MEKH rendelet alapján közcélú hálózathoz díjmentesen vételezhető induktív meddőenergia/hatásos energia arányára utal.

értékének csökkentése, ezt oly módon teszik, hogy az adott frekvenciájú árammal ellentétes fázisú és azonos nagyságú áramot táplálnak be a hálózatba. Az áramot impulzusszélesség modulációs eljárással hozza létre. Nagyságrendileg $100\mu s$ alatt képes az áramban történő változásokra reagálni. Ezeknek a képességeknek köszönhetően alkalmas arra is, hogy meddőenergia kompenzálást végezzünk vele. A könnyen bővíthetőség mellett nagy előnye, hogy azonos mértékben kapacitív és induktív irányban is képes a meddőteltjesítményt kompenzálni, ezért remekül alkalmazható olyan hálózati viszonyok között ahol mindkét típusú meddőenergiát szükséges kompenzálni.

5.10.2. Meddőenergia kompenzálás napelemes inverterekkel

Szakdolgozatomban feldolgozott témához szorosan kapcsolódnak a napelemes inverterek, ezért külön kitérek a teljesítménytényező szabályozási lehetőségekre amit ezek a berendezések nyújtanak. A modern inverterek több más egyéb paraméterezési lehetőséget kínálnak. Az inverter meddőszabályozását elsősorban feszültség szabályozásra és hálózati veszteségek csökkentésére használják. A gyakorlatban elmondható, hogy többnyire a magas hatásfok elérése érdekében illetve, hogy a közcélú hálózathoz vételezett hatásos energiát csökkentsék, a teljesítménytényezőt egy diszkrét értékre állítják ami lehetőség szerint $\cos\varphi=1$. Az inverterek esetében csakúgy mint a aktív szűrők esetében a hálózatba táplált áram fázishelyzetének változásával valósíthatunk meg meddőteltjesítmény kompenzálást. Fontos azonban megemlíteni, hogy a napelemes betáplálás nagyfokú időjárás függése miatt nem érdemes a teljes meddőenergia kompenzálást erre az eszközre bízni, különösen azokon a hálózatokon ahol a MEKH rendelet alapján meddőenergia díjat számolhatnak fel.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A szakdolgozatom témáját kiemelten fontosnak tartom a napelemes rendszerek gyors terjedése miatt. A megfelelő meddőenergia kompenzáció megvalósítása érdekében, nem csak az új létesítmények energiaellátásának tervezésekor kell nagyfokú körültekintéssel eljárni, hanem a meglévő hálózatok új fogyasztói és az újonnan megjelenő, energia termelői berendezésekkel való bővítés esetén is. Bármilyen hálózaton történő módosítás esetén érdemes tehát az alapvetően addig jól működő meddőenergia kompenzáló berendezéseket felülvizsgálni, hiszen a megfelelő minőségű energiaellátás ma már nélkülözhetetlen.

7. IRODALOMJEGYZÉK

[1.] Kovács Kristóf Tamás: Kisfeszültségű hálózatra csatlakozó napelemek inverterei által megvalósítható lokális feszültségszabályozás Tudományos Diákköri Dolgozat

[2.] g7.hu: Fel kell készülnünk a magas energiaárak időszakára (webes folyóirat) Elérhető: <https://g7.hu/adat/20210721/fel-kell-keszulnunk-a-magas-energiaarak-idoszakara/> (2021. 11. 15.)

[3.] sma-sunny.com: Bad Power Factor? – A reason to oversize your inverter (angol nyelvű online hivatkozás) Elérhető: <https://www.sma-sunny.com/en/bad-power-factor-a-reason-to-oversize-your-inverter/> (2021.11.15.)

[4.] Magyar Szabványügyi Testület: A közcélú elosztóhálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemzői - MSZ EN 50160:2011

[5.] Polgár Viktor: A modern fázisjavítás – Villanyszerelők lapja 2010/szeptemberi lapszám. <https://www.villanylap.hu/lapszamok/2010/szeptember/1365-a-modern-fazisjavitas> (2021.11.20.)

[6.] muszaki-magazin.hu Aktív felharmonikus szűrők alkalmazásának lehetőségei (webes folyóirat) Elérhető: <https://www.muszaki-magazin.hu/2020/01/29/aktiv-felharmonikus-szurok-alkalmazasanak-lehetosegei/> (2021.12.03.)