

MISKOLCI EGYETEM  
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**NAPELEMES VILLAMOSENERGIA TERMELŐ RENDSZEREK KOMPLEX  
VIZSGÁLATA ÉS ÉRTÉKELÉSÉNEK MÓDSZERTANA**

PhD értekezés

KÉSZÍTETTE

**Lipták Róbert**

villamosmérnök (BSc),  
energetikai mérnök (MSc)

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

GÉPÉSZETI ALAPTUDOMÁNYOK TÉMATERÜLET

TRANZSPORTFOLYAMATOK ÉS GÉPEIK TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ

**Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella**

DSc, egyetemi tanár

TÉMATERÜLET VEZETŐ

**Prof. Dr. Baranyi László**

DSc, egyetemi tanár

TÉMACSOPORT VEZETŐ

**Prof. Dr. Baranyi László**

DSc, egyetemi tanár

TÉMAVEZETŐ

**Dr. habil. Bodnár István**

egyetemi docens

**Miskolc  
2024**

## TARTALOM

<b>TARTALOM</b> .....	<b>I</b>
<b>TERVEZÉSVEZETŐ AJÁNLÁSA</b> .....	<b>III</b>
<b>JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK LISTÁJA</b> .....	<b>V</b>
<b>1. BEVEZETÉS</b> .....	<b>8</b>
1.1. Általános áttekintés .....	8
1.2. Háromszögmodell általános felépítése.....	9
<b>2. A NAPELEMÉK TÍPUSAI</b> .....	<b>12</b>
2.1. Monokristályos napelem cellák.....	12
2.2. Polikristályos napelem cellák.....	13
2.3. Vékonyfilm napelem cellák.....	13
2.4. Hibrid napelem cellák.....	14
2.5. Napelem cella elektronikai modellje .....	14
<b>3. A NAPELEMES RENDSZEREK FELÉPÍTÉSE</b> .....	<b>18</b>
3.1. Szigetüzemű rendszerek.....	19
3.1.1. Közvetlen csatolású szigetüzemű napelemes rendszerek.....	19
3.1.2. Akkumulátortárolós szigetüzemű napelemes rendszerek .....	19
3.1.3. Hálózat-interaktív szigetüzemű napelemes rendszer.....	20
3.2. Hálózatcsatolt napelemes rendszerek akkumulátor telep nélkül .....	21
3.3. Hálózatcsatolt napelemes rendszerek akkumulátor teleppel (Hibrid).....	21
3.3.1. Hibrid napelemes rendszer .....	22
3.3.2. Szigetüzemre is alkalmas hibrid napelemes rendszerek.....	22
<b>4. A NAPELEMES RENDSZER ENERGIAELLÁTÁS BIZTONSÁGRA GYAKOROLT HATÁSA</b> .....	<b>24</b>
4.1. A villamos hálózati csatlakozás és egyéb bővítések .....	24
4.1.1. Csatlakozási távolság.....	24
4.1.2. Napelemes rendszerrel kapcsolatos bővítések .....	25
4.1.3. Villamos hálózattal kapcsolatos pontozási rendszere .....	25
4.2. A fogyasztók energiaellátása.....	25
4.2.1. Napelemes rendszerek a villamos hálózatban.....	25
4.2.2. A fogyasztók energiaellátásával kapcsolatos pontozási rendszer .....	26
4.3. A rendszer energiatároló képessége.....	27
4.3.1. Hálózatcsatolt napelemes rendszer akkumulátor kapacitásának vizsgálata.....	28
4.3.2. Napelemes rendszer energiatároló képességének pontozási rendszere .....	32
<b>5. A NAPELEMES RENDSZEREK TECHNOLÓGIAI VIZSGÁLATA</b> .....	<b>33</b>
5.1. Feszültségérték változása .....	33
5.1.1. Feszültségminőség .....	33
5.1.2. Napelemes rendszerek egyenáramú oldalon fellépő hibák vizsgálata .....	34
5.1.3. A feszültség értékének változása a hőmérséklet függvényében .....	42
5.1.4. Feszültségérték változással kapcsolatos pontozási rendszer .....	45
5.2. Felharmonikusok hatása .....	46
5.2.1. Harmonikusok, Fourier transzformáció.....	47
5.2.2. Teljes harmonikus torzítás .....	48

---

5.2.3. Napelemes rendszerek harmonikus vizsgálata hálózati méréssel .....	49
5.2.4. Napelemes rendszerek harmonikus vizsgálata szimulációs környezetben .....	54
5.2.5. A teljes harmonikus torzítás értékével kapcsolatos pontozási rendszer .....	58
5.3. Élettartam és öregedés .....	59
<b>6. A NAPELEMES RENDSZEREK GAZDASÁGI ELEMZÉSE .....</b>	<b>60</b>
6.1. Beruházási költségek .....	60
6.2. Karbantartási költségek .....	61
6.3. Megtérülési idő .....	62
6.3.1. Egyszerűsített megtérülési idő .....	62
6.3.2. Összetett megtérülési idő .....	62
6.3.3. Megtérülési idővel kapcsolatos pontozási rendszer .....	64
<b>7. NAPELEMES RENDSZEREK VIZSGÁLATA HÁROMSZÖGMODELLEL SEGÍTSÉGÉVEL....</b>	<b>65</b>
7.1. Szigetüzemű napelemes rendszerek vizsgálata .....	65
7.2. Hálózatcsatolt rendszer vizsgálata .....	67
7.3. Hibrid napelemes rendszer vizsgálata .....	68
7.4. A napelemes rendszerek vizsgálatának összegzése .....	70
7.4.1. A vizsgált szigetüzemű rendszerek összegzése .....	70
7.4.2. A vizsgált hálózatcsatolt rendszerek összegzése .....	72
<b>8. TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....</b>	<b>74</b>
<b>ÖSSZEFOGLALÁS.....</b>	<b>79</b>
<b>9. SUMMARY .....</b>	<b>81</b>
<b>KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS .....</b>	<b>83</b>
<b>PUBLIKÁCIÓS LISTA.....</b>	<b>84</b>
<b>ÁBRAJEGYZÉK .....</b>	<b>86</b>
<b>TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE.....</b>	<b>88</b>
<b>IRODALOM.....</b>	<b>89</b>

## TERVEZÉSVEZETŐ AJÁNLÁSA

Lipták Róbertet már BSc-s hallgató korunk óta ismerem, hiszen együtt kezdtük a villamosmérnöki BSc szakot és együtt is záróvizsgáztunk le. Róbert Energetikai mérnök mesterszakon folytatta tovább tanulmányait, ami mellett a miskolci Bláthy Ottó Villamosipari Szakközépiskolában dolgozott óraadó oktatóként.

Egyetemi tanulmányai befejezését követően az iparban helyezkedett el, ahol villamos tervezői tapasztalatot, PLC programozói és PC alapon futó szoftver fejlesztői ismereteket is szerzett. Széleskörű szaktudással rendelkezik, amely nem csak a villamosmérnöki szakterülethez kapcsolódik, így örömmel vettem, amikor 2019-ben megkeresett, hogy szeretne Ph.D. fokozatot szerezni.

2020. tavaszán kezdte meg Ph.D tanulmányait a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskolában. Kutatási témája a napelemekre koncentrált, első sorban a folyamatosan változó tervezési és üzemeltetési kérdések, az hálózati visszahatások mérséklése, valamint az optimális teljesítményválasztás témáját kutatja, amely egyre hangsúlyosabb tématerületté vált a villamosenergetikában. Munkája során alkalmazott és elméleti kutatást egyformán végzett, ahol a különböző típusú napelemes rendszerek hálózati visszahatásait, technológiai és gazdasági kérdéseit tárgyalja. Kutatásait mérésekkel és szimulációkkal támasztotta alá.

Már a képzése kezdetén egyetértésben kidolgozott egy ütemtervet, amely tartalmazta a tantárgyak felvételének- és teljesítésének rendjét. Az elvégzendő mérések és szimulációk tervét, valamint felvázolta a publikációs lehetőségeket is.

Az elmúlt négy évben számtalan szakirodalmat tanulmányozott, amely alapján nem csak mérőrendszert, és szimulációs módszert fejlesztett ki, hanem egy döntéstámogató-döntéshozó módszert is, amelyek felhasználásával számos kísérletet végzett. A mérések és szimulációk eredményeit angol- és magyar nyelvű konferencia-, illetve folyóiratcikkek formájában jelentette meg, valamint magyar és angol nyelven tartott konferencia előadásokat.

A napelemes rendszerek jogi szabályozása az elmúlt években dinamikusan változott, így számos olyan kérdés merült fel, amelyek megválaszolása kizárólag optimalizálási folyamat eredményeként válaszolható meg. Ilyen kérdések például az energiaellátás folyamatos, kiesés nélküli biztosítására szolgáló akkumulátoros energiatároló egységek optimális és költséghatékony kapacitásának, valamint a napelemek teljesítményének megválasztása. Nem elhanyagolható a hálózati visszahatás sem, amely az utóbbi években jelentős problémává vált a hazai villamosenergia-rendszerben. Róbert ebbe az irányba mozdította kutatását, amely eredményei összhangban állnak az igen kis számban rendelkezésre álló, de annál értékesebb szakirodalmakkal.

Folyamatosan részt vett intézeti kutatásokban, ezek révén igen sok, az értekezés készítése során is hasznosítható, gyakorlati tapasztalat birtokába jutott.

PhD értekezését folyamatos munkával készítette el. Az elkészített értekezés egyik legnagyobb értékének azt tartom, hogy a tudományos kutatások eszköztárával, tudatos és jól megválasztott alkalmazásával a mindennapi gyakorlat számára is hasznosítható eredményekhez vezetett.

Lipták Róbert emberileg, oktatóként és kutatóként is kiváló kolléga, eddigi tudományos tevékenységével, PhD értekezésének elkészítésével az önálló, alkotó tudományos tevékenység végzésére való alkalmasságát messzemenően bizonyította.

Összefoglalva, az elkészült értekezést tartalmi és formai vonatkozásban igényesnek tartom, a jelölt eredményes munkája közvetett bizonyítéka a Karon folytatott doktori képzés magas színvonalának.

Miskolc, 2024. április 8.

Dr. habil. Bodnár István  
egyetemi docens, témavezető

JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK LISTÁJA

JELÖLÉSJEGYZÉK

Jel	Megnevezés	Mérték
$AM_s^n$	adott évben megtakarított villamos energia mennyisége	Ft
$AM_u^n$	adott évben vételezett villamos energia költsége	Ft
$c$	fénysebesség (közelítő értéke: $3 \cdot 10^8$ m/s)	m/s
$C_T$	parazita kapacitás	F
$CST_i^n$	adott év biztosítási költsége	Ft
$CST_m^n$	adott év fenntartási költsége	Ft
$E_e^n$	adott évben exportált villamos energia	kWh
$E_u^n$	adott évben felhasznált villamos energia	kWh
$E_p^n$	adott év teljes energiatermelése	kWh
$E_p^{n-1}$	előző év energiatermelés	kWh
$f$	frekvencia	Hz
$I_0$	telítési (szaturációs) áramerősség	A
$I_d$	diódaáram	A
$I_{foto}$	fotoáram	A
$I_{mp}$	munkaponti áram	A
$I_R$	a napelem kivezetésén mérhető áramerősség	A
$I_{rz}$	rövidzárási áram	A
$LN_I^n$	adott év törlesztőrészlete	Ft
$P$	hatásos villamos teljesítmény	W
$P_{fény}$	a napelempanel hasznos felületére érkező fényteliesség	W
$P_{max}$	maximális teljesítmény, a napelem csúcsteljesítménye	W
$P_{mp}$	munkaponti teljesítmény	W
$PD_\eta$	éves teljesítményromlás	%
$PR_e^n$	adott évben értékesített villamos energia	Ft

$PR_{sum}^n$	adott év össznyeresége	Ft
$R_p$	párhuzamos ellenállás	$\Omega$
$R_s$	soros ellenállás	$\Omega$
$R_t$	terhelő ellenállás	$\Omega$
$T$	hőmérséklet	$^{\circ}\text{C}$
$T_k$	a környezeti hőmérséklet	$^{\circ}\text{C}$
$T_n$	a napelem névleges hőmérséklete	$^{\circ}\text{C}$
$T_{nf}$	a napelem felületi hőmérséklete	$^{\circ}\text{C}$
$THD_I$	az áram teljes harmonikus torzítás értéke	%
$THD_U$	a feszültség teljes harmonikus torzítás értéke	%
$U_{mp}$	munkaponti feszültség	V
$U_R$	a napelem kivezetésén mérhető feszültség	V
$U_T$	termikus feszültség	V
$U_{\bar{u}}$	üresjárási feszültség	V
$\eta$	hatásfok	-, %
$\lambda$	hullámhossz	m
$\varphi$	kitöltési tényező	-, %

### RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

PV	<i>photovoltaic (angol)</i> , fotovoltaikus
DSC	<i>dye-sensitised cells (angol)</i> , fényérzékeny festett cellák
HMKE	háztartási méretű kiserőmű
MPPT	<i>maximum power point tracking (angol)</i> , maximálismunkapont-keresés
MVM	Magyar Villamos Művek
HIT	<i>Heterojunction with Intrinsic Thin Layer solar cell (angol)</i> , Kristályos és az amorf cellák keveréke
MEKH	Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal
CdTe	Kadmium-Tellurid
a-Si	Amorf Vékonyréteg-szilícium
CIGS/CIS	Réz-Indium-Gallium diSelenide
DC	<i>Direct Current (angol)</i> , Egyenáram

## JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK LISTÁJA

AC	<i>Alternate Current (angol)</i> , Váltakozóáram
SOC	<i>State of Charge (angol)</i> , Töltöttési állapot
BMS	<i>Battery Management System (angol)</i> , Akkumulátor-kezelő rendszer
kWp	<i>kilowatt peak (angol)</i> , Napelemes rendszer csúcsteljesítménye
kWh	<i>kilowatt hour (angol)</i> , kilowatt óra
RMS	<i>Root Mean Square (angol)</i> , négyzetes középérték
THD	<i>Total Harmonic Distortion (angol)</i> , Teljes harmonikus torzítás
STC	<i>Standard Test Conditions (angol)</i> , Szabványos vizsgálati feltételek
FFT	<i>Fast Fourier Transformation (angol)</i> , Gyors Fourier Transzformáció



## 1. BEVEZETÉS

### 1.1. Általános áttekintés

Az elmúlt évtizedekben jelentősen megnövekedett a villamosenergia igény, ez egyrészt a technológiák automatizálásának, másrészt otthonok kényelmét szolgáló elektronikai eszközök egyre nagyobb elterjedésének köszönhető. A fenntarthatóság érdekében világszerte egyre nagyobb törekvés mutatkozik azzal kapcsolatban, hogy a villamosenergia-szükségletet megújuló energiaforrások segítségével állítsák elő. Villamosenergia-előállítás szempontjából a napenergia fontos helyet foglal el a globális energia kontextusban. A napelemes rendszerek az elmúlt évtizedekben egyre fontosabb energiaforrásokká váltak. Az utóbbi években Magyarország energiapolitikája is egyértelműen a megújuló energiaforrások arányának növelésére összpontosított.

A napelemes rendszerekkel kapcsolatos jelenlegi szabályozások szigorodásának köszönhetően a jövőben egyre fontosabb lesz a teljes rendszer szabályozása és ellenőrzése. A napelemes rendszerek a villamos hálózatba történő integrálásának egyre növekvő figyelembe vétele mellett továbbra is elengedhetetlen az energiabiztonság és a megbízhatóság. A Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal (MEKH) 2022-es éves adatai szerint a villamosenergia-termelés területén a megújuló források részesedése elérte a 21,4 százalékot, és ezen belül a napenergia alkotja a legnagyobb részt, 61,8 százalékot [1]. A hazai támogatási rendszer sikerei miatt a naperőmű-fejlesztések olyan mértékben felgyorsultak, hogy a tervezett 2030-as naperőmű-kapacitás valószínűleg már 2024 év végére, vagy 2025 év elejére megvalósulhat. A növekvő energiaszuverenitás és ellátásbiztonság azonban komplikációkat okozott az áramellátó rendszer egyensúlyában. A magyar villamosenergia rendszer befogadó képessége elérte a határait. Ezért jelenleg a fókusz az elektromos ellátórendszer modernizációjára és digitalizációjára került át. Ez az egyik stratégiai pont, amely arra irányul, hogy maximális kapacitás kihasználása mellett stabil működést produkáljon, továbbá az energiaveszteség minimalizálása melletti hatékonyság növelése.

A másik stratégiai irány a megtermelt villamosenergia lehető legnagyobb arányban helyben történő felhasználására összpontosít, ebben az esetben az energiatárolás és az akkumulátorok szerepe jelentős. A jövőben az akkumulátoros tárolóval rendelkező napelemes rendszerek sokkal fontosabbak lesznek. Alkalmazásuk csökkenti a hálózat terhelését, mivel a csúcsidőben megtermelt és fel nem használt villamos energia helyben tárolható, és ezáltal redukálható a nagy távolságra történő átviteléből adódó veszteség. Az optimálisan megválasztott akkumulátorkapacitás jobb teljesítményt nyújthat az energiarendszerek számára. Ezenkívül az

akkumulátorok növelik a háztartások önfogyasztását és autonómiáját, ezáltal hozzájárulnak az energiaköltségek csökkentéséhez is.

Az utóbbi években a napelemes rendszerek telepítésére vonatkozó jogszabályok dinamikus változása nehezen tették követhetővé az előírásokat, amelyek jelentősen növelték a bizonytalanságot és a bizalmatlanságot azok körében, akik érdeklődnek a megújuló energia felhasználása iránt. Egy napelemes rendszer jelentős beruházás, amely komoly terhet róhat egy család költségvetésére, ezért fontos, hogy átlátható módon követhessük a kapcsolódó költségeket és kötelezettségeket.

A megfelelő napelemes rendszer kialakításához elengedhetetlen, hogy minden szempontot figyelembe vegyünk. Egy rendszer kiválasztásánál általában a beruházási költség, valamint a megtérülési idő azon paraméterek, amelyek a vizsgálat középpontjában állnak. Ezek a számítások sok esetben csak egyszerűsített módszerrel történnek, amellyel adott esetben pontatlan eredményt adnak az adott rendszer jellemzésére, mivel nem veszik figyelembe az évek alatt a rendszerben bekövetkező tényleges változásokat. Annak érdekében, hogy egy rendszert teljes egészében optimalizálni tudjunk, nem csak gazdasági oldalról, hanem energiaellátás biztonsági és technológia oldalról is szükséges megvizsgálni. Mindemellett elengedhetetlen egy döntéstámogató rendszer kidolgozása, hogy átfogó képet kapjunk az egyes rendszerekről és nem csak gazdasági-gazdaságossági oldalról vizsgáljuk azokat.

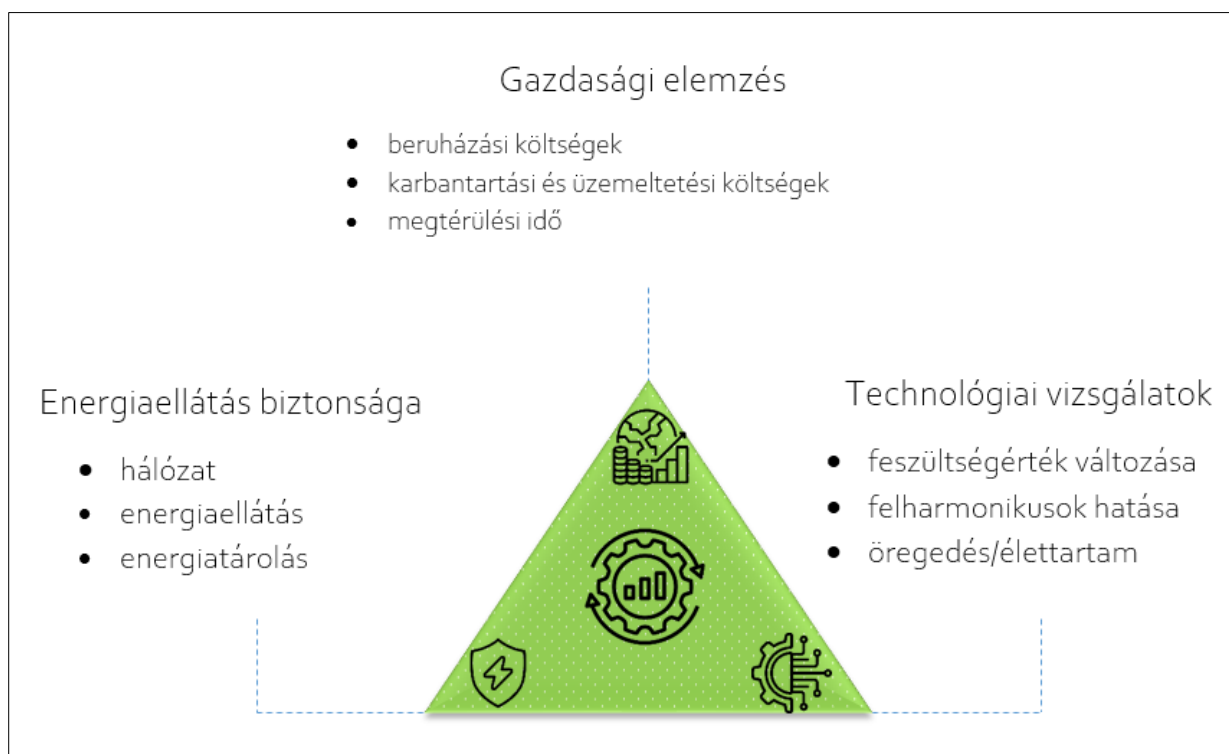
Munkám célja ennek a döntéstámogató rendszernek a kidolgozása volt, melynek kapcsán felállítottam egy háromszögmodellt, amely segít átfogó képet adni egyes rendszerek átláthatóságáról három szempont alapján. A háromszögmodell egy olyan döntéstámogató, döntéshozó módszer, amely lehetővé teszi a különböző rendszerek értékelését három tudományterületi megközelítés szempontjából. A modell egy optimumkeresés eljárást valósít meg.

Napelemes rendszereknél az optimális rendszer megtalálásának folyamata során számos olyan kérdés merül fel, amelyeket szükséges több oldalról is megvizsgálni. Több módszer is rendelkezésre áll, hogy egy napelemes rendszert méretezzünk és kiválasszunk, ám sok olyan tényező nincs vizsgálva, amely adott esetben megváltoztatja a kiválasztás eredményét. Mindezek figyelembevételével célszerű az egyes rendszereket tovább vizsgálni és az egyes összefüggéseket külön-külön ellenőrizni, összehasonlítani és értelmezni. Ahhoz, hogy a döntéshozatali folyamat során minden fontos és látszólag kevésbé fontos tényező hatása és súlya felismerhető legyen; tehát egy átfogó modell alkalmazása válik indokolttá.

## 1.2. Háromszögmodell általános felépítése

A háromszögmodell elvi felépítését mutatja a *1. ábra*. Alappillérei az Energiaellátás biztonsága, Technológiai vizsgálatok és a Gazdasági elemzés. Mindhárom pillér mélyebb vizsgálatára további három alpont került bevezetésre, melyek részletesen vizsgálják a rendszerek egyes tulajdonságait. Mindegyik alpont esetén egy olyan pontozási rendszert kellett kidolgozni, amely ötös számrendszeren alapul [16]. Ennek megfelelően egy adott rendszer minden egyes alpont esetén az

értékelési szempont szerint a '0', az '1', a '2', a '3' vagy a '4' pontszámokat kaphatja. Minden egyes terület pontszámaihoz tartozó részletesebb kifejtés az adott pillér és azon belül is az alpontok tárgyalásánál kerül mélyebb bemutatásra.



*1. ábra Háromszög modell elvi felépítése*

A dolgozatom felépítése az irodalmi áttekintéssel indul, amelyben a napelemek fajtáit részletezem. Ezután a napelemek működési elvének rövid bemutatását követően, a napelemes rendszerek típusait mutatom be. A szakirodalmi áttekintés után a háromszögmodellben alkalmazott pillérek felépítését taglalom részletesen.

Az első pillér az energiaellátás biztonsága. Az egyik vizsgálandó terület e pilléren belül a napelemes rendszerhez tartozó villamos hálózati csatlakozás és az ahhoz tartozó egyéb bővítések. A második alpont ezen a területen a tápellátás elvesztésére vonatkozik. A felhasználók számára az energiaellátás folytonossága nem egy elhanyagolható tényező. Ez a pont azt vizsgálja, hogy a napelemes rendszerek miként tudják szerteágzóbbá tenni az energiaellátást amiatt, hogy növekedjen a fogyasztók ellátottsága és adott esetben minél kevesebb legyen az energiakiésés. A harmadik pont ezen a pilléren belül a rendszer energiatároló képességét vizsgálja. Tehát a rendszer alkalmas-e az energia tárolására vagy sem és milyen mértékben.

A második pillér a napelemes rendszerek technológiai vizsgálata. Ezen belül az egyik legfontosabb pont a feszültségérték változása. Ennek az értéknek a csökkenése és növekedése is negatívan hat a hálózatra csatlakozott eszközökre, a napelemes rendszerre illetve magára a hálózatra is. A második vizsgált terület e pilléren belül a felharmonikusok hatása, amely szintén negatív hatással van a hálózathoz csatlakozó eszközökre, főleg abban az esetben, ha az egyes

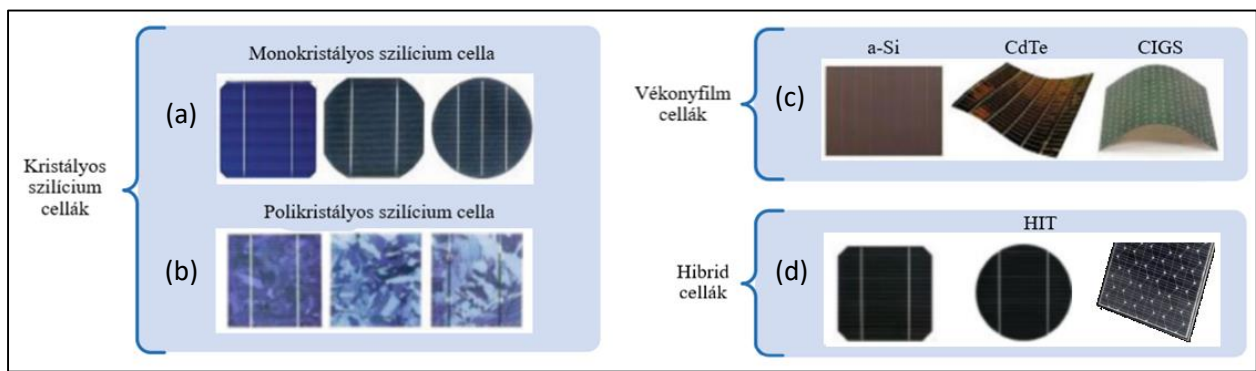
eszközök által okozott felharmonikusok egymásra is hatást gyakorolnak. A harmadik terület pedig az öregedés és élettartammal kapcsolatos vizsgálat.

A harmadik pillér a gazdasági elemzés. A napelemes rendszerek beszerelése egy jelentős induló költséggel jár, viszont az élettartam növelése érdekében ezeknél a rendszereknél is érdemes a karbantartásra figyelni. A rendszeres panel tisztítás elmaradása nem csak teljesítmény romlást, hanem adott esetben maradandó károkat is okozhatnak a panelekben. Mindezeket összevetve a lehető legrészletesebb számítás alapján érdemes kiszámolni a megtérülési időt a napelemes rendszereket tekintve.

A háromszög modell ezeket a területeket veszi figyelembe és ez alapján ad vissza egy mérőszámot a rendszer tulajdonságaiból, illetve egyéb felhasználói igényekből, amely segít az egyes rendszerek összehasonlíthatóságában.

## 2. A NAPELEMEK TÍPUSAI

Manapság a napelem cellák elsődleges elemei a félvezetők, bár a kutatók más anyagokkal is próbálkoznak, beleértve a szerves polimereket is. A napelem celláknak alapvetően négy fő típusa létezik (2. ábra). A kristályos szilíciumnak két variációja, a monokristályos és a polikristályos, továbbá a vékonyréteg- és hibridcella [2, 7].



2. ábra Szilícium alapú (a) mono- és (b) polikristályos cellák, (c) vékonyfilm cellák, (d) hibrid napelem cellák [2]

### 2.1. Monokristályos napelem cellák

A monokristályos (egykristályos) szilíciumot a Czochralski-eljárásból készült hengeres geometriából vágják ki. A napelemeket álnégyzet alakúra vágják, hogy minimalizálják a feldolgozott monokristályos szilícium hulladékát. Ezért egy monokristályos szilíciumból előállított napelem modulban, a modul területének egy része nincs lefedve napelem cellával [9]. A teljes cella egy irányba van igazítva, ami azt jelenti, hogy amikor a nap ragyogóan süt rájuk, a megfelelő szögben, akkor rendkívül hatékonyak. Egységesebb feketés színűek, mert elnyelik a fény nagy részét. A tiszta cellák nyolcszögletűek, bár vannak kerek és félig kerek cellák, így a sarkokban fel nem használt hely van, ha sok cellából készítenek napelem modult. A monokristályos cellák legfőbb előnye a nagy, körülbelül 20-24 %-os a hatásfok, bár a gyártási folyamat bonyolult és költséges [2, 3]. Laboratóriumi körülmények között ez az érték akár 30-40 % is lehet [10]. A tiszta szilícium ostya előállításának költsége valamivel több, mint a polikristályos cellaké, de manapság nincs sok különbség az árban [2, 7, 8].

## 2.2. Polikristályos napelem cellák

Polikristályos vagy többkristályos szilíciumban a kristályszerkezet nem homogén eloszlású. A napelem cellák szemcsehatárokkal rendelkeznek. A gyártási folyamat során az olvadt szilíciumot grafittegelyekbe öntik, majd a hűtést szabályozva kristályosítják ki. A kristályosodási folyamat a hűtési folyamat közben több pontból indul meg [7, 8, 11]. Az ostyákat (kb. 180–350  $\mu\text{m}$  vastagságúak) négyzet alakú rudakból vágják ki és komplett cellákká állítják össze [9]. A polikristályos napelemek olcsóbbak, mint a monokristályos napelemek, de ezeknek a napelemeknek alacsonyabb a hatékonyságuk a napelemekben jelenlévő szemcsehatárok miatt. Mivel az egyes kristályok nem feltétlenül tökéletesen illeszkednek egymáshoz, mint a monokristályos cellák az előző esetben, így veszteségek vannak a cellák közötti rések miatt. Ez az eltérés azonban bizonyos körülmények között segíthet, mivel a cellák nem csak a megfelelő szögből megvilágítva tudnak működni, hanem minden szögből tudják a fényt hasznosítani, akár szórt fényenél vagy gyenge megvilágítás esetén is. A panelek megjelenése is más, a véletlenszerű kristályelrendezés miatt. A panelek kissé kékesebbek, mivel visszatükrözik a fény egy részét. A polikristályos cellák korábban olcsóbbak voltak, mint a monokristályos cellák az egyszerűbb gyártási folyamatuk miatt, de manapság áruk nagyon hasonlít a monokristályos cellákhoz, bár kissé alacsonyabb a hatásfokuk (kb. 18–20 %) [2, 7, 8]. Ez az érték laboratóriumi körülmények között 20–22 % [10].

## 2.3. Vékonyfilm napelem cellák

A vékonyfilm (egyes szakirodalmakban: amorf típusú) napelemek második generációs napelemek, amelyeket egy vagy több fázisban, vékony film réteget gőzölnek fel egy hordozóra, például üvegre, műanyagra vagy fémre. A filmvastagság néhány nanométertől (nm) a tíz mikrométerig ( $\mu\text{m}$ ) változik. Így ez a fotovoltaiikus anyagréteg sokkal vékonyabb, mint bármely más rivális technológia, például a kristályos szilícium napelem (c-Si), amely legfeljebb 200  $\mu\text{m}$ -es ostyákat használ a c-Si-sejtek első generációjához. Ez az oka annak, hogy „vékonyrétegű” PV napelem technológiának hívják őket. Ez a funkció lehetővé teszi, hogy a vékonyréteg-cellák rugalmasak, sokoldalúak, kisebb súlyúak legyenek. Jó teljesítményt nyújtanak közvetett fény és magas hőmérsékletű alkalmazásokban egyaránt. A jellemző hatékonyság körülbelül 6–12 %, de ezeket könnyebb és következképpen olcsóbb előállítani, mint a kristályos szilícium napelemeket [2, 4]. Van azonban oka annak, hogy a vékonyrétegű napelem modulok még nem váltották ki a régebbi típusokat. A hatékonyságon kívül vannak olyan vékonyréteg-anyagok, amelyek teljesítményromlást mutattak az idő múlásával, stabilizált hatásfokuk 15–35 %-kal alacsonyabb, mint a kezdetben. A vékony fólia sokféle hordozóra rögzíthető, mind merev, mind rugalmas felületre egyaránt, így ideális ívelt és egyenetlen felületekhez is. Valamint üveg felületekre is felhordható. Három elterjedt vékonyréteg-napelem van a kereskedelemben, köztük az amorf vékonyréteg-szilícium (a-Si), amely még szilícium, de a kristályos celláktól eltérő formában, a kadmium-tellurid (CdTe) és a réz-indium-gallium diSelenide (CIGS vagy egyszerűen CIS). Az amorf vékonyfilm szilícium hatásfoka 6–8 % közelében van, és elviseli az extrém meleget is, a szilícium-mentes CdTe és CIGS cellák nagyobb hatásfokkal, 9–11 % és 10–12 %. Viszonylag kis

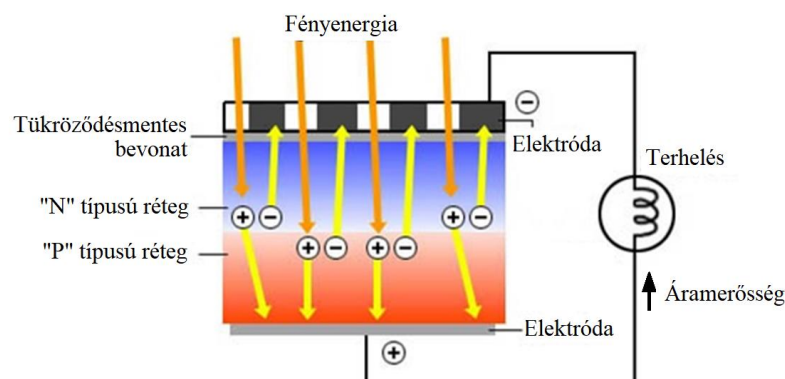
mértékben befolyásolja a hőmérséklet ezt az értéket [2, 4, 5]. A legmagasabb laboratóriumi hatásfok a vékonyréteg technológiáknál: 21 % a CdTe esetén és 20,5 % a CIGS napelemeknél [10]. Az egyéb vékonyréteg-technológiákat, amelyek még mindig a folyamatban lévő kutatások korai szakaszában vannak sok esetben korlátozott kereskedelmi hozzáférhetőséggel rendelkeznek. Továbbá gyakran feltörekvő vagy harmadik generációs fotovoltaiikus cellák közé sorolják. Ide tartoznak a szerves, a fényérzékeny festett cellák (dye-sensitised cells, DSC) és polimer napelemek, valamint a kvantumpont, a réz-cink ón-szulfid, a nanokristály, a mikromorf és a perovszkit napelemek [2, 12, 13, 14, 15].

#### 2.4. Hibrid napelem cellák

A negyedik típusú PV-elem olyan hibrid cellákból áll, amikor két különféle technológiát ötvöznek egy cellába: egy kristályos szilíciumcella, amely két réteg amorf „vékony film” szilícium közé kerül. Egyes külföldi szakirodalmak HIT-heterojunction technológiának nevezik. Ezen technológia legfontosabb jellemzője, hogy az amorf emitter és a kristályos bázis közé egy vékony belső amorf szilíciumréteg kerül beillesztésre. A hatásfok akár a 23-34 %-ot is elérheti. A hibrid panelek azonban sokkal drágábbak, mint a mono- vagy polikristályos panelek, így a megtermelt energia növekedése még nem indokolja ennek a PV technológiának a többlet beruházási költségeit.

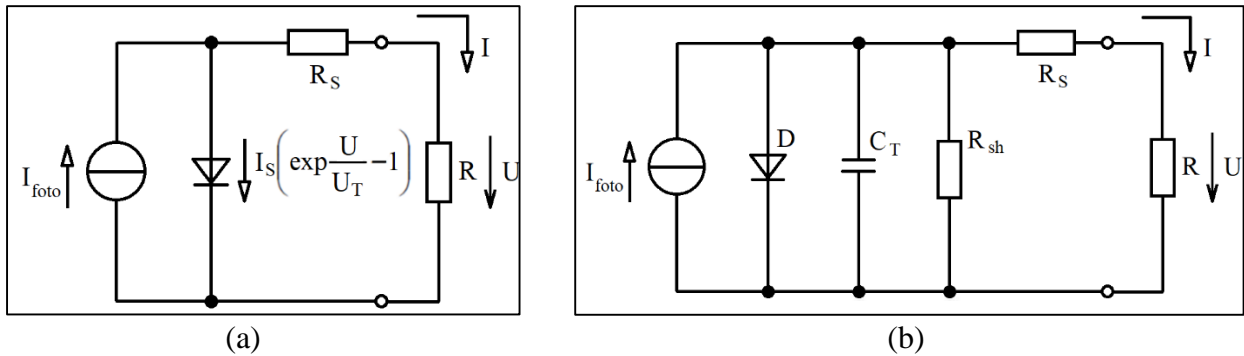
#### 2.5. Napelem cella elektronikai modellje

A napelem cella két különböző szennyezésű, egymással összekapcsolt, vékony rétegű félvezető anyag (3. ábra). A két réteg között határréteg helyezkedik el, amelyet p-n átmenetnek neveznek. A becsapódó foton energiájának hatására többlettöltéshordozók keletkeznek a határrétegben. A két réteg töltéshordozói csak egy külső áramkörön keresztül képesek rekombinálódni, a köztük lévő potenciál lépcső miatt. Ha a p- és n-típusú félvezető rétegeket kapcsolatba hozzuk, egy p-n átmenet keletkezik: a felesleges elektronok az n-típusú félvezetőből a p-típusúba diffundálnak. Ha az átmenet megvilágításra kerül, úgy az elektronok a fotonokat elnyelik. Az így szerzett energia fedezni fogja a kilépési munkát, a kötés felszakad. A szabad elektronok az elektromos tér hatására az n- típusú félvezető felé, a keletkezett lyuk pedig az ellentétes irányba indul. Az áramkört zárva egyenáram folyik [18, 19, 20].



3. ábra Napelem cella működési modellje

Tehát, ha a fotonok energiája elég nagy, akkor a napelem belsejében úgynevezett fotoáram jelenik meg.



4. ábra A napelem (a) egyszerűsített és (b) valóságos helyettesítő kapcsolása

A napelem ideális/egyszerűsített és valóságos helyettesítő kapcsolását mutatja a 4. ábra. Az egyszerűsített modell nem tartalmaz a terhelő ellenálláson kívül kapacitív és ohmikus áramköri elemet, csak diódát és a vele párhuzamosan kapcsolt áramgenerátort. A valóságos helyettesítő kép figyelembe veszi a napelem felületén keletkező veszteséget ( $R_{sh}$ ), valamint a napelem belső áramvezetésében és csatlakozási kialakításából származó veszteségeket ( $R_s$ ), továbbá a diódával párhuzamosan kapcsolt kondenzátorral ( $C_T$ ), amely fellépő parazitakapacitást hivatott jelképezni [19, 24]. A további egyenletek felírásánál az egyszerűsített helyettesítő kapcsolást vettem figyelembe [11, 16, 17].

Ha a napelemet egy  $R$  ellenállású fogyasztóval terheljük, akkor a napelem sarkain az üresjárási értéknél kisebb feszültséget mérhetünk, mivel a belső potenciálgát csökken. Az átmenet áramát a megvilágítással arányos fényáram ( $I_{foto}$ ) és a termikus töltésmozgásból eredő sötétáram különbségeként írhatjuk fel [11, 16, 17, 25].

$$I(U) = I_{foto} - I_S \left( \exp \frac{U}{U_T} - 1 \right) \quad (1)$$

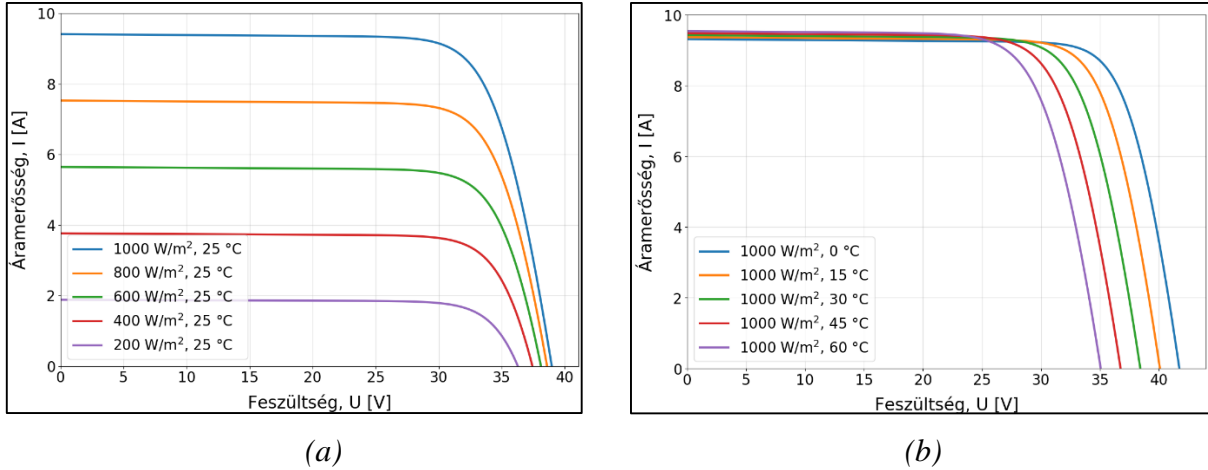
ahol  $I_S$  a telítési áram  $U_T$  a termikus feszültség. Amennyiben a terhelő ellenállás értéke végtelen nagyságú  $R_t = \infty$ , abban az esetben  $I_{Rz} = 0$  esetén megkapjuk az  $U_{\bar{u}}$  üresjárási feszültséget. Valamint  $R_t = 0$  esetén  $U_{\bar{u}} = 0$  helyettesítéssel megkapjuk a zárlati áramot  $I_{Rz}$ .

$$I_{Rz} = I_{foto} \quad (2)$$

$$U_{\bar{u}} = U_T \cdot \ln \left( \frac{I_{foto}}{I_S} + 1 \right) \quad (3)$$

Tehát a rövidzárási áram arányos a megvilágítás intenzitásával, illetve az üresjárási feszültség a megvilágítás intenzitásának logaritmusával arányos. A 5. ábrán látható, hogy a napelem panelek villamos tulajdonságaira milyen hatással van a megvilágítás és a hőmérséklet.





5. ábra A (a) megvilágítás és (b) hőmérséklet hatása a napelem panelre

A napelem teljesítménye a kimenetére kapcsolt R ellenálláson átfolyó áramerősség és a kapcsain mérhető feszültség szorzataként számítható ki.

$$P = U \cdot I = I_R \cdot U - I_S \cdot U \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T} - 1\right) \quad (4)$$

Ahol P a hasznos teljesítményt jelenti. Az adott megvilágítás mellett maximálisan levehető teljesítmény értékéhez szükséges megkeresni az egyenlet szélső értékét. Ehhez a  $\frac{\partial P}{\partial U} = 0$  feltételt vesszük figyelembe és megkeressük az egyenlet megoldását. Ebből kifejezhető a maximális teljesítményhez tartozó  $I_m$  munkaponti áramerősség és az  $U_m$  munkaponti feszültség.

$$I_m = -\frac{U_m}{U_T} \cdot I_S \cdot \exp\left(\frac{U_m}{U_T}\right) \approx -I_{Rz} \cdot \left(1 - \frac{U_T}{U_m}\right) \quad (5)$$

$$U_m = U_{\ddot{u}} - U_T \cdot \ln\left(1 + \frac{U_m}{U_T}\right) \quad (6)$$

Az optimális terhelő ellenállás értéke kifejezhető az Ohm törvény segítségével.

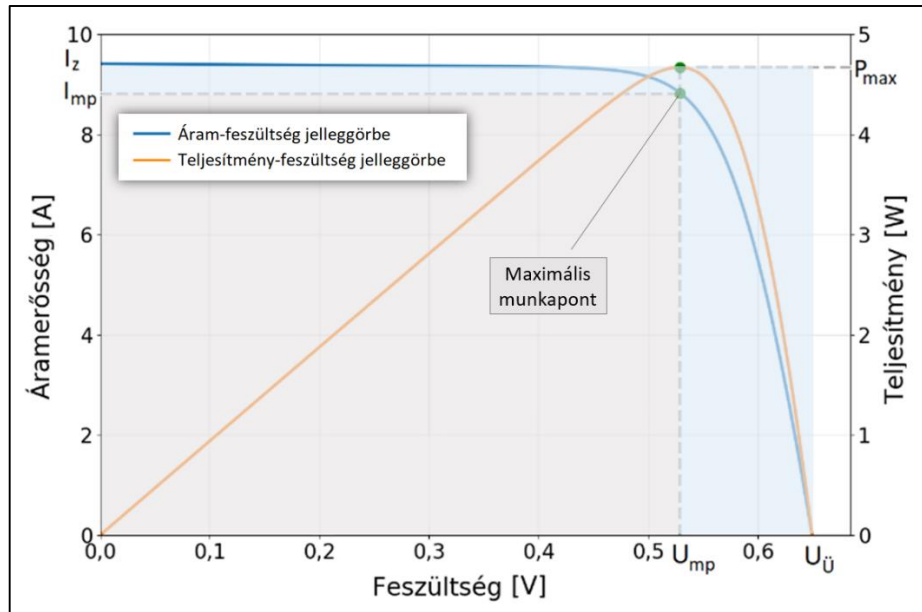
$$R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U_T}{I_S \cdot \exp\left(\frac{U_m}{U_T}\right)} = \frac{U_T}{I_m + I_S + I_{Rz}} \quad (7)$$

ahol  $R_m$  az optimális értékű munkaponti ellenállás. A maximálisan kivehető teljesítmény a 6. ábrán szürkével jelzett terület. A kitöltési tényező megmutatja, hogy a munkaponti feszültség és munkaponti áramerősség szorzata hogyan viszonyul az üresjárási feszültség és rövidzárási áramerősség szorzatához. Az ábrán az utóbbi kékkel jelzett terület. Tehát a két téglalap területének hányadosa [11, 16, 17, 21, 22].

$$\varphi[\%] = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{\ddot{u}} \cdot I_{Rz}} \cdot 100\% \quad (8)$$

A napelem hatásfoka pedig a maximálisan kivehető teljesítmény és a beeső fényteltjesítmény hányadosából adódik [6, 11, 16, 17, 23, 26].

$$\eta[\%] = \frac{P_m}{P_{f\acute{e}ny}} = \frac{U_m \cdot I_m}{P_{f\acute{e}ny}} \cdot 100\% = \frac{U_{\ddot{u}} \cdot I_{Rz} \cdot \varphi}{P_{f\acute{e}ny}} \cdot 100\% \quad (9)$$

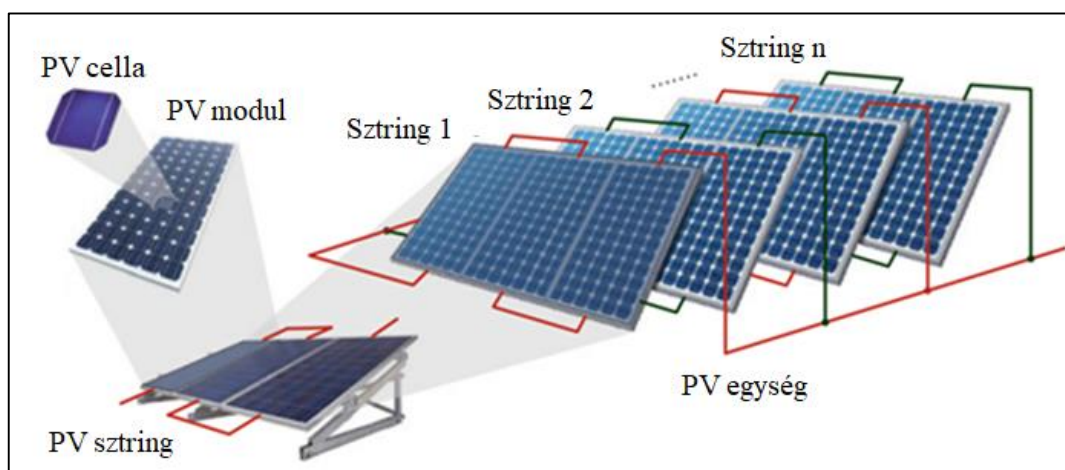


6. ábra Áram-feszültség és teljesítmény-feszültség kapcsolata

A kitöltési tényező értéke a gyakorlatban használt napelemek esetén 75 % és 85 % közé tehető, de ez jelentősen függ a napelem élettartamától, ugyanis ez az érték folyamatosan csökken az öregedéssel.

### 3. A NAPELEMES RENDSZEREK FELÉPÍTÉSE

A napelemes rendszerek építőköve a napelem panel, amely cellákból épül fel. Egy napelem cella mérete rendszerint  $60$  és  $300\text{ cm}^2$  között változik, amelyek kapcsolófeszültsége  $0,5\text{--}0,6\text{ DC}$  közötti érték, méretétől függetlenül. A PV-cellák jelenlegi áramleadóképessége rendszerint  $1$  és  $5$  amper között változik, amely a méret és a hatékonyság függvényében változik. A kimeneti teljesítmény szintén arányos a cellafelületre érő napfény intenzitásával. Ez a legtöbb alkalmazáshoz nem elegendő teljesítmény. Következésképpen a cellákat modulokká (amelyet egyes szakirodalmak panelnek neveznek) egyesítik. A napelem modulok sorba kötésével stringeket hoznak létre, azzal a céllal, hogy növeljék feszültségüket, a nagyobb feszültségű alkalmazások elérése érdekében (7. ábra). Végül a stringeket sorosan/párhuzamosan, alacsony/nagy feszültség mellett kombinálva akár több tíz megawatt (vagy annál is nagyobb) napelemes rendszer képezhető [2, 28].



7. ábra A napelemes rendszer egyenáramú oldalának részegységei [2]

Alapvetően három féle típusú rendszert különböztetünk meg. Az első a szigetüzemű napelemes rendszer, amely nem csatlakozik villamos elosztó hálózathoz. A szigetüzemű napelemes rendszerek esetében csak a napelemes rendszer által megtermelt villamos energia áll a felhasználók rendelkezésére. Az energiát vagy közvetlenül felhasználják a fogyasztók vagy egy akkumulátor tárolja [29, 30, 31]. A második a hálózatsatolt napelemes rendszer. A hálózatra kötött napelemes rendszerek esetén nincs saját energiatároló. A megtermelt energia egy része a belső hálózat fogyasztóihoz kerül. A megtermelt, de fel nem használt villamosenergiát az inverterek egy úgynevezett kétirányú fogyasztásmérő készüléken keresztül táplálják be a villamosenergia hálózatba [32, 33]. A harmadik a hibrid napelemes rendszer, amely a szigetüzemű és a hálózatra kapcsolt rendszerek kombinációjaként működnek, melynél nem feltétel, de nem is

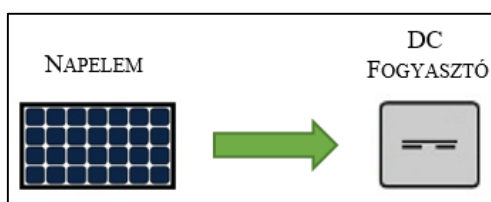
kizárt a kétirányú fogyasztásmérés, amely attól függ milyen az éppen aktuális szabályozás [34, 35]. Amennyiben elérhető a napenergiából megtermelhető villamos energia, akkor a töltésvezérlő prioritásában az első az önfogyasztás és a saját tárolókapacitás feltöltése.

### 3.1. Szigetüzemű rendszerek

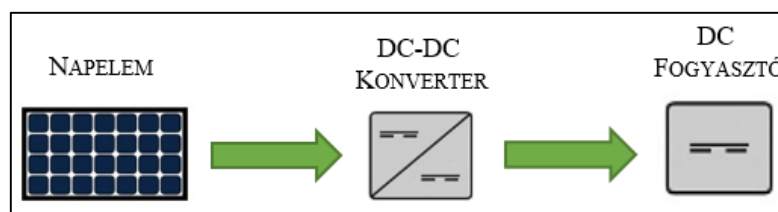
Az önálló PV rendszerek autonóm rendszerek, amelyek a közüzemi hálózattól függetlenül működnek. Az önálló napelemes rendszerek „Off-grid rendszerek” vagy szigetüzemű néven is ismertek, mivel nem csatlakoznak a hálózathoz. A szigetüzemű napelemes rendszerek két alkategóriába sorolhatók. Az egyik a közvetlen-csatolású szigetüzemű napelemes rendszereket foglalja magába, a másik pedig az akkumulátortárolós energiatárolót tartalmazó szigetüzemű napelemes rendszerek [10, 27].

#### 3.1.1. Közvetlen csatolású szigetüzemű napelemes rendszerek

A közvetlen csatlakozású szigetüzemű napelemes rendszer a napelem panelekből és fogyasztókból állnak (8. ábra). A napelemek villamos energiát termelnek és egyenáramú fogyasztókat látnak el. Ezen rendszerekhez nincs csatlakoztatva semmilyen akkumulátor vagy hálózat. A rendszer egy vagy több napelemet tartalmaz, továbbá leválasztó kapcsolót, túláramvédelmet, illetve az elektromos fogyasztót. Ezek voltak az uralkodó napelemes rendszerek, mielőtt a hálózatcsatolt rendszerek egyre népszerűbbé váltak. A közvetlen csatolású napelemes rendszereket nagyon sok területen alkalmazzák, mint például órák, számológépek, ventilátorok, telekommunikáció egyes területei, műholdak. Bizonyos teljesítményeknél DC-DC konverter alkalmazása válhat szükségessé (9. ábra), ezáltal jobban ki tudják használni a rendelkezésre álló napelemes teljesítményt [27, 28].



8. ábra Közvetlen csatolású szigetüzemű napelemes rendszer

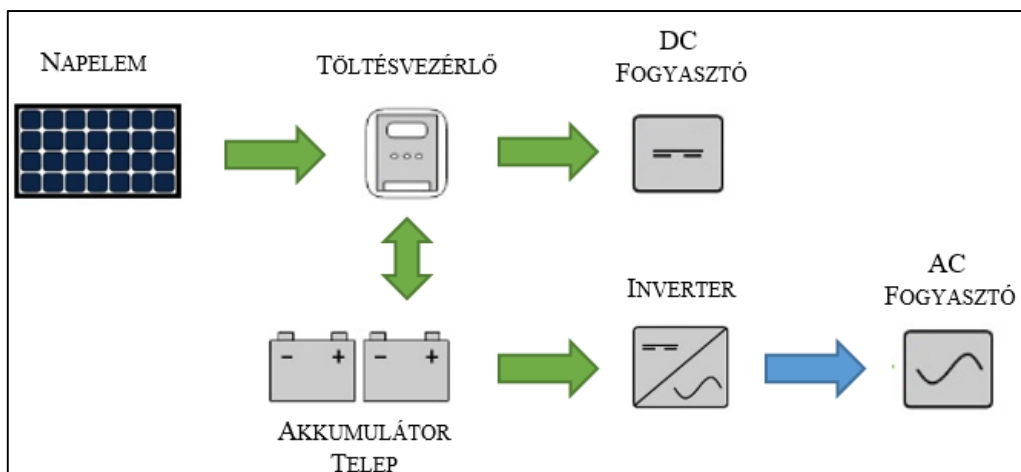


9. ábra Közvetlen csatolású szigetüzemű napelemes rendszer DC-DC konverterrel

#### 3.1.2. Akkumulátortárolós szigetüzemű napelemes rendszerek

A közvetlen csatlakozású szigetüzemű rendszerek egyik hátránya, hogy nem képesek éjszakai vagy felhős napokon, továbbá elégtelen megvilágítás mellett működni. Ezt a hátrányt kiküszöbölhetjük egy akkumulátoros tárolóval ellátott napelemes rendszer használatával (10.

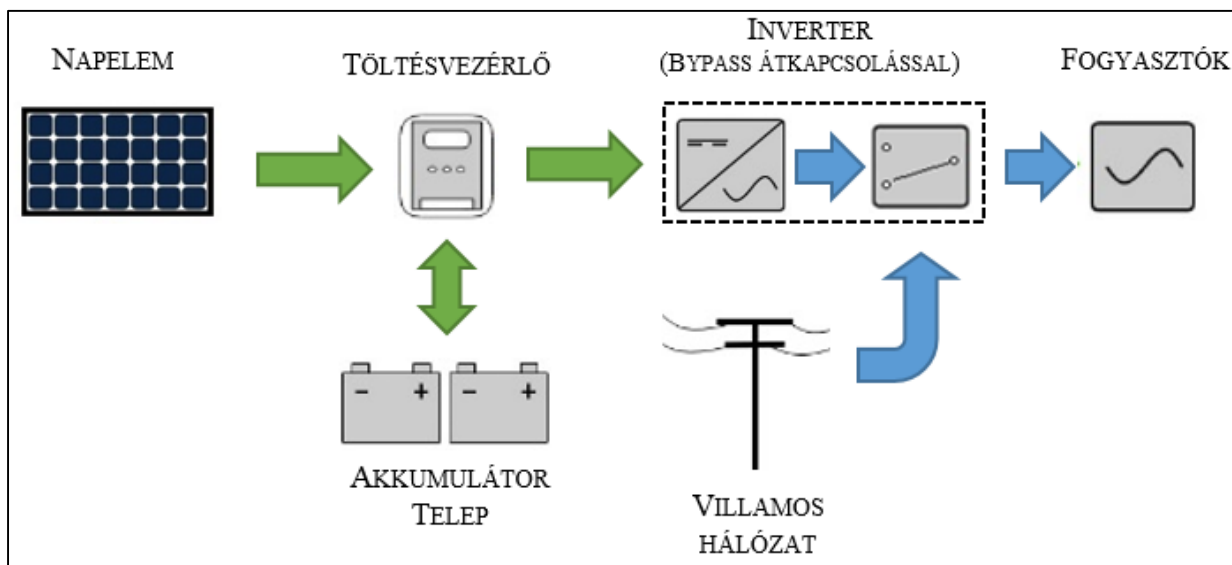
ábra). Előnye, hogy tárolja az energiát, amely szükség esetén biztosítja a fogyasztók felé. A rendszer megbízhatóságát az akkumulátortöltő és a hozzá tartozó akkumulátorok, valamint a megfelelően megválasztott töltési jellemzők határozzák meg, amelyek hosszú távon biztosíthatják az akkumulátor élettartamát. A rendszer méretezésénél figyelembe kell venni továbbá, hogy nem csak fogyasztóinkat kell a folyamatos energiaellátáshoz elegendő energiával ellátni, hanem a napsütéses órákban is biztosítani kell a tároló akkumulátorok töltéséhez szükséges villamos energiát. Ez egyes esetekben a napelem panelek túlméretezését teheti szükségessé [29, 30].



10. ábra Közvetlen csatolású szigetüzemű napelemes rendszer

### 3.1.3. Hálózat-interaktív szigetüzemű napelemes rendszer

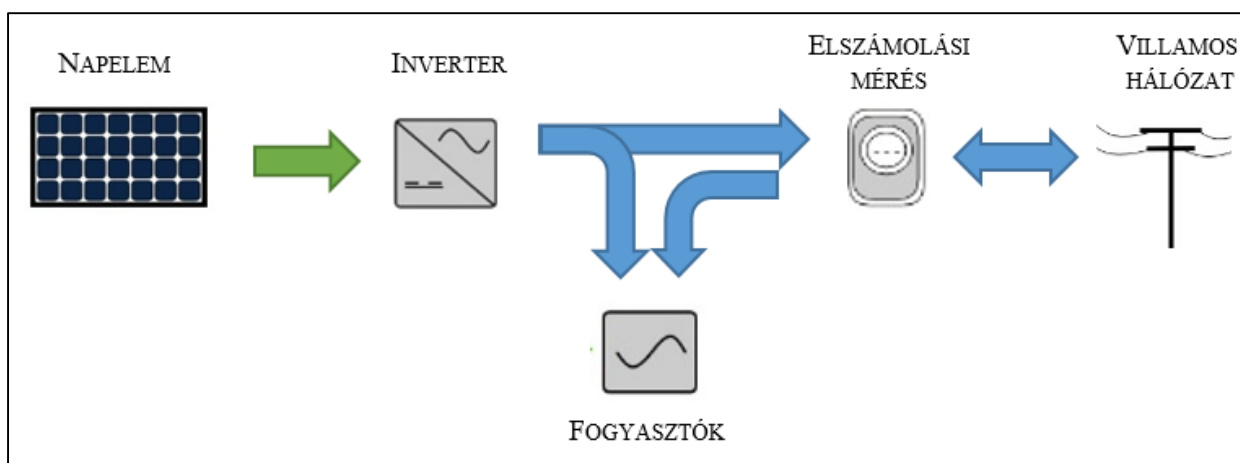
A korábban felsorolt rendszereken kívül még szükséges megemlíteni a hálózat-interaktív szigetüzemű napelemes rendszert, melyet gyakran szigetüzemű hibrid rendszernek neveznek (11. ábra). Ezen a rendszereknél nem szükséges engedélyeztetés, mivel a hálózati visszatáplálásra nincs lehetőség. A hálózati csatlakozást, mint „bypass” használja, ha nincs elegendő napenergia és akkumulátor töltöttség, akkor is el tudja látni a csatlakoztatott fogyasztókat villamos energiával.



11. ábra Hálózat-interaktív szigetüzemű napelemes rendszer

### 3.2. Hálózatsatolt napelemes rendszerek akkumulátor telep nélkül

Az akkumulátor telep nélküli hálózatsatolt napelemes rendszerek közvetlenül össze vannak kapcsolva a villamos hálózattal (12. ábra). Két irányú fogyasztásmérő van alkalmazva a rendszerben, tehát, ha a napelemes rendszer által megtermelt villamos energia több, mint amit az épület vagy létesítmény fel tud használni az adott pillanatban, akkor betáplálásra kerül a közcélú villamos hálózatba és az elszámolás az aktuális szabályozás és szerződés értelmében történik. Ezek a rendszerek a hálózattal szinkronban működnek. Abban az esetben, ha van egy áramszünet a hálózaton, az inverter a kimeneteit lekapcsolja [32, 33]. Azzal, hogy a korábbi jogi szabályozásban az áramszolgáltatónak kötelessége volt átvenni a fel nem használt napenergiából megtermelt villamos energiát, továbbá az éves szaldós elszámolással felfogható a villamos közüzemi hálózat egy energiátároló eszközként is. Amelynél a nyáron fel nem használt és visszatáplált villamos energiát, elszámolási szempontból télen felhasználhatjuk. Ez alapján nem szükséges lényegesen túlméretezni a paneleket, hogy a téli hónapokra is biztosított legyen az ellátás, mint a szigetüzemű rendszernél, egyes esetekben. Az éves szaldó rendszer megszüntetésével sokkal kedvezőtlenebb lett a hálózatsatolt rendszerek megtérülési ideje.

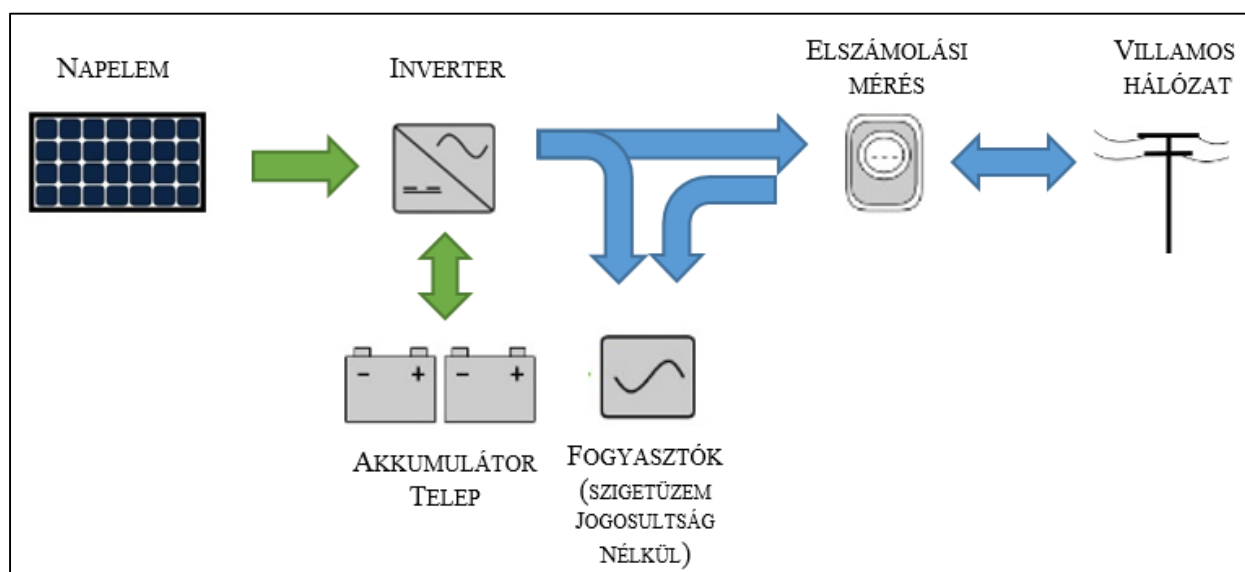


12. ábra Hálózatsatolt napelemes rendszer akkumulátor telep nélkül

### 3.3. Hálózatsatolt napelemes rendszerek akkumulátor teleppel (Hibrid)

A rendszer autonómiájának növelése érdekében az előző két főbb rendszer előnyös tulajdonságait szükséges kombinálni. A megfelelő rendszer és azon belül a rendszerelemek kiválasztásával olyan energiaellátás biztonságot tudunk kialakítani, amelyet egy adott létesítmény igényel. A hibrid rendszerek esetén több konfiguráció lehetséges, amelyeknél nem csak a beruházási költség a meghatározó, hanem az egyes áramszolgáltatók engedélyezési szabályozása is [34, 35, 36].

### 3.3.1. Hibrid napelemes rendszer



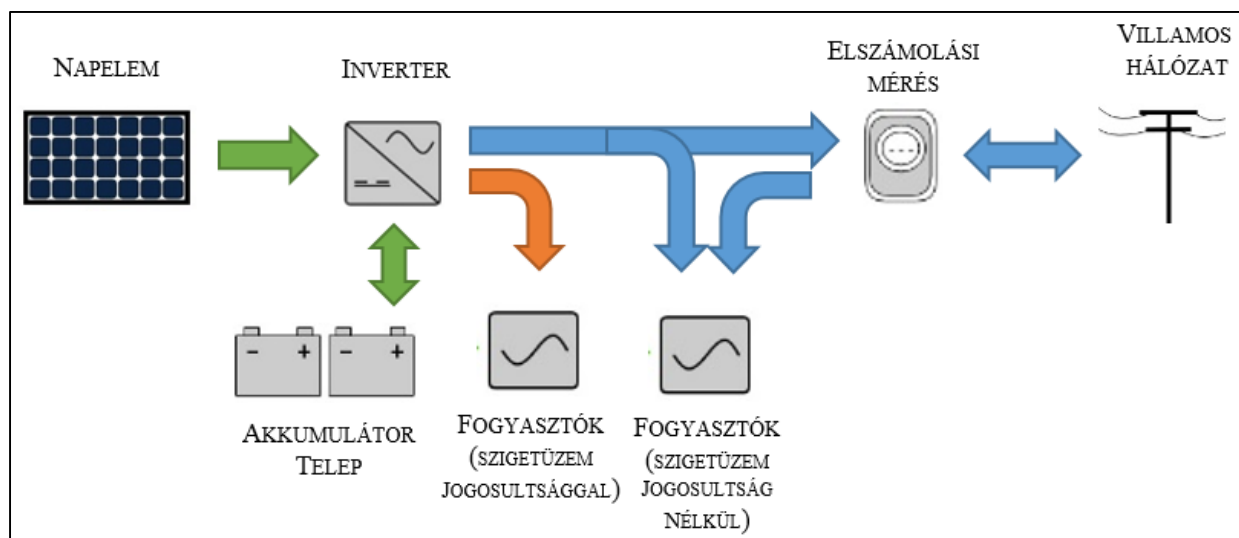
13. ábra Hibrid napelemes rendszer

A hibrid rendszer esetén a hálózatsatolt rendszer ki van egészítve energiátárolóval. Tehát abban az esetben, ha nincs önfogyasztása az épületnek vagy ingatlannak, akkor lehetőség van az akkumulátor telep töltésére (13. ábra). Ezt az energiát pedig fel lehet használni, amennyiben nincs elérhető napenergiából származó villamos energia. Abban az esetben, ha az akkumulátor telep fel van töltve, de továbbra is van elérhető napenergia, az aktuális jogi szabályozástól függően tudunk visszatáplálni a közüzemi hálózatba. Tehát az a két eset lehetséges, ha a hibrid inverter csak vételezni tud a villamos hálózatról vagy vissza is tud táplálni. Fontos még megjegyezni, hogy a villamos hálózat megszűnésével a teljes rendszer lekapcsol és az inverter nem tud tovább szolgáltatni villamos energiát, még abban az esetben sem, ha van elérhető energia a napelem vagy akkumulátor oldalon [37, 38, 39, 40, 41].

### 3.3.2. Szigetüzemre is alkalmas hibrid napelemes rendszerek

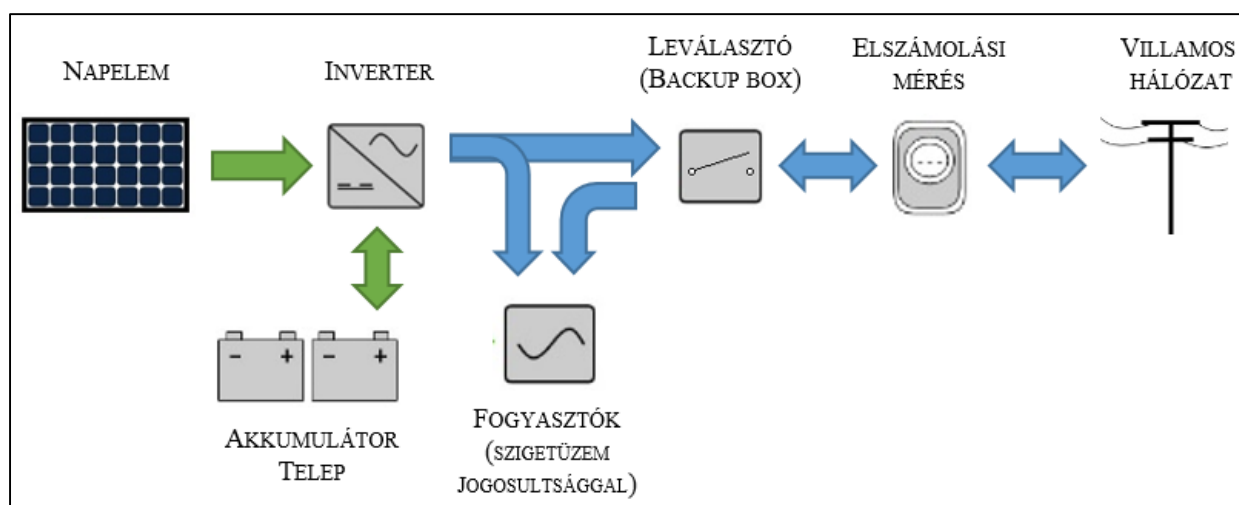
Ahhoz, hogy a létesítmény önálló legyen és energiaellátás szempontjából autonóm, olyan rendszer kialakítása szükséges, amely részben vagy egészben tud szigetüzemként is működni, például hálózatkiesés esetén. Egyes invertergyártók termékei alkalmasak arra, hogy egy dedikált leágazást (14. ábra) tudnak biztosítani abban az esetben, ha a villamos hálózaton van egy esetleges áramkimaradás. Erről a leágazásról kiemelt fogyasztókat el tudnak látni villamos energiával, például hűtőszekrény, szivattyú.





14. ábra Szigetüzemre is alkalmas hibrid napelemes rendszerek dedikált leágazással

Mindazonáltal arra is van lehetőség, hogy a teljes létesítmény tudjon tovább üzemelni áramszünet esetén, viszont ehhez szükséges egy olyan leválasztó egység, amely ebben az esetben a napelemes rendszert a teljes létesítménnyel leválasztja a villamos közüzemi hálózatról (15. ábra). Így a napelemes rendszer biztosítja az energiát, a napelemek pillanatnyi teljesítményének és az energiatárolók töltöttségi állapotának függvényében.



15. ábra Szigetüzemre is alkalmas hibrid napelemes rendszerek teljes leválasztással

Mindkét megoldást az áramszolgáltatóval engedélyeztetni szükséges. Jelenleg az EON Hungária Zrt. és az MVM Zrt. területén mindkét szigetüzemre is alkalmas hibrid rendszer lehetséges. A korábbi ELMŰ-ÉMÁSZ Energiaszolgáltató Zrt. területén csak a hibrid rendszer engedélyezésére volt lehetőség.



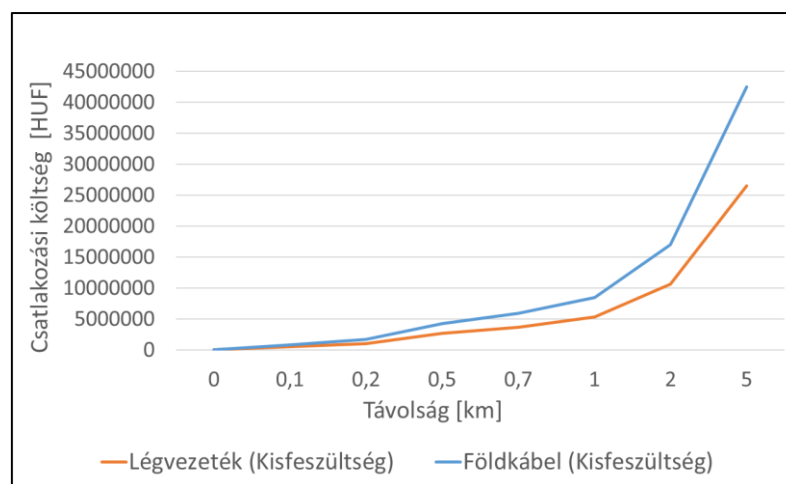
## 4. A NAPELEMES RENDSZER ENERGIAELLÁTÁS BIZTONSÁGRA GYAKOROLT HATÁSA

Az energia szükséges szinte az élet minden szegmenséhez. Ezen belül a villamos energiaellátás kiemelten fontos a modern társadalom számára. Számos területen játszik kulcsfontosságú szerepet. Ezek közül néhány fontos terület a teljesség igénye nélkül az egészségügy, közlekedés, vízellátás, kommunikáció, háztartások, ipari tevékenységek, stb. Az energiaellátás biztonságát további három pont bevezetésével vizsgáljuk a napelemes rendszerek kapcsán. A villamos hálózat, fogyasztók energiaellátása és a rendszer energiatárolási képessége [44].

### 4.1. A villamos hálózati csatlakozás és egyéb bővítések

#### 4.1.1. Csatlakozási távolság

Hálózati csatlakozás esetén számolni kell a csatlakozási távolsággal. Ez a távolság az adott fogyasztó és a legközelebbi villamos hálózati csatlakozási pont közötti távolságot jelenti. Ez a távolság függvényében jelentős költség növekedést és számos kihívást jelenthetnek. A hosszú csatlakozási távolságok a villamos hálózat bővítését vagy a meglévő hálózat módosítását igényelhetik. A költségek magasabbak lehetnek az átlagosnál, amennyiben nagyobb távolságokról van szó, mivel a vezetékek és kábelek telepítése költséges (16. ábra) és adott esetben transzformátor telepítése is szükséges lehet [44]. A tervezés során a megfelelő méretezés, az energiahatékonyság és a megbízhatóság kulcsfontosságú a hosszú távú fenntartható működés biztosítása érdekében. A villamos hálózathoz való csatlakozás költségét és a távolság kapcsolatát mutatja a 16. ábra.



16. ábra Villamos hálózat csatlakozási költség és távolság kapcsolata [3]

#### 4.1.2. Napelemes rendszerrel kapcsolatos bővítések

Napelemes rendszereknél a villamos hálózathoz való csatlakozáshoz még számos követelménynek meg kell felelni. Nem elegendő csak és kizárólag a napelemes rendszert megtervezni, hanem az is fontos, hogy az ingatlan vagy létesítmény alkalmas-e új energiatermelő egység befogadására. Amennyiben a mérőhely nem alkalmas erre, akkor korszerűsítés szükséges. A mérőhelynek rendelkeznie kell megfelelő keresztmetszetű mért fővezetékkel, amely nem áramszolgáltatói hatáskör. Továbbá szabványos főelosztóval és megfelelő védőföldeléssel is rendelkeznie kell. Számos esetben csak régi rossz állapotú földelőszonda van jelen, viszont egy napelemes rendszer létesítésénél szükséges a biztonságos földelés kialakítása. Ezek a bővítések és korszerűsítések magába foglalják a korábban felsoroltakon kívül a fázisszám és a védelmek esetleges bővítését is. Ezeket az engedélyeztetési eljárás során az áramszolgáltató is kéri a felhasználótól.

#### 4.1.3. Villamos hálózattal kapcsolatos pontozási rendszere

A villamos hálózattal kapcsolatos értékelés pontozási rendszerét az 1. táblázat tartalmazza. Amennyiben a villamos hálózat alkalmas a napelemes rendszer befogadására bármilyen hálózati fejlesztés nélkül, abban az esetben a pontozási rendszerben maximális pontot ér el. Minden beavatkozás a mértékétől függően rontja a pontszám értékét.

1. táblázat. Villamos hálózat pontozási rendszere

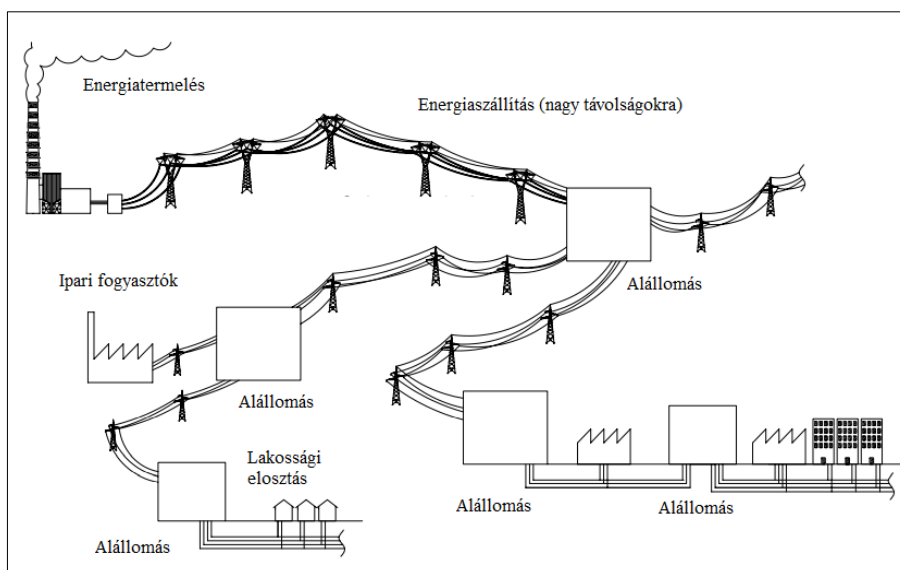
Nincs villamos hálózati csatlakozás, de nincs is rá szükség a létesítményben	0
Nincs villamos hálózati csatlakozás, a lehetséges csatlakozás nagyon nagy távolságra van a létesítménytől	1
Nincs villamos hálózati csatlakozás, a lehetséges csatlakozás nagyon kis távolságra van a létesítménytől	2
Van villamos hálózati csatlakozás, de korszerűsítés szükséges (fázisszám bővítést, fővezeték és a védelmek esetleges bővítése)	3
Van villamos hálózati csatlakozás és nem szükséges semmilyen bővítés	4

## 4.2. A fogyasztók energiaellátása

### 4.2.1. Napelemes rendszerek a villamos hálózatban

A hagyományos villamosenergia-rendszer arra épül, hogy az erőművekből származó villamosenergiát az ipartelepeken és háztartásokban központosított fogyasztókhoz vezesse. Az erőművek hatásfokát tekintve, az égési folyamatoknál a primer energia 50-70 %-a hőveszteség, továbbá a hagyományos erőműveknél 20-25 % extra kapacitás áll csak rendelkezésre, hogy az aktuális fogyasztás követhető legyen csúcsidejében [45, 46]. A villamos energia előállítás és nagy távolságokra szállítása nagy veszteséggel is jár. További hátránya ennek a topológiának a teljes áramkimaradás miatti sebezhetőség, ha tömeges kiesések történnek a hálózat bármelyik részén. A tipikus hagyományos villamosenergia rendszer felépítése az 17. ábrán látható. Amennyiben egy épületben vagy létesítményben minél több olyan eszközt használnak, amely villamos energiát

igényel és azok kiesése súlyos károkat okozhat, mindenképpen gondoskodni kell valamilyen energiátárolásról, valamint a zavartalan működésről.



17. ábra Hagyományos villamos energia rendszer felépítése [45]

A napelemes rendszerek olyan energiaforrásként működhetnek, amikor a hagyományos energiaellátás megszűnik vagy sérül és kiesik. Ez segíthet a kritikus szolgáltatások fenntartásában és a fontos műveletek folytatásában. A napelemes rendszerek lehetővé teszik a helyi energiatermelést ott, ahol a villamos hálózat nincs jelen vagy csak nagy költségek árán lehetne eljuttatni. Azonban a villamos energiaellátás biztonságát nem növeli nagy mértékben, amennyiben a napsugárzás nem elérhető pár napra az időjárás miatt és az akkumulátortelegek is lemerülnek, abban az esetben gyakorlatilag kiesik a teljes villamos energiaellátás. Bár az akkumulátor telepek növelésével növekszik a rendszer autonómiája is, de ez a költségeket is nagyban befolyásolja. [42, 43, 44, 47]

#### 4.2.2. A fogyasztók energiaellátásával kapcsolatos pontozási rendszer

A napelemes rendszer jó alternatíva az energiaellátás-biztonság növelésére, mivel a napelemes rendszerek hozzájárulnak a villamos energiaellátás diverzifikálásához, amely csökkenti a hagyományos energiatermeléstől való kizárólagos függőségét. A fogyasztók energiaellátásával kapcsolatos értékelés pontozási rendszerét a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat. A fogyasztók energiaellátásával kapcsolatos pontozási rendszer

Nem releváns a villamos energia ellátás a létesítménynél.	0
Van energiátárolás, de nincs hálózat	1
Van energiátárolás, van hálózati csatlakozás, de hálózatkiesés esetén a teljes rendszer lekapcsolásra kerül.	2
Van energiátárolás, van hálózati csatlakozás, de hálózatkiesés esetén dedikált fogyasztók tudnak működni.	3
Van energiátárolás, hálózatkiesés esetén a teljes rendszer tovább tud működni.	4

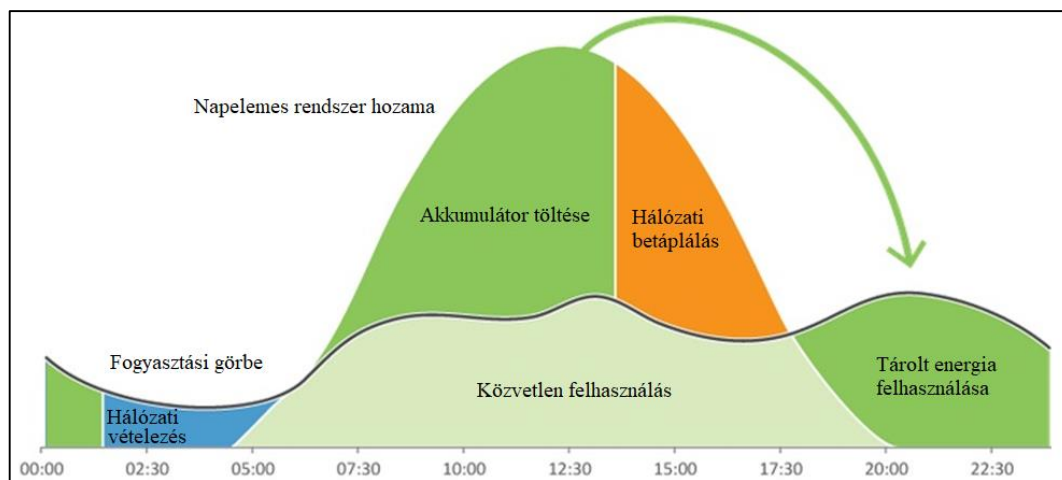
### 4.3. A rendszer energiatároló képessége

Az akkumulátorok egyéb hagyományos felhasználási módoktól eltérően a napelemes alkalmazásokra jellemző SOC (State of Charge) kismértékű változása a napi töltési-kisütési ciklusok során. A SOC azonban az év bizonyos időszakaiban meredek csökkenést mutat, az időjárástól és az évszaktól függően.

A napelemes rendszerek energiatárolóival szemben támasztott legfontosabb általános követelmények a következők: alacsony költség, nagy energiahatékonyság és önkisülés, hosszú élettartam, alacsony karbantartás, egyszerű kezelés. Továbbá az akkumulátorral szemben támasztott követelmények [48]:

- rendelkeznie kell saját akkumulátor-kezelő rendszerrel (BMS),
- minimum 10 év vagy 6000 töltési-kisütési ciklus élettartama,
- moduláris felépítés,
- az inverterrel együtt kialakított rendszernek alkalmasnak kell lennie egy külső vezérlőjel fogadására és megvalósítására (az ingatlan tulajdonosától függetlenül).

A napelemes rendszerből származó villamos energia felhasználása javítható, amennyiben a hálózatsatolt rendszert akkumulátorral egészítjük ki. A 18. ábra akkumulátortelep használatát mutatja be a lakossági felhasználás esetén [49].



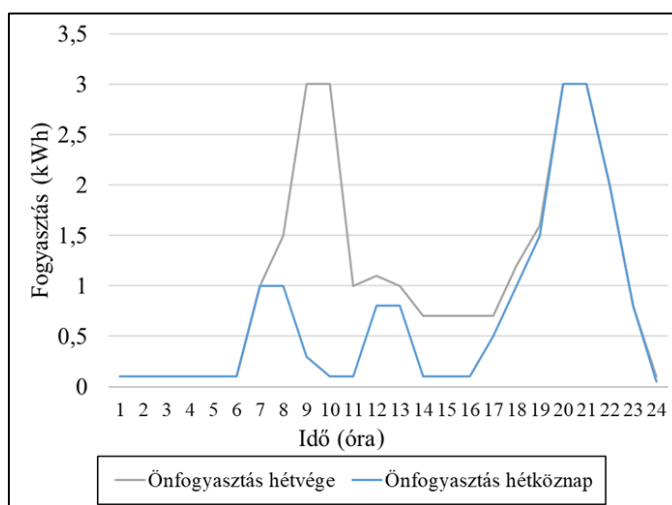
18. ábra Akkumulátor használata lakossági felhasználás esetén

Ha rendelkezésre áll napenergia és az épület vagy ingatlan önfogyasztása fölé emelkedik ez az érték, akkor a rendszer az akkumulátor töltésére fordítja azt, amennyibe nincs teljesen feltöltve. Amikor az akkumulátor teljesen fel van töltve a továbbra is elérhető napenergiából származó villamos energiát a hálózatba táplálja vissza az inverter, ha az aktuális jogi szabályozás lehetővé teszi azt. A korábban feltöltött akkumulátor kapacitását szükség esetén az esti órákban lehet hasznosítani. A rendszer célja az, hogy az akkumulátorokban, minél több megtermelt megújuló energiát tároljon, valamint a lehető legkevesebb energiát vételezzon a közcélú hálózatról. Fontos a rendszer optimális méretének helyes meghatározása. Kis méretű akkumulátor kapacitás esetén

inkább az épület önfogyasztása mellett a gyakori töltés-kisütés lesz jellemző az energiatárolókra. Nagy akkumulátor kapacitás esetén pedig a beruházási költség és a megtérülési idő lesz jelentős.

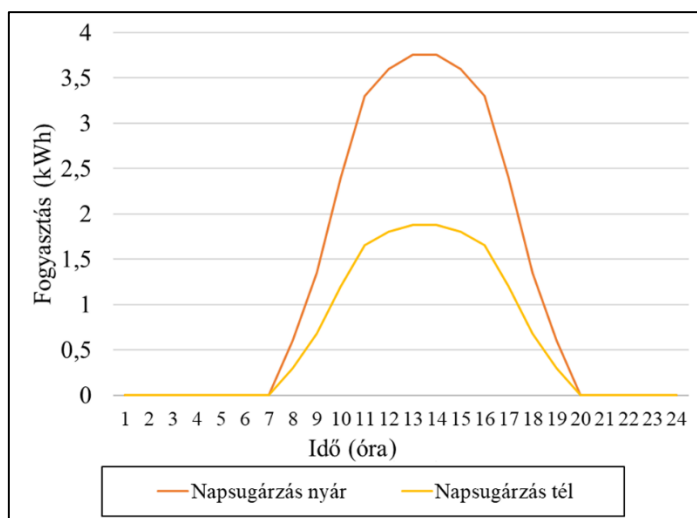
#### 4.3.1. Hálózatsatolt napelemes rendszer akkumulátor kapacitásának vizsgálata

Az alábbiakban három olyan rendszert vizsgáltam meg, ahol az akkumulátor kapacitása változik oly módon, hogy a napelemes rendszer teljesítményéhez képest egyszeres, háromszoros és ötszörös kapacitású a választott akkumulátor telep. Egy 5 kWp teljesítményű napelemes rendszer alkalmazását vettem figyelembe. Ez azt jelenti, hogy 5 kWh, 15 kWh és 25 kWh kapacitású akkumulátor telepet szükséges megvizsgálni. A 19. ábrán látható a számítások során figyelembe vett önfogyasztási görbék hétvégén és hétköznap.



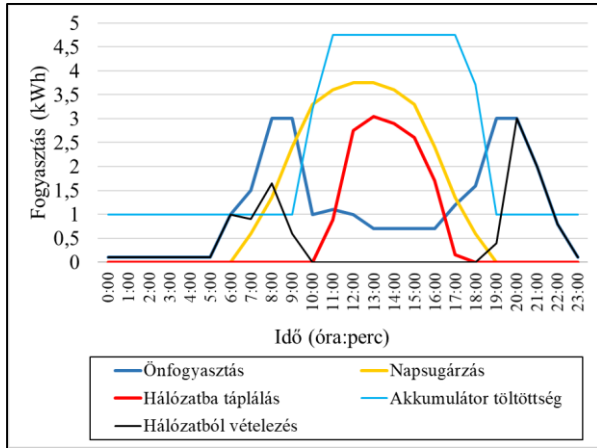
19. ábra Önfogyasztás görbék hétvégén és hétköznap

Ezen rendszerek összehasonlításával esettanulmányokat végeztem arra vonatkozóan, hogy energetikailag és gazdaságilag, melyik rendszer bizonyul a legoptimálisabbnak. Azokat az eseteket vettem figyelembe amikor a napsugárzás megszakítás nélkül szolgáltat energiát, tehát nincs felhőátvonulás. A 20. ábrán látható a napsugárzási görbe a téli és a nyári időszakban.

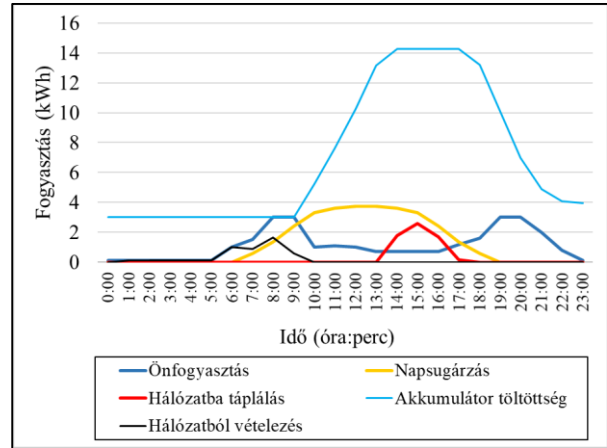


20. ábra Önfogyasztás görbék hétvégén és hétköznap

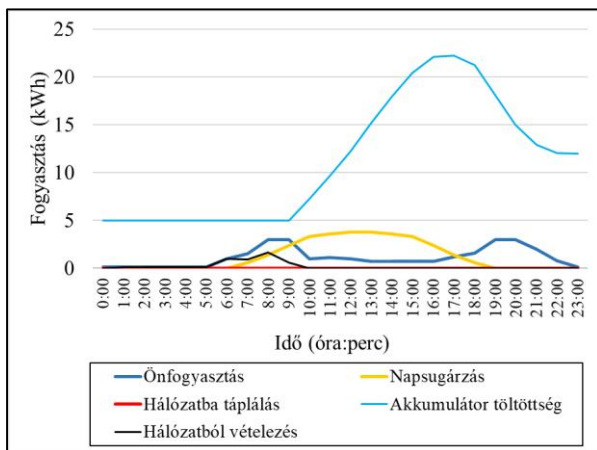
Megvizsgálva egy tipikus hétvégi fogyasztási görbét a nyári időszakban (21. ábra) az látható, hogy az 5 kWh kapacitású akkumulátortelep teljes mértékben ki van használva. A teljes töltés-kisütési ciklus megfigyelhető.



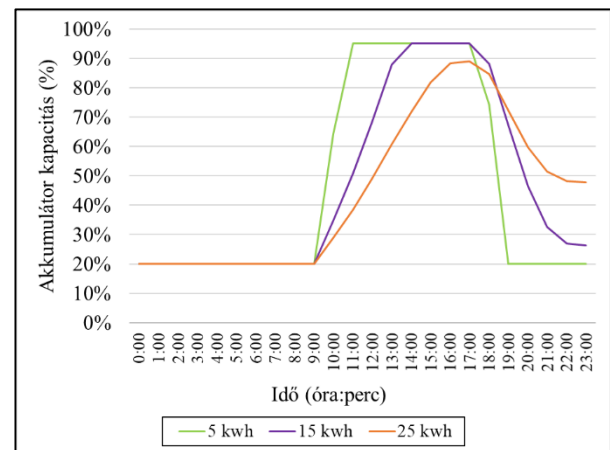
(a)



(b)



(c)

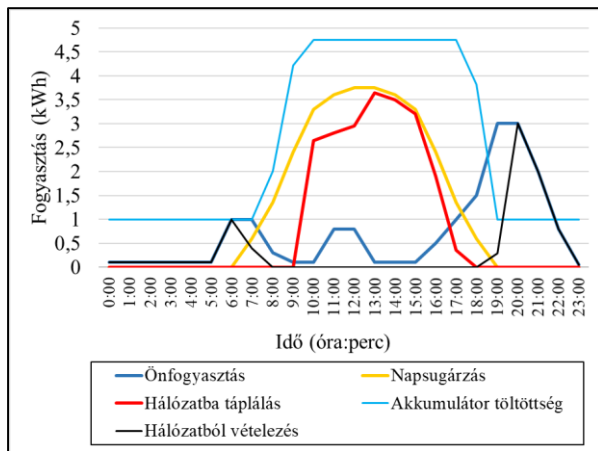


(d)

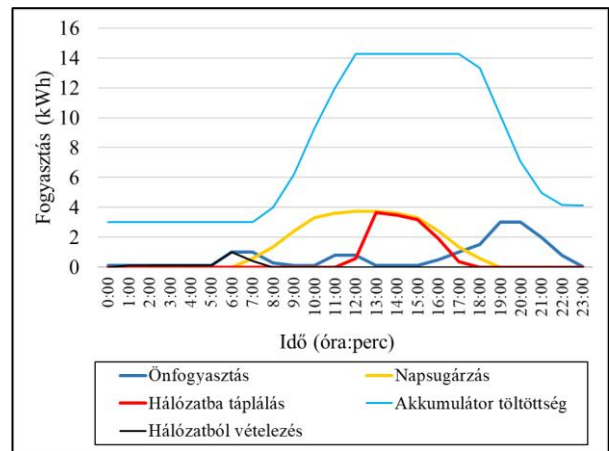
21. ábra Nyári időszak hétvége fogyasztási görbe (a) 5 kWh, (b) 15 kWh, (c) 25 kWh akkumulátor kapacitás, (d) akkumulátor kapacitások értéke

15 kWh esetén nem éri el a teljes kisütést a nap végére, a 25 kWh esetén pedig nem töltődik fel teljes mértékben, viszont nem is merül le teljesen. Az utóbbi esetben nagyobb kapacitás marad a nap végére ami energiabiztonsági szempontból mindenképpen előnyös. Nagyobb akkumulátorkapacitásnál a hálózatra való visszatáplálás helyett a rendelkezésre álló napenergiát az akkumulátor töltésére használja fel az inverter. A következőkben a nyári időszakon belül egy tipikus hétköznapi fogyasztási görbét vizsgáltam (22. ábra) Ha nagyobb kapacitású akkumulátor van csatlakoztatva a napelemes rendszerhez, akkor megfigyelhető, hogy kevesebb töltést veszít a nap végére. Ezzel párhuzamosan az is megfigyelhető, hogy nagyobb akkumulátorkapacitásnál a hálózatra való visszatáplálás helyett a rendelkezésre álló napenergiát az akkumulátor töltésére fordítja a rendszer. A hétvégi fogyasztás/termeléshez képest, ha a nap végére megmaradt

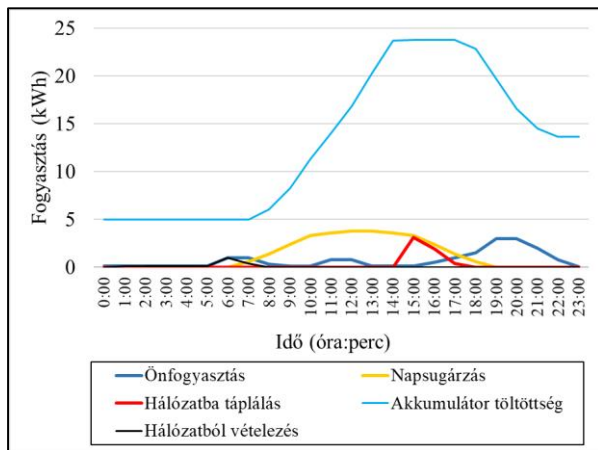
akkumulátor töltést is figyelembe vesszük, valamint a többi napon keresztül megfelelő szintű a napsugárzás, akkor a hálózatba való visszatáplálás is több lesz.



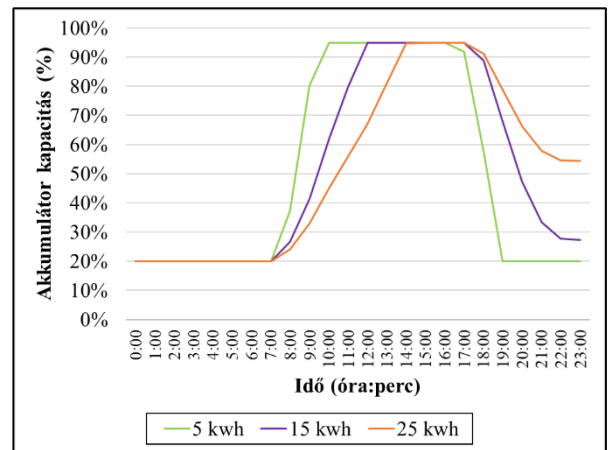
(a)



(b)



(c)

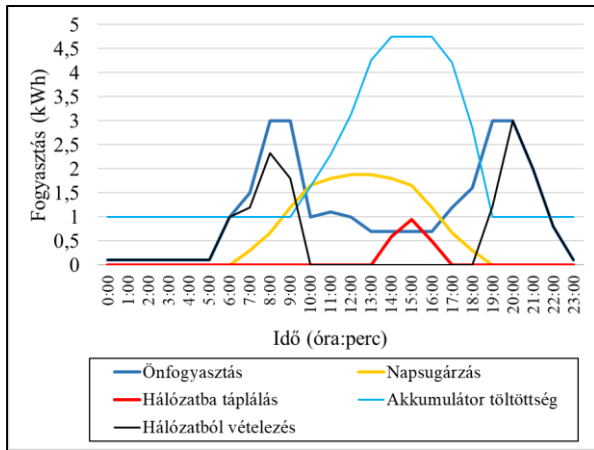


(d)

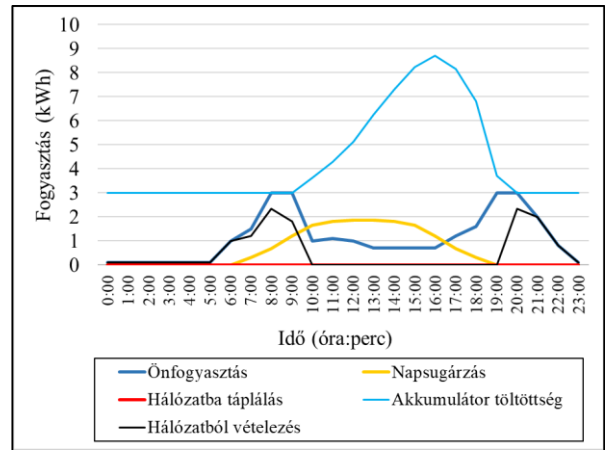
22. ábra Nyári időszak hétköznap fogyasztási görbe (a) 5 kWh, (b) 15 kWh, (c) 25 kWh akkumulátor kapacitás, (d) akkumulátor kapacitások értéke

A napelemes rendszer által termelt villamos energia a téli időszakban a besugárzási szög és a napsütéses órák száma miatt jóval kevesebb. A téli időszak hétfégi fogyasztási görbével (23. ábra) megállapítható, hogy a három rendszert összevetve az 5 kWh teljesítményű rendszer a korábbi esetekhez hasonlóan jóval teljesebb kihasználtságú, mint a nagyobb kapacitású energiatárolók. Amikor az akkumulátor teljesen feltöltődött, visszatáplál a hálózatba, de mivel télen sokkal kevesebb napenergia termelődik, a visszatáplálás is kevesebb. A nagyobb kapacitású akkumulátor telepek (15 kWh és 25 kWh) ezzel a fogyasztási és napsugárzási görbével nehezen érik el az 50 %-os töltöttséget.

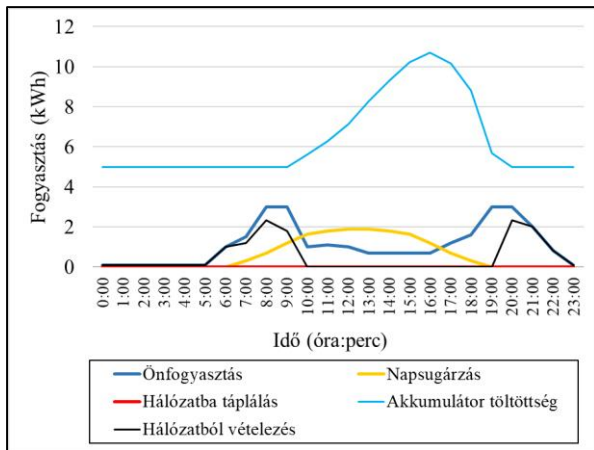




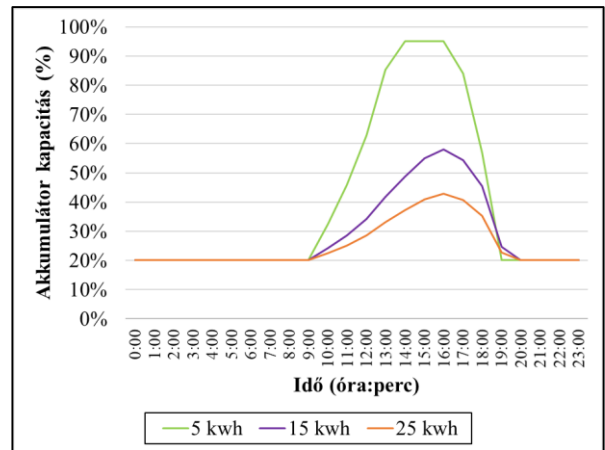
(a)



(b)



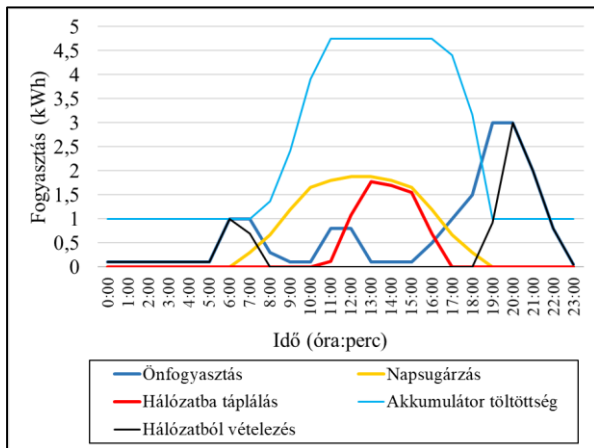
(c)



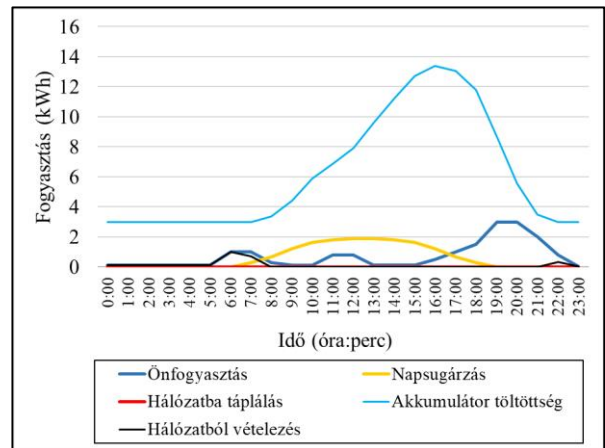
(d)

23. ábra Téli időszak hétvége fogyasztási görbe (a) 5 kWh, (b) 15 kWh, (c) 25 kWh akkumulátor kapacitás, (d) akkumulátor kapacitások értéke

A hétköznapokból (24. ábra) adódó alacsonyabb önfogyasztás miatt kisebb akkumulátorkapacitások esetén valószínűbb a teljes feltöltési állapota az akkumulátor telepnek. Viszont a nagyobb kapacitás esetén ugyanúgy nem elegendő az akkumulátor teljes feltöltéséhez.

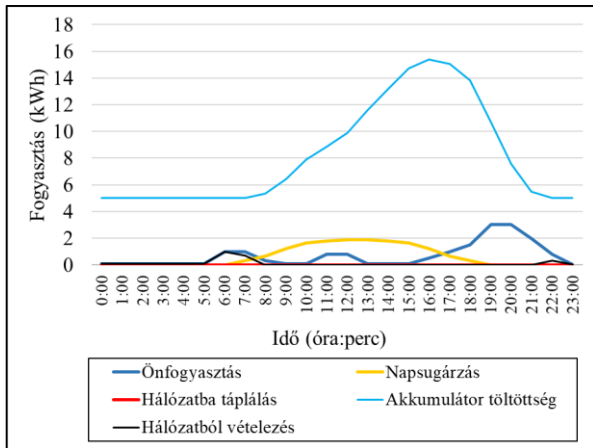


(a)

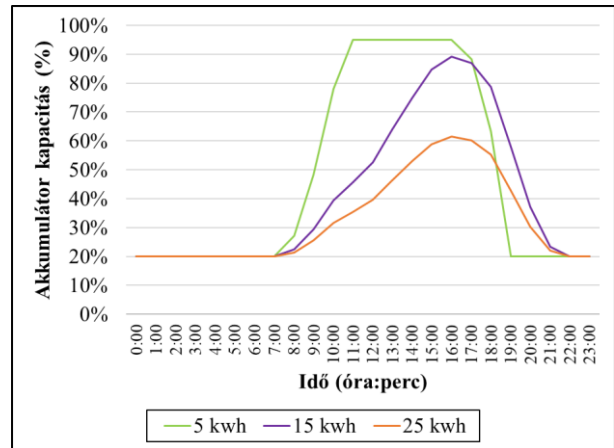


(b)





(c)



(d)

24. ábra Téli időszak hétköznap fogyasztási görbe (a) 5 kWh, (b) 15 kWh, (c) 25 kWh akkumulátor kapacitás, (d) akkumulátor kapacitások értéke

#### 4.3.2. Napelemes rendszer energiatároló képességének pontozási rendszere

Összességében megállapítható, hogy a villamosenergia ellátás fontos része a rendszer energiatároló képessége. Ebben a pontban nem a létesítmény energiaellátásbeli diverzitását vagy módját vizsgáljuk, hanem a mértékét. Fontos különbség van az alábbi esetek között. Az egyik eset amikor egy létesítmény villamos fogyasztói, egy esetleges villamos energia hálózat kiesés következtében biztonságosan le tudjanak állni, kisebb akkumulátor kapacitás is elegendő. A másik eset pedig az amikor egy kiesés következtében még több órán vagy adott esetben egy napon keresztül is képes legyen ellátni villamos energiával a teljes épületet vagy dedikált fogyasztókat. Ehhez mindenképpen nagyobb tárolókapacitás szükséges.

A rendszer energiatároló képességével kapcsolatos értékelés pontozási rendszerét a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat. A rendszer energiatároló képességével kapcsolatos pontozási rendszer

Nincs energiatárolás és nem is szükséges	0
Nincs villamos hálózati csatlakozás, de a villamosenergia ellátás 5-10 óráig fenntartható	1
Nincs villamos hálózati csatlakozás, de a villamosenergia ellátás 1-2 napig fenntartható	2
Van villamos hálózati csatlakozás, de a kiesése után 5-10 óráig fenntartható a villamos energia ellátás	3
Van hálózati csatlakozás, de a kiesése után 1-2 napig fenntartható a villamos energia ellátás	4

### 5. A NAPELEMES RENDSZEREK TECHNOLÓGIAI VIZSGÁLATA

A fotovoltaikus rendszerek közműhálózatokhoz való csatlakoztatása számos működési problémát okozhat az elosztóhálózatok számára. E problémák mértéke közvetlenül függ attól, hogy az adott hálózati csomópontban mennyi ilyen rendszer csatlakozik, továbbá még függ a létesítmény földrajzi elhelyezkedésétől. A napelemes rendszerek által okozott lehetséges problémák a teljesség igénye nélkül a feszültség érték változása, kimeneti teljesítmény ingadozás, harmonikus torzítás, frekvencia ingadozás, fordított teljesítmény áramlás.

A három alpont közül az első a feszültségérték változása, amelynek kapcsán szükségesnek tartottam megvizsgálni a napelemes rendszerek egyenáramú oldalán fellépő esetleges problémákat és hibákat, mivel ez a teljes rendszerre hatással van. A napelem működéséből adódik, hogy a hőmérséklet hatására megváltozik az egyenáramú oldalon a feszültség értéke, ezért a váltakozó áramú hálózatra gyakorolt hatását is vizsgáltam. Továbbá, ha egy hálózati csomópontba több napelemes energiatermelő csatlakozik azok jelentős hatást gyakorolhatnak a hálózati feszültség értékére.

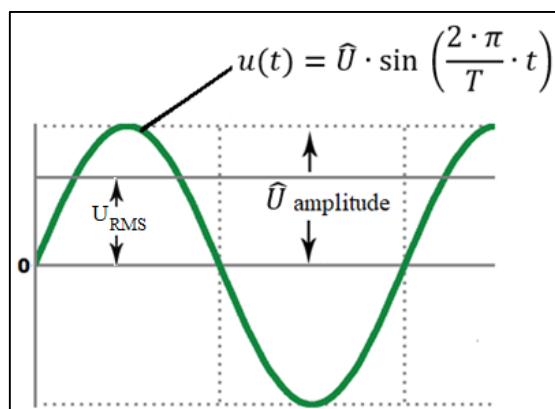
A második alpont a harmonikus torzítás, amely fontos villamos-energiaminőségi probléma. Ezt a hatást sok esetben a fotovoltaikus rendszerekben használt inverterek is okozzák. Az így létrejövő harmonikusok párhuzamos és soros rezonanciákat, transzformátor túlmelegedést, védőberendezések meghibásodását okozhatják, ami csökkentheti az áramellátó rendszerek megbízhatóságát.

Az alkatrészek öregedése fontos egy rendszer élettartamát tekintve, ezért a napelemes rendszerek technológiai vizsgálatának pillérének belül a harmadik alpont az öregedés és élettartam.

#### 5.1. Feszültségérték változása

##### 5.1.1. Feszültségminőség

A fogyasztók számára alapvetően fontos a csatlakozási ponton elérhető feszültség mennyisége és minősége. A tápvezetéken átfolyó fogyasztói áram feszültségesést okoz a vezetékben. Az időben változó fogyasztói áram miatt a fogyasztói feszültség nemcsak a helytől, hanem az időtől is függ. A hálózati feszültség minőségét számos tényező befolyásolja, amelyeket figyelembe kell venni ahhoz, hogy a fogyasztó elektromos berendezései megfelelően és károsodás nélkül működjenek. Az elektromos feszültség ideálisnak tekinthető, a feszültségjel tisztán szinuszos hullám a hálózati rácsra jellemző feszültség- és frekvenciaértékekkel (25. ábra).



25. ábra Váltakozó feszültség jelalakja

Az  $U_{eff}$  a feszültség RMS értéke, más néven négyzetes középérték (RMS). Tisztán szinuszos jel esetén a jel csúcsertékéből a következőképpen számítható ki az RMS érték:

$$U_{eff} = U_{RMS} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

A gyakorlatban az RMS értéket nem a csúcsertékéből kell meghatározni, hanem az időfüggvény integrálásával. A feszültségméréseket szabványos valós idejű RMS mérések szerint szükséges elvégezni. Ez vonatkozik a gyors változás értékelésére is [50, 51, 52].

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u^2(\omega t) d\omega t} \quad (11)$$

Digitális mintavevő rendszerek esetén:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{s=0}^{M-1} (U_s)^2} \quad (12)$$

ahol:  $M$  a minták száma ciklusonként ( $M = 256$ ),  $U_s$  az  $s$ -edik mintavételi pont feszültségének pillanatnyi értéke. Az érték 10 ciklusból kerül kiszámításra. A gyakorlatban a lassú változások kiértékeléséhez 50 Hz-en a mért értékekből 10 perióduson 10 percenként valós idejű átlagot kell generálni, és ezt a 10 perces átlagot el kell tárolni [50, 51, 52].

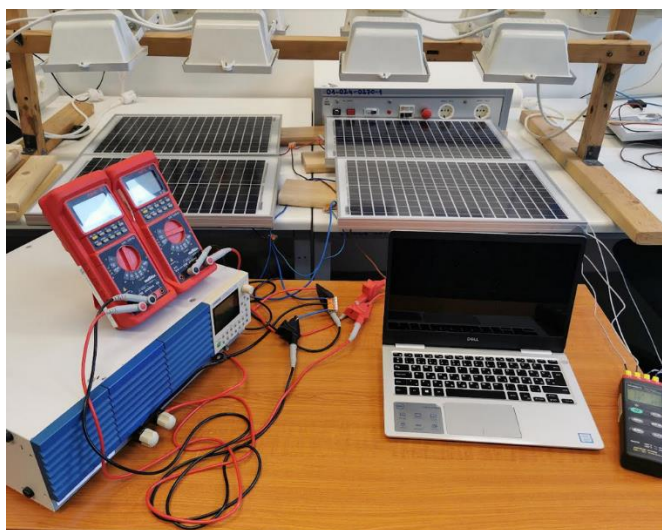
### 5.1.2. Napelemes rendszerek egyenáramú oldalon fellépő hibák vizsgálata

A napelemes rendszereknél az egyenáramú oldalon többféle hiba jelentkezhet. Három fő részre oszthatjuk [53, 54, 55]:

- elektromos hibák (szakadási hiba, rövidzársi hiba, földzárlati hiba, bypass dióda hiba, inverter hiba, MPPT hiba, ívhibák, stb.) [54, 56, 59, 60],
- környezeti hatások (szennyeződések, egyenetlen besugárzás, árnyékolás, stb.) [53, 57, 58],
- panel hibák/degradáció (elszíneződés, rétegleválás, belső korrózió, mikrorepedések, a belső ellenállás növekedése, stb.) [53, 54, 55]

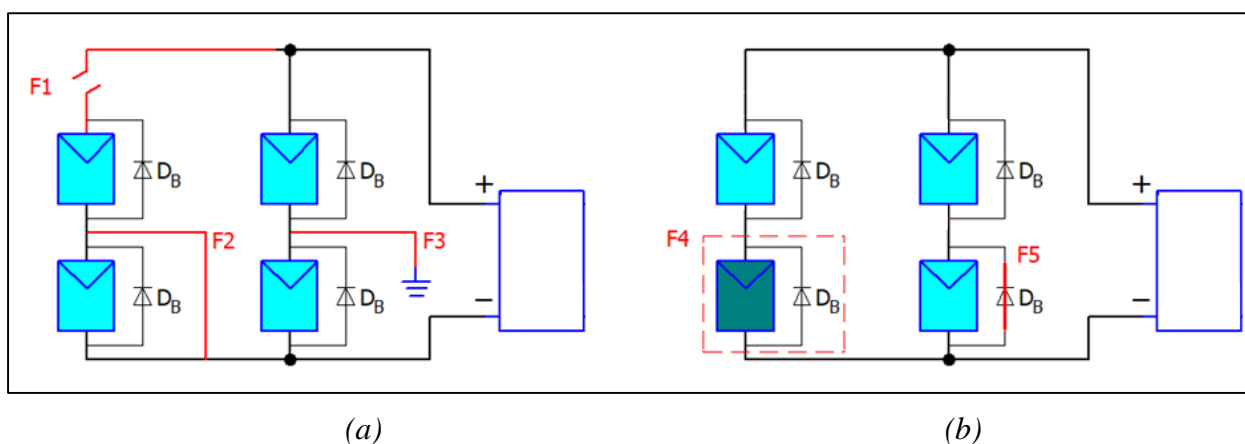
A továbbiakban az elektromos hibák egy részével foglalkozom, illetve még az árnyékolás hatásával. A kérdés az, hogy miként változtatja a napelemes rendszer karakterisztikáját a hibák a

fennállásuk következtében. Az első lépés a hibák vizsgálatához az volt, hogy a szimulációs módszert méréssel validáljam. A 26. ábrán látható a laboratórimban összeállított rendszer, melyet később szimulációs környezetben is összeállítottam.



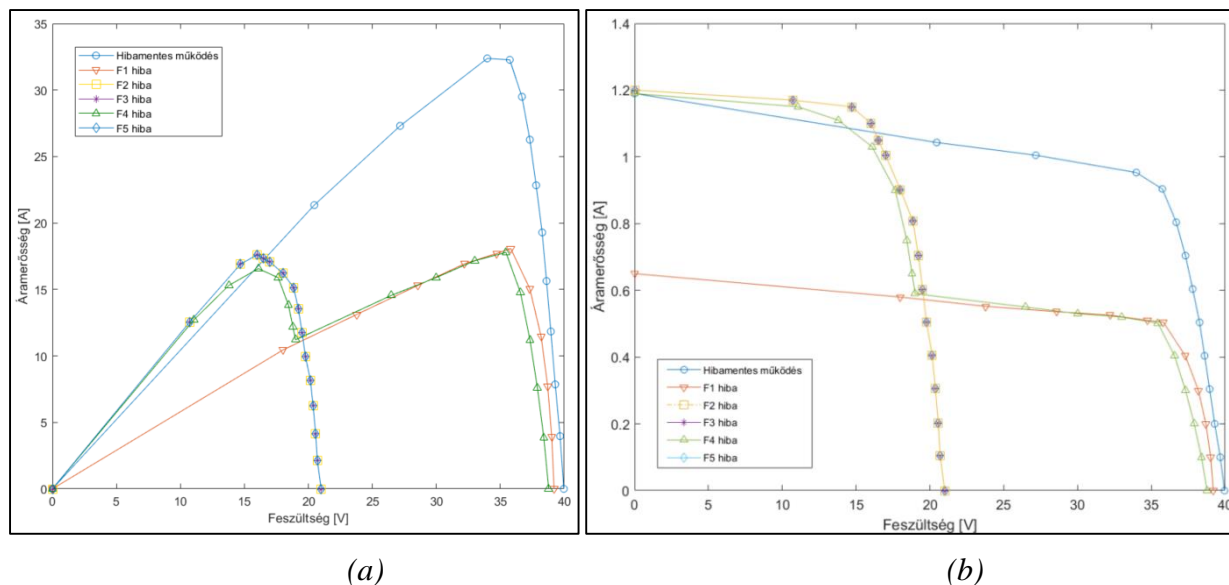
26. ábra Az összeállított mérés validáláshoz

A 27. ábrán látható az általam vizsgált egyenáramú oldali hibák fajtái, amelyek jelölése F1 a szakadási hiba, F2 rövidzárási hiba, F3 földzárlati hiba, F4 árnyékolási hiba és F5 bypass dióda hiba. A napelem panelek a vizsgált konfigurációban kettő sorba kapcsolva egy sztringben és a két sztring párhuzamosan lett kapcsolva. A mérés során az összeállítás egy KIKUSUI PLZ1004W típusú változtatható terhelésre volt csatlakoztatva, hogy megkapjam az U-I értékeket, kontroll mérés miatt MAXWELL MX-25 328 digitális multiméterrel lett mérve a feszültség és az áramerősség. Nyolc 500 W-os R-500WFEH halogén Floodlight lámpát használtak a napsugárzás szimulálására, a sugárzást pedig átlagosan  $600 \text{ W/m}^2$ -es értéket PCE-SPM 1 napenergia-mérővel mértük. Az egyes napelemes panelek kapcsolódó paraméterei STC alatt ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$  és  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) a következők:  $P_{mp} = 20 \text{ W}$ ,  $U_{mp} = 17,49 \text{ V}$ ,  $I_{mp} = 1,14 \text{ A}$ ,  $I_{RZ} = 1,22 \text{ A}$ .

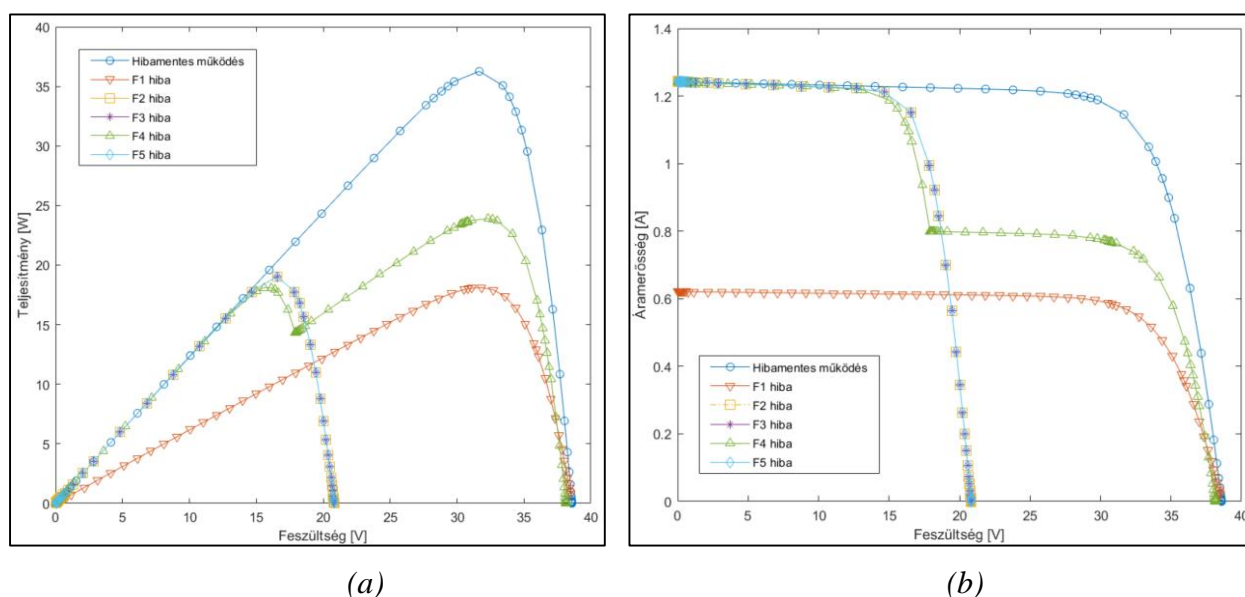


27. ábra Validált napelemes rendszer kapcsolási rajza (a) F1 szakadás, F2 rövidzár, F3 földelési hibák; (b) F4 árnyékolási hiba, F5 bypass dióda hiba

Az elektromos modellt Matlab és Simulink segítségével lett validálva, összehasonlítva a kísérleti úton kapott U-I görbét a modell által generált kimeneti jelleggörbével. A rendszer kimeneti jelleggörbéi a hibatípusok beállítását követően az 28. ábrán, a szimulált jelleggörbék a 29. ábrán láthatók.



28. ábra A mérés (a) feszültség-áramerősség, (b) feszültség-teljesítmény jelleggörbe

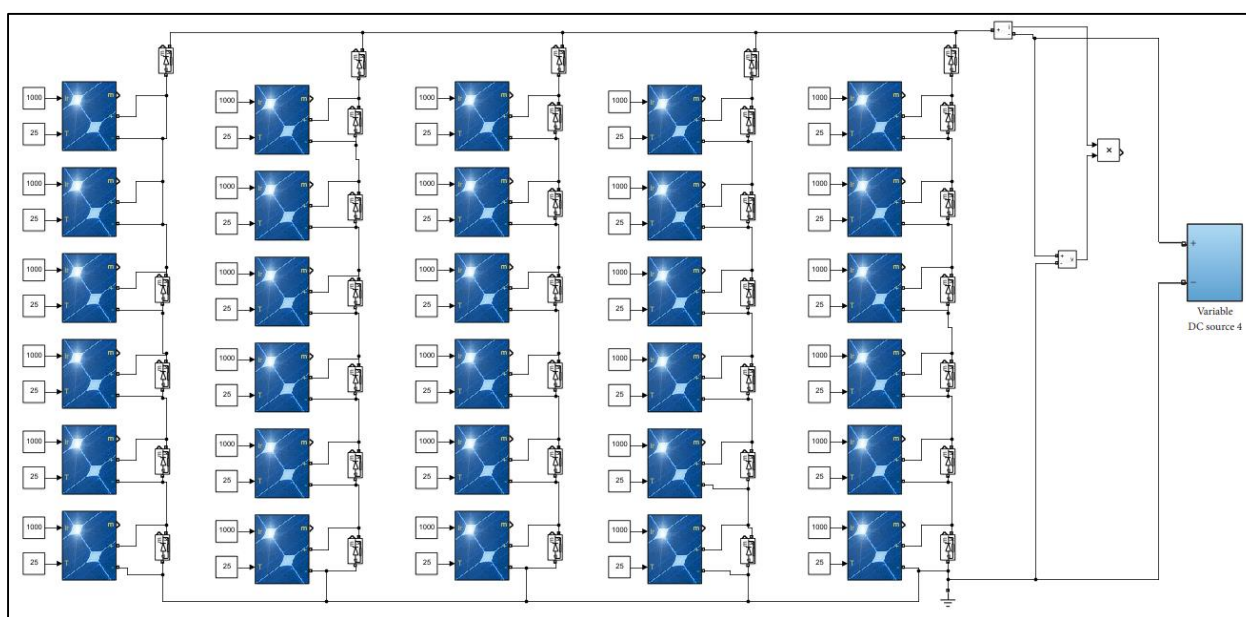


29. ábra A szimuláció (a) feszültség-áramerősség, (b) feszültség-teljesítmény jelleggörbe

A szimulációs módszer validálása után egy tipikus napelemes rendszert vizsgáltam szimulációs környezetben MATLAB/Simulink segítségével, hogy nagyobb mértékben is megállapítható legyen a hatása az egyenáramú oldali hibáknak. A vizsgált rendszer  $6 \times 5$  modulból áll, amely a 30. ábrán látható. Egy sztring 6 panelből áll és 5 sztring van párhuzamosan kapcsolva. Az egyes panelek kapcsolódó paramétereit a 4. táblázat foglalja össze.

4. táblázat. A szimuláció során használt napelem adattábla adatai

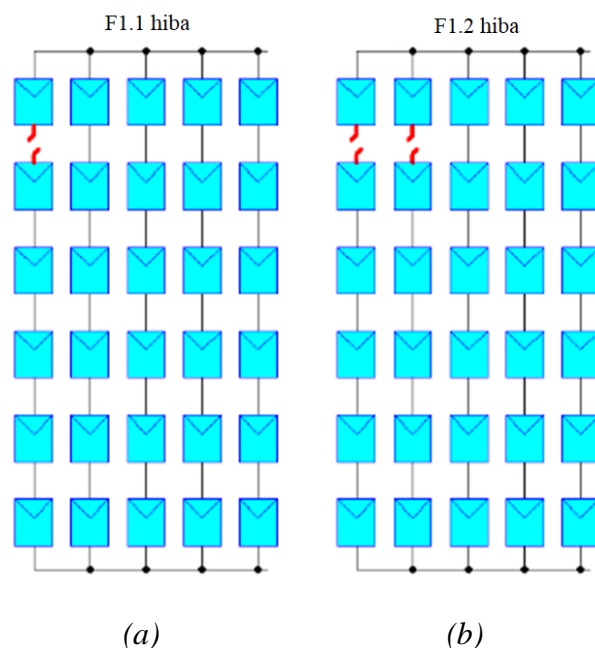
Maximális munkaponti teljesítmény ( $P_{MAX}$ )	80 W
Üresjárási feszültség ( $U_{ü}$ )	21,9 V
Rövidzárási áramerősség ( $I_{RZ}$ )	5 A
Maximális MPP feszültség ( $U_{MP}$ )	17,7 V
Maximális MPP áramerősség ( $I_{MP}$ )	4,52 A
Cellák darabszáma ( $N_S$ )	36 pcs
Üresjárási feszültség hőmérsékleti együttható ( $\mu_{U_{ü}}$ )	-0,32 %/°C
Rövidzárási áram hőmérsékleti együttható ( $\mu_{I_{RZ}}$ )	+0,04 %/°C



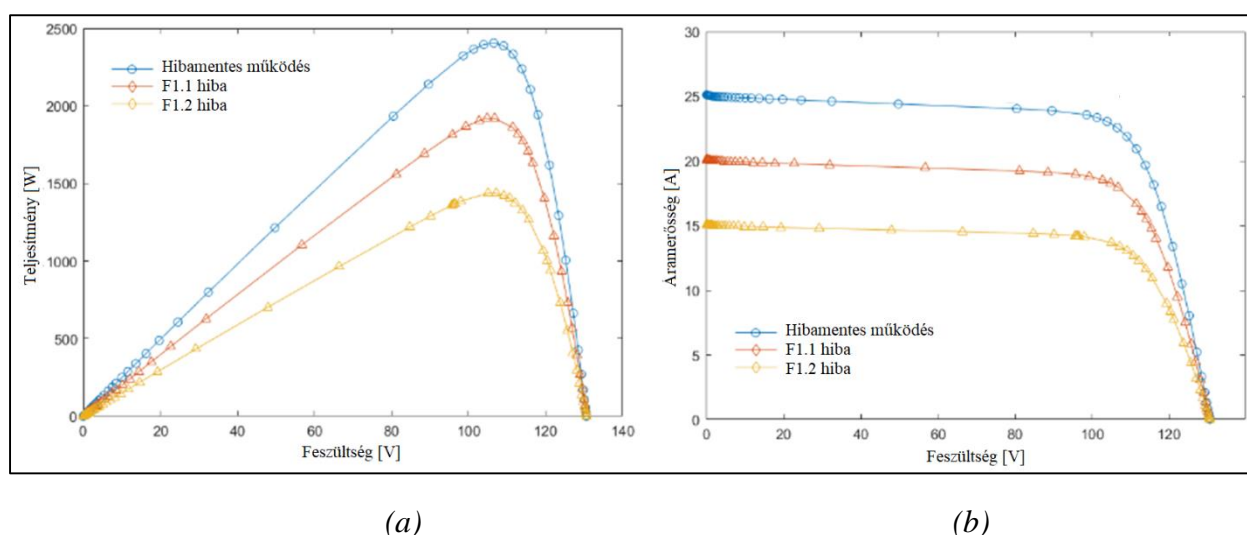
30. ábra Vizsgált napelemes rendszer kapcsolási rajza

Ebben a szimulációban 5 gyakori hibátípust vizsgáltam, típusonként pedig két esetet. Ezt a 10 eredményt hasonlítottam össze a hibamentes állapottal. Az első két hibaállapot F1.1 és F1.2 jelzéssel a 31. ábrán látható, mely mindkét esetben szakadás lép fel a sztringeket. Az első esetben egy a második esetben pedig két sztring is kiesik a termelésből a szakadás által. A valóságban ez az állapot a gyári MC4 csatlakozók helytelen szereléséből vagy csatlakoztatásából adódhat leggyakrabban. Az áram-feszültség és teljesítmény-feszültség görbéket a 32. ábra mutatja. A szakadási hiba (a 27. ábrán F1-ként látható) egy vezeték véletlen szétkapcsolódását jelenti. Ha a napelemek azonos műszaki jellemzőkkel rendelkeznek, és mindegyik azonos napsugárzási és hőmérsékleti viszonyok között van, akkor szakadási hiba esetén a feszültség minden sztring kimenetén azonos. Ez azt jelenti, hogy ha egy sztringnek szakadási hibája van, a fennmaradó sztringek miatt a kimenetükön lévő feszültség továbbra is ugyanaz lesz. A maximális munkapontban a feszültség akkor is azonos lesz, ha a tömbben megváltoztatjuk a sztringek darabszámát. Tehát sztringek hozzáadásával vagy eltávolításával az áramkörben csak a teljes tömb kimeneti árama változik meg [53, 54, 55, 56].



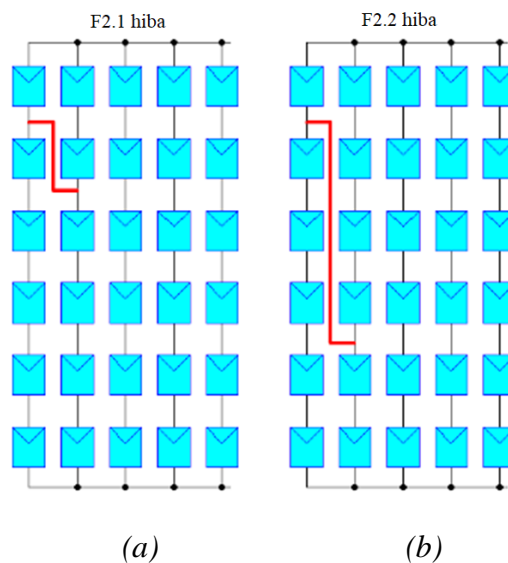


31. ábra F1 Szakadási hiba (a) első eset, (b) második eset

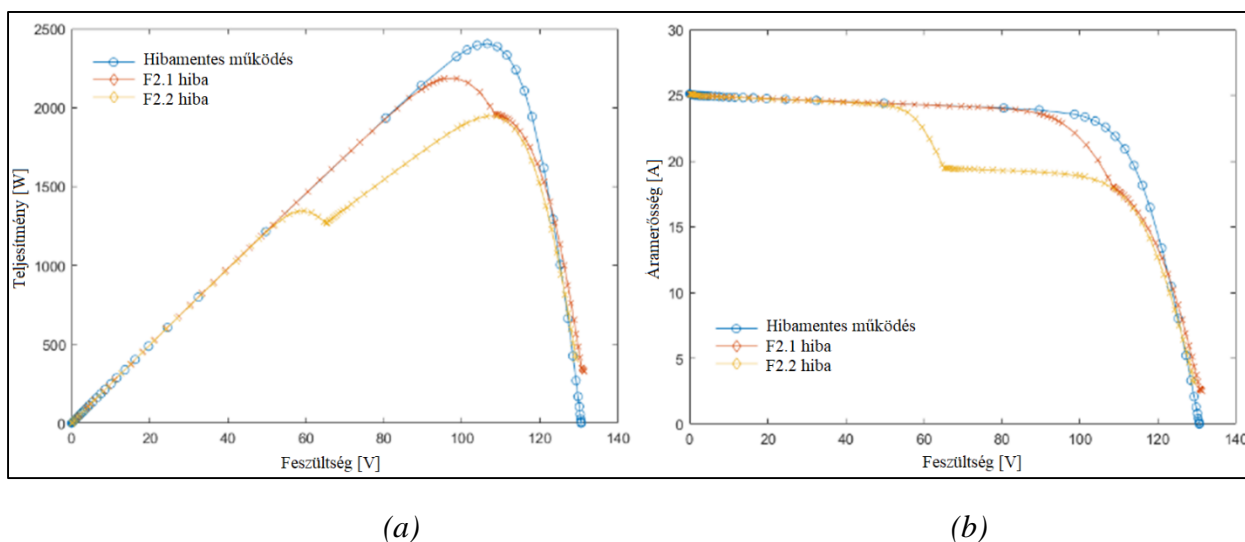


32. ábra F1 Szakadási hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe

Az második két hibaállapot ezúttal zárlatos üzemállapotot mutat. Ezek F2.1 és F2.2 jelzéssel a 33. ábrán láthatók. Mindkét esetben két sztring között lép fel zárlatos üzemállapot. Ez akkor fordulhat elő, amennyiben a helytelen telepítésből adódóan a szolárkábel sérülés következtében a tartószerkezettel zárlat alakulhat ki. Az áram-feszültség és teljesítmény-feszültség görbéket a 34. ábra mutatja. A hibaáram amplitúdója a hibát okozó sztringek pontjai közötti feszültségkülönbségtől függ. A túláramvédelmi eszközök esetenként megoldást jelenthetnek erre a típusú hibára is, de ezeknek az eszközöknek vannak korlátozásai, pl.: ha az áram egy küszöbértéknél alacsonyabb. Ha a két sztring között fellépő zárlati hiba gyenge megvilágítás mellett következik be (pl. éjszakai, éjszakai átmenet, reggel, napról éjszakára átmenet), az érintett sztringeken átfolyó áram nem elég nagy ahhoz, hogy kioldja a túláramvédelmi eszközt.



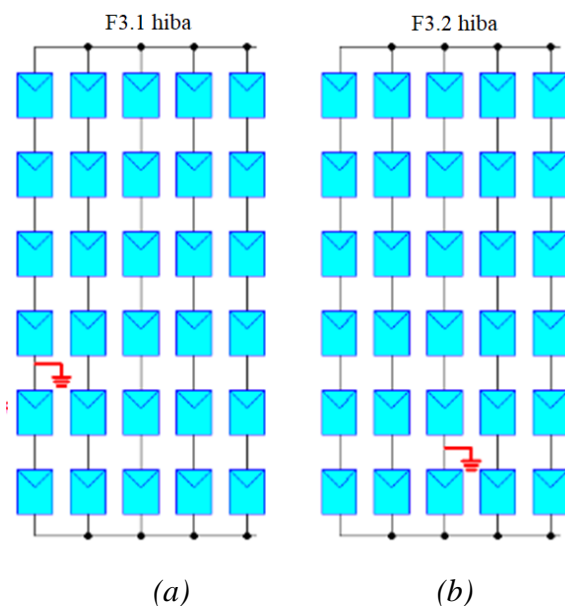
33. ábra F2 zárlat hiba (a) első eset, (b) második eset



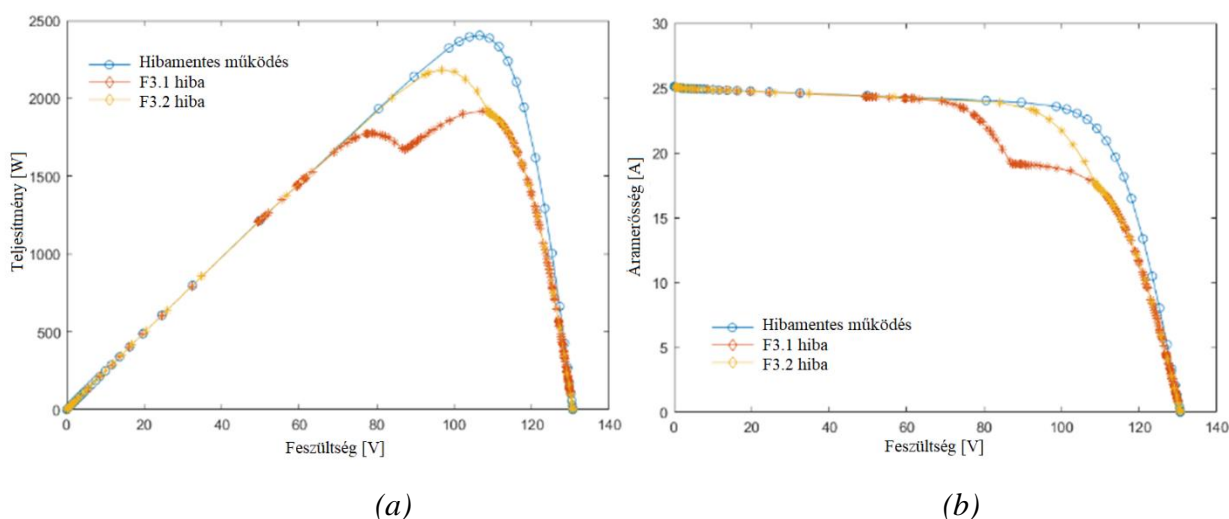
34. ábra F2 Szakadási hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe

Az harmadik hibaállapot a földzárlati üzemállapotot mutat. Ezek F3.1 és F3.2 jelzéssel a 35. ábrán láthatók. Mindkét esetben földzárlat alakul ki egy sztring és a föld között, csak mindkét esetben máshol van a zárlat kialakulásának a helye. Az előző esethez hasonlóan szintén szolárkábel sérülés miatt alakulhat ki a legkönnyebben ez a típusú hiba. Az áram-feszültség és teljesítmény-feszültség görbéket a 36. ábra mutatja. A földzárlati hibák adódhatnak abból, hogy a kábelek szigetelése megsérül a nem megfelelő telepítés következtében. Ide sorolható még az öregedés vagy valamilyen rácsáló okozta sérülés miatt bekövetkezett földzárlat. Földzárlatot a napelem moduloknál okozhat leromlott tömítőanyag vagy a víz és nedvesség behatolása, de a nem megfelelő körültekintéssel végzett karbantartás a kötődobozokban is okozhat földzárlatot. Ha a földzárlat nem észlelhető, az egyenáramú ívet generálhat, amely tüzet is okozhat.



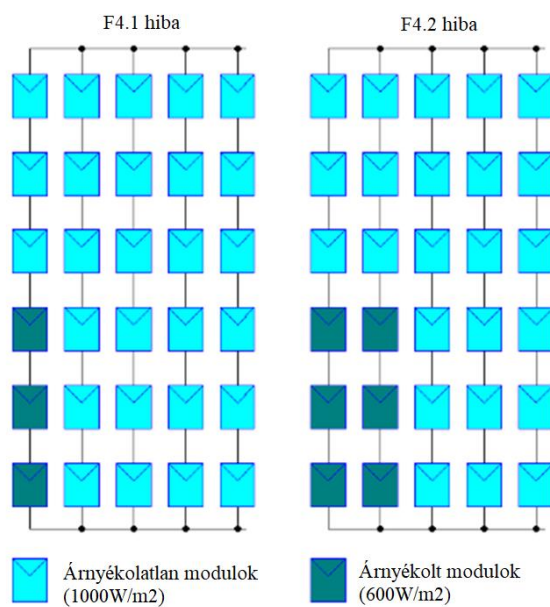


35. ábra F3 földelési hiba (a) első eset, (b) második eset



36. ábra F3 földelési hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe

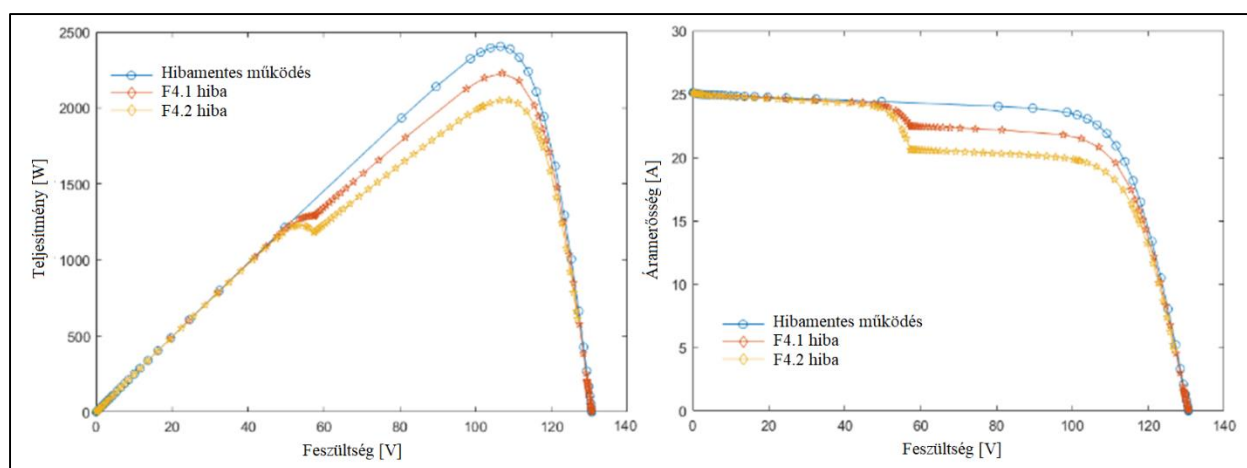
A negyedik hibaállapot talán a leggyakrabban előforduló hiba a napelemes rendszereknél ez pedig az árnyékolási hiba. Ezek F4.1 és F4.2 jelzéssel a 37. ábrán láthatók. A két eset az árnyékolás mértékében különbözik, illetve a leárnyékolt panelek darabszámában. Az áram-feszültség és teljesítmény-feszültség görbéket a 38. ábra mutatja. A részleges árnyékolás az a jelenség, amikor egy PV-tömb egyenetlen besugárzást és hőmérsékletet kap, amelyet az elhaladó felhők, szomszédos épületek vagy bármilyen tereptárgy például kémény vagy a panelek felé belógó növényzet is okozhatja. Nem megfelelő telepítésnél, amikor a megfelelő távolságot nem tartják be két napelem sor között, a reggeli és esti órákban szintén okozhatja ezt a hibát az önárnyékolás. A munkapontban globális és lokális maximum pontok alakulnak ki, de a napelemes tömb rövidzárási árama és üresjárású feszültsége alapvetően invariáns.



(a)

(b)

37. ábra F4 árnyékolási hiba (a) első eset, (b) második eset

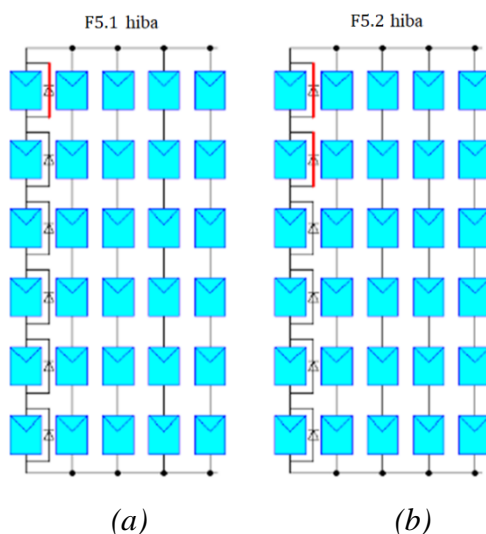


(a)

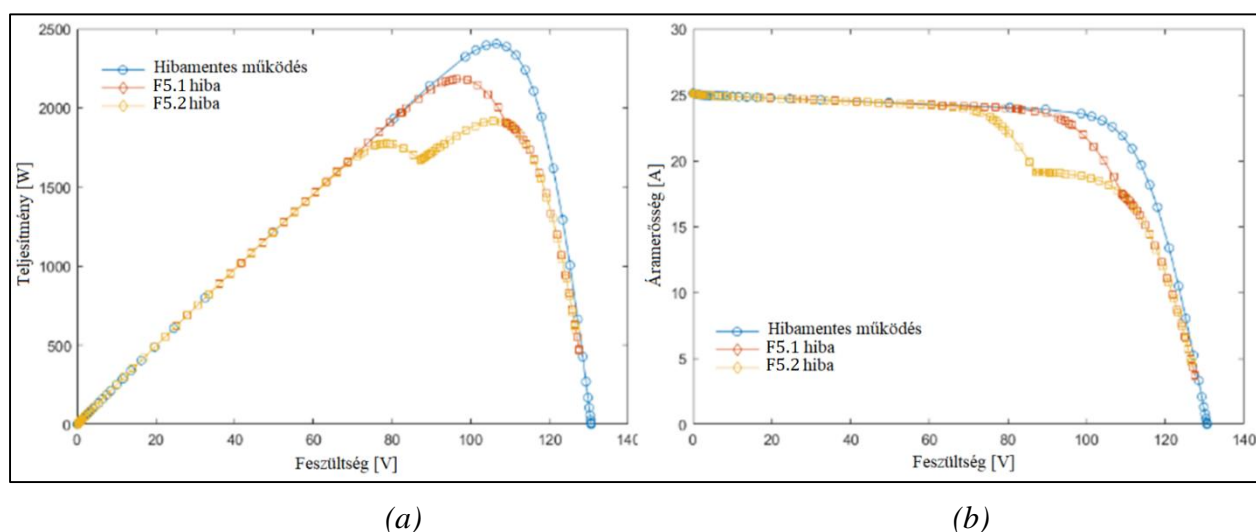
(b)

38. ábra F4 árnyékolási hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe

Az ötödik vizsgált hibaállapot a bypass dióda hiba, ezek F5.1 és F5.2 jelzéssel a 39. ábrán láthatók. Az áram-feszültség és teljesítmény-feszültség görbéket a 40. ábra mutatja. Egy bypass diódát általában párhuzamosan kapcsolnak több cellára, hogy javítsák a napelemes rendszer működését egyenetlen körülmények között. A bypass dióda meghibásodhat villámcsapás vagy normál működés közben a termikus hatás miatt [61, 62, 63, 64, 65]. A meghibásodás következtében ellenállásként vagy teljesen rövidzárként üzemel tovább az áramkörben.



39. ábra F5 bypass dióda hiba (a) első eset, (b) második eset



40. ábra F5 bypass dióda hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe

Amikor különböző hibák jelennek meg egy napelemes rendszer egyenáramú oldalán, a kimeneti paraméterek jellemzői esetenként nagyon eltérőek lesznek. A hibák következtében a jelleggörbén lokális és globális maximumpontok figyelhetők meg a F2, F3, F4 és F5 esetben. A mértéke pedig attól függően változik, hogy a sztringen belül hol található a hiba forrása. Minden esetben az inverternek szabályoznia kell a kimeneti értéket, és az is megállapítható, hogy az ilyen hibák minden esetben csökkentik a kimeneti teljesítményt.

### 5.1.3. A feszültség értékének változása a hőmérséklet függvényében

Ebben a fejezetben a napelemes kiserőmű villamos hálózatra gyakorolt hatását foglaltam össze a külső hőmérséklet változása függvényében. A napelemek egy 27 kW-os névleges teljesítményű (AC) inverterre csatlakoznak. Az inverter adattábláját az 5. táblázat mutatja. Az inverter egyenáramú oldalára összesen 37,8 kWp névleges teljesítményű napelem tömb csatlakozik. A

kiválasztott napelem modulok teljesítménye 280 W. A 6. táblázat a kiválasztott PV modulok adatait mutatja.

5. táblázat. Az inverter adattáblája

AC oldali kimeneti teljesítmény ( $P_{AC}$ )	27 kW
DC oldali feszültség ( $U_{DC, MIN} - U_{DC, MAX}$ )	580 – 1,000 V
Munkaponti tartomány ( $U_{MP, MIN} - U_{MP, MAX}$ )	580 – 850 V
Induló feszültség ( $U_{DC START}$ )	650 V
Feszültség tolerancia ( $\Delta U$ )	+20 %; -30 %
DC oldali maximális üzemi áramerősség ( $I_{DC, MAX}$ )	47.7 A
DC oldali maximális rövidzárási áramerősség ( $I_{RZ, MAX}$ )	71.6 A
Maximális teljesítmény ( $P_{DC, MAX}$ )	37.8 kW <sub>p</sub>
DC oldali sztringek száma	6 pcs
Hatásfok (EU) ( $\eta_{EU}$ )	98 %

6. táblázat. A napelemek adatábláját

Maximális munkaponti teljesítmény ( $P_{MAX}$ )	280 W
Üresjárási feszültség ( $U_{\bar{u}}$ )	38.5 V
Rövidzárási áramerősség ( $I_{RZ}$ )	9.15 A
Maximális MPP feszültség ( $U_{MP}$ )	31.3 V
Maximális munkaponti áramerősség ( $I_{MP}$ )	8.79 A
Panel hatásfok ( $\eta$ )	15.4 %
Sorba kapcsolt cellák száma ( $N_S$ )	60 pcs
Hőmérsékleti együttható ( $U_{\bar{u}}$ ) ( $\mu_{U_{\bar{u}}}$ )	-0.34 %/°C
Hőmérsékleti együttható ( $I_{RZ}$ ) ( $\mu_{I_{RZ}}$ )	+0.035 %/°C
Hőmérsékleti együttható ( $P_{MAX}$ ) ( $\mu_{P_{max}}$ )	-0.45 %/°C

Meg kell határozni az inverterhez sorosan és párhuzamosan köthető PV modulok maximális számát. Egy sztring sorba kapcsolt PV modulokból áll. Ahhoz, hogy meghatározzuk a PV modulok maximális számát egy láncon belül, abból kell kiindulni, hogy a napelem modulok hőmérséklete -10 °C. Ez hideg, de napos időben lehetséges. Ebben az esetben a napelemek nagyobb feszültségen működnek ( $U_{OC}$  (-10 °C)). Az inverter bemenetének (DC oldali) maximális feszültségének ( $U_{DC, MAX}$ ) megadásával meghatározható a sztringen belüli PV modulok maximális száma:

$$n_{S, MAX} = \frac{U_{DC, MAX}}{U_{\bar{u}(-10^{\circ}C)}} = \frac{U_{DC, MAX}}{U_{\bar{u}} \cdot \left[ 1 + \frac{\mu_{U_{\bar{u}}} (T_{PANEL} - T_{STC})}{100} \right]} = \frac{1000}{38.5 \cdot \left[ 1 + \frac{(-0.34) \cdot (-35)}{100} \right]} = 23.21 \quad (13)$$

ahol:  $T_{PANEL}$  – PV modul hőmérséklete (°C),  $T_{STC}$  – a napelem modul hőmérséklete STC-n (25 °C). Ahhoz, hogy meghatározzuk a PV modulok minimális számát egy láncon belül, abból kell kiindulni, hogy a napelem modulok hőmérséklete +70 °C. Ez meleg napsütéses időben lehetséges. A vonatkozó feszültség értékéből ( $U_{MP}$  (+70 °C)) számítható. Az inverter bemenetének (DC oldali) minimális feszültségének ( $U_{DC, MAX}$ ) megadásával meghatározható a sztringen belüli PV modulok minimális száma: [21, 66, 67]:

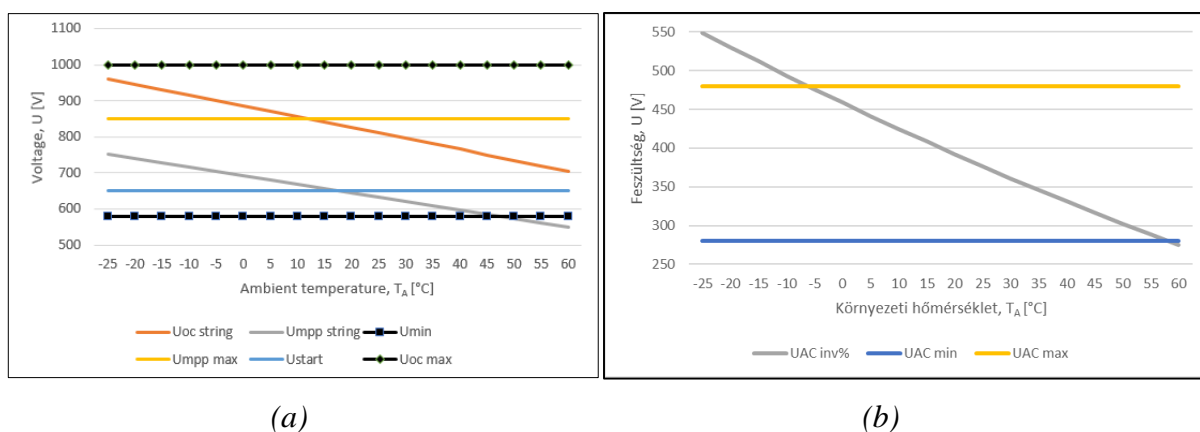
$$n_{S, MIN} = \frac{U_{MP, MIN}}{U_{\bar{u}(+70^{\circ}C)}} = \frac{U_{MP, MIN}}{U_{MP} \cdot \left[ 1 + \frac{\mu_{U_{\bar{u}}} (T_{PANEL} - T_{STC})}{100} \right]} = \frac{1000}{31.3 \cdot \left[ 1 + \frac{(-0.34) \cdot (45)}{100} \right]} = 21.87 \quad (14)$$

Az inverter legoptimálisabb működési állapota a lehető leghosszabb sztringek használata. Így a lehető legszélesebb tartományra skálázhatóak a működési korlátaink azért, hogy napelemes rendszerünk termeljen energiát a reggeli és esti órákban is. Korábbi számítások alapján egy sztringen belüli napelemek száma 23 db. Ezek után azt is ellenőrizni kell, hogy a zárlati áram az inverter maximális bemeneti árama alatt van-e ( $I_{DC,MAX}$ ). A napelemek zárlati áramát  $+70\text{ °C}$ -on ( $I_{SC} (+70\text{ °C})$ ) határozzuk meg. Ez megadja a csatlakoztatott sztringek indítóáramát a következő egyenletben [21, 67]:

$$n_{P,MAX} = \frac{I_{DC,MAX}}{I_{rZ(+70^{\circ}C)}} = \frac{I_{DC,MAX}}{U_{rZ} \cdot \left[ 1 + \frac{\mu_{ISC}(T_{PANEL} - T_{STC})}{100} \right]} = \frac{47,7}{9,15 \cdot \left[ 1 + \frac{0,035 \cdot (45)}{100} \right]} = 5,13 \quad (15)$$

A számítások alapján 23 darab napelem van sorba kapcsolva egy sztringben és 5 sztring párhuzamosan. Ez az inverterhez csatlakoztatott 115 napelem használatát jelenti [21, 67]. Az egyenáramú oldali teljesítmény a következő:  $5 \cdot 23 \cdot 280\text{ Wp} = 32,2\text{ kWp}$ , az üresjáratú feszültség  $23 \cdot 38,5\text{ V} = 885,5\text{ V}$  maximális kimeneti teljesítmény mellett (MPP), az üresjáratú feszültség  $719,9\text{ V}$  a maximális üzemi áramerősség  $43,95\text{ A}$ . A zárlati áramerősség  $45,75\text{ A}$ . Az inverterek adattáblázata szerint az említett mennyiségek megfelelőek.

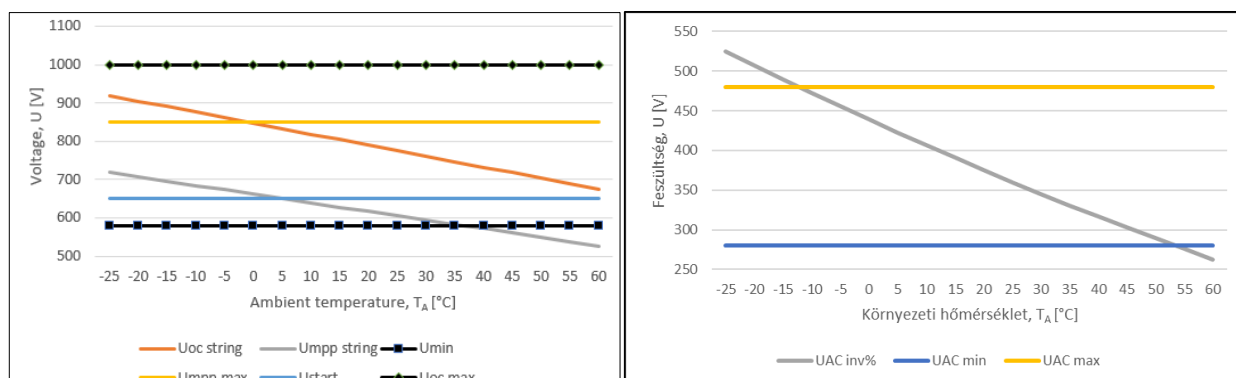
A 41. ábrán látható, hogy a sztring üresjáratú, üzemi feszültségértéke hogyan változik a hőmérséklet változás függvényében, valamint az inverter minimális és maximális üzemi feszültsége is. Ennek megfelelően, amikor a légköri hőmérséklet eléri a  $45\text{ °C}$  fokot, a feszültség olyan értékre csökken, amely kívül esik az inverter bemeneti tűréshatárán, és már nem tudja biztosítani az inverter működéséhez szükséges feszültséget. Az inverter ekkor kikapcsol, mert a működéséhez szükséges feszültségérték nem áll rendelkezésre, és üresjáratú állapotba kapcsol.



41. ábra Feszültség értékek változása a hőmérséklet függvényében a napelemes rendszer (a) egyenáramú és (b) váltakozó áramú oldalán normál üzemállapot esetén

Amikor a napelemek hőmérséklete visszaesik a megfelelő értékre és a feszültségérték ismét eléri a bekapcsoláshoz szükséges értéket, akkor újra bekapcsol és üzemel, ez hiszterézis típusú szabályozást eredményez. A 41. ábra azt mutatja, hogy ez a tendencia hogyan változik az AC oldalon (a hálózat kiefeszültségű oldalán). Látható, hogy a  $-10\text{ °C}$  és  $+55\text{ °C}$  tartományon kívül az inverter nem képes fenntartani a szükséges  $+20\%$  és  $-30\%$  százalékos feszültségtűrést.

Az 42. ábra mutatja azt az esetet, ha egy sztringen belül egy panel árnyékhatásnak van kitéve, tehát a bypass diódákon keresztül üzemel tovább, ebben az esetben 23 panel helyett egy sztringben csak 22 panel üzemel.



(a)

(b)

42. ábra Feszültség értékek változása a hőmérséklet függvényében a napelemes rendszer (a) egyenáramú és (b) váltakozó áramú oldalán 1 panel hiba esetén

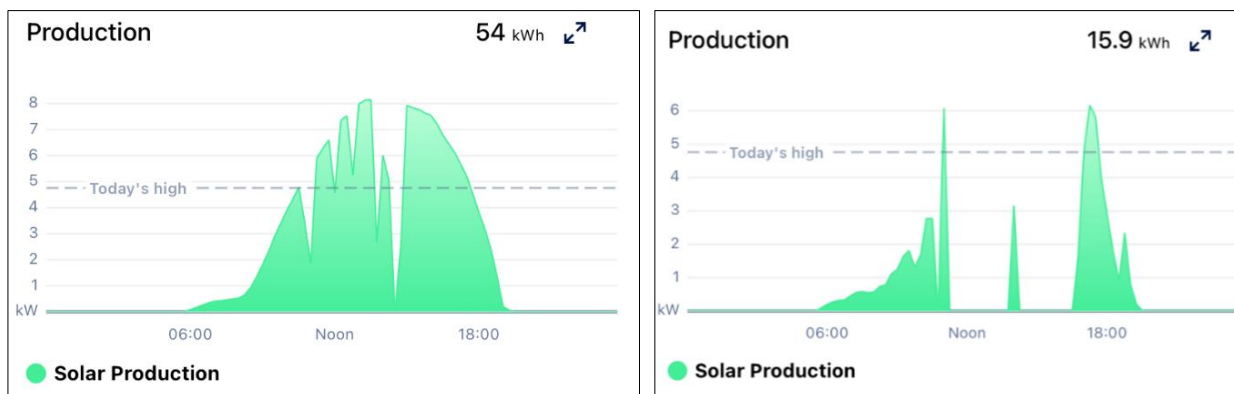
A feszültségérték alacsonyabb hőmérsékleten ( $35\text{ °C}$ ) éri el a kritikus értéket, amelynél az inverter kikapcsol. Ez az érték 23 panel esetében volt magasabb ( $45\text{ °C}$ ). Tehát megfigyelhető, hogy az egyenáramú oldali hibák, váltakozó áramú oldalon nem csak teljesítménycsökkenést okoznak, hanem a hőmérséklet függvényében hamarabb érheti el azt a feszültségtartományt, ahol már nem tud megfelelően üzemelni és ennek eredményeképpen lekapcsol, amikor a tolerancia tartományon kívül esik a feszültség értéke. Ha van egy árnyékolt panelünk ahol a bypass dióda működik csak, akkor hamarabb el fogja érni a kritikus értéket, ahol tartományon kívül esik.

#### 5.1.4. Feszültségérték változással kapcsolatos pontozási rendszer

A magyar villamosenergia-rendszer hálózatai közül tipikusan sugaras hálózatok a 20 kV-os szabadvezetékes-, valamint a 10 kV-os kábelhálózatok. A kisebb biztonsági igényű ipari fogyasztók belső villamosenergia-ellátása is kialakítható sugaras jelleggel. Ezek általában 10, 6, 3, 0,4 kV-os kábelhálózatok. Sugaras a kisfeszültségű, kis teljesítményű, szétszórt, vidéki fogyasztók 0,4 kV-os szabadvezetéki ellátási alakzata.

A hálózati feszültség szabályozása a csomóponti feszültségek szabályozásán alapszik. A hálózatra tápláló elosztott termelőegységek elterjedésével a feszültségszabályozási elveket alapjaiban is megváltoztatja, mivel a betáplálás hatására a termelőegységekhez közeli csomópontoknál a feszültség értéke akár nagyobb is lehet mint az eredetileg tápponti feszültség.

Amennyiben a napelemes rendszerek darabszáma az adott villamoshálózati szakaszon megnövekszik, olyan jelenségeket is okozhat, hogy ezen termelőegységek kimeneti feszültség értéke annyira megemeli a hálózati feszültség értékét, hogy egyes egységek inverter működésére negatívan hathatnak. Például egy olyan napszakban, amikor a rendszernek termelnie kellene, az inverter lekapcsol mivel az elfogadható tartományon kívül esik a hálózati feszültség értéke. Erre az esetre látható példa a 43. ábrán.



(a)

(b)

43. ábra (a) Napelemes termelés normál üzemállapot esetén, (b) termelés kiesése feszültségemelkedés miatt

Ez sokkal nagyobb mértékben jelenkezik abban az esetben amikor egy napelemes rendszernél nincs önfogyasztás egy adott napszakban, hanem a hálózatra való visszatáplálás üzemállapota áll fenn. Amennyiben az épületnek van önfogyasztása, legyen az akármilyen fogyasztó vagy akkumulátortelep töltése, akkor a feszültségemelkedés mértéke kevesebb. A feszültségérték változással kapcsolatos értékelés pontozási rendszerét a 7. táblázat tartalmazza.

7. táblázat. A feszültségérték változással kapcsolatos pontozási rendszer

Nem releváns, mert nincs hálózati csatlakozás	0
Mindig feszültségemelkedést okoz és nagy mértékben, ha nincs önfogyasztás	1
Mindig feszültségemelkedést okoz és kis mértékben, ha nincs önfogyasztás	2
Ha nincs önfogyasztása az épületnek, akkor feszültség növekedést okozhat, de a rendszerre kapcsolt akkumulátorkapacitás miatt ez a feltöltést követően jelentkezhet	3
Ha nincs önfogyasztása az épületnek, akkor nagyon kis eséllyel okoz feszültség növekedést a nagy akkumulátorkapacitás miatt	4

## 5.2. Felharmonikusok hatása

A harmonikus áramokat a nemlineáris terhelés hozza létre. Pontosabban a terhelés által az alapharmonikusból harmonikus alakított áramok a hálózati impedanciákon keresztül záródnak. Ennek eredményeként harmonikus feszültségesések keletkeznek a hálózati elemeken, és harmonikus feszültségek jelennek meg a teljes létesítmény minden eleménél. A feszültségharmonikusokat az áramharmonikusok okozzák, amelyek torzítják a feszültség hullámformáját. Ezek a feszültségharmonikusok az egész rendszert érintik, nem csak az őket okozó terheléseket. Hatásuk a harmonikusokat okozó terhelés áramforrástól mért távolságától függenek.

Harmonikus áramok okozta problémák lehetnek az alábbiak [75, 76]:

- a nullavezetők túlterhelése,

- transzformátorok túlmelegedése,
- a megszakítók téves működése,
- fázisjavító kondenzátorok túlterhelése,
- szkinhatás.

Továbbá a harmonikus feszültség okozta problémák lehetnek a következők:

- a feszültség torzulás,
- az indukciós motorok veszteségének növekedése,
- nulla átmeneti bizonytalanság.

A leggyakoribb nemlineáris terhelések, amelyek harmonikus áramot generálnak a kapcsolóüzemű tápegységek, fénycsövek elektronikus előtéttel, szünetmentes tápegységek, frekvenciaváltós hajtások hajtások. Emellett az elosztóhálózaton a napelemes rendszerek elmúlt években megnövekedett inverterei is hozzájárulnak a harmonikus komponensek térnyeréséhez. [50, 77, 78]. Ez a tendencia az elkövetkező években tovább erősödik. Ezen túlmenően, ha a napsugárzás egyenetlen, akkor az egész napelemes rendszerben, például felhős napon, sokkal többet kell szabályozni, hogy a rendszerből maximális teljesítményt kapjunk. A töltésvezérlő áramkör folyamatosan figyeli és megtalálja azt az optimális feszültség-áram értéket, amely mellett mindig maximális teljesítményt kaphat. A napelem panelek folyamatos hőmérséklet változása miatt további szabályzásra van szükség a maximális teljesítmény érdekében. Ez viszont a harmonikus értékek változását okozza. Az év különböző szakaszaiban különböző THD szintek keletkeznek [68, 69, 79].

### **5.2.1. Harmonikusok, Fourier transzformáció**

Ideális esetben minden terhelésnek és forrásnak tiszta szinuszos áramhulláma van. De sajnos a legtöbb berendezés valódi hullámformája nagyon eltérő. A nemlineáris terhelések a hálózati feszültség torzulását okozzák. A nemlineáris fogyasztók közös jellemzője, hogy szinuszos feszültségről vett áramuk nemcsak a hálózati frekvenciakomponenst tartalmazza, hanem annak egész vagy nem egész számú többszörösét is [80, 81]. Így a fogyasztók csoportosításának egyik módja az, hogy osztályozzuk őket a fogyasztói áramban lévő harmonikus áram jelenléte alapján. A fogyasztók a fentiek alapján alapvetően két csoportra oszthatók: 1. lineáris fogyasztók 2. nemlineáris fogyasztók A fogyasztók impedanciája, áramerőssége és teljesítménye mindkét csoportban állandó vagy időben változó lehet, a fogyasztók pedig szimmetrikus háromfázisúak vagy aszimmetrikusak [80, 81]. A harmonikus áramokat nemlineáris elektronikus terhelések vagy nem szinuszos források generálják. Az energiarendszer impedanciáin átfolyó harmonikus áramok feszültségharmonikusokat generálnak és torzítják a tápfeszültséget. A harmonikus áramot egy másik fogyasztó közvetlenül nem érzékeli, de a harmonikus áram a hálózat impedanciáján keresztül (a hálózat merevsége miatt) torzítja a feszültséget. Így már nem beszélhetünk teljesen szinuszos feszültségről [50].



Egy periodikus függvény előállítható végtelen számú szinusz- és koszinuszfüggvény összegeként, amelyek körfrekvenciái az alapkörfrekvencia (a legalacsonyabb körfrekvenciás tag körfrekvenciája) egész számú többszörösei. A periodikus jelet harmonikus komponensekre bontják [84]. A hullámforma-torzítások túlnyomó többségét periodicitás jellemzi, azaz olyan szinuszos komponenseket tartalmaznak, amelyek frekvenciája az alapharmonikus többszöröse. Az ilyen komplex periodikus jelek (feszültségek) hatása a harmonikus komponensek egyedi hatásaival és a hatások összességével jellemezhető, ezért Fourier-rendben vizsgáljuk [82, 83, 84].

$$f(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos k\omega t + B_k \sin k\omega t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (F_k \cos k\omega t + \rho_k) \quad (16)$$

ahol az együtthatók a következőképpen határozhatók meg:

$$F_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t) \quad (17)$$

$$A_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos k\omega t d(\omega t) \quad (18)$$

$$B_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin k\omega t d(\omega t) \quad (19)$$

$$F_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad (20)$$

$$\operatorname{tg} \rho_k = -\frac{B_k}{A_k} \quad (21)$$

Így Fourier-soros dekompozícióval lehetőség nyílik az adott jel vizsgálatára az időtartományon kívül a frekvenciatartományban is. A dekrementált jel tartalmazza az egyes komponensek amplitúdóját (általában decibelben) és kezdőfázisát egy adott körfrekvencián. Az 50 Hz-nél nagyobb felharmonikusokat harmonikusoknak nevezzük.

### 5.2.2. Teljes harmonikus torzítás

A harmonikus elemzéshez kapcsolódó alakjellemező az úgynevezett torzítási tényező, amely azt jellemzi, hogy egy periodikus jel milyen mértékben tér el a tiszta szinuszos jeltől. Ezt teljes harmonikus torzításnak (THD) is nevezik, és a fogyasztó nemlinearitása jellemzi. Általában százalékban adják meg [70, 72, 85, 86]. A teljes feszültségtorzítás a következőképpen írható fel:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^K U_k^2}}{U_1} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{U_{2,rms}^2 + U_{3,rms}^2 + U_{4,rms}^2 + \dots + U_{kmax,rms}^2}}{U_{1,rms}} \cdot 100\% \quad (22)$$

ahol  $THD_U$  a feszültség harmonikus torzítás százalékos értéke, az  $U_k$  a  $k$ -edik harmonikus feszültség effektív értéke,  $U_1$  az alapharmonikus feszültség effektív értéke,  $K$  az utolsó vizsgált harmonikus száma. A teljes áramtorzítás pedig hasonló módon a feszültségtorzításhoz a következő képlettel fejezhető ki:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^K I_k^2}}{I_1} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{I_{2,rms}^2 + I_{3,rms}^2 + I_{4,rms}^2 + \dots + I_{kmax,rms}^2}}{I_{1,rms}} \cdot 100\% \quad (23)$$

ahol:  $THD_I$  az áram harmonikus torzítás százalékos értéke, az  $I_k$  a k-adik harmonikus áram effektív értéke,  $I_1$  az alapharmonikus áram effektív értéke,  $K$  az utolsó vizsgált harmonikus száma.

A harmonikus feszültségek növelik a hálózati és fogyasztói berendezések veszteségét, csökkentik az élettartamot, zavarják a biztonsági, elektronikai és informatikai berendezéseket [50, 70, 71, 72, 85, 86]. Az MSZ EN 50160 szabvány szerint a tápfeszültség THD értéke nem haladhatja meg a 8%-ot a harmonikusok 40-es rendszámáig számolva [73, 74, 87].

### 5.2.3. Napelemes rendszerek harmonikus vizsgálata hálózati méréssel

A harmonikus komponensek viselkedésének vizsgálatára egy 25 kW-os napelemes rendszert vizsgáltam. Az egyenáramú oldalon összesen 92 napelem modul csatlakozik az inverterhez, egyenként 265 Wp teljesítménnyel. A napelemek száma egy sztringen belül 23 db. 4 sztring csatlakozik az inverterhez, 25 kW névleges teljesítménnyel (AC). Az inverter adattábláját az 8. táblázat mutatja. A 9. táblázat a napelem modulok adatait mutatja.

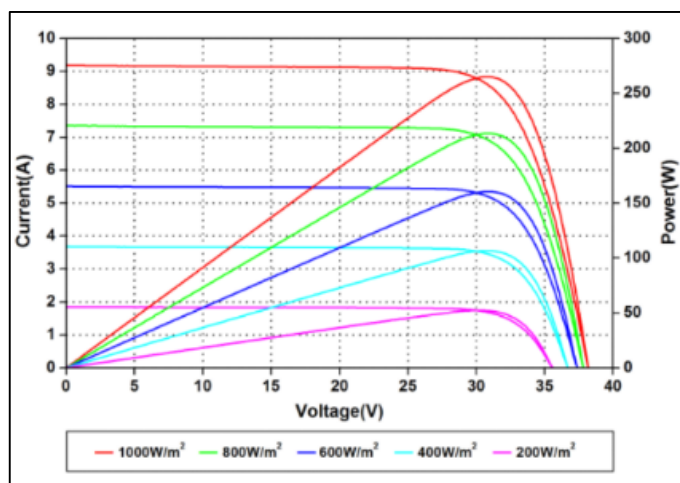
8. táblázat. Az inverter adatlapja

AC oldali kimeneti teljesítmény ( $P_{AC}$ )	25 kW
DC oldali feszültség ( $U_{DC, MIN} - U_{DC, MAX}$ )	580 – 1000 V
Munkaponti tartomány ( $U_{MP, MIN} - U_{MP, MAX}$ )	580 – 850 V
Induló feszültség ( $U_{DC START}$ )	650 V
Feszültség tolerancia ( $\Delta U$ )	+20%; -30%
DC oldali maximális üzemi áramerősség ( $I_{DC, MAX}$ )	44.2 A
DC oldali maximális rövidzárási áramerősség ( $I_{rz, MAX}$ )	71.6 A
Maximális teljesítmény ( $P_{DC, MAX}$ )	37.8 kW <sub>p</sub>
DC oldali sztringek száma	6 pcs
Hatásfok (EU) ( $\eta_{EU}$ )	98 %

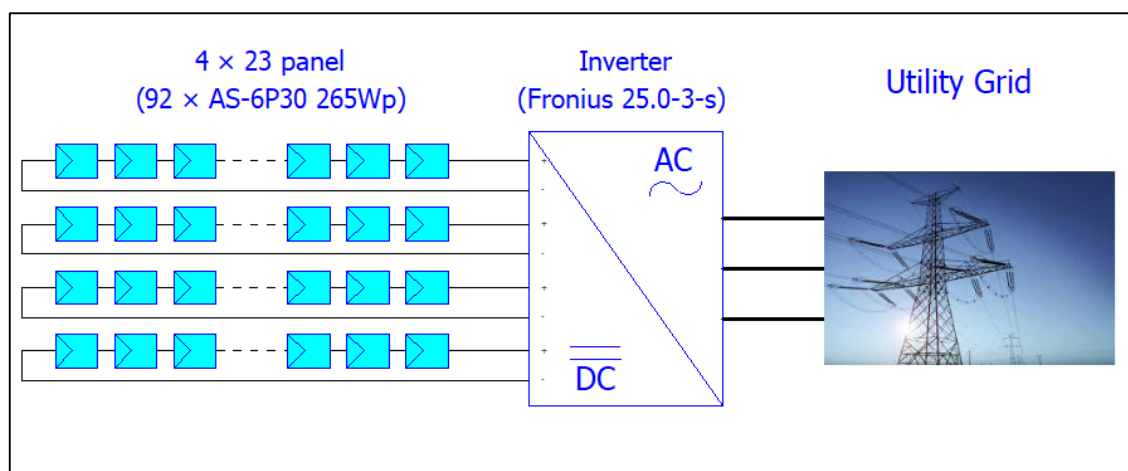
9. táblázat. A napelem panel adatlapja

Maximális munkaponti teljesítmény ( $P_{MAX}$ )	265 W
Üresjárási feszültség ( $U_{\bar{i}}$ )	38.2 V
Rövidzárási áramerősség ( $I_{rz}$ )	8.9 A
Maximális MPP feszültség ( $U_{MP}$ )	30.9 V
Maximális munkaponti áramerősség ( $I_{MP}$ )	8.47 A
Panel hatásfok ( $\eta$ )	15.98 %
Sorba kapcsolt cellák száma ( $N_S$ )	60 pcs
Hőmérsékleti együttható ( $U_{\bar{i}}$ ) ( $\mu_{U_{\bar{i}}}$ )	-0.31 %/°C
Hőmérsékleti együttható ( $I_{rz}$ ) ( $\mu_{I_{rz}}$ )	+0.05 %/°C
Hőmérsékleti együttható ( $P_{MAX}$ ) ( $\mu_{P_{max}}$ )	-0.41 %/°C

A 44. ábra az adott modul I-U és P-U görbéit mutatja STC-nél a gyártó adatlapja szerint. A 45. ábra a vizsgált napelemes rendszer vázlatos kapcsolási rajzát mutatja.

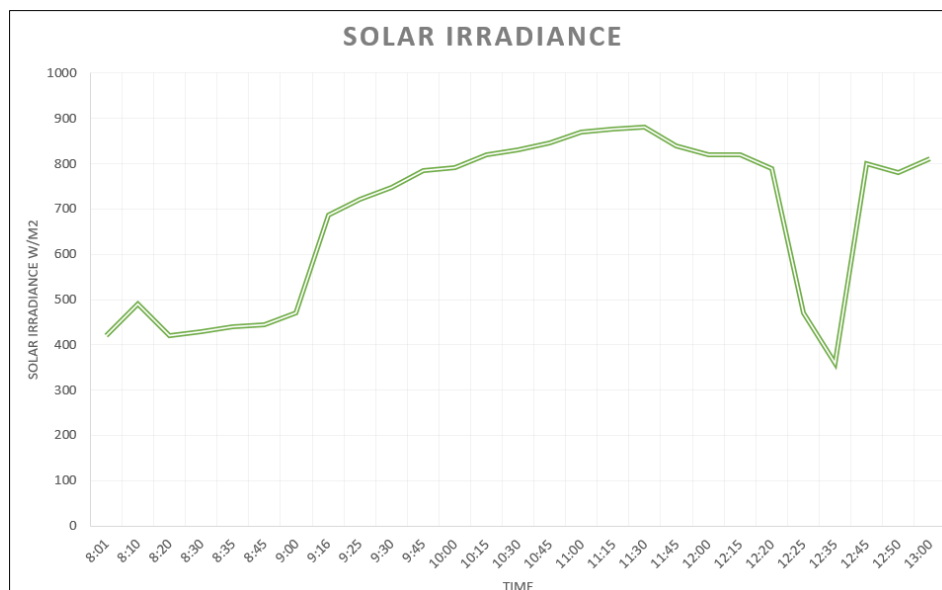


44. ábra A rendszerben használt napelem modul görbéi

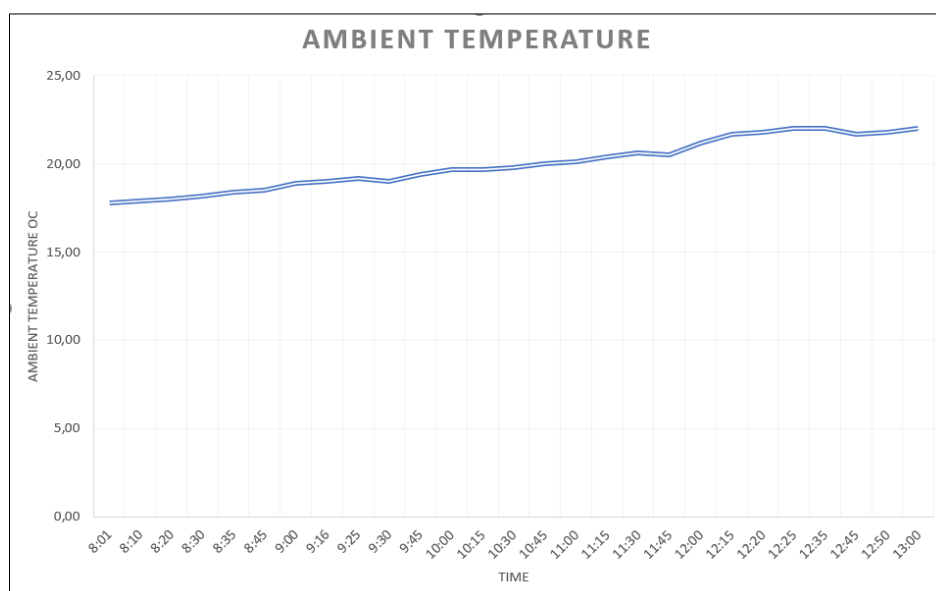


45. ábra A vizsgált napelemes rendszer felépítése

A mérés során a napsugárzás intenzitását PCE-SPM 1 típusú napenergia-mérővel, a környezeti hőmérsékletet pedig Voltcraft K204 digitális hőmérővel mértem. A napsugárzást és a környezeti hőmérsékletet 15 percenként rögzítettem. Ezeket a 46. ábra és a 47. ábra mutatja. A harmonikus feszültség- és áram mérésére Chauvin Arnoux C.A 8230 hálózati analízátort használtam.

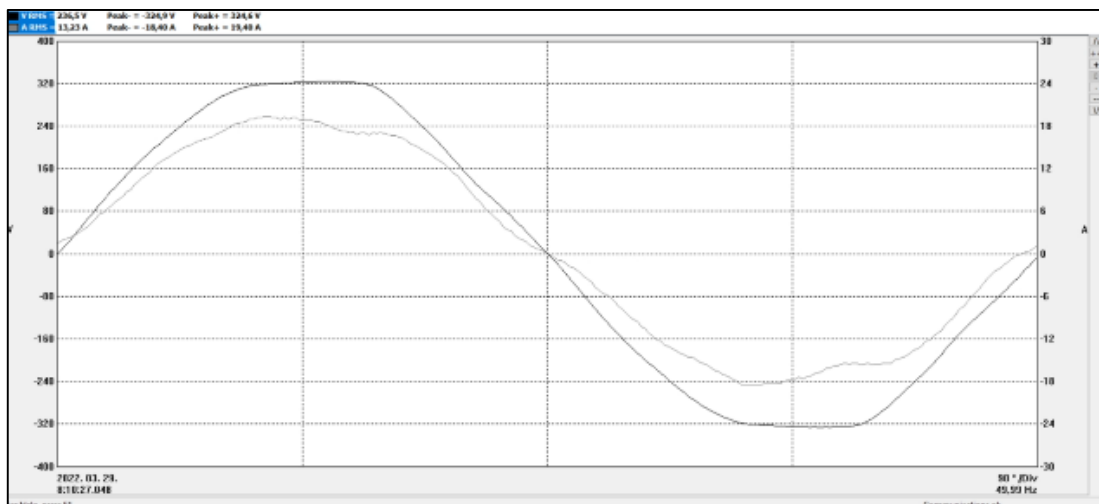


46. ábra A napsugárzás a vizsgálat során

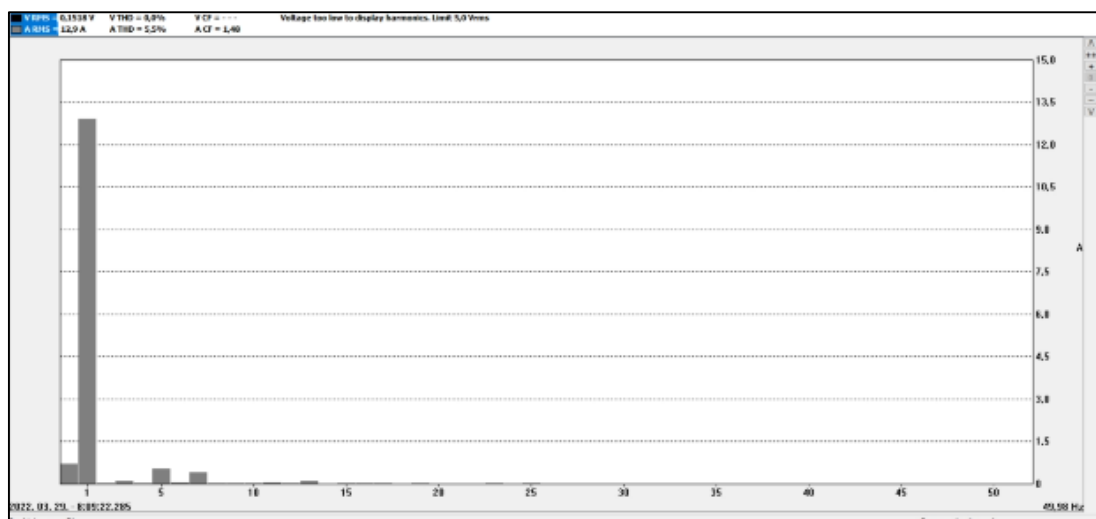


47. ábra A külső hőmérséklet a vizsgálat során

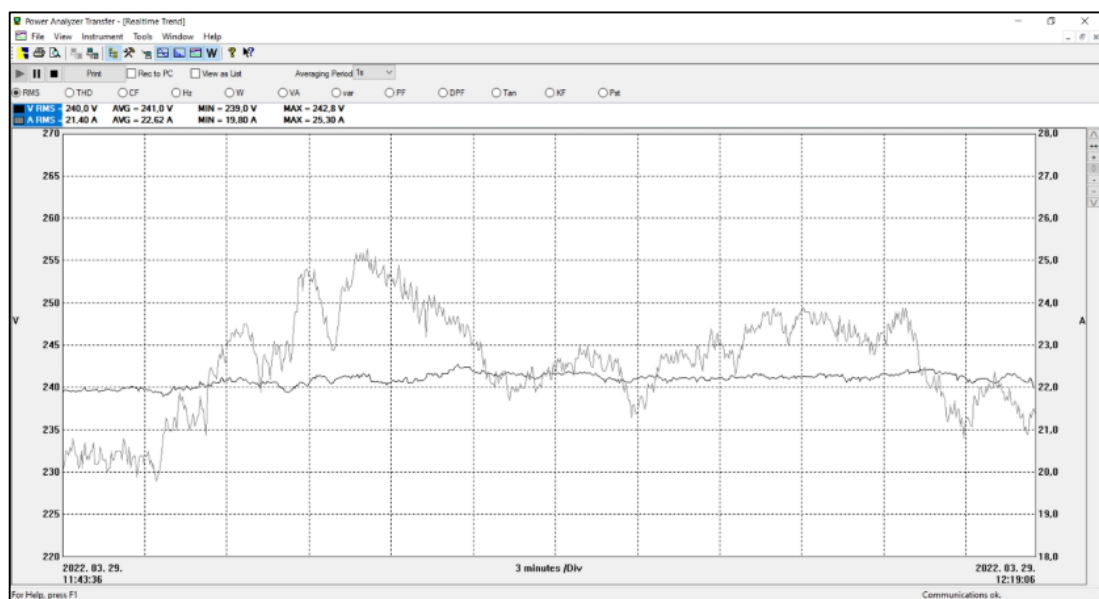
A folyamatosan növekvő besugárzásnál a THD értéke folyamatosan csökkenő tendenciát mutat, értéke kevésbé ingadozik. A THDI értéke 5,3 % és 5,5 % között mozog. Ebben az esetben a napsugárzás 260 W/m<sup>2</sup> és 400 W/m<sup>2</sup> között volt mérhető. 400 W/m<sup>2</sup> felett a THDI értéke tovább csökken, ingadozása viszont nő. Folyamatosan ingadozó trendet követ. THDI 3,4 % és 6,7 % között mérhető ami átlagosan 5,05 %. A 720–820 W/m<sup>2</sup> közötti besugárzásoknál a feszültségtrend egyenletes és stabil maradt, valószínűleg a hálózat merevsége miatt. Az áram effektív értékének trendje folyamatosan ingadozott, ami a panelek egyre növekvő hőmérsékletének tudható be. A mért feszültség és áram hullámalakját a 48. ábra, az áram harmonikus összetevőit pedig a 49. ábra mutatja. Az RMS és THD értékének a trendjét pedig az 50. és 51. ábra mutatja.



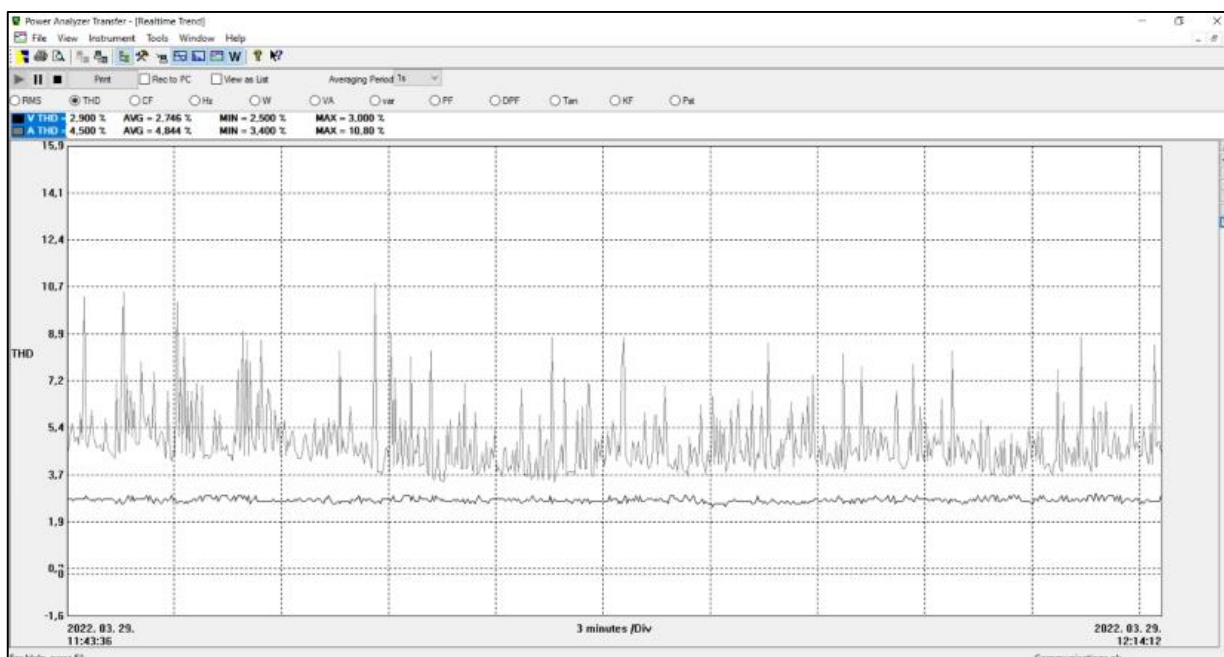
48. ábra A feszültség és áram hullámalakja 260-400 W/m<sup>2</sup> besugárzás esetén



49. ábra Az áram harmonikus összetevői 260-400 W/m<sup>2</sup> besugárzás esetén

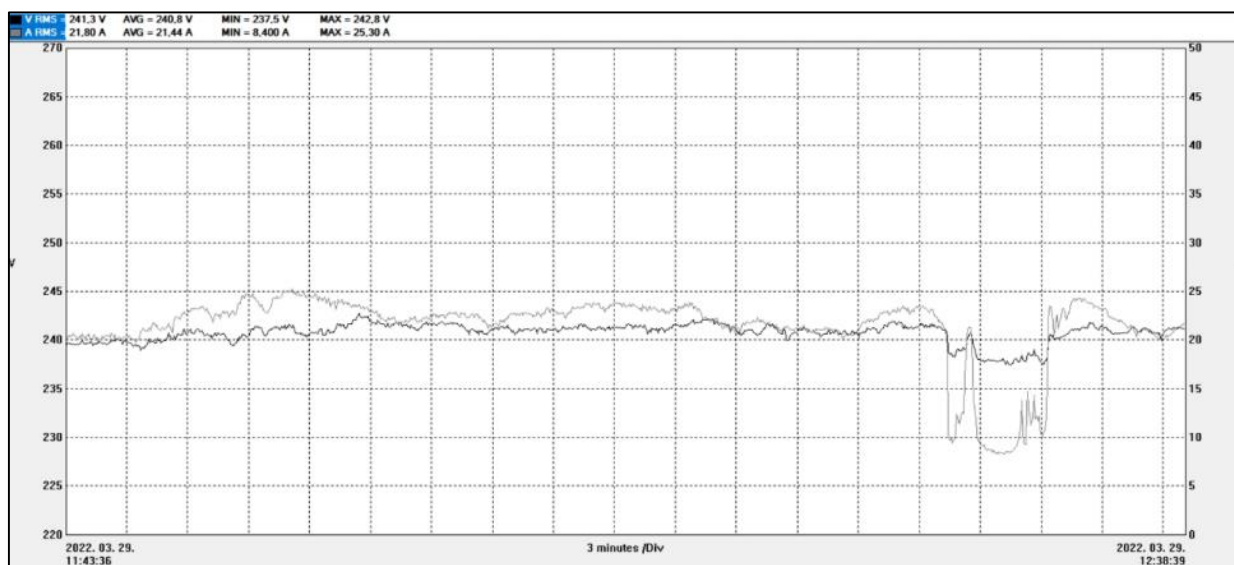


50. ábra A feszültség és az áram RMS értékének trendje

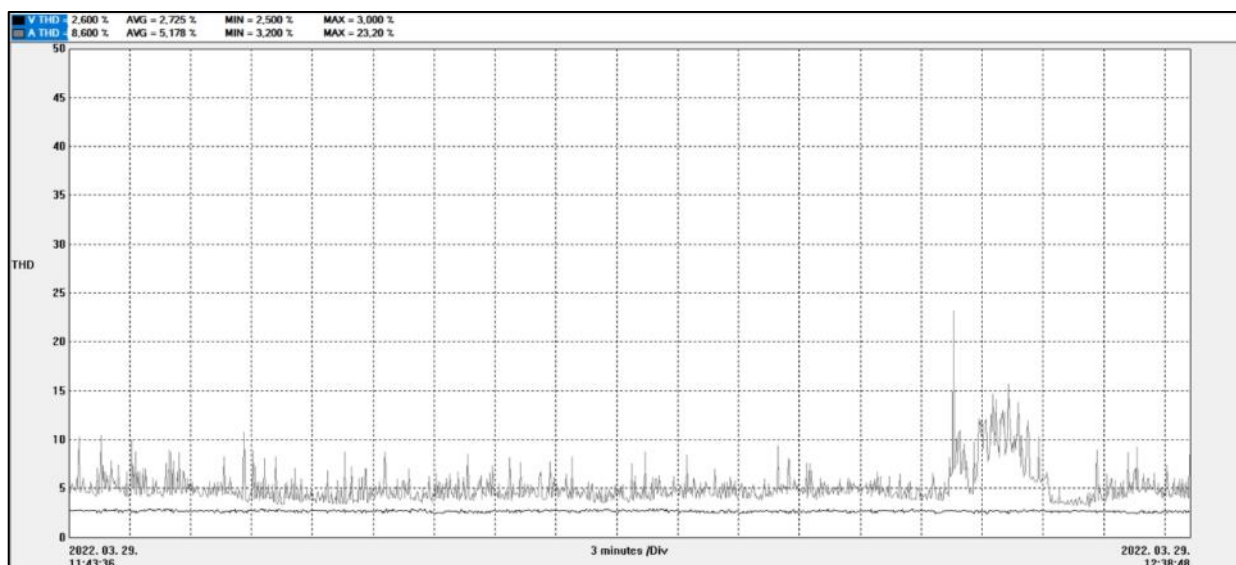


51. ábra A feszültség és az áram THD értékének trendje

Egy kisebb felhőáthaladás eredményeként a napsugárzás  $350 \text{ W/m}^2$ -re csökkent le. A feszültség és áram effektív értéke egyértelműen azt mutatja, hogy teljesítménycsökkenés alakult ki 52. ábra. A THD<sub>I</sub> trendje viszont növekvő eredményt mutatott 53. ábra. Az átlagos 5-6 %-ról az értéke 14-15%-ra növekedett.



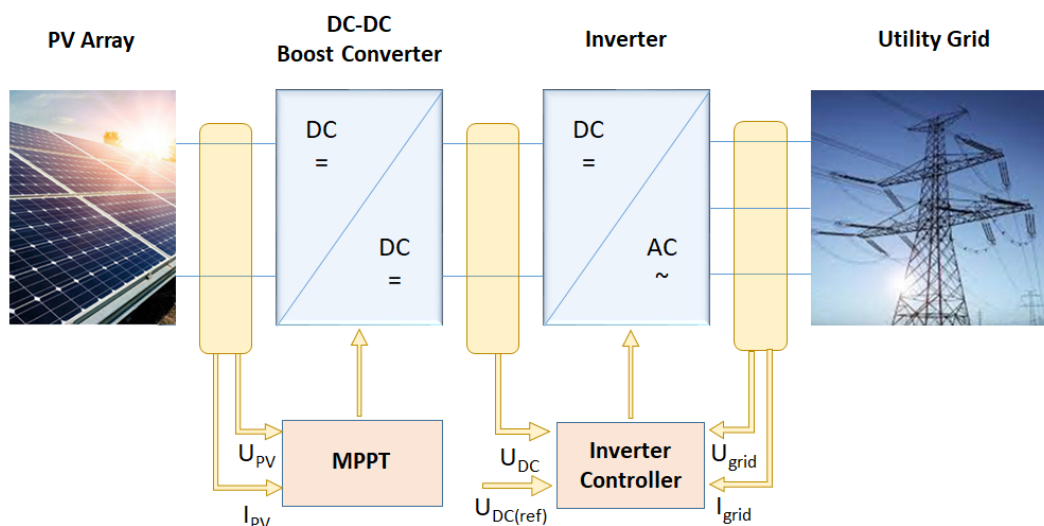
52. ábra Az áram és a feszültség RMS trendjének változása az árnyékhátás következtében



53. ábra Az áram és a feszültség THD trendjének változása az árnyékhatas következtében

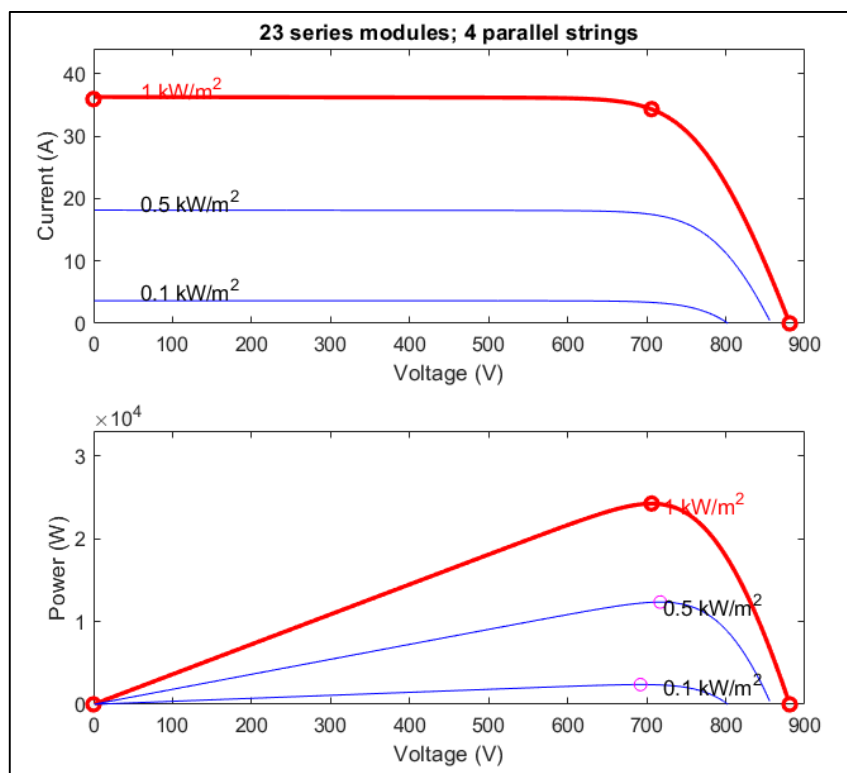
#### 5.2.4. Napelemes rendszerek harmonikus vizsgálata szimulációs környezetben

A szimulációk sokkal több esetet és eseményt jelezhetnek előre, mint a mérések. De mindenképpen szükséges az ellenőrző mérésen alapuló szimuláció validálása. A szimuláció végrehajtásához ugyanaz a rendszer lett felépítve MATLAB / SIMULINK segítségével, mint a mért rendszert. A bemeneti paraméterek (pl.: besugárzás intenzitás) tekintetében ugyanazokat az eseményeket mértem, mint a mérés során. A 54. ábrán látható szimulált hálózatra kapcsolt napelemes rendszer felépítése.

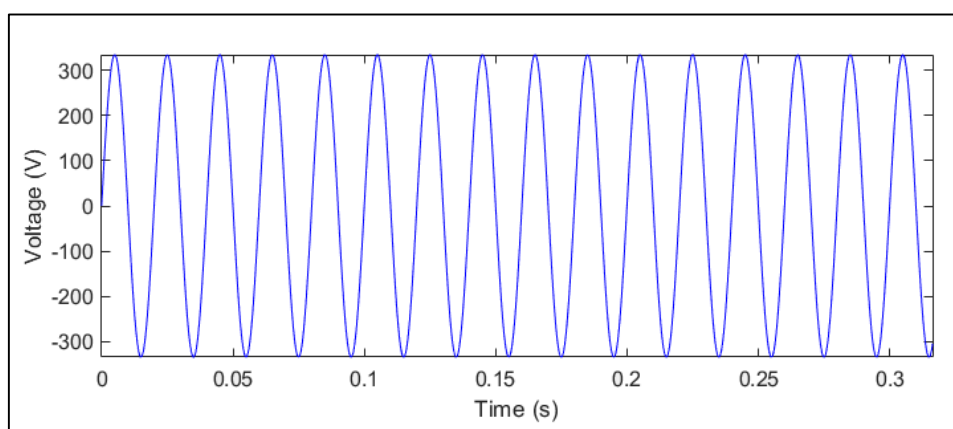


54. ábra A szimulált napelemes rendszer felépítése

A szimulált PV tömbgörbék P–U és I–U karakterisztikáját Simulink modellen keresztül szükséges ellenőrizni normál tesztkörülmények között,  $G_{\text{ref}} = 1000 \text{ W/m}^2$  és  $T_{\text{rk}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  mellett, a 55. ábrán látható módon.



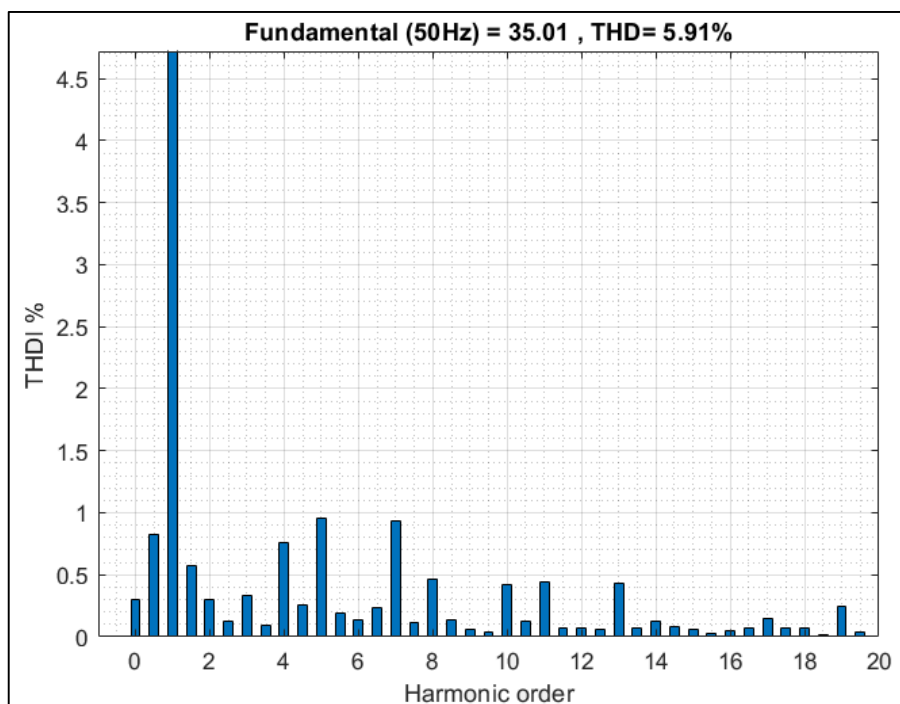
55. ábra A rendszerben használt napelem modul görbéi szimulációs környezetben



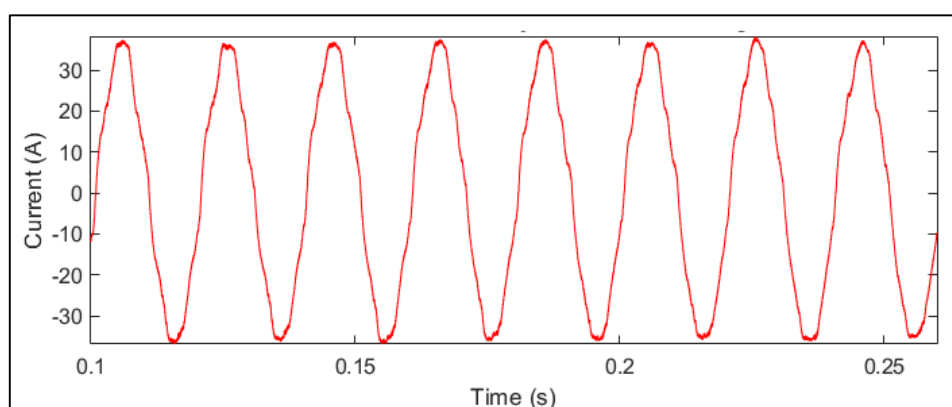
56. ábra A szimulált hálózati feszültség szinuszos hullámaformája

A 56. ábrán látható szimulációs eredmény a villamos hálózat szinuszos hulláma, amely szerint az Ugrid RMS értéke 236,7 V, amikor a napsugárzás  $820 \text{ W/m}^2$ . Ez összhangban van a 241,0 V-os mérési értékkel, ami 2%-nál kisebb eltérést jelent a mérési értékhez képest. A különbség főként a szimulációs modell és a ténylegesen telepített inverter közötti eltérő invertertopológiából adódik [78]. Az 57. ábrán látható a Matlab/Simulink FFT analízise a  $\text{THD}_I$  százalékos értékét mutatja. A szimuláció során 5,91 % érték mutatkozott  $820 \text{ W/m}^2$  besugárzás értéknél. Ez a mérés során átlagosan 5-6 % között volt mérhető. Amint a 58. ábrán látható, a villamos hálózati áram szinuszos jelalakja. A hálózati áram effektív értéke 24,75 A (Icsúcs = 35,01 A), amely  $820 \text{ W/m}^2$  besugárzásnál figyelhető meg. Összehasonlítva a mért értékekkel az áram effektív értéke átlagosan 23-25 A között volt mérhető.



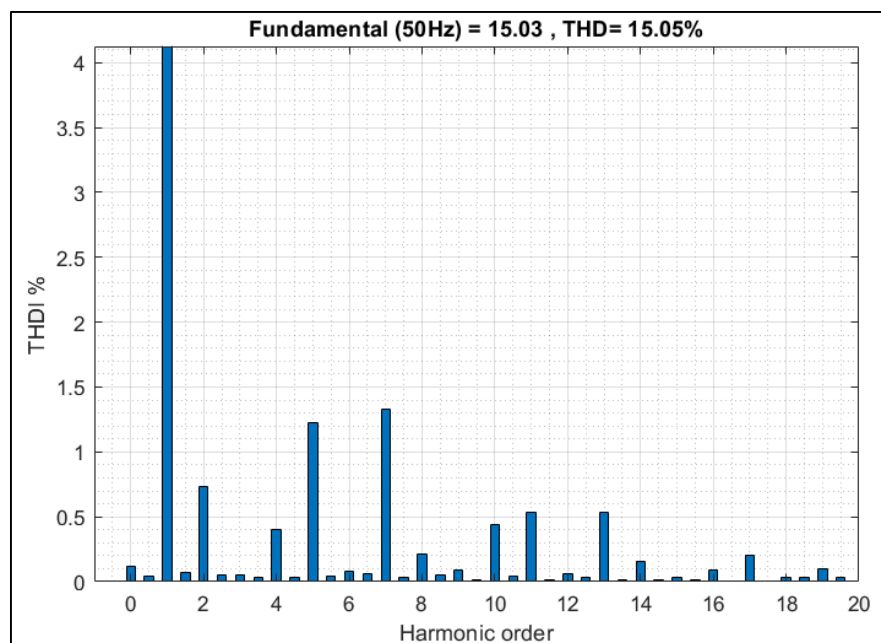


57. ábra Az áram THDI  $820 \text{ W/m}^2$  besugárzás mellett

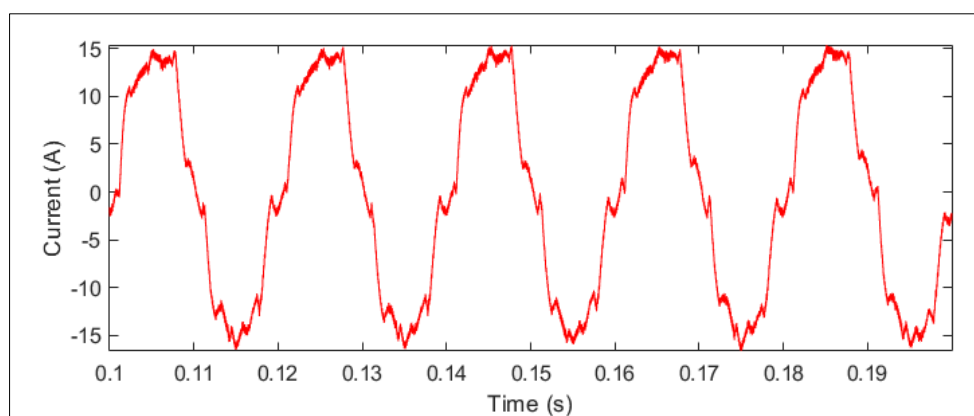


58. ábra Az áram jelalakja  $820 \text{ W/m}^2$  besugárzás mellett

A 59. ábrán látható alacsony napsugárzási teljesítmény mellett a Matlab/Simulink FFT analízise azt mutatja a THDI százalékos értéke  $350 \text{ W/m}^2$ -nél 15,05 %. A mért adatok alapján ez az érték átlagosan 14-16 % között volt mérhető. A 60. ábrán látható a villamos hálózati áram szinuszos jelalakja. Az áram effektív értéke 10,62 A (Icsúcs = 15,03 A)  $350 \text{ W/m}^2$  napsugárzás mellett. A mérésnél az áram effektív értéke átlagosan 9-11 A volt mérhető.



59. ábra Az áram THDI 350 W/m<sup>2</sup> besugárzás mellett



60. ábra Az áram jelalakja 820 W/m<sup>2</sup> besugárzás mellett

A mért értékek és a szimuláció eredményei nagyon közel állnak egymáshoz. Ez alapján kijelenthető, hogy a mérési körülményeket sikerült szimulációs környezetben is reprodukálni és validálni a szimulációt. A kisebb eltérések a szimuláció és a ténylegesen telepített rendszer között az betudható az eltérő hálózati topológiának. A mérésekből jól látható, hogy az inverter áramának THD értékét különböző napsugárzási szintek befolyásolják. Ezért egyértelmű, hogy a THD<sub>i</sub> értéke magas, alacsony napsugárzási szint mellett, és a PV-modul kimeneti áramát a különböző napsugárzási szintek befolyásolják. Megfigyelhető, hogy a napelemek felületi hőmérséklete hozzájárulnak a harmonikus torzítás mértékéhez. Mivel a reggeli órákban, amikor a sugárzási szint folyamatosan emelkedett (300 W/m<sup>2</sup>) vagy a besugárzás hirtelen lecsökkent a napi csúcson (800 W/m<sup>2</sup>-ről 300 W/m<sup>2</sup>-re) nem ekvivalens a harmonikus torzítás tekintetében még akkor is, ha a besugárzás mindkét esetben egyenlő 10. Táblázat.

10. táblázat. A THD változása ugyanazon besugárzási értékeknél

Besugárzás [W/m <sup>2</sup> ]	350 W/m <sup>2</sup> (reggel)	820 W/m <sup>2</sup> (dél)	350 W/m <sup>2</sup> (dél)
THD <sub>I</sub> [%]	THD <sub>I</sub> = 3-4 %	THD <sub>I</sub> = 5-6 %	THD <sub>I</sub> = 14-16 %
Környezeti hőmérséklet [°C]	16 °C	22 °C	22 °C
Napelem panelek hőmérséklete [°C]	22-25 °C	50-60 °C	50-60 °C
Megjegyzés	Reggeli órák, amikor a besugárzási szint folyamatosan emelkedik	Napi csúcserték	A besugárzás azonnal leesik 820W / m <sup>2</sup> -ről 350W / m <sup>2</sup> -re

Ez a hőmérséklet-különbség miatt is lehetséges, amely a panelek felületén mérhető. A mérésekből megállapítható, hogy a felhő átvonulás hatására nemcsak a rendszer teljesítménye csökken, hanem a harmonikus torzítás mértéke is nő a panelek aktuálisan magas hőmérséklete miatt. A terepi mérések és a szimuláció eredményei azt mutatják, hogy a besugárzás változásának kiváltó oka jelentős hatással van a harmonikusok viselkedésére.

#### 5.2.5. A teljes harmonikus torzítás értékével kapcsolatos pontozási rendszer

Egy napelemes rendszer harmonikus profiljának javítása érdekében számos módszer áll rendelkezésre. Az egyik a szűrők és szabályozók használata. Ezek lehetnek passzív vagy aktív szűrők illetve szabályozók. Továbbá a megfelelő minőségű inverterek kiválasztása és megfelelő beállítása szintén hozzájárulhat a rendszer harmonikusainak csökkentéséhez. Megfelelő kábelezés és földelőrendszer kialakítása is segít a harmonikusok negatív hatásainak csökkentésében. Akkumulátor telep alkalmazásával inverter típusától függően javíthatja a hálózat harmonikus profilját. Elektromos autók töltése általában negatívan hat a harmonikusok értékére, de fix telepítésű akkumulátor telepek esetén rendszertől függően javíthat ezen. A Teljes harmonikus torzítás értékével kapcsolatos értékelés pontozási rendszerét a 11. táblázat tartalmazza.

11. táblázat. A Teljes harmonikus torzítás értékével kapcsolatos pontozási rendszer

Nem releváns, mert nincs hálózati csatlakozás	0
Magas mértékű THD-t okoz	1
Közepes mértékű THD-t okoz	2
Alacsony mértékű THD-t okoz	3
Elhanyagolható mértékű THD-t okoz	4

### 5.3. Élettartam és öregedés

A különböző típusú napelemes rendszerek mindegyikénél öregedési és élettartamproblémák merülnek fel. Ezek befolyásolhatják a rendszerek hatékonyságát és működését. A napelem panelek idővel degradálódnak és veszítenek hatékonyságukból. Továbbá a környezeti hatások, például az UV-sugárzás, az időjárás és a szennyeződés hozzájárulhatnak a panelek teljesítményének csökkenéséhez [90, 91, 92]. Az inverterekben használt elektronikai alkatrészek, hajlamosak lehetnek meghibásodásra és teljesítményvesztésre hosszabb távon. Különösen akkor, ha ezen eszközök méretezése nem megfelelő. Ez csökkentheti a rendszer hatékonyságát és megbízhatóságát. Fontos lehet még a rendszeres teljesítményének ellenőrzése és monitorozása. Ezek a mérések segíthetnek az esetleges problémák és hibák korai észlelésében, lehetővé téve a gyors és hatékony beavatkozást az időben történő javítást [93, 94, 95, 96]. Egy napelemes rendszernél a rendszerelemek kiválasztása kulcsfontosságú az élettartamot tekintve. Egy inverter, amennyiben alul van méretezve akkor a működése során előfordulhat, hogy a munkaponti tartomány felső határában sok üzemórát tölt. Ez az inverter viszonylag korábbi tönkremeneteléhez vezethet. Az akkumulátortelemek esetén, ha nincs jól megválasztva a méretezés, akkor az akkumulátor telepek korai kapacitás csökkenéséhez vagy akár tönkremeneteléhez vezethet. Ez függ attól, hogy alul- vagy túl van méretezve. Ha alul van méretezve, akkor a túl sok töltés és kisütési ciklus lesz a káros. Ha túl van méretezve az akkumulátortelep, akkor a folyamatos "csepegtető töltés" lesz veszélyes [93, 94, 97, 98, 99]. Az öregedéssel kapcsolatos értékelés pontozási rendszerét a 12. táblázat tartalmazza.

12. táblázat. Az öregedéssel kapcsolatos pontozási rendszer

Alulméretezett inverter és alulméretezett akkumulátor	0
Alulméretezett inverter	1
Alulméretezett akkumulátor	2
Túlméretezett akkumulátor	3
Optimálisan megtervezett rendszer	4

## 6. A NAPELEMES RENDSZEREK GAZDASÁGI ELEMZÉSE

Napelemes rendszerek esetében mint minden beruháznál jelentős költségek mutatnoznak. A legfontosabb és legjelentősebb költsége a beruházási költség, amely magába foglalja a tervezési, engedélyeztetési és kivitelezési költségeket. Ezen felül a rendszer üzemeltetését és karbantartását tekintve is jelentkezik költségek a rendszer jellegétől és a rendszer méretétől függően. Továbbá fontos tényező még a megtérülési idő számítása is, amely azt hivatott megmutatni, hogy az adott beruházás gazdasági oldalról milyen mértékben és mikor térül meg a beruházónak [89, 100, 101].

A napelemes rendszereknél a méretezést kétféle módon végezhetjük el. Az egyik módszer amikor a rendszer teljesítményét úgy határozzuk meg, hogy azt összehangoljuk az ingatlan vagy létesítmény fogyasztásával. Ebben az esetben az a cél, hogy a napelemes rendszer fedezni tudja a fogyasztási igényeket vagy legalább is a lehető legközelebb álljon ehhez az értékhez. Ezt a méretezést termelésoptimalizált tervezésnek nevezik. A másik módszer az amikor meghatározott méretű helyünk van a napelemes rendszer befogadására. Itt pedig az a cél, hogy a rendelkezésre álló helyet a lehető legkedvezőbben használjuk ki. Ezt a méretezést méretoptimalizált tervezésnek nevezik.

### 6.1. Beruházási költségek

Minden napelemes rendszer típusnak más a felépítése. Rendszertípustól függően más követelmények vonatkoznak rá villamosenergia-szolgáltatói oldalról és a beruházási költségek is eltérőek lesznek.

Egy szigetüzemű rendszer esetén nem kell engedélyeztetési eljárás tehát a tervezési és engedélyeztetési költségek nem jelentkezik ennél a típusnál. Viszont érdemes megjegyezni, hogy ennél a rendszernél is szükséges a rendszerelemek (napelemes rendszer eszközei, védelmek, kábelek, stb.) méretezése mivel méretezésből adód meghibásodás esetén súlyos anyagi kár is keletkezhet. A szigetüzemű rendszer esetén az akkumulátortelep az ami a jelentős többletköltséget adja egy hagyományos hálózatcsatolt napelemes rendszerhez képest.

A hálózatcsatolt napelemes rendszer esetén a korábban felsorolt tervezési és engedélyeztetési eljárás költségei fognak jelentkezni. A rendszer a fel nem használt napenergiából származó villamos energiát képes a hálózatra visszatáplálni, melyet a villamosenergia-szolgáltató az éppen aktuális jogi szabályozásoknak megfelelően átvesz. Viszont akkumulátor telep kezelésére ez a rendszer nem képes, így ezek a többletköltség nem jelentkezik. Induló tőkét tekintve ez a rendszer jár a legkevesebb fajlagos beruházási költséggel.

A hibrid rendszerek a szigetüzemű és hálózatra csatolt rendszerek kombinációjaként működnek, melynél nem feltétel, de nem is kizárt a kétirányú fogyasztásmérés - (a hálózatba visszacsatolás a tarifától függ) , ha van, akkor a töltésvezérlési prioritásban az első a saját feltöltési tárolókapacitás. Összehasonlítva a hálózatra kapcsolt és a hibrid rendszert, a hibrid rendszer is drágább az akkumulátorcellák beruházási költsége miatt, és ebben az esetben is előfordulhat, hogy a rendszertervezés során túltervezték az egyes részegységeket például a napelemeket vagy az akkumulátor telepeket, de ez a rendszer sokkal több esetben használható. A hálózati feszültség megszűnése esetén lehetőség van a hálózaton kívüli üzemre is, ha rendelkezésre áll napenergia vagy az akkumulátor töltöttsége lehetővé teszi [88, 89, 100]. A napelemes rendszertípusok beruházásával kapcsolatos részegységeit mutatja a 13. táblázat tartalmazza. A beruházási költségekkel kapcsolatos értékelés pontozási rendszerét a 14. táblázat mutatja.

13. táblázat. Az egyes napelemes rendszerek beruházással kapcsolatos részei

	Szigetüzemű rendszer	Hálózatszatolt rendszer	Hibridüzemű rendszer
Napelem panelek	✓	✓	✓
Töltésvezérlő	✓	✗	✗
Szigetüzemű inverter	✓	✗	✗
Hálózatszatolt inverter	✗	✓	✗
Hibrid inverter	✗	✗	✓
Akkumulátor telep	✓	✗	✓
Villámvédelem	✓	✓	✓
Tartószerkezet	✓	✓	✓
Kiegészítők: kötődobozok, kábelek, stb.	✓	✓	✓
Egyenáramú oldali távlekapcsolás	✓	✓	✓
Terhelésátkapcsoló egység	✗	✗	✓
Földelőrendszer	✓	✓	✓
Munkaköltség (tervezés, kivitelezés, stb)	✓	✓	✓

14. táblázat. A beruházási költségekkel kapcsolatos pontozási rendszer

Túlméretezett panelek vagy túlméretezett akkumulátor telep	0
Hibrid rendszer akkumulátor teleppel és panelekkel (normál méretezéssel)	1
Szigetüzemű rendszer (normál méretezéssel)	2
Hibrid rendszer csak panelekkel (normál méretezéssel) akkumulátor telep nélkül	3
Hálózatszatolt rendszer (normál méretezéssel)	4

## 6.2. Karbantartási költségek

A napelemes rendszerek karbantartási és üzemeltetési költségei viszonylag alacsonyak, de van néhány lehetséges költség és költségelem, amelyet figyelembe kell venni. A hatékony működés és a maximális teljesítmény fenntartásához szükség lehet a napelemek rendszeres tisztítása. Továbbá

a szigetüzemű és hibrid napelemes rendszerek esetén az akkumulátoroknak csere- és karbantartási költségei lehetnek. Különösen hosszabb távon, amikor az akkumulátorok kapacitása csökkenhet. A napelemes rendszer telepítése növelheti az ingatlanbiztosítás értékét. Ez is besorolható a karbantartási és üzemeltetési költségek közé. Ha a napelemes rendszer rendszeres felügyeletet igényel, a karbantartási vagy üzemeltetési költségek hozzáadhatók az éves költségvetéshez. Ez általában a nagyobb rendszerekre vonatkozik. Ráadásul, ha számvitelhez kapcsolódó adminisztrációs feladatok is felmerülnek, az is növelheti az éves költségeket [100]. A karbantartási és üzemeltetési költségekkel kapcsolatos értékelés pontozási rendszerét a 15. táblázat tartalmazza.

*15. táblázat. A karbantartási költségekkel kapcsolatos pontozási rendszer*

Éves tisztítás, biztosítás, akkumulátor karbantartása, rendszer felügyeleti személyzet, adminisztratív költségek (pl. elszámolás)	0
Éves tisztítás, biztosítás, akkumulátor karbantartása, rendszer felügyeleti személyzet	1
Éves tisztítás, biztosítás, akkumulátor karbantartása	2
Éves tisztítás, biztosítás	3
Éves tisztítás	4

### 6.3. Megtérülési idő

#### 6.3.1. Egyszerűsített megtérülési idő

A megtérülési idő azt az időt jelenti, amely a beruházásra fordított pénzeszközök megtérüléséhez szükséges. Az egyszerűsített megtérülési számítás egy nagyon egyszerű módszer, amely figyelmen kívül hagyja a pénz időértékét, azonban némi betekintést nyújt egy projekt gazdasági értékébe. Az egyszerűsített megtérülési idő számítása: úgy számíthatjuk ki, hogy az egységnyi teljesítményű napelem rendszer beruházási költségét elosztjuk a rendszer által egy év alatt megtermelt villamos energia árával [89, 100, 101, 102].

$$\text{Megtérülési idő} = \frac{\text{Beruházási költség}}{\text{Éves bevétel}} \quad (24)$$

#### 6.3.2. Összetett megtérülési idő

Az egyszerűsített megtérülési számítás több olyan fontos tényezőt nem vesz figyelembe, amely nagy hatással lehet egy rendszer valós megtérülési idejének a kiszámításában [89, 100, 101, 103, 104]:

- a rendszerelemek minősége, a napelemes rendszer technológiája,
- a napelem rendszer hatékonysága (szennyeződés, napelemek árnyékolása),
- éves teljesítményromlás (a napelemeknél bizonyos mértékű teljesítménycsökkenése következik be),
- az épület elhelyezkedése, tető mérete és dőlésszöge, napsütéses órák száma,
- karbantartási és biztosítási költségek,
- az inverter/akkumulátor cseréjének gyakorisága,
- az infláció mértéke,

- a villamos energia árának emelkedése,
- finanszírozási kérdések, amelybe beletartoznak az alkalmazható állami vagy Európai uniós támogatások vagy esetleg hitelfelvétel.

Ha a felsorolt paramétereket bevonjuk a vizsgálatba, megkapjuk az összetett megtérülési időt. Az összetett megtérülési idő számítás bonyolultabb és pontosabb számítást tesz lehetővé, mint az egyszerűsített számítás. A számítást évekre bontjuk több lépésben [100, 101].

Az első lépés az  $E_p^n$  kiszámítása, amely az adott év teljes energiatermelése. A megtermelt villamosenergia-mennyiség két részből tevődik össze. Az egyik a felhasznált, a másik pedig a hálózatba visszatáplált mennyiség. A következő egyenlettel határozható meg az adott év teljes energiatermelése:

$$E_p^n = E_p^{n-1} \cdot \left(1 - \frac{PD_\eta}{100}\right) \quad (25)$$

ahol:  $E_p^{n-1}$  az előző évi energiatermelés kWh-ban,  $PD_\eta$  az évi teljesítményromlás % - ban kifejezve,  $n$  pedig az évek száma. Az első évben a teljesítményromlást nem vesszük figyelembe,  $n = 2, 3 \dots N$ ), így ott a megtermelt villamosenergia-mennyiség a következő képlettel fejezhető ki:

$$E_p^1 = \eta \cdot E_p^{max} \quad (26)$$

Az  $AM_s^n$  kiszámítása az adott évben megtakarított villamos energia mennyisége kifejezhető a következőképpen:

$$AM_s^n = E_u^n \cdot CST_{PE} \cdot \left(1 + \frac{CH_{EP}}{100}\right)^{n-1} \quad (27)$$

ahol:  $E_u^n$  az adott év felhasznált energiája kWh-ban,  $CST_{PE}$  a vásárolt villamos energia ára forintban,  $CH_{EP}$  a villamos energia ára évente változik. Ez az érték is százalékban van kifejezve. Az  $n$  az évek száma ( $n = 1, 2, 3 \dots N$ ). Az  $E_e^n$  kiszámítása az adott évben az összes exportált energia:

$$E_e^n = E_p^n - E_u^n \quad (28)$$

ahol:  $E_p^n$  adott év energiatermelése kWh-ban,  $E_u^n$  adott év felhasznált energiája kWh-ban,  $n$  az évek száma ( $n = 1, 2, 3 \dots N$ ). A  $PR_e^n$  az adott évben értékesített villamos energia nyeresége a következő egyenlettel fejezhető ki:

$$PR_e^n = E_e^n \cdot C_{SE} \cdot \left(1 + \frac{CH_{EP}}{100}\right)^{n-1} \quad (29)$$

ahol:  $E_e^n$  az aktuális év energiaexportja a hálózatba (kWh),  $C_{SE}$  az eladott villamos energia kWh-nkénti ára forintban,  $CH_{EP}$  az éves villamosenergia árának változása százalékban,  $n$  az évek száma



( $n = 1, 2, 3 \dots N$ ). A következő egyenlettel meghatározható az adott év karbantartási és biztosítási költségei :

$$CST_{m+i}^n = (CST_m^n + CST_i^n) \cdot \left(1 + \frac{Inf}{100}\right)^{n-1} \quad (30)$$

ahol:  $CST_m^n$  az adott év fenntartási költsége forintban,  $CST_i^n$  az adott év biztosítási költsége forintban,  $Inf$  az infláció százalékban,  $n$  évek száma ( $n = 1, 2, 3 \dots N$ ). A következő egyenlet segítségével a  $PR_{sum}^n$  értéke kifejezhető. Ez az adott év nyeresége:

$$PR_{sum}^n = AM_s^n + PR_e^n - CST_{m+i}^n - LN_i^n - AM_u^n \quad (31)$$

ahol  $AM_s^n$  az  $n$ -edik évben a villamos energián megtakarított összeg (Ft),  $PR_e^n$  az adott évben értékesített villamos energia nyeresége (Ft),  $CST_{m+i}^n$  az adott év fenntartási és biztosítási költsége (Ft),  $LN_i^n$  az adott év törlesztőrészlete (Ft)  $AM_u^n$  az  $n$ -edik évben vételezett villamos energia költsége (Ft). Az utolsó változót az egyenletben ( $AM_u^n$ ) csak abban esetben szükséges figyelembe venni, ha a visszatáplálás nem engedélyezett a közüzemi hálózatra. Mivel a fenti eredmény reálértéke az infláció miatt évről évre csökken, az eredmény inflációval korrigált értékét a következőképpen kapjuk:

$$PR_{sum+inf}^n = \frac{PR_{sum}^n}{\left(1 + \frac{Inf}{100}\right)^n} \quad (32)$$

A fenti számítás eredményeit évenként összeadva, azaz összesítve megkapjuk, hogy hányadik évtől jövedelmező naprendszerünk (ebben az esetben a kumulatív érték pozitív) vagy veszteséges (ebben az esetben az összesített érték negatív) [100, 101, 102, 103, 104].

### 6.3.3. *Megtérülési idővel kapcsolatos pontozási rendszer*

A megtérülési idővel kapcsolatos értékelés pontozási rendszerét a 16. táblázat tartalmazza. A megtérülési idő számításnál a 0-ás pontozás kiegészült egy -10 értékkel amennyiben a megtérülési idő nagyobb lesz mint 30 év. Mivel a pontozási rendszer ezt nem veszi figyelembe normál esetben. Viszont ez nem elhanyagolható tényező, különben a költségeket nem veszi figyelembe a rendszer.

*16. táblázat. A megtérülési idővel kapcsolatos pontozási rendszer*

26 évnél több a megtérülési idő / 30 évtől nagyobb érték esetén -10 lesz ez az érték	0 / -10
21-25 év között van a megtérülési idő	1
16-20 év között van a megtérülési idő	2
11-15 év között van a megtérülési idő	3
0-10 év között van a megtérülési idő	4

## 7. NAPELEMES RENDSZEREK VIZSGÁLATA HÁROMSZÖGMODELL SEGÍTSÉGÉVEL

A háromszögmodell alkalmazásával öt napelemes rendszer lett vizsgálva. A napelemes rendszerek három fő alaptípusát vizsgálva a szigetüzemű rendszer esetében két különböző konfiguráció, a hálózatcsatolt rendszerek esetében pedig 1 konfiguráció amely akkumulátor telep nélkül működik és 2 konfiguráció, amely akkumulátor teleppel van ellátva.

### 7.1. Szigetüzemű napelemes rendszerek vizsgálata

Szigetüzemű rendszerek esetén két különböző konfiguráció lett vizsgálva. Az első esetben egy 5 kWp rendszerhez egy 5 kWh kapacitású akkumulátor telep lett illesztve. A második esetben pedig ugyanehhez a rendszerhez az akkumulátor telep kapacitását megdupláztuk a rendszer autonómiájának érdekében. A vizsgált szigetüzemű rendszerek beruházási költségeit a 17. táblázat, továbbá a megtérüléssel kapcsolatos adatokat pedig a 18. táblázat tartalmazza.

*17. táblázat. A vizsgált szigetüzemű rendszerek beruházási költségei*

Konfiguráció	Beruházási tételek	Megjegyzés	Mennyiség	Egységár (HUF)	Teljes ár (HUF)	Összesen (HUF)
Szigetüzem (1. eset)	Napelem panelek	450 Wp/db	11	60 000	660 000	2 660 000
	Inverter + Töltésvezérlő	5 kW	1	500 000	500 000	
	Kábelek, kiegészítők, telepítés, tartószerkezet				600 000	
	Akkumulátorok	5 kWh	1	900 000	900 000	
Szigetüzem (2. eset)	Napelem panelek	450 Wp/db	11	60 000	660 000	3 560 000
	Inverter + Töltésvezérlő	5 kW	1	500 000	500 000	
	Kábelek, kiegészítők, telepítés, tartószerkezet				600 000	
	Akkumulátorok	5 kWh	2	900 000	1 800 000	

18. táblázat. A vizsgált szigetüzemű rendszerek megtérülési ideje

Konfiguráció	Egyszerűsített megtérülés	Összetett megtérülés
Szigetüzem (1. eset)	~ 12 év	~ 25 év
Szigetüzem (2. eset)	~ 16 év	~ 31 év

A szigetüzemű rendszer függetlenül tud működni a villamos hálózattól. Tehát abban az esetben, ha egy létesítmény nagyon távol helyezkedik el a lehetséges villamos hálózat csatlakozási pontjához képest akkor abban az esetben nyújt jó megoldást egy épület villamos táplálására.

19. táblázat. A háromszögmodell pontozási eredményei a vizsgált szigetüzemű rendszerek esetén

Vizsgált kategória		Szigetüzemű rendszer 1	Szigetüzemű rendszer 2
Energiaellátás biztonsága	Villamos hálózati csatlakozás és egyéb bővítések	0	0
	Fogyasztók energiaellátása	0	0
	A rendszer energiatároló képessége	1	2
Részpontszám		1	2
Technológiai vizsgálatok	Feszültségváltozás problémái	0	0
	Felharmonikusok hatása	0	0
	Élettartam és öregedés	4	3
Részpontszám		4	3
Gazdasági elemzések	Beruházási költségek	2	0
	Karbantartási és üzemeltetési költségek	2	2
	Megtérülési idő	1	-10
Részpontszám		5	-8
Összpontszám		<b>10</b>	<b>-3</b>

A háromszög modell pontozását a szigetüzemű rendszerek esetén a 19. táblázat tartalmazza. Ez alapján az első konfiguráció 10 pontot kapott. Viszont a második esetben a megtérülési idő nagyon megnövekedett az akkumulátorok beruházási költsége miatt 31 évre emelkedett, ez a pontozási rendszerből adódóan nem 0, hanem -10 értékelést kap, így összpontszámomban ez a rendszer -3 pontot kapott. Ez az eset amikor az akkumulátor telep dupla kapacitással lett méretezve. Tehát amennyiben a rendszer autonómiáját szeretnénk növelni az akkumulátor telep növelésével, abban az esetben a megtérülési idő drasztikusan megnövekszik. Ezeket az értékeket lehet csökkenteni, amennyiben releváns pályázatot vagy támogatást is beleszámolunk és csökkenteni tudjuk a beruházási költségeket.

## 7.2. Hálózatcsatolt rendszer vizsgálata

Gazdasági oldalról vizsgálva mindhárom alponthoz nagyon jó értékelést kapott ez a típusú rendszer, ami érthető is abból a szempontból, hogy a napelem paneleken és az inverteren kívül, mást nem tartalmaz a rendszer, amely komolyabb költséget jelentene a többi napelemes rendszerrel összehasonlítva. A szigetüzemű rendszerhez képest még beruházási költségként megjelenik a tervezési és egyéb engedélyeztetési költség. Az összesítést a 20. táblázat tartalmazza.

20. táblázat. A vizsgált hálózatcsatolt rendszer beruházási költségei

Konfiguráció	Beruházási tételek	Megjegyzés	Mennyiség	Egységár (HUF)	Teljes ár (HUF)	Összesen (HUF)
Hálózatcsatolt rendszer	Napelem panelek	450 Wp/db	11	60 000	660 000	2 490 000
	Inverter	5 kW	1	730 000	730 000	
	Kábelek, kiegészítők, telepítés, tartószerkezet				1 100 000	

21. táblázat. A vizsgált hálózatcsatolt rendszer megtérülési ideje

Konfiguráció	Egyszerűsített megtérülés	Összetett megtérülés
Hálózatcsatolt napelemes rendszer	~ 11,1 év	~ 25 év

A vizsgált hálózatcsatolt rendszer megtérülési idejét a 21. táblázat tartalmazza. Szükséges megjegyezni azt, hogy az összetett megtérülési idő számítás alapján 25 év a rendszer megtérülési ideje. Az egyszerűsített megtérülési számítás alapján ez az érték 11,1 év amely igencsak pontatlannak mondható. Ez minden rendszer számítása esetén elmondható, hogy az egyszerűsített megtérülési számítás jóval kisebb értéket hozott mint az összetett megtérülési számítás.

22. táblázat. A háromszögmodell pontozási eredményei a vizsgált hálózatcsatolt rendszer esetén

Vizsgált kategória		Hálózatcsatolt rendszer
Energiaellátás biztonsága	Villamos hálózati csatlakozás és egyéb bővítések	0
	Fogyasztók energiaellátása	0
	A rendszer energiátároló képessége	3
Részpontszám		3
Technológiai vizsgálatok	Feszültségváltozás problémái	2
	Felharmonikusok hatása	2
	Élettartam és öregedés	4
Részpontszám		8
Gazdasági elemzések	Beruházási költségek	4
	Karbantartási és üzemeltetési költségek	3
	Megtérülési idő	1
Részpontszám		8
Összpontszám		<b>19</b>

A hálózatcsatolt rendszer értékeléséből az látszik, hogy az Energiaellátás-biztonság szempontjából jobb értékelést kapott, mint a szigetüzemű rendszerek viszont magas pontszámot ez a rendszer sem ért el ebben az alponban. A Gazdasági elemzések alapján ez a rendszer bizonyult a leggazdaságosabb konfigurációnak. Ez a rendszer a háromszög modell értékelése alapján 19 pontot kapott. Az összesítést a 22. táblázat tartalmazza.

### 7.3. Hibrid napelemes rendszer vizsgálata

Hibrid rendszerek esetén is két különböző konfiguráció lett vizsgálva, hasonlóan a szigetüzemű rendszerek esetén. Az első esetben egy 5 kWp rendszerhez egy 5 kWh kapacitású akkumulátor telep lett illesztve. A második esetben pedig ugyanehhez a rendszerhez az akkumulátor telep kapacitása meg lett duplázva a rendszer autonómiájának érdekében, tehát 10 kWh kapacitású akkumulátor teleppel vizsgáltuk.

23. táblázat. A hibrid rendszerek beruházási költségei

Konfiguráció	Beruházási tételek	Megjegyzés	Mennyiség	Egységár (HUF)	Teljes ár (HUF)	Összesen (HUF)
Hibrid (1. eset)	Napelem panelek	450 Wp/db	11	60 000	660 000	3 510 000
	Inverter	5 kW	1	750 000	750 000	
	Kábelek, kiegészítők, telepítés, tartószerkezet				1 100 000	
	Akkumulátor	5 kWh	1	1 000 000	1 000 000	
Hibrid (2. eset)	Napelem panelek	450 Wp/db	11	60 000	660 000	4 510 000
	Inverter	5 kW	1	750 000	750 000	
	Kábelek, kiegészítők, telepítés, tartószerkezet				1 100 000	
	Akkumulátor	5 kWh	2	1 000 000	2 000 000	

24. táblázat. Megtérülési idő hibrid rendszerek esetén

Konfiguráció	Egyszerűsített megtérülés	Összetett megtérülés
Hibrid (1. eset)	~ 15,7 év	~ 29 év
Hibrid (2. eset)	~ 20 év	~ 34 év

A vizsgált hibrid napelemes rendszerek beruházási költségeit a 23. táblázat, valamint a megtérülési időket a 24. táblázat tartalmazza. Az összetett megtérülési idő számítás az első esetben 29 év, a második konfiguráció esetében pedig 34 év. Ez az eset, amikor az akkumulátor telep dupla kapacitással van méretezve. Tehát ebben az esetben a rendszer képes a fogyasztók hosszabb ideig tartó ellátására egy esetleges villamos hálózat kiesés következtében. Viszont a rendszer megtérülési ideje a szigetüzemű rendszerhez hasonlóan drasztikusan megnövekszik. Ezeket az értékeket lehet csökkenteni amennyiben pályázat vagy támogatást is beleszámolunk.

A háromszög modell pontozása a hibrid rendszerek esetén a 25. táblázatban látható. Ez alapján az első konfiguráció kapta a legmagasabb pontszámot, amely 22. Viszont a második esetben a megtérülési idő nagyon megnövekedett és 30 év felé is emelkedett, ez a pontozási rendszerből adódóan nem 0, hanem -10 értékelést kap, így összpontszámában ez a rendszer 13 pontot kapott.

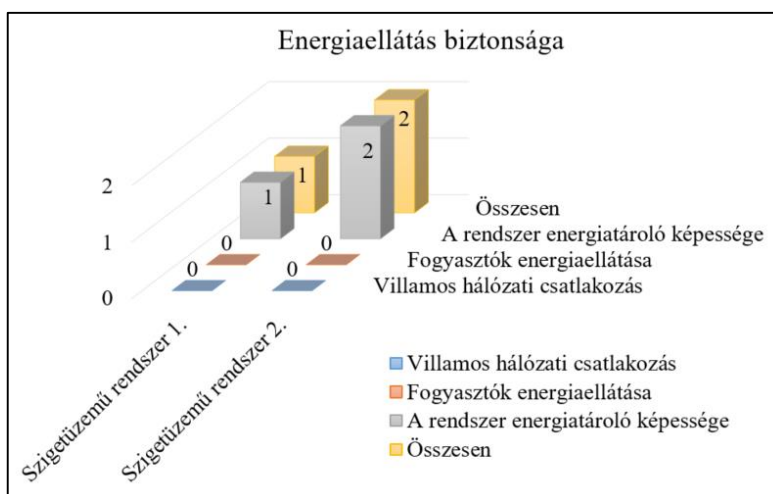
25. táblázat. A háromszögmodell pontozási eredményei a vizsgált hibrid rendszer esetén

Vizsgált kategória		Hibrid rendszer 1	Hibrid rendszer 2
Energiaellátás biztonsága	Villamos hálózati csatlakozás és egyéb bővítések	3	3
	Fogyasztók energiaellátása	3	3
	A rendszer energiatároló képessége	3	4
Részpontoszám		9	10
Technológiai vizsgálatok	Feszültségváltozás problémái	3	3
	Felharmonikusok hatása	3	3
	Élettartam és öregedés	4	4
Részpontoszám		10	10
Gazdasági elemzések	Beruházási költségek	1	1
	Karbantartási és üzemeltetési költségek	2	2
	Megtérülési idő	0	-10
Részpontoszám		3	-7
Összpontoszám		<b>22</b>	<b>13</b>

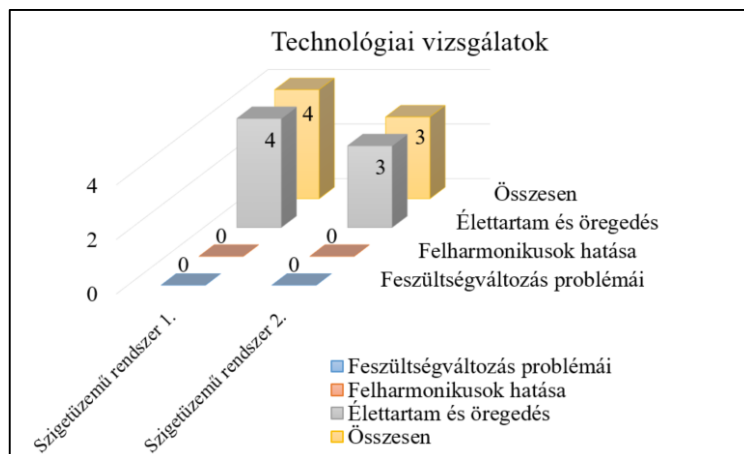
#### 7.4. A napelemes rendszerek vizsgálatának összegzése

##### 7.4.1. A vizsgált szigetüzemű rendszerek összegzése

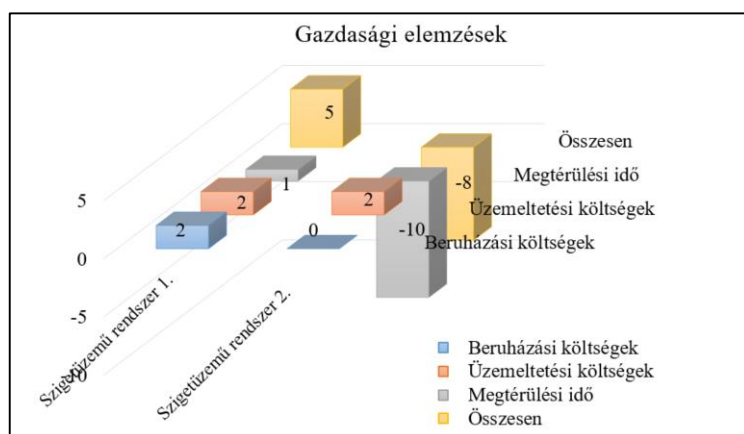
A 61. - 63. ábra mutatja a vizsgált szigetüzemű rendszerek Energiaellátás biztonsága, Technológiai vizsgálatok és a Gazdasági elemzésekkel kapcsolatos részpontoszámokat. A 64. ábra szemlélteti mindhárom pillér összpontoszámát.



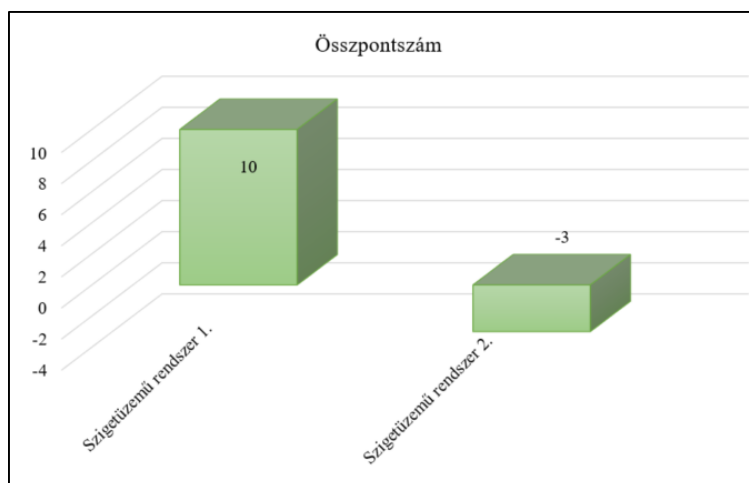
61. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek Energiaellátás biztonsága részpontoszáma



62. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek Technológiai vizsgálatok részpontszáma



63. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek Gazdasági aspektusok részpontszáma



64. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek összpontszáma

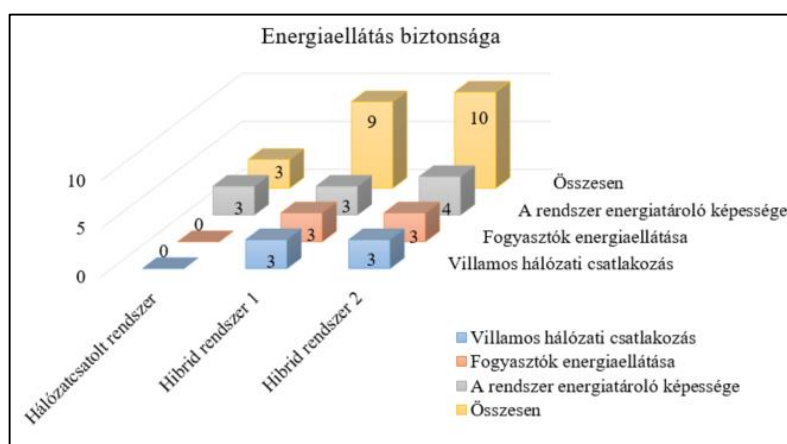
Szigetüzemű rendszerek esetén nincs hálózati csatlakozás, emiatt több olyan vizsgálati pont nem releváns a háromszög modellben ezen rendszereknél. Ebből az okból kifolyólag érdemes ezeket a rendszereket külön vizsgálni, és nem összehasonlítani a hálózatcsatolt rendszerekkel. Mivel itt a energiellátás biztonsága csak és kizárólag a napelemes rendszertől függ. Tehát a létesítmény sokkal inkább önmagára van utalva és több más létesítménnyel nem tud Microgrid



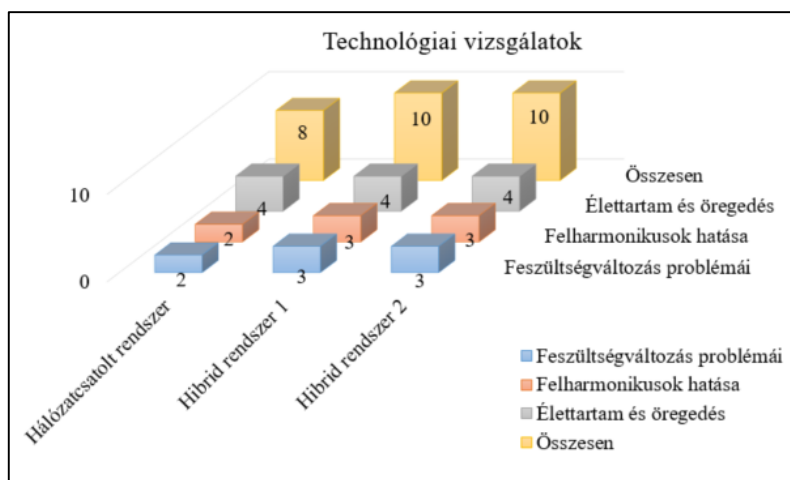
hálózatban működni. A két szigetüzemű rendszer esetében az első konfiguráció kapott magasabb pontszámot az összegzésben, amely 10 pont. Bár Energiaellátás biztonság szempontjából alacsonyabb értéket kapott, de a második konfiguráció esetében a megtérülési idő drasztikusan megnövekszik, így összpontszámot tekintve -3 pont az eredmény.

#### 7.4.2. A vizsgált hálózatcsatolt rendszerek összegzése

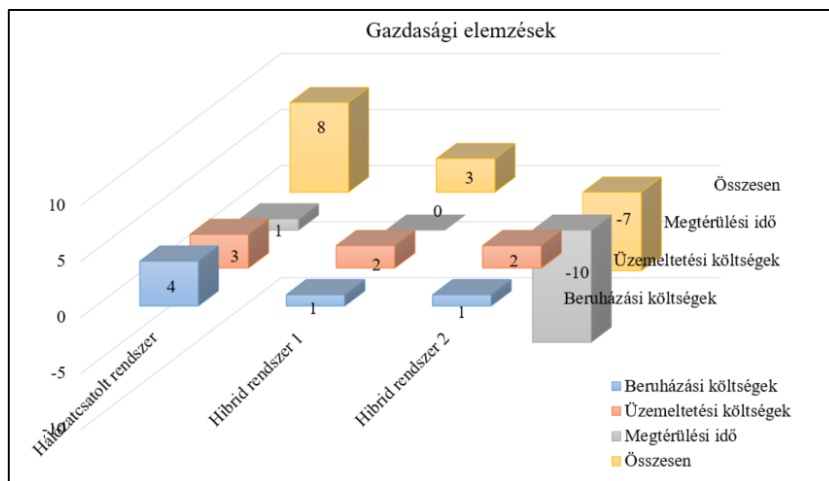
A 65.-67. ábra mutatja a vizsgált hálózatcsatolt rendszerek Energiaellátás biztonság, Technológiai vizsgálatok és a Gazdasági elemzésekkel kapcsolatos részpontszámokat. Az akkumulátor telep nélküli és a két hibrid rendszert lehetséges közös elemzésnek alávetni, mivel a hálózati csatlakozás miatt nem lesznek irreleváns pontok a háromszögmodellben a szigetüzemű rendszerrel ellentétben. A 68. ábra szemlélteti mindhárom pillér összpontszámát.



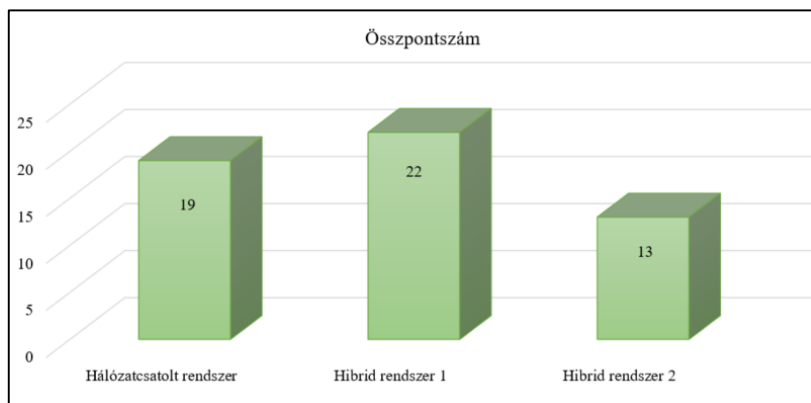
65. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek Energiaellátás biztonság részpontszáma



66. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek Technológiai vizsgálatának részpontszáma



67. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek Gazdasági aspektusainak részpontszáma



68. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek összpontszáma

A hálózatcsatolt rendszerek esetén megfigyelhető, hogy a leggazdaságosabb konfiguráció az, amely nem tartalmaz akkumulátor, de energiaellátás biztonsági szempontból lényegesen rosszabb a hibrid napelemes rendszerhez képest. Az eredmények alapján, amennyiben csak a gazdasági oldalt vizsgáljuk a hibrid rendszer szinte minden esetben rosszabb értékelést kapott, azonban, ha figyelembe vesszük az energiaellátás-biztonság és technológiai oldalt, akkor az látható, hogy ez a típusú napelemes rendszer magasabb pontszámot kapott. Viszont fontos szem előtt tartani a megtérülési időt. Ha a beruházási és egyéb költségek nagyon megnövekednek, akkor a megtérülési idő drasztikusan megnövekszik, amely negatívan befolyásolja a fenntarthatóságot.

## 8. TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

T1. A megfelelő napelemes rendszer kiválasztása nem csak gazdasági, hanem energiaellátás-biztonsági és technológiai kérdés is, amely optimalizálási feladatnak tekinthető. E feladat elvégzésére kidolgoztam egy döntéstámogató-értékelő módszert, amely alkalmazhatóságát különböző kialakítású 5 kWp teljesítményű háztartási méretű kiserőművek segítségével teszteltem. A háromszögmodell értékelése alapján az 5 kWp teljesítményű hálózatsatolt napelemes rendszereket vizsgálva a pontszámok az alábbi táblázat szerint alakulnak:

Konfiguráció	Energiaellátás biztonsága	Technológiai vizsgálatok	Gazdasági elemzések	Összpontszám
5 kWp hálózatsatolt rendszer (akkumulátor telep nélkül)	3	8	8	<b>19</b>
5 kWp Hibrid (5 kWh akkumulátor teleppel)	9	10	3	<b>22</b>
5 kWp Hibrid (10 kWh akkumulátor teleppel)	10	10	-7	<b>13</b>

**Amennyiben a rendszer kiválasztásakor csak a gazdasági szempontokat vesszük figyelembe, akkor egyértelműen a hagyományos napelemes rendszer kapja a legnagyobb értéket, amely 8 pont. Amennyiben a másik két pillérrel is kibővítjük a vizsgálatot, az összpontszámokat tekintve az 5 kWp hibrid napelemes rendszer 5 kWh kapacitású akkumulátor teleppel éri el a legmagasabb pontszámot, amely 22 pont. Abban az esetben, ha az 5 kWp hibrid napelemes rendszerhez 10 kWh kapacitású akkumulátor telepet választunk, akkor a gazdasági elemzés értéke -7 pont (a megtérülési idő miatt) az összpontszámot tekintve az érték 13 pontra esik, tehát ez a legalacsonyabb pontszám.**

Mindezek alapján elmondható, hogy az 5 kWp teljesítményű és 5 kWh akkumulátorkapacitású hibrid rendszer a háromszögmodell értékelése alapján magasabb összpontszámot ért el az akkumulátor telep nélkül rendszerhez képest, tehát alkalmazása előnyösebb. A háromszögmodell figyelembe veszi azt, hogy egy rendszernél a beruházási költségek drasztikusan megnövekednek az akkumulátorkapacitás növelésével, így a gazdasági elemzésből származó pontszámok is ezzel szinkronban visszaesnek.

A T1 tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S1], [S2], [S3], [S5], [S6], [S13]

T2. Hibrid napelemes rendszereknél a helyes akkumulátorkapacitás meghatározás összetett feladat. Az elvégzett vizsgálatokból egyértelműen látható, hogy a lakossági felhasználású, háztartási méretű kiserőművek esetén 1 kWp napelemre 1 kWh tárolási kapacitás nem elegendő az 1 napi fogyasztási igények ellátására, a be- és kitárolási igények kielégítésére. Háromszoros tároló kapacitástól felfelé túlméretezés valósul meg a nyári időszakban. A túlméretezett akkumulátorteleg esetében (15 kWh vagy 25 kWh), ha több egymást követő napot veszünk figyelembe, amelyek átlagos napsugárzási jellemzőkkel bírnak (30 kWh), akkor a vizsgált napi átlagos fogyasztási igény mellett (15-20 kWh) nem kerül az akkumulátor telep kisütési állapotba a nap végére. Ezáltal a háromszoros vagy ötszörös tárolókapacitás esetén, a soron következő napokban az akkumulátor kezdő töltöttségi szintje növekvő tendenciát mutat, majd végül eléri a maximális telítettséget. **Ebből az következik, hogy 1 kWp napelemes rendszerhez viszonyítva 1 szeres és 3 szoros érték között van az optimális akkumulátor kapacitása, amely a napi fogyasztási igények alapján pontosítható.** Téli időszakban az 1 kWp teljesítményhez viszonyítva a háromszoros és ötszörös akkumulátor kapacitás is megfelelő méretet a kihasználtságot tekintve, de a rendszer többletermelése a nyári időszakban valósul meg, ezért azt kell előtérbe helyezni a megfelelő akkumulátor kapacitás kiválasztásánál.

A T2 tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S1], [S6], [S13]

T3. A napelemes rendszereknél az egyenáramú oldali hibák bizonyos típusai, például a szakadási hiba vagy a zárlat bármilyen formája tűzveszélyt jelenthet, e hibákat a korszerű inverterek észlelik és azonnal lekapcsolnak, ugyanakkor a nem drasztikus egyenáramú hibáknál elmondható, hogy azok fellépte termelés-csökkenési problémákat okoznak. A lentebb felsorolt DC oldali hibákat vizsgáltam, amelyek a leggyakoribb hibatípusok:

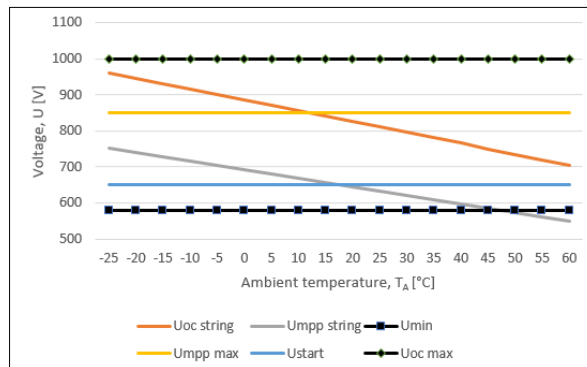
- F1 a szakadási hiba,
- F2 rövidzárási hiba,
- F3 földzárlati hiba,
- F4 árnyékolási hiba,
- F5 bypass dióda hiba.

Az elvégzett mérésekből és szimulációkból egyértelműen kiderül, hogy a DC oldalon a munkapont értéke csökken mind feszültség, mind áramerősség szempontjából amennyiben a vizsgált hibák legalább egyike fellép.

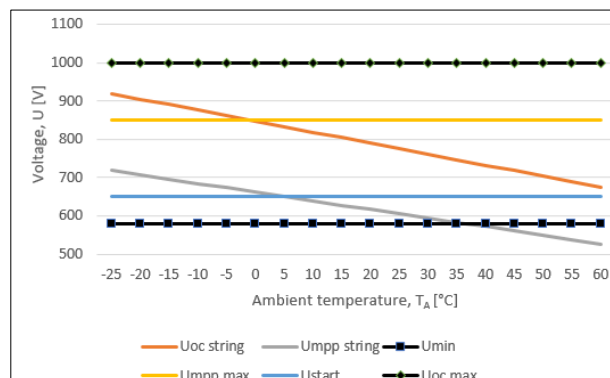
**A szakadási hiba kivételével minden vizsgált egyenáramú hibánál lokális és globális munkapontok alakulnak ki a feszültség-áram és a feszültség-teljesítmény jelleggörbén. A napelem panelek darabszámának kiesésével egyenes arányban csökken a rendszer teljesítménye, mindaddig, amíg a kiesett panelek darabszáma el nem éri a kritikus értéket. A kritikus érték az inverter minimális bemeneti feszültségértékétől függ.**

A T3 tézishoz kapcsolódó saját publikáció: [S7]

T4. A napelemek és a környezet hőmérséklete hatást gyakorol a napelemek feszültségleadóképességére. A növekvő hőmérséklet csökkenő feszültségben mutatkozik, amely rendszerszintű problémákat okozhat. A következő ábrán látható, hogy a sztring üresjárat, üzemi feszültségértéke hogyan változik a hőmérséklet-változás függvényében, valamint az inverter minimális és maximális üzemi feszültsége is:



Ennek megfelelően, amikor a környezeti/légköri hőmérséklet eléri a 45 C fokot, a feszültség olyan értékre csökken, amely kívül esik az inverter bemeneti tűréshatárán, és már nem tudja biztosítani az inverter működéséhez szükséges feszültséget. Az inverter ekkor kikapcsol, mert a működéséhez szükséges feszültségérték nem áll rendelkezésre, és üresjáratú állapotba kapcsol. A következő ábra mutatja azt az esetet, ha egy sztringen belül egy panel árnyékhataásnak van kitéve, tehát a bypass diódákon keresztül üzemel tovább. Ebben az esetben 23 panel helyett egy sztringben csak 22 panel üzemel.



A feszültségérték alacsonyabb hőmérsékleten (35 °C) éri el a kritikus értéket, amelynél az inverter kikapcsol. Ez az érték 23 panel esetében volt magasabb (45 °C). Tehát ebben a konfigurációban egy panel kiesése következtében 77 %-ra csökkent a kritikus érték alsó határa.

A T4 tézishez kapcsolódó saját publikációk: [S4], [S7]

T5. Mivel a napelemek egyenáramú villamosenergiát állatínak elő, a villamos hálózat pedig váltakozó árammal működik, ezért inverterek alkalmazása szükséges, amelyek teljesítményelektronikai átalakítók. Az inverterek működésük közben felharmonikusokat termelnek. A felharmonikus-termelés mértékét a környezeti hatások befolyásolják. Statikus környezeti hatás változások esetén az inverter beavatkozója kevésbé szabályoz, ezáltal a felharmonikus termelés szabványos érték alatt marad. A mérésekből és szimulációkból az látszik, hogy az inverter áramának THD értékét különböző napsugárzási szintek befolyásolják. A harmonikus torzítás mértéke azonos besugárzásnál is lehet eltérő, amelyet a következő táblázat szemléltet:

Besugárzás [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	350 $\text{W}/\text{m}^2$ (reggel)	820 $\text{W}/\text{m}^2$ (dél)	350 $\text{W}/\text{m}^2$ (dél)
THD <sub>I</sub> [%]	THDI = 3-4%	THDI = 5-6%	THDI = 14-16%
Környezeti hőmérséklet [ $^{\circ}\text{C}$ ]	16 $^{\circ}\text{C}$	22 $^{\circ}\text{C}$	22 $^{\circ}\text{C}$
Napelem panelek hőmérséklete [ $^{\circ}\text{C}$ ]	22-25 $^{\circ}\text{C}$	50-60 $^{\circ}\text{C}$	50-60 $^{\circ}\text{C}$
Megjegyzés	Reggeli órák, amikor a besugárzási szint folyamatosan emelkedik	Napi csúcserték	A besugárzás azonnal leesik 820 $\text{W}/\text{m}^2$ -ről 350 $\text{W}/\text{m}^2$ -re

Megfigyelhető, hogy a napelemek felületi hőmérsékletei is hozzájárulnak a harmonikus torzítás mértékéhez. Továbbá a felhőátvonulás az inverternél, a szabályozását tekintve, egy dinamikus beavatkozást igényel. Megfigyelhető, hogy a reggeli órákban mért és szimulált THD<sub>I</sub> százalékos értéke 3-4 %, a déli órákban a felhőátvonulás következtében a THD<sub>I</sub> értéke szabványos érték felé emelkedik, amelynek az értéke 14-16 %. Mindkét esetben a besugárzás mért értéke 350  $\text{W}/\text{m}^2$ . Tehát a harmonikus torzítás tekintetében a két eset nem ekvivalens még akkor sem, ha a besugárzás mindkét esetben egyenlő.

A T5 tézishoz kapcsolódó saját publikáció: [S5], [S13]

T6. Az egyszerűsített megtérülési számítás egy nagyon egyszerű módszer, amely figyelmen kívül hagyja a pénz időértékét, azonban némi betekintést nyújt egy projekt gazdasági értékébe, jelen esetben a napelemes rendszer megtérülésébe. Azonban az egyszerű megtérülési számítás nem vesz figyelembe több olyan lényeges tényezőt, amelyek jelentős hatással lehetnek a rendszer valós megtérülési idejére. Összetett megtérülési számítással a vizsgált napelemes rendszerek esetében jelentős eltérések mutatkoznak az egyszerű megtérülési számításhoz képest, amit az alábbi táblázat szemléltet:

Konfiguráció	Egyszerű megtérülési idő	Összetett megtérülési idő
5 kWp Offgrid (5 kWh akkumulátor teleppel)	~ 15 év	~ 28 év
5 kWp Offgrid 10 kWh akkumulátor teleppel)	~ 24 év	~ 39 év
5 kWp hálózatcsatolt rendszer (akkumulátor telep nélkül)	~ 11,1 év	~ 25 év
5 kWp Hibrid (5 kWh akkumulátor teleppel)	~ 15,7 év	~ 29 év
5 kWp Hibrid (10 kWh akkumulátor teleppel)	~ 20 év	~ 34 év

A számításoknál a villamos energia esetében 36 forintos ár lett figyelembe véve 1 kW-ra vonatkoztatva. Az egyszerűsített és az összetett számítás eredményei között átalagosan 14 év eltérés mutatkozott, amely nem elhanyagolható különbség egy beruházás esetében. Ebből adódóan az egyszerűsített számítás nem alkalmas a tényleges megtérülési idő kiszámítására, helyette célszerű az összetett számítás alkalmazása.

Megfigyelhető, hogy az akkumulátorkapacitás növelése drasztikusabban növeli a megtérülési időt. A kapott eredmények azt mutatják, hogy a saját forrásból történő beruházás esetén, az összetett megtérülési idő számítási módszer alkalmazásával a legtöbb rendszer megtérülési ideje magasabb, mint a napelemek várható élettartama, üzemideje.

A T6 tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S1], [S6], [S13]

## ÖSSZEFOGLALÁS

Értekezésem témája a napelemes rendszerek olyan komplex kutatása, amely magába foglalja az energiaellátás biztonsági kérdéseket, a műszaki/technológiai vizsgálatokat, valamint az optimalizálási feladatokhoz elengedhetetlen gazdasági elemzéseket. Ezeket a területeket egy háromszögmodellben egyesítettem és egy olyan döntéstámogató-döntéshozó módszert dolgoztam ki, melynek segítségével a napelemes rendszereket sokkal pontosabban tudjuk optimalizálni. A háromszögmodell mindhárom alappillére további három alpontot tartalmaz, amelynek mentén a kutatásomat és vizsgálataimat végeztem.

Az energiaellátás biztonsága a háromszögmodell első alappillére. Ez magába foglalja azt, hogy a napelemes rendszerek miként tudják szerteágzóbbá tenni az energiaellátást annak az érdekében, hogy növekedjen a fogyasztók ellátottsága és adott esetben minél kevesebb legyen az energiakiesés. Az egyik vizsgálandó terület ezen a pilléren belül a napelemes rendszerhez tartozó villamos hálózati csatlakozás és az ahhoz tartozó egyéb bővítések. A második alpont ezen a területen a tápellátás elvesztésére vonatkozik, mivel a felhasználók számára az energiaellátás folytonossága nem egy elhanyagolható tényező, amennyiben olyan fogyasztókat is figyelembe veszünk, melynek a kiesése súlyosabb károkat okozhat. Ezek alapján az akkumulátor-tárolók szerepe jelentős és ebből következik, hogy a harmadik vizsgálandó pont ezen a pilléren belül a rendszer energiatároló képességét vizsgálja. Tehát a rendszer alkalmas-e az energia tárolására, és ha igen milyen mértékben. Ennek érdekében több esetet is megvizsgáltam, hogy megfelelő képet kapjak az akkumulátor telep kapacitásának optimális megválasztásáról.

A technológiai vizsgálatok segítségével mélyebb betekintést kaphatunk a napelemes rendszerek hálózatra gyakorolt hatásaiból. A második alappillér egyik legfontosabb alpontja a feszültségérték változása. Ennek az értéknek a csökkenése és növekedése is negatívan hat a hálózatra csatlakozott eszközökre. Emiatt fontosnak tartottam a napelemes rendszerek egyenáramú oldali hibáinak, továbbá az egyenáramú hibák és a hőmérséklet kapcsolatának vizsgálatát. A feszültség érték változását tekintve fontos szempont még, hogy az adott hálózati csomópontban mennyi ilyen rendszer csatlakozik. A második vizsgált terület e pilléren belül a felharmonikusok hatása, amely szintén negatív hatással van a hálózathoz csatlakozó eszközökre. A napelemes inverterek a félvezető alkatrészek miatt erősen hozzájárulnak a harmonikus torzítás mértékéhez, amit sikerült mérésrel és szimulációval is megerősítenem. A harmonikus torzítás, egy olyan villamos-energiaminőségi probléma, amely például hálózati zavarokat, transzformátor túlmelegedést, védőberendezések meghibásodását okozhatják, ami csökkentheti az áramellátó rendszerek megbízhatóságát. Az alkatrészek öregedése fontos egy rendszer élettartamát tekintve, ezért a napelemes rendszerek technológiai vizsgálatának alappilléren belül a harmadik vizsgált alpont az öregedés és élettartam. A technológiai vizsgálatok alappilléren belül a feszültségváltozás és harmonikus torzítás alpontok azt vizsgálják, hogy a napelemes rendszerek hogyan és milyen mértékben hatnak a villamos hálózatra. Az öregedés esetén pedig azt, hogy a rendszer tervezése



és kialakítása során az egyes részegységek kiválasztása milyen hatással van a rendszer élettartamára.

A háromszögmodell harmadik alappillére a gazdasági elemzés. A napelemes rendszerek beszerelése egy jelentős induló költséggel jár. Ahhoz, hogy az előző két alappillérben vizsgált területeket megfelelően tudjuk optimalizálni nagyon fontos költségeket számításban venni. Mivel a költségek vizsgálata nélkül nem beszélhetünk optimalizálásról, csupán mérnöki „kíváncsiságról”, annak érdekében, hogy a rendszerünk a lehető legjobbat szolgáltatassa számunkra. Ezek alapján a beruházási költség nem elhanyagolható tényező. A gazdasági elemzések alappilléren belül a második alpont a karbantartással járó költségeket vizsgálja, mivel az élettartam növelése érdekében ezeknél a napelemes rendszereknél is érdemes a karbantartásra figyelni. A rendszeres panel tisztítás elmaradása nem csak teljesítményromlást, hanem adott esetben maradandó károkat is okozhatnak a panelekben. Mindezeket összevetve a lehető legrészletesebb számítás alapján érdemes kiszámolni a megtérülési időt a napelemes rendszereket tekintve, amely az utolsó alpont ezen az alappilléren belül.

A háromszög modell előnyeit jól szemlélteti, hogy az első pillér esetén a rendszer autonómiájának növeléséről esett szó viszont a költségeket abban az esetben nem vizsgáljuk, mivel az alappilléreket külön-külön szükséges vizsgálni ahhoz, hogy egy adott területet a többi területtől függetlenül lehessen értékelni. A pontozási rendszer segítségével a három terület önálló vizsgálatával és azok összegzésével kapjuk meg a rendszer összesített pontszámát, ahol a legmagasabb pontszám adja meg azt, amely az optimum értéket képviseli.

Az általam kidolgozott módszer alkalmazásával egy pontozási rendszer segítségével könnyedén összehasonlíthatóvá válnak a különböző napelemes rendszerek, amely segítségével egy objektív döntéshozó sorozaton keresztül megtalálható az energiaellátás biztonsága, technológiai és gazdasági szempontok alapján a legoptimálisabb rendszer.

## 9. SUMMARY

The topic of my dissertation is the complex research of photovoltaic systems, which includes energy supply security, technical/technological examinations, and economic analyzes essential for optimization tasks. I combined these areas in a triangle model and developed a decision-supporting decision-making system, with the help of which the photovoltaic systems can be optimized much more precisely. Each of the three basic pillars of the triangle model contains three additional sub-points along which I conducted my research and investigations.

Security of energy supply is the first pillar of the triangle model. This includes how photovoltaic systems can make the energy supply more diversified in order to increase the supply of consumers and, where applicable, to minimize energy losses. One of the areas to be examined within this pillar is the electrical grid connection for the photovoltaic system and other related extensions. The second subsection in this area concerns the loss of power supply, since the continuity of the energy supply for users is not a negligible factor, if we also take into account consumers whose failure could cause more serious damage. Based on these, the role of battery storage is significant and it follows that the third point to be examined within this pillar examines the energy storage capacity of the system. So, is the system suitable for energy storage, and if so, to what extent. To this end, I examined several cases in order to get a good idea of the optimal choice of battery capacity.

With the help of technological examinations, it is possible to get a deeper insight into the effects of photovoltaic systems on the electricity network. One of the most important sub-points of the second pillar is the change in the voltage value. Both the decrease and increase of this value have a negative effect on the devices connected to the network. For this reason, I considered it important to examine the direct current side errors of solar systems and the relationship between direct current errors and temperature. Regarding the change in the voltage value, an important aspect is how many such systems are connected in the given network node. The second investigated area within this pillar is the effect of harmonics, which also have a negative effect on devices connected to the network. Photovoltaic system inverters contribute strongly to the degree of harmonic distortion due to the semiconductor components, which I was able to confirm by measurement and simulation. Harmonic distortion is a power quality problem that can cause, for example, network disturbances, transformer overheating, and the failure of protective devices, which can reduce the reliability of power supply systems. The aging of the components is important in terms of the lifetime of a system, therefore aging and lifetime are the third examined sub-points within the basic pillar of the technological examination of solar panel systems. Within the main pillar of technological examinations, the sub-points voltage change and harmonic distortion examine how and to what extent solar systems affect the electrical network. And in the case of aging, how the selection of individual components during the planning and design of the system affects the life of the system.

The third pillar of the triangle model is economic analysis. The installation of solar systems involves a significant initial cost. In order to properly optimize the areas examined in the previous two pillars, very important costs must be taken into account. Since we cannot talk about optimization without examining the costs, it is only an engineering "desire" in order for our system to provide us with the best possible performance. Based on these, the investment cost is not a negligible factor. Within the main pillar of economic analyses, the second sub-point examines the costs associated with maintenance, since in order to increase the service life, it is also worth paying attention to the maintenance of these solar systems. Failure to regularly clean the panels can cause not only performance degradation, but also permanent damage to the panels. Considering all of this, it is worth calculating the payback time for photovoltaic systems based on the most detailed calculation possible, which is the last sub-point within this basic pillar.

The advantages of the triangle model are well illustrated by the fact that in the case of the first pillar, there was talk of increasing the autonomy of the system. However, we do not examine the costs in that case, since the basic pillars need to be examined separately in order to be able to evaluate a given area independently of the other areas. With the help of the scoring system, we obtain the total score of the system by examining the three areas independently and summing them up, where the highest score indicates the one that represents the optimum value.

Using the method I developed, different photovoltaic systems can be easily compared with the help of a scoring system. With the help of an objective decision-making series, the most optimal system can be found based on the security of the energy supply, technological and economic aspects.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Elsőként szeretném köszönetemet kifejezni témavezetőmnek Dr. habil. Bodnár Istvánnak, aki folyamatosan támogatott és fáradhatatlanul, a rá jellemző szorgalommal és magas fokú szakértelemmel segítette a munkámat.

Továbbá köszönettel tartozom az Intézet valamennyi oktató és dolgozó munkatársának, valamint hallgatóinak az értekezés megvalósításában a maga területén nyújtott segítségért.

Szeretném megköszönni a családomnak és a barátaimnak a támogatásukat, segítségüket és a szünni nem akaró türelmüket, amiért végig mellettem álltak és mindenben támagattak.

Köszönet illeti meg a Miskolci SZC Bláthy Ottó Villamosipari Technikumot és Major Pétert, akik mérési infrastruktúrát biztosítottak.

## PUBLIKÁCIÓS LISTA

*A disszertációhoz köthető minőségi publikációk:*

- [S1] R. Lipták, I. Bodnár, *Optimal sizing of battery storage for photovoltaic systems*, in Proceedings of the 2023 24th International Carpathian Control Conference (ICCC), 2023, pp. 236–241., (SCOPUS és Web of Science)
- [S2] G. Kozsely, I. Bodnar, D. Matusz-Kalász, R. Lipták, *Determination of Solar Panel's Characteristics by Flash Testing*, 2022 23rd International Carpathian Control Conference (ICCC), pp. 233-238, 2022, (SCOPUS és Web of Science)
- [S3] I. Bodnár, D. Matusz-Kalász, R.R. Boros, R. Lipták, *Condition Assessment of Solar Modules by Flash Test and Electroluminescence Test*, Coatings, vol. 11, no. 11, 1361, 2021, (SCOPUS, Q2, IF: 2.881)
- [S4] R. Lipták, I. Bodnár, *Control Problems of Solar Power Plants*, in 22nd International Carpathian Control Conference (ICCC 2021), 2021, pp. 1–5. (SCOPUS és Web of Science)

*A disszertációhoz köthető egyéb publikációk:*

- [S5] R. Lipták, I. Bodnár, *Effects of photovoltaic systems on the behavior of harmonic components in low voltage network*, Analecta Technica Szegedinensia, vol. 2, no. 17, pp. 32–47, 2023.
- [S6] R. Lipták, *Comperative analysis of different types of photovoltaic systems from the technical and economic*, in Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2022: konferencia előadások publikációi, 2022, pp. 82–97.
- [S7] R. Lipták, I. Bodnár, *Simulation of fault detection in photovoltaic arrays*, Analecta Technica Szegedinensia, vol. 15, no. 2, pp. 31–40, 2021.
- [S8] R. Lipták, T. Hadházi, *A villamosenergia-felhasználás változása*, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye, vol. 11, no. 3, pp. 167–174, 2021.
- [S9] R. Lipták, P. Balázs, *Cellaoptimalizált napelemek*, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye, vol. 11, no. 3, pp. 161–166, 2021.
- [S10] D. Matusz-Kalász, R. Lipták, and P. Tóth, *Napelemek tönkremenetele*, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye, vol. 11, no. 3, pp. 94–101, 2021.
- [S11] R. Lipták, I. Bodnár, *Microgrid hálózatok felépítése*, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye, vol. 11, no. 4, pp. 188–197, 2021.
- [S12] R. Lipták, I. Bodnár, *Napelemes villamosenergia-termelő rendszerek*, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye, vol. 10, no. 4, pp. 434–443, 2020.

*A disszertációhoz köthető megjelenítésre várakozó publikációk:*

- [S13] R. Lipták, I. Bodnár, *Analysis of Photovoltaic Systems from Energy Supply Security, Technological and Economic Aspects*, XXXIX. Kandó Konferencia Kiadvány kötet, 2023. november 9-10. (**A publikáció megjelenítése folyamatban!**)

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra Háromszög modell elvi felépítése .....	10
2. ábra Szilícium alapú (a) mono- és (b) polikristályos cellák, (c) vékonyfilm cellák, (d) hibrid napelem cellák [2].....	12
3. ábra Napelem cella működési modellje.....	14
4. ábra A napelem (a) egyszerűsített és (b) valóságos helyettesítő kapcsolása .....	15
5. ábra A (a) megvilágítás és (b) hőmérséklet hatása a napelem panelre .....	16
6. ábra Áram-feszültség és teljesítmény-feszültség kapcsolata.....	17
7. ábra A napelemes rendszer egyenáramú oldalának részegységei [2].....	18
8. ábra Közvetlen csatolású szigetüzemű napelemes rendszer.....	19
9. ábra Közvetlen csatolású szigetüzemű napelemes rendszer DC-DC konverterrel.....	19
10. ábra Közvetlen csatolású szigetüzemű napelemes rendszer.....	20
11. ábra Hálózat-interaktív szigetüzemű napelemes rendszer.....	20
12. ábra Hálózatcsatolt napelemes rendszer akkumulátor telep nélkül .....	21
13. ábra Hibrid napelemes rendszer .....	22
14. ábra Szigetüzemre is alkalmas hibrid napelemes rendszerek dedikált leágazással .....	23
15. ábra Szigetüzemre is alkalmas hibrid napelemes rendszerek teljes leválasztással.....	23
16. ábra Villamos hálózat csatlakozási költség és távolság kapcsolata [3] .....	24
17. ábra Hagyományos villamos energia rendszer felépítése [45] .....	26
18. ábra Akkumulátor használata lakossági felhasználás esetén.....	27
19. ábra Önfogyasztás görbék hétvégén és hétköznap .....	28
20. ábra Önfogyasztás görbék hétvégén és hétköznap .....	28
21. ábra Nyári időszak hétvége fogyasztási görbe (a) 5 kWh, (b) 15 kWh, (c) 25 kWh akkumulátor kapacitás, (d) akkumulátor kapacitások értéke.....	29
22. ábra Nyári időszak hétköznap fogyasztási görbe (a) 5 kWh, (b) 15 kWh, (c) 25 kWh akkumulátor kapacitás, (d) akkumulátor kapacitások értéke.....	30
23. ábra Téli időszak hétvége fogyasztási görbe (a) 5 kWh, (b) 15 kWh, (c) 25 kWh akkumulátor kapacitás, (d) akkumulátor kapacitások értéke.....	31
24. ábra Téli időszak hétköznap fogyasztási görbe (a) 5 kWh, (b) 15 kWh, (c) 25 kWh akkumulátor kapacitás, (d) akkumulátor kapacitások értéke.....	32
25. ábra Váltakozó feszültség jelalakja .....	34
26. ábra Az összeállított mérés validáláshoz.....	35
27. ábra Validált napelemes rendszer kapcsolási rajza (a) F1 szakadás, F2 rövidzár, F3 földelési hibák; (b) F4 árnyékolási hiba, F5 bypass dióda hiba.....	35
28. ábra A mérés (a) feszültség-áramerősség, (b) feszültség-teljesítmény jelleggörbe.....	36
29. ábra A szimuláció (a) feszültség-áramerősség, (b) feszültség-teljesítmény jelleggörbe .....	36
30. ábra Vizsgált napelemes rendszer kapcsolási rajza .....	37
31. ábra F1 Szakadási hiba (a) első eset, (b) második eset.....	38
32. ábra F1 Szakadási hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe .....	38
33. ábra F2 zárlat hiba (a) első eset, (b) második eset.....	39
34. ábra F2 Szakadási hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe .....	39
35. ábra F3 földelési hiba (a) első eset, (b) második eset.....	40
36. ábra F3 földelési hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe .....	40

37. ábra F4 árnyékolási hiba (a) első eset, (b) második eset.....	41
38. ábra F4 árnyékolási hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe.....	41
39. ábra F5 bypass dióda hiba (a) első eset, (b) második eset.....	42
40. ábra F5 bypass dióda hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe .....	42
41. ábra Feszültség értékek változása a hőmérséklet függvényében a napelemes rendszer (a) egyenáramú és (b) váltakozó áramú oldalán normál üzemállapot esetén .....	44
42. ábra Feszültség értékek változása a hőmérséklet függvényében a napelemes rendszer (a) egyenáramú és (b) váltakozó áramú oldalán 1 panel hiba esetén .....	45
43. ábra (a) Napelemes termelés normál üzemállapot esetén, (b) termelés kiesése feszültségemelkedés miatt.....	46
44. ábra A rendszerben használt napelem modul görbéi .....	50
45. ábra A vizsgált napelemes rendszer felépítése .....	50
46. ábra A napsugárzás a vizsgálat során .....	51
47. ábra A külső hőmérséklet a vizsgálat során .....	51
48. ábra A feszültség és áram hullámalakja 260-400W/m <sup>2</sup> besugárzás esetén .....	52
49. ábra Az áram harmonikus összetevői 260-400W/m <sup>2</sup> besugárzás esetén .....	52
50. ábra A feszültség és az áram RMS értékének trendje .....	52
51. ábra A feszültség és az áram THD értékének trendje.....	53
52. ábra Az áram és a feszültség RMS trendjének változása az árnyékhataás következtében.....	53
53. ábra Az áram és a feszültség THD trendjének változása az árnyékhataás következtében .....	54
54. ábra A szimulált napelemes rendszer felépítése.....	54
55. ábra A rendszerben használt napelem modul görbéi szimulációs környezetben.....	55
56. ábra A szimulált hálózati feszültség szinuszos hullámaformája .....	55
57. ábra Az áram THDI 820 W/m <sup>2</sup> besugárzás mellett .....	56
58. ábra Az áram jelalakja 820 W/m <sup>2</sup> besugárzás mellett .....	56
59. ábra Az áram THDI 350 W/m <sup>2</sup> besugárzás mellett .....	57
60. ábra Az áram jelalakja 820 W/m <sup>2</sup> besugárzás mellett .....	57
61. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek Energiaellátás biztonság részpontoszáma .....	70
62. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek Technológiai vizsgálatok részpontoszáma .....	71
63. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek Gazdasági aspektusok részpontoszáma.....	71
64. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek összpontoszáma.....	71
65. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek Energiaellátás biztonság részpontoszáma .....	72
66. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek Technológiai vizsgálatának részpontoszáma .....	72
67. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek Gazdasági aspektusainak részpontoszáma .....	73
68. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek összpontoszáma .....	73



## TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat. Villamos hálózat pontozási rendszere.....	25
2. táblázat. A fogyasztók energiaellátásával kapcsolatos pontozási rendszer .....	26
3. táblázat. A rendszer energiatároló képességével kapcsolatos pontozási rendszer.....	32
4. táblázat. A szimuláció során használt napelem adattábla adatai .....	37
5. táblázat. Az inverter adattáblája .....	43
6. táblázat. A napelemek adattábláját .....	43
7. táblázat. A feszültségérték változással kapcsolatos pontozási rendszer.....	46
8. táblázat. Az inverter adatlapja .....	49
9. táblázat. A napelem panel adatlapja .....	49
10. táblázat. A THD változása ugyanazon besugárzási értékeknél .....	58
11. táblázat. A Teljes harmonikus torzítás értékével kapcsolatos pontozási rendszer .....	58
12. táblázat. Az öregedéssel kapcsolatos pontozási rendszer .....	59
13. táblázat. Az egyes napelemes rendszerek beruházással kapcsolatos részei .....	61
14. táblázat. A beruházási költségekkel kapcsolatos pontozási rendszer .....	61
15. táblázat. A karbantartási költségekkel kapcsolatos pontozási rendszer.....	62
16. táblázat. A megtérülési idővel kapcsolatos pontozási rendszer.....	64
17. táblázat. A vizsgált szigetüzemű rendszerek beruházási költségei.....	65
18. táblázat. A vizsgált szigetüzemű rendszerek megtérülési ideje.....	66
19. táblázat. A háromszögmodell pontozási eredményei a vizsgált szigetüzemű rendszerek esetén .....	66
20. táblázat. A vizsgált hálózatcsatolt rendszer beruházási költségei .....	67
21. táblázat. A vizsgált hálózatcsatolt rendszer megtérülési ideje .....	67
22. táblázat. A háromszögmodell pontozási eredményei a vizsgált hálózatcsatolt rendszer esetén.....	68
23. táblázat. A hibrid rendszerek beruházási költségei .....	69
24. táblázat. Megtérülési idő hibrid rendszerek esetén.....	69
25. táblázat. A háromszögmodell pontozási eredményei a vizsgált hibrid rendszer esetén .....	70

## IRODALOM

- [1] MEKH, *Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal*, 2022. [Online]. Available: <http://www.mekh.hu/energiastatisztika-riport>
- [2] A. C. Zambroni de Souza, M. Castilla, *Microgrids design and implementation*, Springer Nature Switzerland AG 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6>
- [3] E. Kobayashi, Y. Watabe, R. Hao, T. S. Ravi, *High efficiency heterojunction solar cells on n-type kerfless mono crystalline silicon wafers by epitaxial growth* <http://dx.doi.org/10.1063/1.4922196>
- [4] H. Fujiwara, M. Kondo, *Effects of a Si : H layer thicknesses on the performance of a Si : H c Si heterojunction solar cells* *Journal of Applied Physics* 101, 054516 (2007); doi: 10.1063/1.2559975
- [5] S. Mathew, A. Yella, P. Gao, R. Humphry-Baker, B. F. E. Curchod, N. Ashari-Astani, I. Tavernelli, U. Rothlisberger, K. Nazeeruddin, M. Gratzel, *Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers*, *Nature Chemistry*, Volume 6, Issue 3, pp. 242-247 (2014), DOI:10.1038/nchem.1861
- [6] I. Szabó, *Napelemes tápellátó rendszerekben alkalmazott növelt hatásfokú, analóg maximális teljesítmény- követő áramkör analízise*, PhD értekezés, Budapest, 1996-97
- [7] A. Agresti, S. Pescetelli, E. Magliano, G. Bengasi, C. Conelli, C. Gerardi, H. Pazniak, F. Bonaccorso, M. Foti, A. Di Carlo, *Highly Efficient 2D Materials Engineered Perovskite/Si Tandem Bifacial Cells Beyond 29%*, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 12, no. 6, pp. 1273-1281, 2022, doi: 10.1109/jphotov.2022.3214345
- [8] D. Pourjafari, S.M.P. Meroni, D. Peralta Domínguez, R. Escalante, J. Baker, A. Saadi Monroy, A. Walters, T. Watson, G. Oskam, *Strategies towards Cost Reduction in the Manufacture of Printable Perovskite Solar Modules*, *Energies*, vol. 15, no. 2, 641, 2022, doi: 10.3390/en15020641
- [9] G. Tiwari, N. Tiwari, A. Shyam *Handbook of solar energy theory, analysis and applications*, Singapore 2016. (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0807-8>
- [10] N. D. Kaushika, A. Mishra, A. K. Rai, *Solar photovoltaics technology, system design, reliability and viability*, India, 2018, ISBN 978-3-319-72403-4
- [11] I. Bodnár, *Napelem működésének alapjai, a napelemes villamosenergia termelés elmélete és gyakorlati megvalósítása*, Miskolc, 2019, ISBN 978-615-00-4566-5
- [12] H. Yao, J. Hou, *Recent Advances in Single-Junction Organic Solar Cells*, *Angewandte Chemie*, vol. 134, no. 37, 2022, doi: 10.1002/ange.202209021
- [13] A. Mahmood, J-L. Wang, *Machine learning for high performance organic solar cells: current scenario and future prospects*, *Energy & Environmental Science*, vol. 14, iss. 1, pp. 90-105, 2021, doi: 10.1039/d0ee02838J

- [14] L. Meng, Y. Zhang, X. Wan, C. Li, X. Zhang, Y. Wang, X. Ke, Z. Xiao, L. Ding, R. Xia, H-L. Yip, Y. Cao, Y. Chen, *Organic and solution-processed tandem solar cells with 17.3% efficiency*, Science, vol. 361, iss. 6407, pp. 1094-1098, 2018, doi: 10.1126/science.aat2612
- [15] Z. Zheng, J. Wang, P. Bi, J. Ren, Y. Wang, Y. Yang, X. Liu, S. Zhang, J. Hou, *Tandem organic solar cell with 20.2% efficiency*, Joule, vol. 6, no. 1, pp. 171-184, 2022, doi: 10.1016/j.joule.2021.12.017
- [16] I. Bodnár, D. Matusz-Kalász, Statistical Comparison Between Experimental and Numerical Simulation Results of The Solar Cell, 2021 22nd International Carpathian Control Conference (ICCC), <https://doi.org/10.1109/ICCC51557.2021.9454650>
- [17] Dr. I. Bodnár, *Napelemek üzemi hatékonyságát csökkentő tényezők számítógéppel támogatott vizsgálata, állapotfelmérése és károsodásvizsgálata*, A Miskolci Egyetem Habilitációs Füzetei, Informatikai Tudományok Tudományági Habilitációs Bizottság, Miskolc, 2022.
- [18] P. Würfel, U. Würfel, *Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts, 3rd Edition*, 2016 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany, 2016, Online ISBN: 9783527618545, doi: 10.1002/9783527618545
- [19] I. Réti, *Nagy határfokú félvezető alapú napelemek*. Ph.D. értekezés, Szent István Egyetem, 2015, doi: 10.14751/SZIE.2015.025
- [20] E. Földváry-Bándy, *Félig átlátszó egykristályos szilícium alapú napelem cella technológiája vizsgálata*, Ph.D. értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2015, <http://hdl.handle.net/10890/1441>
- [21] I. Bodnár, *Electric parameters determination of solar panel by numeric simulations and laboratory measurements during temperature transient*. Acta Polytechnica Hungarica. vol. 15. nr. 4. pp. 59-82. 2018
- [22] E. Radziemska, *The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells*. Renewable Energy. Vol. 28. No. 1. 2003. pp. 1-12.
- [23] P. Yadav, K. Pandey, V. Bhatt, M. Kumar, J. Kim, *Critical aspects of impedance spectroscopy in silicon solar cell characterization: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 76. 2017. pp. 1562-1578
- [24] A. Laudani, F. R. Fulginei, A. Salvini, *High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I-V curves by using reduced forms*, Solar Energy, vol. 103, no. 3, pp. 316–326, 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.02.014
- [25] Y.R. Golive, A. Kottantharayil, N. Shiradkar, *Improving the accuracy of temperature coefficient measurement of a PV module by accounting for the transient temperature difference between cell and backsheet*, Solar Energy, vol. 237, pp. 203-212, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.03.049
- [26] V. Varjú, *Napelemes energia és környezet*, MTA Közgazdaság- és Regionális Tudományi Kutatóközpont Regionális Kutatások Intézete, 2014. ISBN 978 963 9899 76 6
- [27] L. Mészáros, K. Schottner, *Megújuló energiatermelő rendszerek Napelemes erőművek*, Ma gyar Mérnöki Kamara Elektrotechnikai Tagozat, 2015. február

- [28] S. Qazi, *Standalone photovoltaic (PV) systems for disaster relief and remote areas*, 2017, ISBN: 978-0-12-803022-6 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803022-6.00005-8>
- [29] A. Ghafoor, A. Munir, *Design and economics analysis of an off-grid PV system for household electrification*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 42, February 2015, Pages 496-502 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.012>
- [30] H. AbdEl-Gawad and Vijay K. Sood, *Overview of Connection Topologies for Grid-Connected PV Systems*, 2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), DOI: 10.1109/CCECE.2014.6901154
- [31] B. Liu, S. Duan, T. Cai, *Photovoltaic DC-Building-Module-Based BIPV System—Concept and Design Considerations*, *IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 26, Issue: 5, May 2011), DOI: 10.1109/TPEL.2010.2085087
- [32] S. Deshpande, Dr. N. R. Bhasme, *A Review of Topologies of Inverter for Grid Connected PV Systems*, 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), DOI: 10.1109/IPACT.2017.8245191
- [33] T. Ngo, S. Santoso, *Grid-connected photovoltaic converters: Topology and grid interconnection*, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 6, 032901 (2014); doi: 10.1063/1.4876415
- [34] Subramaniam, U.; Vavilapalli, S.; Padmanaban, S.; Blaabjerg, F.; Holm-Nielsen, J.B.; Almakhlles, D. *A Hybrid PV-Battery System for ON-Grid and OFF-Grid Applications—Controller-In-Loop Simulation Validation*. *Energies* 2020, 13, 755. <https://doi.org/10.3390/en13030755>
- [35] Deotti, L.; Guedes, W.; Dias, B.; Soares, T. *Technical and Economic Analysis of Battery Storage for Residential Solar Photovoltaic Systems in the Brazilian Regulatory Context*. *Energies* 2020, 13, 6517. <https://doi.org/10.3390/en13246517>
- [36] I. Ranaweera, O-M. Midtgård, *Optimization of operational cost for a grid-supporting PV system with battery storage*, *Renewable Energy* 88 (2016) 262-272, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.044>
- [37] A. Marquez, J. I. Leon, S. Vazquez, L. G. Franquelo and S. Kouro, *Operation of an hybrid PV-battery system with improved harmonic performance*, *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, China, 2017, pp. 4272-4277, doi: 10.1109/IECON.2017.8216733.
- [38] S. Garip, S. Ozdemir, *Optimization of PV and Battery Energy Storage Size in Grid-Connected Microgrid*. *Appl. Sci.* 2022, 12, 8247. <https://doi.org/10.3390/app12168247>
- [39] H. B. Yamchi, H. Shahsavari, N.T. Kalantari, A. Safari, M. Farrokhifar, *A cost-efficient application of different battery energy storage technologies in microgrids considering load uncertainty*, *Journal of Energy Storage* Volume 22, April 2019, Pages 17-26, <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.023>
- [40] A. Jasuan, Z. Nawawi; H. Samaulah, *Comparative Analysis of Applications Off-Grid PV System and On-Grid PV System for Households in Indonesia*, 978-1-5386-5721-8/18/\$31.00 ©2018 IEEE
- [41] S. Nguyen, W. Peng, P. Sokolowski, D. Alahakoon, X. Yu, *Optimizing rooftop photovoltaic distributed generation with battery storage for peer-to-peer energy trading*, *Applied Energy* Volume 228, 15 October 2018, Pages 2567-2580, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.042>

- [42] Dr. Novothny Ferenc, *Villamosenergia-ellátás II.*, Budapest, 2002
- [43] N. Hatziargyriou, *Microgrids Architectures and Control*, 2014, ISBN: 978-1-118 7208-4
- [44] EON Hungária Zrt. *Csatlakozási díjak KIF/KÖF hálózatra* (2023)
- [45] N. M. Tabatabaei, E. Kabalci, N. Bizon, *Microgrid Architectures - Control and Protection Methods*, 2020, ISSN 1860-4676 <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3>
- [46] I. Bodnár, *Villamosenergetika és biztonságtechnika*, Miskolc: Miskolci Egyetem, 2019.
- [47] F. Delfino, R. Procopio, M. Rossi, S. Bracco, M. Brignone, M. Robba, *Microgrid Design and Operation*, 2018, ISBN 13: 978-1-63081-150-1
- [48] H.A. Keihne I. *Battery technology handbook*, second edition, ISBN:0 8247-4249-4, 2003
- [49] S. Comello, S. Reichelstein, *The emergence of cost effective battery storage*, Nature Communications volume 10, Article number: 2038 (2019), <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09988-z>
- [50] R. Bátorfi, *A szolgáltatott villamos energia minőségének és a felhasználás hatékonyságának on-line vizsgálata*, PhD értekezés, 2013, Miskolc
- [51] N.B.G. Brinkel, M.K. Gerritsmaa, T.A. AlSkaif, I. Lampropoulosa, A.M. van Voordenb ,H.A. Fidderb , W.G.J.H.M. van Sark, *Impact of rapid PV fluctuations on power quality in the low-voltage grid and mitigation strategies using electric vehicles*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 118, June 2020, 105741, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105741>
- [52] E. Styvaktakis, M. H. J. Bollen and I. Y. H. Gu, *Automatic classification of power system events using RMS voltage measurements*, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting,, Chicago, IL, USA, 2002, pp. 824-829 vol.2, doi: 10.1109/PSS.2002.1043446.
- [53] T. Pei, X. Hao, *A Fault Detection Method for Photovoltaic Systems Based on Voltage and Current Observation and Evaluation*, Energies 2019, 12(9),1712, <https://doi.org/10.3390/en12091712>
- [54] A. E. Nieto, F. Ruiz, D. Patiño, *Characterization of electric faults in photovoltaic array systems*, October 2019 Dyna (Medellin, Colombia) 86(211):54-63, DOI:10.15446/dyna.v86n211.79085
- [55] M. S. Arani, M. A. Hejazi, *The Comprehensive Study of Electrical Faults in PV Arrays*, Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Volume 2016, Article ID 8712960, 10 pages, <https://doi.org/10.1155/2016/8712960>
- [56] M.K. Alam, F. Khan, J. Johnson, J. Flicker, *A Comprehensive Review of Catastrophic Faults in PV arrays: types, detection, and mitigation techniques*, IEEE Journal of Photovoltaics, 5(3), pp. 982-997, 2015. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2397599
- [57] K. Ishaque, Z. Salam, *A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition*. Renew. Sustain. Energy Rev. 2013, 19, 475–488.
- [58] Li, G.; Jin, Y.; Akram, M.W.; Chen, X.; Ji, J. *Application of bio-inspired algorithms in maximum power point tracking for PV systems under partial shading conditions—*

- A review., *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 81, 840–873, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127279>
- [59] S.A. Fahrenbruch, *Solar bypass diodes: Then and now*. A PV Management Magazine 2010.
- [60] N. Ishikura, T. Okamoto, I. Nanno, T. Hamada, S Oke, M. Fujii, *Simulation analysis of really occurred accident caused by short circuit failure of blocking diode and bypass circuit in the photovoltaics system*. In: 7th Int. IEEE Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2018, vol. 5. IEEE; 2018. p. 533e6. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2018.8566896>.
- [61] G. L. Chung, G. S. Woo, R. L. Jong, H. K. Gi, C. J. Young, M. H. Hye, S. C. Hyo, W. K. Suk, *Analysis of electrical and thermal characteristics of PV array under mismatching conditions caused by partial shading and short circuit failure of bypass diodes*, *Energies* 218. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119480>
- [62] J. Posbic, E. Rhee, D. Amin, *High temperature reverse by-pass diodes bias and failures*. 2013. 2013, [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/01/f7/pvmrw13\\_ps3\\_memc\\_posbic.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/01/f7/pvmrw13_ps3_memc_posbic.pdf).
- [63] N.S. Shiradkar, E. Schneller, N.G. Dhere, V. Gade, *Predicting thermal runaway in bypass diodes in photovoltaic modules*. In: 2014 IEEE 40th Photovolt. Spec.Conf. PVSC. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2014. p. 3585e8. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6924881>. 2014
- [64] Shin W-G, Jung T-H, Go S-H, Ju Y-C, Chang H-S, Kang G-H. Analysis on thermal & electrical characteristics variation of PV module with damaged bypass diodes. *J Korean Sol Energy Soc* 2015;35:67e75. <https://doi.org/10.7836/kjes.2015.35.4.067>.
- [65] W.G. Shin, S.W. Ko, H.J Song, Y.C. Ju, H.M. Hwang, G.H. Kang. *Origin of bypass diode fault in c-Si photovoltaic modules: leakage current under high surrounding temperature*. *Energies* 2018;11. <https://doi.org/10.3390/en11092416>
- [66] I. Bodnár, D. Faragó, Gy. Dojcsák, *Simulation of a solar power plant*, 978-1-7281-0702-8/19/\$31.00©2019 IEEE
- [67] Épületgépész folyóirat 2015/1. - *Az inverter feladata és kiválasztása hálózatra csatlakozó napelemes rendszerekben*. <http://www.naplopo.hu/tudastar/szakcikkeink-hasznos-irasaink/332-az-inverter-feladata-es-kivalasztasa-halozatra-csatlakozo-napelemesrendszerekben>, 2018.12.02.
- [68] S. ADAK1, H. CANGİ, *Harmonic analysis of stand alone photovoltaic system at low irradiance conditions*, *The International Journal of Energy & Engineering Sciences*, 2020, 5 (1) 1-11, ISSN: 2602-294X - Gaziantep University
- [69] S. Wei, E. Temitope, *Adoption of Solar Grid-Tied PV-System Adopted in a Residential Building*, *Australasian Journal of Construction Economics and Building - Conference Series* 2(2):80, April 2014, DOI:10.5130/ajceb-cs.v2i2.3894
- [70] Žnidarec M., Klaić Z., Šljivac D., Dumnić B., *Harmonic Distortion Prediction Model of a Grid-Tie Photovoltaic Inverter Using an Artificial Neural Network*. *Energies* 2019, 12, 790. <https://doi.org/10.3390/en12050790>
- [71] Podder A.K., Habibullah M., Tariquzzaman M., Hossain E., Padmanaban S., *Power Loss Analysis of Solar Photovoltaic Integrated Model Predictive Control Based On-Grid Inverter*. *Energies* 2020, 13, 4669. <https://doi.org/10.3390/en13184669>

- [72] Zeb K., Nazir M.S., Ahmad I., Uddin W., Kim H.-J., *Control of Transformerless Inverter-Based Two-Stage Grid-Connected Photovoltaic System Using Adaptive-PI and Adaptive Sliding Mode Controllers*. *Energies* 2021, 14, 2546. <https://doi.org/10.3390/en14092546>
- [73] Wang, L.; Qiao, T.; Zhao, B.; Zeng, X.; Yuan, Q., *Modeling and Parameter Optimization of Grid-Connected Photovoltaic Systems Considering the Low Voltage Ride-through Control*, *Energies* 2020, 13, 3972. <https://doi.org/10.3390/en13153972>
- [74] A. Khan, M.Y.; Liu, H.; Yang, Z.; Yuan, X., *A Comprehensive Review on Grid Connected Photovoltaic Inverters, Their Modulation Techniques, and Control Strategies*. *Energies* 2020, 13, 4185. <https://doi.org/10.3390/en13164185>
- [75] R. González, A. Argüello, J. Quirós-Tortós, G. Valverde, *Statistical analysis of residential harmonic spectrum in Costa Rica*, 2016 IEEE 36th Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXVI), pp.1-6, 2016. DOI: 10.1109/INTLEC.1992.268395
- [76] C. Kocatepe, R. Yumurtaci, O. Arikan, M. Baysal, B. Kekezoglu, A. Bozkurt, and C. Fadil, *Harmonic Effects of Power System Loads: An Experimental Study*, INTECH, 2013. DOI: 10.5772/53108
- [77] D. Chapman Copper, *Harmonikusok Források és hatások Villamosenergia-minőség – Alkalmazási segédlet*, Development Association 2001. március
- [78] M. Ayub, C. K. Gan, A. F. A. Kadir, *The Impact of Grid-Connected PV Systems on Harmonic Distortion*, 2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA), 978-1-4799-1300 8/14/\$31.00 ©2014 IEEE
- [79] S.M. Ahsan, H.A. Khan, A. Hussain, S. Tariq, N.A Zaffar, *Harmonic Analysis of Grid-Connected Solar PV Systems with Nonlinear Household Loads in Low-Voltage Distribution Networks*. *Sustainability* 2021, 13, 3709. <https://doi.org/10.3390/su13073709>
- [80] A. Dán, T. Tersztyánszky, Gy. Varjú, *Villamosenergia minőség*, ISBN 963 22 9619 2, 2006.
- [81] A. Dán, B. Hartmann, P. Kiss, *Hálózati áramellátás és feszültségminőség*, Publication date 2012.
- [82] J. Somogyiné Dr. Molnár, *Villamosságtan III előadás jegyzet*, Miskolci Egyetem Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék
- [83] I.N. Bronstejn, K.A.Szemengyajev, D. Musiol, H. Mühlig, *Matematikai kézikönyv* Typotex kiadó, Budapest 2009.
- [84] J.V. Fischer, *On the Duality of Regular and Local Functions*, 2017 *Mathematics* 5, no. 3: 41. <https://doi.org/10.3390/math5030041>
- [85] D. Shmilovitz, *On the Definition of Total Harmonic Distortion and Its Effect on Measurement Interpretation*, January 2005 IEEE Transactions on Power Delivery 20 (1) January 2005, DOI:10.1109/TPWRD.2004.839744
- [86] A. Allik, A. Annuk, *Transient processes in small scale autonomous photovoltaic and wind power systems*, 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), pp.159-163, 2017. DOI: 10.1109/IFEEC.2017.7992269
- [87] MSZ EN 50160: *A közcélú elosztóhálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemzői*. 2010.

- [88] M.N. Ashtinania, T. Ashkan, F. R. Astraei, Y. Hossein, M. Akbar, *Techno-economic analysis of a grid-connected PV/battery system using the teaching learning-based optimization algorithm*, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.007>, Received 26 July 2019;
- [89] S. Bozsik, J. Szemán, G. Süveges, *Vállalati pénzügyek*, ISBN 978-615 5216-39-8. Miskolc. 2017
- [90] A. Ndiaye, C.M.F Kébe, B.O. Bilal, A. Charki, V. Sambou, P.A Ndiaye, *Study of the correlation between the dust density accumulated on photovoltaic module's surface and their performance characteristics degradation*. Innov. Interdiscip. Solut. Underserved Areas 2018, 204, 31–42.
- [91] E. Klugmann-Radziemska, *Shading, dusting and incorrect positioning of photovoltaic modules as important factors in performance reduction*. Energies 2020, 13, 1992. <https://doi.org/10.3390/en13081992>
- [92] P. Singh, N.M Ravindra, *Temperature dependence of solar cell performance—An analysis*. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2012, 101, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.02.019>
- [93] S. Oh, B.W. Figgis, S. Rashkeev, *Effect of thermophoresis on dust accumulation on solar panels*, Solar Energy Volume 211, 15 November 2020, Pages 412-417. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.053>
- [94] M.U. Ali, S. Saleem, H. Masood, K.D. Kallu, M. Masud, M.J. Alvi, A. Zafar, *Early hotspot detection in photovoltaic modules using color image descriptors: An infrared thermography study*, Int. J. Energy Res. 2021, 45, 1–12. <https://doi.org/10.1002/er.7201>
- [95] O.E. Ikejiofor, Y.E Asuamah, H.O. Njoku, S.O Enibe, *Detection of hotspots and performance deteriorations in pv modules under partial shading conditions using infrared thermography*. Eng. Proc. 2020, 2, 71. <https://doi.org/10.3390/ecsa-7-08201>
- [96] M. Gürtürk, H. Benli, N.K. Ertürk, *Effects of different parameters on energy—Exergy and power conversion efficiency of PV modules*. Renew. Sustain. Energy Rev. 2018, 92, 426–439., <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.117>
- [97] J. Weniger, T. Tjaden, V. Quaschnig, *Sizing of residential PV battery systems*, Energy Procedia Volume 46, 2014, Pages 78-87, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.160>
- [98] Y. Wu, Z. Liu, J. Liu, H. Xiao, R. Liu, L. Zhang, *Optimal battery capacity of grid-connected PV-battery systems considering battery degradation* Renewable Energy Volume 181, January 2022, Pages 10-23, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.036>
- [99] A. S. Hassan, L. Cipcigan, N. Jenkins, *Optimal battery storage operation for PV systems with tariff incentives*, Applied Energy Volume 203, 1 October 2017, Pages 422-441, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.043>
- [100] J. Somogyiné Dr. Molnár, *Gazdasági Aspektusok*, Előadás, Department of Electrical Engineering and Electronics, University of Miskolc, Miskolc, 2022.
- [101] J. Somogyiné Molnár, D. Szanlánczi, *Napelemes Rendszerek Megtérülési idejének vizsgálata*, Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2022.; Miskolc, 2022; ISBN 978-963-358-279-4



- 
- [102] B. Zsótér, *Vállalati gazdaságtan és pénzügyi ismeretek mérnököknek*. Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar, Szeged, 2019.
- [103] R.A. Brealey, S.C Myers, *Modern vállalati pénzügyek*. PANEM, Budapest, 2005.
- [104] P. Papp, E. Szűcs, *Beruházási alapismeretek*. TERC Kft., Budapest, 2013.