



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Napelemek kisfeszültségű elosztóhálózatra gyakorolt hatásainak vizsgálata az elhelyezésük függvényében

Papp Szabolcs

Villamosmérnöki szak, mesterképzés, 2012-es évfolyam

Konzulens:

Hartmann Bálint, tanársegéd, BME VET

OTDK Dolgozat
2012

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	3
2.	A napelemes rendszer felépítése	6
2.1.	A napelem modul	6
2.2.	Az inverter	13
3.	Az elosztóhálózatra kifejtett hatások	15
3.1.	A napelem tulajdonságaiból fakadó hatások	15
3.1.1.	Változó teljesítmény:	15
3.1.2.	Változó feszültség:	17
3.1.3.	Hálózati veszteség:	20
3.1.4.	A táppont terhelésének változtatása:	21
3.1.5.	Visszaáramló energia:	22
3.1.6.	Meddőteljesítmény fluktuáció:	22
3.1.7.	Aszimmetria:	23
3.2.	Az inverter felépítéséből fakadó hatások	23
3.2.1.	Harmonikusok:	23
3.2.2.	Flicker:	24
3.2.3.	Teljesítménytényező:	25
3.2.4.	Szigetüzem:	26
3.3.	Összefoglalás	27
4.	A DigSILENT PowerFactory szimulációk előállítása	28
4.2.	Az egyvonalas séma előállítása	28
4.2.1.	A fogyasztók leképezése:	28
4.2.2.	A napelemek leképezése:	31
4.3.	Szimulációk elkészítése	37
5.	A szimulációk eredményeinek kiértékelése	39
5.1.	Az elosztóhálózat csomópontjainak feszültségváltozása	39
5.1.2.	Hosszú idejű feszültségváltoztató képesség:	39
5.1.3.	Rövid idejű feszültségváltoztató képesség:	45
5.2.	Hálózati veszteség változása	47
5.3.	Visszaáramló energia	53
5.4.	Összefoglalás	54
6.	Összefoglalás	56

1. Bevezetés

A növekvő energiaigények, a fosszilis energiaforrások csökkenése és az élhető környezet fenntartása érdekében a megújuló energiatermelőknek nagy szerepe lesz az elkövetkezendő évtizedekben. Szerencsére a megújuló energiaforrások kellően széles palettája képes lehet a különféle elvárásoknak megfelelni, ha kellő tudatossággal használjuk őket. A tudatosság véleményem szerint abban rejlik a megújuló energiaforrások terén, hogy mindig a környezethez illeszkedő, lehető legjobb hatásfokot adó megoldásokat keressük. Fontos, hogy a környezet szó alatt a természetes és az épített környezetet is értsük. Csak ennek a tudatosságnak a felhasználásával biztosítható, hogy versenyképesé tegyük a megújuló energiaforrásokat.

A dolgozatomnak alapot adó napelemek tekintetében kiemelten fontos ezen tudatosság követése, mert a napelemekről mondható el leginkább az elterjedtebb megújuló energiaforrások közül az, hogy se gazdaságilag, se műszakilag nézve nem vetélytársai a jelenlegi energiatermelő megoldásoknak. Természetesen a gazdaságosság háttérében leginkább a műszaki szempontból még megoldásra váró problémák vannak, mind modul, mind rendszerszinten. Ezek közül kettőt kiemelek, amelyek véleményem szerint a legsürgetőbb kezelésre váró problémák:

- gyenge hatásfok, amiből a nagy fajlagos területigénye fakad,
- szabályozatlan termelés, ami az időjárás viszonyosságaitól nagyban függ.

A problémákhoz társul, hogy Magyarország megújuló energia hasznosítási cselekvési terve előírja a megújuló energiaforrások magasabb részarányát az energiatermelő rendszerben, amiből következően a napelemek telepítése bizonyos „kényszer” alatt áll. [20] Ezekből adódóan a napelemek telepítése nem feltétlenül gazdaságos, így a rövid időn belül megtérülő napelemes beruházások csak külső forrás, például állami támogatás segítségével valósíthatóak meg.

Ezekén felül a napelemek az elosztóhálózatra is negatív hatást gyakorolhatnak. A legtöbb esetben az elosztóhálózatra csatlakoznak, amiből következően elkerülhetetlen, hogy valamilyen mértékben ne befolyásolják a már kialakult villamosenergia-rendszer működését. Ennek a hatásnak a mértéke nagyban függ a napelemek elosztóhálózatban történő elhelyezésének milyenségétől, azaz hogy hova, mennyi napelemet teszünk. A napelemeknek ez a fajta hátránya kevésbé van rivaldafényben, miközben nagyon fontos

lenne a pontos ismerete, hiszen a napelem telepítések szabályozását és támogatását úgy kéne kialakítani, hogy a már kialakult villamosenergia-rendszer szabályozhatóságát és működőképességét ne veszélyeztessék.

Dolgozatomban ezért fogom a fotovoltaiikus rendszerek kisfeszültségű elosztóhálózatra kifejtett hatásait elemezni. A kidolgozás során első lépésben összefoglalom, hogy mik is ezek a befolyásoló tényezők. Majd ezek közül többet, a napelemek elosztóhálózatba történő csatlakozásának elhelyezésének függvényében fogok kvázistacioner load-flow vizsgálatokkal elemezni. Az elhelyezés szerint két esetet különböztetek meg. Az első esetben decentralizáltan, a körzetben található családi házaknál helyezem el a napelemeket, a második esetben pedig koncentráltan, kizárólag egy darab koncentrált fogyasztót leképező áruháza telepítve. A vizsgálataim eredményéből kiindulva, a jobb elrendezés kiválasztásával egy megoldást is próbálok nyújtani az elosztóhálózatra kifejtett hatások csökkentésének érdekében.

A napelemek negatívumai mellett a pozitívumok felsorolása alátámasztja telepítésük szükségességét. Véleményem szerint a napelemekre elsősorban, mint innovációra kell gondolni, hiszen a fosszilis primerenergiára épülő energiatermelőink egy idő után a kifogyó üzemanyagaiknak hatására, növekedő árral tudnak majd csak termelni. Ezért megfelelő helyettesítő megoldásokat kell már most kidolgoznunk, amik között a kimeríthetetlen forrással rendelkező napelemek kedvező pozícióban vannak. Előnye a napelemeknek az is, hogy a fogyasztóhoz közel történik a legtöbb esetben az energiatermelése. De ugyanígy pozitívum mellette, hogy a Föld kiszipolyozása helyett a Napnak az energiájából termelünk villamosenergiát, még hozzá káros anyag kibocsátása nélkül. Azzal, hogy működés közben nincs káros anyag kibocsátása, haszonként jelentkezik a CO₂-kibocsátás csökkentését előíró normatívák teljesítésének lehetősége. Persze tudjuk, hogy a napelemek gyártása közben és a leszerelésük után jelentkező szennyezések nem elhanyagolhatóak, de még mindig kisebb mértékűek, mint a fosszilis vagy a nukleáris energiára építkező technológiáknál. De a napelemeknek egyéb környezeti hatásuk is kisebb, mint a többi megújulónak. Példának okáért gondolok itt a szélfarmok zajára és vibrációjára, és arra, hogy a napelemek könnyebben alkalmazkodnak a területi adottságokhoz a modularitásuknak köszönhetően. Végül arról se feledkezzünk meg, hogy egy olyan energiatermelő megoldásról beszélünk, ami

például Magyarország esetében fontos szerepű lehetne az energia importfüggőség csökkentésében.

Összefoglalva a bevezető részt, kijelenthetjük, hogy a napelemeket még nem jelentenek kiforrott technológiát. Láthatóan rengeteg előnnyel rendelkezik, de a technológiai fejletlenségükből fakadó hátrányokat le kell küzdeniük. Ezt elérhetjük azzal, hogy növeljük és egységesítjük a rendszert felépítő komponensek élettartamát, csökkentjük a veszteségeit és növeljük a megbízhatóságát. Ezen megoldásokkal és a növekvő fosszilis primerenergia árak együttes hatásával a napelemek idővel versenyképesekké tehetők. Azonban ezzel az a napelemek elosztóhálózatra kifejtett negatív hatásait még nem küszöböltük ki, ezért foglalkozom dolgozatomban az elosztóhálózatra kifejtett hatásokkal.

2. A napelemes rendszer felépítése

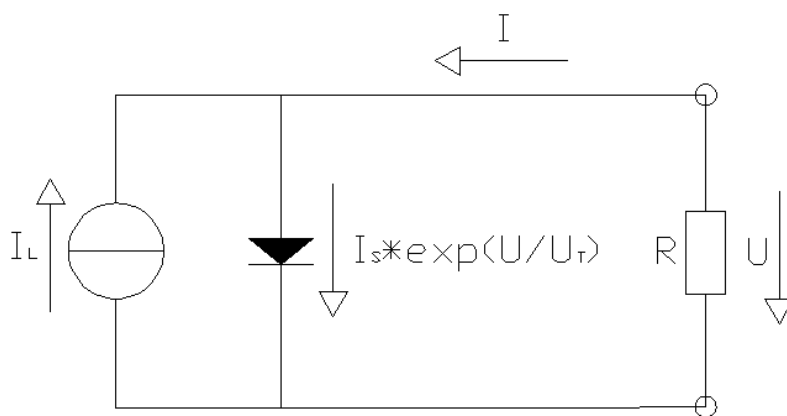
A napelem által okozott problémák miatt tárgyalni kell röviden a napelemes rendszerek fontos elemeit és a napelem energiatermelésének alapjait. A napelemes rendszernek két fő építőköve van, maga a napelem modul és az inverter. Mindkettővel röviden foglalkozom, csak a dolgozathoz szükséges mértékben.

2.1. A napelem modul

A napelem modul több cella soros és esetleg még a sorok párhuzamos összekötéséből adódik. A legelterjedtebb és a dolgozatban is vizsgált esetben a cella egy egyrétegű monokristályos pn átmenetű félvezető. A félvezető fizikai tulajdonságai közé tartozik, hogy a rá eső fotonok bizonyos körülmények között vezetési sávba vihetik a kristály vegyérték-elektronjait. Az így keletkező szabad elektronokat a pn átmenet a beépített térerősségének hatására a megfelelő irányba terelve áramot hozhat létre. Erről bővebben lehet olvasni a fejezetnek is alapot adó „Napelemek” című könyvben [1].

A dolgozat szempontjából releváns az, hogy milyen összefüggés van a cella feszültsége és árama, továbbá a cella feszültsége és teljesítménye között, hiszen ezekből fakadóan érthetjük meg, hogy hogyan alakul ki egy modul teljesítménye. Ezen részben nem az a célom, hogy mélyrehatóan vizsgáljam és előállítsam ezeket a karakterisztikákat, csak az, hogy a karakterisztikák fő tulajdonságait be tudjam mutatni és következtetéseket tudjak levonni belőlük. A részletesebb értelmezés megtalálható a [1] forrásban és a [2] forrásban, ahol szimulációk is segítik a megértést.

Kiindulásként nézzük meg az ideális pn átmenet helyettesítő kapcsolását, amiből majd tudunk következtetni az I-U és P-U karakterisztikákra. Az alábbi 1. ábrán az említett helyettesítő kapcsolat látható megvilágítás esetén.



1. ábra: Az ideális pn átmenet helyettesítő kapcsolása megvilágítás esetén. Forrás: [1]

A helyettesítő kép alapján felírható az áram feszültségfüggő egyenlete:

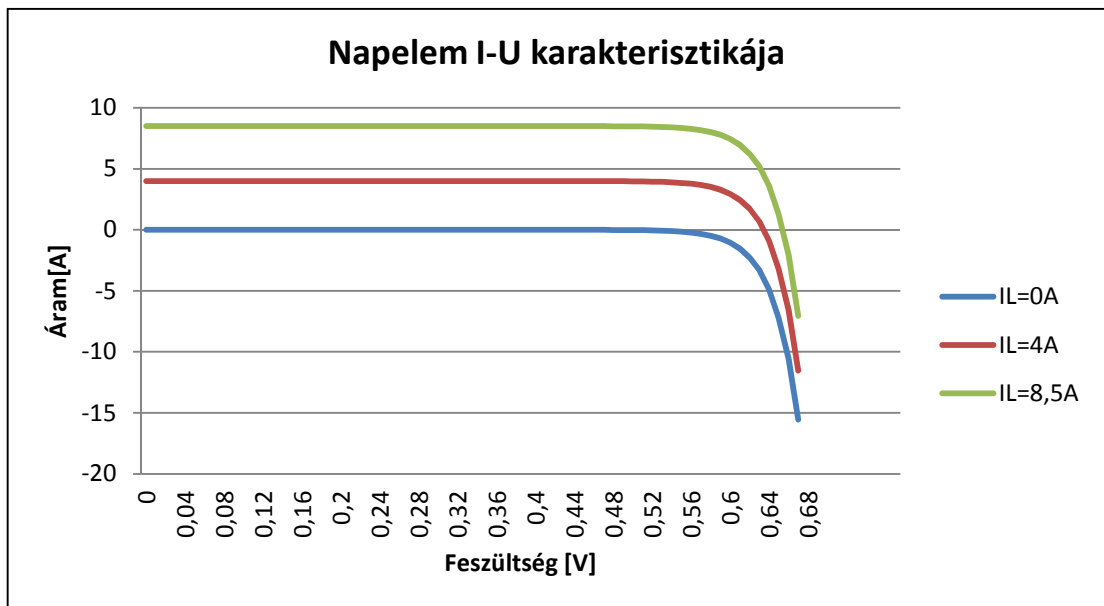
$$I = I_S \left(\exp \frac{U}{U_T} - 1 \right) - I_L, \quad (2.1)$$

Ahhoz, hogy a (2.1) képlet és a helyettesítő kép értelmezhető legyen, szükséges tömören kifejtetni az átmeneten áthaladó egyes áramösszetevőket:

- I_S : a termikus gerjesztéssel arányos áram, azaz a termikus generációval szabaddá vált n oldali lyukak és p oldali elektronok diffúziója az átmenet széléhez, majd sodródási árama az átmeneten keresztül,
- I_L : a foton gerjesztéssel arányos áram, azaz a fény által generált n oldali lyukak és p oldali elektronok diffúziója az átmenet széléhez, majd sodródási árama az átmeneten keresztül, kiegészülve az átmenet kiürített rétegében generálódott elektron-lyuk párok szétszóródásából adódó árammal,
- $I_S * \exp \frac{U}{U_T}$: az n oldali elektronok és p oldali lyukak diffúziója a nyitófeszültséggel csökkentett diffúziós potenciálzáttal szemben. Az U_T a termikus feszültség, ami 26 mV,
- U, I : a napelem kimeneti feszültsége és árama.

A (2.1) képletet vizsgáljuk meg különböző napfényintenzitásokra, és ábrázoljuk annak az ismeretében, hogy a később felhasznált és ismertett napelemnek a rövidzárási, azaz a maximális árama 8,5 A. Az alábbi ábrához megjegyzendő, hogy az egyszerűsítés végett (-1)-el beszoroztam a (2.1) egyenletet, hogy a gyakorlatban megszokott irányú görbéket kapjuk. Továbbá, mivel nem mért értékeket ábrázolok, hanem a (2.1)

egyenletet alkalmazom, így intenzitás helyett a tőle nagyban függő I_L értékek változtatásával képezem le a napfényintenzitás változását.



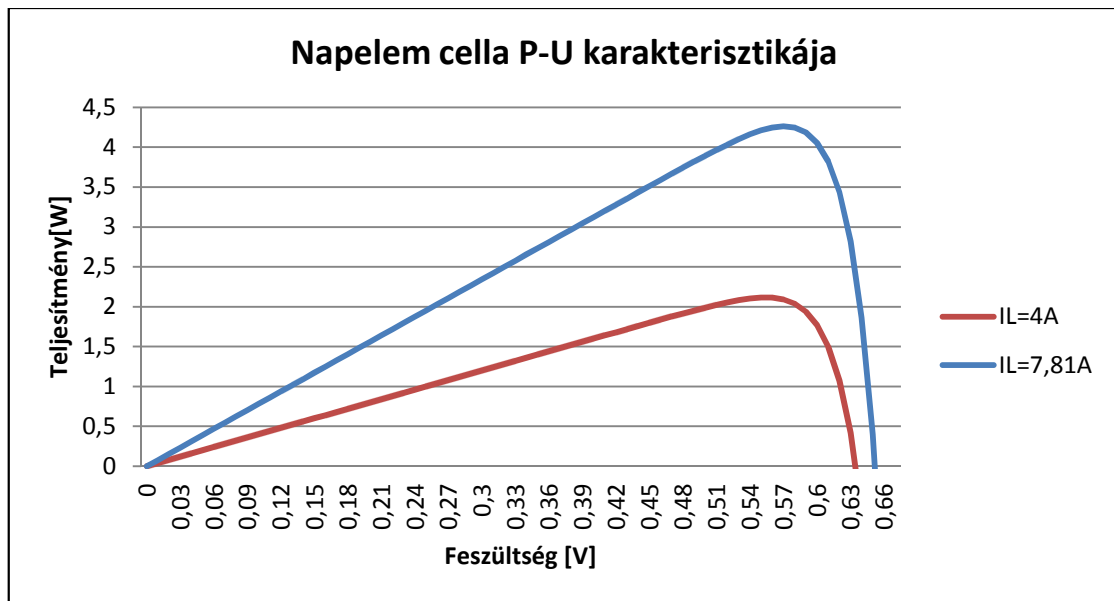
2. ábra: A napelem I-U karakterisztikája különböző megvilágításokra.

Érthető a 2. ábra alapján, hogy a cella a beeső fény intenzitásától és a terheléstől függő villamos teljesítmény leadására képes. Ha csak az intenzitás tekintetében vizsgáljuk, akkor látható, hogy a cella ráeső napfény nélkül diódként viselkedik, és minél nagyobb intenzitással sugározzuk be, annál inkább el tudja tolni a dióda alap görbéjét, azaz annál nagyobb teljesítményt tudunk kinyerni belőle.

Vizsgáljuk meg a P-U görbét is az előző esethez hasonlóan. Ehhez először is határozzuk meg a képletét:

$$P = UI = UI_S \left(\exp \frac{U}{U_T} - 1 \right) - UI_L \quad (2.2)$$

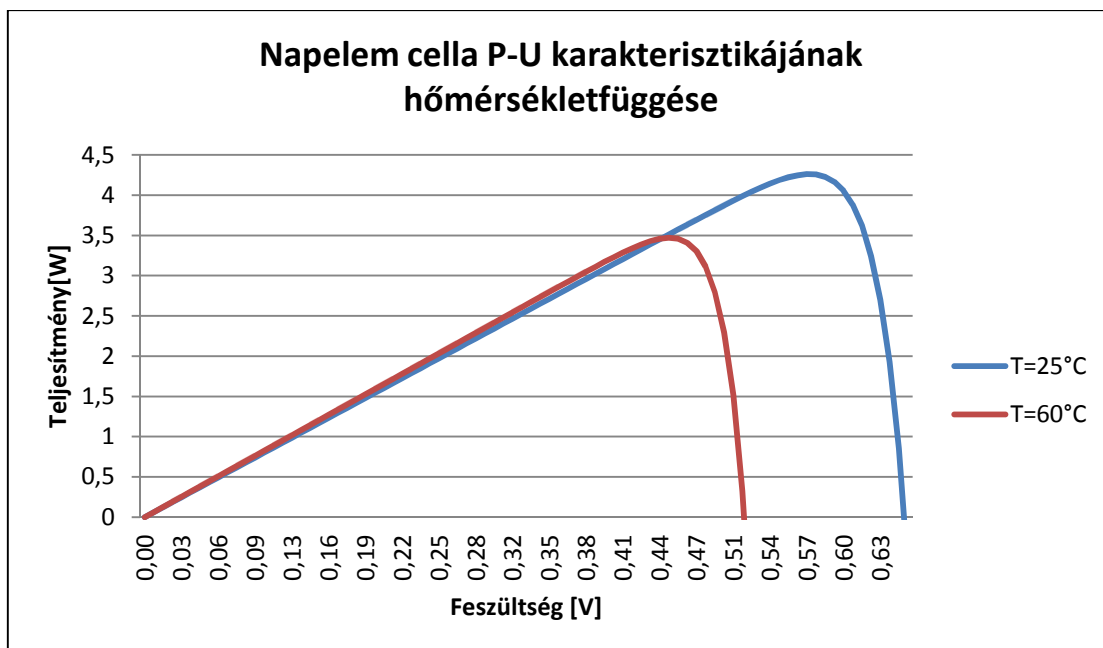
A (2.2) egyenletből következő P-U görbe ábrázolásánál az előző esettől annyiban térnek el, hogy nem a rövidzárási áramot veszem áram csúcserőértéknek, hisz az számunkra irreleváns, hanem a kiválasztott napelem gyártója által megadott maximális teljesítményhez tartozó áramot ($I_{mp}=7,81 A$).



3. ábra: A napelem P-U karakterisztikája különböző megvilágításokra.

A 3. ábrán észrevehető, hogy a teljesítmény a maximumát nem a feszültség maximumban éri el, hanem egy annál kisebb feszültségen. Ezen kívül még az is nagyon fontos következtetés a dolgozat további részéhez, hogy a különböző napfényintenzitásoknak különböző P-U görbéje van. Megfigyelhető, hogy a kisebb intenzitáshoz kisebb meredekségű és kisebb maximumú P-U görbe tartozik. Ebből látható, hogy milyen fontos a maximális napfényintenzitás biztosítása, hiszen jelentősen függ tőle a kinyerhető maximális teljesítmény. Érdekes továbbá megjegyezni, hogy matematikailag a maximum megtalálásához, a teljesítmény függvény deriváltját kell nullával egyenlővé tenni, és így megoldani az egyenletet. Így megkapjuk azt a feszültséget, amin a cellát tartanunk kell ahhoz, hogy a maximális teljesítményű munkapontban legyünk. A valóságban ezt a műveletet, azaz a cella maximális teljesítményre szabályozását (Maximum Power Point Tracking (MPPT)) egy elektronikus szabályozóval lehet elérni, ami a cella folyamatos vizsgálatából következtet a megfelelő feszültségen tartásra. Az MPPT-ről és megvalósításáról bővebben lehet olvasni „A megújuló és környezetbarát energetika villamos gépei és szabályozásuk” című könyvben. [3]

Vizsgáljuk meg azt is, hogy miként függ a kinyerhető teljesítmény a cella hőmérsékletétől, hiszen a későbbiekben ez szintén fontos tulajdonsága lesz a cellának. Ezt a jelenséget körvonalalaiban vizsgáljuk meg az alábbi ábrán.



4. ábra: A napelem P-U karakterisztikája különböző hőmérsékleteken, de ugyanazon napfényintenzitású besugárzással ($I_L=7,81\text{A}$).

A 4. ábrán mindkét görbe a standard tesztkörülmenyeknél használt intenzitású napfényvel megvilágított, azonban különböző hőmérsékletű cella P-U görbáját ábrázolja. Az ábrán követhető, hogy a magasabb hőmérséklet hatására kisebb teljesítmény nyerhető ki a cellából, a cella félvezető tulajdonságainak hőmérsékletfüggése miatt. Az is jól látható, hogy a hőmérsékleti függés leginkább a napelem feszültségét befolyásolja. Tehát a maximális teljesítmény kinyerésének fontos szempontja kellene hogy legyen a cella megfelelő hőmérsékleten tartása. Ezt esetleges hűtéssel, megfelelő modultervezéssel és a tetőn való megfelelő elhelyezéssel kordában lehetne tartani.

A fenti ábrákból jól szemléltetik azt, hogy milyen nehézségekbe ütközünk a maximális teljesítmény kinyerése során, akár egyetlen cella esetében is. Azonban még tovább bonyolódik a helyzet, hisz modul szinten kell gondolkodnunk. Ez azért szükséges, mert egy darab napelem cella feszültsége (jelen esetben, kb. 0,57 V) és teljesítménye igen csekély (jelen esetben, kb. 4,2 W), ezért több napelem cella összekapcsolására van szükség, hogy egy használható teljesítményű és feszültségű napelem modult kapjunk. A dolgozatban vizsgált napelemnél 60 darab cella van sorba kötve, ami a fenti számításaimmal azt adja, hogy a maximális teljesítményhez tartozó feszültsége a modulnak 34,2 V és a maximális teljesítménye 252 Wp. Ha ezeket összevetem a napelemhez adott leírással, ami a maximális teljesítményhez tartozó feszültséget 30,1

V-ban és a maximális teljesítményt 235 Wp-ben határozza meg. Az eltérések azzal magyarázhatóak, hogy az én értékeim ideális, számított értékek, míg a modul adatait laboratóriumi körülmények között előállított standard tesztkörülmények között végzett méréssel határozzák meg, amiknek az eredményében közrejátszik sokféle hatás. Érthető, hogy ha munkapontban akarjuk tartani az egész modult, ahhoz nagyon fontos, hogy az egész modult ugyanolyan tulajdonságú cellák építsék fel, és minden cellát ugyanaz a napfényintenzitás érje. Sőt, fontos még az is, hogy a hőmérsékletük is ugyanolyan legyen, hisz láthattuk, hogy a félvezető tulajdonságai nagyban függenek a hőmérséklettől. Ezeknek a modul tervezésénél és alkalmazásánál nagy figyelmet kell szentelni.

A valós fogyasztási igényeket is kielégítő megoldásokhoz több modul soros és/vagy párhuzamos összekapcsolásából kell napelem rendszereket készítenünk, hiszen egy 235 Wp-es napelem teljesítménye elenyésző a valós igényekhez képest. A napelem parkokban a napelemek soros összekapcsolását sztringnek hívjuk és általánosságban elmondható, hogy egy sztringhez egy inverter tartozik, aminek a rengeteg feladata között csak egy kis része az előzőekben tárgyalt MPPT. Ebben a sorosan összekapcsolt rendszerben azonban a cella negatív tulajdonságai sokszorozva jelennek meg amellett, hogy egyéb új problémák is előkerülnek. Ilyen negatív tulajdonsága a nagy rendszereknek például a hőmérsékletváltozás hatásának sokszorozódása és az árnyékolás okozta nagyobb léptékű teljesítményváltozás, amikre figyelemmel kell lenni a rendszer tervezésekor. Ez főként azért jelent problémát, mert nem minden egyes modulhoz (és főként nem minden egyes cellához) tartozik egy inverter, hanem egy egész sztringhez. Az egy darab inverter azonban nem tudja külön-külön kezelni a problémákat, csak a sztring egészében, ami modulszinten nem feltétlenül a legjobb megoldást jelenti. A napelemekről és a rendszerszinten megjelenő negatív tulajdonságairól bővebben írok a további fejezetekben.

A napelemek felépítése és energiatermelésük mikéntje után a dolgozat szempontjából fontos a napelemek különböző csoportosításainak tárgyalása, hogy a későbbiekben egyszerűbb legyen a rájuk való hivatkozás.

Beszélhetünk hálózatra csatlakozó és szigetüzemben működő rendszerekről. A fő különbség a kettő között, hogy a hálózatra csatlakozó erőművek a fogyasztó által el nem fogyasztott többlet energiát vissza tudja táplálni a kisfeszültségű hálózatba. Ezzel

szemben a szigetüzemű rendszer, mivel nincs hálózatra kötve, kénytelen saját magának megtermelni az összes energiáját és a lehetőségekhez mérten a többlet energiát tárolni, hiszen számolnia kell azon időszakokkal, amikor nem termelnek a napelemek eleget, például este, vagy borús időben. Jelen dolgozatban, mivel a napelemek hálózati hatásait figyelem, ezért a hálózatra csatlakozó rendszerekkel foglalkozom. [3]

A másik fontos csoportosítás, amire a későbbiekben még sokat hivatkozom, az a rendszer nagyságát alapul vevő csoportosítás. Ennek alapját a [4] forrás adja, amely három nagy csoportot különböztet meg:

- Nagy napelem rendszer (Utility scale): Ezek közé tartoznak a MWp nagyságú rendszerek (1-10 MWp), amik általában közvetlenül, külön alállomással és háromfázisúan csatlakoznak a középvezettségű elosztóhálózatba vagy a nagyfeszültségű átviteli hálózatba.
- Közepes napelem rendszer (Medium scale): A 10-1000 kWp teljesítményű installációkat soroljuk ide, amiket általában nagyobb épületekre (középületekre, bevásárló központokra) helyeznek. A hálózatra csatlakozásuk milyensége, azaz, hogy közvetlenül vagy közvetetten csatlakoznak be, a telepítésre kerülő napelemes rendszer csúcsteljesítményétől függ leginkább. Nagyobb rendszereknél, ahol a napelem rendszer nagysága az alállomási rendszer nagyságával összevethető, külön transzformátorral közvetlenül a hálózatba táplálnak. Míg kisebb rendszereknél, ahol a napelem teljesítménye összevethető a villamos energia igény nagyságával, közvetetten csatlakoznak a hálózatba a már meglévő transzformátoron keresztül.
- Kicsi napelemes rendszerek (Small scale): Az előzőekből logikusan következik, hogy ide a 10 kWp-et meg nem haladó nagyságú rendszerek tartoznak. Általánosan elmondható, hogy ide tartozik a legtöbb telepített rendszer, hisz ezek a kommunális fogyasztókhoz, például családi házakhoz telepített napelemes rendszerek, amik a kisfeszültségű elosztóhálózatra táplálnak be. Általában ezek a rendszerek egyfázisú csatlakozásúak és 1 és 3 kWp között változó méretűek.

2.2. Az inverter

A napelem cellák vizsgálatánál használt képletekből látható, hogy a napelemek egyenáramot állítanak elő, miközben a villamosenergia-hálózat alapját a váltakozó áram adja. Így elkerülhetetlen eleme a napelemes rendszereknek az inverter, aminek elsődleges feladata a napelemek felől érkező egyenáramnak a hálózati előírásoknak megfelelő váltakozó árammá alakítása. Számunkra jelenleg a legfontosabb, hogy ez egy elektronikus átalakítás, aminek nagyon sok funkciót kell ellátnia és ebből fakadóan kellően sok problémát is okozhat az elosztóhálózat felől nézve, amikkel a későbbiekben foglalkozom is. A „Megújuló energia termelésben alkalmazott hálózati inverterek és minősítésük” [5] című cikkben található egy jó összefoglalás az inverterekről, a továbbiakban ezt használok forrásként ebben a pontban. Elsőként nézzük, milyen funkciói vannak az invertereknek, csak néhányat kiemelve:

- A PV panel telep feszültségének, áramának mérése
 - Ezzel közel a maximális teljesítményű munkapontban tudja működtetni a rendszert, amiről már korábban volt szó.
- A hálózati feszültség, áram, teljesítmény és frekvencia mérése (egy vagy három fázison)
 - Ez azért szükséges, hogy az inverter a feszültség és frekvencia csökkenése és növekedése esetén beavatkozhasson, azaz leállíthassa a napelem hálózatba termelését. Ezek a határok feszültség esetén $0,85U_n - 1,1U_n$, ahol $U_n=230\text{ V}$, és frekvencia esetén $50\text{ Hz} \pm 1\text{ Hz}$. A hozzájuk tartozó kikapcsolási idők ($0,2 - 2\text{ s}$), illetve a hálózati feszültség visszatérése esetén a feléledési idő ($30 - 300\text{s}$).
- A hálózati csatlakozás felügyelete
 - Ennek fő motivációja, hogy a nem kívánt sziget üzemet elkerülhessük (anti-islanding), amiről a későbbiekben lesz még szó. Ehhez tartozik a sziget üzem érzékelése, ami után a szolgáltatói hálózatról lekapcsolódik az inverter és ide tartozik a sziget üzem miatti leállás utáni újraindítás és visszakapcsolódás is.
- A kimeneti áram teljesítménytényezőjének tartása
 - Erről is bővebben lesz szó a későbbiekben, de előljáróban megjegyezhető, hogy $\cos\varphi=1$ -et tart általában az inverter, de akár

változtatható $\cos\varphi$ -vel részt vehet a feszültség- és meddőszabályozásban is.

- A kimeneti áram harmonikus tartalmának (THD) kontrollja
 - o Szintén a későbbiekben tárgyalom, hogy egy fontos kritériuma az inverter működésének a hálózatba táplált áram megfelelő mértékű harmonikus torzítási érték alatt tartása.
- A kimeneti áram egyenáram tartalmának az ellenőrzése

Az invertereknek rengeteg feladatot el kell látniuk, de ezek mellett egyre gyakrabban a legtöbb védelmi funkciót is az inverterbe építik, hogy egy komplex eszközzel kezelhessék az összes felmerülő feladatot. Így az invertereknek például a következő védelmeket kell tartalmazniuk: túlterhelés- és rövidzárlati védelem; földzárlati/testzárlati védelem; feszültségnövekedési-, feszültségcsökkenési védelem; frekvencianövekedési-, frekvenciacsökkenési védelem; elosztóhálózati-szigetüzem elleni védelem; egyenáramú védelem.

A fentiekből fakadóan kellően sok előírást kell a PV invertereknek kielégíteniük nem csak a hálózatba betáplált áram minősége érdekében, de a felhasználók védelmében is, akik a legtöbb esetben olyan háztulajdonosok, akik nem szakemberek. Mivel egy gyorsan fejlődő technológiáról beszélünk a szabályozás még korántsem egységes, de fejlődési iránya egységes nemzetközi irányba mutat. Így a későbbiekben a jelenségek vizsgálatánál a nemzetközi IEC szabvány előírásait veszem alapul. A szabályozási törekvésre magyarországi példát is láthatunk az E-On oldalán közzétett minta csatlakozási dokumentumban, mely szerint „a termelő berendezés által okozott hálózatszennyezések (relatív THD / flicker / feszültségváltozások stb.) nem nagyobbak az MSZ EN 50160 szabványban meghatározott feszültségminőségi határértékek 1/5-énél.” [6]

3. Az elosztóhálózatra kifejtett hatások

Két fő problémacsoportra osztottam a napelemes rendszerek hálózatra kifejtett hatásait. Az első csoportba a napelemek elemi tulajdonságaiból és a napelemes rendszerek felépítéséből fakadó hibákat soroltam, amiket főként a termelt energia változékonysága határoz meg. A második csoportba az inverterek számlájára róható hatásokat írtam. Természetesen a két csoport teljesen nem választható szét, hisz egymással szorosan összekapcsolódnak, így lesznek olyan problémák, amiket csak a saját meglátásom szerint tettem az egyik csoport helyett a másikba.

3.1. A napelem tulajdonságaiból fakadó hatások

A napelemek tulajdonságaiból fakadó problémák közé azokat sorolom, amik a termelés változásából fakadnak. Ehhez az elméleti alapokat kiegészítendő röviden írok a napelem primer energiaforrásának, azaz a napfény intenzitásának változásáról.

A Nap energiájának vizsgálatánál az alapot az úgynevezett napállandó adja, ami a Föld légkörének határát elérő sugárzás nagyságát mutatja, amely $I_0=1360-1370 \text{ W/m}^2$ körüli érték. Ennek egy része elnyelődik, másik része visszasugárzódik a világűrbe, így egyszeres földi levegőréteget, mint elnyelő közeget, feltételezve mintegy 925 W/m^2 sugárzási teljesítmény érkezik a föld felszínére, ami a gyakorlatban bevett idealizált 1000 W/m^2 érték helyesebb formája. [1]

Rengeteg mindentől függ az, hogy ebből a kinyerhető energiából adott pillanatban mennyi áll rendelkezésre a napelem felületén. A legfontosabb, hogy a nap pályája hatással van a napfényintenzitás nagyságára. Ebből következően függ az évszaktól, napszaktól, földrajzi szélességtől, tengerszint feletti magasságtól. Természetesnek tűnik továbbá, hogy függ az adott időjárási viszonyoktól; mennyire felhős az ég, esett-e hó, mekkora a páratartalom. Befolyása van még a légtömeg nagyságának és a légszennyezettségnek is az intenzitás mértékére. Ezen gondolatokat később a dolgozatomban még felhasználok a napelem energiatermelésének meghatározásánál.

3.1.1. Változó teljesítmény:

A napelem termelése a rá eső napfény intenzitásának nagyságától függ, ebből fakadóan sztochasztikus, ahogy a második fejezetben hosszasan be is mutattam. Így további

magyarázat nélkül elfogadhatjuk a napfényintenzitás változásából fakadó teljesítményváltozást, mint a napelemek elsődleges hálózati hatását. Ebben a teljesítményváltozásban gyökereznek a napelemek alábbi fejezetében tárgyalt egyéb hálózatra kifejtett hatásai is.

De még mielőtt ezekre rátérnék, szeretnék mélyebben a napfényintenzitás egyenetlen változásának a napelem energiatermelésére gyakorolt hatásával is foglalkozni. Ez az úgynevezett mismatch (egyenetlenség) effektusként jelenik meg. A mismatch effektus során veszteségek lépnek fel, amiknek okozója modul szinten a cellák, vagy rendszer szinten a modulok fizikai paramétereinek különbsége, vagy a különböző körülmények hatása. Ez abból fakad, hogy a napelem kiadott teljesítménye a legkisebb teljesítményt kiadó cella/modul által van meghatározva. Például amikor egy cellát a modulban kisebb napfényintenzitás éri, míg a többit változatlan nagyságú, akkor a jól működő cellák rákényszerítik a teljesítményüket a rossz cellára, ezzel túlterhelve azt. Ennek magyarázata az 1. ábrán látható helyettesítő képből következik. Ezen az látható, hogy a cellák áramforrásként képzelhetők el, amiből fakadóan, ha a sorba kapcsolt cellák áramai nem egyeznek meg, akkor erősen lokalizált disszipáció lép fel. Ez úgynevezett melegpontokat (hot-spot) hoz létre, ami maradandó károsodást okozhat a modulban. [2]

Mélyebben nem foglalkozva a modul szint celláinak gyártási különbségéből adódó mismatch veszteségekkel, foglalkozzunk az egyenetlen napfényintenzitásból következő hibákkal. Fő okozójuk a felhőátvonulás vagy a szmog árnyékának egyenetlen elterülése a napelemeken, de akár tervezési hiba is lehet, például ha a telepítő nem számol a kémény vagy közeli fák okozta árnyékok mozgásával. Megoldásának legegyszerűbb, ámbar nem legjobb módja, a cellákkal anti-parallel bekötött bypass dióda alkalmazása. Ez egy nagyon egyszerű megoldás, hiszen úgy működik, hogy az árnyékolt cellát mentesíti az áramkényszer alól, azaz átveszi az energiaáramlást. Ebből azonban az adódik, hogy az árnyékolásnak köszönhetően a modul teljesítménye jelentősen romolhat, akár nullára is leeshet.

Áttérve rendszerszintre általánosan elmondható, hogy a nagy napelemes rendszereknél szükséges, hogy sorba kössük a napelemeket, úgynevezett sztringekbe, ahhoz hogy elérjük a kellő nagyságú feszültséget. Ezért gyakran több tucat napelem kell egy sztringbe. Ebből kifolyólag azonban könnyen befolyásolható a sztring maximális teljesítményű munkapontja részleges árnyékolással, amiket okozhatnak fák, felhők,

hiszen a befolyásolt napelemeknek különböző MPP-je lesz és létrejöhet melegpont effektus rendszerszinten is. A több MPP-vel természetesen csökken az általánosan inverterbe épített MPPT hatékonysága, ahogy már az előző fejezetben jeleztem. Ebből kifolyólag csökken a kinyerhető energia, nem beszélve arról, hogy roncsolódhatnak a napelemek is. [7] A bypass diódák alkalmazása rendszerszinten is segít a hot-spotok elkerülésében, azonban a teljesítménycsökkentő hatásuk nagyobb mértéket ölthet, hisz nagyobb a rendszer. Ezen kívül több problémát is okoznak rendszerszinten, amikkel a [2] forrásban lehet találkozni.

Tehát a bypass diódák nem az optimális megoldást nyújtják. Szerencsére azonban a probléma limitálható a megfelelő kialakítás és rendszeres karbantartásnak köszönhetően. Egy érdekes tanulmányt olvashatunk például a sorba-párhuzamosan kötések variálásáról és annak hatásairól árnyékolás esetében a források között megtalálható [8] forrásban, ami egyik alapjául is szolgált ezen rész kidolgozásának. Ebben felmerült az, hogy legyenek újrakonfigurálhatóak a modulok egymáshoz kötése a hatások függvényében, így mindig az optimális működési szinten tartva a rendszert. Egy másik napelemek összekapcsolását vizsgáló forrás [7] érdekes eredményre jutott, miszerint a párhuzamba kapcsolt modulok tulajdonságai sokkal jobbak, mint a sorba kapcsolt moduloké. Így érdemes sztringek helyett párhuzamosan kötött napelemes rendszerekben gondolkodni. Ezt a párhuzamosan kötött rendszert egy DC-DC konverter irányítja az MPP-jébe, majd egy kaszkád DC-DC konverterrel elérhető, hogy megfelelő nagyságú energiát és feszültséget tudjunk az inverterre bocsájtani. Ez megoldást jelent a részleges árnyékolásból vagy egyéb mismatch jelenségekből adódó rendszerszintű problémákra.

Ez után a tárgyalás után érthető, hogy miért és hogyan jelentkezik az intenzitás egyenetlen elosztásából következő teljesítményváltozása a napelemes rendszereknek. További kérdés azonban, hogy ez a sztochasztikus teljesítményváltozás, milyen egyéb elosztóhálózatra kifejtett hatásokkal is rendelkezik még.

3.1.2. Változó feszültség:

Az előző pont tárgyalása szorosan kapcsolódik ezen ponthoz, hisz látható volt, hogyan befolyásolja a napelemek energiatermelését a napfény intenzitásának változása és egyenetlen eloszlása. A termelt energia csökkenésén kívül problémaként jelentkezik a

változó termelés tápponton okozott feszültségnövekedése és -fluktuációja. Ez a két különböző eset a hosszú és a rövid idejű feszültségváltozás. Mindkét probléma a napelemek számával arányosan növekszik, és főként akkor jelentősek, ha a nagy napelemes rendszerek közel a hosszú távvezeték nem túlterhelt végpontjához kerültek betelepítésre. Az elhelyezés is befolyásolja a feszültségváltozás mértékét.

A rövid idejű feszültségváltozást általánosságban a felhők mozgásából adódó gyors intenzitásváltozás okozza. Ez olyan tüskéket hoz létre az energiatermelésben, ami feszültségcsökkenések és feszültségnövekedések rövid idejű egymás utáni lefolyását válthatják ki. A hosszú idejű feszültségváltozás lehet a napelem általános termeléséből adódó feszültségnövekedés vagy a hosszabb idejű felhősödésből fakadó teljesítményváltozásnak a feszültségváltoztatása. [4]

A napelemek termelésének feszültségváltoztató képessége egyszerűen magyarázható az alábbi képlettel: [9]

$$\Delta U \approx \frac{P_{dg}R_{th} + Q_{dg}X_{th}}{U_n}, \quad (3.1)$$

ahol U_n a névleges feszültsége a rendszernek, $(R_{th} + jX_{th})$ a vezeték Thevenin helyettesítő képéből kapott impedanciája és $(P_{dg} + jQ_{dg})$ a napelem által termelt energia, ahol a $Q_{dg} = 0$ az általános esetben. A (3.1) képletből következően a feszültségváltozás mértéke a betáplált teljesítménytől függ, így az említett fluktuáló teljesítmény változó feszültséget okoz.

Miért is probléma ez a feszültségváltozás? Ennek megértéséhez szükséges a kisfeszültségen alkalmazott feszültségszabályozás módszereinek ismerete. A kifejtés során felhasználok forrásként a Villamosenergia-rendszer üzeme és irányítása és a Hálózati áramellátás és feszültségminőség egyetemi tárgyak jegyzeteit. [10] [11]

Kisfeszültségen a 400 V névleges feszültségű háromfázisú, illetve a 230 V-os egyfázisú fogyasztók csatlakozási pontján az MSZ EN 50160 szabvány szerint a tápfeszültség 10 perces átlagos effektív értékei 95%-ának bármely egyhetes időszakban az $U_n \pm 10\%$ tartományban kell lennie. Ahhoz, hogy ezt elérjük, a változó igények és termelési tulajdonságok miatt feszültségszabályozás szükséges. A magyar elosztóhálózatban a feszültség névleges értéken tartását leginkább a megfelelő méretezés mellett általában csak a 120 kV/KÖF transzformátorok áttételének terhelés alatti változtatásával tudjuk

elérni, a 120 kV-os oldalon kialakított, általában $\pm 15\%$ -os áttétel-változtatási lehetőség révén. A méretezéshez tartoznak a vezeték keresztmetszetének és a tápvonal hosszúságának kialakítása, a transzformátor névleges teljesítményének és névleges középállású áttételének beállítása és a fogyasztói- és áramszolgáltatói meddőteljesítmény-kompenzáció beillesztése (söntkondenzátor). De lehetséges még a KÖF/KIF transzformátor $\pm 3\%$ -os megcsapolás változtatása is kellően indokolt esetben.

A feszültségszabályozó eszközökkel a KÖF sín feszültségének szabályozásával a 400/230 V-os fogyasztói csatlakozási pontokra kell biztosítani a feszültségnek a névleges érték körüli engedélyezett sávon belül való megtartását. Fontos, hogy a kis terhelési állapotokban a villamosan legközelebbi fogyasztónál a feszültség ne legyen túl nagy, de ezzel ellentétesen a nagy terhelési állapotokban a villamosan legtávolabbi fogyasztónál a feszültség ne legyen túl kicsi.

A szabályozás szükségességének alapvetően két oka volt még az elosztott energiatermelés térnyerése előtt. Ezek a 120 kV-on történő teljesítményváltozás miatti 120 kV-os tápponton fellépő feszültség ingadozás és a KÖF ill. a 0,4 kV-os hálózati elemek terhelésének változása által előidézett feszültségváltozás. Ezzel magyarázható, hogy a hálózat nincs teljesen felkészülve az elosztott energiatermelők okozta plusz feszültségváltozásokra.

A rövid idejű feszültségváltozás jellegzetesen az alábbi hálózati hatásokkal bír:

- Feszültségszabályozáshoz szükséges eszközöknek az általánosnál gyakoribb működését okozhatja. A szabályozási mechanizmusa ezen feszültségszabályozó eszközöknek 30-90 másodperces időtartamok alapján működik, így perc alapú feszültségléptetés változások lesznek érzékelhetők. Ez a gyakori működési kényszerük csökkenti a berendezések várható élettartamát és növeli a fenntartási költségeiket. [4]
- Feszültségnövekedést és csökkenést okozhat, aminek az értéke nagyban függ a napelemes rendszer nagyságától. A dolgozatban vizsgált méretekben a feszültségnövekedés és csökkenés szélsőséges esetei, azaz a feszültségletörés és emelkedés előfordulásának esélye csekély, de nagy napelemes rendszereknél előfordulhatnak.

Hosszú idejű feszültségváltozásra jellemző hálózati hatás:

- Ha a napelem rendszer túlméretezett, akkor akár hosszabb idejű, a névleges feszültséget is túllépő feszültségnövekedést is okozhat. [4]

Az általam használt terminológiában a túlméretezés az, amikor a napelem termelési csúcsának az idején a fogyasztó által elfogyasztott energia nagysága maximum 80%-a a napelem által termelt energia értékének. Természetesen ez csak olyan napelemeknél alkalmazható, ahol fogyasztóval közös hálózati csatlakozási pontja van a napelemnek. Fontos kiemelni ennél a definíciónál, hogy a dolgozatomban csakis a kisfeszültségű fogyasztói csatlakozási pontra illesztett napelemes rendszereket vizsgállok, és nem foglalkozom azon közepes vagy nagy napelemek rendszerekkel, amik közvetlenül a hálózatra táplálóknak, mondhatni erőműi funkciót ellátva.

Látható, hogy a feszültségtartáshoz köthető legtöbb probléma akkor lép fel, ha a kisfeszültségű elosztóhálózatba csatlakozó napelemes rendszer túlméretezett, ebből fakadóan ezt el kell kerülni. De a napelemeket akár alkalmazhatjuk, mint a feszültségszabályozás passzív eszközét a hosszú idejű feszültségváltoztató hatásával, és mint aktív eszközét, az inverternél már említett változtatható teljesítménytényezőjével.

3.1.3. Hálózati veszteség:

Ezzel a kitüntetett témával bővebben foglalkoztam a szakdolgozatomban, ahol a napelem elhelyezése és méretezése szempontjából vizsgáltam a hálózati veszteség alakulását, amivel célom az volt, hogy olyan rendszert tudjak kiépíteni egy adott transzformátor körzetben, ami képes a hálózati veszteséget felére csökkenteni. Mivel szakdolgozatom sikeres eredményekkel zárult, így elmondhatom, hogy képesek a napelemek a hálózati veszteséget csökkenteni. De ugyanígy a nem megfelelő méretezés és elhelyezés hatására képesek a hálózati veszteséget növelni is, így röviden foglalkozom ezen hálózati hatással is.

Első lépésben azt kell megértenünk, hogy a hálózati veszteség első sorban az elosztóhálózat (vezetékek, transzformátorok) leterheltségétől függ, de függ még a csúcskihasználási tényezőtől, az alapharmonikus meddőteljesítménytől, az alapharmonikus áram aszimmetriától és a harmonikus áramoktól. Ezekről bővebben lehet olvasni a szakdolgozatomban, amiből kiderül, hogy a napelemek főként a hálózat terheltségét tudják befolyásolni, így érdemes elsősorban ezzel foglalkoznunk. [12]

A hálózati veszteséget két részre bontom: a vezeték veszteségére (3.2) és a transzformátor rézveszteségére (3.3). Ezeket az alábbi képletekkel kaphatjuk meg.

$$S_v = 3 \cdot \int_0^l I^2(x) \cdot (r) dx + j \cdot 3 \int_0^l I^2(x) \cdot (x_L) dx \quad (3.2)$$

$$P_R = I^2 R \quad (3.3)$$

A napelem láthatóan csak az áram nagyságát tudja befolyásolni az energiatermelésével, így a hálózat tehermentesítésével érhető el jelentős veszteségcsökkentést. Ez logikus is, hiszen minél kevesebb teljesítményt kell szállítania a vezetéknek és a transzformátornak, annál kisebb energia tud rajta eldisszipálni. Míg ha az eredeti terhelési állapotnál nagyobb terhelést tesz az elosztóhálózatra, azaz például a napelemmel jelentős mennyiségű teljesítményt táplálok be, akkor veszteségnövelést is elérhetek. Ezért nagyon fontos következtetés az, hogy ha a hálózati veszteségre nézve is előnyös napelemes rendszerekben szeretnénk gondolkodni, akkor a hálózatba tápláló napelemek hálózatra táplált energiájának nagyságát korlátozni kell. Az eredményeim alapján arra jutottam, hogy az alábbi definíció szerint érdemes a napelemeket méretezni:

„A napelem által termelhető maximális energia nagyságának a napelem termelési időszaka alatt kisebbnek kell lennie, mint a hozzá csatlakozó fogyasztó által, ugyanazon időszak alatt felvehető minimális energia 70% - 85%-a.”

Így már egy általánosan használható méretbeli limittel rendelkezem, ami talán az előző pontban tárgyalt feszültségszabályozásbeli hatásokat is mérsékli. Azonban a napelemek elosztóhálózatban történő megfelelő elrendezésére ezzel még nem kaptam megoldást, ezért foglalkozom jelen dolgozatomban a napelemek elhelyezésének hatásaival.

3.1.4. A táppont terhelésének változtatása:

A decentralizáltan termelő napelemes egység elhelyezkedése nagyban befolyásolja azt a vezetékszakaszt, amire csatlakozik. Ebből következően mielőtt egy nagy napelemes rendszert telepítenek, le kell ellenőrizni, hogy a napelemek és az állomás közötti vezetékszakasz kezelni tudja-e a napelemek által betáplált plusz energia szállítása okozta többletterhelést. Néhány esetben szükséges lehet a hálózat újratervezése.

Ez a jelenség azonban a dolgozatban vizsgált esetekben nem túl valószínű, hisz kisfeszültségű elosztóhálózatra csatlakoztatott, megfelelően méretezett kis és közepes

méretű PV rendszerekről lesz szó. Ez a jelenség inkább a nagy napelemes rendszereknél lép fel. A mostani esetben az várható, hogy javul az elosztóhálózatban lévő eszközök terheltsége, hisz a napelemek levehetik róluk a terhet, ahogy azt a veszteségeknél is tárgyaltam. [4]

3.1.5. Visszaáramló energia:

A napelemek képesek az energiájukat az elosztóhálózatba betáplálni, így képesek ellentétes irányú teljesítményáramlást okozni. Ez kisfeszültségen főként olyan napelemes rendszereknél jelentkezik, ahol a napelemek termelése meghaladja a napelemekkel közös csatlakozási ponttal rendelkező fogyasztók aktuális teljesítményigényét. Így a fogyasztó felé folyó áram iránya megfordul és elindul a szomszédos betáplálási pontokra vagy a transzformátorkörzeten kívüli KÖF elosztóhálózatba egy teljesítményáramlás. Ez a fordított teljesítményáramlás jelentős hatással lehet az elosztóhálózatban található védelmek működésére. Nagy napelem rendszereknél, ahol közvetlenül csatlakozik a hálózatba a napelem, még jelentősebb ez a hatás. Ezért az ellenkező irányú teljesítményáramlással számolni kell a transzformátorkörzetek alállomásainak kialakításánál, hogy a nagyobb napelem rendszereket is kezelni tudó védelmeket tudjunk kialakítani. [4], [9]

3.1.6. Meddőteljesítmény fluktuáció:

A napelemek feszültségváltoztató hatásával szorosan összefügg a meddőteljesítmény fluktuáció okozása, hisz a feszültségváltozásnál tárgyaltaknak megfelelően a feszültségszabályozó eszközöket gyakori működésre készíthetjük. Példának okáért, ha egy fázisjavító kondenzátor is szerepet játszik a feszültségszabályozásban, akkor a gyakori ki-bekapcsolásuk meddőteljesítmény ingadozáshoz vezethet. Ha a napelemes rendszer nagy és kiterjedt, akkor akár a középfeszültségű elosztóhálózaton is zavarokat okozhat.

Ezen felül negatív hatásként jelentkezik ekkor, hogy a fázisjavító kondenzátorok leválása azt eredményezi, hogy a meddőenergiát a középfeszültségű hálózatnak kell szolgáltatnia. Ez gazdasági következményekkel jár a nagy napelemes rendszereknél, hisz a meddő energia szállítása költségesebb annál, mintha helyben állítanánk elő. Mert ez a többlet meddőteljesítmény szállítás az alállomásokon és a távvezetéseken nagyobb terhelést és így többlet veszteséget okoz. [4]

3.1.7. Aszimmetria:

A napelemes energiatermelés milyenségéhez köthető hálózati hatásként értelmezhető az aszimmetria is. Az aszimmetria azt mutatja meg, hogy elosztóhálózaton lévő feszültségnek a negatív sorrendű összetevője mekkora a feszültség pozitív sorrendű összetevőjéhez képest. A napelemek azáltal okozhatnak aszimmetriát, hogy kisfeszültségen leggyakrabban egyfázisúan csatlakoznak az elosztóhálózatba. Megjegyezendő, hogy könnyen lehet védekezni ellene. Legegyszerűbben kis napelem rendszereknél a megfelelő elosztottsággal való tervezéssel lehet, még hozzá úgy, hogy minden fázisra megpróbálunk ugyanannyi napelemet tenni az adott leágazásban. De védekezhetünk ellene úgy is, hogy háromfázisú inverteren keresztül csatlakoztatjuk a hálózathoz a napelemeket, ahogy a nagy vagy közepes méretű napelemes rendszerekben teszik is.

3.2. Az inverter felépítéséből fakadó hatások

Az előző pontban láthattuk, hogy milyen sok hatással is bír az elosztóhálózatra az, hogy a napelemek energiatermelése nem egyenletes. Ezen felül további gondokat okoz az, hogy a napelemek egyenáramot állítanak elő, emiatt inverterre is szükség van. Ez a felépítéséből fakadóan nem tud a hálózat számára minden igényt kielégítő minőségű áramot szolgáltatni. Ezen fejezet tárgyalása során a „Villamosenergia minőség” című könyv elméleti háttérére alapozok. [13]

3.2.1. Harmonikusok:

Azt már tudjuk, hogy a napelemek által előállított egyenáramot inverter segítségével alakítjuk váltakozó árammá. Ez az inverter, a teljesítményelektronikai voltából adódóan nem képes tökéletes, csak alapharmonikust tartalmazó, szinuszos áramot előállítani, így elkerülhetetlen a felharmonikusok megjelenése a napelemes rendszer által generált váltakozó áramban. A jobb megértés érdekében részletesebben tárgyalom a harmonikus jelenséget.

A Fourier tételnek köszönhetően, mivel az inverter által létrehozott áram periodikus, felírható szinuszos és koszinuszos tagokból álló, az alapharmonikus egészszámú többszöröse szerinti periodikus függvények összegeként. Ennek a Fourier sornak a komplex alapját egyszerűen megkaphatjuk az alábbi képlettel:

$$i(\omega t) = \frac{I_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} \operatorname{Re}(|I_h| e^{j\varphi_h} e^{jh\omega t}) \quad (3.4)$$

$$I_h = \frac{1}{\pi} * \int_{-\pi}^{\pi} i(\omega t) e^{-jh\omega t} d(\omega t) \quad (3.5)$$

A Fourier sornak h-tól függő elemei vannak, ahol h-t harmonikus rendszámnak hívjuk, h=1 az alapharmonikus és h>1 a felharmonikusok. Emellett beszélhetünk még közbenső harmonikusokról is, ha h nem egész szám.

A harmonikus jelenlét jellemzésére használjuk az úgynevezett teljes harmonikus torzulást (Total Harmonic Distortion (THD)), ami feszültség esetében az alábbi egyenlettel számítható:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \quad (3.6)$$

A PV inverterek áramminőség jellemzőit és a hálózathoz kapcsolódási tulajdonságokat meghatározó IEC 61727 szabvány szerint a közbenső harmonikusokat is tartalmazó áramtorzulás az inverter névleges áramára vonatkoztatva nem haladhatja meg az 5%-ot. Ez még kis méretekben nem olyan rossz, ha arra gondolunk, hogy egy nem lineáris fogyasztó (kompakt fénycső) akár több mint 100%-os áram THD-t is okozhat. Ellenben nem ismerjük a hatását annak, hogy ha sok inverter csatlakozik a hálózatba, miként alakulnak ezek a harmonikusok, így ez a későbbiekben fontos vizsgálandó téma terület, ahogy a [14] forrás is említi.

Szorosan kapcsolódik a harmonikusokhoz az egyenáram betáplálás jelensége, ami legegyszerűbben a Fourier sor képletével (3.4) magyarázható, amiben az U_0 jelenti az egyenáramú összetevőt. Ez a hatás ebből fakadóan a harmonikushoz hasonlóan szintén a rendszer nagyságától és az inverter tulajdonságaitól függő hatás. Az IEC 61727 szabvány előírja, hogy napelem rendszer által előállított áramban, akármilyen körülmények állnak is fent, az egyenáramú összetevő nem lehet nagyobb a névleges áram 1%-ánál.

3.2.2. Flicker:

Az villamosenergia fogyasztók (pl. izzólámpák) megfelelő működése érdekében állandó effektív értékű feszültség biztosítása szükséges, ellenben ez nem mindig teljesül. A

feszültség effektív értékének kismértékű, ciklikus és gyors változása úgynevezett flicker (villogás) jelenséget okozhat. A flicker definíciója az MSZ EN 50160 szabvány alapján: időben ingadozó fényességű vagy színeképi eloszlású fényinger által létrehozott látásérzet ingadozás hatása.

A különböző források eltérnek abban, hogy a napelemeknél foglalkozni kell-e a flicker jelenséggel. Egyes források szerint nincs flicker jelenség a napelemeknél; ez abban az esetben igaz, ha kis napelemes rendszerekről van szó, hisz akkor elhanyagolható mértékű a villogás. Azonban, ha belegondolunk abba, hogy a nagy napelemes rendszereknél a kiadott teljesítmény akár gyorsan, és nagymértékben változó is lehet (pl.: felhőátvonulás), akkor már találkozhatunk flicker jelenséggel. Ennél a jelenségnél már nem mindegy, hogy hol található a napelemes termelő egység, hisz a középvezetési feszültségen keletkező flicker jelentősebb hatással bír az elosztóhálózat működésére, mint a kisfeszültségen keletkező. Azonban a jelentősebb ideig tartó flickert okozó 5 Hz és 10 Hz közötti ciklikus feszültségváltoztató képessége a napelemeknek nem vagy csak nagyon ritkán lesz tapasztalható. Hisz a felhőátvonulásból fakadó rövid idejű feszültségváltozás valószínűtlen, hogy ilyen gyorsasággal és ciklikussággal bírjon. Ezért az IEC 61727 szabvány, hivatkozva az IEC 61000-3-3 és 61000-3-5 szabványokra, az inverter által keltett hosszú idejű (2 órás) villogásmértékét szabályozza.

3.2.3. Teljesítménytényező:

Már többször előkerült a teljesítménytényező fogalma, ami a hálózatban folyó meddőteljesítmény jellemzésére használható mérőszám. A jelenlegi elosztóhálózatban elsődleges célunk, hogy a rendszer teljesítménytényezője az egyhez közeli legyen.

Általánosságban az inverternek a teljesítménytényezőre vonatkozó hatása nem jelentős, hiszen az inverter felépítéséből fakadóan előállítható a $\cos\varphi=1$ érték. Ettől függetlenül előírások vonatkoznak erre az értékre is. Elő van írva, hogy amikor a napelem a névleges teljesítményének 50%-ánál nagyobb teljesítményt ad le, akkor a teljesítménytényezőjének nagyobbnak kell lennie, mint 0,9.

Tudjuk azt is, hogy az inverter gyártók egyre többször már szabályozható teljesítménytényezőjű invertereket gyártanak, amelyek ($\cos\varphi_{\text{kapacitív}} = 0,8 < \cos\varphi < \cos\varphi_{\text{induktív}} = 0,8$) között állíthatóak. Az inverter által kibocsátott teljesítménynek a

szabályozható teljesítménytényezője egy kihasználható tulajdonsága lesz a jövőben, amivel a napelemes termelőegység aktív szerepet tud majd vállalni az elosztóhálózat meddő- és feszültségszabályozásában.

3.2.4. Szigetüzem:

A szigetüzem az egyik legfontosabb vizsgálandó állapot az elosztóhálózat és a hozzá csatlakozó decentralizált energiatermelők esetén. A szigetüzem egy olyan állapotot jelent, amikor a villamosenergia-hálózat egy része, függetlenül a többitől, önálló részé válik.

A szigetüzemnek két formáját különböztetjük meg: a szándékolt szigetekre bontást és a nem tervezett szigetüzemet. A szándékolt szigetüzem egy alaposan megtervezett, a villamosenergia megbízhatóság és minőség kritériumainak megfelelő állapotot jelöl, ami így egy megengedett állapota a hálózatnak. Ezzel szemben a nem tervezett szigetüzem során előállhat, hogy a fogyasztók nem megfelelő minőségű villamosenergiát kapnak.

A véletlen szigetüzem többféle hibát okozhat a hálózat működésében, ezek közül néhányat kiemelve: [15]

- Ha elég hosszú ideig fennáll a véletlen szigetüzem, akkor előfordulhat, hogy a hálózat és a szigetüzemben lévő leszakadt rendszer között fázisszög különbség jön létre. Ez a visszakapcsolás során a kapcsolóberendezések, energiatermelők és a fogyasztók számára is káros lehet.
- A véletlen szigetüzem, mivel egy nem tervezett állapota a hálózatnak, így általában nem képes az előírt frekvenciákat és feszültségszinteket biztosítani a fogyasztóknak.
- Veszélyeztetheti a helyreállítási munkákat és a lakosokat azzal, hogy nem várt hálózati elemeket, például a vezetékeket, feszültségen tartja.

Ez a problémakör a decentralizált hálózatban fokozottabb figyelmet kíván. A jelenlegi szabványokban a napelemes decentralizált energiatermelő egységeknél elő van írva a szigetüzem elleni védekezés (anti-islanding protection). Ilyen például az IEC 62116 szabvány, ami az IEC 61727 szabványban leírt szigetüzem megelőzési elvárások méréséhez ad mérési utasítást, útmutatót. [5] A szigetüzem elleni védekezés lényege, hogy amint érzékeli a védelem a szigetüzem előállását, szinte azonnal lecsatlakoztassa

az elosztóhálózatról a decentralizált termelőegységet. Azonban a decentralizált energiatermelés tervezett szigetüzemű működése a jövő villamosenergia-hálózatának megbízhatóságában nagy szerepet kaphat. Bővebben lehet olvasni a szigetüzem elleni védekezés mikéntjéről a [16] forrásban.

3.3. Összefoglalás

A napelemek hálózati hatásainak áttekintése után érthető, hogy ha nem megfelelően vannak a napelemes rendszerek megtervezve, akkor a szolgáltatott villamosenergia minősége jelentősen romolhat. De több helyen előkerült az is, hogy ki is lehetne használni a napelemes termelőegységek bizonyos hatásait. Az, hogy negatív vagy pozitív elemként jelenik meg az elosztóhálózatban, nagyban függ a rendszer tervezettségétől. Így a hálózati hatást nagyban befolyásolja a napelemes rendszer nagysága, a napelemes rendszer elosztóhálózatban lévő helye és elosztottsága és a telepítés helyének éghajlata, időjárása és földrajzi adottságai.

Ezek után már érthető, hogy miért is érdemes a hálózati hatásokkal foglalkozni. A továbbiakban a különböző napelem elrendezések tükrében elemzem a hálózati hatásokat.

4. A DIgSILENT PowerFactory szimulációk előállítása

A napelemek elosztóhálózatra kifejtett hatásainak vizsgálatához el kell készítenem a szimulációim alapját adó transzformátor körzet valóságghű egyvonalas sémáját és a szimulációkhoz szükséges programkódokat a DIgSILENT PowerFactory programban. A hálózati hatások jellegükből fakadóan nagy mennyiségű számítógépes szimulációt igényelnek, amik lehetnek stacioner és dinamikus vizsgálatok is. A dolgozatomban a manapság egyre jobban elterjedő kvázi-stacioner analízist alkalmazom a szimulációk során. Ennek az a lényege, hogy egy előre meghatározott időtartam alatt, rövid időközökben, egyesével végzem el programozottan a load-flow futtatásokat. Ennek hatására közelíthetek a dinamikus vizsgálatokhoz, miközben megmaradok a stacioner vizsgálatok könnyebbségeinél. [4]

4.2. Az egyvonalas séma előállítása

A szimulációimhoz első lépésben építenem kell egy szimulálásra alkalmas DIgSILENT PowerFactory modellt, aminek kialakításánál fontos ismernem:

- a pontos transzformátor körzet leképezést, ami magába foglalja a hálózatot felépítő elemek terveit (távvezeték, transzformátor adatok),
- a valóságghű fogyasztási adatokat, mind a kommunális mind a koncentrált fogyasztóknál,
- a közelítőleg pontos napelem termelési profilokat.

4.2.1. A fogyasztók leképezése:

Nem tartom szükségesnek, hogy alaposabban foglalkozzak a kisfeszültségű elosztóhálózat tervezésének és DIgSILENT PowerFactoryba való leképezésének lépéseivel, hisz mindezek alapjaiban megtalálhatóak a [12] forrásban. Azonban fontosnak tartom, hogy azon pontokról bővebben beszéljek, amikben eltérek tőle.

Már magát a PowerFactory egyvonalas sémát alapjaiban átalakítom, azért, hogy precízebbé tegyem a modellt. Ezért minden fogyasztói leágazással rendelkező villanyoszlopot egy külön csomóponttal látok el. Ennek a szükségességét az adja, hogy a kisfeszültségű elosztóhálózaton minden villanyoszlop egy elosztóhálózati betáplálási csomópontot képvisel, amire 2 - 4 ház csatlakozik. Ennek köszönhetően elérem, hogy

minden fogyasztóhoz egy közvetlen mérési pontot kapjunk. Az egyszerűsítés végett a csomópontokra csatlakozó 2 - 4 családi házat egy fogyasztóvá vonom össze a fogyasztói profiljuk megfelelő kombinációjával. Ezt az összevont fogyasztót pedig háromfázisúan csatlakoztatom a csomópontba, ami jó közelítést ad. Ugyanígy közvetlenül erre a csomópontokra viszonylag valóságosan, tudom majd később a napelemeket is csatlakoztatni.

A transzformátorkörzet összesen 128 kommunális fogyasztót tartalmaz, 45 csomópontra csatlakoztatva. Ezen csomópontok mindegyike egy villanyoszlopot szimbolizál, amire 2 - 4 fogyasztót jelképező kifestésű fogyasztót illesztünk. Így kapok:

- 22 db 2 fogyasztót tartalmazó leágazást,
- 8 db 3 fogyasztót tartalmazó leágazást,
- és 15 db 4 fogyasztót tartalmazó leágazást.

A körzetben található faluközpont több koncentrált fogyasztójából egy nagyobb koncentrált fogyasztót alakítok ki, ami egy áruháza képez le. Fontos, hogy ennek az egy fogyasztónak ugyanakkora maximumú és hasonló profilú legyen a teljesítmény felvétele, mint az eredeti összegének, hogy ne kelljen az alapot adó elosztóhálózatot újraterveznem az eltérő teljesítményáramlások miatt (pl.: transzformátor méretét és vezeték keresztmetszetét növelnem). A teljesítményfelvételének görbéjéhez, a profil alapú villamosenergia-fogyasztás elszámolásának alapot adó kettes számú kisüzleti csoport profilját veszem. Ebben szerencsére adott a téli és a nyári fogyasztói viselkedés.

A szimulációimat, ahogy említettem, kvázistacioner módon végzem, ami most azt jelenti, hogy egy napot vizsgállok több load-flow szimulációval. A precizitás növelése érdekében egy nap óránkénti vizsgálata helyett 10 perc alapú vizsgálatokat végzek a körzetben. Ehhez a koncentrált és kommunális fogyasztók fogyasztási és a napelemek termelési adatait is 10 perces felbontásúvá kell tennem. Ezt úgy érem el, hogy az eredeti egyórás bontásokat interpolációs függvény segítségével 10 perces bontásra finomítom és a programkódokat eszerint módosítom. Ez azonban a program futásának idejét jelentősen megnöveli, hisz csak egy nap vizsgálatához is $24 \cdot 6 = 144$ darab load-flow szimulációt kell lefuttatnom. Döntésemet indokolja, hogy így precízebb adatokkal tudok dolgozni, főként a napelem intenzitás szempontjából, valamint hogy az MSZ EN 50160

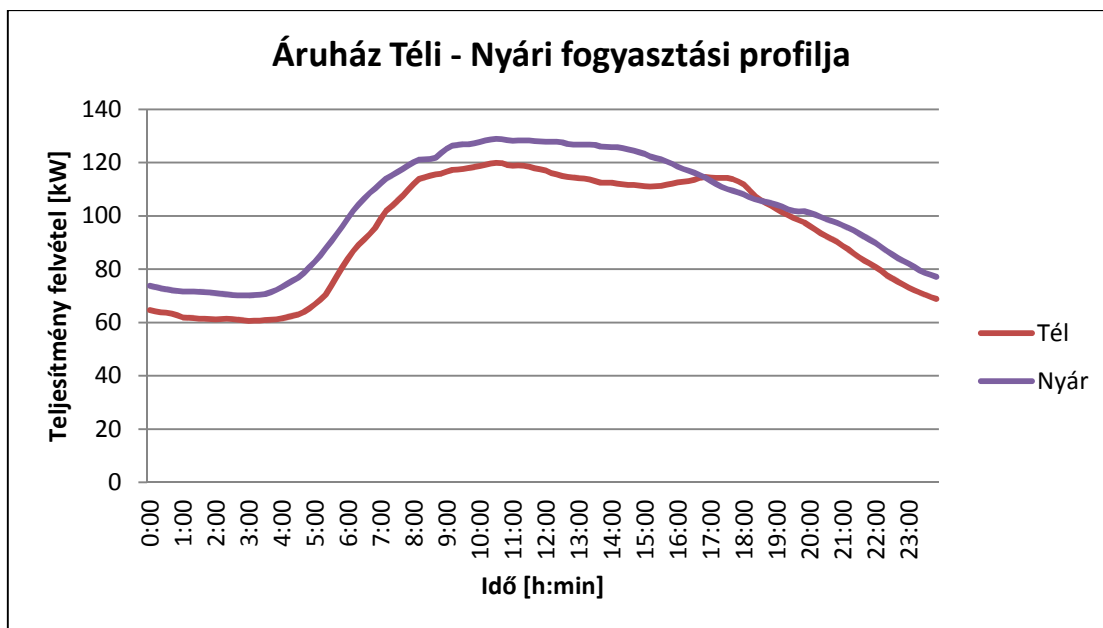
szabványban sok helyen a 10 perces átlagképzés jelenti az előírt értékeknek az ellenőrzési alapját.

A módosításaim célja az, hogy alkalmassá tegyem a hálózatot a napelemek hálózatra kifejtett hatásainak vizsgálatához. A vizsgálatokon belül két esetet különböztetek meg a napelemek hálózati csatlakoztatásának elhelyezése szempontjából. Az első esetben decentralizáltan, a körzetben található családi házaknál helyezem el a napelemeket, a második esetben pedig koncentráltan, kizárólag az áruházra telepítve. A szimulációim során ezeken belül is további három eltérő esetet vizsgállok meg:

- Nyári nap, amely teljes egészében napos
- Nyári nap, amely rövid idejű és hosszú idejű felhőátvonulásokkal tarkított
- Téli nap, amely teljes egészében napos

Ezek összehasonlíthatóvá teszik az elrendezéseket a szimulálni kívánt hálózati hatások alapján, amikről a következő fejezetben lesz szó.

Figyelnem kell még a különböző évszakokban jelentkező különböző fogyasztási profilokra. A háztartási fogyasztóknál a fogyasztást úgy képezem le, hogy nincs különbség a nyári és téli fogyasztói profilok között. Ez azzal indokolható, hogy a légkondicionálók elterjedésével a nyári és a téli fogyasztás nagysága és milyensége közel azonos. Viszont a koncentrált fogyasztóként megjelenő áruháznál már láthatónak kell lennie a különbségnek a téli és nyári fogyasztás között, hiszen nyáron a légkondicionáló berendezéseknek, és egyéb hűtőberendezéseknek nagyobb mennyiségű energia kell, mint télen önmagában a fűtésnek. Ez a különbség az 5. ábrán követhető az áruház esetében, amin jól látható a téli és nyári fogyasztás közötti különbségen kívül a téli kettős fogyasztási csúcs is.



5. ábra: Az áruház téli és nyári fogyasztásának összehasonlítása.

4.2.2. A napelemek leképezése:

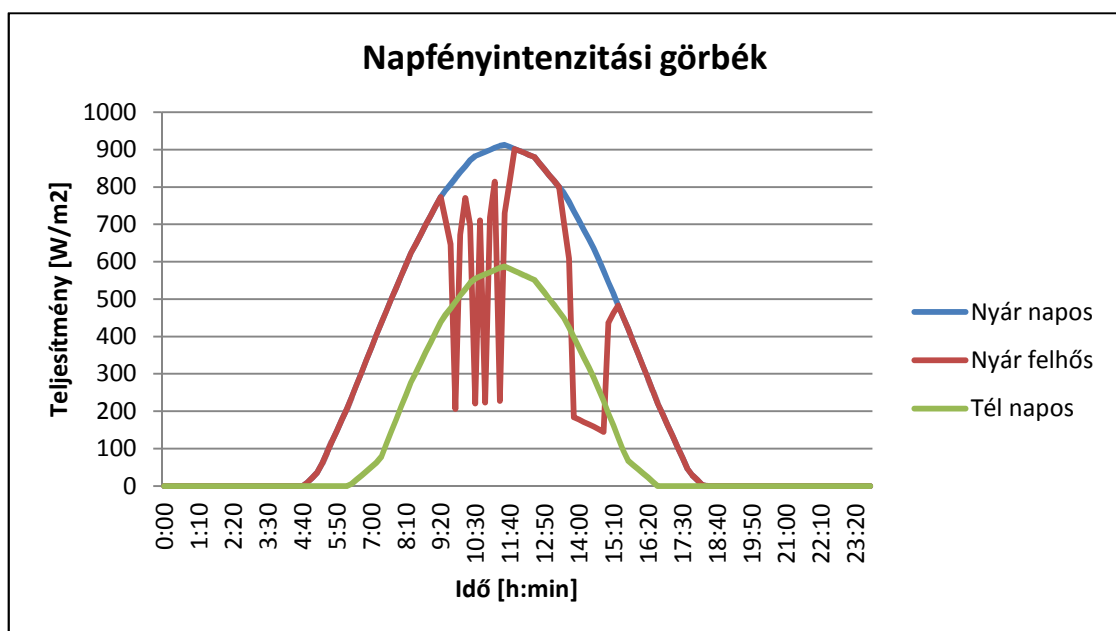
A napelemek által termelt energia kiszámításánál sok kritériumot veszek figyelembe, példának okáért a hőmérsékletfüggéssel is foglalkozom. Többladmunkát jelent még, hogy a napelem termelését a nyári napos, a téli napos és a nyári felhős esetekben is elő kell állítanom.

A szimulációim során a legnagyobb hatások vizsgálatának érdekében a legrosszabb esetet kell vizsgálnom a napelem termelésének hálózati hatása szempontjából. Ezért esett a választásom a nyári napos és a nyári felhős esetek szimulálására. A téli napos nap ellenpróbaként fog szerepelni, mint a napsütéses esetben a legkisebb energiatermelést ösztönző napfényintenzitás. Ahhoz, hogy előállíthassuk a napelemek ezen energiatermelési profiljait, ismernünk kell az energiatermelését meghatározó összetevőit. Szorítkozzunk a három fő komponensre, amiből kiderül, hogy az energiatermelés függ a felületet érő intenzitástól, a modul hőmérsékletétől és a rendszer veszteségeitől.

A napelem felületét érő intenzitás meghatározásából indulok ki. Ehhez készítettem a BSc tanulmányaimhoz köthető szakmai gyakorlatom során egy olyan programot, ami viszonylag jó közelítéssel kiszámítja, hogy mekkora napfényintenzitás éri a megadott dőlésszögű, 1 m² felületű napelemet. Ez a program főként akkor működik megfelelően, ha az egész nap során napsütés van. Persze az időjárási viszonyokkal is tud kalkulálni,

azonban akkor további átalakításokat kell végezni a végeredményein, hogy a diffúz fénnel is megfelelően kalkuláljon. A téli (január 17.) és a nyári (július 17.) napsütéses esetekben ezekből következően könnyedén elő tudom állítani a görbéim.

A felhőátvonulás jelenségének csökkentett napfényintenzitásához hosszas gondolkodás után arra jutottam, hogy a [17] forrás szerint fogok eljárni. Eszerint felhős idő esetén az elérhető intenzitás a maximálisan elérhető intenzitás 10% és 40%-a között változhat. Ebből önkényesen a 25%-ra való csökkentést választottam ki. Így képeztem az alábbi ábra „Nyár napos” névvel ellátott görbéjét. A 6. ábrán a többi napfényintenzitású görbe is megtalálható, amik az adott dőlésszögű 1 m² felületre vonatkoznak.



6. ábra: Napfényintenzitás görbék a vizsgálandó évszakokra és időjárási jelenségekre.

A programom az időjárás figyelembevételével meg tudja határozni a magyarországi ideális napelem dőlésszögét, amit 35°-nak adott. Ez megegyezik a gyakorlatban használttal, így kijelenthető, hogy a szimulációknak megfelelő alapot ad az Excel programom, melynek működőképességét korábbi munkáimban részletesen is bemutattam. [12]

Ez után foglalkozom azzal, hogy milyen módon befolyásolja a cella hőmérséklete a napelem energiatermelését. A 2. fejezetben láttuk, hogy a napelemet alkotó félvezető szilícium cellák fényre adott reakciója függ a cella hőmérsékletétől. Ezt be is láttam a különböző hőmérsékleteken számított P-U diagramokból. De ahhoz, hogy ez milyen mértékű egy modul esetében, további számításokat kell végeznem.

A hőmérséklet hatásának vizsgálatához először ki kell számítanom a cella hőmérsékletét, amire az alábbi (4.1) képletet szokták alkalmazni:

$$T_{cell} = T_{ambient} + \frac{S}{800} * (T_{NOCT} - 20), \quad (4.1)$$

ahol T_{cell} a cella hőmérséklete, $T_{ambient}$ a környezeti hőmérséklet, S a felületet érő napfényintenzitás és T_{NOCT} a cella névleges működési hőmérséklete.

Ennek a kiszámításához hiányoznak még a környezeti hőmérséklet adatok. Mivel egy számítógépes szimulációról van szó, itt is csak képzett értéket és nem valós értéket tudok használni a környezeti hőmérséklet számításához. Szerencsére azonban jó közelítéssel elő tudom állítani az OMSZ által szolgáltatott, Szegeden mért, 100 éves átlagokból [18]. Ezekből le tudom képezni a lehető legvalószínűbb hőmérsékletet bármely vizsgált napra.

A cella hőmérsékletének kiszámítása után kiszámíthatom a hőmérséklet faktort is magába foglaló napelem teljesítményt. Ennek a számításnak az alapját a (4.2) képlet adja:

$$P_{DC} = P_{STC} * \frac{S}{S_{STC}} * [1 + (T_{cell} - T_{STC}) * C_T], \quad (4.2)$$

ahol P_{DC} a keresett DC teljesítmény, P_{STC} a napelem maximálisan kiadható teljesítménye standard tesztkörülmények között (STC: standard test conditions), S_{STC} a felületet érő napfényintenzitás normál tesztkörülmények között (1000 W/m^2), T_{STC} a normál tesztkörülményekbeli hőmérséklet (25°C) és C_T a napelem gyártó által megadott teljesítmény hőmérsékleti együtthatója.

Ezen számítás elvégzéséhez már elengedhetetlen a későbbiekben felhasznált napelem meghatározása. Választásom, a hosszú múltra visszatekintő, és Európában elterjedten használt Sharp napelem márkára esett. Ezen belül a 235 Wp-es monokristályos NU-Q235F4 típusú napelemre. Ennek az adatlapja megtalálható a források között [21]. A napelem számításához szükséges adatai:

- o $P_{STC} = 235 \text{ Wp}$
- o $T_{NOCT} = 47,5^\circ\text{C}$
- o $C_T = -0.485\%/^\circ\text{C}$

Ebből megkaptam Excel program használatának segítségével a napelem által termelt energiát 10 perces bontásban.

Mivel a szimulációknál a betáplálási pontra kell megadnom a napelemek által termelt energiát, így harmadik befolyásoló tényezőként a rendszer veszteségeivel is számolnom kell. Ilyen veszteségekből sokat felsorol a [19] forrás. Eszerint napelemes rendszer esetében számolnunk kell:

- a teljesítmény toleranciából következő teljesítményváltozással, ami a kiválasztott napelem típusnál (+ 10%/ -5%), azaz a legrosszabb esetben 5% teljesítmény csökkenést okoz
- a napelem felületének tisztaságával, úgy, mint a felületén felgyülemmlő por és homok, hiszen ezek csökkentik a cellákra érkező napfényintenzitást, így csökkentik a kinyerhető teljesítményt, ez a forrás szerint 7%-os teljesítménycsökkenést is eredményezhet átlagosan
- a napelem rendszer DC és AC vezetékeinek veszteségével, ami csökkenti a kinyerhető energiát, méghozzá akár 8%-os csökkenést is okozva
- az inverter konverziós veszteségével és az MPPT tökéletlenségéből fakadó veszteséggel, amelyek együttesen 92-95% között lehetnek, jelen esetben a legrosszabb esetet véve, 8% teljesítménycsökkenéssel kalkulálhatok.

A legrosszabb esetben a kinyerhető energia az eredetileg kiszámított 75%-a lehet. Ez azonban ijesztően kicsi értéket ad, aminek megkérdőjelezhető több pontja is. Mivel szeretném, hogy a dolgozatomban a napelemek termelése minden lehetséges befolyásoló tényezőt tartalmazzon, úgy veszem, hogy ezek a hatások csökkentik a kinyerhető energiát, még ha a valóságban lehetséges, hogy sokkal kisebb mértékben. Ezen felül az áruházhhoz telepített koncentrált rendszerben és az elosztottan házakhoz telepített rendszerben különbözőeknek választom ezeket az értékeket. Most mélyebben nem vizsgálva, csak közelítőleg és logikailag helyesen, a veszteségekkel az 1. táblázat szerint kalkulálok.

1. táblázat: A napelemes rendszer veszteségei.

	Teljesítmény tolerancia	Felület tisztaság	Vezeték veszteség	Inverter hatásfok	Összesen
Centralizált PV	+1%	-2%	-8%	-5%	-14%
Decentralizált PV	-1%	-4%	-4%	-7%	-16%

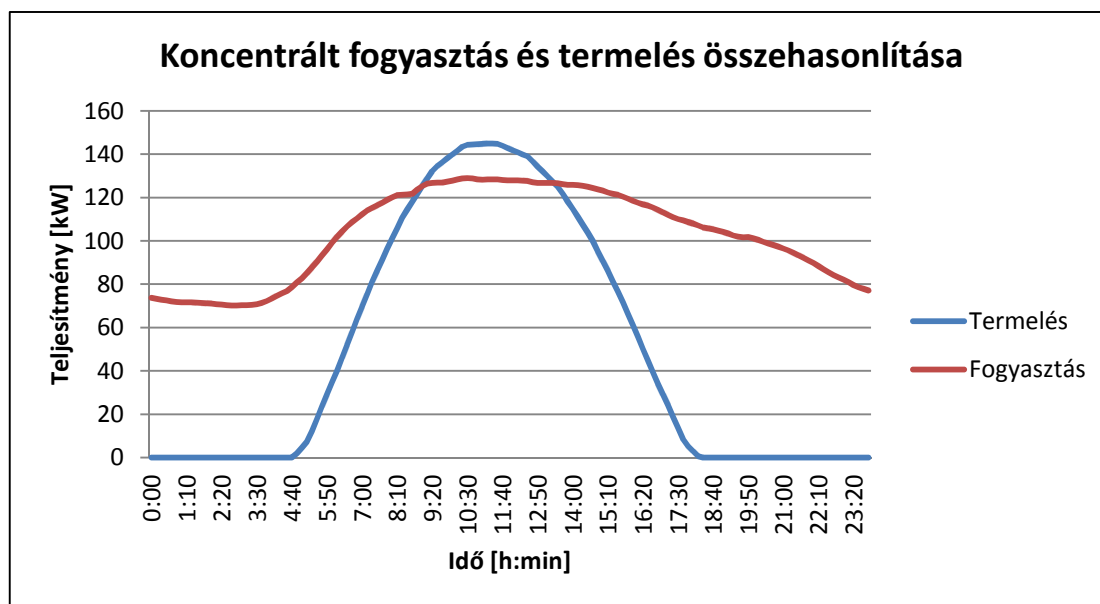
A két veszteség közötti 2% különbség nem tűnik soknak, azonban egy, az elosztóhálózatban nagyobb részarányú napelem rendszernél sokat jelent, ahogy azt később be is látjuk. Ezért fontosnak tartom, hogy ekképpen számítsak velük. A tél és a nyár között és a napelemes rendszer terheltségéből fakadó hatások között most nem teszek különbséget.

A napelemek meddőtermelését zérusra fogom a szimulációk során állítani, ezzel jelezve, hogy a feszültségszabályozásban, meddőkompenzálásban nem vesznek részt.

A szimuláció megkezdése előtt még hátra van, hogy kiszámoljam a centralizált és a decentralizált napelemes rendszerek nagyságait. Próbálom a szimulációt úgy megtervezni, hogy tartom magam a valósághűséghez és a szimulációk korrektségéhez, azaz hogy véletlenül se legyen az egyik elrendezés előnyben részesítve. Ezért úgy járok el, hogy első lépésben megtervezem a koncentrált fogyasztóra a napelem parkom a 3.1.3. pontban definiált méretezési szempont alapján. Ezután a decentralizált esetben ugyanazon mennyiségű napelemet fogom szétosztani a háztartások között, a gyakorlatban használt méretek alapján.

A koncentrált napelem park méretezésénél egyszerűen csak használom a hálózati veszteségnél alkalmazott definíciót, amiből most a 75%-os értéket választottam ki alapul. Így adódott, hogy 940 darabból álló, összesen 220,9 kWp nagyságú napelemes rendszert kell az áruház tetejére illesztenem, ahhoz, hogy a kitűzött célt elérjem. Ennek a rendszer összterületigénye legrosszabb esetben is 3000 m², ami egy áruház tetőméretéhez képest elfogadhatónak mondható. Így akár az áruház tetejére is elhelyezhető a rendszer, aminek köszönhetően nem foglal el plusz, egyéb célokra is hasznosítható szabad területeket. Azért, hogy érzékelhető legyen a termelés és a fogyasztás kapcsolata, kirajzoltatom a 7. ábrán az áruház fogyasztási görbáját a hozzá

csatlakozó napelemes rendszer termelési görbéjével. Nyomon követhető az ábrán, hogy arányaiban nem lépi jelentősen túl a termelési csúcs a fogyasztási csúcsot, ahogy azt terveztem.



7. ábra: Az áruház fogyasztásának és a centralizált napelemes rendszer termelésének összehasonlítása.

A családi házak esetében a napelemek méretezésénél bevett szokás, hogy megnézik mennyi az éves fogyasztása a háznak és ezt összevetik az 1200 kWh/év/kWp értékkel, amiből kiadódik, hogy mennyi napelem kell az adott épületre, ha az egész fogyasztását le akarjuk fedni a napelem termelt energiájával. A dolgozatomnak alapot adó adatok között megtalálható a fogyasztók éves fogyasztása, ami néhány kiugró értéktől eltekintve átlagban 4373 kWh/év értéknek adódik. Ebből következően, ha a gyakorlatban bevett szokás szerint akarok eljárni, és az egész fogyasztását le akarom fedni a háznak, akkor egy házhoz kb. 3,6 kWp-es rendszert illeszték. Azonban azt figyelembe kell vennem, hogy nem szoktak a gyakorlatban ekkora rendszereket építeni, csak 2 és 3 kWp közötti méreteket. Ezért én az arany középútként 2,585 kWp nagyságú, kommunális fogyasztókra illesztendő rendszerméretet választom, ami 11 darab napelemből áll. Ez a mennyiségű napelem maximum 20 m² területigényű, ami egy átlagos családi ház tetőméretéhez képest elfogadható. Idealizáltan úgy gondolkodom, hogy minden háznak ez a 20 m²-es tetőterülete kihasználható és a valódi délnek néz.

Ezután meg kell néznem, hány darab házhoz kell csatlakoztatnom a napelemeimet, hogy a decentralizált esetben is ugyanannyi napelemet illesszem a hálózatba, mint centralizált

esetben. A számításaim szerint ehhez 85 darab házra van szükségem, amikre 11 darabból álló egységenként 235 Wp-es napelemeket teszem. Mivel összesen 128 darab ház van a körzetben, ebből következően a házak 66%-ra kerül napelem. Az ilyen mértékű részaránya a napelemeknek a valóságban nem egy gyakori jelenség, azonban a modellhez elfogadható, hisz a számítások összehasonlíthatóságához szükséges. Nem beszélve arról, hogy nem csak a jelenben gondolkodom, hanem a jövőbeni megvalósítási lehetőségekben is.

Fontos megjegyezni, hogy a számításaim egyszerűsítése végett a felhős esetekben úgy vizsgáltam, hogy mindegyik napelemet ugyanazon felhős adatokkal programozom fel, miközben a felhők nem egyszerre érik el az összes napelemet. Ez a jelenség egy felhőátvonulás esetén nagyobb területű rendszerben, mint ami most lehetne akár mindkettő vizsgált elrendezésem, nem egyszerre rontja le a teljesítményt. De, hogy vizsgálható legyen a felhőátvonulás, ezzel a közelítéssel kellett élnem. A későbbiekben akár egy ilyen pontosítást is végezhetek a vizsgálataimnál.

4.3. Szimulációk elkészítése

Mindezen előzmények, finomítások és módosítások szükségesek ahhoz, hogy képes legyek kvázistacioner load-flow szimulációkkal analizálni a napelemeknek a vizsgálni kívánt kiefeszültségű elosztóhálózatra kifejtett hatásait. Az elemezhető hatások számát a szimulálási módszer nagyban korlátozza, ezért csak az alábbi vizsgálatokat fogom elvégezni:

- a kiefeszültségű elosztóhálózat csomópontjainak feszültsége,
- a kiefeszültségű elosztóhálózat hálózati veszteségének változása,
- a kiefeszültségű elosztóhálózat energiaáramlásainak iránya.

Érdemes a dolgozatomban átláthatóságának növelése érdekében összefoglalnom azt, hogy miként fogom a szimulációkat végezni. A vizsgálatokat három különböző elosztóhálózati kialakításban hajtom végre, amik a PowerFactory programban is különböző projekteket alkotnak:

- Alap eset: a kiefeszültségű elosztóhálózat napelemek nélkül,

- Centralizált eset: a centralizáltan elhelyezett napelemek tartalmazó hálózat, amiben a 940 darabos napelem rendszer az áruház hálózati csatlakozási pontjához, azaz az egyvonalas séma 176-os csomópontjához, van kötve,
- Decentralizált eset: a decentralizáltan elhelyezett napelemeket tartalmazó hálózat, amiben a kommunális fogyasztók 66%-hoz kötöm a 11 darabos napelem rendszereket.

Ezeknek az elrendezéseknek a PowerFactory programban képzett egyvonalas sémája megtalálható a mellékletek között.

Ezen felül minden esetben elvégzem a különböző időjárás hatásainak elemzését is, így sor fog kerülni a nyári napsütéses, téli napütéses és nyári felhős szimulációkra, attól függően, hogy milyen hálózati hatásokat vizsgállok. Ebből kifolyólag számos szimulációra lesz szükségem.

Ezen szimulációk nem lennének elvégezhetőek, ha nem állna rendelkezésemre a DIgSILENT Programozási Nyelve (DIgSILENT Programming Language (DPL)). Ezzel képes vagyok automatizálva, a fogyasztási és termelési adatokat programozottan változtatva folyamatosan futtatni a load-flow számításokat, miközben kinyerem a számomra releváns információkat. A dolgozat hossza nem teszi lehetővé, hogy tárgyaljam ezeket a programkódokat, ezért nézzük egyből az eredményeket.

5. A szimulációk eredményeinek kiértékelése

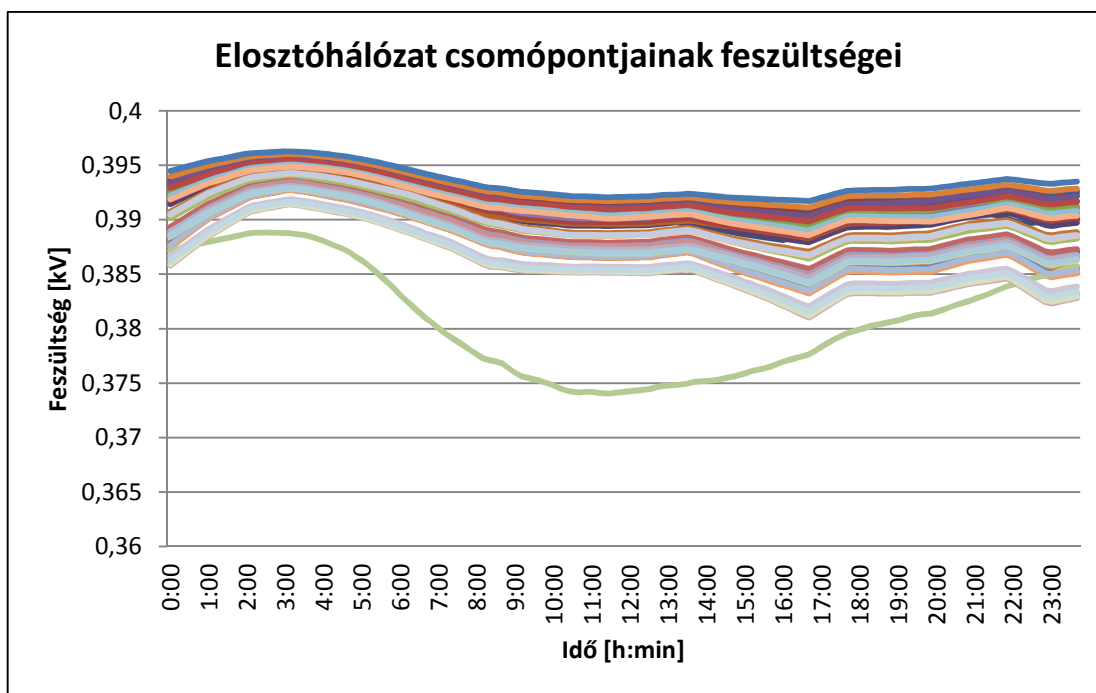
A szimulációk kiértékelése során egyesével megvizsgálom a különböző napelem elosztottságok hálózati hatásait a szimulációs eredményeik alapján. A fejezet végére célom, hogy a vizsgálatok eredményeiből következtetést tudjak levonni a megfelelő napelem elhelyezés mikéntjére. Mivel alaposan tárgyaltam már minden alapját ennek a fejezetnek, ebben a fejezetben már csak az eredmények kiértékelése a feladatom.

5.1. Az elosztóhálózat csomópontjainak feszültségváltozása

A két különböző feszültségváltoztató képességet külön tárgyalom, kezdve a napelemek hosszú idejű feszültségváltoztatásával.

5.1.2. Hosszú idejű feszültségváltoztató képesség:

Elsőként nézzük meg, hogy miként is változik a nyári időszakban a napelemeket nem tartalmazó hálózaton a csomópontok feszültsége egy ábrán belül kirajzoltatva.

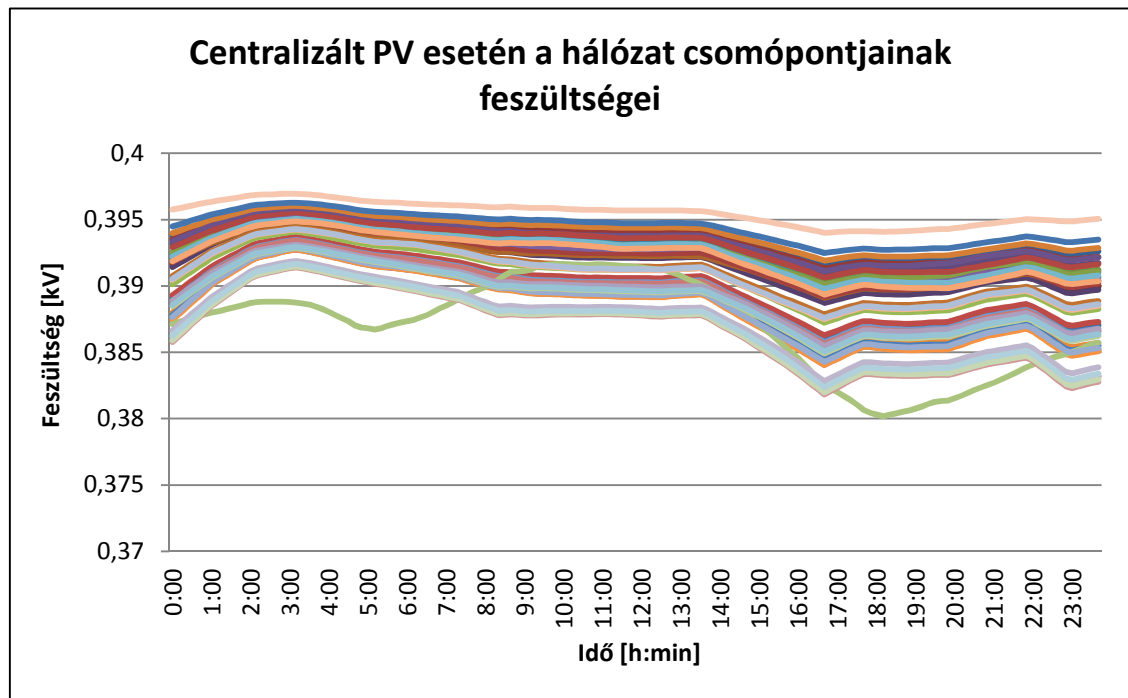


8. ábra: A napelemeket nem tartalmazó elosztóhálózat csomópontjainak feszültségprofiljai nyári adatokkal.

A 8. ábrán észrevehető, hogy kellően sok csomóponton (48) történt a feszültség vizsgálata. Az ábrából kivehető, hogy az elosztóhálózat egy jól megtervezett hálózat,

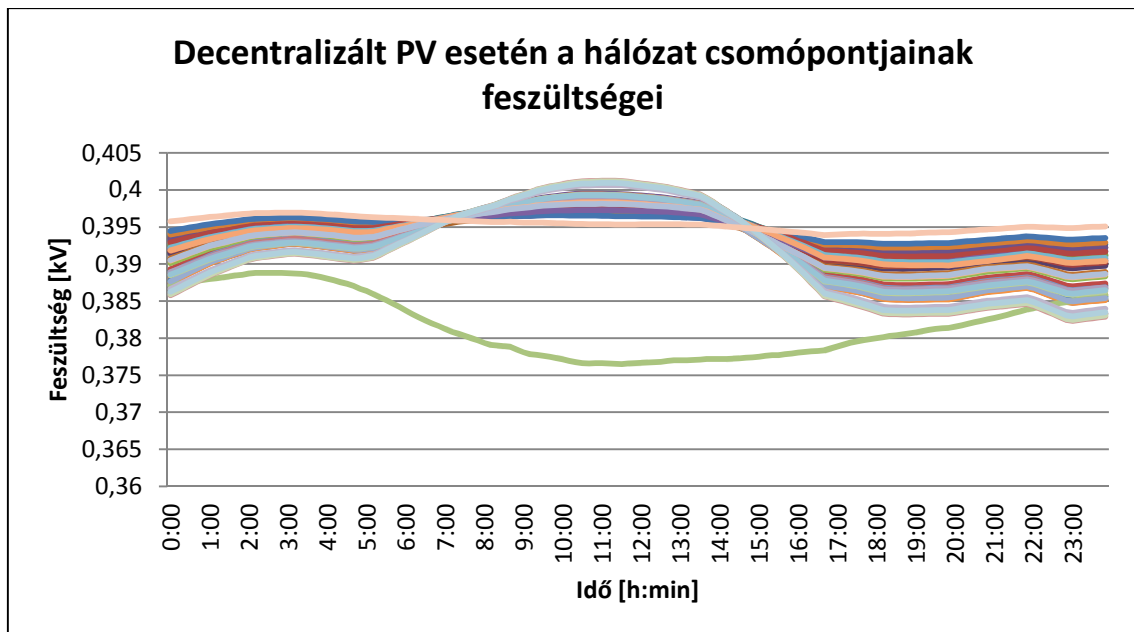
hisz minden pontján teljesül, hogy a feszültség értéke a névleges értékének 10%-nál nagyobb mértékben nem tér el. A legnagyobb eltérés a 176-os csomópontban van, ami maximálisan is csak 6,5%-os, ennek oka pedig az erre a csomópontra csatlakozó az áruház.

A rendszer működőképességének megállapítása után érdemes megnézni ugyanezen ábrákat a decentralizált és a centralizált esetekben a nyári napsütéses nap folyamán.



9. ábra: A centralizáltan elhelyezett napelemes rendszert tartalmazó hálózat csomópontjainak feszültségprofiljai nyári adatokkal.

A 9. ábrán a centralizált eset van kirajzoltatva, amin leginkább észrevehető, hogy eltűnt az áruháznak a jellegzetes feszültségprofilja. Ez könnyen értelmezhető, hiszen a csomóponthoz illesztett napelemes rendszer várt tulajdonsága volt, hogy a csatlakozási pontján növeli a feszültséget. Mivel egy közepes napelem rendszerről van szó, ezért ez jelentősen tudja a nagyobb fogyasztási értékekkel szemben is növelni a csomópont feszültségét. Kevésbé szembetűnő, de észrevehető tulajdonsága még, hogy a kommunális fogyasztók csatlakozási pontjának feszültségét is növelte. De mielőtt ennek okait részletezném egy másik ábrán, tekintsünk rá a decentralizált energiatermelésből fakadó feszültségprofilokra.

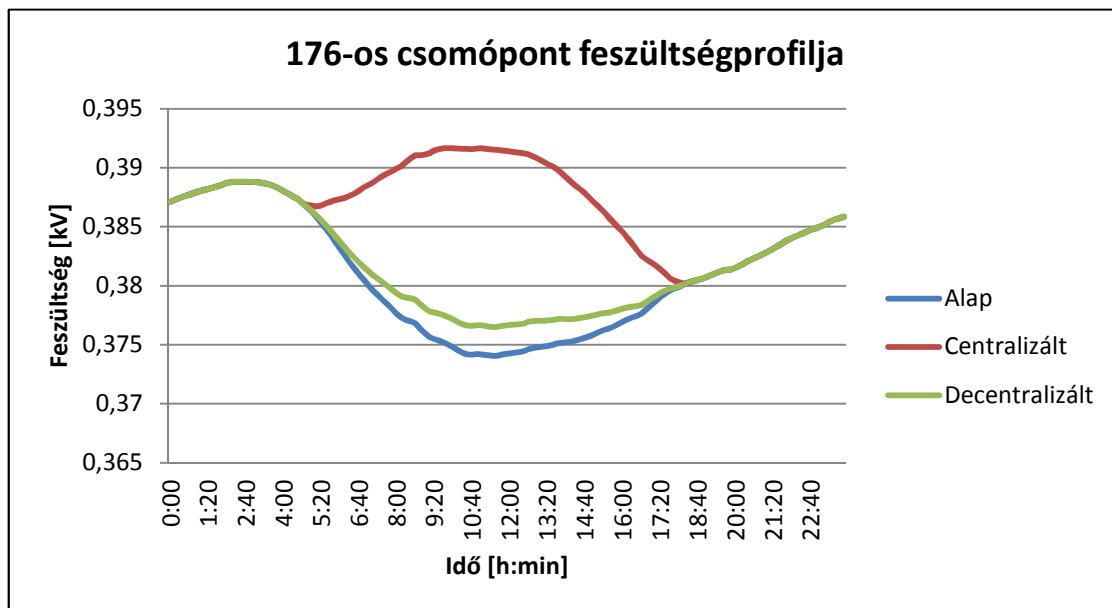


10. ábra: A centralizáltan elhelyezett napelemes rendszert tartalmazó hálózat csomópontjainak feszültségprofiljai nyári adatokkal.

A 10. ábrán szemmel látható különbségeket fedezhetünk fel a centralizált elrendezés és a decentralizált elrendezés között. Első jelentős különbség, hogy a sok kicsi decentralizáltan elhelyezett napelem a becsatlakozási pontjainak a feszültségét jobban eltolta a névleges vonali feszültség irányába, egyes esetekben még a csomópont névleges feszültségénél is magasabb értékeket létrehozva. Ez azzal magyarázható, hogy a decentralizált napelemes rendszerek termelt energiája jelentősen meghaladja a vele közös csomópontba csatlakozó ház által fogyasztott energiát. Ez egy valósághű esetet szimbolizál, hisz valósághűen méreteztem őket, ami azonban egy túlméretezett napelemes rendszert ad a kommunális fogyasztókra nézve. Ebből fakadóan lett nagy a feszültségváltozás. Ez viszont akár kis mértékű előnyként jelentkezhet a feszültségváltoztató képesség tekintetében. A decentralizált eset az áruház csatlakozási pontján mérhető feszültségesésen csak minimális mértékben tudott javítani.

Ezek után megnézem alaposabban három kiválasztott csomópontban a feszültségváltoztató képességét a különböző eseteknek, hogy azok jobban összehasonlíthatóvá váljanak. A három különböző csomópont vizsgálatából az egyik csomópont az áruház csomópontja lesz (176). A második vizsgált csomópont a centralizált fogyasztóhoz villamosan közel eső csomóponté, amit most a kisfeszültségű sín csomópontjának választottam és a harmadik csomópontként a centralizált fogyasztótól villamosan távol eső csomópontot elemzem (97). Ezek a csomópontok

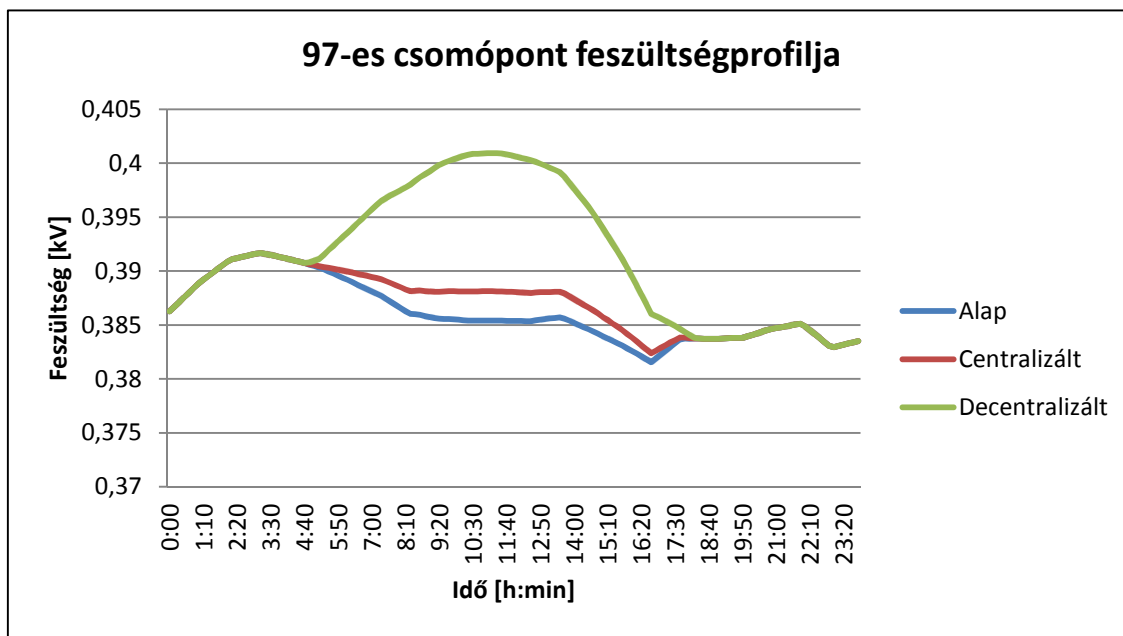
mellékletek között található egyvonalas sémákat tartalmazó ábrákban jelölve vannak. Az áruházzal csomópontjával kezdem a vizsgálatot az alábbi ábrával.



11. ábra: A 176-os csomópont feszültségprofilja a különböző napelem elrendezések esetében nyári adatokkal.

A 11. ábra egyik különlegessége, hogy attól függetlenül, hogy közvetlenül nem csatlakozik napelem az áruházzal a decentralizált esetben, még közvetetten érzékelhető a kisebb napelemek feszültségnövelő képessége. De természetesen elenyésző a hatásuk a közvetlenül rá csatlakozó és rá méretezett centralizált napelem parkkal szemben. Fontos tanulsága még az ábrának, hogy a napelem termelési görbéje és a koncentrált fogyasztó fogyasztási profilja nagyon hasonlít egymásra, ahogy azt a 7. ábrán is láthattuk. Ebből következően a legnagyobb fogyasztás idején van a napelemnek a legnagyobb termelése, így valóban képesek vagyunk passzív szabályozásként alkalmazni a centralizált napelemes rendszert, hiszen csökkentjük vele a maximális feszültségesés értékét. Ezt számokkal is kifejezve, a napelemek nélkül a feszültség minimuma a csomóponton 374 V, a decentralizáltan elhelyezett napelemes esetben 376,5 V, ami dél környékén jelentkezik és a centralizáltan elhelyezett esetben 380 V, ami 18 óra környékén van. A feszültségszabályozás tárgyalásánál nem említettem külön, de előfordulhat, hogy egyes ipari fogyasztók, így az áruház is saját feszültségszabályozó eszközökkel rendelkeznek. Ilyen szabályozó lehet például a szabályozható söntkondenzátor, vagy az úgynevezett DVR (Dynamic Voltage Restorer), amely valamilyen energiaforrás segítségével indukálja a hálózatba a soros feszültségszabályozáshoz szükséges energiát. [11] Ezeknek a kalibrálásánál a 11.

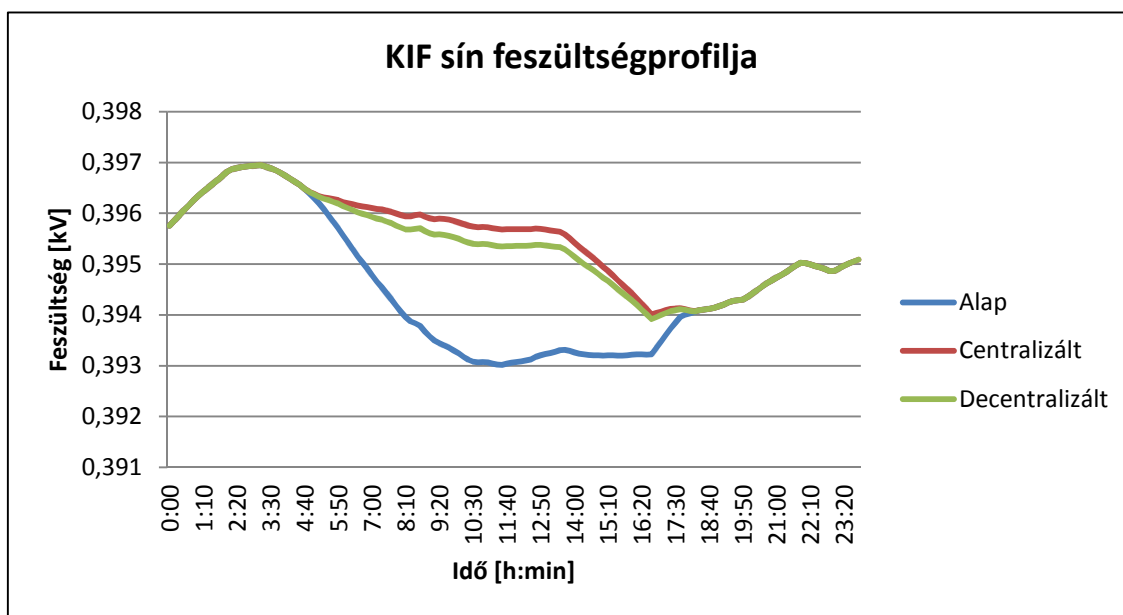
ábrából következően számolni kell a napelemek hatásával. Bár kijelenthető a fenti ábra alapján, hogy a napelem tehermentesíti bizonyos mértékben a feszültségszabályozókat, hisz az eredeti feszültségminimum és –maximum közötti 14,8 V feszültségváltozásból egy 11,5 V feszültségváltozást hoz létre, így ebből a szempontból is előnyösnek bizonyul.



12. ábra: A 97-es csomópont feszültségprofilja a különböző napelem elrendezések esetében nyári adatokkal.

A 12. ábrán az áruháztól távoli (97) csomópont feszültségváltozása követhető. Szembetűnik az ábrán, hogy a centralizált megoldás is javít a kommunális fogyasztóknál jelentkező feszültségesésen, de csak kis mértékben, míg a decentralizált, közvetlenül a csomópontba kötött napelemes rendszer esetében még a névleges feszültséget is túllépő feszültség nagyságot okoz a csomóponton. Az előző ábrával ellentétben itt az látható, hogy a napelem termelési görbéje és a kommunális fogyasztók fogyasztási szokásai eltérően alakulnak, így a legnagyobb feszültségesés időpontjában csak kis mértékben tud a napelem javítani, hisz akkor már alig termel. Ez számokkal kifejezve azt jelenti, hogy alap esetben a legkisebb feszültség a csomóponton 381,5 V, centralizált esetben 382,3 V és decentralizált esetben 382,9 V. Ebből fakadóan nem nevezhető jobb megoldásnak a feszültségesés javítása szempontjából a decentralizált eset, még a kommunális fogyasztókra nézve sem. Sőt emellett az is látható, hogy nagyon nagy, az eredetinel jelentősebb feszültségváltozást tesz a csomópontba az egész napra levetítve a decentralizált megoldás. Ez a nagy lengés a feszültség értékek

szempontjából rosszabb, mintha hagytuk volna a rendszert önmagában működni. De ez a hatás nem lehet jelentős szempont, hisz a decentralizált napelemeknek a feszültségszabályozásra kifejtett hatásáról csak a kiefeszültségű sín feszültségének változtatásánál lehet szó. Ettől függetlenül véleményem szerint a centralizált napelem kisebb hatása jobbnak mondható e szempontból, mert kisimítja a feszültségprofil változását.



13. ábra: A KIF sín feszültségprofilja a különböző napelem elrendezések esetében nyári adatokkal.

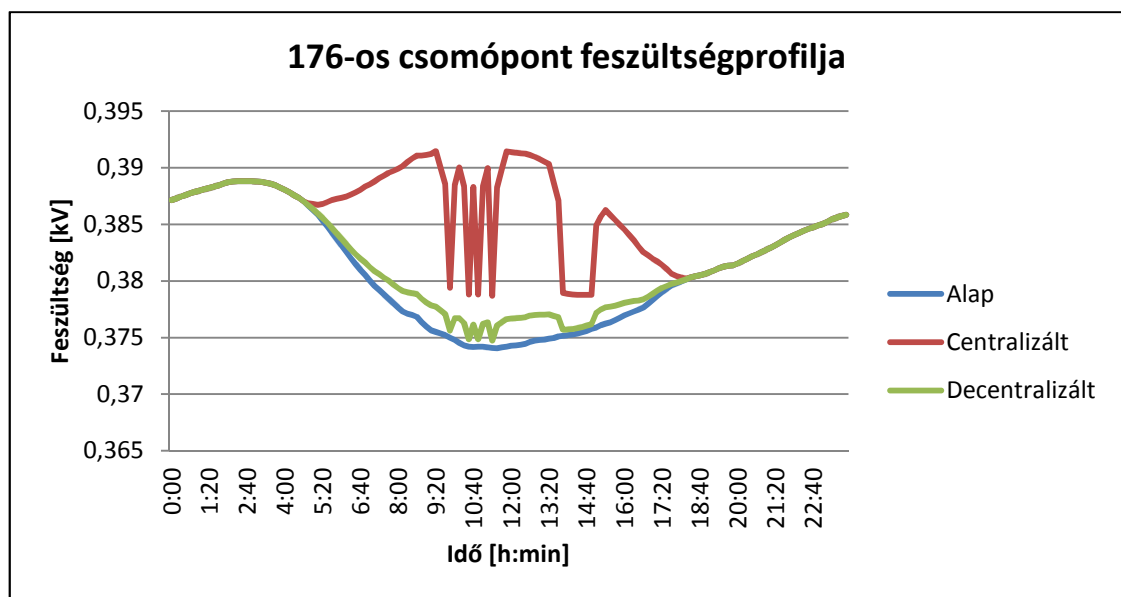
A 13. ábra alapján a kiefeszültségű sín feszültségének változása a centralizált és a decentralizált esetben nagyon hasonló és kiváló hatásúnak mondható, azonban több érdekesség is észrevehető az ábrán. Az első ilyen észrevétel, hogy attól függetlenül, hogy ugyanazt a napelem mennyiséget osztottam el a rendszerben mindkét esetben, a centralizált napelem rendszer feszültségcsökkentése kedvezőbb. Ez talán abból fakadhat, hogy ugyan a decentralizáltan és centralizáltan elhelyezett napelemek darabszámra megegyeznek, de a betáplálási ponton mért termelés tekintetében a centralizált többet termel, mert 2%-al több veszteséget terveztem bele a termelésükbe. Második észrevételként említem, hogy a centralizált napelem rendszer a kommunális fogyasztói csomópontok feszültségén úgy növel, hogy a kiefeszültségű sín feszültségét viszi feljebb. Ezáltal a feszültségesés után kapott feszültségük a csomópontoknak is magasabb feszültségszintre kerül, hisz a feszültségesés magasabb potenciálról indult. Az aktív feszültségszabályozás kiinduló pontja a villamosenergia-rendszer kiefeszültségű elosztóhálózatában a transzformátor kiefeszültségű sínje. Így a 13. ábra

tanulsága az, hogy a centralizált és decentralizált napelemes elhelyezés közel egyenlő mértékben tehermentesíti a feszültségszabályozókat, így mindkettő megfelelőnek mondható e tekintetben.

Az ábrák elemzése után elmondható, hogy az aktív feszültségszabályozás esetén a 13. ábránál beláttuk, hogy közel egyenlő a hatásuk. De mégis a centralizált elrendezés a vizsgált hálózati topológia esetén jobbnak bizonyul, hiszen a passzív feszültségszabályozás esetében azonban a centralizált a jobb, mert a kommunális és a koncentrált fogyasztó esetében is az egész napos feszültségváltozás nagyságán csökkentett. Ez a decentralizált napelem esetében nem mondható el.

5.1.3. Rövid idejű feszültségváltoztató képesség:

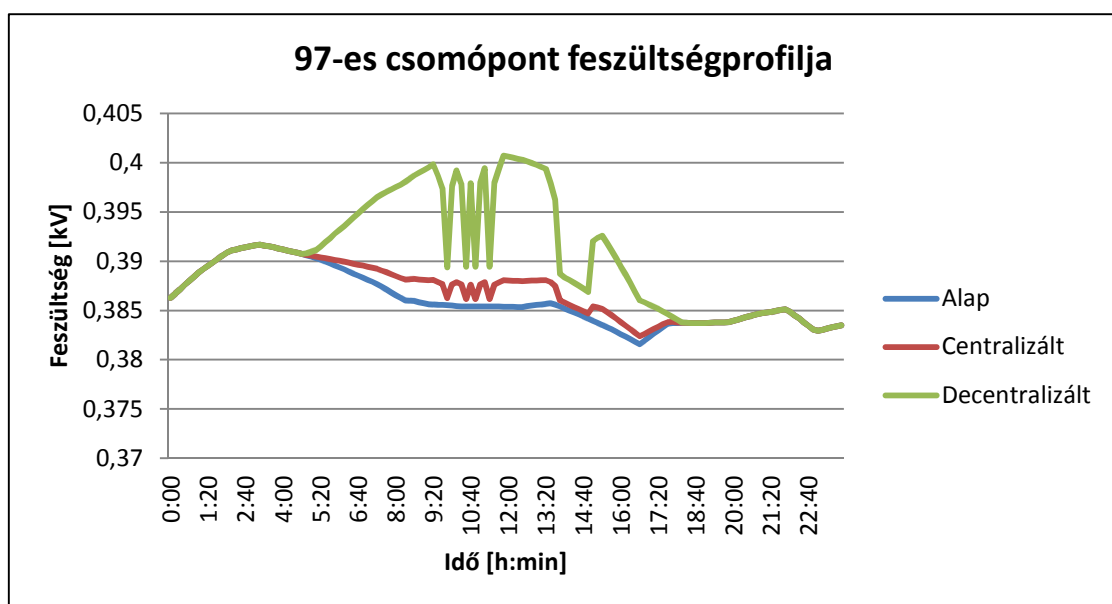
Ebben a pontban egyből az eltérő csomópontokra külön-külön ábrázoltatom a feszültségprofilokat, méghozzá az előző pontban is elemzett csomópontoknál maradva, így elsőként az áruház csomópontját nézem meg.



14. ábra: A 176-os csomópont feszültségprofilja a különböző napelem elrendezési esetekben nyári felhős adatokkal.

Egyből feltűnik a 14. ábrán, hogy milyen jelentős feszültségfluktuációkat okoz a napfényintenzitás fluktuációja, méghozzá a centralizált esetben jóval jelentősebbet, mint a decentralizált esetben. Ha az előző pontban ismertetett feszültségszabályozással rendelkezik az áruház, akkor nagyon fontos odafigyelni a szabályozás megfelelő beállítására, hogy a 10 V amplitúdójú feszültségtűskék ne okozzanak állandó

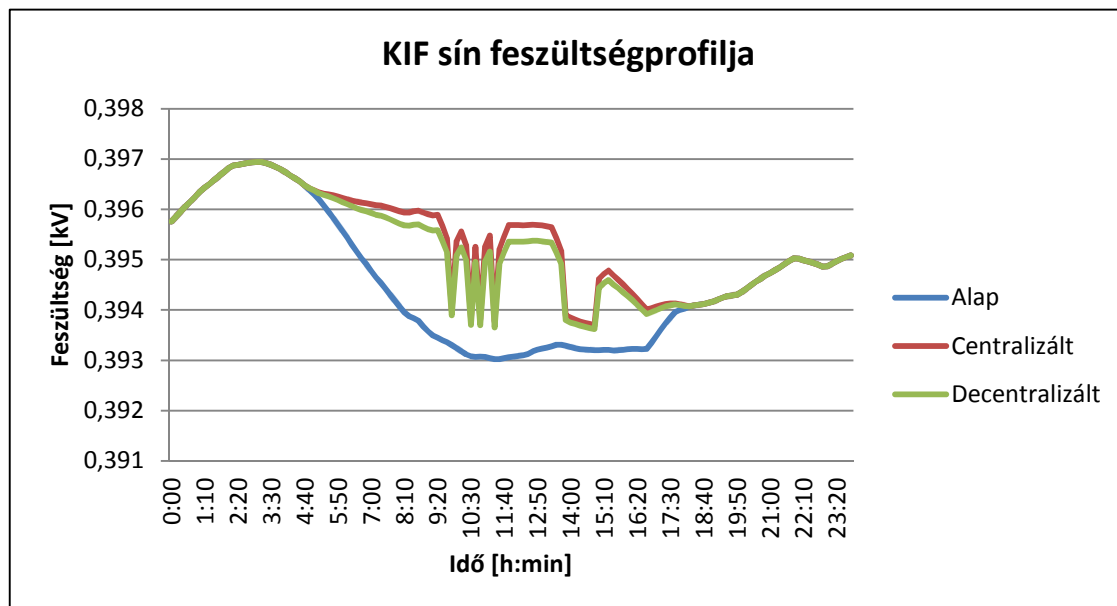
feszültségszabályozó működést. Érdemes megemlíteni, hogy meddőteljesítmény fluktuáció is felléphet, hisz belátható, hogy a közepes napelem rendszer feszültségfluktuációja, ha söntkondenzátorral van feszültségszabályozva, akkor meddőteljesítmény fluktuációt okozhat a fenti kép alapján. Bár megjegyzendő, hogy ilyen kis méretekben nem szokás külön feszültségszabályozással ellátni a fogyasztót, így a fenti két hatás nem igazán jelenik meg, de a példa kedvéért meg kellett említenem. Azonban, ha a fenti két hatás nem is jelenik meg, a rövid ideig fennálló flicker jelensége minden bizonnyal meg fog, hiszen a napelem gyors teljesítménycsökkenése flickert is okozhat. Fontos itt beszélni arról még, hogy az MSZ EN 50160 szabvány alapján a gyors feszültségváltozás nem haladhatja meg az 5%-os értéket, rövid időre viszont elérheti, az $U_n \pm 10\%$ -át. Ez a szabály nem sérül, hisz csak 2,5%-os feszültségváltozás van a csomóponton. Összefoglalva elmondható, hogy a vizsgált szempontok alapján, ha a legrosszabb esetet vizsgáljuk az áruház csomópontján, akkor a decentralizált napelemek kisebb amplitúdójú feszültségváltoztató képessége jobbnak bizonyul.



15. ábra: A 97-es csomópont feszültségprofilja a különböző napelem elrendezések esetében nyári felhős adatokkal.

A 14. ábrához hasonló eredményre jutunk a 15. ábra elemzésekor, amikor megfordul a szituáció. Ennél az ábránál a csomópont a decentralizált napelemmel van közvetlen kapcsolatban, így a decentralizált napelem a nagyobb feszültségváltoztató képességű a csomóponton. Hasonlóan a 14. ábrához 10 V amplitúdójú, gyorsan kialakuló feszültségűtöskéket tapasztalhatunk. Kismértékű és rövid ideig tartó villogás kialakulhat a gyors feszültségcsökkenés és növekedés hatására. Összefoglalásképp ezen a

csomóponton a centralizált napelem elrendezés tűnik megfelelőbbnek, hisz kisebb hatással van a csomópont feszültségére.



16. ábra: A KIF sín feszültségprofilja a különböző napelem elrendezési esetekben nyári felhős adatokkal.

A kisfeszültségű sín vonali feszültségét vizsgálva a 16. ábrán arra juthatunk, hogy a két különböző elrendezés rövid idejű feszültségváltoztató hatása nagyjából megegyezik. Ebből fakadóan, a kisfeszültségű sínre nézve, szinte lényegtelen a rövid idejű feszültségváltozás feszültség szabályozására kifejtett hatása alapján, hogy a centralizált vagy a decentralizált esettel van dolgunk. Mindkettő nagyjából azonos mértékű fluktuációt okoz a kisfeszültségű sínen, amiből fakadóan figyelmet kell szentelni az aktív feszültség szabályozás megfelelő kalibrálására.

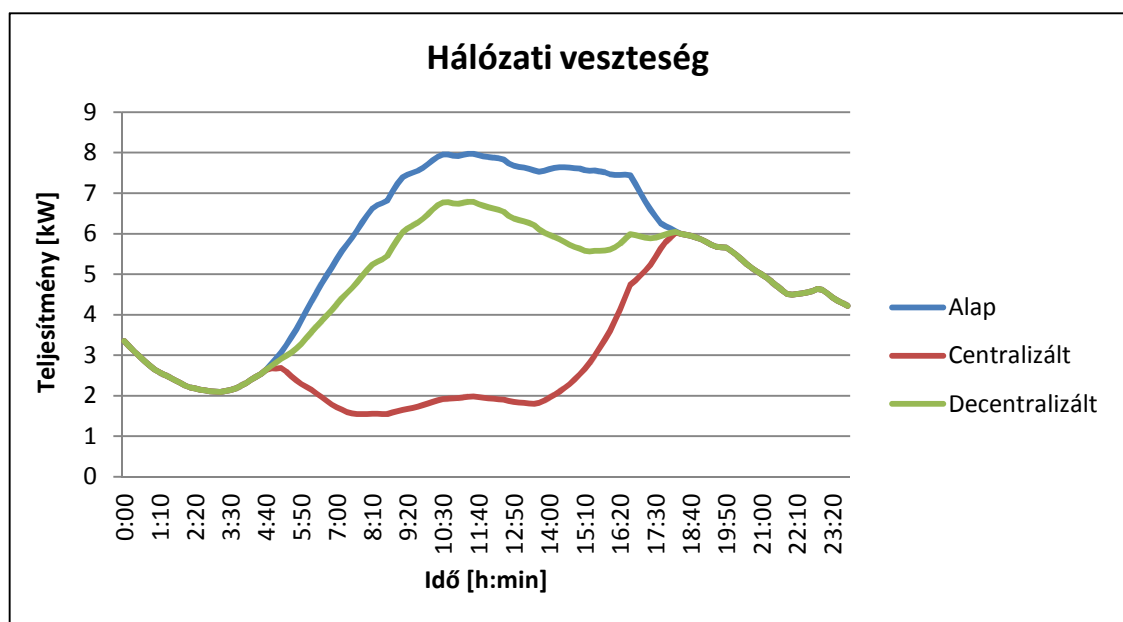
Összefoglalásként ehhez a ponthoz elmondható, hogy a rövid idejű feszültség fluktuáció hatása mindig azon a ponton a jelentősebb, amire a napelem közvetlenül csatlakozik, így eldönthetjük, hogy a kommunális vagy a koncentrált fogyasztókra szeretnénk áttenni ezt a terhelést. Mivel azonban a koncentrált fogyasztók egy koncentráltabbban, és így könnyebben védhető elemei a rendszernek, ezért én mellettük tenném le a voksomat, ha eszerint a hatás szerint kellene elhelyeznem a napelemeket.

5.2. Hálózati veszteség változása

Következő vizsgálandó hatás a hálózati veszteség változtató képessége a két különböző elrendezésnek. Ahogy már említettem, a hálózati veszteség vizsgálata, a vezeték és a

transzformátor veszteséget foglalja magába. Közelítőleg semmi egyéb jelentősebb veszteségforrást nem tartalmaz a hálózat és a napelemből fakadó veszteségeket már a napelemes rendszer kiadott energiája magába foglalja. Csak hatásos teljesítménnyel foglalkozom, hisz a napelemek teljesítménytényezője 1-re van állítva.

Az elvárásom az, hogy a jobb veszteségcsökkentéshez a jobban elosztott termeléssel kell eljutnom, ami most a decentralizált esetet jelenti. Ez abból következik, hogy a decentralizált napelemek termelése által ekkor a lehető legtöbb vezetéknek kellene tehermentesítve lennie. Mivel a vezeték vesztesége teszi ki a hálózati veszteség jelentős részét, így magának a hálózati veszteségnek is kisebbnek kell lennie.



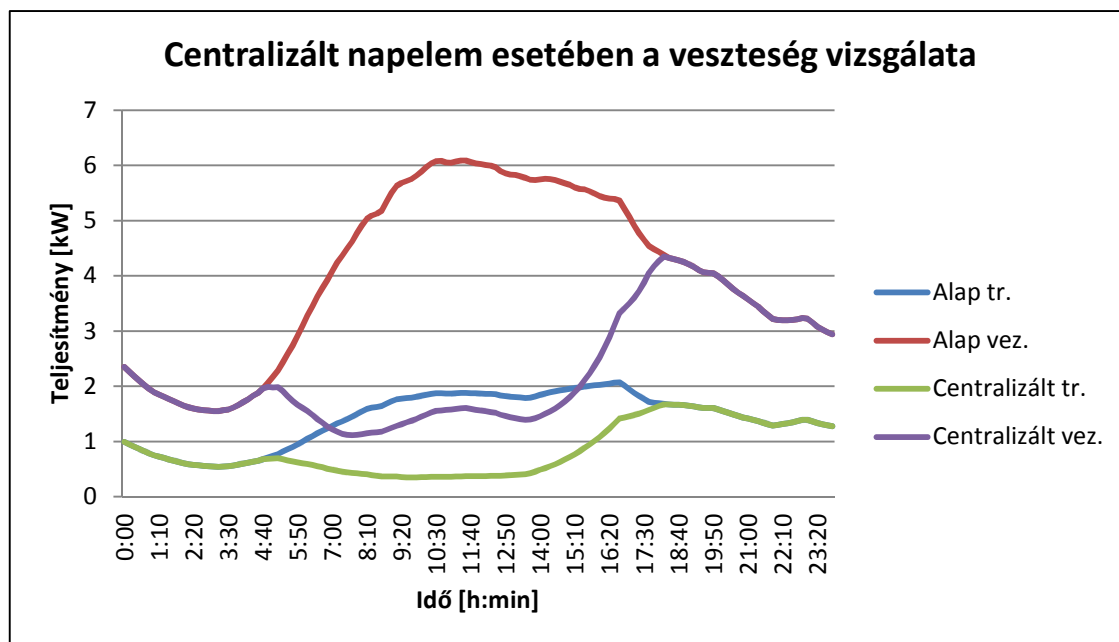
17. ábra: A hálózati veszteség alakulása a különböző napelem elrendezések esetében nyári adatokkal.

Az elvárásaimmal szemben azonban a 17. ábra mást mutat, mégpedig jelentősen a centralizált eset felé döntve a mérleget. Ezt számokkal is kifejezve azt kapom, hogy a napelem termelési időszak alatt a hálózati veszteségek értéke a következő:

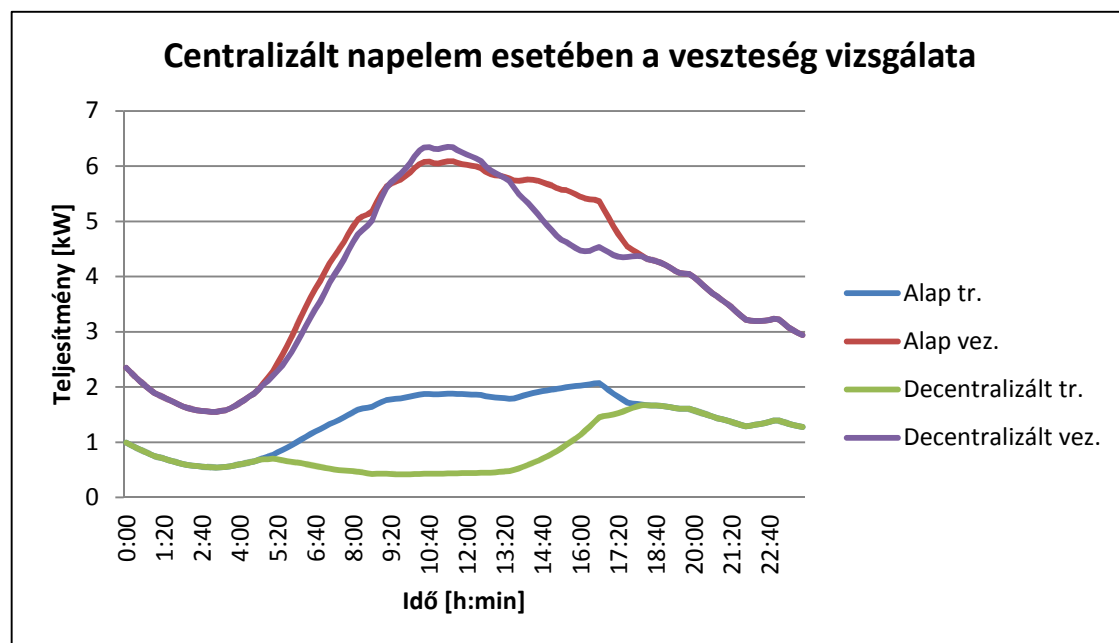
- Hálózati veszteség napelemek nélkül: 92 kWh
- Hálózati veszteség centralizált napelemekkel: 35 kWh
- Hálózati veszteség decentralizált napelemekkel: 76 kWh

A centralizált megvalósításban az eredeti 38%-ára csökkentettem a hálózati veszteséget, ami jelentős, 62%-os veszteségcsökkentést jelent. A decentralizált esetben az eredeti veszteséget 82%-ára csökkentettem, ami 18%-os veszteségcsökkentést jelent.

Mivel nem felel meg az elvártaknak az eredmény, ezért alaposabban megvizsgálom a kapott eredményt. Ehhez a decentralizált és a centralizált napelem elrendezések esetén külön-külön is megnézem a transzformátor és a vezetékek veszteségének alakulását a napelemek nélküli elosztóhálózatnak a veszteségéhez képest.



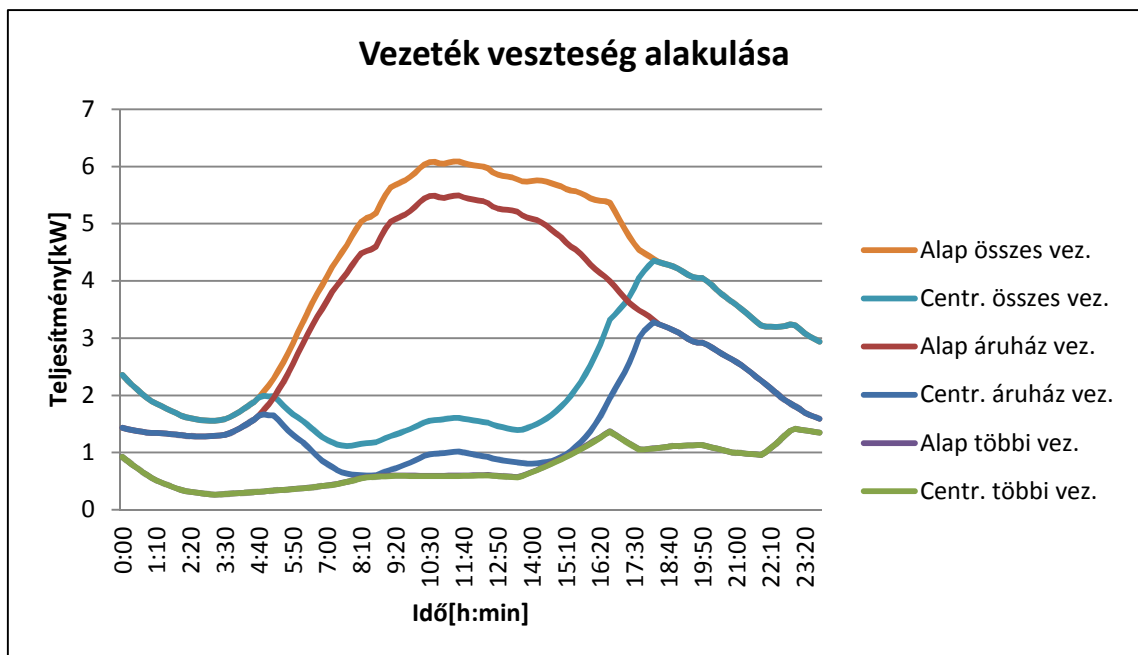
18. ábra: A vezetékek és a transzformátor veszteségek alakulása a centralizált napelem elrendezés esetében nyári adatokkal.



19. ábra: A vezetékek és a transzformátor veszteségek alakulása a decentralizált napelem elrendezés esetében nyári adatokkal.

A 18. és 19. ábra összehasonlításából egyből szembetűnik, hogy a vezeték veszteségének alakulásában keresendő a veszteségek eltérésének az oka. Mivel a két rendszernagyság összességében azonos, így a transzformátor veszteségét azonos mértékben csökkentik, hisz azonos nagyságú energiaáramlástól mentesítik a transzformátort. Azonban a vezetékek vesztesége jelentős eltérést mutat, ennek több oka is van. Nézzük először a centralizált napelem esetében, hogy miért alakul így a vezeték vesztesége.

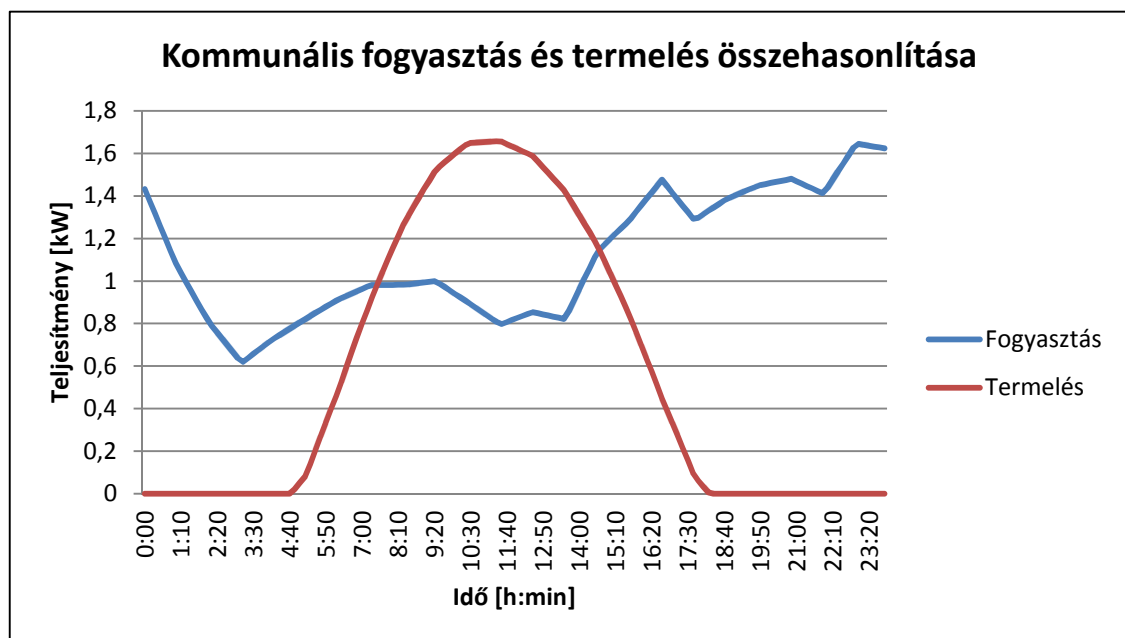
A centralizált esetben tudjuk, hogy az áruház fogyasztási profilja közel egyezik a napelem termelésének profiljával, hiszen mindkettőnek a nap közepén van a csúcsa és a meredekségük is hasonlóan alakul a csúcs előtt és után is. Ebből fakadóan a koncentrált fogyasztó igényeinek kielégítése mellett a hálózatra táplálást közelítőleg el lehet kerülni. Ennek előnye még, hogy a nap közepén a hálózat legjelentősebb energiafogyasztóját „kivesszük a rendszerből”, így az eredetileg a legjelentősebb energiaáramlással rendelkező vezetéket tehermentesítjük. De ez még így is egy meglepő eredmény, ezért megvizsgáltam, hogy mekkora az áruház vezetékének a vesztesége és a transzformátorkörzet többi vezetékének a vesztesége. A 20. ábrán követhető a napelemek nélküli és a centralizált napelemet tartalmazó vezetéki veszteségek összehasonlítása.



20. ábra: Az elosztóhálózat vezetékének veszteségei a centralizált napelem elrendezés és a napelemek nélküli topológia esetében.

Ezzel a képpel szemléltetem azt, hogy az áruházat a kisfeszültségű sínre kötő vezeték vesztesége hogyan viszonyul az áruház bekötővezetékét nem tartalmazó vezetéki veszteséghez és az összes vezetéket tartalmazó vezetéki veszteséghez képest. Mindezt a napelemeket nem tartalmazó és a centralizált napelemeket tartalmazó hálózati esetekre is bemutatom. Az eredményekből következik, hogy az áruház bekötővezetékének vesztesége jelentősen túlszárnyalja az összes többi vezeték veszteségének együttesét is. Ebből fakad, hogy ennek a vezetéknek a tehermentesítésével a centralizált esetben ekkora veszteségcsökkentés érhető el. Ezen felül az is látszik a képből, hogy az áruház bekötővezetékén kívül a többi vezeték veszteségén nem változtat a centralizált napelem rendszer, ahogy az várható is.

De az még mindig nem világos, hogy a decentralizált esetben miért kaptunk ilyen rossz értékeket. Ehhez tudnunk kell, hogy a decentralizált napelemeket tartalmazó képben a kommunális fogyasztók fogyasztási szokásai nagyban eltérnek a napelemek termelésétől. Ezt a 21. ábrán lehet követni, ahol egy véletlenszerűen kiválasztott háznak a fogyasztását és a vele közös csomóponton lévő 11 darab napelem termelését vetem össze.



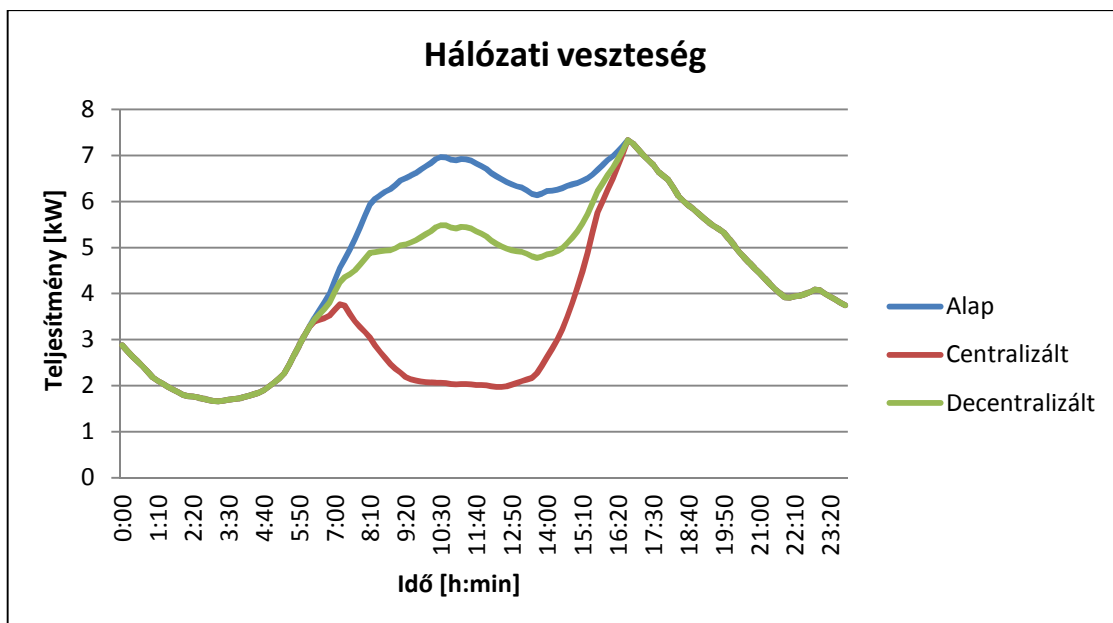
21. ábra: Egy kommunális fogyasztó fogyasztásának és a decentralizált napelemes rendszer termelésének összehasonlítása nyári napon.

Ebből a képből következik, hogy az igények csúcsa és a termelés csúcsa el van tolva egymáshoz képest. Ezen felül a gyakorlatban bevett napelem tervezési eljárásból következően a kommunális fogyasztóknál mondhatni a fogyasztási profil csúcsainak

kielégítésére terveznek, így mondhatni túlméreteznek. Ez a két tényező együttesen azt adja, hogy a napelem termelése a termelési csúcsánál jelentősen meghaladja a fogyasztást, ami nagy mennyiségű hálózatba táplált energiával jár, így nem hogy veszteséget csökkentek, de veszteséget növelek a vezetéken. Ez követhető a 19. ábra és a 21. ábra összevetése alapján. A 21. ábrán a dél körüli csúcsnál sokkal nagyobb a decentralizált termelés, mint a fogyasztás, ami a vezetékekre az eredetinél nagyobb energiaáramlást bocsájt, ezzel növelve a veszteséget. Azonban 16 óra magasságában elkezd csökkenni a termelt energia mennyisége és ezzel arányosan elkezd növekedni a kommunális fogyasztó fogyasztása. Így a 19. ábrából kivehetően 16 óra után a vezetékek tehermentesítődnek, mert nem kell a napelemek termeléséből származó termelt energiát szállítaniuk, miközben a fogyasztó energiájának is csak egy csökkentett részét kell szállítaniuk, így veszteségcsökkenés jelenik meg.

Ennek a problémának az elkerülése decentralizált esetben esetlegesen megoldható a kisebb napelemes rendszerekben való gondolkodással. Azonban sohasem fogunk tudni olyan jó eredményeket elérni, mint a centralizált esetben, mert ott a termelési csúcs a fogyasztási csúccsal jellemzően egybeesik. Ebből következően másik megoldás lehet az energiatárolók alkalmazása, amivel a termelési csúcsok eltolhatók. De költséghatékonyság szempontjából minek gondolkodnánk drága energiatárolást is magába foglaló megoldásokban, ha azok nélkül is, centralizált esetben, ilyen jó eredményeket kapunk?

Azonban lehetséges, hogy csak a legnagyobb napfényintenzitás esetén jönnek ki ilyen drasztikus eredmények, ezért érdemes megnézni a téli napelem termelésekből és téli koncentrált fogyasztó fogyasztási szokásaiból adódó veszteségcsökkentéseket.



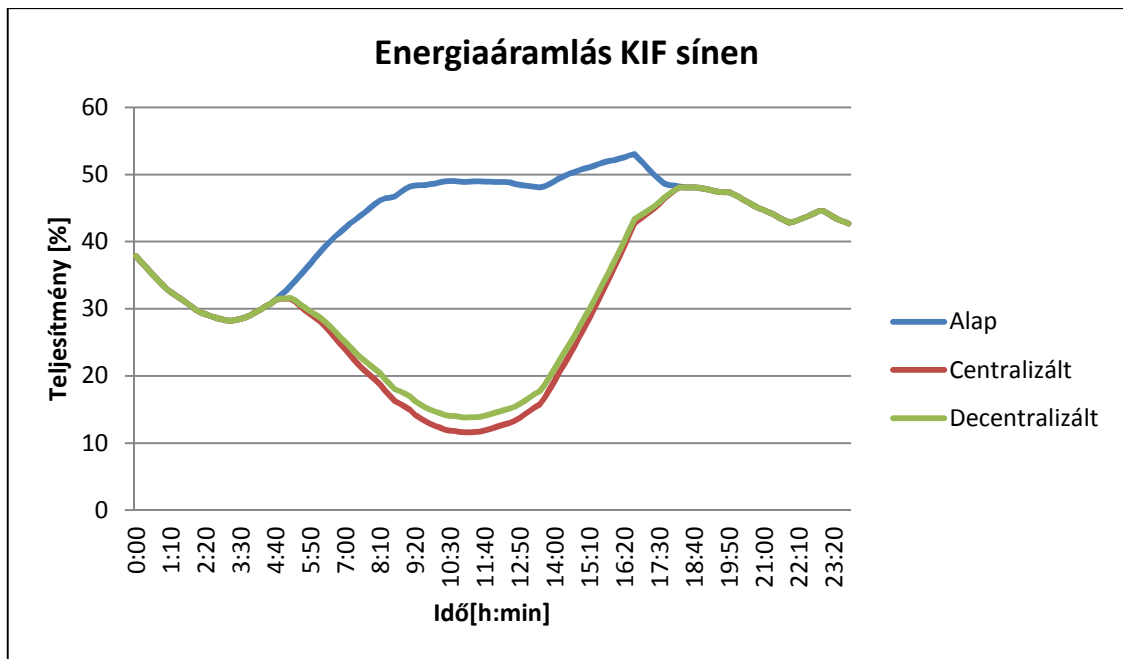
22. ábra: A hálózati veszteség alakulása a különböző napelem elrendezések esetében téli adatokkal.

A 22. ábrán már látható, hogy közelednek egymáshoz a veszteségcsökkentés mértékei a különböző napelem elrendezések esetében. Ennek oka egyrészt a decentralizált eset javulása, hisz csökken télen a termelt energia mennyisége, így már nincs akkora túllövés az energiatermelésben. Továbbá megjelenik, hogy a centralizált esetenél az áruház kisebb energiát fogyaszt, és azt is kettős csúccsal, így már nem olyan tökéletesen illeszkedik a termelés a fogyasztáshoz. Ettől függetlenül még mindig a centralizált eset a jobb, még a rá nézve legkedvezőtlenebb veszteségcsökkentési képesség esetében is.

Összefoglalásképp elmondható, hogy a veszteségcsökkentő képesség tekintetében mindenképp a centralizált elosztás a jobb, mert a koncentrált fogyasztónak a fogyasztási szokásai megegyeznek a napelem termelési tulajdonságaival.

5.3. Visszaáramló energia

Az utolsó hálózati hatás vizsgálataként érdemes megnézni a teljesítményáramlásokat, hogy előfordul-e visszaáramló energia a transzformátoron.



23. ábra: A hatásos teljesítmény áramlásának nagysága a transzformátor névleges teljesítményéhez viszonyított százalékos értékben kifejezve a transzformátor kisfeszültségű oldalán, nyári adatokkal.

A 23. ábrán a transzformátor kisfeszültségű oldalán történő energiaáramlást rajzoltatom ki a transzformátor névleges teljesítményének (0,4 MVA) százalékos értékében. Mivel nem látható előjelváltás, ebből fakadóan, nem fordul meg a transzformátoron az energiaáramlás iránya, így a visszaáramló energia hatása nem játszik szerepet ekkora méretű napelem rendszerek esetében. Ez annak köszönhető, hogy a napelem rendszer megfelelően volt méretezve az elosztóhálózatban található fogyasztók méretéhez képest. Érdekes azonban belegondolni abban, hogy a középvezetű elosztóhálózathoz érkező hatásos energiát 80%-al lecsökkentette a napelem, azonban a meddő energiaáramláson nem változtatott, így előfordulhat a napelem termelési csúcsánál, hogy a körzet fogyasztói főként meddőforrásnak használják a középvezetű elosztóhálózatot.

5.4. Összefoglalás

A konklúzió levonásához összesítem az egyes hatásokra nézve, hogy melyik elrendezés lett az előnyösebb a vizsgált hálózati elrendezésben:

- Hosszú idejű feszültségváltozás: a centralizált modell a jobb.
- Rövid idejű feszültségváltozás: a centralizált modell a jobb.
- Flicker: közel egyenlő mértékű a hatásuk.
- Meddőtartalom fluktuáció: közel egyenlő mértékű a hatásuk.

- Hálózati veszteség változás: a centralizált modell a jobb.
- Visszaáramló energia: közel egyenlő mértékű a hatásuk.

Ebből következően a vizsgált hálózati eset kisfeszültségű elosztóhálózatában a koncentrált fogyasztóhoz illesztett centralizált modell a megfelelőbb elrendezése a napelemeknek. Ennek okai között felsorolható a megfelelő méretezés és a koncentrált fogyasztói szokásoknak a napelem termelési profiljával való nagymértékű egyezése. Így mondhatom, hogy ha a kommunális fogyasztók energia felvételéhez méretezném a napelem rendszert, mint ahogy a koncentráltaknál teszem, lehet, hogy jobb eredményeket kapnék a decentralizált elrendezés esetében is, azonban feltehetően sose érhetnék el velük ugyanolyan jó eredményeket, hiszen ehhez a kommunális fogyasztók fogyasztási szokásait a napelem termelési profiljához kellene illesztenem. Természetesen nagyban függ az elosztóhálózat topológiájától az eredmény, például ha nincs nagyobb koncentrált fogyasztó a KIF elosztóhálózatban, akkor nem is merül fel a centralizált napelem elrendezés megvalósítása. De elmondhatom így is, hogy az általánosságban is használható jobb napelem elhelyezéshez egy lépéssel közelebb kerültem.

6. Összefoglalás

A dolgozatom során megvizsgáltam a napelemek centralizált és decentralizált elhelyezésének az elosztóhálózatra kifejtett hatásait. Szimulációkkal elemeztem, hogy milyen feszültség- és veszteségváltoztató képessége van a napelemek elosztottságának. Ezekből kiderült, hogy a megfelelően méretezett, koncentrált fogyasztókhoz illesztett centralizált napelemes rendszerek installálása lehet a megfelelőbb az elosztóhálózatra kifejtett hatások tekintetében. Felvethető még az összehasonlítási szempontok közé a decentralizált és centralizált napelemek között a megtérülési idő, a karbantarthatóság és az elérhető határfok is. De ezek mélyebb vizsgálata nélkül is belátható, hogy szintén a centralizált napelemes projektek a jobbak.

A vizsgálthoz hasonló elosztóhálózat topológiáknál a kapott eredmények felhasználhatóak a napelemek elhelyezésének megtervezésében. Azonban nem szabad végkövetkeztetésként levonni azt, hogy a centralizált modell minden esetben jobb a decentralizált modellnél, mert a vizsgálataim korlátozott mennyiségű, ámbar valósághűséghez ragaszkodó lehetőséget mutatnak be. Az eredményeim továbbgondolása során a decentralizáltan elhelyezett napelemek jobban elosztott és a kommunális fogyasztói szokásokhoz méretezett vizsgálatával foglalkozni fogok. Alaposabban vizsgálható lenne a napelemek dinamikus viselkedése is, azaz a napelemek hálózatban okozott tranzienseinek a vizsgálata, ami például szigetüzem vagy harmonikus vizsgálat esetén felmerülhet. Ezzel növelhető lenne az összehasonlítási szempontok palettája, így ezek vizsgálata szintén a dolgozatom folytatásaként átgondolandó. Ezekhez kapcsolódóan egy másik kérdéskörként vizsgálom majd azt is, hogy a középfeszültségre csatlakozó nagy teljesítményű napelem parkoknak milyen hatásai vannak, és esetleg előnyösebb lehet-e kisebb méretekre bontva, a kisfeszültségű oldalon található fogyasztói csomópontokra csatlakozni velük.

A végső célja a vizsgálataimnak egy működőképesebb napelemes struktúra kialakítása, amivel segíthetek a napelemek elterjedésében, miközben az elosztóhálózatra is jó hatással lévő struktúrát hozok létre. Szerencsére azt mondhatom, hogy ehhez a célomhoz egyre közelebb jutok, mert a napelemek a megfelelő méretezésén kívül most egy lépéssel közelebb kerültem a megfelelő napelem elrendezéshez is, amivel tovább könnyíthető a napelemek rendszerintegrációja.

Források

- [1] Dr. Mizsei János, Timárné Horváth Veronika: Napelemek, 2003, Budapest, Műegyetemi Kiadó
- [2] Stuart Bowden and Christiana Honsberg: Elektronikus oktatókönyv a napelemekről: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/> (2012.10.22.)
- [3] Hunyár M., Schmidt I., Veszprémi K., Vincze Gy-né: A megújuló és környezetbarát energetika villamos gépei és szabályozásuk, 2001, Budapest, Műegyetemi Kiadó, pp. 177.-219.
- [4] Farid Katiraei, Julio Romero Agüero: Solar PV integration challenges, 2011. május/június, IEEE power & energy magazine
- [5] Szentpály W. Miklós: Megújuló energia termelésben alkalmazott hálózati inverterek és minősítésük, 2010/07-08, Elektrotechnika, 103. évfolyam
- [6] E-On napelemes termelő berendezés csatlakozási minta dokumentációja: http://www.eon.hu/download/Csatlakozasi_dokumentacio_MINTA.PDF (2012.10.22.)
- [7] Qi Zhang, Xiangdong Sun, Yanru Zhong, Mikihiro Matsui: A Novel Topology for Solving the Partial Shading Problem in Photovoltaic Power Generation System, 2009. május 17-20, IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09
- [8] V. Di Dio , D. La Cascia, R. Miceli, C. Rando: A mathematical model to determine the electrical energy production in photovoltaic fields under mismatch effect, 2009. június 9-11., 2009 International Conference on Clean Electrical Power
- [9] Martin Geidl: Protection of Power Systems with Distributed Generation: State of the Art, 2005 július 20., Power Systems Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich
- [10] Faludi Andor, Szabó László: Villamosenergia-rendszer üzeme és irányítása, egyetemi jegyzet
- [11] Dr. Dán András, Hartmann Bálint, Kiss Péter: Hálózati áramellátás és feszültségminőség, egyetemi jegyzet

- [12] Papp Szabolcs: Egy 800 háztartásból álló falu villamos-energia ellátása részben napelemes rásegítéssel, BSc szakdolgozat, 2011
- [13] Dán András, Tersztyánszky Tibor, Varjú György: Villamosenergia minőség, Budapest, 2006
- [14] Johan H. R. Enslin, Peter J. M. Heskes: Harmonic Interaction Between a Large Number of Distributed Power Inverters and the Distribution Network, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 19, No. 6, 2004. november
- [15] Mark McGranaghan, Thomas Ortmeyer, David Crudele, Thomas Key, Jeff Smith, Phil Barker: Renewable Systems Interconnection Study: Advanced Grid Planning and Operations, Sandia National Laboratories, 2008. február
- [16] Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, Remus Teodorescu, Mummadi Veerachary, Massimo Vitelli: Reliability Issues in Photovoltaic Power Processing Systems, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 55, No. 7, 2008 július
- [17] S. Armstrong, W.G. Hurley: A new methodology to optimise solar energy extraction under cloudy conditions, Renewable Energy 35 (2010) 780–787, 2009. október 12.
- [18] Az országos meteorológia szolgálat által elkészített éghajlati adatsorok:
http://owwww.met.hu/eghajlat/eghajlati_adatsorok/sz/Navig/Index2.htm (2012.10.24.)
- [19] Endecon Engineering, Regional Economic Research, Inc.: A guide to photovoltaic (pv) system design and installation, prepared for: California Energy Commission, 2001 június
- [20] Magyarország megújuló energia hasznosítási cselekvési terve 2010 – 2020
http://www.kormany.hu/download/2/88/20000/NCsT_20110106_v%C3%A9gleges_201103.pdf (2012.10.24.)
- [21] A dolgozatban használt napelem adatlapja: Sharp NU-Q235F4
http://files.sharppusa.com/Downloads/Solar/Products/sol_dow_NUQ235F4.pdf (2012.10.24.)

Mellékletek

A DIgSILENT PowerFactory program egyvonalas ksfeszültségű elosztóhálózat különböző napelem elrendezéseinek a képei:

- Alap elosztóhálózat napelemek nélkül:
 - o egyvonalas_alap.pdf
- Centralizáltan elhelyezett napelemeket tartalmazó hálózat:
 - o egyvonalas_centralizalt.pdf
- Decentralizáltan elhelyezett napelemeket tartalmazó hálózat:
 - o egyvonalas_decentralizalt.pdf

A mellékletek megtalálhatóak a dolgozat CD mellékletén .pdf formátumban.