

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

TRANSPORTFOLYAMATOK ÉS GÉPEIK TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella

DSc, egyetemi tanár

TÉMATERÜLET VEZETŐ

Prof. Dr. Páczelt István

DSc, egyetemi tanár

TÉMACSOPORT VEZETŐ

Prof. Dr. Baranyi László

DSc, egyetemi tanár

TÉMAVEZETŐ

Dr. habil. Bodnár István

egyetemi docens

**Miskolc
2024**

TARTALOM

TARTALOM	I
TERVEZÉSVEZETŐ AJÁNLÁSA	III
JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK LISTÁJA	V
1. BEVEZETÉS	8
2. A NAPELEMEK ÉS NAPELEMES RENDSZEREK TÍPUSAI	10
2.1. <i>A napelemek típusai</i>	10
2.1.1. <i>Monokristályos napelem cellák</i>	10
2.1.2. <i>Polikristályos napelem cellák</i>	10
2.1.3. <i>Vékonyréteg napelem cellák</i>	11
2.1.4. <i>Hibrid napelem cellák</i>	12
2.2. <i>A napelem cella elektronikai modellje</i>	12
2.3. <i>A napelemes rendszerek felépítése</i>	15
2.3.1. <i>Szigetüzemű rendszerek</i>	16
2.3.1.1. <i>Közvetlen csatolású szigetüzemű napelemes rendszerek</i>	16
2.3.1.2. <i>Akkumulátortárolós szigetüzemű napelemes rendszerek</i>	17
2.3.1.3. <i>Hálózat-interaktív szigetüzemű napelemes rendszer</i>	18
2.3.2. <i>Hálózatcsatolt napelemes rendszerek akkumulátor telep nélkül</i>	18
2.3.3. <i>Hálózatcsatolt napelemes rendszerek akkumulátor teleppel (Hibrid rendszerek)</i>	19
2.3.3.1. <i>Hibrid napelemes rendszer</i>	19
2.3.3.2. <i>Szigetüzemre is alkalmas hibrid napelemes rendszerek</i>	20
3. DÖNTÉSTÁMOGATÓ ÉS DÖNTÉST HOZÓ MÓDSZEREK	22
3.1. <i>A döntéshozó módszerek szakirodalmi áttekintése</i>	22
3.2. <i>A háromszögmodell általános felépítése</i>	24
4. A NAPELEMES RENDSZER ENERGIAELLÁTÁS BIZTONSÁGRA GYAKOROLT HATÁSA	26
4.1. <i>A villamos hálózati csatlakozás és egyéb bővítések</i>	26
4.1.1. <i>Csatlakozási távolság</i>	26
4.1.2. <i>Napelemes rendszerrel kapcsolatos bővítések</i>	27
4.1.3. <i>Villamos hálózattal kapcsolatos pontozási rendszer</i>	27
4.2. <i>A fogyasztók energiaellátása</i>	27
4.2.1. <i>Napelemes rendszerek a villamos hálózatban</i>	27
4.2.2. <i>A fogyasztók energiaellátásával kapcsolatos pontozási rendszer</i>	28
4.3. <i>A rendszer energiatároló képessége</i>	29
4.3.1. <i>Hálózatcsatolt napelemes rendszer akkumulátor kapacitásának vizsgálata</i>	30
4.3.2. <i>Napelemes rendszer energiatároló képességének pontozási rendszere</i>	35
5. A NAPELEMES RENDSZEREK TECHNOLÓGIAI VIZSGÁLATA	36
5.1. <i>Feszültségérték változása</i>	37
5.1.1. <i>Feszültségminőség</i>	37
5.1.2. <i>Napelemes rendszerek egyenáramú oldalán fellépő hibák vizsgálata</i>	38
5.1.3. <i>A feszültség értékének változása a hőmérséklet függvényében</i>	47
5.1.4. <i>Feszültségérték változással kapcsolatos pontozási rendszer</i>	49
5.2. <i>Felharmonikusok hatása</i>	51

5.2.1. <i>Harmonikusok, Fourier transzformáció</i>	52
5.2.2. <i>Teljes harmonikus torzítás</i>	53
5.2.3. <i>Napelemes rendszerek harmonikus vizsgálata hálózati méréssel</i>	53
5.2.4. <i>Napelemes rendszerek harmonikus vizsgálata szimulációs környezetben</i>	58
5.2.5. <i>A teljes harmonikus torzítás értékével kapcsolatos pontozási rendszer</i>	63
5.3. <i>Élettartam és öregedés</i>	63
6. A NAPELEMES RENDSZEREK GAZDASÁGI ELEMZÉSE	65
6.1. <i>Beruházási költségek</i>	65
6.2. <i>Karbantartási költségek</i>	66
6.3. <i>Megtérülési idő</i>	67
6.3.1. <i>Egyszerűsített megtérülési idő</i>	67
6.3.2. <i>Jelenérték (PV) és jövőérték (FV)</i>	67
6.3.3. <i>Nettó jelenérték (NPV)</i>	68
6.3.4. <i>Összetett megtérülési idő</i>	68
6.3.5. <i>Megtérülési idővel kapcsolatos pontozási rendszer</i>	70
7. NAPELEMES RENDSZEREK VIZSGÁLATA HÁROMSZÖGMODELL SEGÍTSÉGÉVEL	71
7.1. <i>Szigetüzemű napelemes rendszerek vizsgálata</i>	71
7.2. <i>Hálózatcsatolt rendszer vizsgálata</i>	73
7.3. <i>Hibrid napelemes rendszer vizsgálata</i>	74
7.4. <i>A napelemes rendszerek vizsgálatának összegzése</i>	76
7.4.1. <i>A vizsgált szigetüzemű rendszerek összegzése</i>	76
7.4.2. <i>A vizsgált hálózatcsatolt rendszerek összegzése</i>	78
8. TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	80
ÖSSZEFOGLALÁS	83
SUMMARY	85
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	87
PUBLIKÁCIÓS LISTA	88
ÁBRAJEGYZÉK	89
TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE	91
IRODALOM	92

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 eszközszerével, 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 költsége	Ft
AM_u^n	adott évben vételezett villamos energia költsége	Ft
c	fénysebesség (<i>közelítő értéke: $3 \cdot 10^8$ m/s</i>)	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 energiatermelés	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
$P_{fénny}$	a napelempanel hasznos felületére érkező fénytjeljesítmény	W
P_{max}	maximális teljesítmény, a napelem csúcsteljesítménye	W
P_{mp}	munkaponti teljesítmény	W
PD_η	éves teljesítményromlás	%
P_0	beruházási költség	Ft

CF_t	a beruházás t-edik időpontban esedékes pénzárama	Ft
PR_e^n	adott évben értékesített villamos energia költsége	Ft
PR_{sum}^n	adott év össznyeresége	Ft
R_p	párhuzamos ellenállás	Ω
R_s	soros ellenállás	Ω
R_t	terhelő ellenállás	Ω
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	teljes harmonikus torzítás	%
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_{ii}	üresjárási feszültség	V
η	hatásfok	-, %
λ	hullámhossz	m
φ	kitöltési tényező	-, %

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

PV	<i>present value (angol)</i> , jelenérték
FV	<i>future value (angol)</i> , jövőérték
NPV	<i>net present value (angol)</i> , nettó jelenérték
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
AC	<i>Alternate Current (angol)</i> , Váltakozóáram
SOC	<i>State of Charge (angol)</i> , Töltöttségi 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
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process (angol)</i> , Analitikus Hierarchia Módszer
MCA	<i>Multi-Criteria Analysis (angol)</i> , Többkritériumos Kimenetelemzés
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats: SWOT analysis (angol)</i> , Gyengeségek, Erősségek, Lehetőségek és Fenyegetettségek: GYELV-elemzés

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben jelentősen megnövekedett a villamosenergia igény, ez egyrészt a technológiák automatizálásának, másrészt az otthonok kényelmét szolgáló elektronikai eszközök 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, azon belül is a napelemes rendszerek arányának növelésére összpontosított.

A napelemes rendszerekkel kapcsolatos jelenlegi szabályozások szigorodásának köszönhetően a jövőben sokkal fontosabb lesz a teljes villamosenergia-rendszer szabályozása és ellenőrzése. A napelemes rendszerek 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 már 2024 év végére megvalósult. 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 a villamosenergia-rendszer modernizációjára és digitalizációjára került át.

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 hatékonyságot 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 napelemes 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 napelemes rendszer jellemzésére, mivel nem veszik figyelembe az évek alatt bekövetkező változásokat. Annak érdekében, hogy egy napelemes rendszert teljes egészében optimalizálni tudjuk, nem csak gazdasági oldalról, hanem energiaellátás biztonsági és technológia oldalról is szükséges megvizsgálni.

Munkám célja egy olyan döntéstámogató rendszer kidolgozása volt, amely segít átfogó képet adni az egyes napelemes rendszerek átláthatóságáról. Ezek alapján felállítottam egy háromszögmodellt, amely segít az egyes napelemes rendszerek vizsgálatában három tudományterületi megközelítés szempontjából. A háromszögmodell egy optimumkeresés eljárást valósít meg.

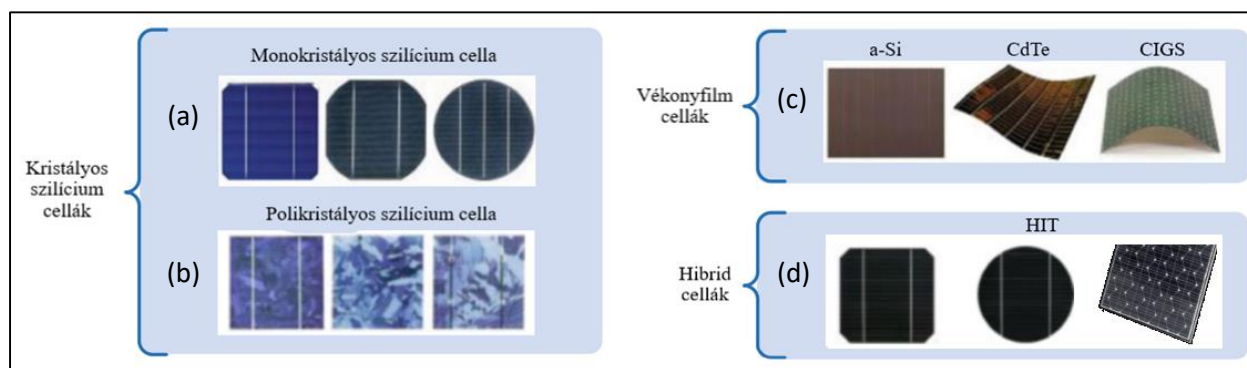
Napelemes rendszereknél az optimális rendszer megtalálásának folyamata során számos olyan kérdés merül fel, amelyeket szükséges több oldalról is megvizsgálni. Több módszer is rendelkezésre áll, hogy egy napelemes rendszert méretezzünk és kiválasszunk, azonban sok olyan tényező nincs vizsgálva, amely 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.

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. Ezt követően a háromszögmodell alkalmazását mutatom be különböző napelemes rendszerek vizsgálatával.

2. A NAPELEMEK ÉS NAPELEMES RENDSZEREK TÍPUSAI

2.1. A napelemek típusai

Manapság a napelem cellák elsődleges elemei a félvezetők, bár a kutatók más anyagokkal is kísérleteznek, beleértve a szerves polimereket is. A napelem celláknak alapvetően négy fő típusát különböztetjük meg (1. ábra). A kristályos szilíciumnak két variációja, a monokristályos és a polikristályos, továbbá a vékonyréteg- és hibridcella [2, 7].



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

2.1.1. Monokristályos napelem cellák

A monokristályos (egykristályos) szilíciumot a Czochralski-eljárásból készült hengeres geometriából vágják ki. A napelemeket „álnégyszet” 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]. Egységesebb feketés színűek, így elnyelik a fény nagy részét. A monokristályos cellák legfőbb előnye a nagy, körülbelül 20-24%-os a hatásfok, azonban a gyártási folyamat bonyolult és költséges [2, 3]. Laboratóriumi körülmények között ez az érték akár 30-40% is lehet [10]. A tiszta szilícium cellák előállításának költsége valamivel nagyobb, mint a polikristályos celláké, de manapság nincs nagy különbség az árban [2, 7, 8].

2.1.2. 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 kristályosodás a hűtési folyamat közben több pontból indul meg [7, 8, 11]. Az „ostyákat” (kb. 180–350 μm vastagságúak)

négyszet 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, így veszteségek vannak a cellák közötti rések miatt. Ez az eltérés azonban bizonyos körülmények között segíthet, mivel a cellák nem csak merőleges 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 hatásfokuk 18–20% [2, 7, 8]. Ez az érték laboratóriumi körülmények között 20–22% [10].

2.1.3. Vékonyréteg napelem cellák

A vékonyréteg (egyes szakirodalmakban: amorf típusú) napelemek második generációs napelemek, amelyeket úgy állítanak elő, hogy egy vagy több fázisban vékony „film” réteget gőzölnek fel egy hordozóra, amelynek anyaga lehet üveg, műanyag vagy fém. A „film”-vastagság néhány nanométertől (nm) a tíz mikrométerig (μm) változik. Így ez a fotovoltaiikus anyagréteg sokkal vékonyabb, mint bármely más rivális technológia, például a kristályos szilícium napelem (c-Si), ahol a félvezető réteg vastagsága 200 μm . Ez az oka annak, hogy „vékonyrétegű” napelem technológiának hívják őket. Az előállítási technológia 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 hatásfokuk az idő múlásával drasztikusabban romlik. A vékony fólia sokféle hordozóra rögzíthető, mind merev, mind rugalmas felületre egyaránt, így ideális ívelt és egyenetlen felületekhez is. Valamint üveg felületekre is felhordható. Jelenleg 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 vékonyréteg szilícium hatásfoka 6–8%, és elviseli az extrém meleget is, a szilícium-mentes CdTe és CIGS cellák nagyobb hatásfokot is elérhetnek, 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].

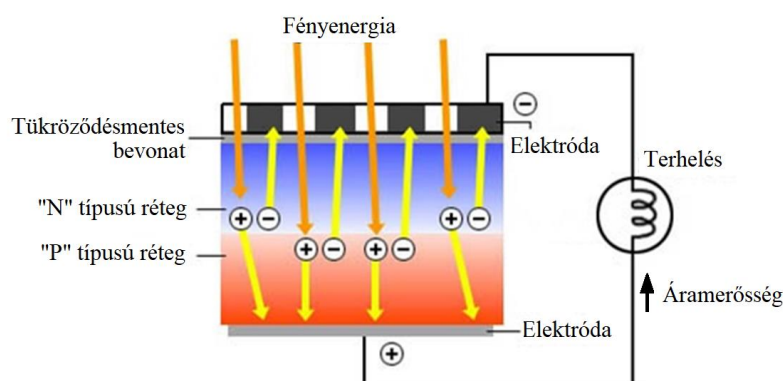
Számos olyan vékonyréteg technológia elérhető, amelyek bár a kutatások korai szakaszában vannak, ígéretesnek bizonyulnak. Ide tartoznak a szerves, a fényérzékeny festett cellák (dye-sensitised cells, DSC) és polimer napelemek, valamint a kvantumpont, a réz-cink ón-szulfid, a nanokristály, a mikromorf és a perovszkit napelemek [2, 12, 13, 14, 15].

2.1.4. Hibrid napelem cellák

A hibrid napelem olyan cellákból áll, amelynél két különféle technológiát ötvöznek egy cellába. Monokristályos cella, amely két réteg amorf vékonyréteg szilícium közé kerül. Egyes külföldi szakirodalmak HIT-heterojunction technológiának nevezik, melynek hatásfoka 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 napelemes technológiának a többlet beruházási költségeit.

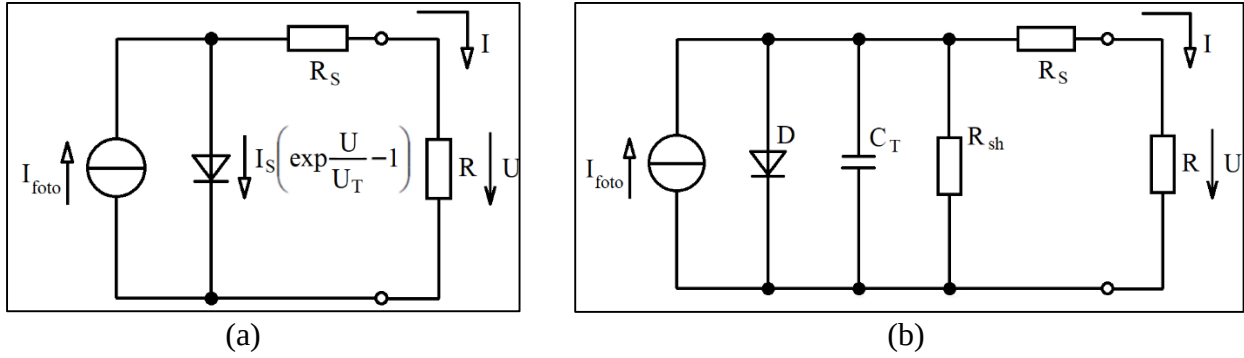
2.2. A napelem cella elektronikai modellje

A napelem cella két eltérő szennyezettségű, egymással összekapcsolt, vékony rétegű félvezető anyagból áll (2. ábra). Amikor a p- és n-típusú félvezető rétegeket érintkezésbe hozzuk, létrejön a p-n átmenet, amely során a felesleges elektronok az n-típusú félvezetőből a p-típusúba diffundálnak. A két réteg töltéshordozói a közöttük lévő potenciál lépcső miatt csak egy külső áramkört keresztül képesek rekombinálódni. Ha az átmenetet fény éri, az elektronok elnyelik a fotonokat, és az így nyert energia fedezi a kilépési munkát, majd a kötés felszakad. A szabad elektronok az elektromos tér hatására az n-típusú félvezető irányába, míg a keletkezett lyukak az ellentétes irányba mozognak. Az áramkört zárva egyenáram jön létre [18, 19, 20]. Tehát, ha a fotonok energiája elég nagy, akkor a napelem belsejében úgynevezett fotoáram jelenik meg.



2. ábra Napelem cella működési modellje

A napelem egyszerűsített és valóságos helyettesítő kapcsolását mutatja a 3. 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 kondenzátor (C_T) a fellépő parazitakapacitást jelképezi [19, 24]. Általánosan elmondható, hogy az R_s soros ellenállás $m\Omega$ nagyságrendű és (R_{sh}) párhuzamos ellenállás $M\Omega$ nagyságrendű.



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

A C_T parazita kapacitás értéke pedig a bekötő vezetékek között fellépő kapacitáshoz képest elhanyagolható. 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].

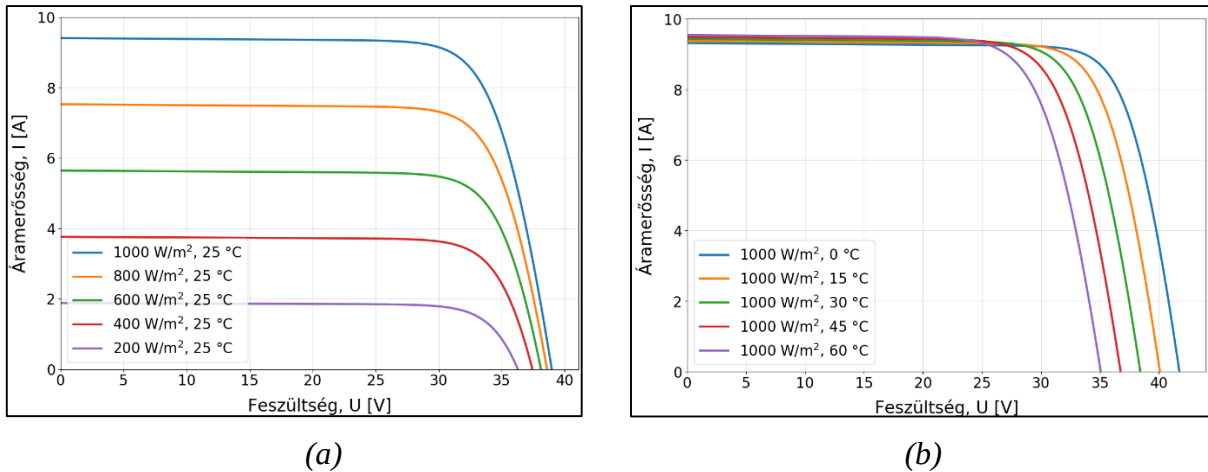
$$I(U) = I_{foto} - I_s \left(\exp \frac{U}{U_T} - 1 \right) \quad (1)$$

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 4. ábrán látható, hogy a napelem panelek villamos tulajdonságaira milyen hatással van a megvilágítás és a hőmérséklet.



4. ábra A (a) megvilágítás és (b) hőmérséklet hatása a napelem panelre [11, 21]

Megfigyelhető, hogy az áramerősség egyenes arányban változik a megvilágítás intenzitásával. Továbbá a hőmérséklettel fordított arányban áll a kapocsfeszültség értéke. A hőmérséklet az áramerősségre elhanyagolható mértékben gyakorol hatást. 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. Az összefüggés szélsőértékének megkereséséhez parciálisan deriváljuk a függvényt U szerint. Ehhez a $\frac{\partial P}{\partial U} = 0$ feltételt vesszük figyelembe és megkeressük az egyenlet megoldását [21]. 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.

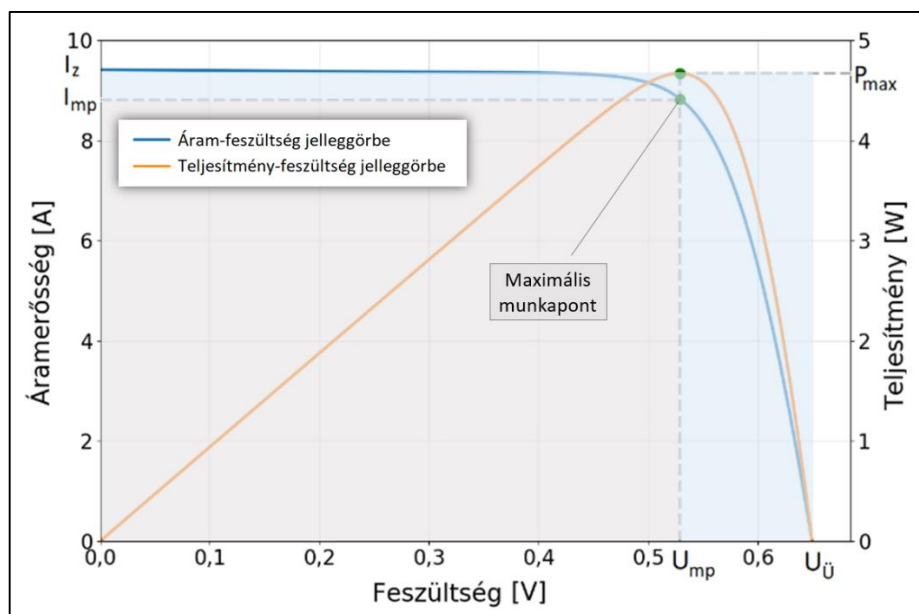
$$R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U_T}{I_S \cdot \exp\left(\frac{U_m}{U_T}\right)} = \frac{U_T}{I_m + I_S + I_{Rz}} \quad (7)$$

ahol R_m az optimális értékű munkaponti ellenállás. A maximálisan kivehető teljesítmény a 5. ábrán szürkével jelzett terület. A kitöltési tényező megmutatja, hogy a munkaponti feszültség és a 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]. Ez a következőképpen fejezhető ki:

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

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

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

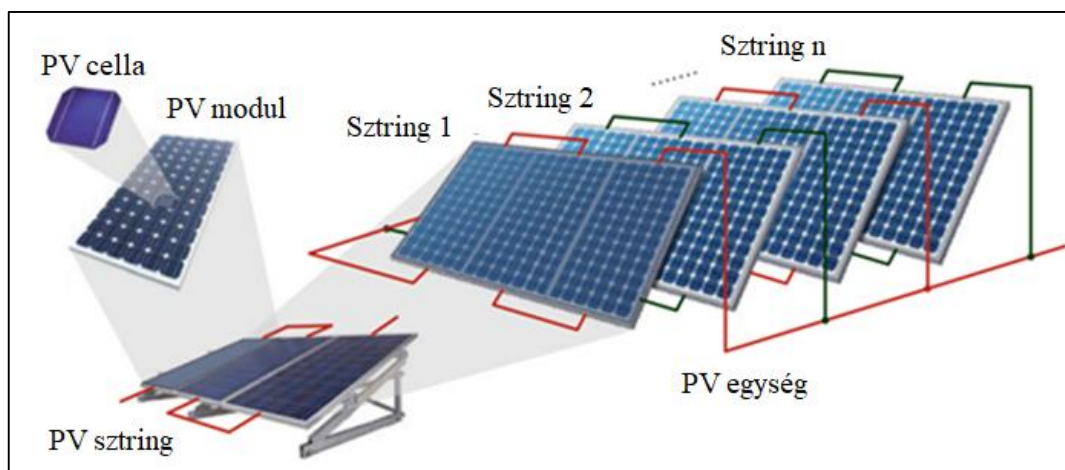


5. ábra Áram-feszültség és teljesítmény-feszültség kapcsolata [11, 21]

A kitöltési tényező értéke a gyakorlatban használt napelemek esetén 75% és 85% közé tehető és folyamatosan csökken a napelem öregedésével.

2.3. A napelemes rendszerek felépítése

A napelemes rendszerek építőköve a napelem panel, amely cellákból épül fel. Egy napelem cella mérete rendszerint 60 és 300 cm² között változik, amelyek kapocsfeszültsége 0,5–0,6 V közötti érték, méretétől függetlenül. A napelem cellák jelenlegi áramleadóképessége rendszerint 1 és 5 amper között változik, amely a méret és a hatékonyság függvényében változik. A kimeneti teljesítmény szintén arányos a cellafelszínre 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 sztringeket hoznak létre, azzal a céllal, hogy növeljék feszültségüket, a nagyobb feszültségű alkalmazások elérése érdekében (6. ábra). Végül a sztringeket sorosan/párhuzamosan, alacsony/nagy feszültség mellett kombinálva akár több tíz megawatt (vagy annál is nagyobb) napelemes rendszer képezhető [2, 28].



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

Alapvetően háromféle típusú rendszert különböztetünk meg. 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]. Második a hálózatsatolt napelemes rendszer. A hálózatra kötött napelemes rendszerek esetén nincs saját energiátároló. 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]. Harmadik a hibrid napelemes rendszer, amely a szigetüzemű és a hálózatra kapcsolt rendszerek kombinációjaként működik, 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.

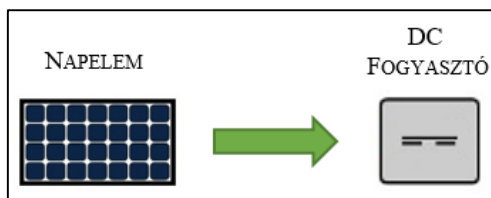
2.3.1. Szigetüzemű rendszerek

Az önálló napelemes rendszerek olyan 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 három alkategóriába sorolhatók. Az első a közvetlen-csatolású szigetüzemű napelemes rendszereket foglalja magába, a második az akkumulátortárolós szigetüzemű napelemes rendszert és a harmadik a hálózat-interaktív szigetüzemű napelemes rendszert [10, 27].

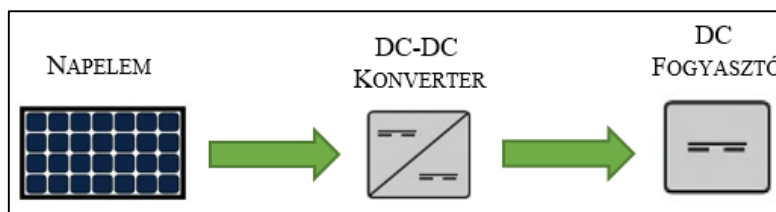
2.3.1.1 Közvetlen csatolású szigetüzemű napelemes rendszerek

A közvetlen csatlakozású szigetüzemű napelemes rendszer a napelem panelekből és fogyasztókból áll (7. 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 a legszélesebb körben elterjedt napelemes rendszerek, mielőtt a hálózatsatolt rendszerek egyre népszerűbbé váltak. A közvetlen csatolású

napelemes rendszereket számos területen alkalmazzák, mint például órák, számológépek, ventilátorok, telekommunikáció egyes területei, műholdak. Bizonyos teljesítményeknél DC-DC konverter alkalmazása válhat szükségessé (8. ábra), ezáltal jobban ki tudják használni a rendelkezésre álló napelemes teljesítményt [27, 28]. A DC-DC konverter feladata, hogy a napelemtől eltérő feszültség tartomány vagy konkrét feszültség érték elérhető legyen a fogyasztó számára, amennyiben a napelem által szolgáltatott feszültség ingadozik.



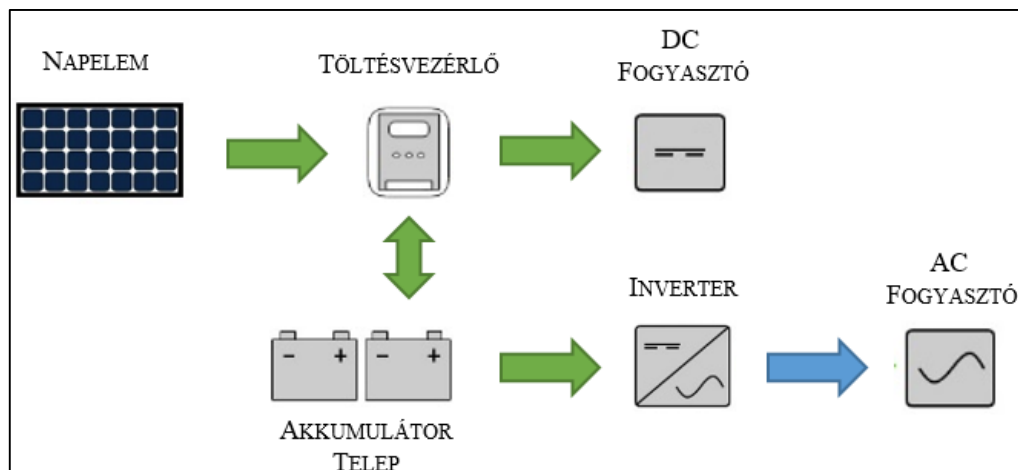
7. ábra Közvetlen csatolású szigetüzemű napelemes rendszer



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

2.3.1.2 Akkumulátortárolós szigetüzemű napelemes rendszerek

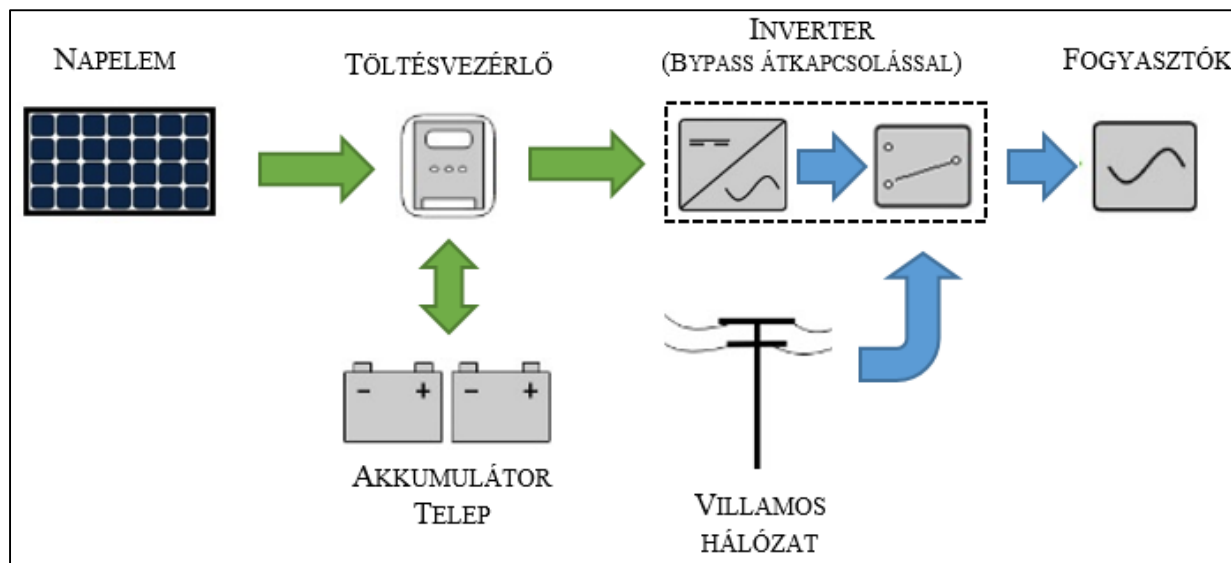
A közvetlen csatlakozású szigetüzemű rendszerek egyik hátránya, hogy nem képesek éjszakai vagy felhős napokon, továbbá elégtelen megvilágítás mellett működni. Ezt a hátrányt kiküszöbölhetjük egy akkumulátoros tárolóval ellátott napelemes rendszer használatával (9. ábra). Előnye, hogy tárolja az energiát és 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].



9. ábra Akkumulátor tárolós szigetüzemű napelemes rendszer

2.3.1.3 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 (10. 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.

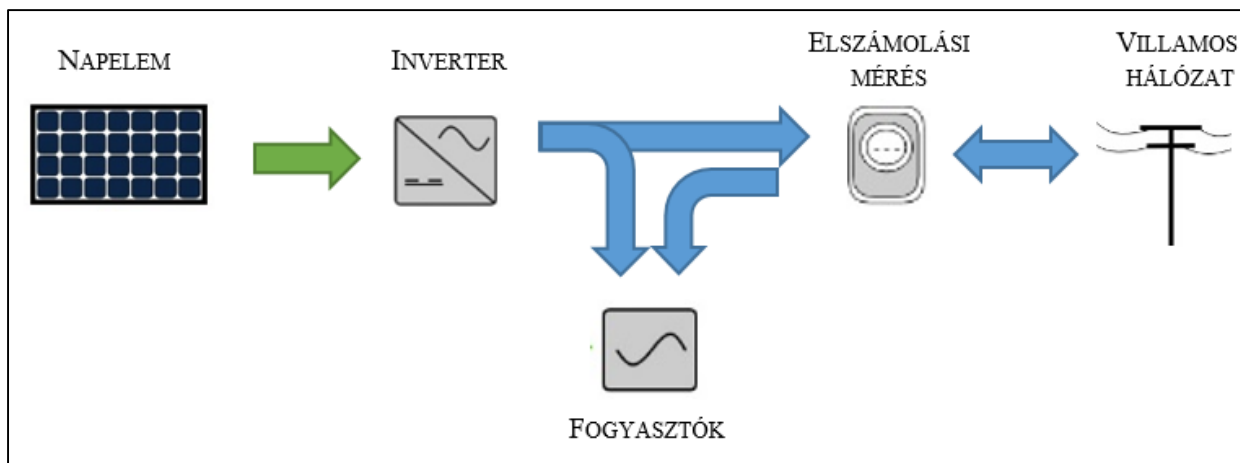


10. ábra Hálózat-interaktív szigetüzemű napelemes rendszer

2.3.2. Hálózatsatolt napelemes rendszerek akkumulátor telep nélkül

Az akkumulátor telep nélküli hálózatsatolt napelemes rendszerek közvetlenül össze vannak kapcsolva a villamos hálózattal (11. ábra), ahol kétirányú fogyasztásmérést alakítanak ki. Amennyiben 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]. A korábbi jogi szabályozásban az áramszolgáltatónak kötelessége volt átvenni a fel nem használt napenergiából megtermelt villamos energiát. Az éves szaldós elszámolással a nyáron fel nem használt és visszatáplált villamos energiát, elszámolási szempontból télen felhasználhatjuk. Ezzel felfogható a villamos közüzemi hálózat egy energiatároló eszközként is. Ez alapján nem szükséges lényegesen túlméretezni a paneleket, hogy a téli hónapokra is biztosított legyen az ellátás, mint a szigetüzemű rendszernél. Az éves szaldó rendszer megszüntetésével sokkal kedvezőtlenebb lett a hálózatsatolt rendszerek megtérülési ideje.



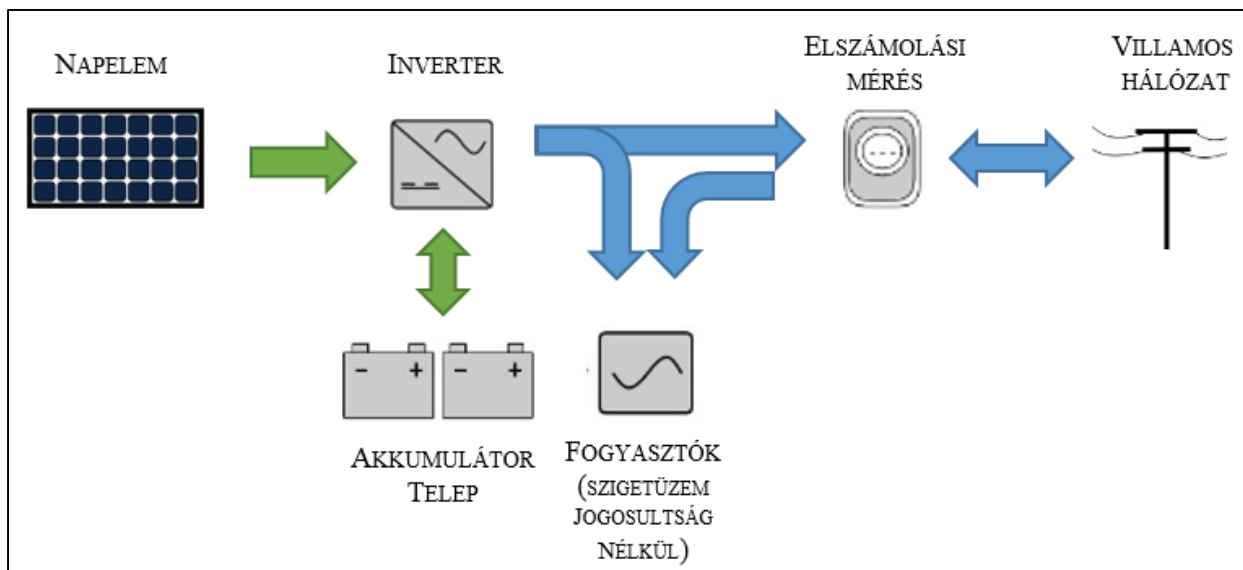
11. ábra Hálózatsatolt napelemes rendszer akkumulátor telep nélkül

2.3.3. Hálózatsatolt napelemes rendszerek akkumulátor teleppel (Hibrid rendszerek)

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 az 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].

2.3.3.1 Hibrid napelemes rendszer

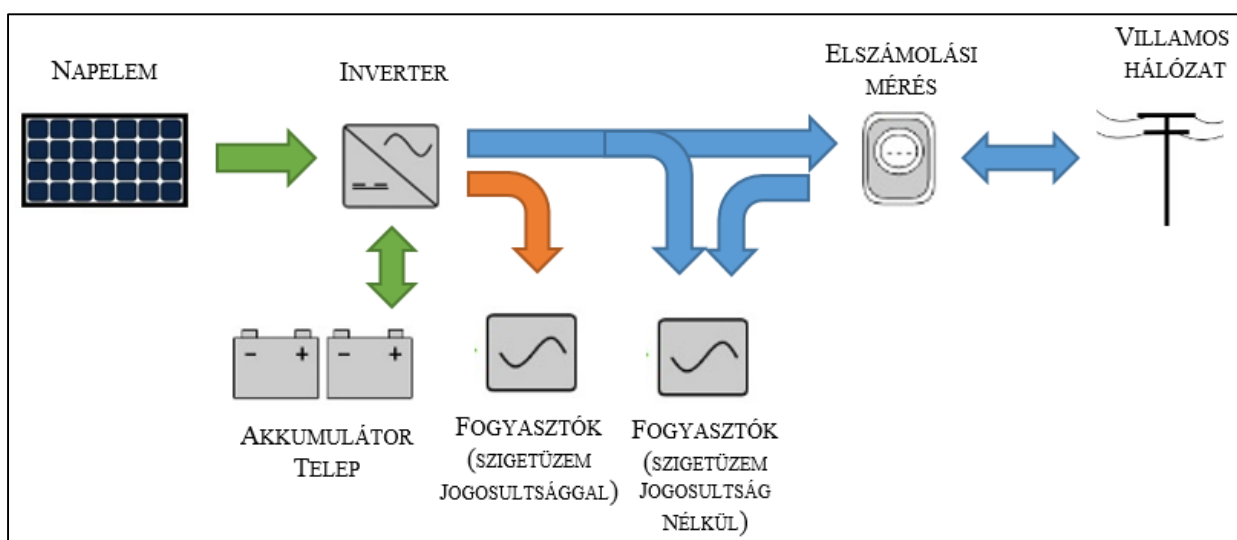
A hibrid rendszer esetén a hálózatsatolt rendszer ki van egészítve energiatárolóval. Tehát abban az esetben, ha nincs önfogyasztása az épületnek vagy ingatlannak, akkor lehetőség van az akkumulátor telep töltésére (12. ábra). Ezt az energiát pedig fel lehet használni, amikor nincs elérhető napenergiából 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 két eset lehetséges, 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].



12. ábra Hibrid napelemes rendszer

2.3.3.2 Szigetüzemre is alkalmas hibrid napelemes rendszerek

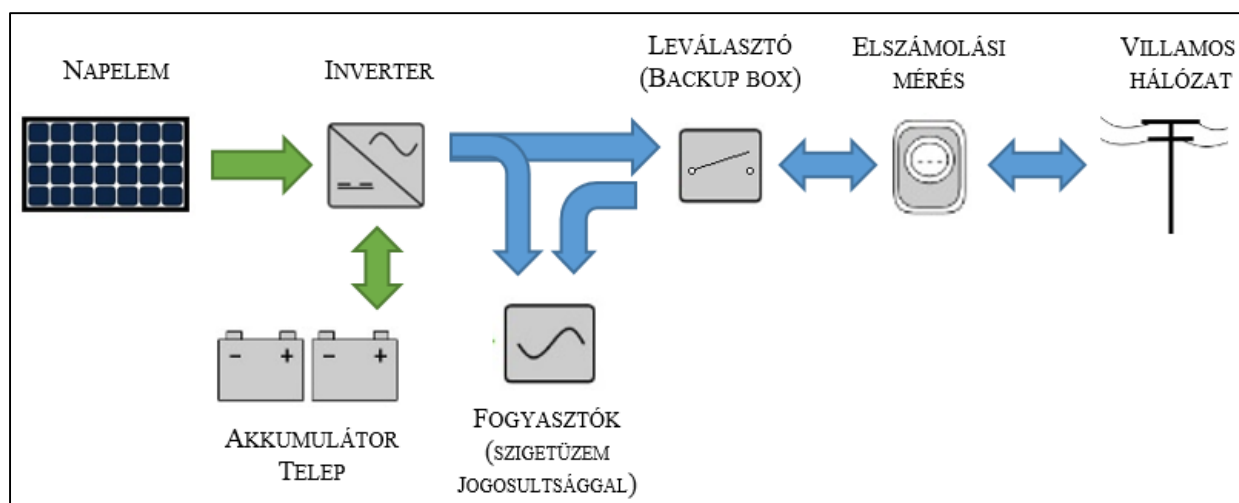
Ahhoz, hogy a létesítmény önellátó legyen és energiaellátás szempontjából autonóm, olyan rendszer kialakítása szükséges, amely részben vagy egészben tud szigetüzemként is működni, például hálózatkiesés esetén. Egyes invertergyártók termékei alkalmasak arra, hogy egy dedikált leágazást (13. ábra) biztosítsanak abban az esetben, ha a villamos hálózaton van egy esetleges áramkimaradás. Erről a leágazásról kiemelt fogyasztókat el tudnak látni villamos energiával (pl.: hűtőszekrény, szivattyú).



13. ábra Szigetüzemre is alkalmas hibrid napelemes rendszerek dedikált leágazással

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 (14. ábra). Így a

napelemes rendszer biztosítja az energiát, a napelemek pillanatnyi teljesítményének és az energiatárolók töltöttségi állapotának függvényében.



14. 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 engedélyeztetésére volt lehetőség.

3. DÖNTÉSTÁMOGATÓ ÉS DÖNTÉST HOZÓ MÓDSZEREK

A döntéshozatal folyamata kulcsfontosságú szerepet játszik a különböző területeken, legyen szó üzleti, politikai vagy társadalmi kontextusról. A döntéshozók gyakran bonyolult helyzetekkel találják magukat szemben, ahol számos alternatívát és egymással összefüggő tényezőt kell figyelembe venniük. Ezek a tényezők – például a gazdasági környezet, a rendelkezésre álló erőforrások, a technológiai fejlődés, valamint a piaci trendek – mind különböző aspektusokat érintenek, amelyeket alaposan mérlegelni kell a döntés meghozatala előtt.

A döntéshozó rendszerek célja, hogy támogassák a döntéshozókat a különböző lehetőségek kiértékelésében és a legmegfelelőbb alternatíva kiválasztásában. Ezek a rendszerek gyakran különféle módszereket és eszközöket alkalmaznak, amelyek strukturált megközelítést kínálnak a döntésekhez, lehetővé téve a bonyolult információk rendszerezését és alapos elemzését. A legfontosabb szempontok azonosítása és hierarchikus rendbe állítása segít abban, hogy a döntéshozók átfogóbb képet kapjanak a helyzetről.

A döntéshozatal támogató módszerek – mint például a többszemponatos elemzés, szimulációs modellek vagy kockázatelemzés – lehetőséget biztosítanak a szakemberek számára, hogy a legjobb döntéseket hozzák meg. Ezek a megközelítések elősegítik a döntési problémák mélyebb megértését, a potenciális kockázatok és előnyök feltérképezését, valamint a jövőbeli következmények előrejelzését, ezzel támogatva a megalapozott döntéshozatalt.

3.1. A döntéshozó módszerek szakirodalmi áttekintése

A modern döntéshozatal egyre komplexebb kihívásokat tartalmaz, így a megfelelő értékelési rendszerek alkalmazása elengedhetetlen a sikeres megoldások megtalálásához. A következő alfejezetben öt különböző döntéshozó és értékelési módszert mutatok be röviden, amelyek széleskörű támogatást nyújtanak a különböző területeken. Ezek a módszerek a komplex döntések megalapozását szolgálják, és lehetővé teszik az alternatívák alapos összehasonlítását.

Az Analitikus Hierarchia Módszer (AHP) kiemelkedő szerepet játszik a döntési folyamat strukturálásában. Ez a megközelítés három alapvető pillérre épül: a költségekre, a környezeti hatásokra és a lakossági elégedettségre. Az alternatívák megvalósítása során figyelembe vett költségek mellett fontos a projektek környezeti következményeinek vizsgálata, mint például a szén-dioxid-kibocsátás vagy a vízhasználat. A közösség reakciója és a projekt elfogadottsága szintén kulcsszerepet játszik az AHP során, amely páros összehasonlítással határozza meg a kritériumok súlyait egy 0-tól 4-ig terjedő skálán [105, 106].

A Többkritériumos Kimenetelemzés (MCA) szintén egy jelentős módszer, amely a döntési alternatívák átfogó értékelésére összpontosít. Az MCA három kulcseleme a költség, a fenntarthatóság és a társadalmi elfogadhatóság. A módszer során figyelembe kell venni az alternatívák megvalósításához szükséges pénzügyi forrásokat, valamint az adott energiaforrások hosszú távú környezeti hatásait. A társadalmi támogatottság pedig a közvélemény és az érintettek véleménye alapján értékelhető. Az MCA esetében a pontozás 1-től 10-ig terjed, ahol a 10 a legjobbat, az 1 pedig a legrosszabbat jelöli [105, 106].

A Delphi-módszer a szakértői vélemények konszenzusára épít, és különösen hasznos lehet olyan helyzetekben, amikor a döntéshozatal különböző szakterületek bevonását igényli. A módszer alapja a szakértők véleményeinek figyelembevétele és az iteratív visszajelzések révén történő konszenzus kialakítása. A Delphi-módszer nem alkalmaz hagyományos pontozási rendszert, hanem a szakértők véleményeit súlyozza, a többségi véleményt tekinti irányadónak [106].

A „Balanced Scorecard” egy átfogó keretrendszer, amely négy fő dimenzióra összpontosít: pénzügyi mutatók, vevői elégedettség, belső folyamatok és tanulás-fejlődés. Ez a megközelítés lehetővé teszi a vállalatok számára, hogy komplex módon értékeljék teljesítményüket, és figyelembe vegyék az innovációs képességet és a munkavállalói fejlődést. A pontozási rendszer minden dimenzióhoz súlyokat rendel, az értékelés 1-től 5-ig terjedő skálán történik, ahol az 5 a legjobb teljesítményt jelenti [107].

Végül, a SWOT-analízis egy másik jelentős módszer, amely a vállalat erősségeit, gyengeségeit, lehetőségeit és fenyegetéseit vizsgálja. Ez a megközelítés nem alkalmaz hagyományos pontozási rendszert, hanem a tényezők súlyozására és a prioritások meghatározására helyezi a hangsúlyt, lehetővé téve a döntéshozók számára, hogy figyelembe vegyék a legfontosabb szempontokat [107].

Ezek a módszerek különböző megközelítéseket kínálnak a komplex problémák átfogó és strukturált elemzésére. A választott módszerek figyelembevételével a döntéshozók jobban megérthetik az előttük álló lehetőségeket és kockázatokat, ami hozzájárul a megalapozottabb döntések meghozatalához.

A különböző döntéshozatali módszerek áttekintése után, fontos megemlíteni, hogy a napelemes rendszerek kiválasztásakor a döntéshozók általában gazdasági alapon döntenek. A beruházás megtérülése és a hosszú távú költségmegtakarítás kulcsszerepet játszik a választási folyamatban. A döntések nem csupán a kezdeti költségekre korlátozódnak, figyelembe kell venni a fenntarthatósági szempontokat is, amelyek befolyásolják a rendszerek hosszú távú teljesítményét. A következő fejezetben részletesebben bemutatom a háromszögmodellt, amely az energiaellátás biztonságát, a technológiai vizsgálatokat és a gazdasági elemzést integrálja. Ez a modell lehetőséget ad arra, hogy a döntéshozók átfogóbb képet kapjanak a napelemes rendszerek értékeléséről, figyelembe véve a költségek és előnyök alapos mérlegelését.

3.2. A háromszögmodell általános felépítése

A háromszögmodell három alappillére az energiaellátás biztonsága, a technológiai vizsgálatok és a gazdasági elemzés (15. ábra). Ezeknek a pilléreknek a mélyebb megértése érdekében három alpontot vezettem be, amelyek célja a rendszerek sajátos jellemzőinek alapos elemzése. Az értékelés egy ötfokozatú pontozási rendszeren alapul [16], amely lehetővé teszi, hogy minden rendszer az egyes alpontok szerint '0', '1', '2', '3' vagy '4' pontot kapjon. A 0-4 skála egyszerű és könnyen érthető, ami segíti a gyors és hatékony döntéshozatalt. A 0 a legrosszabb, míg a 4 a legjobb eredményt tükrözi, ezáltal objektív értékelést nyújt. A skála olyan értékelési rendszert biztosít, amely lehetővé teszi a különböző lehetőségek könnyű összehasonlítását. Ez különösen fontos, mert segít a következetesség fenntartásában az elemzések során, így az értékelés minden esetben azonos alapelvek szerint történik. A skála elegendő mozgásteret ad a finom különbségek észlelésére, ami segít a lényeges eltérések felismerésében anélkül, hogy a rendszer túlbonyolódna.

Az eddigi szakirodalomban nem találtam olyan döntéstámogató vagy döntéshozó módszert, amely egyszerre integrálja ezeket a pilléreket.



15. ábra Háromszög modell elvi felépítése

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 energiakiadás. 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 öregedéssel 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 az egyes napelemes rendszerekre nézve.

A háromszögmodell ezeket a területeket veszi figyelembe és ez alapján ad vissza egy mérőszámot a napelemes rendszer tulajdonságaiból, illetve egyéb felhasználói igényekből, amely segíti az egyes rendszerek összehasonlíthatóságát. A következő fejezetekben a részletes elemzés során minden alpontnál alapos magyarázatot adok az egyes pontszámok jelentését és az értékelés kritériumait illetően. A háromszögmodell célja, hogy lehetőséget adjon a napelemes rendszerek objektív összehasonlítására és rangsorolására, ahol a magasabb összpontszám egyértelműen kedvezőbb eredményt vagy a jobb rendszert jelenti.

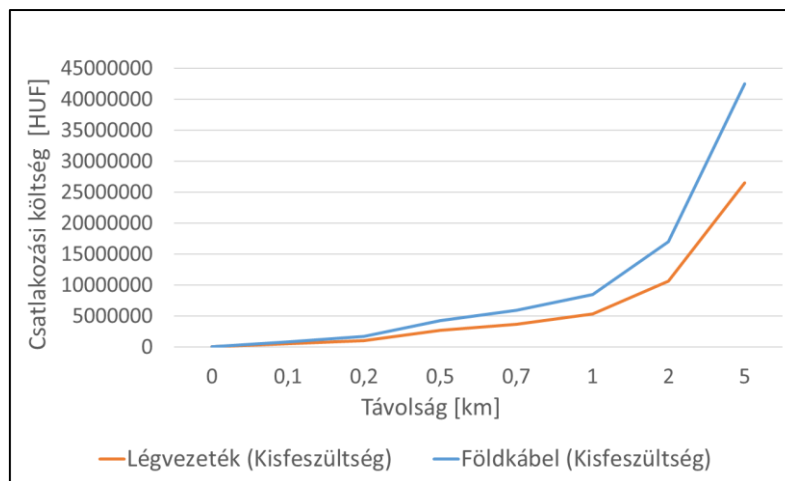
4. A NAPELEMES RENDSZER ENERGIAELLÁTÁS BIZTONSÁGRA GYAKOROLT HATÁSA

Az energia szükséges színt az élet minden szegmenséhez. Ezen belül a villamosenergia-ellátás 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 vizsgálom a napelemes rendszerek kapcsán. A villamos hálózat, a 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. A csatlakozás a távolság függvényében jelentős költség növekedést és számos kihívást jelenthet. 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 szükségessé válhat [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 [44]

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. Számos esetben csak régi rossz állapotú földelőszonda van jelen, viszont egy napelemes rendszer létesítésénél szükséges a biztonságos földelés kialakítása. Ezek a bővítések és korszerűsítések magukba 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 rendszer

A villamos hálózat állapotának és távolságának függvényében kidolgoztam egy pontozási rendszert. 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 (4 pont). Minden szükséges beavatkozás a mértékétől függően rontja a pontszám értékét. Az értékelési rendszerben meghatározott 100 m-es távolság beruházási költsége (légvezeték esetén 530 ezer Ft, földkábel esetén 850 ezer Ft) azonos nagyságrendbe esik a napelemes rendszer fajlagos költségével.

1. táblázat. Villamos hálózat pontozási rendszere

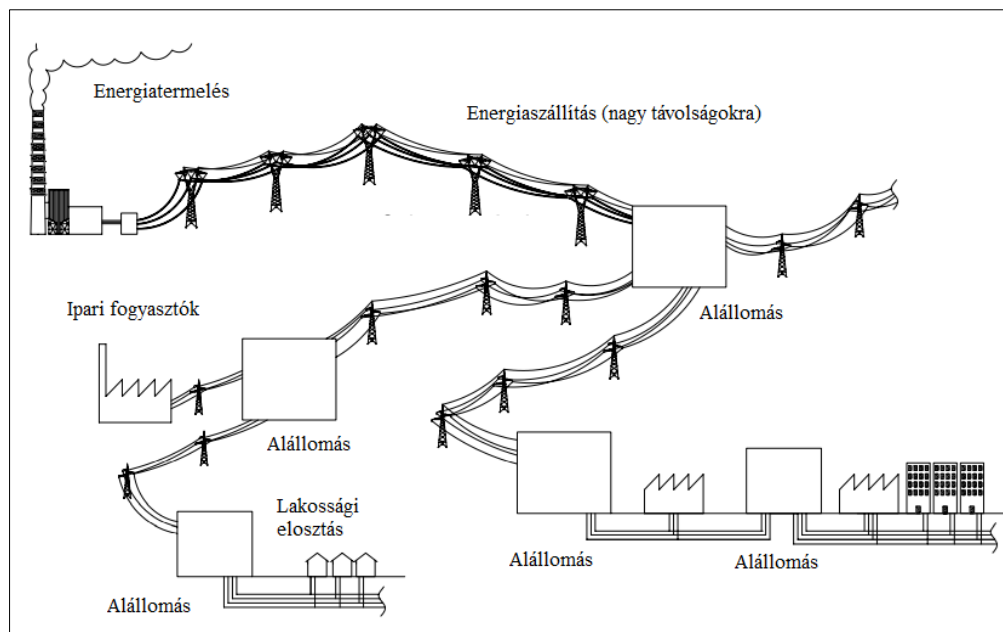
Nincs villamos hálózati csatlakozás, de nincs is rá szükség a létesítményben.	0
Nincs villamos hálózati csatlakozás, a lehetséges csatlakozás 100 m-től nagyobb távolságra van a létesítménytől.	1
Nincs villamos hálózati csatlakozás, a lehetséges csatlakozás 100 m-től kisebb távolságra van a létesítménytől.	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 villamosenergiaellátó 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 csúcsidőben [45, 46]. A villamos energia előállítása 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. Egy épületben vagy létesítményben minél több olyan eszközt használnak, amely villamos energiát igényel és azok kiesése súlyos károkat okozhat, mindenképpen gondoskodni kell valamilyen energiatárolásról, a zavartalan működés érdekében.



17. ábra Hagyományos villamosenergia ellátó rendszer felépítése [45]

A napelemes rendszerek akár szünetmentes energiaforrásként is működhetnek, amikor a hagyományos energiaellátás megszűnik vagy sérül és kiesik. Ez segíthet a kritikus szolgáltatások fenntartásában és a fontos technológiai műveletek folytatásában. A napelemes rendszerek lehetővé teszik a helyi energiatermelést ott, ahol a villamos hálózat nincs jelen vagy ahová csak nagy költségek árán lehetne eljuttatni. Azonban a villamosenergia-ellátás biztonsága nem növekszik nagy mértékben, amennyiben a napsugárzás nem elérhető pár napra az időjárás miatt és az akkumulátortelepek is lemerülnek. Ebben az esetben gyakorlatilag kiesik a teljes villamosenergia-ellátás. Bár az akkumulátor telepek kapacitásának növelésével növekszik a rendszer autonómiája, szükséges megjegyezni, hogy ezzel párhuzamosan a beruházási költségeket is nagyban növeli [42, 43, 44, 47].

4.2.2. A fogyasztók energiaellátásával kapcsolatos pontozási rendszer

Annak függvényében, hogy a fogyasztók igényelnek-e szünetmentes energiaellátást, különböző szempontok alapján dolgoztam ki egy pontozási rendszert. A napelemes rendszer jó alternatíva az energiaellátás biztonságának növelésére, mivel a napelemes rendszerek hozzájárulnak a villamosenergia-ellátás 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 villamosenergia-ellátás a létesítménynél.	0
Van energiatárolás, de nincs hálózat.	1
Van energiatárolás, van hálózati csatlakozás, de hálózatkiesés esetén a teljes rendszer lekapcsolásra kerül.	2
Van energiatárolás, van hálózati csatlakozás, de hálózatkiesés esetén dedikált fogyasztók tudnak működni.	3
Van energiatárolás, hálózatkiesés esetén a teljes rendszer tovább tud működni.	4

4.3. A rendszer energiatároló képessége

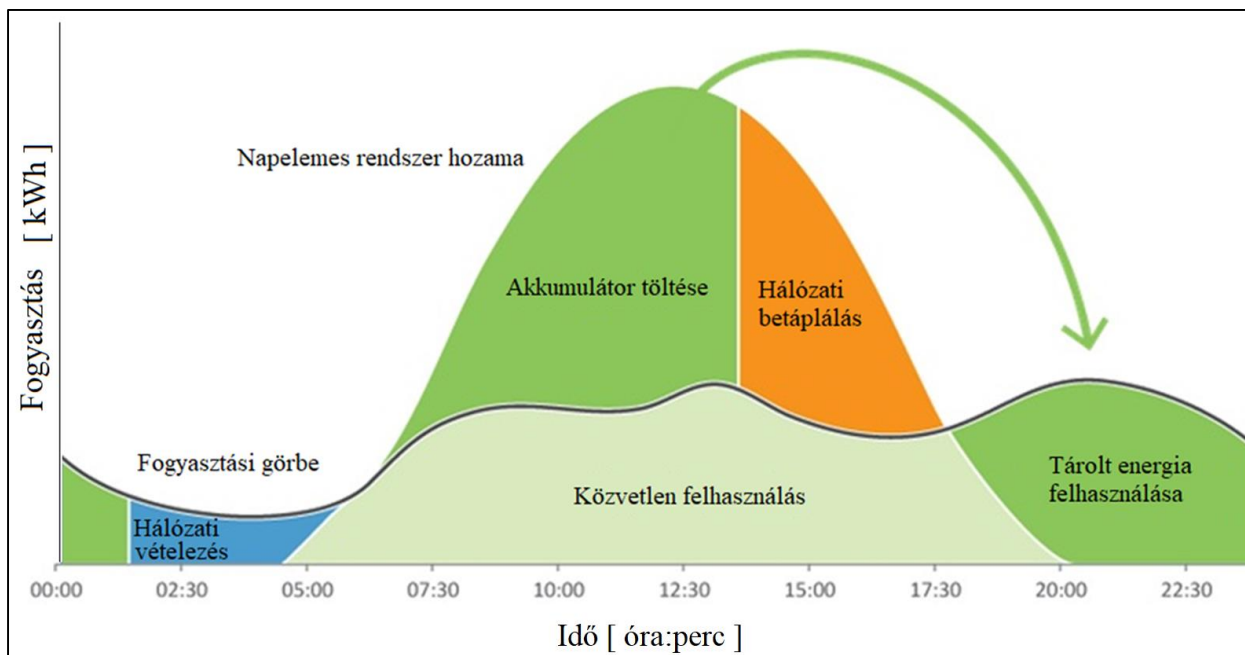
Az akkumulátorok töltöttségi szintjét százalékosan megadó mérőszám a SOC (State of Charge) a felhasználási módoktól függően változik. Az év bizonyos időszakában meredek csökkenést mutat, az időjárástól és az évszaktól függően.

A napelemes rendszerek energiatárolóival szemben támasztott legfontosabb általános követelmények a következők: alacsony költség, nagy energiahatékonyság és önkisülés, hosszú élettartam, alacsony karbantartási költség, egyszerű kezelés.

Továbbá az akkumulátorral szemben támasztott követelmények [48]:

- rendelkeznie kell saját akkumulátor-kezelő rendszerrel (BMS),
- minimum 10 év vagy 6000 töltési-kisütési ciklus élettartam,
- 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 felhasználásának hatékonysága javítható, amennyiben a hálózatszatolt rendszert akkumulátorral egészítjük ki. A 18. ábra akkumulátortelep használatát mutatja be a lakossági felhasználás esetén [49].

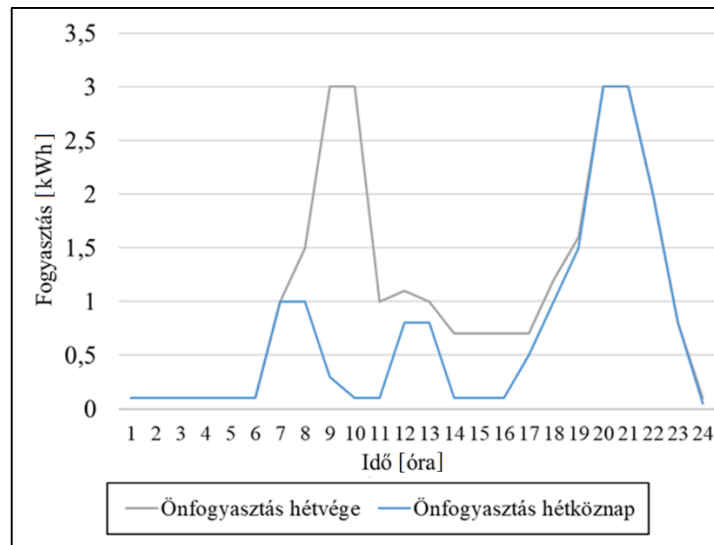


18. ábra Akkumulátor használata lakossági felhasználás esetén

Ha rendelkezésre áll napenergiából származó villamos energia és az épület vagy ingatlan önfogyasztása fölé emelkedik a megtermelt mennyiség, akkor a rendszer az akkumulátor töltésére fordítja azt, amennyiben nincs teljesen feltöltve. Amikor az akkumulátor teljesen fel van töltve a továbbra is elérhető napenergiából származó villamos energiát a hálózatra 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 és a várhatóan rövidebb élettartam lesz jellemző az energiatárolókra. Nagy akkumulátor kapacitás esetén pedig a beruházási költség és a megtérülési idő lesz jelentős.

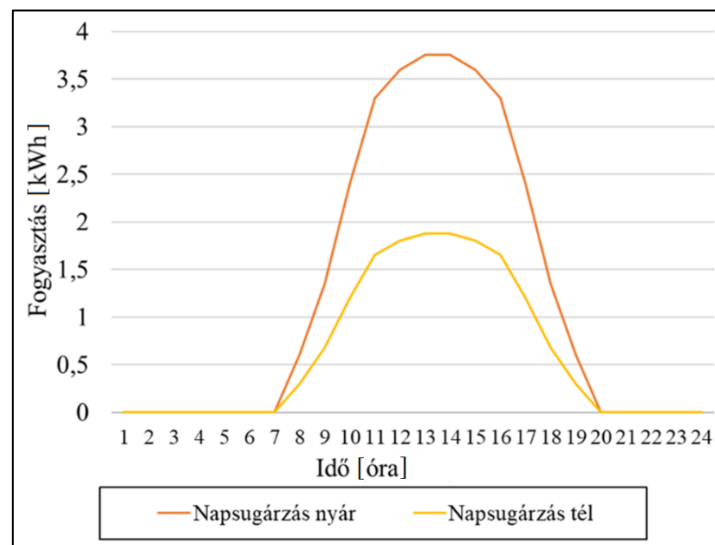
4.3.1. Hálózatsatolt napelemes rendszer akkumulátor kapacitásának vizsgálata

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 esetén 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. A fogyasztási és napsugárzási görbék előállításánál felhasznált adatok saját mérési eredmények átlagolása alapján végeztem el.



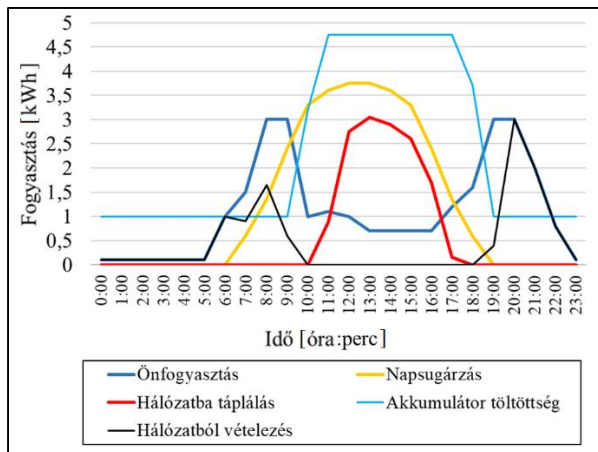
19. ábra Önfogyasztás görbék hétvégén és hétköznap

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.

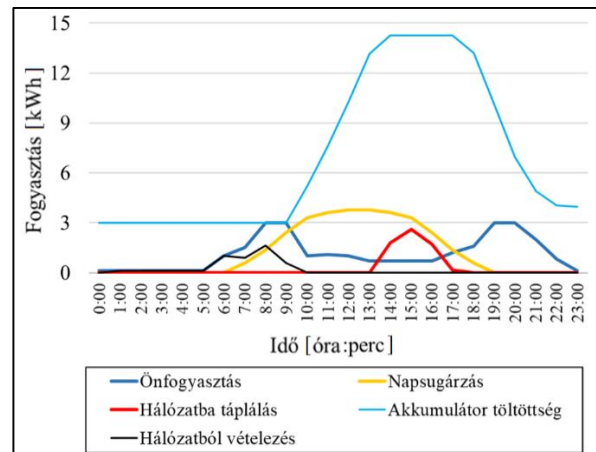


20. ábra Besugárzási görbék nyári és téli időszakban

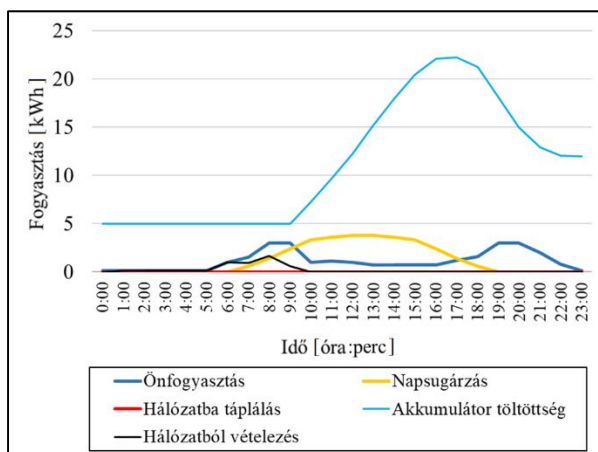
Megvizsgálva egy tipikus hétvégi fogyasztási görbét a nyári időszakban (21. ábra) az látható, hogy az 5 kWh kapacitású akkumulátortelep teljes mértékben ki van használva. A teljes töltés-kisütési ciklus megfigyelhető.



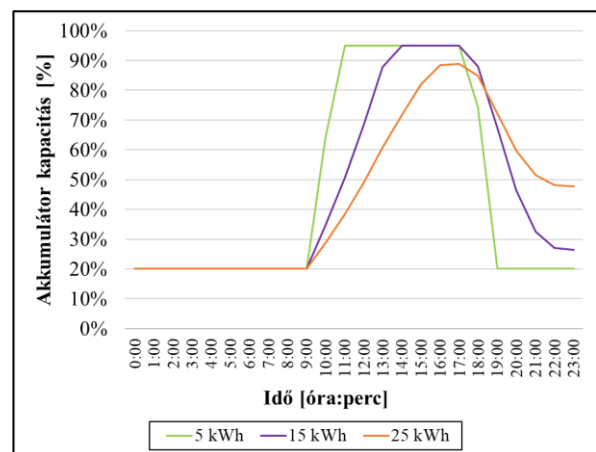
(a)



(b)



(c)

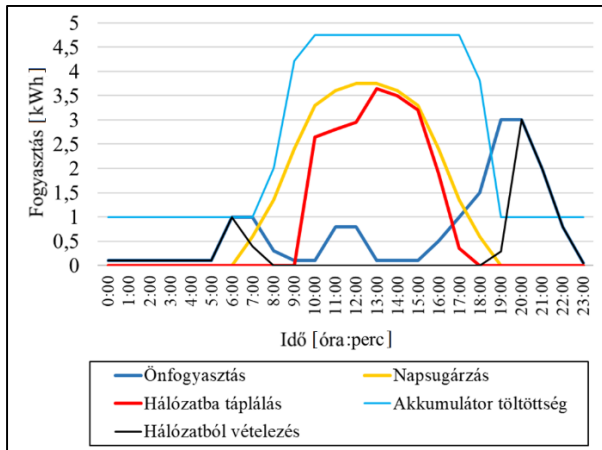


(d)

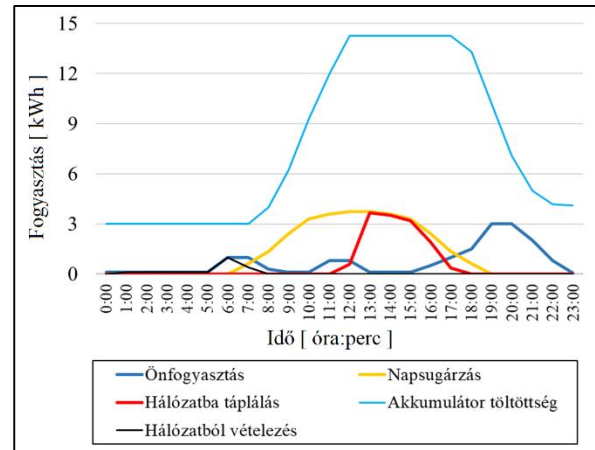
21. ábra Nyári időszak hétvége fogyasztási görbe (a) 5 kWh, (b) 15 kWh, (c) 25 kWh akkumulátor kapacitás, (d) akkumulátor kapacitások értéke

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.

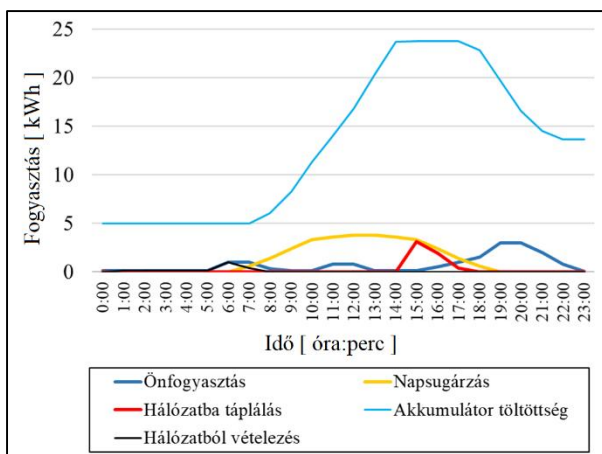
A következőkben a nyári időszakon belül egy tipikus hétköznapi fogyasztási görbét vizsgáltam (22. ábra). Ha nagyobb kapacitású akkumulátor van csatlakoztatva a napelemes rendszerhez, akkor megfigyelhető, hogy kevesebb töltést veszít a nap végére. Ezzel párhuzamosan az is megfigyelhető, hogy nagyobb akkumulátor kapacitásnál 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 hálózatra való visszatáplálás is több lesz.



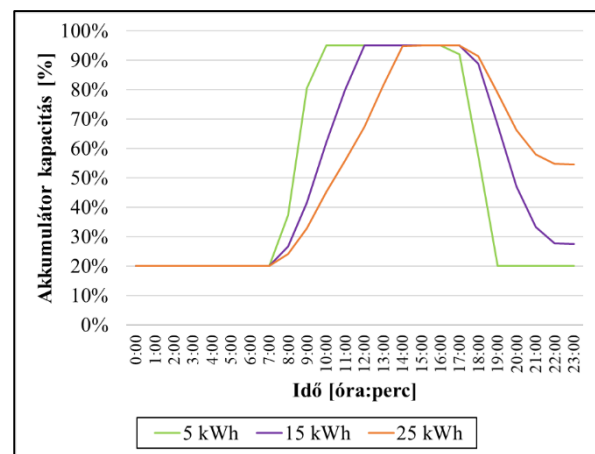
(a)



(b)



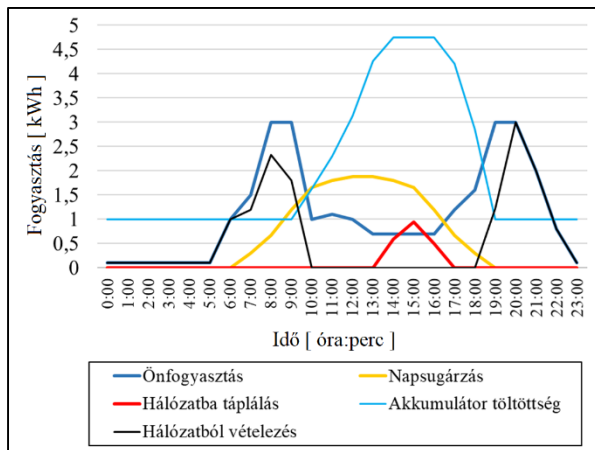
(c)



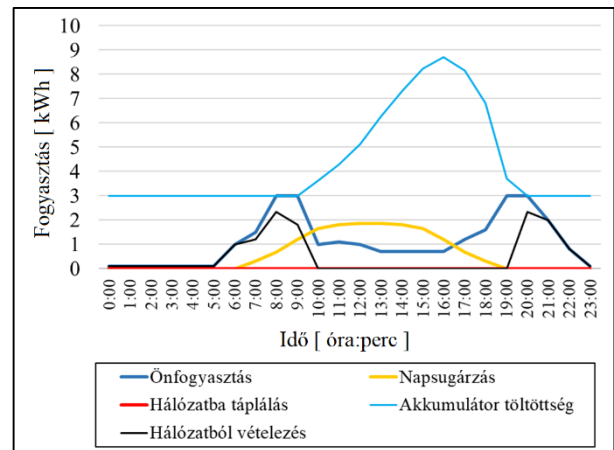
(d)

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

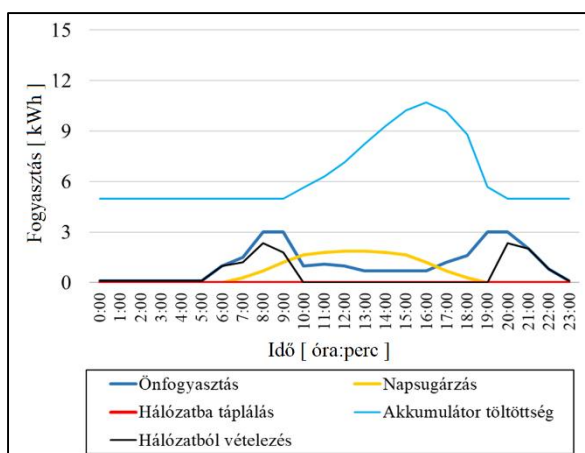
A napelemes rendszer által termelt villamos energia a téli időszakban a besugárzási szög és a napsütéses órák száma miatt jóval kevesebb. A téli időszak hétköznapi fogyasztási görbével (23. ábra) megállapítható, hogy a három rendszert összevetve az 5 kWh akkumulátor kapacitás esetén a korábbi esetekhez hasonlóan jóval teljesebb kihasználtságú, mint a nagyobb kapacitású energiatárolók. Amikor az akkumulátor teljesen feltöltődött, visszatáplál a hálózatra, de mivel télen sokkal kevesebb energiát termelnek a napelemek, 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.



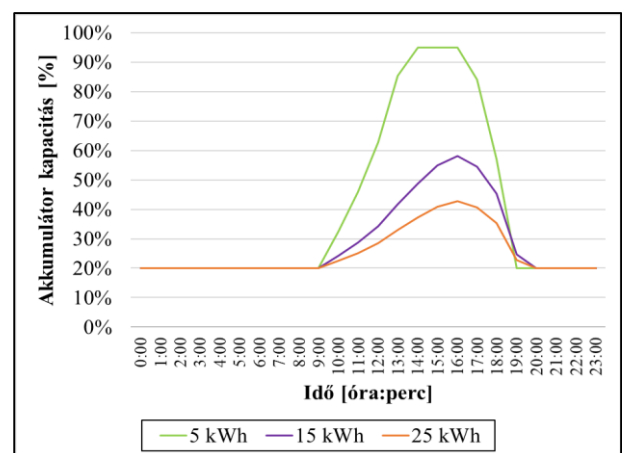
(a)



(b)



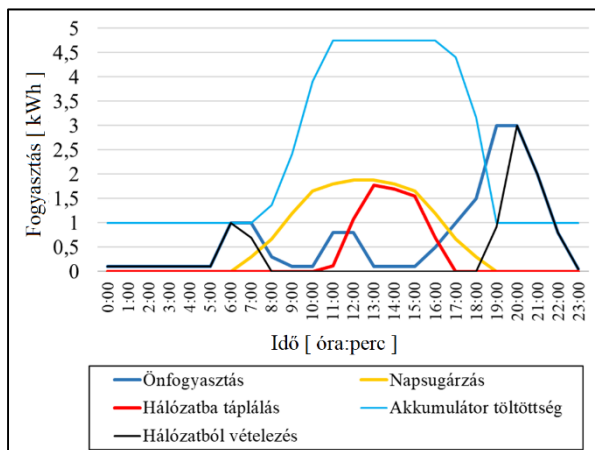
(c)



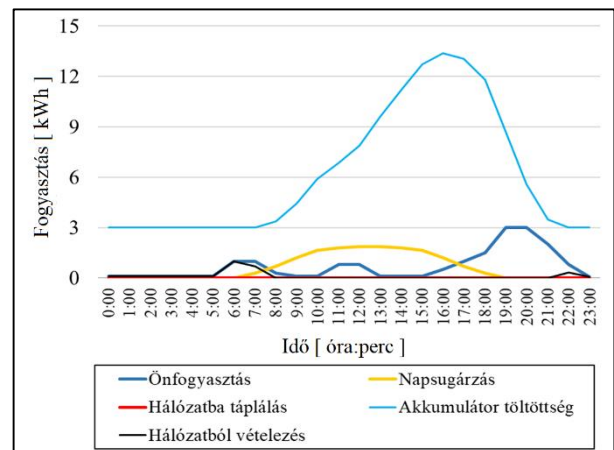
(d)

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

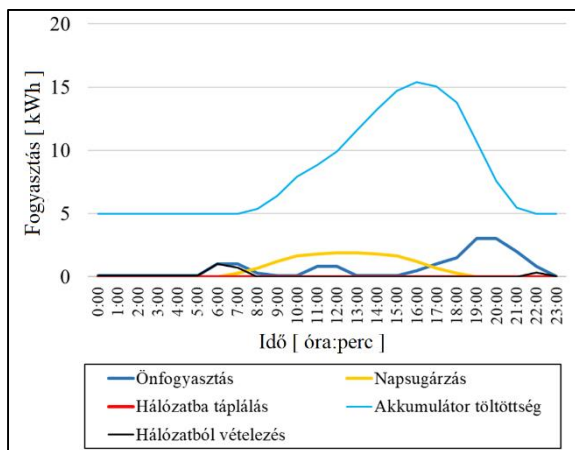
A hétköznapokból (24. ábra) adódó alacsonyabb önfogyasztás miatt kisebb akkumulátorkapacitások esetén valószínűbb a teljes feltöltési állapota az akkumulátor telepnek. Viszont a nagyobb kapacitás esetén ugyanúgy nem elegendő az akkumulátor teljes feltöltéséhez.



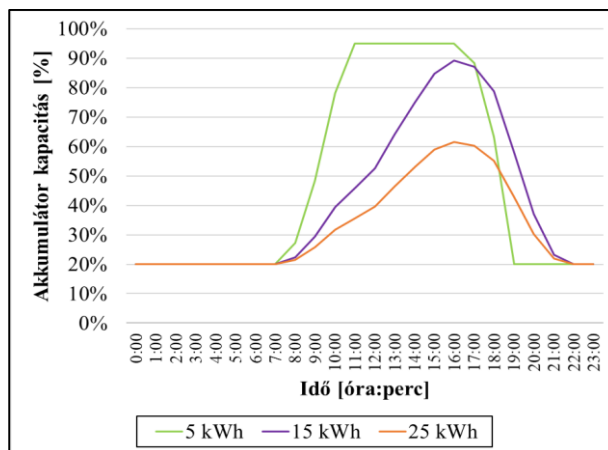
(a)



(b)



(c)



(d)

24. ábra Téli időszak hétköznapi 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 vizsgálom, hanem a mértékét. Fontos különbség van az alábbi esetek között. Az egyik eset amikor egy létesítmény villamos fogyasztói, egy esetleges villamosenergia-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 10-24 óráig 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 10-24 óráig 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 üzemeltetése számos villamos hálózati kihívást okozhat, amelyek közül kiemelkedők az alábbiak:

- feszültség érték változása,
- kimeneti teljesítmény ingadozás,
- harmonikus torzítás.

Egyéb potenciális hálózati zavarok közé tartozik a frekvencia ingadozás és a fordított teljesítmény áramlás is, bár ezek az előzőekhez képest kevésbé mértékadóak.

A háromszögmodell technológiai vizsgálatára vonatkozó pillér három alpontja 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 hatást gyakorol. 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.

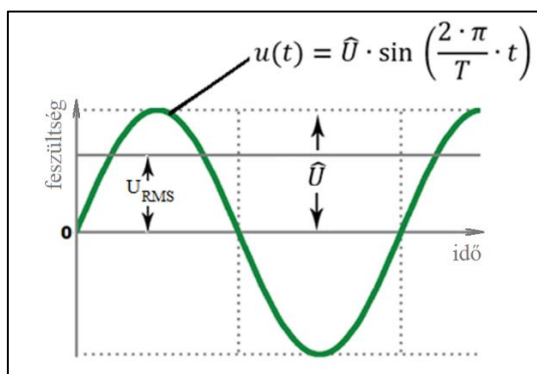
A második alpont a harmonikus torzítás, amely fontos villamos-energiaminőségi probléma. Ezt a hatást sok esetben a fotovoltaikus rendszerekben használt inverterek is okozzák. Az így létrejövő harmonikusok párhuzamos és soros rezonanciákat, transzformátor túlmelegedést, védőberendezések meghibásodását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

A harmadik vizsgálati pont az alkatrészek öregedése és élettartama, mivel ezek meghatározóak a napelemes rendszerek hosszú távú működőképessége szempontjából. Ezért a technológiai vizsgálatoknál az élettartam kérdéskörének kiemelt szerepe van.

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. A feszültségjel ideálisnak tekinthető, tisztán szinuszos hullám a hálózatra jellemző feszültség- és frekvenciaértékekkel, amely 25. ábrán látható.



25. ábra Váltakozó feszültség jelalakja

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

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

A gyakorlatban az RMS értéket nem a csúcserőértékből 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:

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

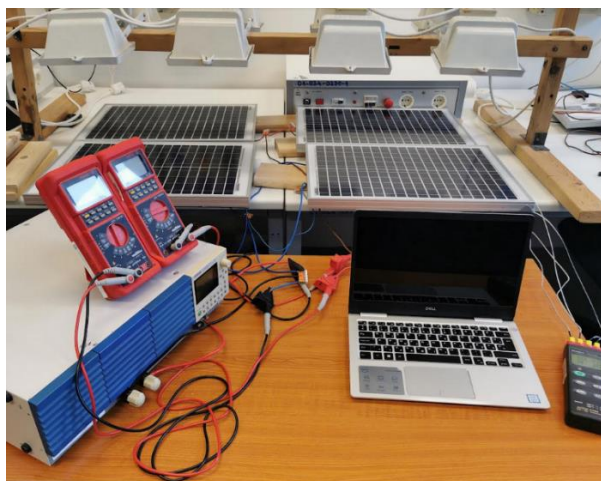
ahol: M a minták száma ciklusonként ($M = 256$), U_s az s -edik mintavételi pont feszültségének pillanatnyi értéke. Az érték 10 ciklusból kerül kiszámításra. A gyakorlatban a lassú változások kiértékeléséhez 50 Hz-en a mért értékekből 10 perióduson 10 percenként valós idejű átlagot kell generálni, és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

5.1.2. Napelemes rendszerek egyenáramú oldalán fellépő hibák vizsgálata

A napelemes rendszereknél az egyenáramú oldalon többféle hiba jelentkezhethet. Három csoportot különböztetünk meg [53, 54, 55]:

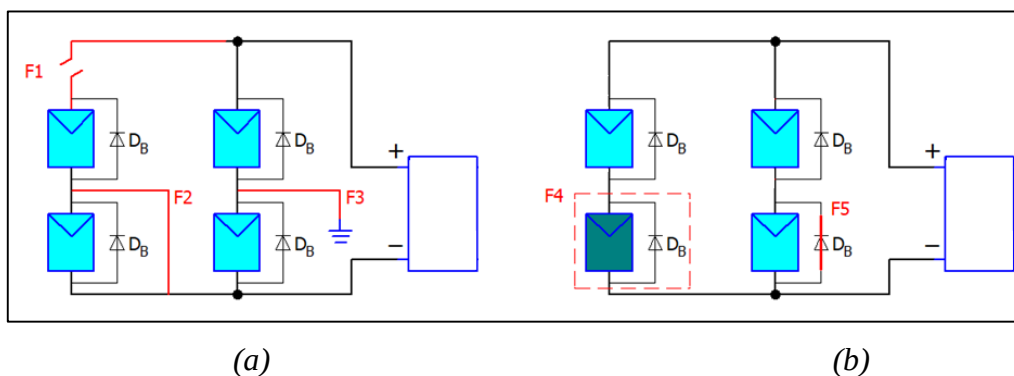
- elektromos hibák (szakadási hiba, rövidzárási hiba, földzárlati hiba, bypass dióda hiba, inverter hiba, MPPT hiba, ívhibák, stb.) [54, 56, 59, 60],
- környezeti hatások (szennyeződések, egyenetlen besugárzás, árnyékolás, stb.) [53, 57, 58],
- panel hibák, degradáció (elszíneződés, rétegleválás, belső 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 laboratóriumban összeállított rendszer, amelyet később szimulációs környezetben is összeállítottam.



26. ábra Az összeállított mérés validáláshoz

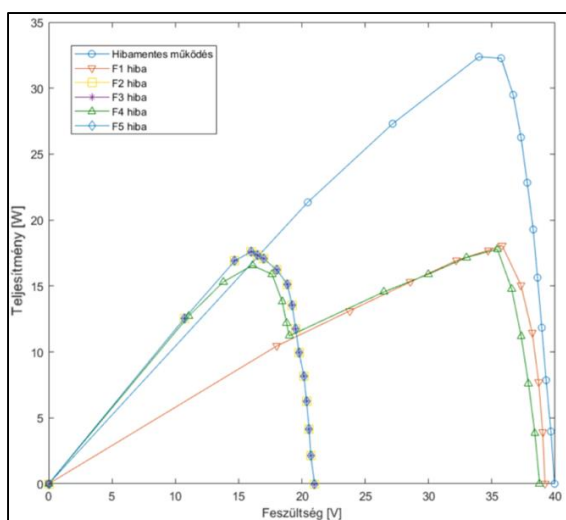
A 27. ábrán bemutatom az általam vizsgált egyenáramú oldali hibák fajtáit, amelyek jelölése: F1 a szakadási hiba, F2 rövidzárási hiba, F3 földzárlati hiba, F4 árnyékolási hiba és F5 bypass dióda hiba.



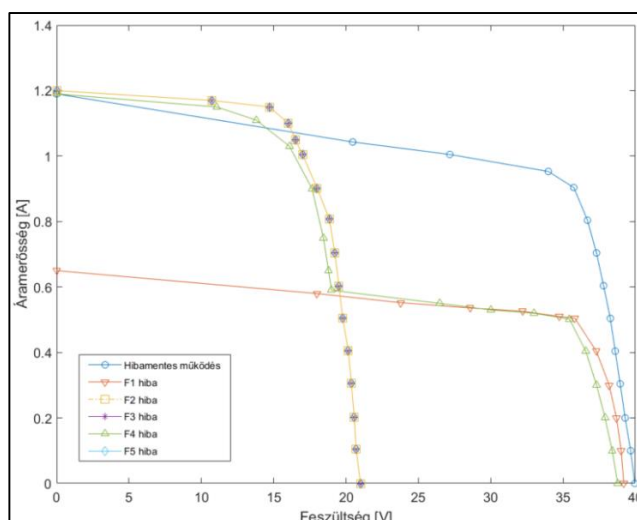
27. ábra Validált napelemes rendszer kapcsolási rajza (a) F1 szakadás, F2 rövidzár, F3 földelési hibák; (b) F4 árnyékolási hiba, F5 bypass dióda hiba

A vizsgált konfigurációban kettő-kettő polikristályos napelem panelt sorba kapcsoltam egy-egy sztringbe és a két sztringet pedig párhuzamosan egymással. 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 mértem a feszültség és az áramerősség értékeit. Nyolc 500 W-os R-500WFEH halogén Floodlight lámpát használtam a napsugárzás szimulálására, a sugárzást PCE-SPM 1 napenergia-mérővel mértem, amely megvilágítási intenzitás átlagosan 600 W/m^2 volt. Az egyes napelem panelek kapcsolódó paraméterei STC alatt ($G = 1000 \text{ W/m}^2$ és $T = 25^\circ\text{C}$) a következők: $P_{mp} = 20 \text{ W}$, $U_{mp} = 17,49 \text{ V}$, $I_{mp} = 1,14 \text{ A}$, $I_{RZ} = 1,22 \text{ A}$.

Matlab Simulink segítségével validáltam a méréseket, összehasonlítva a kísérleti úton kapott U-I görbét a szimuláció által generált kimeneti jelleggörbével. A rendszer kimeneti jelleggörbéi a hibatípusok beállítását követően az 28. ábrán, a szimulált jelleggörbék a 29. ábrán láthatók.

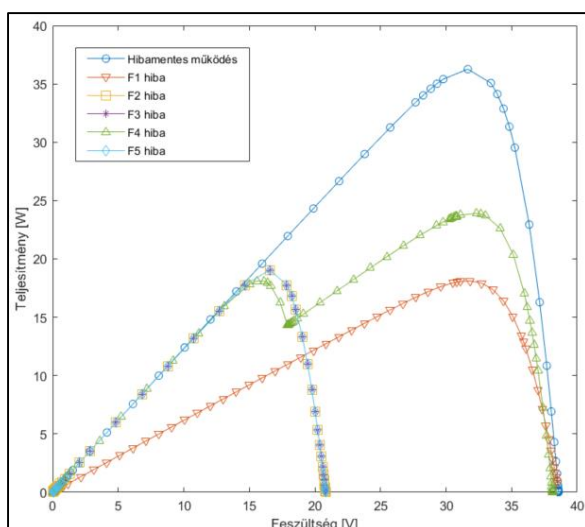


(a)

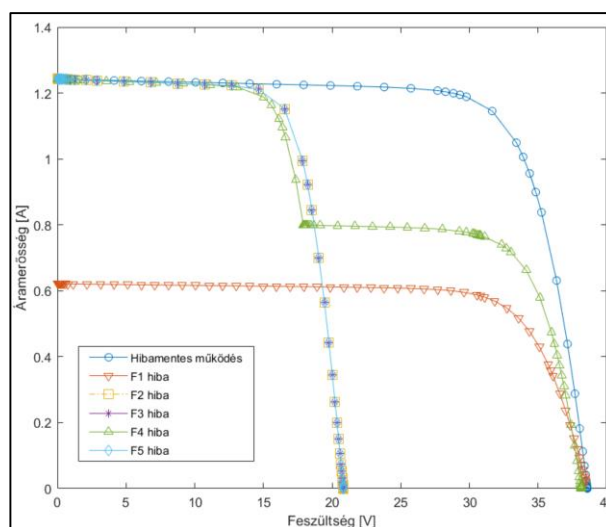


(b)

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



(a)



(b)

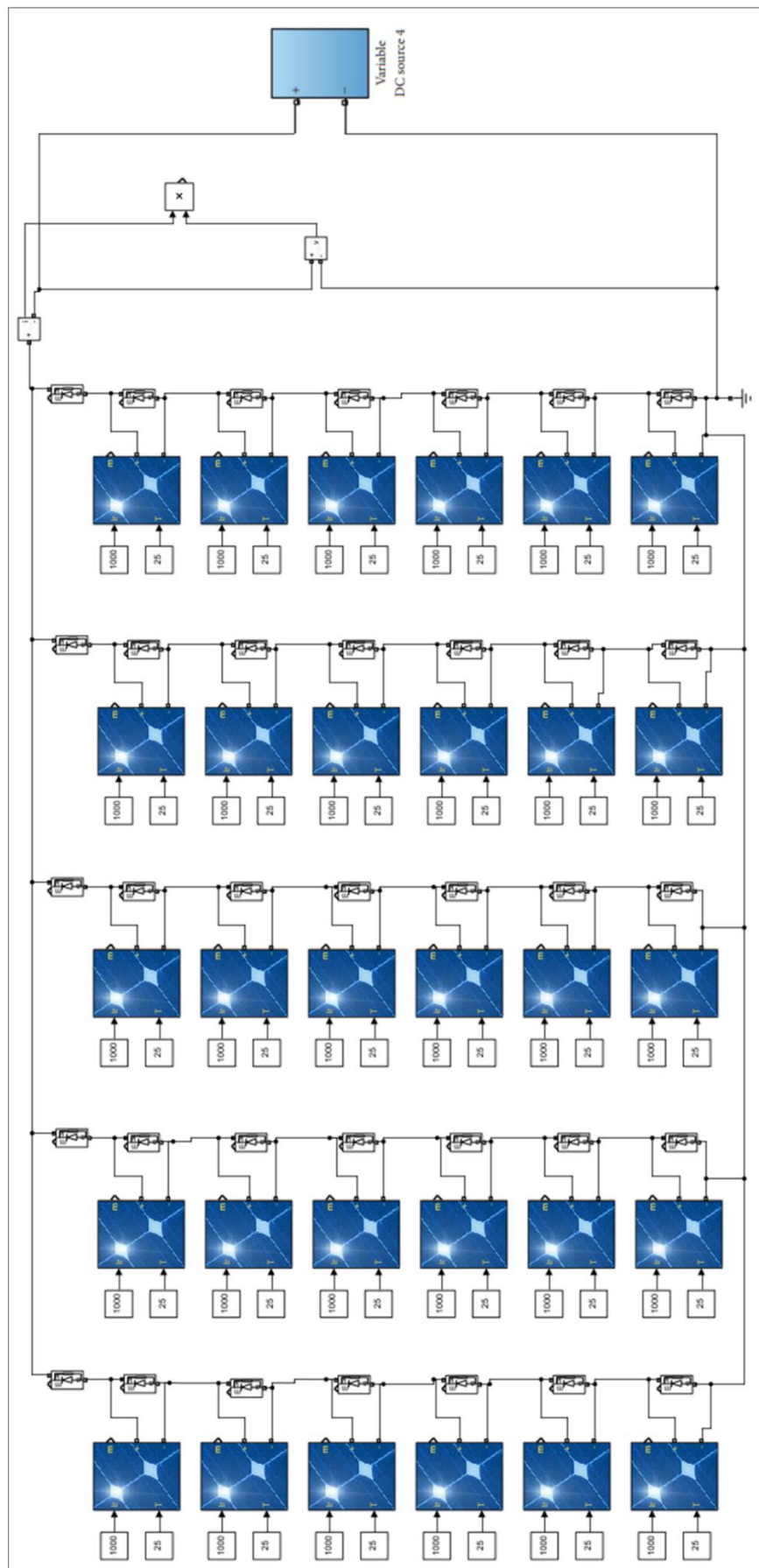
29. ábra A szimuláció (a) feszültség-áramerősség, (b) feszültség-teljesítmény jelleggörbe

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 6×5 modulból áll, amely a 30. ábrán látható. Egy sztring 6 panelből állt és az 5 sztringet párhuzamosan kapcsoltam. Az egyes panelek kapcsolódó paramétereit a 4. táblázat foglalja össze.

4. táblázat. A szimuláció során használt napelem adattábla adatai

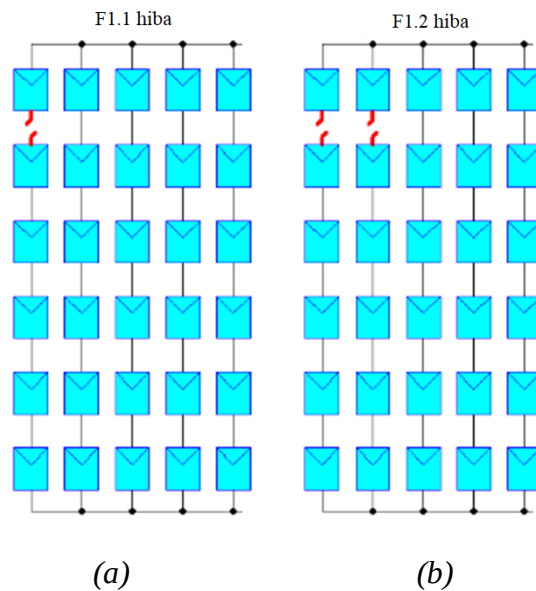
Maximális munkaponti teljesítmény (P_{MAX})	80 W
Üresjárási feszültség ($U_{ü}$)	21,9 V
Rövidzárási áramerősség (I_{RZ})	5 A
Maximális MPP feszültség (U_{MP})	17,7 V
Maximális MPP áramerősség (I_{MP})	4,52 A
Cellák darabszáma (N_S)	36 pcs
Üresjárási feszültség hőmérsékleti együttható ($\mu_{U_{ü}}$)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

Ebben a szimulációban 5 gyakori hibatípust vizsgáltam, típusonként pedig két esetet. Ezt a 10 eredményt hasonlítottam össze a hibamentes állapottal.

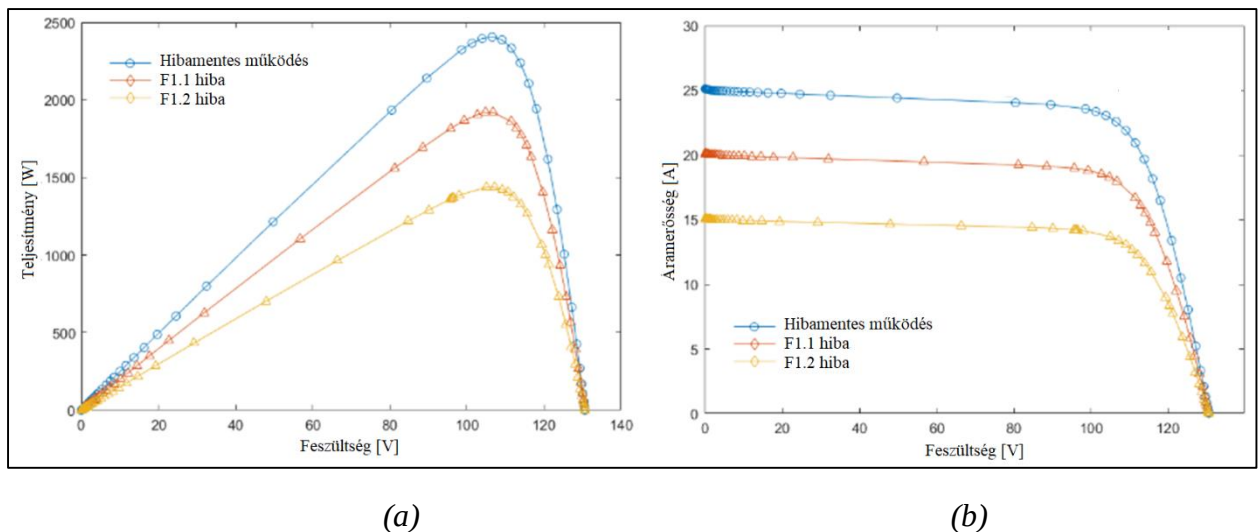


30. ábra Vizsgált napelemes rendszer kapcsolási rajza

Az első két hibaállapot F1.1 és F1.2 jelzéssel a 31. ábrán látható. Mindkét esetben szakadás lép fel a sztringek között. 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].

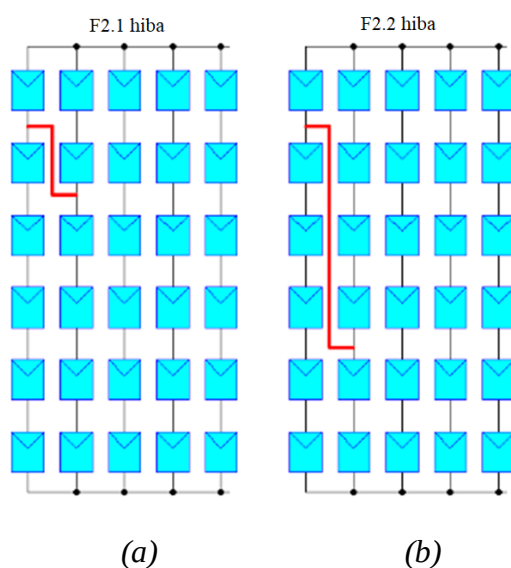


31. ábra F1 Szakadási hiba (a) első eset, (b) második eset

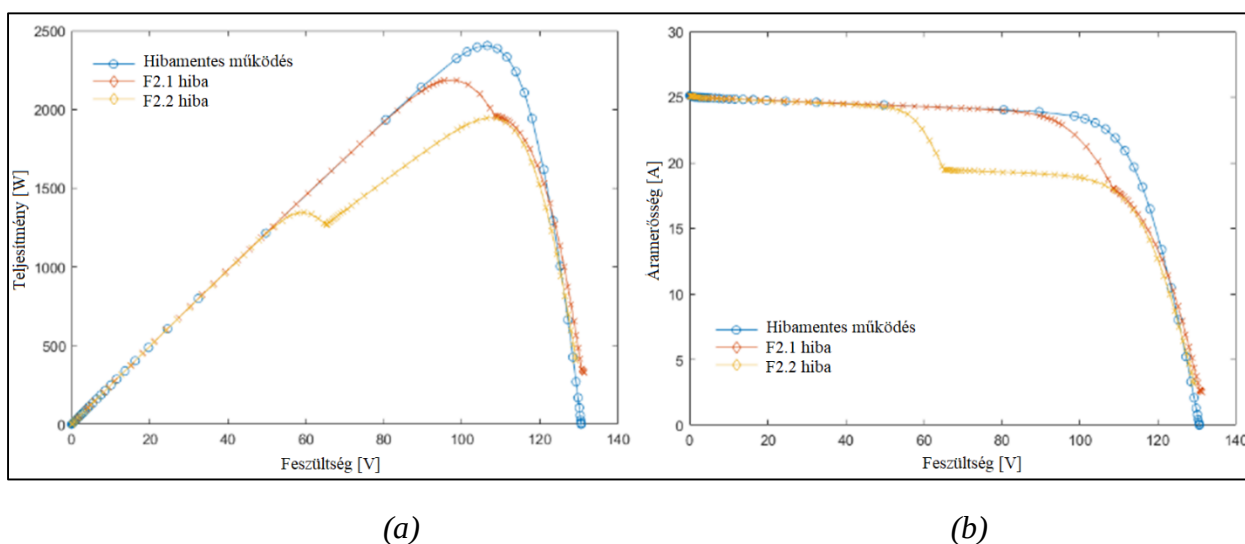


32. ábra F1 Szakadási hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe

A második két hibaállapot ezúttal zárlatos esetet 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, ha a helytelen telepítésből adódóan a szolárkábel sérülés következtében a tartószerkezettel zárlat alakul ki. Az áram-feszültség és teljesítmény-feszültség görbéket a 34. ábra mutatja. A hibaáram amplitúdója a hibát okozó sztringek pontjai közötti potenciál különbségtől 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. hajnali vagy esti órákban), az érintett sztringeken átfolyó áram nem elég nagy ahhoz, hogy kioldja a túláramvédelmi eszközt.



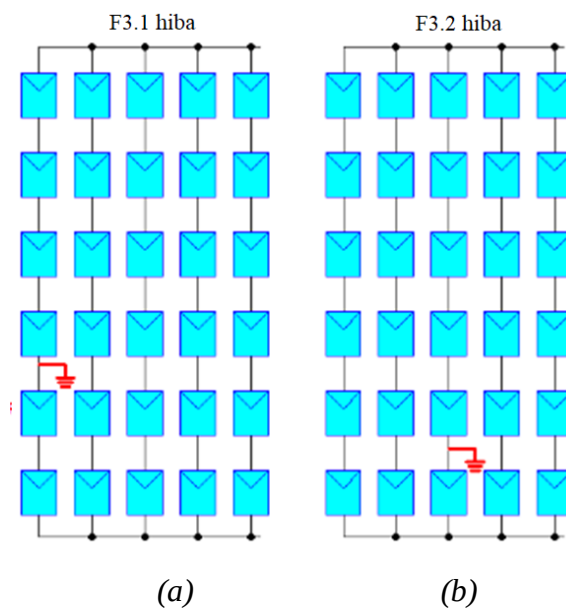
33. ábra F2 zárlat hiba (a) első eset, (b) második eset



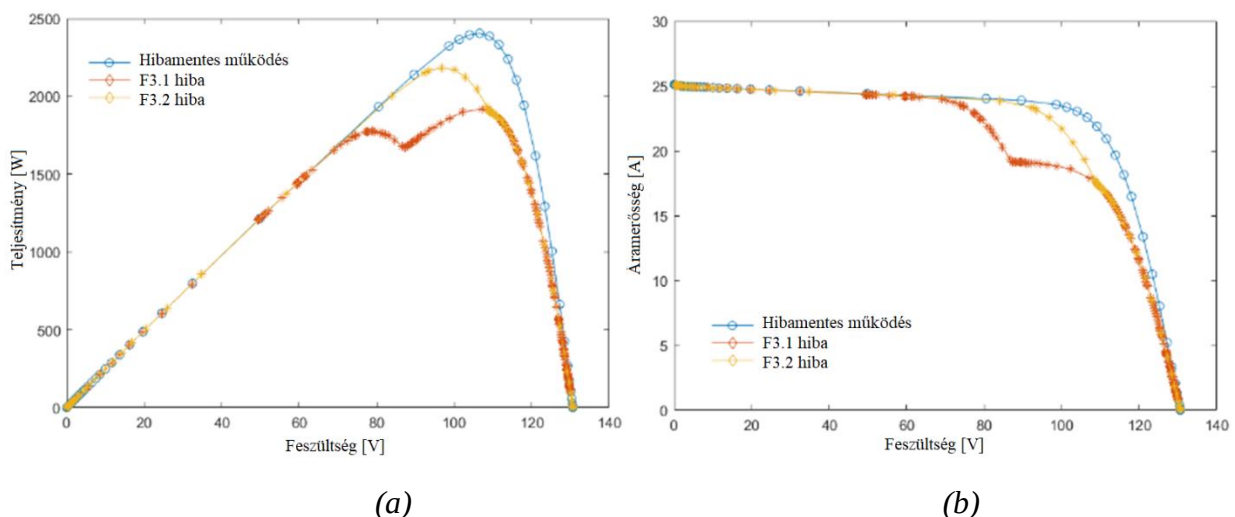
34. ábra F2 Szakadási hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe

A harmadik hibaállapot 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. Ennek elkerülése érdekében egyre több invertert látnak el ívvédelemmel.



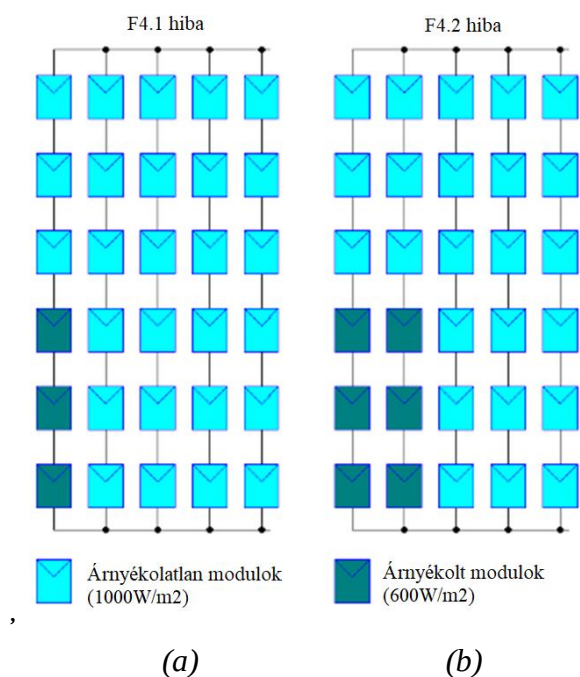
35. ábra F3 földelési hiba (a) első eset, (b) második eset



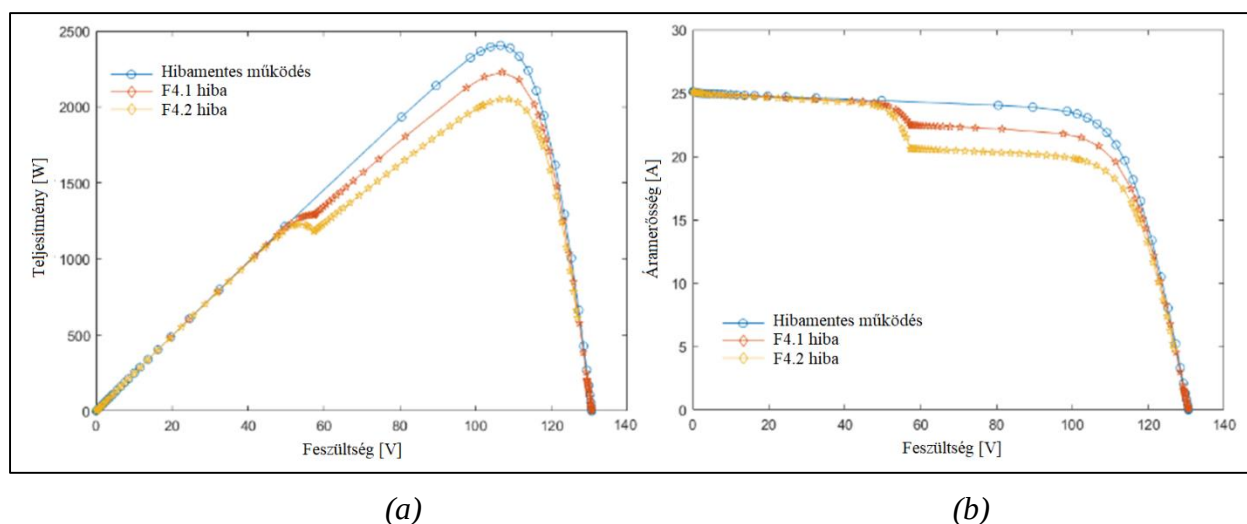
36. ábra F3 földelési hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe

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 leárnyékolott panelek darabszámában. Az áram-

feszültség és teljesítmény-feszültség görbéket a 38. ábra mutatja. A részleges árnyékolás az a jelenség, amikor egy napelemes 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 üresjárási feszültsége alapvetően invariáns.



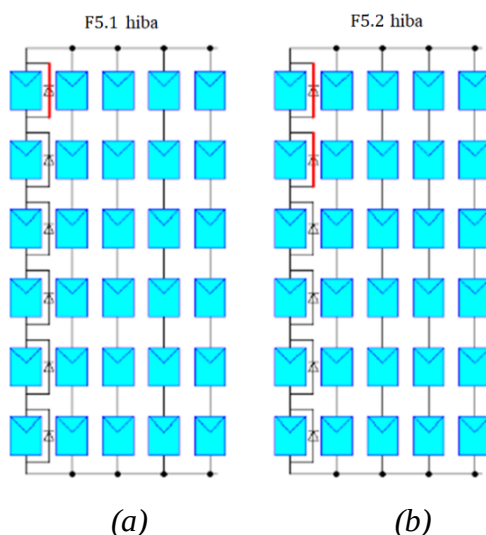
37. ábra F4 árnyékolási hiba (a) első eset, (b) második eset



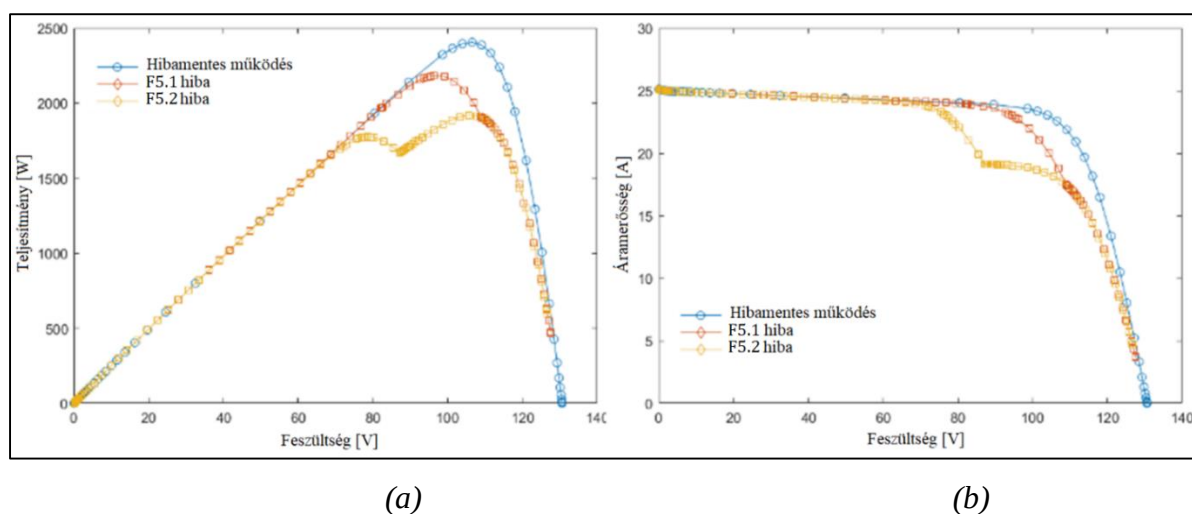
38. ábra F4 árnyékolási hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe

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 besugárzási körülmény között. A bypass dióda meghibásodhat villámcsapás vagy normál működés közben extrém magas hőmérséklet következtében [61, 62, 63, 64, 65]. Az utóbbi abban az esetben fordulhat elő, ha például a tetőhöz olyan közel van telepítve a panel, hogy annak nincs lehetősége a természetes szellőzésre. 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 az F2, F3, F4 és F5 esetben. A mértéke pedig attól függően változik, hogy a sztringen belül hol található a hiba forrása. Minden esetben szabályoznia kell az inverternek a kimeneti értéket, amely felharmonikus keletkezéséhez vezet, továbbá 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 foglalom 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 maximálisan 37,8 kWp névleges teljesítményű napelem tömb csatlakoztatható. A kiválasztott napelem modulok teljesítménye 280 W. A 6. táblázat a kiválasztott napelem 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 (ΔU)	+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 _p
DC oldali sztringek száma	6 pcs
Hatásfok (EU) (η_{EU})	98%

6. táblázat. A napelemek adatábláját

Maximális munkaponti teljesítmény (P_{MAX})	280 W
Üresjárási feszültség ($U_{ü}$)	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 (η)	15,4%
Sorba kapcsolt cellák száma (N_s)	60 pcs
Hőmérsékleti együttható ($U_{ü}$) ($\mu_{U_{ü}}$)	-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 napelem modulok maximális számát. Egy sztring sorba kapcsolt napelem modulokból áll. Ahhoz, hogy meghatározzuk a napelem modulok maximális számát egy sztringen belül, abból kell kiindulni, hogy a napelem modulok hőmérséklete -10 °C. Ez téli 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 napelem modulok maximális száma:

$$n_{S, MAX} = \frac{U_{DC, MAX}}{U_{ü(-10^{\circ}C)}} = \frac{U_{DC, MAX}}{U_{ü} \cdot \left[1 + \frac{\mu_{U_{ü}} (T_{PANEL} - T_{STC})}{100} \right]} = \frac{1000}{38.5 \cdot \left[1 + \frac{(-0.34) \cdot (-35)}{100} \right]} = 23,21 \quad (13)$$

ahol: T_{PANEL} – napelem modul hőmérséklete (°C), T_{STC} – a napelem modul hőmérséklete STC-n (25 °C).

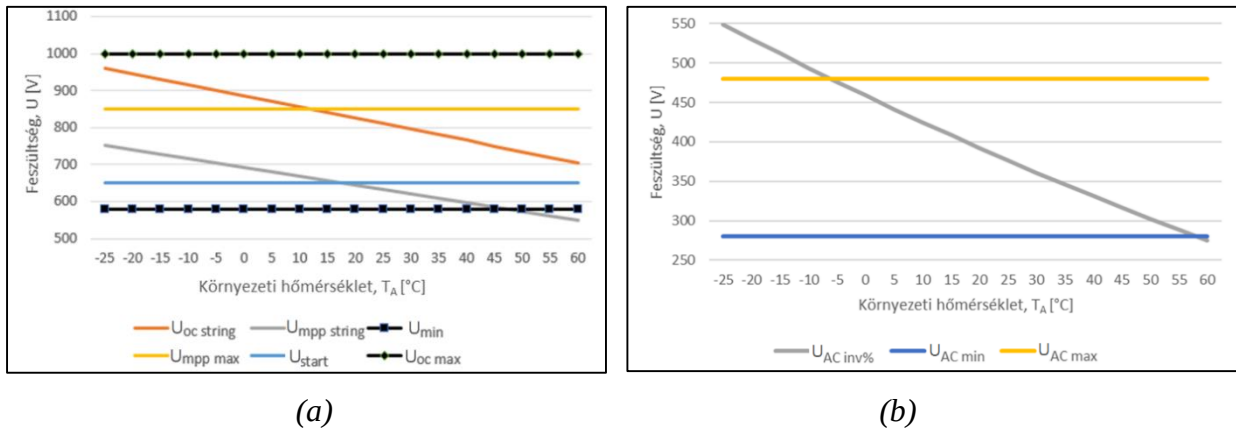
Ahhoz, hogy meghatározzuk a napelem modulok minimális számát egy sztringen belül, abból kell kiindulni, hogy a napelem modulok hőmérséklete $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ez nyári melegben, napsütéses időben lehetséges. A vonatkozó feszültség értékéből (U_{MP} ($+70\text{ }^{\circ}\text{C}$)) számítható. Az inverter bemenetének (DC oldali) minimális feszültségének ($U_{DC,MIN}$) megadásával meghatározható a sztringen belüli napelem modulok minimális száma [21, 66, 67]:

$$n_{S,MIN} = \frac{U_{MP,MIN}}{U_{ü(+70^{\circ}\text{C})}} = \frac{U_{MP,MIN}}{U_{MP} \cdot \left[1 + \frac{\mu_{Uü}(T_{PANEL} - T_{STC})}{100}\right]} = \frac{580}{31.3 \cdot \left[1 + \frac{(-0.34) \cdot (45)}{100}\right]} = 21,87 \quad (14)$$

Az inverter legoptimálisabb működési állapota a lehető leghosszabb sztringek használata. Így a lehető legszélesebb tartományra skálázhatók 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 $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on (I_{rz} ($+70\text{ }^{\circ}\text{C}$)) határozzuk meg. Ez megadja a csatlakoztatott sztringek indítóáramát a következő egyenletben [21, 67]:

$$n_{P,MAX} = \frac{I_{DC,MAX}}{I_{rz(+70^{\circ}\text{C})}} = \frac{I_{DC,MAX}}{I_{rz} \cdot \left[1 + \frac{\mu_{ISC}(T_{PANEL} - T_{STC})}{100}\right]} = \frac{47,7}{9.15 \cdot \left[1 + \frac{0.035 \cdot (45)}{100}\right]} = 5,13 \quad (15)$$

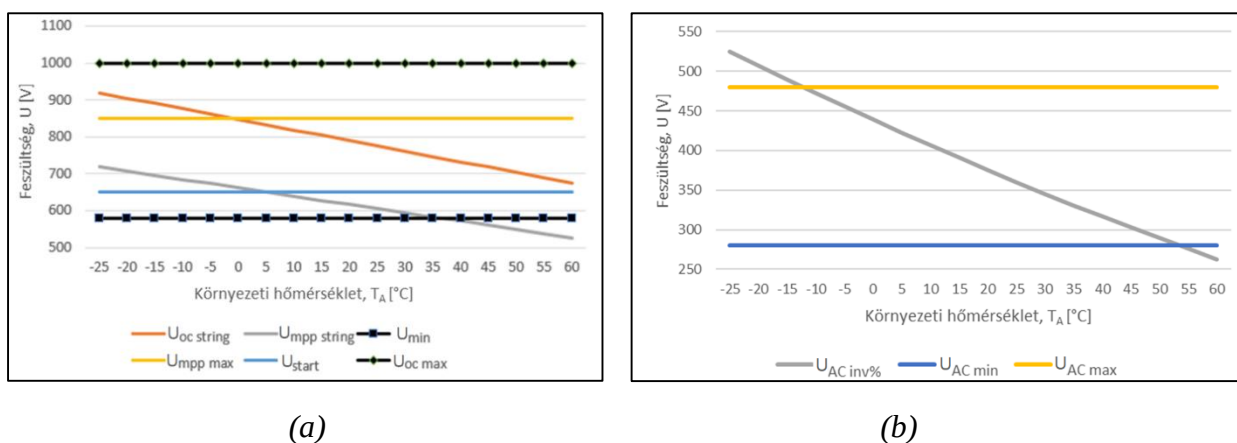
A számítások alapján 23 darab napelem van sorba kapcsolva egy sztringben és 5 sztring párhuzamosan. Ez az inverterhez csatlakoztatott 115 db napelem használatát jelenti [21, 67]. Az egyenáramú oldali teljesítmény a következő: $5 \cdot 23 \cdot 280\text{ Wp} = 32,2\text{ kWp}$, az üresjáratú feszültség $23 \cdot 38,5\text{ V} = 885,5\text{ V}$ maximális kimeneti teljesítmény mellett (MPP), az üzemi feszültség $23 \cdot 31,3\text{ V} = 719,9\text{ V}$ a maximális üzemi áramerősség $5 \cdot 8,79\text{ A} = 43,95\text{ A}$. A zárlati áramerősség $5 \cdot 9,15\text{ A} = 45,75\text{ A}$. Az inverterek adattáblázata szerint az említett mennyiségek megfelelőek.



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

A 41.a 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 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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. 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.b ábra azt mutatja, hogy ez a tendencia hogyan változik az AC oldalon (a hálózat kisfeszültségű oldalán). Látható, hogy a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ tartományon kívül az inverter nem képes fenntartani a szükséges $+20\%$ és -30% feszültségtűrést. A 42. ábra mutatja azt az esetet, ha egy sztringen belül egy panel árnyékhátsónak van kitéve, tehát a bypass diódákon keresztül üzemel tovább, ebben az esetben 23 panel helyett egy sztringben csak 22 panel üzemel. A panelek kiesése egyenes arányban van feszültség értékének csökkenésével. Az inverter mindaddig működőképes, amíg a kiesett panelek száma által okozott feszültség csökkenés mértéke nem éri el az inverter alsó tolerancia küszöbét. Ezt nevezzük kritikus panelszámnak. Ha a kritikus panelszámtól több panel esik ki, akkor az inverter véglegesen lekapcsol.



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

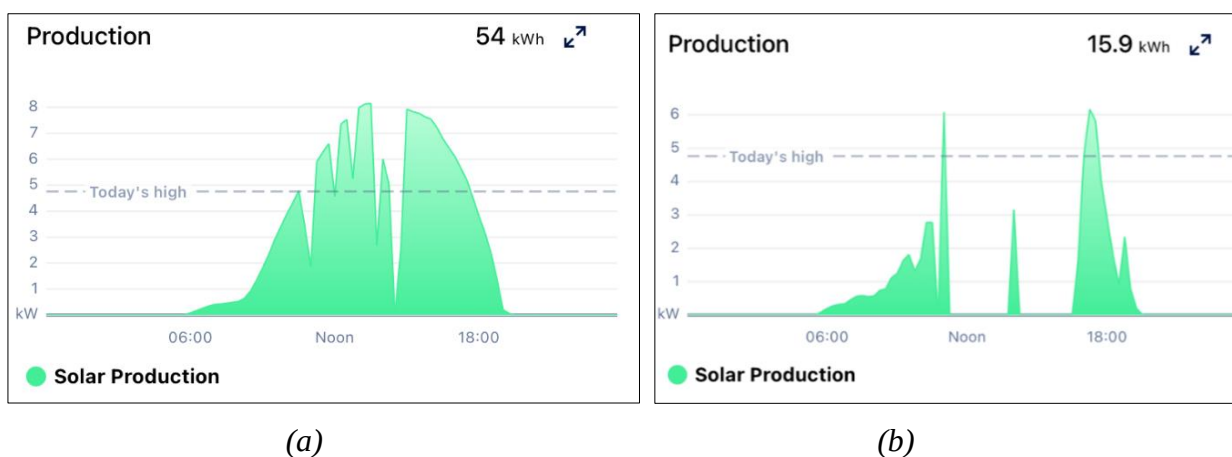
A feszültségérték alacsonyabb hőmérsékleten ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$) éri el a kritikus értéket, amelynél az inverter kikapcsol. Ez az érték 23 panel esetében volt magasabb ($45\text{ }^{\circ}\text{C}$). Tehát megfigyelhető, hogy az egyenáramú oldali hibák, váltakozó áramú oldalon nem csak teljesítménycsökkenést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

A hálózati feszültség szabályozása a csomóponti feszültségek szabályozásán alapszik. A hálózatra tápláló elosztott termelőegységek elterjedésével a feszültszabályozási elvek alapjaiban változtak meg, mivel a betáplálás hatására a termelőegységekhez közeli csomópontoknál a feszültség értéke akár nagyobb is lehet, mint az eredeti 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 (akár szabványos) tartományon kívül esik a hálózati feszültség értéke. Erre az esetre látható példa a 43. ábrán, ahol egy hazai lakossági fogyasztó termelési értékét mutatja (SolarEdge alkalmazásból).



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

Ez a jelenség sokkal nagyobb mértékben jelenkezik abban az esetben amikor egy napelemes rendszernek 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 kisebb. A feszültségérték változással kapcsolatos értékelés pontozási rendszerét a 7. táblázat tartalmazza. Az MSZ 447:2019 „Kisfeszültségű, közcélú elosztóhálózatra való csatlakoztatás”-ról szóló szabvány +8/-7,5% feszültségváltozást enged meg, ezért ezt vettem alapul.

7. táblázat. A feszültségérték változással kapcsolatos pontozási rendszer

Nem releváns, mert nincs hálózati csatlakozás.	0
Mindig feszültségemelkedést okoz amely 8% feletti, ha nincs önfogyasztás.	1
Mindig feszültségemelkedést okoz, de 8% alatti érték, ha nincs önfogyasztás.	2
Ha nincs önfogyasztása az épületnek, akkor feszültség növekedést okozhat, de a rendszerre kapcsolt akkumulátorkapacitás miatt ez a feltöltést követően jelentkezhet 8% feletti értékben.	3
Ha nincs önfogyasztása az épületnek, akkor nagyon kis eséllyel (max 8%-ig) 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 harmonikussá 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 függ. A leggyakoribb nemlineáris terhelések, amelyek harmonikus áramot generálnak a kapcsolóüzemű tápegységek, fénycsövek elektronikus előtéttel, szünetmentes tápegységek, frekvenciaváltós hajtások. Emellett az elosztóhálózaton az elmúlt években a napelemes inverterek darabszámának növekedése is hozzájárult a harmonikus komponensek egyre gyakoribb megjelenéséhez [50, 77, 78]. Ez a tendencia az elkövetkező években tovább erősödhet a hálózatra visszatápláló napelemes rendszerek számának növekedésével.

Amennyiben, a napsugárzás egyenetlen, az időjárás változékony, akkor az inverternek gyakrabban és gyorsabban kell szabályozni, hogy a rendszerből a maximális teljesítményt kapjuk. A legjobb példa ezen esetekre a felhőátvonulások időszakai. A töltésvezérlő áramkör folyamatosan figyeli és megtalálja azt az optimális feszültség-áram értéket, amely mellett mindig maximális teljesítményt szolgáltatnak a napelemek. A napelem panelek folyamatos hőmérséklet változása miatt további szabályzásra van szükség a maximális teljesítmény érdekében. Ugyanakkor a napelemek hőtehetetlensége miatt ez lényegesen lassabb folyamat. Ez a folyamat úgyszintén a harmonikus értékek változását okozza. Mindezeket figyelembe véve elmondható, hogy az év különböző szakaszaiban különböző THD szintek keletkeznek [68, 69, 79].

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

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

Továbbá a harmonikus feszültség okozta problémák lehetnek a következők is [75, 76]:

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

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 feszültségjelalakról és állandó feszültségszintről [50].

Egy periodikus függvény előállítható végtelen számú szinusz- és koszinuszfüggvény súlyozott összegeként, amelyek körfrekvenciái az alapkörfrekvencia (a legalacsonyabb körfrekvenciás tag körfrekvenciája) egész számú többszörösei. A periodikus jel harmonikus komponensekre bonthatók [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 harmonikusokat felharmonikusoknak 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:

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

ahol THD_U a feszültség harmonikus torzítás százalékos értéke, az U_k a k -adik 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:

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

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, 73, 85, 86]. Az MSZ EN 50160 szabvány szerint az áram THD_i nem haladhatja meg az 5%-ot a harmonikusok 40-es rendszámáig számolva [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 a 8. táblázat mutatja. A 9. táblázat a napelem modulok adatait mutatja.

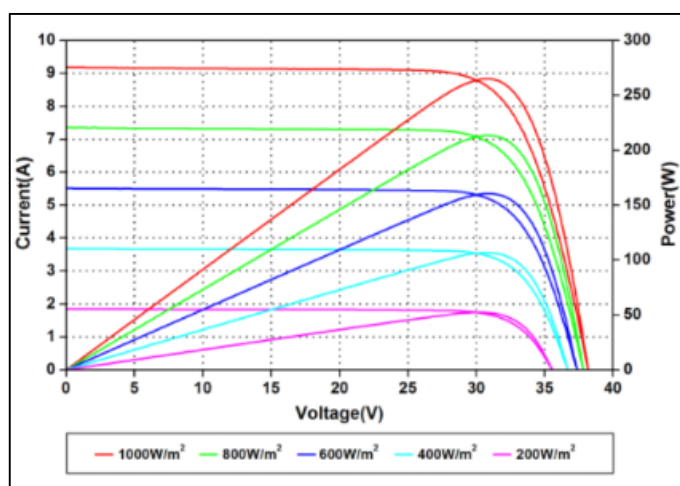
8. táblázat. Az inverter adatlapja

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 (ΔU)	+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 _p
DC oldali sztringek száma	6 pcs
Hatásfok (EU) (η_{EU})	98 %

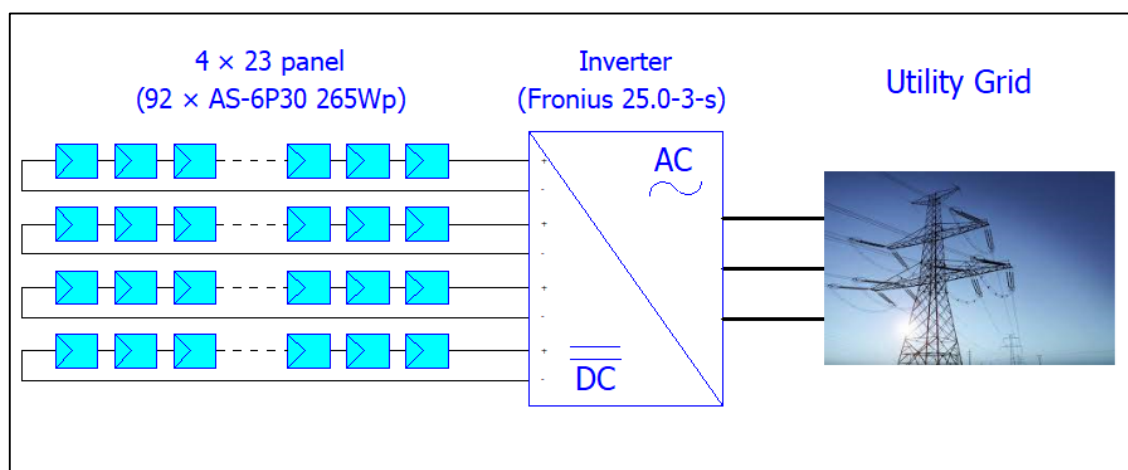
9. táblázat. A napelem panel adatlapja

Maximális munkaponti teljesítmény (P_{MAX})	265 W
Üresjárási feszültség ($U_{ü}$)	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 (η)	15,98 %
Sorba kapcsolt cellák száma (N_S)	60 pcs
Hőmérsékleti együttható ($U_{ü}$) ($\mu_{U_{ü}}$)	-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.



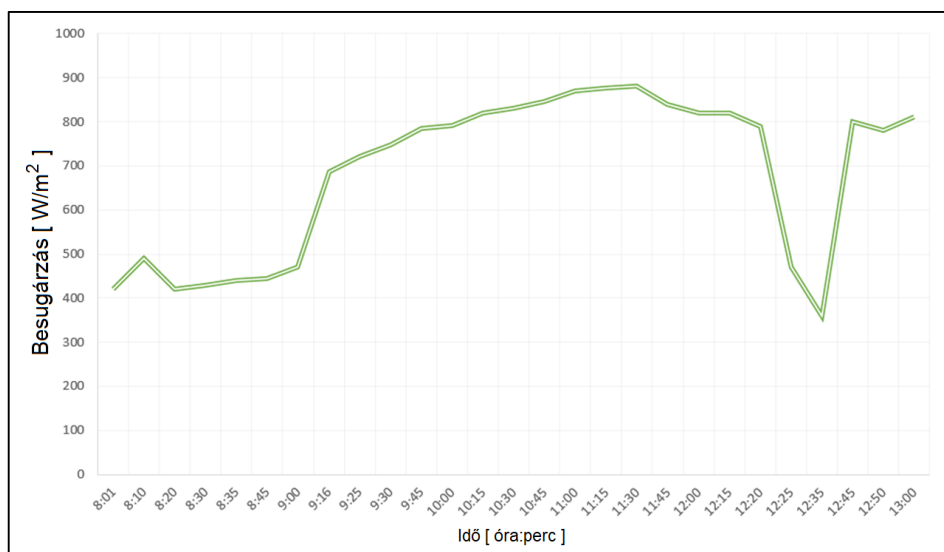
44. ábra A rendszerben használt napelem modul görbéi



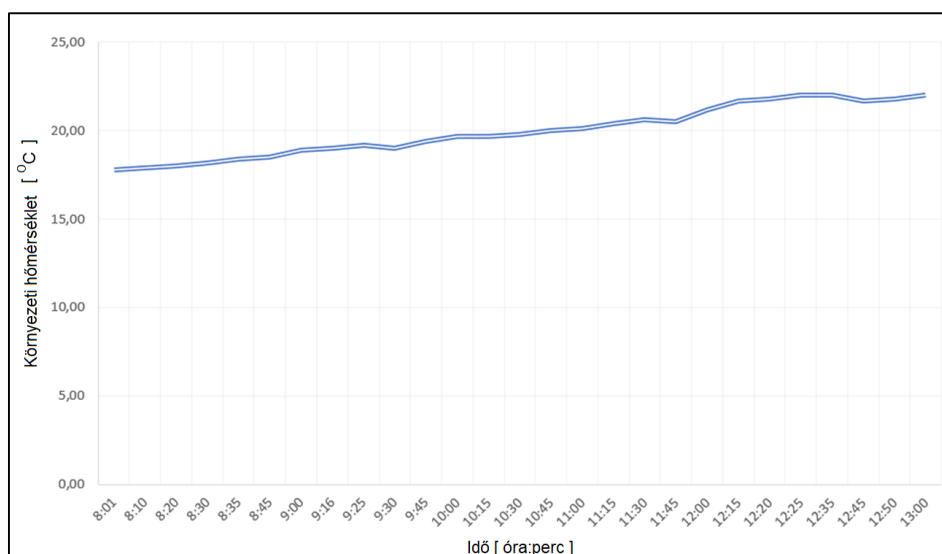
45. ábra A vizsgált napelemes rendszer felépítése

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 (2022. március 29.). Ezeket a 46. ábra és a 47. ábra mutatja. A harmonikus feszültség- és áram mérésére Chauvin Arnoux C.A 8230 hálózati analizátort használtam.

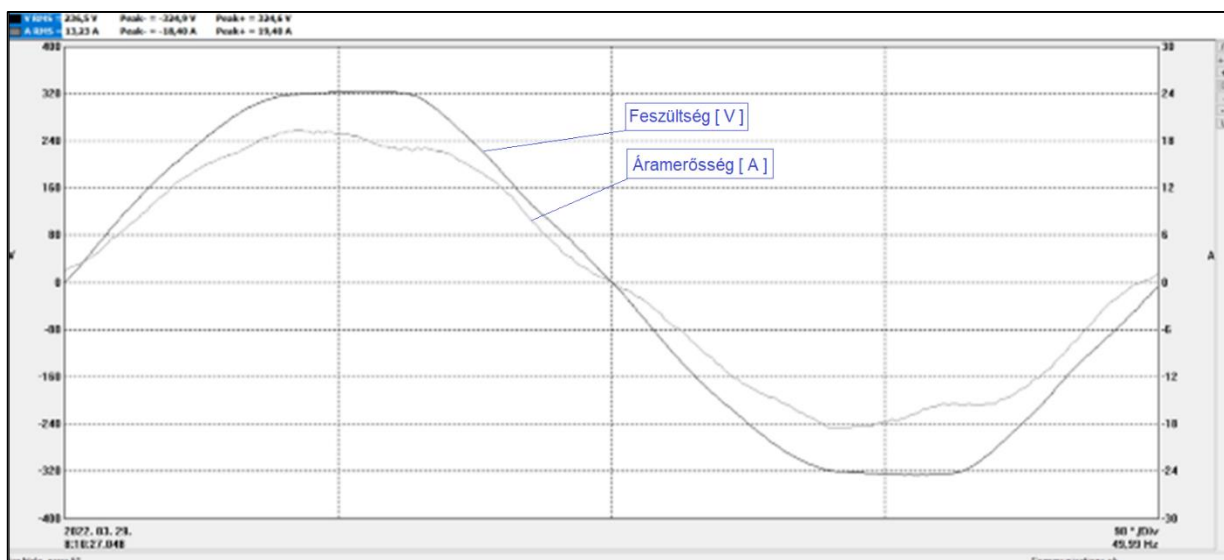


46. ábra A napsugárzás értéke a vizsgálat során

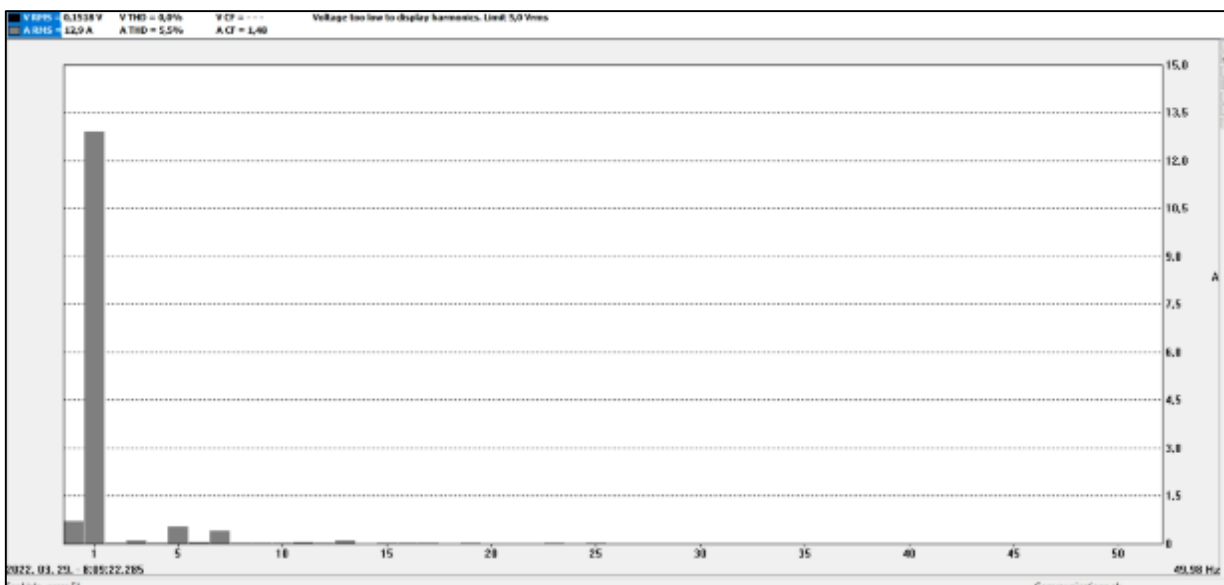


47. ábra A külső hőmérséklet a vizsgálat során

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^2 és 400 W/m^2 között volt mérhető. 400 W/m^2 felett a THD_I értéke tovább csökken, ingadozása viszont nő. Folyamatosan ingadozó trendet követ. THD_I 3,4% és 6,7% között mérhető ami átlagosan 5,05%. A $720\text{-}820 \text{ W/m}^2$ 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.



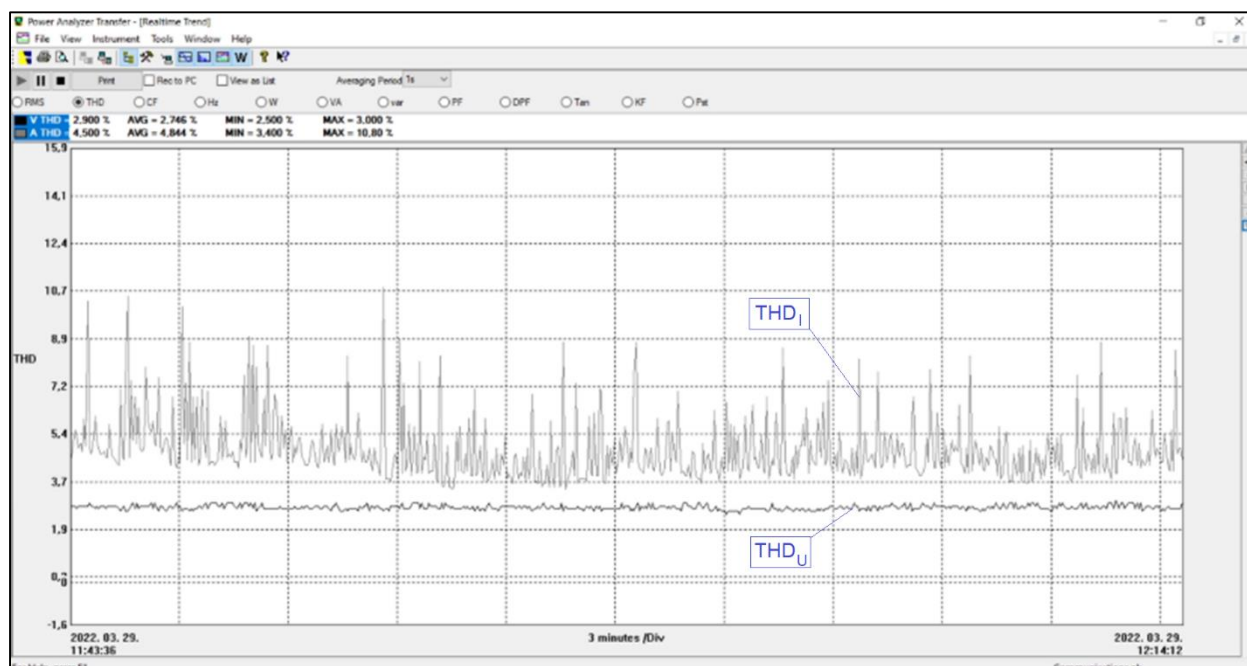
48. ábra A feszültség és áram hullámalakja 260-400 W/m² besugárzás esetén



49. ábra Az áram harmonikus összetevői 260-400 W/m² besugárzás esetén

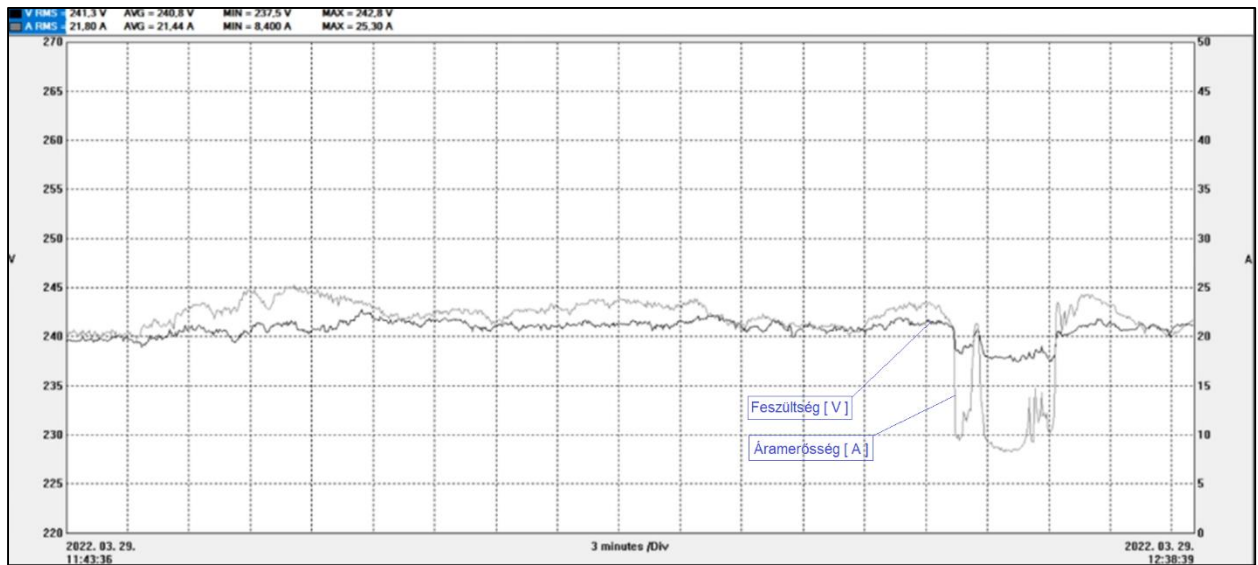


50. ábra A feszültség és az áram RMS értékének trendje

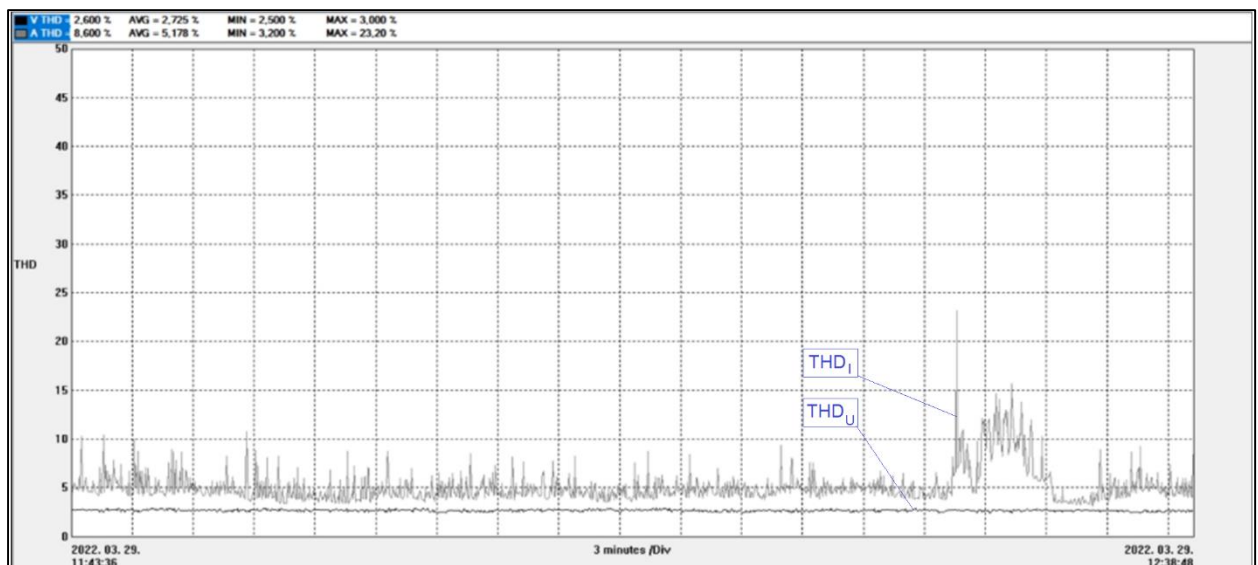


51. ábra A feszültség és az áram THD értékének trendje

Egy kisebb felhőáthaladás eredményeként a napsugárzás 350 W/m^2 -re csökkent le (46. ábra). A feszültség és áram effektív értéke egyértelműen azt mutatja, hogy teljesítménycsökkenés alakult ki (52. ábra). A THD_I trendje viszont növekvő értéket mutatott (53. ábra). Az átlagos 5-6%-ról az értéke 14-15%-ra növekedett. Ez egyértelműen mutatja, hogy az inverternek szabályozás révén be kell avatkoznia a maximális teljesítményű munkapont megtalálása és beállítása érdekében. E szabályozás folyamata jelenik meg a THD_I trendjében.



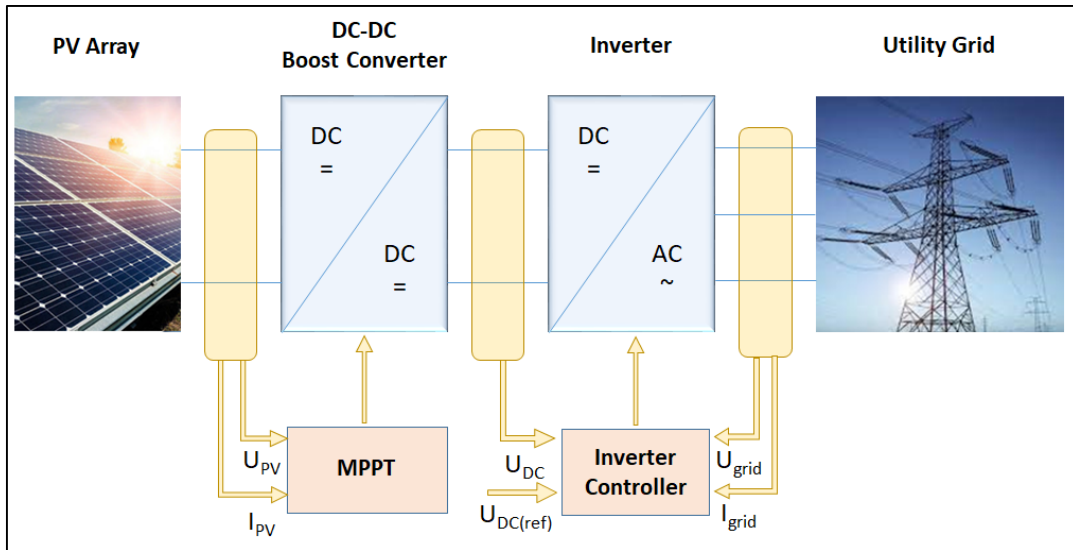
52. ábra Az áram és a feszültség RMS trendjének változása az árnyékhataás következtében



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

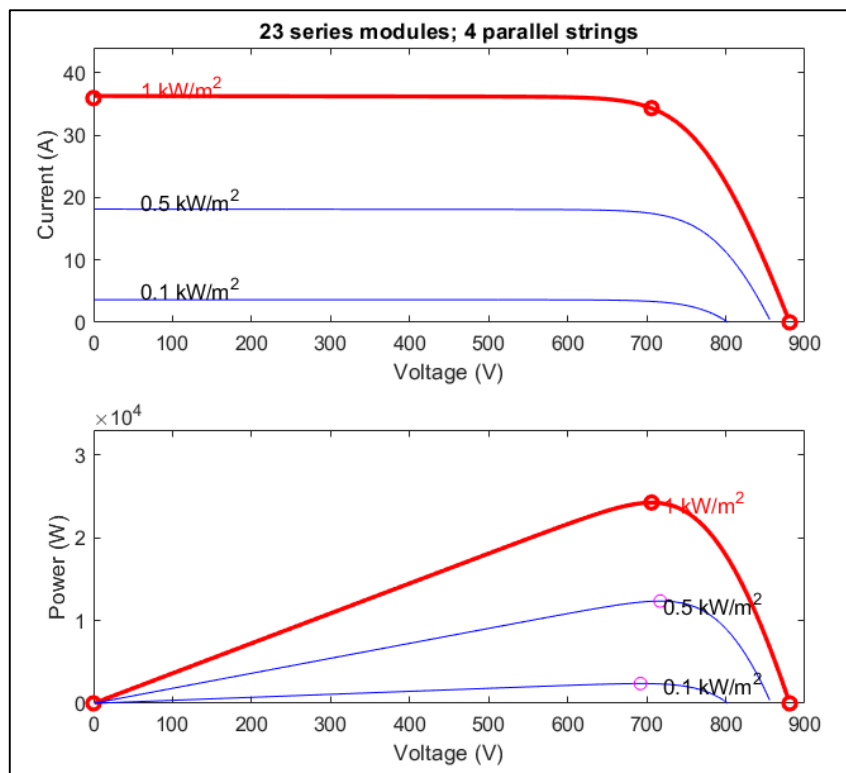
5.2.4. Napelemes rendszerek harmonikus vizsgálata szimulációs környezetben

A szimulációk sokkal több esetet és eseményt jelezhetnek előre, mint a mérések. De mindenképpen szükséges az ellenőrző mérésen alapuló szimuláció validálása. A szimuláció végrehajtásához a 45. ábrán látható rendszert építettem fel MATLAB Simulink segítségével. A bemeneti paraméterek (pl.: besugárzás, hőmérséklet) tekintetében ugyanazokat az értékeket állítottam be, mint a mérés során. Az 54. ábrán látható a szimulált hálózatra kapcsolt napelemes rendszer felépítése.

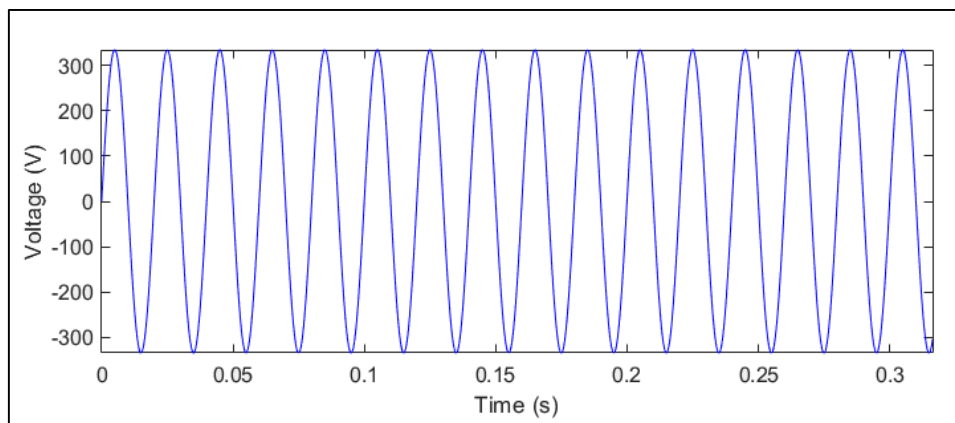


54. ábra A szimulált napelemes rendszer felépítése

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

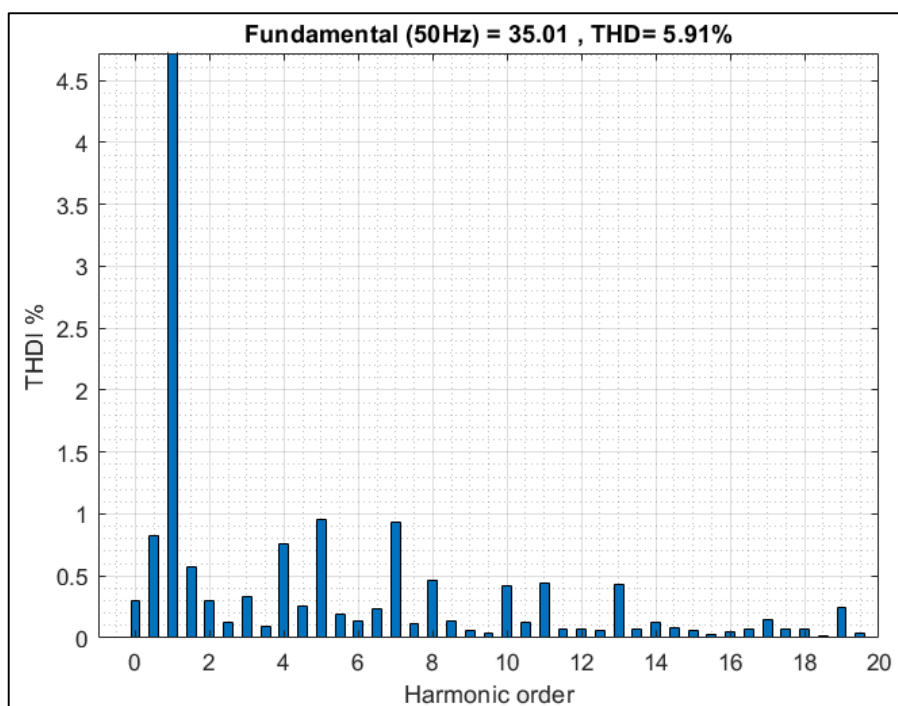


55. ábra A rendszerben használt napelem modul görbéi szimulációs környezetben

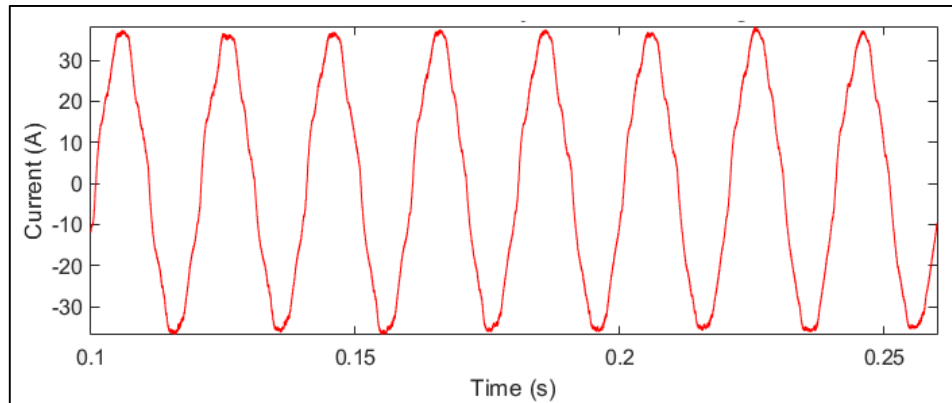


56. ábra A szimulált hálózati feszültség szinuszos hullámformája

A 56. ábrán látható szimulációs eredmény a villamos hálózat szinuszos hulláma, amely szerint az U_{grid} RMS értéke 236,7 V, amikor a napsugárzás 820 W/m². Korábban a mérés során 241,0 V-os feszültséget mértem, amely 2%-nál kisebb eltérést jelent a szimuláció és mérés között. 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, amely a THD_I százalékos értékét mutatja. A szimuláció során 5,91% érték mutatkozott 820 W/m² besugárzás értéknél. Korábban a mérés során átlagosan 5-6% között mértem. Az 58. ábrán látható, a villamos hálózati áram szinuszos jelalakja. A hálózati áram effektív értéke 24,75 A (I_{csúcs} = 35,01 A), amely 820 W/m² besugárzásnál figyelhető meg. Összehasonlítva a mért értékekkel, amelynél az áram effektív értéke átlagosan 23-25 A, csúcserőértéke 32,43-35,25 A között változott.

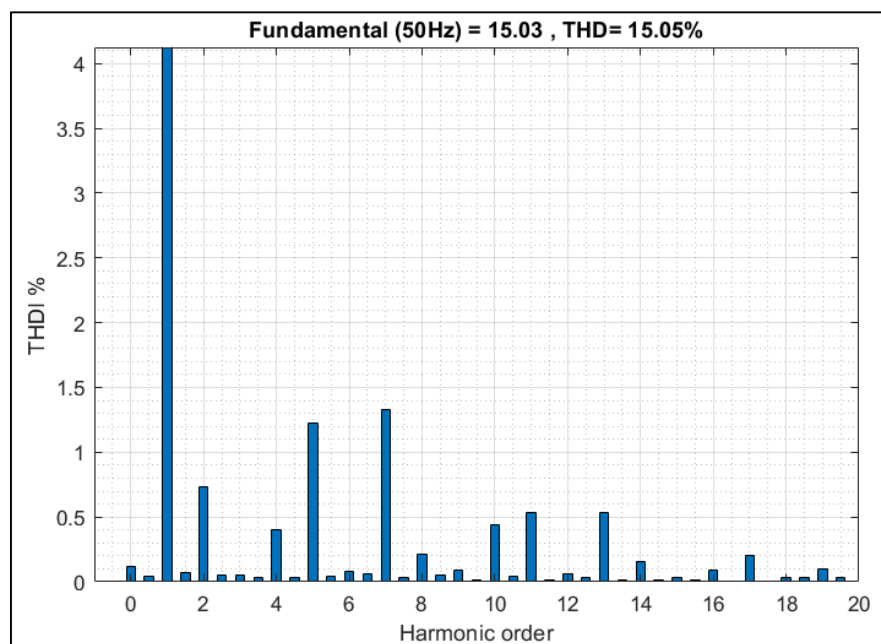


57. ábra Az áram THD_I 820 W/m² besugárzás mellett



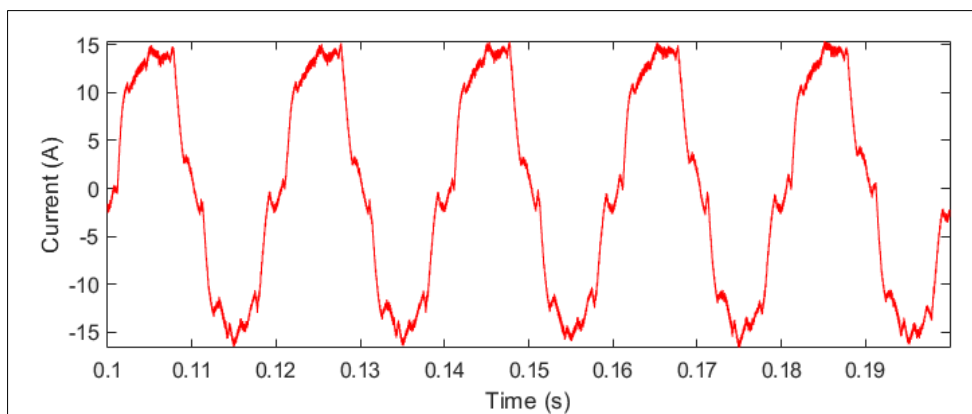
58. ábra Az áram jelalakja 820 W/m² besugárzás mellett

A 59. ábrán látható alacsony napsugárzási teljesítmény mellett a Matlab Simulink FFT analízise azt mutatja, hogy a THD_I százalékos értéke 350 W/m²-nél 15,05%. A mért adatok alapján ez az érték átlagosan 14-16% között volt. A 60. ábrán látható a villamos hálózati áram szinuszos jelalakja. Az áram effektív értéke 10,62 A ($I_{csúcs} = 15,03$ A) 350 W/m² napsugárzás mellett. Korábban a mérésnél az áram effektív értéke átlagosan 9-11 A, csúcsértéke pedig 12,69-15,51 A között változott.



59. ábra Az áram THD_I 350 W/m² besugárzás mellett

Az 57. és 59. ábra magyarázatához hozzátartozik, hogy az alapharmonikus egész számú többszöröseit nevezzük a felharmonikusoknak. Az interharmonikusok olyan összetevők, amelyek nem egész számú többszöröse a rendszer alapharmonikusának. A szubharmonikusok pedig olyan interharmonikusok, amelyek frekvenciája alacsonyabb, mint az alapharmonikus. Ezen összetevők további torzulást okozhatnak.



60. ábra Az áram jelalakja 820 W/m^2 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, betudhatók az eltérő hálózati topológiának, illetve az ismert alapadatok valóságtól való esetleges eltérésének. A mérésekből jól látható, hogy az inverter áramának THD értékét különböző napsugárzási szintek befolyásolják. Ezért egyértelmű, hogy a THD_I értéke magasabb, alacsony napsugárzási szint mellett, és a napelem modul kimeneti áramát a különböző napsugárzási szintek befolyásolják. Megfigyelhető, hogy a napelemek felületi hőmérséklete hozzájárul a harmonikus torzítás mértékéhez. Mivel a reggeli órákban, amikor a besugárzási szint (350 W/m^2), vagy a besugárzás hirtelen lecsökkent a napi csúcson (820 W/m^2 -ről 350 W/m^2 -re), nem ekvivalens a harmonikus torzítás tekintetében (10. Táblázat).

10. táblázat. A THD változása ugyanazon besugárzási értékeknél

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

Ez a hőmérséklet-különbség miatt jelentkezik, 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. A THD értéke előre nem határozható meg hiszen a teleptési környezettől függ. Utólag méréssel igazolható. Ezért a táblázatban a tervezés során használt tapasztalat alapján határoztam meg a pontozási rendszert.

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

Nem releváns, mert nincs hálózati csatlakozás	0
Várhatóan magas mértékű THD-t okoz (Akkumulátor alulméretezve és szűrő nélkül).	1
Várhatóan közepes mértékű THD-t okoz (Akkumulátor túlméretezve és szűrő nélkül).	2
Várhatóan alacsony mértékű THD-t okoz (Akkumulátor alulméretezve és szűrővel).	3
Várhatóan elhanyagolható mértékű THD-t okoz (Akkumulátor túlméretezve és szűrővel).	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 rendszer 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 korai tönkremeneteléhez vezethet. Az akkumulátortelepek esetén, ha nincs jól megválasztva a méretezési alap, akkor az akkumulátor telepek korai kapacitáscsökkenéséhez 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. Az optimálisan megtervezett napelemes rendszerénél, a rendszerelemek öregedése a természetes öregedési folyamat alapján történik és az üzemeltetési folyamat során indukált öregedés kevésbé jelentkezik. Abban esetben, ha a méretezés során valamely rendszerelem alul- vagy túl van méretezve, az üzemeltetésből adódó indukált öregedési folyamat gyorsabb, mint a természetes, így a rendszerelemek hamarabb, a tervezett élettartamukhoz képest korábban hibásodnak meg.

12. táblázat. Az öregedéssel kapcsolatos pontozási rendszer

Alulméretezett inverter és alulméretezett akkumulátor.	0
Alulméretezett akkumulátor és optimálisan méretezett inverter.	1
Alulméretezett inverter és optimálisan méretezett akkumulátor.	2
Túlméretezett akkumulátor és túlméretezett inverter.	3
Optimálisan megtervezett rendszer.	4

6. A NAPELEMES RENDSZEREK GAZDASÁGI ELEMZÉSE

Napelemes rendszerek esetében mint minden beruházásnál jelentős költségek mutatkoznak. 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 jelentkeznek 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. Ebben az esetben az a cél, hogy a rendelkezésre álló helyet a lehető legoptimálisabban 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 jelentkeznek ennél a típusnál. Viszont érdemes megjegyezni, hogy ennél a rendszernél is szükséges a rendszerelemek (napelemes rendszer eszközei, védelmek, kábelek, stb.) méretezése mivel a méretezésből adódó meghibásodás esetén súlyos anyagi kár is keletkezhet. A szigetüzemű rendszer esetén az akkumulátortelep az ami a jelentős többletköltséget adja egy hagyományos hálózatsatolt napelemes rendszerhez képest.

A hálózatsatolt 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 ez 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, melyeknél nem feltétel, de nem is kizárt a kétirányú fogyasztásmérés - (a hálózatba visszacsatolás a tarifától függ), amely ha van, akkor a töltésvezérlési prioritásban az első a saját tárolókapacitás feltöltése. 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 változatos üzemállapotok esetében is használható. A hálózati feszültség megszűnése esetén lehetőség van a hálózaton kívüli üzemre is, ha rendelkezésre áll napenergia vagy az akkumulátor töltöttsége ezt lehetővé teszi [88, 89, 100]. A napelemes rendszertípusok beruházásával kapcsolatos részegységeket mutatja a 13. táblázat. A beruházási költségekkel kapcsolatos értékelés pontozási rendszerét a 14. táblázat mutatja. Az optimális tervezés a fogyasztási igényekhez igazított tervezést jelenti.

13. táblázat. Az egyes napelemes rendszerek beruházással kapcsolatos részegységei

	Szigetüzemű rendszer	Hálózatsatolt rendszer	Hibridüzemű rendszer
Napelem panelek	✓	✓	✓
Töltésvezérlő	✓	✗	✗
Szigetüzemű inverter	✓	✗	✗
Hálózatsatolt inverter	✗	✓	✗
Hibrid inverter	✗	✗	✓
Akkumulátor telep	✓	✗	✓
Villámvédelem	✓	✓	✓
Tartószerkezet	✓	✓	✓
Kötődobozok, kábelek, kiegészítők	✓	✓	✓
Egyenáramú oldali távlekapcsolás	✓	✓	✓
Terhelésátkapcsoló egység	✗	✗	✓
Földelőrendszer	✓	✓	✓
Munkaköltség (tervezés, kivitelezés)	✓	✓	✓

14. táblázat. A beruházási költségekkel kapcsolatos pontozási rendszer

Túlméretezett panelek vagy túlméretezett akkumulátor telep	0
Hibrid rendszer akkumulátor teleppel és panelekkel (optimális méretezéssel)	1
Szigetüzemű rendszer (optimális méretezéssel)	2
Hibrid rendszer csak panelekkel (optimális méretezéssel) akkumulátor telep nélkül	3
Hálózatsatolt rendszer (optimális 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 tisztítására. 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

A következőkben néhány módszert ismertetek a megtérülési idő számítására. Ez a bemutatás nem teljes körű, mivel számos módszer létezik a megtérülési idő meghatározására. A kutatásom célja csupán annyira korlátozódik, hogy ezen módszerek alkalmazásával alátámasszam a háromszögmodell gazdasági aspektusainak érvényességét. A kutatásomban számos gazdasági szakirodalmat használtam, amelyek jelentős betekintést nyújtanak a témába. Ezen források mellett a megtérüléssel kapcsolatos számítások alapjául Somogyiné Dr. Molnár Judit kutatásait vettem.

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 időt úgy számíthatjuk ki, hogy az adott 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. Jelenérték (PV) és jövőérték (FV)

A megtérülés számításánál a jelenérték (PV) és a jövőérték (FV) fogalmak ismerete elengedhetetlen, mivel ezek segítenek értékelni a befektetések jövedelmezőségét. A jelenérték az a pénzösszeg, amelyet a jövőben kapunk meg, de a mai értékét tükrözi, figyelembe véve a kamatot vagy a hozamot. A jelenérték segít meghatározni, mennyit ér a jövőbeli kifizetés a jelenlegi időpontban. A számítása a következő képlettel történik:

$$PV = \frac{FV}{(1+r)^n} \quad (25)$$

ahol: FV a jövőérték, r a kamatláb (vagy diszkontálási ráta), n az évek száma. A jövőérték a pénzösszeg, amelyet egy befektetés a jövőben elér, figyelembe véve a kamatot vagy a hozamot. A jövőérték segít megállapítani, mennyi pénzünk lesz egy adott időpontban, ha a mai pénzünket befektetjük. A számítása a következő képlettel történik:

$$FV = PV \cdot (1 + r)^n \quad (26)$$

ahol: PV a jelenérték, r a kamatláb, n az évek száma.

6.3.3. *Nettó jelenérték (NPV)*

A nettó jelenérték (NPV, Net Present Value) egy pénzügyi mutató, amely segít értékelni egy befektetés jövedelmezőségét, figyelembe véve a jövőbeli pénzáramlások jelenértékét és a kezdeti befektetést. Az NPV számítása során a jövőbeli bevételeket és kiadásokat diszkontálják a jelenlegi értékükre, majd ezeket összeadják.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - P_0 \quad (27)$$

ahol: P_0 - a beruházás költsége, CF_t - a beruházás t-edik időpontban esedékes pénzárama, n - a beruházás időszaka, r - beruházástól elvárt hozam, NPV - a beruházás nettó jelenértéke.

Ha az NPV értéke nagyobb nullánál, akkor a befektetés megtérülő, és ebben az esetben a befektetési javaslat elfogadható. Amennyiben az értéke kisebb nullánál, akkor a befektetés gondolatát el kell vetni, mert az veszteséget termelne.

6.3.4. *Összetett megtérülési idő*

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

- a napelem rendszer hatékonysága (szennyeződés, napelemek árnyékolása),
- napelemek éves teljesítményromlása,
- 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 változása,
- 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, de 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:

$$E_p^n = E_p^{n-1} \cdot \left(1 - \frac{PD_\eta}{100}\right) \quad (28)$$

ahol: E_p^{n-1} az előző évi energiatermelés kWh-ban, PD_η 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:

$$E_p^1 = \eta \cdot E_p^{max} \quad (29)$$

ahol: E_p^1 az első évben termelt villamosenergia-mennyiség, E_p^{max} a napelemes rendszer maximális évenkénti termelt energiamennyiségének és η a napelemes rendszer hatásfoka (95%).

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

$$AM_s^n = E_u^n \cdot CST_{PE} \cdot \left(1 + \frac{CH_{EP}}{100}\right)^{n-1} \quad (30)$$

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:

$$E_e^n = E_p^n - E_u^n \quad (31)$$

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:

$$PR_e^n = E_e^n \cdot CST_{SE} \cdot \left(1 + \frac{CH_{EP}}{100}\right)^{n-1} \quad (32)$$

ahol: E_e^n az aktuális év energiaexportja a hálózatba (kWh), CST_{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 :

$$CST_{m+i}^n = (CST_m^n + CST_i^n) \cdot \left(1 + \frac{Inf}{100}\right)^{n-1} \quad (33)$$

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:

$$PR_{sum}^n = AM_s^n + PR_e^n - CST_{m+i}^n - LN_l^n - AM_u^n \quad (34)$$

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_l^n az adott év törlesztőrésze (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:

$$PR_{sum+inf}^n = \frac{PR_{sum}^n}{\left(1 + \frac{Inf}{100}\right)^n} \quad (35)$$

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

6.3.5. Megtérülési idővel kapcsolatos pontozási rendszer

A megtérülési idővel kapcsolatos értékelés pontozási rendszerét a 16. táblázat tartalmazza. A megtérülési idő számításnál a 0-ás pontozás mellett kiegészült egy negatív értékkel, amely a napelem élettartamán túli megtérülési időt hivatott figyelembe venni. Amennyiben a megtérülési idő nagyobb lesz mint 30 év, akkor minden további évben -1 pontot kap az értékelésben. Tehát például 31 év esetén -1 pont, 32 év esetén -2 pont, 42 év esetén -12 pontot jelent a pontozásnál.

16. táblázat. A megtérülési idővel kapcsolatos pontozási rendszer

30 év felett minden év -1 pontot jelent	-1, -2, -3...-n
26-30 év között van a megtérülési idő	0
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 rendszert vizsgáltam. Szigetüzemű rendszerek esetén két különböző konfigurációt. A hálózatsatolt rendszerekből egy konfigurációt, amely akkumulátor telep nélkül működik és két konfigurációt, amely akkumulátor teleppel van ellátva. A számításoknál a villamos energia esetében 36 forintos árat vettem figyelembe véve 1 kWh-ra vonatkoztatva. Hálózatsatolt napelemes rendszerek esetén az önfogyasztás és a visszatermelés aránya jelentős hatással van egy napelemes rendszer megtérülési idejére, hiszen ezek az arányok befolyásolják, mennyi villamos energiát szükséges a hálózathoz vételezni, és mennyi energiát lehet visszatáplálni. Emellett a vételezési és visszatáplálási árak közötti különbség is lényeges tényező, mivel a jelenlegi szabályozások szerint a visszatáplált energia ára jóval alacsonyabb, mint a hálózati vételezése. Ezért a fogyasztási szokások, különösen az önfogyasztás növelésére irányuló erőfeszítések, kedvezően hatnak a megtérülési időre. Egy akkumulátor nélküli, 5 kW-os napelemes rendszerben a háztartás által termelt villamos energia körülbelül 30-40%-a használható fel közvetlenül, mivel csak a termelés pillanatában érhető el. Ha egy 5 kWh-s akkumulátort is telepítünk, az önfogyasztás akár 60-70%-ra is emelkedhet, mivel a napközben megtermelt energiát este vagy éjszaka is hasznosítani lehet. Egy 10 kWh kapacitású akkumulátor beépítésével pedig az önfogyasztás aránya elérheti a 70-80%-ot, jelentősen csökkentve a villamos hálózathoz való vételezést [108, 109]. A számításokban az egyes esetek felső határait vettem alapul. A valós rendszerek értékelésekor részletesebb elemzések szükségesek, mivel az egyedi fogyasztási szokások önmagukban nagymértékben befolyásolják a megtérülési időt. Az összehasonlíthatóság érdekében az elemzéseket egységes peremfeltételek mentén kell végezni.

7.1. Szigetüzemű napelemes rendszerek vizsgálata

Szigetüzemű rendszerek esetén két különböző konfigurációt vizsgáltam. Az első esetben egy 5 kWp rendszerhez egy 5 kWh kapacitású akkumulátor telepet illesztettem. A második esetben pedig ugyanehhez a rendszerhez az akkumulátor telep kapacitását kétszeresére növeltem a rendszer autonómiájának érdekében. A vizsgált szigetüzemű rendszerek beruházási költségeit a *17. táblázat*, a megtérüléssel kapcsolatos adatokat pedig a *18. táblázat* tartalmazza. Az egyes rendszerelemek beruházási költségei a 2023. decemberben elérhető fogyasztói árak átlagolásából adódik. A szigetüzemű rendszer függetlenül tud működni a villamos hálózattól. Tehát abban az esetben, ha a létesítmény nagyon távol helyezkedik el a lehetséges villamos hálózat csatlakozási ponttól, akkor nyújt megfelelő megoldást az épület villamos táplálására.

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 háromszögmodell pontozási eredményét a szigetüzemű rendszerek esetén a 19. táblázat tartalmazza. Ez alapján az első konfiguráció 10 pontot kapott. A második esetben az összpontszám 6-os értékre adódott. Ez az érték abból adódik, hogy a megtérülési idő nagyon megnövekedett az akkumulátorok beruházási költsége miatt (31 évre emelkedett), ez a pontozási rendszerből adódóan nem 0, hanem -1 értékelést kap (a 30 év feletti megtérülési idő értelmében). Az akkumulátor telepet a második konfigurációnál dupla kapacitással méreteztem. Tehát amennyiben a rendszer autonómiáját szeretnénk növelni az akkumulátor telep bővítésével, abban az esetben a megtérülési idő drasztikusan megnövekszik. Ezeket az értékeket lehet csökkenteni, amennyiben releváns pályázatot vagy támogatást is beleszámolunk és redukálni tudjuk a beruházási költségeket.

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	-1
Részpontszám		5	1
Összpontszám		10	6

7.2. Hálózatsatolt 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, más, meghatározó berendezést nem tartalmaz a rendszer, amely komolyabb költséget jelentene a többi napelemes rendszerrel összehasonlítva. Azonban a szigetüzemű rendszerhez képest még beruházási költségként megjelenik a tervezési és egyéb engedélyeztetési költség. Az összesítést a 20. táblázat tartalmazza.

20. táblázat. A vizsgált hálózatsatolt rendszer beruházási költségei

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

21. táblázat. A vizsgált hálózatsatolt rendszer megtérülési ideje

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

A vizsgált hálózatsatolt 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 hálózatsatolt rendszer esetén

Vizsgált kategória		Hálózatsatolt rendszer
Energiaellátás biztonsága	Villamos hálózati csatlakozás és egyéb bővítések	3
	Fogyasztók energiaellátása	0
	A rendszer energiatároló képessége	0
Részpontoszám		3
Technológiai vizsgálatok	Feszültségváltozás problémái	2
	Felharmonikusok hatása	2
	Élettartam és öregedés	4
Részpontoszám		8
Gazdasági elemzések	Beruházási költségek	4
	Karbantartási és üzemeltetési költségek	3
	Megtérülési idő	1
Részpontoszám		8
Összpontoszám		19

A hálózatsatolt 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 alpontban. 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 konfigurációt vizsgáltam, hasonlóan a szigetüzemű rendszerekhez. Az első esetben egy 5 kWp rendszerhez egy 5 kWh kapacitású akkumulátor telepet illesztettem. A második esetben pedig ugyanehhez a rendszerhez az akkumulátor telep kapacitását

kétszeresére növeltem a rendszer autonómiájának érdekében, tehát 10 kWh kapacitású akkumulátor teleppel vizsgáltam.

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	
	Tervezés, engedélyek, tartószerkezet, telepítés				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	
	Tervezés, engedélyek, tartószerkezet, telepítés				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. Ebben az esetben az akkumulátor telepet dupla kapacitással illesztettem, így a napelemes rendszer képes a fogyasztók hosszabb ideig tartó ellátására, egy esetleges villamos hálózat kiesés következtében. Azonban a rendszer megtérülési ideje a szigetüzemű rendszerhez hasonlóan drasztikusan megnövekszik. Ezeket az értékeket pályázat vagy támogatás igénybevételével lehet csökkenteni.

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, ami 30 év felé emelkedett, ez a megtérülési idő pontozási rendszeréből adódóan nem 0, hanem -4 értékelést kapott, így összpontszámban ez a hibrid napelemes rendszer 19 pontot kapott.

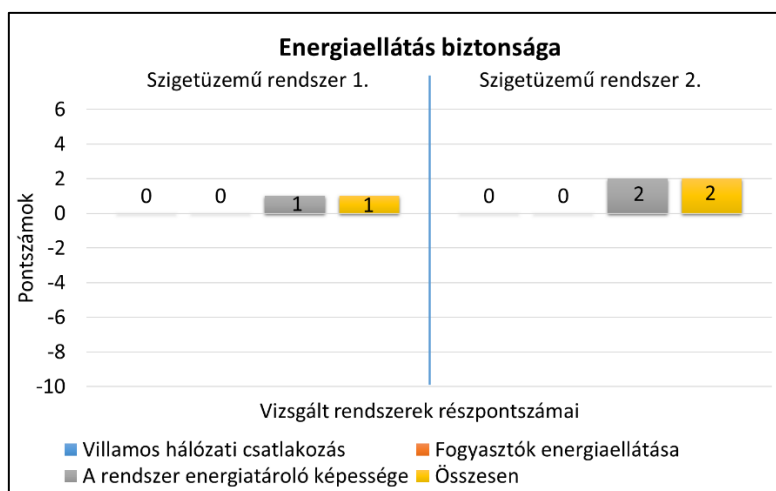
25. táblázat. A háromszögmodell pontozási eredményei a vizsgált hibrid rendszer esetén

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
Részpontszám		9	10
Technológiai vizsgálatok	Feszültségváltozás problémái	3	3
	Felharmonikusok hatása	3	3
	Élettartam és öregedés	4	4
Részpontszám		10	10
Gazdasági elemzések	Beruházási költségek	1	1
	Karbantartási és üzemeltetési költségek	2	2
	Megtérülési idő	0	-4
Részpontszám		3	-1
Összpontszám		22	19

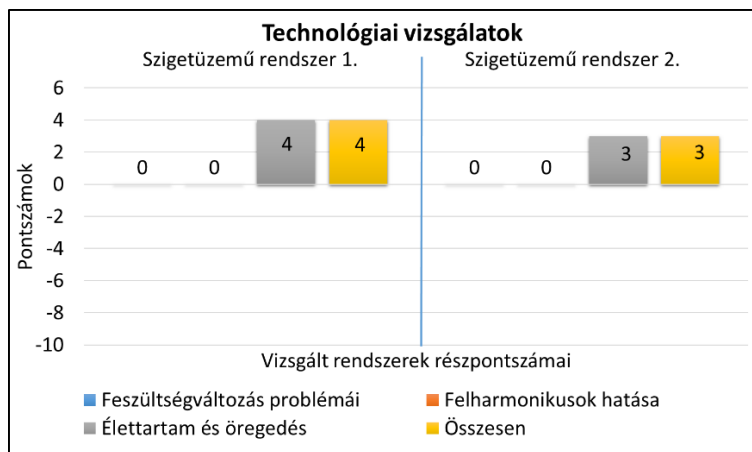
7.4. A napelemes rendszerek vizsgálatának összegzése

7.4.1. A vizsgált szigetüzemű rendszerek összegzése

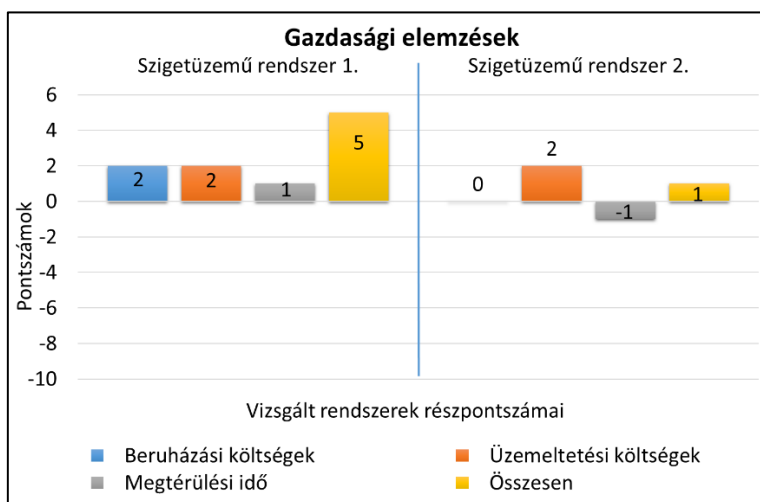
A 61. - 63. ábra mutatja a vizsgált szigetüzemű rendszerek energiaellátás biztonsággal, technológiai vizsgálatokkal és a gazdasági elemzésekkel kapcsolatos részpontszámait. A 64. ábra szemlélteti mindhárom pillér összpontszámát.



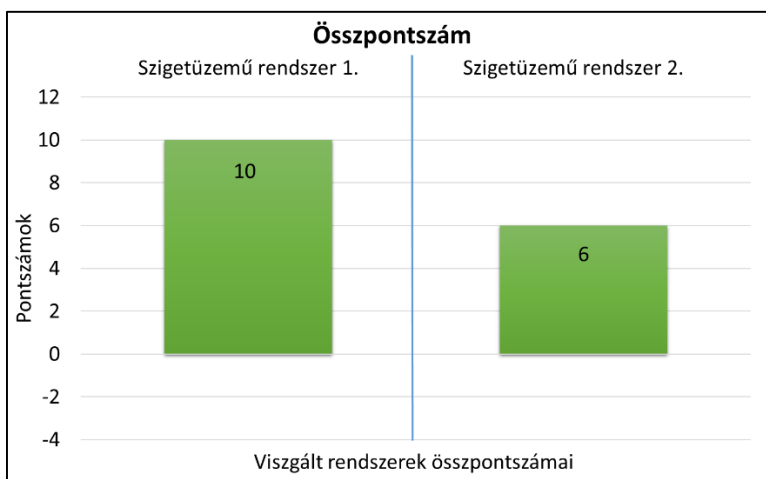
61. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek energiaellátás biztonság részpontszáma



62. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek technológiai vizsgálatok részpontszáma



63. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek gazdasági aspektusok részpontszáma



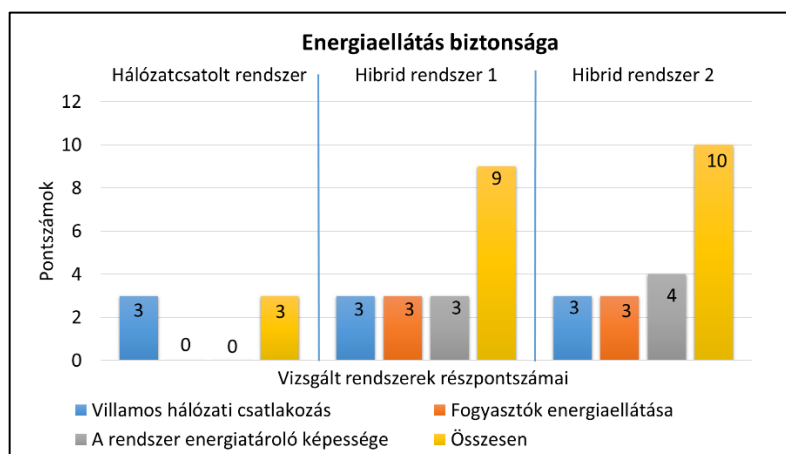
64. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek összpontszáma

Szigetüzemű rendszerek esetén nincs hálózati csatlakozás, emiatt több vizsgálati pont nem releváns a háromszög modellben ezen rendszereknél. Ebből az okból kifolyólag érdemes ezeket a rendszereket külön vizsgálni, és nem összehasonlítani a hálózatsatolt rendszerekkel. Mivel itt az

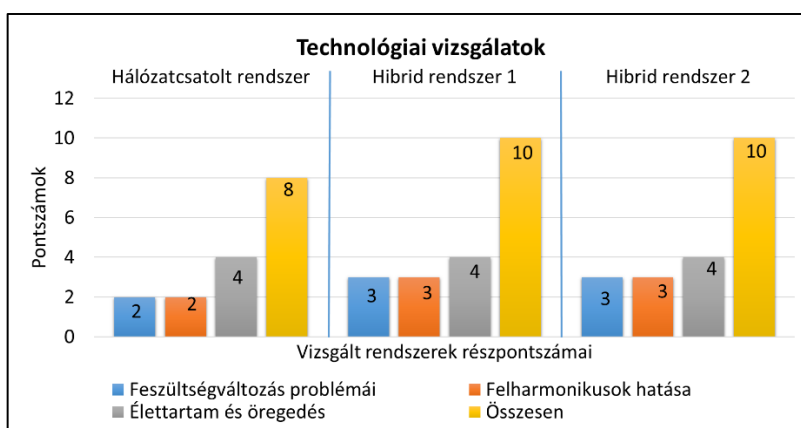
energiellátás biztonsága csak és kizárólag a napelemes rendszertől függ. Tehát a létesítmény sokkal inkább önmagára van utalva és több más létesítménnyel nem tud közös kooperációban működni egy hálózaton. A két szigetüzemű rendszer esetében az első konfiguráció kapott magasabb pontszámot az összegzésben, amely 10 pont. Bár Energiaellátás biztonság szempontjából alacsonyabb értéket kapott, de a második konfiguráció esetében a megtérülési idő drasztikusan megnövekedett, így összpontszámot tekintve 6 pont az eredmény.

7.4.2. A vizsgált hálózatcsatolt rendszerek összegzése

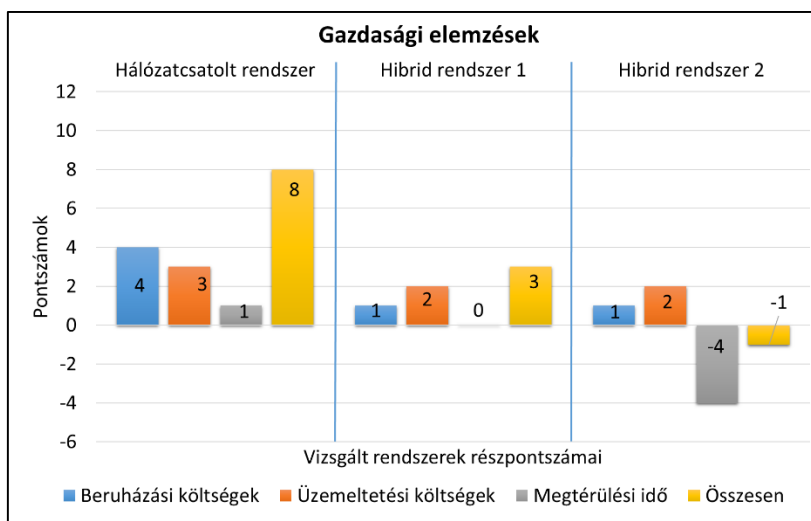
A 65.-67. ábra mutatja a vizsgált hálózatcsatolt napelemes rendszerek energiaellátás biztonsággal, technológiai vizsgálatokkal és a gazdasági elemzésekkel kapcsolatos részpontszámait. Az akkumulátor telep nélküli és a két hibrid rendszert lehetséges közös elemzésnek alávetni, mivel a hálózati csatlakozás miatt nem lesznek irreleváns pontok a háromszögmodellben a szigetüzemű rendszerrel ellentétben. A 68. ábra szemlélteti mindhárom pillér összpontszámát.



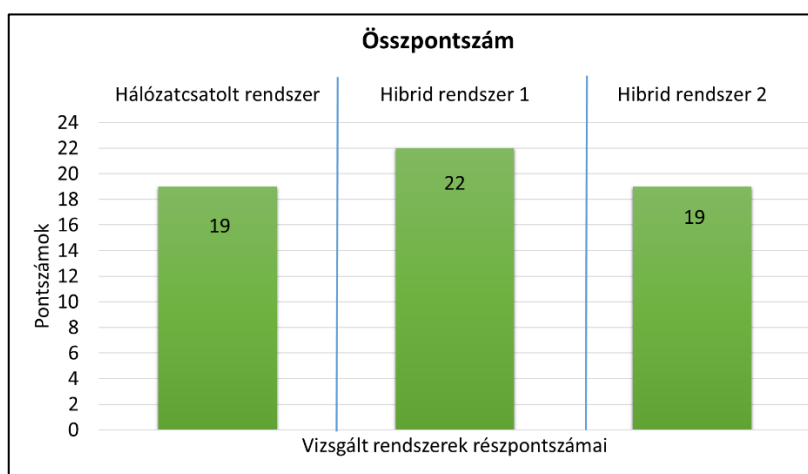
65. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek energiaellátás biztonság részpontszáma



66. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek technológiai vizsgálatának részpontszáma



67. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek gazdasági aspektusainak részpontszáma



68. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek összpontszáma

A hálózatsatolt rendszerek esetén megfigyelhető, hogy a leggazdaságosabb konfiguráció az, amely nem tartalmaz akkumulátort, 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-biztonságot és technológiai vizsgálatokat, akkor az látható, hogy ez a típusú napelemes rendszer magasabb összpontszámot kapott a háromszögmodell értékelése szerint. 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. Az általam kidolgozott döntéstámogató-értékelő módszer – az ún. háromszögmodell - segítségével megállapítottam, hogy háztartási méretű napelemes rendszerek esetében az 5 kWp teljesítményű és 5 kWh akkumulátorkapacitású hibrid rendszer magasabb összpontszámot ért el az akkumulátor telep nélkül hálózatsatolt rendszerhez képest, tehát alkalmazása előnyösebb. Ha az akkumulátor telep kapacitását duplájára növeljük, akkor gazdaságilag, pályázati támogatás nélkül nem térül meg.**

Háttérmagyarázat: Kidolgoztam egy döntéstámogató-értékelő módszert a fogyasztói igényeknek megfelelő optimális napelemes rendszer kiválasztása céljából, amelyet háromszögmodellnek neveztem el és alkalmazhatóságát különböző kialakítású 5 kWp teljesítményű háztartási méretű kiserőművek segítségével teszteltem. Ha a napelemes rendszer kiválasztásakor csak a gazdasági szempontokat vesszük figyelembe, akkor egyértelműen a hagyományos napelemes rendszer kapja a legnagyobb értéket (8 pont). Amennyiben a másik két pillérrel (Energiallátás biztonsága és Technológiai vizsgálatok) is kibővítjük a vizsgálatot, az összpontszámokat tekintve az 5 kWp hibrid napelemes rendszer 5 kWh kapacitású akkumulátor teleppel éri el a legmagasabb pontszámot (22 pont). Abban az esetben, ha az 5 kWp hibrid napelemes rendszerhez 10 kWh kapacitású akkumulátor telepet választunk, akkor a gazdasági elemzés értéke -1 pont (a megtérülési idő miatt) és az összpontszámot tekintve az érték 19 pontra esik.

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

Az értekezés kapcsolódó fejezetei: 3, 4.1.3, 4.2.2, 4.3.2, 5.1.4, 5.2.5, 5.3, 6.1, 6.2, 6.2, 7

- T2. Megállapítottam, hogy lakossági fogyasztók esetében 1 kWp napelemes rendszerhez viszonyítva 1 szeres és 3 szoros érték között található a kWh-ban meghatározott optimális akkumulátor kapacitása, amely az egyedi napi fogyasztási igények (trendek) alapján pontosítható.**

Háttérmagyarázat: Hibrid napelemes rendszereknél a helyes akkumulátorkapacitás meghatározás összetett feladat. Az elvégzett vizsgálatokból megállapítottam, hogy a lakossági felhasználású, háztartási méretű kiserőművek esetén 1 kWp napelemes rendszerhez viszonyítva az 1 szeres tárolási kapacitás nem elegendő a fogyasztási igények ellátására, a be- és kitárolási igények kielégítésére. Háromszoros tároló kapacitástól felfelé túlméretezés valósul meg a nyári időszakban.

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

Az értekezés kapcsolódó fejezetei: 4.3.1

- T3. Megállapítottam, hogy 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, amely az inverter lekapcsolásához vezet. A kritikus érték az inverter minimális bemeneti feszültségértékétől függ.**

Háttérmagyarázat: A napelemes rendszereknél az egyenáramú oldali hibák bizonyos típusai, például a szakadási hiba vagy a zárlat bármilyen formája tűzveszélyt jelenthet, e hibákat (pl.: átívelés) a korszerű inverterek észlelik és azonnal lekapcsolnak, ugyanakkor a nem drasztikus egyenáramú hibáknál elmondható, hogy azok fellépte termelés-csökkenési problémákat okoznak. Az egyenáramú oldali hibák, amelyeket vizsgáltam a szakadási hiba, rövidzárási hiba, földzárlati hiba, árnyékolási hiba és a 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 T3 tézishoz kapcsolódó saját publikáció: [S7]

Az értekezés kapcsolódó fejezetei: 5.1.2

- T4. Megállapítottam, hogy a napelem sztringben bekövetkező hibák számának növekedésével egyre alacsonyabb környezeti hőmérsékleten képes tartani az inverter a hálózat által igényelt feszültség-szintet, amely a működéshez és a hálózatra való visszatápláláshoz szükséges. A meghibásodott/kiesett panelek számának növekedésével az inverter visszatáplálási képessége csökken. A kritikus panel számra történő csökkenést követően az inverter működéséhez szükséges feszültségérték nem áll rendelkezésre, és ezért üresjáratú állapotba kapcsol.**

Háttérmagyarázat: Az inverterre kapcsolt napelemek optimális darabszámának meghatározása a hőmérsékleti együtthatók okozta változások mellett az inverter névleges teljesítményének együtteséből következik. Az inverter névleges teljesítményének legalább 80%-ával, maximum 120%-ával terhelhető. A választott inverternél a minimális panelszám 16 db, a névleges 20 db, a maximum pedig 24 db. Tehát, ha 20 db panel van és 1 db esik ki, akkor a DC oldalon 25%-os változást hoz létre. Azaz ennyivel csökken az aktuális és a minimális feszültség közötti különbség. 2 db panel kiesése esetén ez már 50%. 4 panel kiesésekor már a minimumra esik a feszültség. Ha melegszik az idő, akkor ez tovább csökken és az inverter lekapcsol, mert nem tud tovább szabályozni ahhoz, hogy az AC oldalon biztosan meglegyen a szükséges feszültség. Mindezek az okai annak, hogy napjainkban már a panelek számát túlméretezik az inverternél előírtakhoz képest, így csak a túlméretezés és a minimális közötti panelszám okoz változást.

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

Az értekezés kapcsolódó fejezetei: 5.1.3

- T5. Megállapítottam, hogy azonos besugárzási szint mellett jelentős eltérések léphetnek fel a harmonikus torzítás mértékében, különösen dinamikus környezeti változások, többek között felhőátvonulások miatt, amelyek hatására a torzítás mértéke akár a szabványos határértékeket is meghaladhatja.**

Háttérmagyarázat: 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 viszont egy esetleges felhőátvonulás miatt az inverternek dinamikusan kell szabályozni. További befolyásoló tényező a környezeti hőmérséklet, valamint a panelek hőmérséklete. A mérésekből és szimulációkból az látszik, hogy az inverter áramának THD értékét különböző napsugárzási szintek befolyásolják. Míg a reggeli órákban a mért áram harmonikus torzítás értéke 3-4% között mozog, a déli órákban a felhőátvonulások miatt ez az érték 14-16%-ra emelkedett, meghaladva a szabványos határértékeket. Mindkét esetben a besugárzás intenzitása 350 W/m^2 volt. Ezek az eredmények mutatják, hogy a harmonikus torzítás mértéke szorosan összefügg a környezeti tényezőkkel és az inverterek szabályozási dinamikájával, még azonos besugárzási körülmények között is.

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

Az értekezés kapcsolódó fejezetei: 5.2.3., 5.2.4.

- T6. A vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a háromszögmodellben a gazdasági pilléren belül a megtérülési idő számítása bír a legnagyobb befolyásoló erővel. A döntéshozatali folyamat során ez a pillér kiemelkedő jelentőségű, mivel két különböző rendszer összehasonlítása esetén ez hozza létre a legnagyobb pontszámkülönbségeket. Alapvető fontosságú, hogy az összehasonlítás során egységes gazdasági számítási módszereket alkalmazzunk, annak érdekében, hogy az eredmények összevethetőek legyenek és a döntések megalapozottak maradjanak.**

Háttérmagyarázat: A villamos energia ára közvetlen hatást gyakorol arra, hogy egy beruházás gazdaságilag megtérül-e, miközben a hálózati csatlakozás szintén meghatározó tényező. Ha a csatlakozási pont nagyobb távolságra található, az jelentősen növeli a beruházás költségeit, ami tovább befolyásolja a projekt megtérülési idejét. A gazdasági pillér egy másik fontos szempontja, hogy a beruházás saját forrásból finanszírozható-e, vagy szükség van-e külső támogatások, vagy hitelek igénybevételére. Ezek a tényezők együttesen határozzák meg, hogy egy projekt pénzügyi szempontból fenntartható-e, avagy sem. Különböző rendszerek összehasonlításakor elengedhetetlen, hogy azonos gazdasági számítási módszereket alkalmazzunk a valós összevethetőség érdekében. A háromszögmodell figyelembe veszi az összes releváns tényezőt, és képes kezelni a nulla értékeket is, amelyek egyes esetekben felmerülhetnek. Ha egy adott tényező nem releváns az adott rendszer számára, a modell ennek megfelelően kezeli azt, így biztosítva a pontos és kiegyensúlyozott elemzést.

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

Az értekezés kapcsolódó fejezetei: 6.3, 7.1, 7.2, 7.3, 7.4

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 szerteágazóbbá 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 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 szolgáltatssa 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 teljesítménycsökkenést, 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.

A háromszögmodell továbbfejlesztésének egyik fontos iránya a súlyozás alkalmazása. Ez azt jelenti, hogy az egyes pillérek különböző súlyokat kaphatnak annak függvényében, hogy a felhasználó számára melyik pillér bír nagyobb jelentőséggel. A súlyozás lehetővé teszi a modell finomhangolását és testreszabását, amely által a hangsúly olyan aspektusokra kerülhet, amelyek a leginkább relevánsak az adott helyzetben. Ezen megközelítés elemzése során érdemes megvizsgálni, hogy a különböző súlyértékek hogyan befolyásolják az eredményeket, és milyen irányba mozdítják el az elemzés hangsúlyait. Ezáltal mélyebb betekintést nyerhetünk a háromszögmodell rugalmasságába és annak képességébe, hogy alkalmazkodjon a felhasználói igényekhez és preferenciákhoz.

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.

One important direction in the further development of the triangle model is the application of weighting. This means that each pillar can be assigned different weights depending on which pillar holds greater significance for the user. Weighting allows for fine-tuning and customization of the model, enabling emphasis to be placed on aspects that are most relevant in a given situation. When analyzing this approach, it is worth examining how different weight values affect the results and how they shift the focus of the analysis. This, in turn, provides deeper insights into the flexibility of the triangle model and its ability to adapt to user needs and preferences.

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 szűnni 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.
- [S13] R. Lipták, I. Bodnár, *Analysis of Photovoltaic Systems from Energy Supply Security, Technological and Economic Aspects*, XXXIX. Kandó Konferencia 2023 Kiadvány kötet , ISBN: 978-963-449-357-0, 2024.

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra Szilícium alapú (a) mono- és (b) polikristályos cellák, (c) vékonyréteg cellák, (d) hibrid napelem cellák [2].....	10
2. ábra Napelem cella működési modellje.....	12
3. ábra A napelem (a) egyszerűsített és (b) valóságos helyettesítő kapcsolása.....	13
4. ábra A (a) megvilágítás és (b) hőmérséklet hatása a napelem panelre [11, 21]	13
5. ábra Áram-feszültség és teljesítmény-feszültség kapcsolata [11, 21]	15
6. ábra A napelemes rendszer egyenáramú oldalának részegységei [2].....	16
7. ábra Közvetlen csatolású szigetüzemű napelemes rendszer.....	17
8. ábra Közvetlen csatolású szigetüzemű napelemes rendszer DC-DC konverterrel.....	17
9. ábra Akkumulátor tárolós szigetüzemű napelemes rendszer.....	18
10. ábra Hálózat-interaktív szigetüzemű napelemes rendszer.....	18
11. ábra Hálózatszatolt napelemes rendszer akkumulátor telep nélkül	19
12. ábra Hibrid napelemes rendszer	20
13. ábra Szigetüzemre is alkalmas hibrid napelemes rendszerek dedikált leágazással	20
14. ábra Szigetüzemre is alkalmas hibrid napelemes rendszerek teljes leválasztással.....	21
15. ábra Háromszög modell elvi felépítése	24
16. ábra Villamos hálózat csatlakozási költség és távolság kapcsolata [44]	26
17. ábra Hagyományos villamosenergia ellátó rendszer felépítése [45]	28
18. ábra Akkumulátor használata lakossági felhasználás esetén.....	30
19. ábra Önfogyasztás görbék hétvégén és hétköznap	31
20. ábra Besugárzási görbék nyári és téli időszakban	31
21. ábra Nyári időszak hétvége fogyasztási görbe (a) 5 kWh, (b) 15 kWh, (c) 25 kWh akkumulátor kapacitás, (d) akkumulátor kapacitások értéke.....	32
22. ábra Nyári időszak hétköznap fogyasztási görbe (a) 5 kWh, (b) 15 kWh, (c) 25 kWh akkumulátor kapacitás, (d) akkumulátor kapacitások értéke.....	33
23. ábra Téli időszak hétvége fogyasztási görbe (a) 5 kWh, (b) 15 kWh, (c) 25 kWh akkumulátor kapacitás, (d) akkumulátor kapacitások értéke.....	34
24. ábra Téli időszak hétköznap fogyasztási görbe (a) 5 kWh, (b) 15 kWh, (c) 25 kWh akkumulátor kapacitás, (d) akkumulátor kapacitások értéke.....	35
25. ábra Váltakozó feszültség jelalakja	37
26. ábra Az összeállított mérés validáláshoz.....	38
27. ábra Validált napelemes rendszer kapcsolási rajza (a) F1 szakadás, F2 rövidzár, F3 földelési hibák; (b) F4 árnyékolási hiba, F5 bypass dióda hiba.....	38
28. ábra A mérés (a) feszültség-áramerősség, (b) feszültség-teljesítmény jelleggörbe.....	39
29. ábra A szimuláció (a) feszültség-áramerősség, (b) feszültség-teljesítmény jelleggörbe	39
30. ábra Vizsgált napelemes rendszer kapcsolási rajza	41
31. ábra F1 Szakadási hiba (a) első eset, (b) második eset.....	42
32. ábra F1 Szakadási hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe	42
33. ábra F2 zárlat hiba (a) első eset, (b) második eset.....	43
34. ábra F2 Szakadási hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe	43
35. ábra F3 földelési hiba (a) első eset, (b) második eset.....	44
36. ábra F3 földelési hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe	44

37. ábra F4 árnyékolási hiba (a) első eset, (b) második eset.....	45
38. ábra F4 árnyékolási hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe.....	45
39. ábra F5 bypass dióda hiba (a) első eset, (b) második eset.....	46
40. ábra F5 bypass dióda hibák (a) feszültség-teljesítmény, (b) feszültség-áramerősség jelleggörbe	46
41. ábra Feszültség értékek változása a hőmérséklet függvényében a napelemes rendszer (a) egyenáramú és (b) váltakozó áramú oldalán normál üzemállapot esetén	48
42. ábra Feszültség értékek változása a hőmérséklet függvényében a napelemes rendszer (a) egyenáramú és (b) váltakozó áramú oldalán 1 panel hiba esetén	49
43. ábra (a) Napelemes termelés normál üzemállapot esetén, (b) termelés kiesése feszültségemelkedés miatt.....	50
44. ábra A rendszerben használt napelem modul görbéi	54
45. ábra A vizsgált napelemes rendszer felépítése	54
46. ábra A napsugárzás értéke a vizsgálat során	55
47. ábra A külső hőmérséklet a vizsgálat során	55
48. ábra A feszültség és áram hullámalakja 260-400 W/m ² besugárzás esetén	56
49. ábra Az áram harmonikus összetevői 260-400 W/m ² besugárzás esetén	56
50. ábra A feszültség és az áram RMS értékének trendje	57
51. ábra A feszültség és az áram THD értékének trendje.....	57
52. ábra Az áram és a feszültség RMS trendjének változása az árnyékhata következtében.....	58
53. ábra Az áram és a feszültség THD trendjének változása az árnyékhata következtében	58
54. ábra A szimulált napelemes rendszer felépítése.....	59
55. ábra A rendszerben használt napelem modul görbéi szimulációs környezetben.....	59
56. ábra A szimulált hálózati feszültség szinuszos hullámformája	60
57. ábra Az áram THD ₁ 820 W/m ² besugárzás mellett.....	60
58. ábra Az áram jelalakja 820 W/m ² besugárzás mellett	61
59. ábra Az áram THD ₁ 350 W/m ² besugárzás mellett.....	61
60. ábra Az áram jelalakja 820 W/m ² besugárzás mellett	62
61. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek energiaellátás biztonság részpontszáma	76
62. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek technológiai vizsgálatok részpontszáma	77
63. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek gazdasági aspektusok részpontszáma.....	77
64. ábra Vizsgált szigetüzemű rendszerek összpontszáma.....	77
65. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek energiaellátás biztonság részpontszáma.....	78
66. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek technológiai vizsgálatának részpontszáma.....	78
67. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek gazdasági aspektusainak részpontszáma.....	79
68. ábra Vizsgált hálózatos rendszerek összpontszáma	79

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat. Villamos hálózat pontozási rendszere.....	27
2. táblázat. A fogyasztók energiaellátásával kapcsolatos pontozási rendszer	29
3. táblázat. A rendszer energiatároló képességével kapcsolatos pontozási rendszer.....	35
4. táblázat. A szimuláció során használt napelem adattábla adatai	40
5. táblázat. Az inverter adattáblája	47
6. táblázat. A napelemek adattábláját	47
7. táblázat. A feszültségérték változással kapcsolatos pontozási rendszer.....	50
8. táblázat. Az inverter adatlapja	53
9. táblázat. A napelem panel adatlapja	54
10. táblázat. A THD változása ugyanazon besugárzási értékeknél	62
11. táblázat. A Teljes harmonikus torzítás értékével kapcsolatos pontozási rendszer	63
12. táblázat. Az öregedéssel kapcsolatos pontozási rendszer	64
13. táblázat. Az egyes napelemes rendszerek beruházással kapcsolatos részegységei	66
14. táblázat. A beruházási költségekkel kapcsolatos pontozási rendszer	66
15. táblázat. A karbantartási költségekkel kapcsolatos pontozási rendszer.....	67
16. táblázat. A megtérülési idővel kapcsolatos pontozási rendszer.....	70
17. táblázat. A vizsgált szigetüzemű rendszerek beruházási költségei.....	72
18. táblázat. A vizsgált szigetüzemű rendszerek megtérülési ideje.....	72
19. táblázat. A háromszögmodell pontozási eredményei a vizsgált szigetüzemű rendszerek esetén	73
20. táblázat. A vizsgált hálózatcsatolt rendszer beruházási költségei	73
21. táblázat. A vizsgált hálózatcsatolt rendszer megtérülési ideje	74
22. táblázat. A háromszögmodell pontozási eredményei a vizsgált hálózatcsatolt rendszer esetén.....	74
23. táblázat. A hibrid rendszerek beruházási költségei	75
24. táblázat. Megtérülési idő hibrid rendszerek esetén.....	75
25. táblázat. A háromszögmodell pontozási eredményei a vizsgált hibrid rendszer esetén	76

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. Gao¹, 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. Connelli, 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 Füzetek, 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 hatásfokú félvezető alapú napelemek*. Ph.D. értekezés, Szent István Egyetem, 2015, doi: 10.14751/SZIE.2015.025
- [20] E. Földvály-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. Hatziaegyriou, *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/PESS.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.
- [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/szakcikkekink-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., Šljivic 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. Szanlanci , *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.
- [105] R. Aliyev, H. Temizkan, R. Aliyev, *Fuzzy Analytic Hierarchy Process-Based Multi-Criteria Decision Making for Universities Ranking*. Symmetry 2020, 12, 1351. <https://doi.org/10.3390/sym12081351>
- [106] V. Ludovic-Alexandre, M. Franck, B. Jean-Claude, *Using a Delphi process and the Analytic Hierarchy Process (AHP) to evaluate the complexity of projects*, Expert Systems with Applications, Volume 38, Issue 5, 2011, Pages 5388-5405, ISSN 0957-4174, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.10.016>.
- [107] L. E. Quezada, E. A. Reinao, P. I. Palominos, A. M. Oddershede, *Measuring Performance Using SWOT Analysis and Balanced Scorecard*, Procedia Manufacturing, Volume 39, 2019, Pages 786-793, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.430>.
- [108] S. Quoilin, K. Kavvadias, A. Mercier, I. Pappone, A. Zucker, *Quantifying self-consumption linked to solar home battery systems: Statistical analysis and economic assessment*, Applied Energy, Volume 182, 2016, Pages 58-67, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.077>.
- [109] C.J. Sarasa-Maestro, R. Dufo-López, J.L Bernal-Agustín, *Analysis of Photovoltaic Self-Consumption Systems*. Energies 2016, 9, 681. <https://doi.org/10.3390/en9090681>