

TDK dolgozat

2023

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK



Háztartási méretű fotovoltaikus rendszerek kihasználtságának és megbízhatóságának javítása energiatároló alkalmazásával termelés- és fogyasztás előrejelzések alapján

Improving the utilization and reliability of household-scale photovoltaic systems by applying energy storage based on production and consumption forecasts

Tóth-Kovács Gellért

Konzulens: Dr. Mayer Martin János

Kézirat lezárásának dátuma: 2023.11.05.

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS.....	4
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS, ELŐZMÉNYEK	5
2.1. Napenergia-hasznosítás.....	5
2.1.1. Napelemek működése és jellemző típusai	7
2.1.2. Fotovoltaikus rendszerek felépítése és működése	9
2.2. Villamosenergia-tárolás: elektrokémiai energiatárolók (akkumulátorok)	11
2.2.1. Savas ólomakkumulátor	13
2.2.2. Nikkel akkumulátorok	14
2.2.3. Lítium ion akkumulátorok	16
2.2.4. Redox folyadékáramú akkumulátorok	18
2.3. Háztartási méretű energiatárolás technológiai lehetőségei	20
2.3.1. Hazai vonatkozású energiatárolási gyakorlatok.....	21
2.3.2. Nemzetközi vonatkozású energiatárolási gyakorlatok.....	22
3. KUTATÁSI MÓDSZERTAN	25
3.1. Kiindulási adatok	25
3.2. Energiatárolási stratégiák	27
3.3. Kiértékelés szempontrendszer	35
4. EREDMÉNYEK, KIÉRTÉKELÉS	40
4.1. Előrejelzések nélküli, ideális stratégiák	40
4.2. Előrejelzéseken alapuló, realisztikus stratégiák	47
4.3. Termelés előrejelzések pontossága	51
5. DISZKUSSZIÓ	52
6. ÖSSZEFOGLALÁS	54
IRODALOMJEGYZÉK.....	55

1. BEVEZETÉS

Magyarországon a különféle pályázati támogatásoknak és a kedvező klímafeltételeknek köszönhetően a háztartási méretű kiserőművek (HMKE) esetében a napenergia vált a legelterjedtebb energiaforrássá. A Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal adatpublikációja szerint a 2023-as év második negyedévének végére összesen 212775 darab (ebből lakossági: 185434 darab), együttesen 1899 MW névleges teljesítményű (ebből lakossági: 1344 MW) fotovoltaikus rendszer telepítése valósult meg országszerte. Háztartási méretben más energiaforrás alkalmazása nem jelentős, ugyanis mindössze 179 darab, együttesen 2,1 MW névleges teljesítményű rendszer lett csatlakoztatva a magyar villamosenergia-hálózatra [1].

A háztartási méretű fotovoltaikus kiserőművek energiatermelése legtöbbször nem esik egybe a fogyasztóoldali terheléssel, ezért a meglévő és a jövőben telepítésre kerülő rendszerek energia- és költséghatékony üzemeltetéséhez várhatóan meg fog nőni a lakossági igény a villamosenergia tárolására. Jelen pillanatban a legtöbb háztartási méretű fotovoltaikus rendszer a kisfeszültségű villamosenergia-hálózatot használja energiatárolóként, azonban a szaldó elszámolás kivezetésével a megtermelt, de el nem fogyasztott villamosenergia eltárolására fizikai energiatárolók létesítése jöhet szóba. Egy energiatároló lehetővé teszi, hogy a prozumer a túlermelését egy későbbi időpontban felhasználhassa, növelve ezáltal a helyben felhasznált megújuló villamosenergia részarányát, továbbá csökkentve a prozumer energiaköltségeit. Az energiarendszer szempontjából azonban kedvezőbb, ha a prozumer a teljesítménycsúcsok levágására törekszik, azonban ez a fogyasztó érdekeivel nehezen összeegyeztethető. Ahhoz, hogy mindkét fél érdekei a legnagyobb mértékben teljesülhessenek, az energiatároló töltését és kisütését termelés- és fogyasztás előrejelzés alapján célszerű megtervezni.

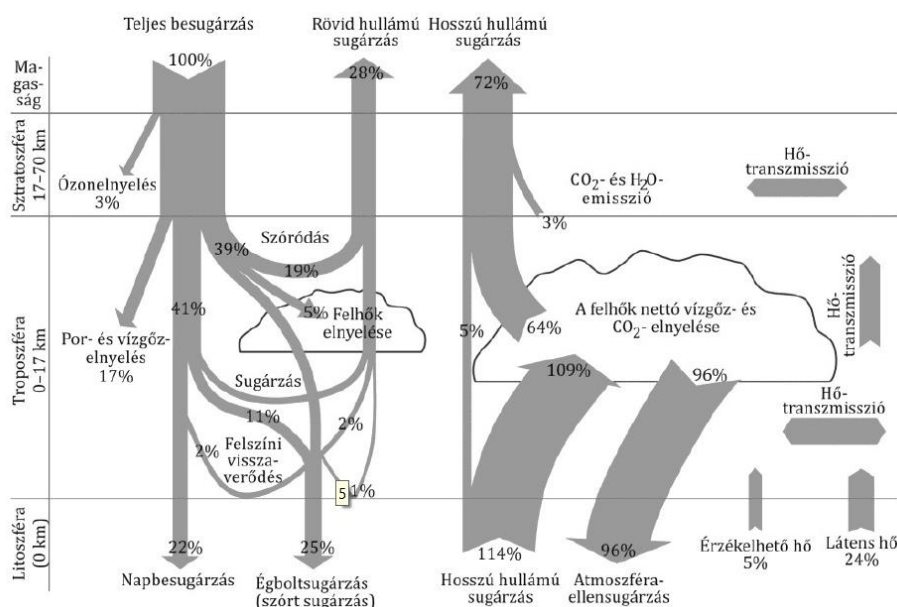
Jelen dolgozatban bemutatásra kerül a napenergia fotovoltaikus hasznosításának elméleti háttere, illetve a megtermelt villamosenergia tárolásának technológiai háztartási méretű rendszerek esetén. A tanulmány fókuszában egy olyan energiatároló tervezése áll, amelynek töltése és kisütése termelés- és fogyasztás előrejelzések alapján valósul meg a fenti tényezők teljesülésének érdekében. Ebben a dolgozatban egy energiatároló nélküli referenciaeset, egy nem szervezett és négy szervezett, energiatároló alkalmazásán alapuló ideális eset, illetve hat előrejelzésen alapuló valóságos eset kerül tárgyalásra. A realisztikus scenáriók ECMWF, AROME és perzisztencia előrejelzések eredményei alapján kerülnek megvizsgálásra. A kutatás célja elősegíteni a fotovoltaikus rendszer által megtermelt villamosenergia részarányának növelését, a szaldó elszámolás kivezetése miatt felmerülő költségek minimalizálását, illetve a villamosenergia-hálózat csúcsterheléseinek és igénybevételének csökkentését.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS, ELŐZMÉNYEK

2.1. Napenergia-hasznosítás

A napenergia a Nap sugárzásából származó energia, amely a Föld atmoszféráján keresztül jut el a bolygó felszínére. A Föld felszínére érkező napsugárzás mértéke szezonális ingadozást mutat, ami a Föld saját tengelye körüli forgásából és a Nap körüli keringéséből következik. A Földre érkező napenergia mennyisége függ az aktuális Nap–Föld távolságtól is. Optimális, vagyis teljesen függőleges beesési szög esetén ez az érték $1307\text{--}1399\text{ W/m}^2$ között váltakozik. A Nap sugárzási energiájának globális átlagát nevezzük szolárállandónak, melynek pontos értékét $1367,7\text{ W/m}^2$ -ben határozták meg [2].

A Nap besugárzási energiájának mennyiségét több tényező befolyásolja (1. ábra). A Földre érkező napsugárzás körülbelül 30%-a közvetlenül a világűrbe verődik vissza (20% a felhőkről, 6% az atmoszféráról, 4% a földfelszínről), és körülbelül 19%-a az atmoszférában nyelődik el (16% a felső atmoszférában, 3% a felhőkben). A fennmaradó besugárzási érték a talajban, a tengerekben és az óceánokban nyelődik el. A Föld felszínéről visszaverődő energia elsősorban a levegőt fűti, valamint vizet párologtat. A Nap sugárzásának intenzitása függ továbbá még az atmoszféra állapotától (az égbolt felhősségétől), a légszennyezettségtől (porszennyezés), az ózon állapotától, a relatív páratartalomtól, valamint a tengerszint feletti magasságtól (vagyis a levegő sűrűségétől) is [2]. Függően az említett tényezőktől és a szezonális ingadozásoktól, a földfelszínre jutó energia nagysága $200\text{--}1000\text{ W/m}^2$ között ingadozik [3].



1. ábra: A Földre érkező napenergia csökkenése az atmoszférában [2]

A napenergia alapvetően a bolygó jelenlegi népességének teljes energiaigényét képes lenne fedezni, azonban a hasznosítás mértéke és a napenergia energiastratégiákban töltött szerepe több tényezőtől függ [3]. Az általános probléma a napenergia hasznosításával kapcsolatban az, hogy a Naptól érkező, elképesztő mennyiségű energiát jelenleg csak korlátozott mértékben lehet energiatermelésre hasznosítani. Ennek legfőbb okai a napenergia kicsi energiasűrűsége, a napi és szezonális ingadozások a besugárzás intenzitásában, illetve a nem állandó klímafeltételek. Fontos továbbá megjegyezni, hogy a napközbeni besugárzás intenzitása nem feltétlen esik egybe a villamosenergia-felhasználással, illetve a villamosenergia tárolása még problematikus és költséges. A napelemekkel történő (fotovoltaikus) villamosenergia-termelés fajlagos beruházási költségei magasabbak a hagyományos, fosszilis energiatermeléshez képest, viszont ez igaz más megújuló energiaforrásokra (elsősorban a szélre és a geotermiára) is [2].

Napjainkra az azonban egyértelművé vált, hogy a jövőben egyre nagyobb szükség lesz a megújuló energiaforrások széleskörű elterjedésére és alkalmazására, mivel a környezet egyre nagyobb mértékű szennyezésnek van kitéve, továbbá a fosszilis energiahordozók a jövőben kiapadhatnak, mely az energiaforrások árának növekedéséhez vezethetnek [2]. A folyamatos kutatásnak, fejlesztésnek és innovációnak, valamint az egyre széleskörűbb alkalmazásnak köszönhetően a megújuló energiaforrások, így a napenergia fotovoltaikus és fototermikus hasznosításának fajlagos beruházási költségei is folyamatosan csökkennek.

A napenergia hasznosításának potenciálja elsősorban a napsütéses órák számától függ, melyet a szóban forgó terület földrajzi fekvése és éghajlata befolyásol. Figyelemfelkeltő az a tendencia, hogy évről évre egyre magasabb a napsütéses órák száma világszerte, melyet a klímaváltozással hoztak elsőként kapcsolatba. Magyarországon a napsütéses órák száma átlagosan 1800–2100 óra között váltakozik éves szinten, viszont vannak országrészek, ahol akár elérheti a 2500 órát is. Magyarországon az elméleti fotovoltaikus potenciál kutatások alapján 1749 PJ/év (486,8 TWh/év), míg az elméleti fototermikus potenciál 48,8 PJ/év (13,6 TWh/év). A műszaki- és a gazdasági potenciál ennél az értéknél természetesen sokkal kevesebb, viszont az egyértelműen látszik a fenti értékekből, hogy a napenergia kifejezetten jelentős szerepet tudna betölteni Magyarország energiastratégiájában és energiamixében [2].

A napenergia hasznosítására különböző passzív és aktív technológiai megoldások léteznek. Passzív hasznosítás esetén a napenergia közvetlenül, külön eszköz vagy berendezés nélkül kerül hasznosításra. Erre példa lehet akár a direkt napsugárzás épületen belüli elnyelése és tárolása, illetve az épület helyiségeinek légterébe történő átadása. A napenergia passzívan mindössze tudatos tervezéssel, megfelelő építőanyag választásával, megfelelő tájolással és hőszigeteléssel külön beruházás nélkül is hasznosítható. A napenergia aktív hasznosításához viszont

mindenképp szükség van külön berendezésekre. A napenergia aktívan napkollektorok (fototermikus) és napelemek (fotovoltaikus) alkalmazásával hasznosítható. A napkollektorok a Nap sugárzási energiáját egy zárt rendszerben lévő hőhordozó közegnek, általában víznek vagy levegőnek adják át. Napkollektorokkal elsősorban fűtési és használati melegvíz állítható elő, főként lokális alkalmazásra. A napelemek ezzel szemben a napsugárzást villamosenergiává alakítják át, melyet közvetlenül lokálisan, illetve hálózatba való betáplálás esetén térben eltérő helyen is fel lehet használni [3].

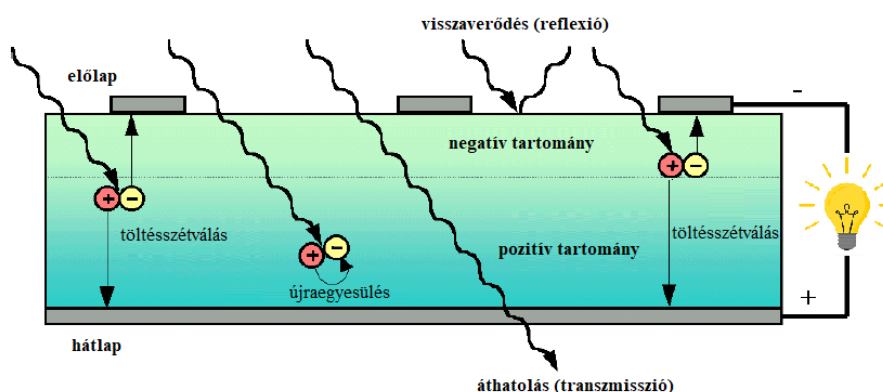
Egy háztartási méretű rendszer esetén korlátozó tényező lehet a tetőfelület nagysága, ezért a tervezett beruházás előtt célszerű mérlegelni azt, hogy villamosenergiára vagy melegvízre van-e nagyobb igény a háztartásban, és az alapján érdemes dönteni a napelemes vagy napkollektoros rendszer között [2]. Egy napkollektoros rendszer mellé szükség lehet hőtárolóra (szolártároló) – a hőveszteségek csökkentése érdekében – abban az esetben, ha a melegvíz előállítása és felhasználása időben lényegesen eltér [3]. Egy napelemes rendszer esetén azonban nincs feltétlenül szükség fizikai tárolóra, hiszen a megtermelt villamosenergia „tárolásához” a kisfeszültségű villamosenergia-hálózat is igénybe vehető.

Háztartási méretű fogyasztók esetében a napelemekkel történő villamosenergia-termelés javasolt inkább, mivel a villamosenergia egy jól szállítható, közel univerzálisan felhasználható, nehezen helyettesíthető energiahordozó. Ennek tudatában kijelenthető, hogy a villamosenergia lényegesen értékesebb a hővel szemben, ezért kizárólag a napelemekkel (fotovoltaikus) történő energiatermelés kap hangsúlyt ebben a dolgozatban.

2.1.1. Napelemek működése és jellemző típusai

A napelemek a fényelektromos hatás (fotovoltaikus effektus) kihasználásával képesek a rövidhullámú napsugárzás energiáját közvetlenül átalakítani villamosenergiává. A napsugárzás apró részecskékből, úgynevezett fotonokból tevődik össze. A megfelelő hullámhosszúságú napfény fotonjai a napelemes cella pozitív- és negatív tartománya között elhelyezkedő zónában – pozitív-negatív átmenetű, szilíciumkristály alapú félvezető rétegben – elnyelődhetnek, arról visszaverődhetnek, vagy azon áthatolhatnak (2. ábra). Kizárólag azok a fotonok nyelődnek el a napelemes cellákban, amelyek szabad elektronjaikat leadják. Az elnyelődő fotonok a semlegesített zónában átadják energiájukat a felületek elektronjainak, melyek szabadabbá válva mozogni kezdenek. A kimozdított elektronok helyén úgymond „lyukak” keletkeznek, melyek szintén képesek elmozdulni. A cellában elektromos tér úgy jön létre, hogy a kimozdított elektronok a negatív félvezető felé, míg a lyukak a pozitív félvezető felé kezdenek el áramlani. Az elektronok a napelemekhez csatlakoztatott külső áramkörrel a cella alja felé áramló lyukakat

feltöltik, melyek további fotonok segítségével képesek lesznek újra szétválni a pozitív-negatív átmenetű félvezető rétegben. Egyetlen pozitív-negatív réteggel rendelkező fotovoltaiikus cella elméleti hatásfoka – a Shockley–Queisser határérték értelmében – legfeljebb 33% lehet, ugyanis jelentős veszteségek jelentkeznek elsősorban a félvezető karakterisztikájából (21%), a cella napfény visszaverődéséből (31%) és a cella maximális feszültségkorlátjából (12%) [2][4].



2. ábra: Egy napelemcellában jellemzően lezajló folyamatok [5]

Napjainkban a monokristályos és polikristályos – szilícium félvezetős – napelemek uralják a piacot, azonban az új technológiákon alapuló szerves anyagok, műanyagok vagy vékonyfilm alapú, eltérő félvezetőkkel kombinált napelemek a jövőben várhatóan egyre piacképesebbek lesznek. A kereskedelemben kapható monokristályos cellák jellemző hatásfoka 18-20%, a polikristályosaké 14-18% közötti, míg a vékonyrétegűeké rendszerint 6-12% között alakul. A jövő napelemes technológiái elsősorban a cellák alacsony hatásfokának javítását, illetve a beruházási költségek csökkentését kívánják megcélolni azért, hogy minél versenyképesebbek legyenek a konvencionális energiahordozókkal és technológiákkal szemben [2][6].

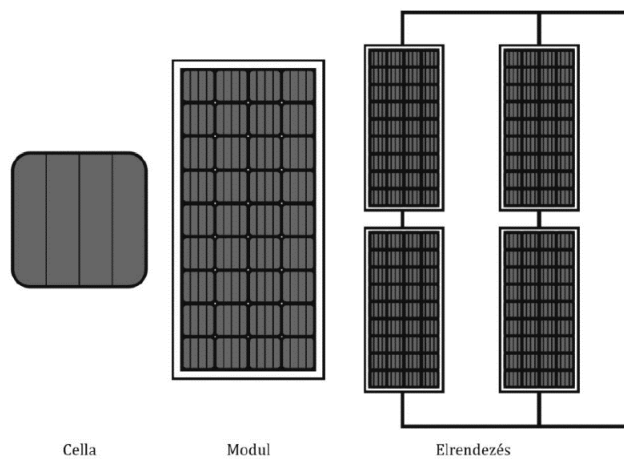
A monokristályos (egykristályos) napelemcellákat az úgynevezett Czochralski eljárásból készült, henger alakú szilícium darabolásából állítják elő. A cellák előállításához a szilícium hengert általában álnégyszet alakú lapokra vágják, ezzel minimalizálva a feldolgozott szilícium hulladékmennyiségét. Ebből kifolyólag a monokristályos szilíciumból készített napelem modul területének egy része nincs lefedve napelemcellával. A cellák egységesen egy irányba vannak igazítva, ezért akkor működnek igazán hatékonyan (közel névleges hatásfokkal), amikor a napfény a megfelelő szögben, nagy intenzitással éri a napelem felületét. A monokristályos napelemek egységesebb, feketés színűek, amivel képesek elnyelni a fény nagy részét. A tiszta napelemcellák jellemzően nyolcszögletűek, bár léteznek félig vagy teljesen kerek cellák is. A monokristályos technológia legfőbb előnye a magas hatásfok, bár a modulok gyártási folyamata

bonyolult és költséges. Laboratóriumi körülmények között a monokristályos napelemek hatásfoka elérheti akár a 25-30%-ot is. A monokristályos cellák előállítási költsége valamivel magasabb, mint a polikristályosaké, azonban manapság nincs sok különbség az árak között [6].

A polikristályos (többkristályos) szilícium kristályszerkezete – a monokristályossal ellentétben – nem homogén eloszlású, ezáltal a polikristályos napelemcellák szemcsehatárokkal rendelkeznek. A napelemcellák gyártásához használt szilíciumot olvadt állapotban jellemzően grafittegelyekbe öntik, majd a hűtés szabályozásával kristályosítják ki. A kristályosodás a hűtési folyamat közben több pontból is megindul. A napelemek alapját képező szilíciumlapokat négyzet alakú rudakból vágják ki, és komplett cellákká, majd később modulokká állítják össze. A polikristályos szilíciumból készült napelemek alapvetően olcsóbbak, mint a monokristályos napelemek, ám ezeknek a típusú napelemeknek alacsonyabb a hatásfokuk – a szemcsehatárok következtében –, mivel az egyes szilíciumkristályok nem illeszkednek tökéletesen egymáshoz, ezáltal a cellák közti rések miatt veszteségek lépnek fel. Bizonyos körülmények között azonban hatékonyabbak tudnak lenni a monokristályos napelemekhez képest, ugyanis a napelemcellák nemcsak egy adott szögből megvilágítva tudnak működni, hanem a különböző szögekből érkező fényt, valamint akár a szórt vagy gyenge intenzitású napfényt is képesek hasznosítani. A polikristályos napelemek megjelenése is eltérő a véletlenszerű kristályelrendezés miatt. A modulok a napfény visszaverődése miatt jellemzően kissé kékesebbek. A polikristályos napelemek az egyszerűbb gyártási folyamat miatt korábban lényegesen olcsóbbak voltak, mint a monokristályos modulok, de napjainkban azonban az árak nagyon hasonló. A polikristályos napelemcellák hatásfoka 14-18% között alakul, viszont megfelelő laboratóriumi környezetben, úgynevezett sztenderd teszt körülmények között elérheti akár a 20%-ot is [6].

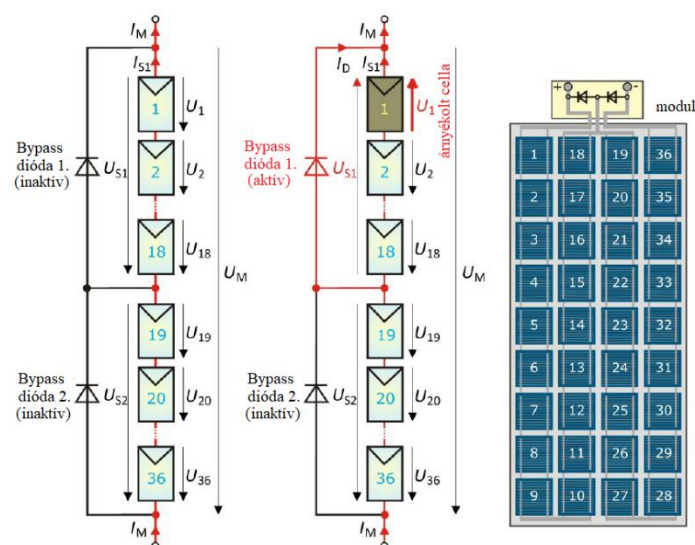
2.1.2. Fotovoltaikus rendszerek felépítése és működése

Egy napelemcella, egy pozitív-negatív réteggel körülbelül 0,5 V feszültség előállítására képes, ezért ritkán alkalmaznak egyetlen napelemcellát a gyakorlatban. A teljesítménynövelés érdekében ehelyett modulokba rendeznek napelemcellákat (modulsort). Egy fotovoltaikus rendszer – egy háztartási méretű kiserőmű esetében is – villamosenergia-igénytől függően több modulból áll. Egy modulban a napelemcellák, illetve egy fotovoltaikus rendszerben a modulok egy része sorosan (feszültségnövelés), míg egy része párhuzamosan kapcsolt (áramerősségnövelés). A modulok kapcsolásának kombinálását, vagyis a modulok rendszerbe szervezését egyes forrásokban elrendezésnek, másokban pedig panelnak nevezik (3. ábra) [2][7].



3. ábra: A fotovoltaikus cella, a modul és az elrendezés (panel) [2]

Egy napelemes (fotovoltaikus) rendszer a fotovoltaikus modulok integrált elrendezésén túl más (kiszolgáló) komponensekből tevődik össze. Ilyen komponensek a tartószerkezet, az MPPT szabályozó, a DC/AC inverter(ek) és – a lehetőségekhez mérten – az energiatárolók. A maximális teljesítményű munkapont követés (MPPT) lehetővé teszi egy mikroprocesszor által vezérelt napelemes szabályozó segítségével, hogy a rendelkezésre álló lehető legnagyobb teljesítményt lehessen kivenni a napelem(ek)ből a napsugárzás intenzitásától függően [2]. A modul celláit azonban nem minden esetben éri egyenletes napsugárzás. Egy leárnyékolott cella magas áramerősség esetén fogyasztóként viselkedik egy modulban. Az árnyékhataás a modul teljesítményének lecsökkenése mellett hőfejlődéssel jár, mely akár a cella meghibásodásához is vezethet. Ennek elkerülése érdekében úgynevezett bypass diódákat alkalmaznak a modulban, melyek csak akkor lépnek működésbe, ha legalább egy cella árnyékolásban van (4. ábra) [5].



4. ábra: A bypass dióda szerepe a modul működésében árnyékolt cella esetén [5]

Egy napelemes rendszer működése szempontjából lehet hálózattal együttműködő (on-grid) és szigetüzemű (off-grid) rendszer. A háztartási méretű fotovoltaiikus kiserőművek jellemzően hálózattal együttműködő rendszerek. A napelemek termelésük során egyenfeszültséget (DC) hoznak létre, melyet váltakozó feszültséggé (AC) kell átalakítani ahhoz, hogy a legtöbb villamosenergiával működő berendezést működtetni lehessen. Hálózatra kötött napelemes rendszerek esetén a megtermelt villamosenergiát egy teljesítmény-szabályozó egységhez (inverterhez) vezetik, amely az egyenáramot – a hálózattal megegyező feszültségű, frekvenciájú és jelalakú – váltakozó árammá alakítja át. Amennyiben a termelés kisebb, mint az ingatlan éppen aktuális energiaigénye, az igények kielégítéséhez a teljesítmény-szabályozó egység kiegészítő energiát vételez a villamosenergia-hálózatról. Túltermelés esetén a villamosenergia-többlet a villamosenergia-hálózatra kerül betáplálásra. A villamosenergia-forgalom mérése egy olyan elektronikus fogyasztásmérővel kerül megvalósításra, mely külön-külön méri a vételezett és a betáplált villamosenergia mennyiségét. Háztartási méretű fotovoltaiikus rendszerek esetén az elszámolás napjainkban évente történik szaldó képzésével, azaz a fogyasztásmérő által rögzített értékek különbsége alapján. Egy hálózattal együttműködő rendszer megtervezése és kialakítása relatíve egyszerűbb, mivel a hálózati csatlakozás és a villamosenergia szaldós elszámolás miatt alapvetően nincs szükség fizikai energiatároló(k)ra, azonban vannak esetek, amikor a közműszolgáltatás instabilitása miatt kiegészítő energiatároló kiépítésére kerül sor [2].

2.2. Villamosenergia-tárolás: elektrokémiai energiatárolók (akkumulátorok)

A villamosenergia-tárolás – az időjárásfüggő megújulóknak vonatkozásában – lehetővé teszi, hogy a fogyasztói igényeket aktív termelés hiányában is ki lehessen elégíteni. Az energiatárolók alapvetően olyan berendezések, melyek a betárolni kívánt energiát eredeti vagy átalakított formában (potenciális, kinetikai, kémiai) képesek megőrizni. A villamosenergia tárolására napjainkban többféle technológiai megoldás létezik. Az energiatárolási technológiák legegyszerűbben aszerint csoportosíthatók, hogy az energia milyen formában kerül eltárolásra. A tárolt energiaforma szerint megkülönböztetünk mechanikai (szivattyús tározós vízerőmű, sűrített levegő tárolós erőmű, lendkerék), villamos (szuperkondenzátor, szupravezető mágneses energiatároló) és kémiai (akkumulátorok, P2G technológiák) alapú energiatárolókat. Egy adott technológia alkalmazhatósága a fajlagos energiasűrűségtől, tárolás hatásfoktól (ciklushatásfok), a hozzáférési időtől és a tárolási-kisütési teljesítménytől függ elsősorban [8].

Az energiatároló kiválasztása előtt fontos meghatározni, hogy mekkora mennyiségű villamosenergiát kell tudni eltárolni, és hogy milyen tárolási hatásfok, ciklusszám és költségek mellett képes azt az energiatároló a fogyasztó számára biztosítani. A helyzeti energián alapuló

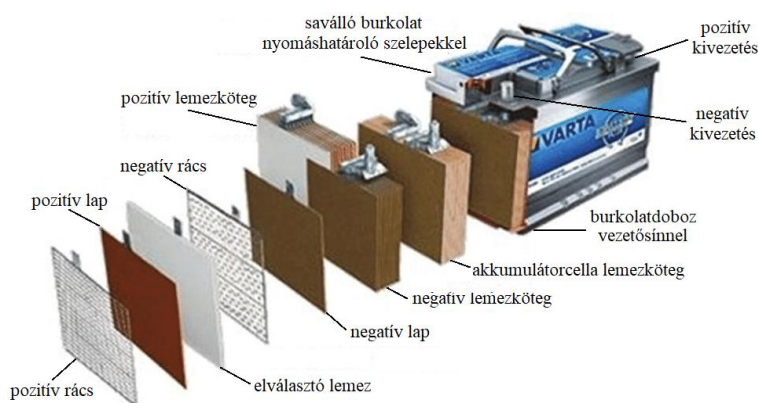
(szivattyús tározós, sűrítettlevegős) mechanikai tárolók nagy mennyiségű energia tárolására szolgálnak, azonban a kiépítésük rendkívül költséges és időigényes. A lendkerekes tárolók kifejezetten rugalmasak a méretezésük szempontjából, viszont a betárolt energiát csak rövid ideig képesek jó hatásfokkal eltárolni. A szuperkondenzátorok alkalmazásának köre egyre szélesedik a magas hatásfokuk, fajlagos teljesítményük és ciklusszámuk miatt, azonban nagy mennyiségű energia tárolása esetén rendkívül helyigényesek tudnak lenni. A szupravezetők a szuperkondenzátorokhoz hasonlóan magas fajlagos teljesítménnyel és korlátlan ciklusszámmal rendelkeznek, viszont az energiatárolás hatásfoka a szupravezetők állandó hűtése miatt az energiatárolás időtartamának függvényében folyamatosan csökken. A kémiai alapú tárolási technológiák a jövőben egyre elterjedtebbek lesznek a magasabb energiasűrűségük és a jobb szállíthatóságuk miatt, azonban az energiaátalakítás összhatásfoka lényegesen alacsonyabb, mint az előbb említett technológiáké, illetve az előállított gázok nem megfelelő tárolása és szállítása robbanáshoz vezethet. Egy elektrokémiai energiatároló (akkumulátor) a fent említett technológiákkal szemben relatíve egyszerűbb, kompaktabb és jobban méretezhető, ezért a háztartási méretű kiserőműveknél az energia tárolását ezekkel érdemes megvalósítani [8].

Az elektrokémiai energiatárolókban (akkumulátorokban) a villamosenergiát töltéshordozók tárolják, melynek töltése és kisütése során a katódon és az anódon végbemenő reakciófolyamatoknál (oxidáció és redukció) ionok átalakulására, továbbá elektronok felvételére vagy leadására kerül sor. Az energiatároló töltésére nyilvánvalóan csak abban az esetben kerülhet sor, ha a tároló aktuális feszültségénél magasabb feszültségű külső energiaforrás van csatlakoztatva. Töltés során az ugyanabban az elektrolitban lévő elektródák között potenciálkülönbség lép fel. A fém elektródák fázishatárán lévő ionok az elektrolitba vándorolnak, az elektronok pedig a fém kristályrácsban maradnak (oxidáció). A tároló kisütése esetén az ionok az elektrolit oldatból a kristályrácsba vándorolnak, ezzel pozitív töltést eredményezve a fém elektródában (redukció). Az elektródákat a rajtuk végbemenő reakciók alapján anódnak és katódnak nevezik. Az elektronok leadása (az oxidációs folyamat) az anódon, míg az elektronok felvétele (a redukciós folyamat) a katódon zajlik le. Az energiatároló töltésekor az anód a pozitív elektróda, míg annak kisütésekor a katód válik a pozitív elektródává. Az elektrokémiai energiatárolókban legalább két sorba kapcsolt elektródát alkalmaznak a gyakorlatban. Az elektródák közötti feszültségkülönbség (cellafeszültség) az egyes elektródák potenciáljainak összegéből számítható ki. Az akkumulátorok tárolási kapacitását jellemzően amperóraban (betárolható töltésmennyiségben) határozzák meg. A betárolható töltésmennyiség elsősorban a terhelő áramerősségtől, az üzemi körülményektől (főként a hőmérséklettől) és a megengedett kisütés végi feszültségtől (cutoff voltage) függ. A

cellák összehasonlítására leggyakrabban az egységnyi tömegben vagy térfogatban tárolható energiamennyiséget használják. Egyes technológiák használata során figyelembe kell venni, hogy cellákra, önálló akkumulátorokra vagy akkumulátortelegekre vonatkoznak-e, illetve, hogy adott esetben az üzemi tulajdonságok fontosabbak-e a méreteknél és a tömegeknél [8].

2.2.1. Savas ólomakkumulátor

Az idők során folyamatosan korszerűsített, illetve napjainkban az iparban is gyakran használt akkumulátortípus a (kén)savas ólomakkumulátor. A savas ólomakkumulátor jellemzően két (többretegű) félcellából áll. A felület növelése érdekében az elektródáknál rácsos szerkezetű vezetőket (és aktív anyagot) alkalmaznak. A negatív elektróda (anód) aktív anyaga szivacsos szerkezetű ólom/ólom-szulfát „hab”, míg a pozitív elektróda (katód) egy kevésbé porózus ólom/ólom-dioxid/ólom-szulfátból álló lemez (5. ábra). A hagyományos ólomakkumulátorokban az elektródákat vízzel hígított kénsav (elektrolit) vesz körül, amely részt vesz a lejátszódó kémiai reakciókban is. Léteznek azonban úgynevezett karbantartásmentes ólomakkumulátorok is, melyek a vízzel hígított kénsav helyett mikroszövetes textíliával felitatott vagy gél állapotú elektrolitot tartalmaznak. A karbantartásmentes ólomakkumulátorok teljesen zárt kialakításúak. A rövidzárlat elkerülésére és az akkumulátor stabilitásának növelésére az elektródák között esetenként elválasztó lemez található, továbbá az akkumulátor szerkezetét károsító túlnyomás megelőzésére nyomáshatároló szelepeket építenek be. Teljesítményintenzív alkalmazásoknál a lemezes kialakítású elektródák helyett henger alakú (csöves) aktív anyagtartó vezetőket használnak. Az akkumulátor kivezetései leggyakrabban ólomötvözetből készülnek, a burkolata saválló, stacioner alkalmazásoknál általában átlátszó műanyag. Energetikai alkalmazás esetén a lemezkötegek alatt üres iszapteret hagynak a használat során az elektródákról leváló aktív anyag részére a hosszabb élettartam elérése érdekében [8].



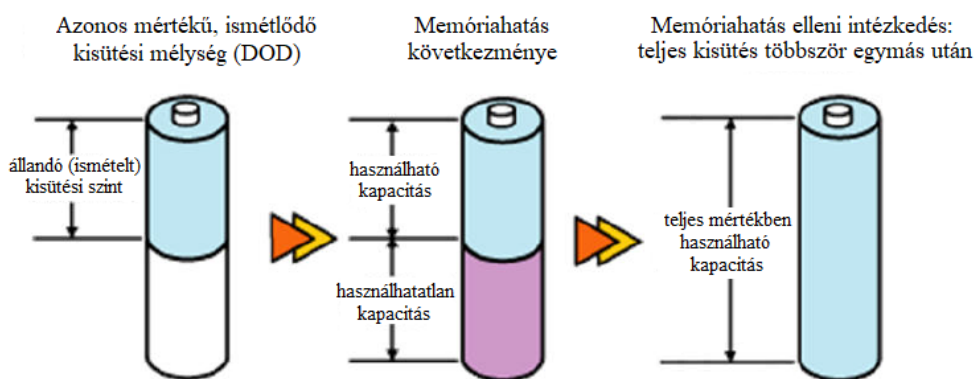
5. ábra: Egy hagyományos ólomakkumulátor felépítése [8][9]

Az ólomakkumulátorokban az energiatárolással kapcsolatos reakciók mellett mellékreakciók (hidrogénképződés, rácskorrozó, oxigénredukció, oxigénképződés) is bekövetkezhetnek – az oxidációk és redukciók mellett párhuzamosan játszódnak le –, melyek az ólomakkumulátor töltésénél veszteséget, terheletlen állapotban pedig önkisülést idéznek elő. Ennek elkerülése érdekében az ólomakkumulátorok feszültségét mindig a gyártó által megadott minimális feszültségszint felett kell tartani. Egy hagyományos ólomakkumulátorban tárolható energia mennyisége az ólomból készült elektródák, illetve a vízzel hígított kénsav elektrolit tömege miatt lényegesen alacsonyabb (25-40 Wh/kg) a korszerűbb akkumulátortípusokéhoz képest, ezért napjainkban – a lítium-ion akkumulátorok világszintű elterjedése óta – jellemzően szünetmentes tápegységekben (UPS) és belső égésű motorral szerelt járművek indító akkumulátoraként alkalmazzák. Háztartási méretű (fotovoltaikus) kiserőműveknél az alacsony ciklusszáma miatt bizonyos korlátok betartása mellett alkalmazható – legfeljebb ~1000 ciklus (körülbelül 3-5 naptári év) várható el 30%-os kisütés esetén –, azonban az eltárolni kívánt energiamennyiségtől függően nagy helyigénye lehet. Hosszú élettartamra elsősorban a túltöltés és a mély kisütés megelőzése, a kisüthető állapotban való tárolás elkerülése, a töltőfeszültség hőmérséklethez történő igazítása, illetve a 20-45 °C közötti cellahőmérséklet betartása esetén lehet számítani [8][9].

2.2.2. Nikkel akkumulátorok

A savas ólomakkumulátorok mellett többféle nikkelből készült pozitív elektródájú (katód) akkumulátort is kifejlesztettek és alkalmaznak a gyakorlatban. Energetikai célú alkalmazásokra jellemzően a nikkel-kadmium és a nikkel-fémhidrid elektródákkal készült akkumulátorok kerülnek elsősorban szóba. A nikkel-kadmium típusú akkumulátor pozitív elektródája (katód) nikkel-hidroxidot, negatív elektródája (anód) pedig kadmium-hidroxidot tartalmaz. A nikkel-kadmium akkumulátor elektrolitja jellemzően körülbelül 20% koncentrációjú káliólúgból áll, melyhez az akkumulátor élettartamának és kapacitásának növelésére gyakran lítium-hidroxidot vagy nátrium-hidroxidot kevernek kis mennyiségben. A nikkel-kadmium akkumulátor eredő egyensúlyi cellafeszültsége környezeti hőmérsékleten 1,3-1,4 V (az ólomakkumulátoré 2 V). A káliólúg elektrolit a reakciókban nem vesz részt, ezért a sűrűsége a töltési és kisütési folyamat során nem változik számottevően. A nikkel-kadmium celláknál a cellafeszültség és a belső ellenállás független a cella töltöttségétől – azonban függ az elektródák állapotától –, tehát az akkumulátorok a teljes működési tartományukban jól tölthetők és kisüthetők, továbbá kevésbé érzékenyek a túltöltésre és a töltés elhanyagolására. A nikkel-kadmium akkumulátorok emellett jobban ellenállnak a korróciónak és az öregedésnek, ezért hosszabb élettartam és nagyobb

ciklusszám (kb. 2000 ciklus vagy 6-10 naptári év) várható el tőlük, továbbá a teljesítménysűrűségük is magasabb (40-60 Wh/kg), mint a savas ólomakkumulátoroké. A nikkel-kadmium akkumulátor legfontosabb előnye a piacon lévő akkumulátortípusokhoz képest, hogy fagypont alatti hőmérsékletek mellett is jól alkalmazható (a névleges kapacitásának 50%-a kinyerhető $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ esetén). Az energetikai alkalmazásának azonban gátat szab az úgynevezett memóriahatás (6. ábra). Állandó kisütési szint mellett az akkumulátor „elfelejti” az eredeti kapacitását, melynek legfőbb oka a kadmium kristálméretének növekedése a nem kisütött cellatartományokban, ami megnövekedett ellenálláshoz, azaz nagyobb veszteségekhez vezet. A memóriahatás mellett felismerték a kadmium káros környezeti hatásait (mérgező) is, ezért alkalmazását a legtöbb területen betiltották [8][9].

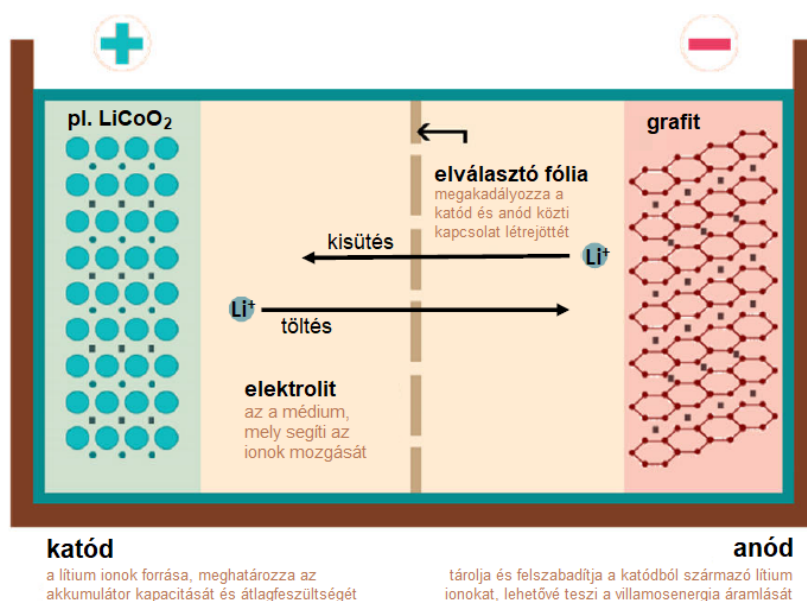


6. ábra: A memóriahatás megjelenése nikkel akkumulátorok esetében [9]

A nikkel-fémhidrid akkumulátorok kifejlesztésére a nikkel-kadmium akkumulátorok energiasűrűségének növelésére és a memóriahatás mérséklésére végzett kutatás eredményeként került sor, ezért a két akkumulátortípus a cellafeszültségük, élettartamuk és megbízhatóságuk szempontjából rendkívül hasonlóak. A nikkel-fémhidrid akkumulátor alapvetően a negatív elektróda anyagában, működésében és üzemi tulajdonságaiban különbözik a nikkel-kadmium akkumulátortól. A fém negatív elektródának köszönhetően nőtt a cellák teljesítménysűrűsége (60-120 Wh/kg), és jelentősen javult az akkumulátor memóriahatása. A nikkel-fémhidrid akkumulátor egyensúlyi cellafeszültsége 1,2 V környezeti hőmérsékleten, azonban a hosszabb élettartam érdekében a cellafeszültségét 0,85-1,42 V (teljesen kisütött és feltöltött feszültségek) tartományban célszerű tartani. Háztartási méretű (fotovoltaikus) kiserőművek számára ez az akkumulátortípus megfelelő is lehetne, azonban a lítium ion akkumulátorok piaci térnyerése és a jobb üzemi tulajdonságai már-már ellehetetlenítik a nikkel-fémhidrid akkumulátorok energetikai célú alkalmazását [8][9].

2.2.3. Lítium ion akkumulátorok

A lítium ion akkumulátorok a gyakorlati alkalmazásokban többféle katód, anód és elektrolit anyaggal fordulnak elő, melyek felépítésüktől függően eltérő elektrokémiai tulajdonságokkal rendelkezhetnek. A lítium ion akkumulátorban a lítium fém és nem fém alakban is megjelenhet. A fém lítiumot nem tartalmazó cellákban a lítium ionok a katód és az anód anyagában is eltárolódhatnak. Az energiatárolás a lítium ionok az akkumulátor rácsos szerkezetű, aktív katód- és anóanyagába történő, reverzibilis (visszafordítható) betárolásán és kisütésén alapul. Kisütésnél a negatív elektróda ionforrásként, a pozitív elektróda ionnyelőként viselkedik, míg betárolásnál a pozitív elektróda szolgál ionforrásként, a negatív elektróda pedig ionnyelőként. A katód aktív anyaga jellemzően valamilyen lítiumot is tartalmazó fémoxid, míg az anód aktív anyaga rendszerint grafit. Az elektródák között a lítium ionok áramlását az ionvezető elektrolit teszi lehetővé, mely ugyanakkor megakadályozza – esetenként elválasztó fólia használatával – az elektronok áramlását a cellán belül (7. ábra). A cella töltése során a katód aktív anyaga oxidálódik, melynek következtében a fématom lead egy elektront a külső áramkörnek, miközben egy pozitív töltésű lítium ion (kation) indul el az anód felé az elektroliton keresztül. Az anódon eközben redukció megy végbe, melynek eredményeként az elektrolitban levő lítium ion az anód anyagában lerakódik (interkalálódik), és a töltésegyensúly fenntartásához az anód a külső áramkörből elektront vesz fel. A cella kisütésénél az anódról kitárolódó lítium ionok a katódon rakódnak le, és a külső áramkörből elektront vesz fel. Kitárolásnál az anód oxidálódik, a katód pedig redukálódik. A lítium ionok elektródákba történő betárolása és kisütése méretváltozással és fázisátalakulással járhat, mely a cellák károsodásához vezethet [8].



7. ábra: A lítium ion akkumulátorok felépítése és működése [9]

Egy lítium ion akkumulátor várható élettartama és töltési-kisütési ciklusszáma az elektródák aktív anyagától függően különbözhetnek. Egy adott akkumulátortípus tényleges élettartamát és ciklusszámát az üzemi körülmények – főként a hőmérséklet, a töltöttség és a kisütés mértéke – határozzák meg. Az élettartam általában arra az időpontra (naptári év), illetve ciklusszámra utal, amikor az akkumulátorcella kapacitása a névleges érték 80%-ára csökken. Az akkumulátor elhasználódását leginkább a kisütés mélysége (depth of discharge) befolyásolja: a nagyobb arányú kisütés nagyobb és gyorsabb (= alacsonyabb ciklusszám) kapacitás-csökkenéshez vezet. Nagy ciklusszám csak gyenge kisütések – és megfelelő üzemi körülmények – mellett érhető el. A lítium ion akkumulátorok hosszú élettartamához célszerű a cellák töltöttségét 30-70% között tartani. A túltöltés és a mély kisütés az akkumulátorcellák helyrehozhatatlan károsodását eredményezhetik, bizonyos esetekben az elektrolit felbomlását, az elektródák hőfejlődéssel járó szétesését, valamint éghető gázok keletkezését okozhatják [8].

Napjainkban a lítium ion akkumulátorokkal történő energiatárolásra – a katód és az anód aktív anyagától függően – különböző technológiai megoldások léteznek (1. táblázat). A lítium-kobalt oxid katóddal készített (LCO) akkumulátorok közül már több felrobbant a termikus instabilitásuk miatt. Habár a lítium-nikkel oxid (LNO) katódanyagú akkumulátorok termikus stabilitása fejlettebb, a nikkel ionok kedvezőtlen tulajdonságai miatt felhagytak ennek alkalmazásával. Kobalt adagolásával a kedvezőtlen tulajdonságok (például a memóriahatás) csökkenthetők, azonban kisebb lítiumtartalom mellett nagyobb hőmérsékleten szintén instabillá és oxidálóvá válhat. A lítium-nikkel-kobalt alumínium (NCA) akkumulátorokban – alumínium adagolásával – a kobalt okozta problémák csökkenthetők voltak, viszont az akkumulátor termikus stabilitása nem lett teljesen megoldva. A visszafordíthatatlan hőmérséklet-növekedés (hőmegfutás) előfordulásának esélyét mangán adagolásával csökkenteni lehetett, azonban magas hőmérséklet esetén (220 °C felett) ennél az akkumulátortípusnál is hőfejlődést tapasztaltak. Ennek ellenére a nagy fajlagos cellakapacitása és üzemi feszültsége miatt az e-mobilitásban – a magasabb hatótáv érdekében – egyre nagyobb szerepet kaphat [8].

1. táblázat: Lítium ion akkumulátor-technológiák tulajdonságai [8][9]

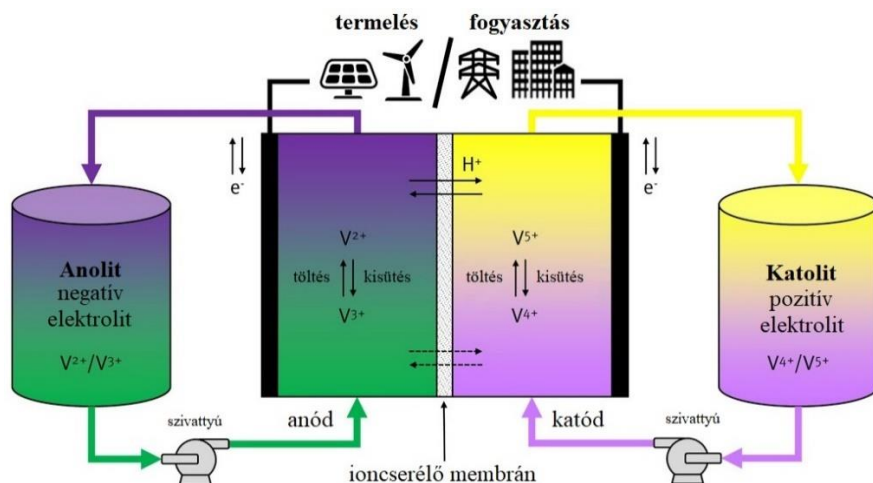
Betűjel	Katód	Anód	Cellafeszültség (V)	Névleges energiasűrűség (Wh/kg)	Névleges ciklusszám
LCO	LiCoO ₂	grafit	3,7-3,9	110-180	300-1000
LNO	LiNiO ₂	grafit	3,6	150	nem ismert
NCA	LiNiCoAlO ₂	grafit	3,65	180-250	500-1000
NMC	LiNiMnCoO ₂	grafit	3,8-4,0	180-210	3000-4000
LMO	LiMn ₂ O ₄	grafit	4,0	100-120	1000-1500
LNM	LiNiMnO ₄	grafit	4,8	140	nem ismert
LFP	LiFePO ₄	grafit	3,2-3,3	80-120	4000-8000
LTO	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	2,4	30-110	15000-20000

Ipari célokra az akkumulátorcellákban katódanyagként réteges oxidokat (lítium-nikkel-mangán oxid - NMC), spinelleket (lítium-mangán oxid - LMO) és átmenetifém-foszfátokat (lítium-vas-foszfát - LFP) alkalmaznak. A lítium ion akkumulátorok anódjának aktív anyaga jellemzően grafit, azonban a dendritképződés („kristálycsúcsok”) elkerülése érdekében szóba került a grafit helyettesítése amorf karbon vagy lítium-titán oxid ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) alkalmazásával. A lítium-nikkel-mangán-kobalt (NMC) cellák mobil és stacioner alkalmazásokhoz is választhatók a magas energia- és teljesítménysűrűségük, valamint a magas töltési-kisütési ciklusszámuk miatt. A kobalt relatíve magas ára miatt az NMC akkumulátorcellák katódjában a nikkel, a mangán és a kobalt különböző arányban – a szerkezeti stabilitás megőrzése mellett – jelenhetnek meg a gyártótól függően. A lítium-mangán oxid (LMO) katódanyagú cellák termikus stabilitása sokkal fejlettebb, továbbá kedvezőbb ionáramlással, ezáltal nagyobb kisütési teljesítménnyel jellemezhetők. Nagy mennyiségű lítium ion felvételénél azonban a cella kristályszerkezete megváltozik, mely a cella térfogatának jelentős növekedésével jár, ezért korlátozni kell a cella megengedhető fajlagos energiasűrűségét. További hátránya, hogy a mangán az elektrolitban fokozatosan feloldódhat, mely gyorsabb öregedéshez, nagyobb környezeti hőmérsékleten akár drasztikusabb kapacitás-csökkenéshez is vezethet. A lítium-vas-foszfát katódanyagú (LFP) akkumulátorcellák termikus stabilitása nagyobb a lítium-vas-foszfát olivin kristályrácsban történő kristályosodása következtében. A grafit anódanyagú LFP cellák üzemi feszültsége alacsonyabb (3,2 V) az említett katódanyagú akkumulátorokéhoz képest, azonban a fajlagos tárolókapacitásuk (160 Ah/kg) nem tér el számottevően. A lítium-vas-foszfát (LiFePO_4) vegyületben lévő oxigén nem szabadulhat el, ezért a grafit anódnál nem kell széndioxid képződéssel és hőmegfűtással kalkulálni. Az LFP akkumulátorcellák fajlagos energiasűrűsége – az alacsonyabb cellafeszültségből adódóan – kisebb, azonban a magas töltési-kisütési ciklusszáma (4000-8000 ciklus, ~12-24 naptári év) miatt számítani lehet a közeljövőben az elterjedésére az energetikában – elsősorban az időjárásfüggő megújulóknak esetében – és a telekommunikációs szektorban [8].

2.2.4. Redox folyadékáramú akkumulátorok

A lítium ion akkumulátorok jelentős piaci térnyerése ellenére napjainkban az úgynevezett redox folyadékáramú akkumulátorok is egyre nagyobb szerepet kapnak az ipari alkalmazásokban. A redox folyadékáramú akkumulátorok – a korábban megismert technológiákhoz hasonlóan – az energiát szintén kémiai kötésekben tárolják. Az „akkumulátorcella” egy membránnal két részre van osztva, melyek közül az egyikben redukció (elektronfelvétel), míg a másikban oxidáció (elektronleadás) játszódik le. Mindkét félben nagy

felületű grafit file elektróda van, amelyek azonban az elektrokémiai folyamatokban nem vesznek egyáltalán részt. Az elektródák egyedüli feladata az áramvezetés az elektrolit oxidált, valamint redukált ionjai közötti elektronátadásnál. Az elektrokémiai reakciókban részt vevő aktív anyagok folyékony oldószerben oldott sókat tartalmazó elektrolitok, melyeket külső edényekben tárolnak és szivattyúval keringtetnek (8. ábra). A cellák felépítése az üzemanyagcellákhoz, a működési elve az akkumulátorokhoz hasonló. A működő cellákban főként a vanádium-vanádium párosítást alkalmazzák, azonban léteznek más anyagpárosítások is (pl. vanádium-bróm, vas-króm), amelyek nagyobb cellafeszültséget és energiasűrűséget tehetnek lehetővé. A vanádium-vanádium cellák névleges feszültsége 1,4 V (25 °C-on), habár a tényleges üresjáratú feszültség a töltöttségtől függően változik. A redox folyadékáramú akkumulátorok hatásfoka 65-80% közé tehető, mivel a töltési-kisütési feszültségek különbségén túl az elektrolitokat keringtető szivattyú energiaigénye is veszteséget okoz [8].



8. ábra: A redox folyadékáramú akkumulátor működési elve [8][10]

A folyadékáramú akkumulátorokban tárolható energia mennyisége elsősorban a tartályok méretétől függ (15-25 Wh/liter elektrolit), ezért a cella aktív elektródafelületének nagyságától függő teljesítménye (néhány száz W/cm²) a tárolókapacitástól függetlenül méretezhető. A vizes elektrolittal működő vanádium-vanádium cellák üzemi hőmérséklete 20-30 °C között van, de 10-40 °C tartományban is működőképesek. Klór vagy egyéb ionok elektrolithoz való adagolása esetén a minimális üzemi hőmérséklet -5 °C, a maximális 50 °C lehet. A redox folyadékáramú akkumulátorok élettartama 20-30 év, és több mint 13000 mélyciklus várható el a membrántól, mielőtt azt az akkumulátorban cserélni szükséges. A redox akkumulátorok legjelentősebb piaci előnyei a rövid (0,001-0,02 s) hozzáférési idő és a magas töltési-kisütési időtartam (4-5 óra). Az akkumulátor teljes kisütése is megengedhető, kisütött állapotban magára hagyható, mivel

az elektrolit és az elektródák nem károsodnak. Alacsony önkisülése miatt töltött állapotban marad – egyedül a cellában visszamaradt elektrolitban következik be önkisülés –, az elektrolit keringtetése leállítható. A redox akkumulátor könnyen telepíthető, karbantartható és javítható, nincs emissziója (nincs gázképződés), nem veszélyes (nem gyúlékony, nem robbanó) és teljes mértékben újrahasznosítható, ezért a különböző tárolási igények ellátásához és a rendszerszintű szolgáltatások (frekvencia-szabályozás) biztosításához hosszútávú megoldást jelenthet [7].

2.3. Háztartási méretű energiatárolás technológiai lehetőségei

Bizonyos energiatárolási technológiák kiválasztása előtt mindenképp ajánlott meghatározni, hogy az energiatároló milyen igények kielégítését kívánják biztosítani. Erőművek (> 50 MW) és kiserőművek (0,05-50 MW) tekintetében a tárolás elsődleges célja lehet a termelőegységek rendelkezésre állásának növelése, valamint a villamosenergia-hálózat egyensúlyának fenntartása érdekében rendszerszintű szolgáltatások biztosítása, melyekhez a mai energiatárolási technológiák jelentős része bevethető (9. ábra). Háztartási méretű kiserőművek (< 50 kW) esetében azonban a hosszú élettartam (egyben a magas ciklusszám), a méret, illetve a beszerzési ár tartozik a legfontosabb szempontok közé. Jelen pillanatban ezen feltételeknek az elektrokémiai energiatárolók (akkumulátorok), főként a savas ólomakkumulátor, a redox folyadékáramú akkumulátorok és a lítium ion akkumulátorok tesznek eleget [11][12][13][14]. Ezen három akkumulátor típus közül a savas ólomakkumulátor a legérettebb energiatárolási technológia (majd a lítium ion és a redox folyadékáramú akkumulátorok), azonban háztartási méretű alkalmazásoknál az üzemi tulajdonságai (elsősorban az alacsony ciklusszáma és a tömegre fajlagosított teljesítménysűrűsége) korlátokat szabnak (2.2.1. fejezet) [11].

Szükséges tárolási technológia...	Akkumulátorok									
... a hálózatban...	Szivattyús víztároló (PHS)	Lítium-ion akkumulátor	Savas ólom-akkumulátor	Redox akkumulátor	Nátrium-kén akkumulátor	Szuper-kondenzátor	Hidrogén ü. cella	Lendkerék	Levegős tároló (CAES/LAES)	Hőtárolás
Szezonális tárolás Igény: Nagy tárolókapacitás, lassú letöltés	✓						✓			
Napi tárolás (a napi csúcsterhelés elhalasztása) Igény: Néhány órás ellátás	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓
Hálózattámogató szolgáltatások (pl. frekvenciaszabályozás) Igény: Gyors reakció, néhány másodperces–néhány órás ellátás	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Háztartások Igény: Kis méret, hosszú élettartam		✓	✓	✓			✓			

9. ábra: A fontosabb energiatárolási technológiák alkalmazási területei [11][12]

2.3.1. Hazai vonatkozású energiatárolási gyakorlatok

A Veszprém vármegyében található Csesznek község külterületén, egy lóterápiás központot üzemeltető jurtaházon – a kisfeszültségű villamosenergia-hálózat gazdaságtalan kiépíthetősége következtében – egy szigetüzemű (off-grid) fotovoltaikus rendszer került telepítésre 2021-ben. A jurta stílusú lakóépület a napenergia optimális mértékű passzív hasznosítására lett kialakítva, így a helyiségek temperálása részben a Nap besugárzásának intenzitása alapján biztosított. Jelen jurtaház villamosenergia-igényeit eredetileg 11 darab, egyenként 280 Wp csúcsteljesítményű polikristályos napelem modul, egy Huawei SUN2000 típusú, 3,6 kVA névleges teljesítményű hibrid inverter, illetve egy Huawei LUNA2000 típusú, lítium-vas-foszfát (LFP) katódanyagú, 5 kWh tárolókapacitású akkumulátor látta el, azonban a tetőszerkezet alacsony meredeksége miatt a napelem modulok a téli hőigényeket nem tudták megfelelően biztosítani, ezért a fotovoltaikus rendszer 6 darab, 450 Wp csúcsteljesítményű monokristályos napelem modullal bővítésre került. A komfortigényeket a bővített fotovoltaikus rendszer képes kielégíteni, azonban a sorozatosan fagyponthoz alatti téli napok áthidalhatósága miatt az ingatlan tulajdonosa az energiatároló további 5 kWh tárolókapacitással való növelését tervezi [11][15].

A Szabolcs-Szatmár-Bereg vármegyei Levelek község külterületén az E.ON Hungária Zrt. BYD U3A1-60P-A típusú modulokból álló, összesen 60 kWh tárolókapacitással és 13,8 kW töltési-kisütési teljesítménnyel rendelkező, lítium-vas-foszfát (LFP) akkumulátor technológiájú energiatároló telepítését valósította meg 2018-ban. Levelek település külterületén egy meglévő 12 kW teljesítményű fotovoltaikus rendszer esetében 20 kW fotovoltaikus kapacitásbővítési igény lett benyújtva, amelynek csatlakoztatása a közcélú villamosenergia-hálózaton komoly feszültségproblémákat eredményezett volna. A fenti energiatároló létesítésének elsődleges célja az volt, hogy helyi szinten a fotovoltaikus rendszerek biztonságos és folyamatos üzemeléséhez a szükséges hálózati befogadóképességet biztosítani lehessen. A beruházás eredményeként a fotovoltaikus kapacitásbővítés nem okozott a közcélú villamosenergia-hálózaton a vonatkozó szabványokban meghatározott határértéken felüli feszültségemelkedést [16][17][18].

A Bács-Kiskun vármegyei Kecelen és a Csongrád-Csanád vármegyei Zsombón az NKM Áramhálózati Kft. és az INFOWARE Zrt. egy 140 kWh névleges tárolókapacitású, 30 kW töltési-kisütési teljesítményű, lítium-vas-foszfát (LFP) katódanyagú energiatároló telepítését és üzembe helyezését valósította meg 2020-ban. Jelen beruházás legfőbb célja a kisméretű villamosenergia-hálózatra csatlakozó háztartási méretű kiserőművek okozta feszültség- és frekvenciaingadozás stabilizálása [19][20]. A Magyar Mérnöki Kamara információi szerint

mindkét energiatárolót a háztartási méretű naperőművek termelésétől függetlenül minden nap meghatározott időben töltenek és sütnek ki a hálózati viszonyoknak megfelelően [11].

A Tolna vármegyében található Gemenci erdőben az E.ON Hungária Zrt. és a JKH Kft. munkatársai 2015-ben egy úgynevezett energiatartályt létesített a helyi erdészeti számára. Jelen energiatartály kifejlesztése elsősorban abból a célból indult, hogy alternatív, fosszilis energiahordozók alkalmazásától mentes megoldást biztosítson villamosítatlan ingatlanok villamosenergia-ellátására. A kifejlesztett energiatartály – amely valójában egy moduláris, energiatárolóval rendelkező, háztartási méretű fotovoltaikus kiserőmű – 32 darab, egyenként 310 Wp csúcsteljesítményű polikristályos napelem modulból, Xtender típusú hibrid inverterből, összesen 48 V és 870 Ah névleges tárolókapacitású, üvegszállal felitatott elektrolitos (AGM) savas ólomakkumulátorokból, egy 0,5 kW villamos teljesítményű, alkáli nátrium-karbonát technológiájú elektrolizálóból, két, 50 liter térfogatú és 200 bar nyomású, hidrogénpalackokat tartalmazó palackkötegből, illetve egy 1000 W teljesítményű PEM tüzelőanyag-cellából áll. Hidrogén előállítására és felhasználásra az akkumulátor betöltése, illetve teljes kimerítése esetén kerül sor. A tartály az eddigi üzemeltetése során akadálytalanul tudta biztosítani az erdészeti villamosenergia-ellátását még extrém időjárási körülmények között is [11][21].

Egy magánkézben álló vállalkozás, a KONTAKT-Elektro Kft. szintén egy hidrogén alapú, szünetmentes energiatartályt tervezett és épített meg 2013-ban. Az energiatartály 6 darab, 250 Wp csúcsteljesítményű, Korax Solar KS-250 típusú napelem modulból, SMA SB-2000-HF-30 típusú hibrid inverterből, 24 darab, Maxwell BCAP3000 típusú szuperkondenzátorból, egy 500 Nl/h térfogatáramú, Acta EL500R típusú elektrolizálóból, illetve egy saját fejlesztésű, Kontakt-Elektro FC-MOD 3.0 típusú, 3 kW teljesítményű tüzelőanyag-cellából tevődik össze. A szuperkondenzátorok a fogyasztói igénybevétel (terhelés) kezdetétől az üzemanyagcella névleges teljesítményének eléréséig tartó időszakot hivatott áthidalni. A fenti elektrolizáló által megtermelt hidrogén egy 200 liter térfogatú és 35 bar nyomású tartályban kerül eltárolásra. A tartály teljes töltöttsége esetén az energiatartály energiatartalék esetén körülbelül 2,5 óra szünetmentes működést képes biztosítani a fogyasztó számára [11][22].

2.3.2. Nemzetközi vonatkozású energiatárolási gyakorlatok

A Huawei Technologies Co. Ltd., mint a világ egyik vezető kommunikációs és információs technológiai vállalata szintén kínál „plug-and-play” energiatárolási megoldásokat a háztartási méretű fotovoltaikus kiserőművek üzemeltetői számára. A nemzetközi cégcsoport úgynevezett Smart String lítium-vas-foszfát (LFP) technológiájú energiatárolójának töltése és kisütése mesterséges intelligencia által vezérelt, elsősorban időjárás előrejelzés alapján optimalizált.

Napsütéses időszakokban a szóban forgó „energiamenedzsment asszisztens” – a fotovoltaikus rendszer energiahozamának növeléséért – az energiatárolóba az inverter teljesítménykorlátja felett megtermelt villamosenergiát tárolja. Borús, illetve csapadékos napszakok esetében – az energiaköltségek mérséklése érdekében – az energiatároló jellemzően mélyvölgyi időszakban, alacsony villamosenergia árak mellett kerül feltöltésre [23]. Jelen energiatároló alapesetben egy teljesítménymodulból, illetve egy 5 kWh névleges tárolókapacitású akkumulátor modulból áll. Igényektől függően az energiatároló tovább bővíthető, azonban egy teljesítménymodulhoz legfeljebb három, egymásra helyezett akkumulátor modul csatlakoztatható [24].

A Samsung Electronics Co. Ltd., mint a világ egyik vezető elektronikai, multinacionális nagyvállalata különböző háztartási méretű és hálózatszintű energiatárolási megoldást hozott kereskedelmi forgalomba az elmúlt évtizedben. Napjainkban a vállalat egyaránt biztosít tárolási alternatívát a kis- és nagy teljesítményigényű háztartások számára is. Kis teljesítményigényű alkalmazásokhoz a cégcsoport az R1-M048 típusú, 5 kWh névleges tárolókapacitású, lítium ion technológiájú energiatárolóját javasolja, mely a tárolandó energiamennyiségtől függően tovább bővíthető. Nagy teljesítményigényhez az R3-M020 típusú, 100 V névleges üzemi feszültségű, 2 kWh névleges tárolókapacitású lítium ion akkumulátor ajánlott, amely további öt modullal 600 V névleges üzemi feszültségig és 12 kWh névleges tárolókapacitásig bővíthető [25].

A Panasonic Corporation of North America, mint a Panasonic Corporation alvállalata a legfontosabb kulcsterületeként tekint a megújuló energiatermelésre és az energiatárolásra [26]. Ennek eredményeként a vállalat védjegyoltalma alatt álló EverVolt™ kínálatában saját fejlesztésű napelem modulok és lítium ion akkumulátorok is egyaránt megtalálhatók [27][28]. Háztartási méretű fotovoltaikus rendszerekhez az EverVolt™ három különböző specifikációjú, lítium-vas-foszfát (LFP) kémiaiájú akkumulátort biztosít, amelyek a tárolási igényektől függően további modulokkal egészen 72 kWh használható tárolókapacitásig bővíthetők [29][30].

A Tesla Inc., mint az e-mobilitás világszintű forradalmasítója egyaránt kínál háztartások és hálózatüzemeltetők számára a járművekben is használt akkumulátorokhoz hasonló lítium ion technológiás energiatárolót [31][32]. A Tesla Powerwall egy teljesen integrált energiatároló, amely háztartási méretű (fotovoltaikus) kiserőmű meglétében és hiányában is alkalmazható. Magas energiasűrűségének (118-122 Wh/kg) köszönhetően az energiatároló nem igényel sok helyet, továbbá beltérben és kültérben, illetve földre és falra szerelve egyaránt üzemeltethető. A Tesla Powerwall energiatárolóban névlegesen 14 kWh villamosenergia tárolható, azonban a fogyasztói igényektől függően (például elektromos autó töltése esetén) további kilenc modullal akár sorosan és párhuzamosan is kapcsolva tovább bővíthető [31][33].

A Mercedes-Benz a piaci trendek és a szigorú klímavédelmi szabályozások következtében kereskedelmi forgalomba hozta háztartások számára saját „plug-and-play” energiatárolóját. A Mercedes-Benz Energy Storage Home a Huawei Technologies akkumulátorához hasonlóan egymásra helyezett (2,5 kWh névleges tárolókapacitású) akkumulátor modulokkal bővíthető. A Mercedes-Benz energiatárolója a fenti gyakorlatoktól eltérően lítium-nikkel-mangán-kobalt (NMC) katódanyagra épül. Jelen akkumulátort nemcsak lakossági, stacioner energiatárolóként, hanem a vállalat elektromos és plug-in-hybrid járműveiben is alkalmazzák [34].

3. KUTATÁSI MÓDSZERTAN

Jelen dolgozat tárgyát egy, a valóságban nem létező, konkrét fizikai elhelyezkedéstől, illetve mérettől és a lakók számától független lakóépület képezi. Az ingatlan hálózattal együttműködő, éves szaldó elszámolásban részesülő, háztartási méretű fotovoltaikus rendszerrel rendelkezik.

3.1. Kiindulási adatok

Tudatában annak, hogy a dolgozatban egy nem létező, képzeletbeli ingatlan energiaellátása kerül megvizsgálásra különböző scenáriók mentén, a háztartási méretű fotovoltaikus rendszer pontos termeléséről mérésen alapuló adat nem áll rendelkezésre. Annak érdekében, hogy a lent részletezett vizsgálatok realisztikus következtetéseket eredményezzenek, a naperőmű termelési adatai historikus, meteorológiai méréseken alapuló szimulációval kerülnek előállításra. Dr. Mayer Martin János, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem adjunktusának fotovoltaikus termelés szimulációja az Országos Meteorológiai Szolgálat Pestszentlőrincen található állomásának mérési adatait (globálsugárzás, környezeti hőmérséklet, szélsébség) felhasználva állít elő egy adott naperőműre termelési értékeket negyedórás felbontásban [35]. A termelési adatok könnyebb feldolgozhatósága és értelmezhetősége érdekében a kapott értékek órás felbontásra lettek átalakítva. A szimuláció által előállított naperőművi termelési adatok a 2022. január 1. és 2022. december 31. közötti időszakra vonatkoznak, illetve egyetemes, koordinált világidőben (UTC) értelmezendők.

Az ingatlan úgynevezett villamosenergia-fogyasztási profilja egy mérésen alapuló, létező lakóépületekre vonatkozó adattábla alapján kerül meghatározásra. Dr. Horváth Miklós, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem docense és munkatársai klaszterezéssel különféle villamosenergia-fogyasztási profilokat fejlesztettek ki Magyarországon található, okosmérőkkel ellátott lakóépületek mérési adatai alapján. A klaszterezésben különféle szűrések és adattisztítások után összesen 1186 lakóépület vett részt, melyek fogyasztási adatai alapján kilenc villamosenergia-fogyasztási profil lett előállítva: nyári csúccsal rendelkező (A csoport), téli magasabb fogyasztással rendelkező (B csoport), kiegyenlített éves fogyasztású (C csoport), illetve az esti csúcsú, alacsony reggeli fogyasztású (I. kategória), esti csúcsú, kiegyenlített napközbeni fogyasztású (II. kategória), reggeli és esti csúcsú (III. kategória) kombinációjaként. A klaszteranalízis során kapott órás fogyasztási értékek a 2018. január 1. és 2018. december 31. közötti időszakra vonatkoznak, illetve egyetemes, koordinált világidőben (UTC) értendők [36]. Feltételezve azt, hogy a dolgozat tárgyát képező ingatlanban nincs elkülöníthető fűtési és hűtési villamosenergia-igény, a fogyasztás kizárólag esti csúcsú, illetve a fotovoltaikus rendszer

megtérülése érdekében az ingatlan energiafogyasztása az átlagosnál magasabb, a későbbiekben megvizsgált scenáriók során a C csoport I. kategóriájának fogyasztási értékei megduplázva lettek felhasználva. További feltételezés az, hogy a fent megjelölt időszakra utaló fogyasztási adatok általános érvényűek, ezért a vizsgálat időintervallumában is alkalmazhatók.

A dolgozat bevezetésében megemlítsre került, hogy a helyben felhasznált villamosenergia megújuló részarányának növelése és a kiefeszűltsűgű villamosenergia-hálózaton tapasztalható teljesítménycsűcsok levágása között a kompromisszumot termelés- és fogyasztás előrejelzés alapján célszerű megállapítani. Dr. Mayer Martin János adjunktus fotovoltaiikus termelés előrejelzése – amely az ECMWF (globális) és az AROME (regionális) időjárás-előrejelzés mérési eredményeiből külön-külön következtet – szolgál a dolgozat vizsgálati tárgyát képező háztartási méretű fotovoltaiikus rendszer termelés-előrejelzésének alapjául. A termelési adatok szimulációjához hasonlóan a kapott értékek negyedórás felbontásúak és a fenti időszakra vonatkoznak a megjelölt időzónában [37]. Megbízható fogyasztás előrejelzés hiányában az ingatlan fogyasztásának előrejelzéséhez az úgynevezett perzisztencia előrejelzés alkalmazható. A perzisztencia előrejelzés azt feltételezi, hogy a jelen körűlményei a jövőben is ugyanolyan formában fennállnak, ebből kifolyólag egy kiválasztott nap(szak) tapasztalati fogyasztása a következő nap(szak) fogyasztásának előrejelzésére felhasználható [38]. Jelen tanulmányban a numerikus időjárás-előrejelzésen (NWP) alapuló termelés előrejelzések mellett megvizsgálásra kerül a perzisztencia előrejelzés fotovoltaiikus termelés előrejelzésére való alkalmazhatósága is.

A Magyar Közlöny 2023. évi 129. számában, a 427/2023. (IX. 13.) Korm. rendelet 1. § (5). értelmében – a 2023. szeptember 7. napjáig benyűjtott igénybejelentések vonatkozásában – a háztartási méretű kiserőműveknél a jogviszonyban álló villamosenergia-kereskedő a kiserőmű üzembe helyezésétől számított 10. év végéig éves szaldó elszámolást kell alkalmazzon [39]. Lantos Csaba energiaügyi miniszter a Portfolio Energy Investment Forum 2023 konferenciáján bejelentette, hogy a már üzembe helyezett, illetve a 2023. szeptember 7. napjáig benyűjtott és 2025. december 31. napjáig feltelepített háztartási méretű kiserőművek esetében a 10. év letelte után bruttó elszámolást kell alkalmazni az egyetemes szolgáltatás keretein belül. Ez azt jelenti, hogy a prozumer A1 kedvezményes árszabáson vételezhet villamosenergiát, azonban hálózatba táplálás esetén a fotovoltaiikus rendszer által megtermelt villamosenergia után ellentételezésre a nettó villamosenergia-ár mértékéig jogosult (rendszerhasználati díj nem számolható fel) [40]. Ebből kifolyólag egy háztartási méretű kiserőmű üzemeltetője számára fontos szemponttá válik az, hogy az éves szaldó elszámolás kivezetése után milyen energiaköltsűgekkal fog szembesűlni különösen akkor, ha a meglévő fotovoltaiikus rendszer mellé az energiaköltsűgek csökkentése érdekében fizikai energiátárolót is kíván létesíteni. A bruttó elszámolás miatt felmerűlő

energiaköltségek meghatározásához az MVM Next Energiakereskedelmi Zrt. által közzétett, az ELMŰ Hálózati Kft. területén – a Pestszentlőrincre vonatkozó termelési adatok következtében – 2022. augusztus 1-jétől hatályos A1 kedvezményes árszabású villamosenergia-egységár kerül alkalmazásra [41]. Feltételezve azt, hogy a háztartási méretű kiserőművek a villamosenergia-piacon is értékesíthetnek villamosenergiát, a felmerülő villamosenergia-költségek piaci alapon is kiszámításra kerülnek a HUPX Zrt. 2022. év másnapi piaci energiaárak (DAM) alapján [42]. A historikus piaci energiaárak órás felbontásban, közép-európai időzónában (CET) érhetők el, ezért az időzóna egyetemes, koordinált világidőbe (UTC) való átváltására volt szükség.

3.2. Energiatárolási stratégiák

Jelen dolgozatban egy irányítás nélküli (1. scenárió) és hat, különböző szempontok szerint irányított (2-7. scenárió), ideális eset, illetve hat, a fent részletezett előrejelzéseken alapuló, realisztikus eset (8-13. scenárió) kerül meghatározásra. Annak érdekében, hogy a használni kívánt fizikai energiatároló hozzáadott értékét is vizsgálni lehessen, egy energiatároló nélküli referenciaeset (0. scenárió) is tárgyalásra kerül. Tekintettel arra, hogy az inverter teljesítménye is befolyásolhatja a stratégiák kimenetelét, a vizsgálatokban kapott eredmények kétféle inverter méretezés (névleges teljesítmény) mellett is össze lesznek hasonlítva: hagyományos, bővíthető rendszer (5 kW) és költségre optimalizált (3,5 kW) (2. táblázat). Konkrét rendszerkomponensek hiányában és a számítások könnyebb ellenőrizhetősége érdekében az energiaátalakítás, illetve az energiatároló töltése és kisütése ideálisnak van feltételezve. Tudatában annak, hogy a tárolás során fellépő veszteségeket mindenképpen szükséges számításba venni, a dolgozatban vizsgált energiatárolási stratégiák közötti sorrendet a tárolási hatásfok érdemben nem befolyásolja.

Egy háztartási méretű prozumer számára a legideálisabb energiatárolási technológia a lítium ion akkumulátor a korábban bemutatott gyakorlatok (2.3. fejezet) alapján. Ahhoz, hogy a tároló (ciklus)élettartamát a legnagyobb mértékben megőrizzük, érdemes mellőzni az energiatároló teljes feltöltését és kisütését. Korábban megemlítsre került (2.2.3. fejezet), hogy a lítium ion akkumulátorokat 30-70% töltöttségi szint között célszerű üzemeltetni, azonban a dolgozatban egy szélesebb tartomány lett meghatározva a magasabb kihasználtság érdekében.

2. táblázat: A dolgozat tárgyát képező háztartási méretű rendszer konfigurációja [43]

Megnevezés [me.]	Érték	Megnevezés [me.]	Érték
Fotovoltaikus teljesítmény [kWp]	5	Névleges tárolókapacitás [kWh]	10
Inverter teljesítmény [kW]	5 / 3,5	Kezdeti tárolókapacitás [%]	100
Inverter méretezési tényező (AC/DC) [-]	1 / 0,7	Ciklusdegradáció [%/ciklus]	0,005
Tetőfelület tájolása (azimutszöge) [°]	0 (déli)	Minimális töltöttségi szint [%]	20
Tetőfelület meredeksége [°]	40	Maximális töltöttségi szint [%]	80

A fotovoltaikus rendszer termelésének és az ingatlan fogyasztásának ismeretében a közcélú villamosenergia-hálózaton, adott időegység alatt tapasztalható hálózati terhelés ($P_{KIF_hálózati_i}$) az (1). összefüggés felhasználásával számítható ki. Értéke a fotovoltaikus rendszer túltermelése esetén pozitív, alultermelés esetén pedig negatív. A hálózati terhelés kiszámításának célja az, hogy a közvetlenül elfogyasztott fotovoltaikus termelést eliminálni lehessen. Minden vizsgált szcenárióban az ingatlanban egy megadott órában közvetlenül elfogyasztott villamosenergia mennyisége túltermeléskor a fogyasztással, alultermeléskor a termeléssel egyenlő.

$$P_{KIF_hálózati_i} [kW] = P_{termelés_i} [kW] - P_{fogyasztás_i} [kW], \quad (1)$$

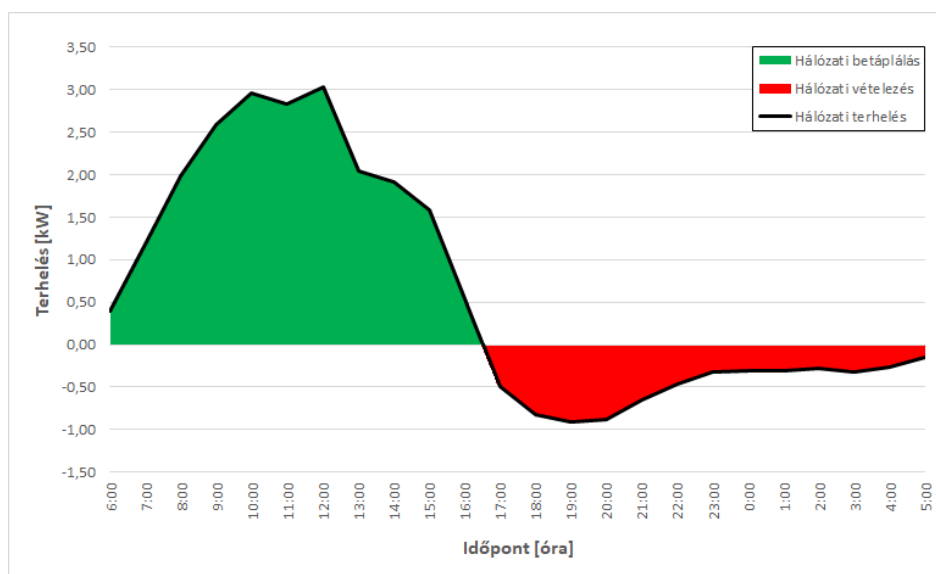
ahol

$P_{KIF_hálózati_i}$: hálózati terhelés a vizsgált időszakban (esetünkben órában) [kW]

$P_{termelés_i}$: fotovoltaikus termelés a vizsgált időszakban (esetünkben órában) [kW]

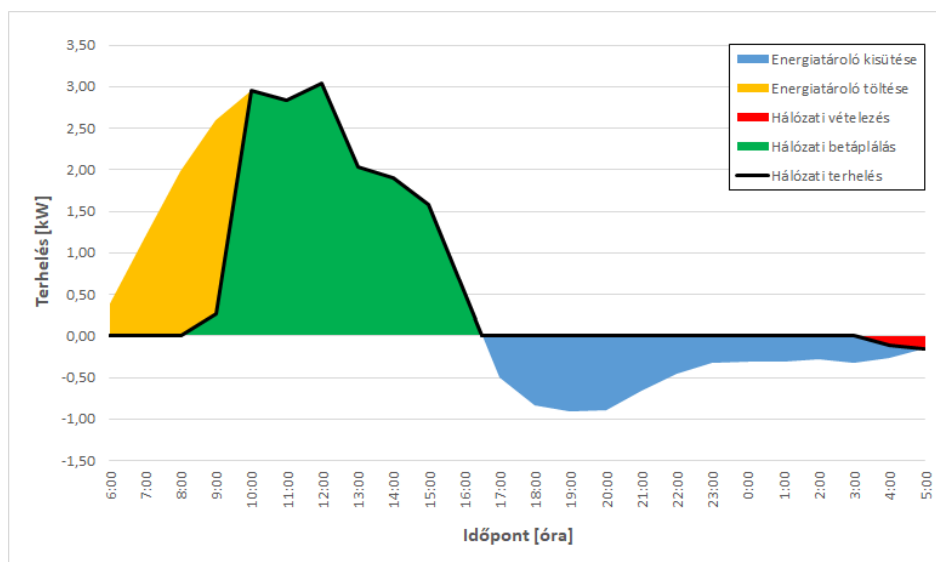
$P_{fogyasztás_i}$: fogyasztási igény a vizsgált időszakban (esetünkben órában) [kW]

A referenciaeset (0. szcenárió) a hagyományos, fizikai energiatároló nélküli háztartási méretű kiserőművek működési elvét reprezentálja. Ebben a konfigurációban a fotovoltaikus rendszer túltermelése esetén az ingatlan a közcélú, jellemzően kiefeszültségű villamosenergia-hálózatot használja energiatárolóként. Fotovoltaikus termelés hiányában, illetve a termelést meghaladó fogyasztás esetén az energiaigények közvetlenül nem elégíthetők ki, ezért azok fedezéséhez a kiefeszültségű hálózatról villamosenergiát kell vételezni (10. ábra).



10. ábra: Teljesítményforgalom fizikai energiatároló nélküli üzemben (0. szcenárió)

Gyakorlati megvalósítás tekintetében a legkézenfekvőbb egy olyan energiatárolási stratégia kialakítása, amelyhez nincs szükség a termelési és fogyasztási adatok ismeretére és elemzésére. Egy ilyen stratégia kivitelezéséhez csupán egy fizikai energiatároló (elsősorban akkumulátor) szükséges, amely a (hibrid) inverteren keresztül kerül összeköttetésbe a napelem modulokkal. Túltermelés esetén a többlet villamosenergia a fizikai energiatárolóban kerül eltárolásra, míg termelés hiányában, illetve alultermelés esetén a villamosenergia-igények az energiatárolóban tárolt villamosenergia kisütésével kerülnek kielégítésre. Abban az esetben, ha a napi túltermelés meghaladja az energiatároló kapacitását, a fennmaradó többlet a hálózatba kerül betáplálásra. Ha a villamosenergia-igények magasabbak, mint az energiatárolóban eltárolt villamosenergia mennyisége, akkor az energiatároló kisütését követően hálózati vételezésre kerül sor (11. ábra). Figyelembe véve az energiatároló technológiájának tulajdonságait, az energiatároló töltése és kisütése minden esetben a 2. táblázatban megadott töltöttségi szintek között következik be.

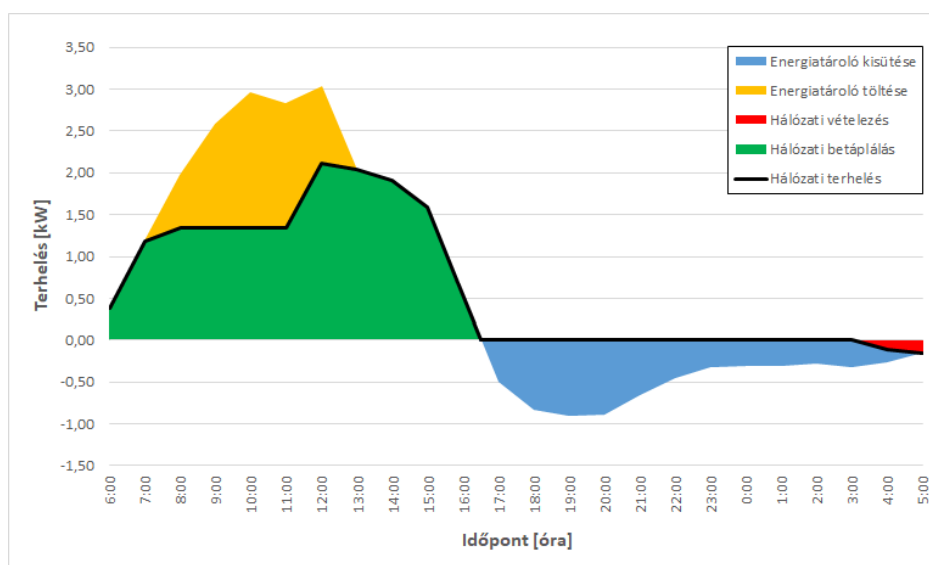


11. ábra: Teljesítményforgalom nem irányított energiatárolás esetén (1. szcenárió)

Napjainkban a kifesztültségű villamosenergia-hálózaton érzékelhető feszültségproblémákat és a fotovoltaiikus kiserőművek közcélú hálózatra csatlakoztatásával kapcsolatos kihívásokat elsősorban a termelők betáplálási teljesítménycsúcsai okozzák. A fent bemutatott, egyszerű energiatárolási stratégia a hangsúlyt a helyi energiaigények kielégítésére helyezi, és nem teszi közvetlenül lehetővé a teljesítménycsúcsok okozta hálózati problémák mérséklését. Ennek oka, hogy az energiatároló gyakran még a napi (pozitív) teljesítménycsúcs előtt teljesen feltöltődik, amely kizárólag fogyasztói energiaigény esetén sül ki. Napi egy töltési-kisütési ciklus esetén a prozumer számára alapvetően nem releváns, hogy az energiatároló melyik napszakban töltődik fel teljesen, ezért az energiatároló csúcslevágásra is alkalmazható. Ez úgy valósítható meg a legegyszerűbben, hogy egy globális (éves) csúcsértékhez egy konstans határértéket választunk.

Pontos eredmények nélkül ez a csúcserő lehet akár a hibrid inverter névleges teljesítménye is. Jelen energiatárolási stratégia (2. scenárió) lényege, hogy a fizikai energiatároló csak akkor legyen tölthető, amikor a naperőmű termelése egy megadott határteljesítmény felett van, vagyis az energiatároló töltésére a naperőmű tényleges teljesítménye és a határteljesítmény – amely a globális csúcserő és a százalékos határérték szorzata – közötti rész használható fel. Globális, állandó határteljesítmény megválasztása esetén azonban előfordulhat, hogy nem teljesül a csúcserő (nyári napokon) vagy az energiatároló teljes feltöltése (téli napokon) (12. ábra). Termelési és fogyasztási adatok ismeretében meghatározható az a határteljesítmény, amely a prozumer és az elosztóhálózati engedélyes céljainak optimumát adja. Ebben a dolgozatban ez az optimum a hibrid inverter teljesítménye, illetve a konstans, százalékos határérték 1%-kal való csökkentése mellett kerül megkeresésre, majd később ábrázolásra.

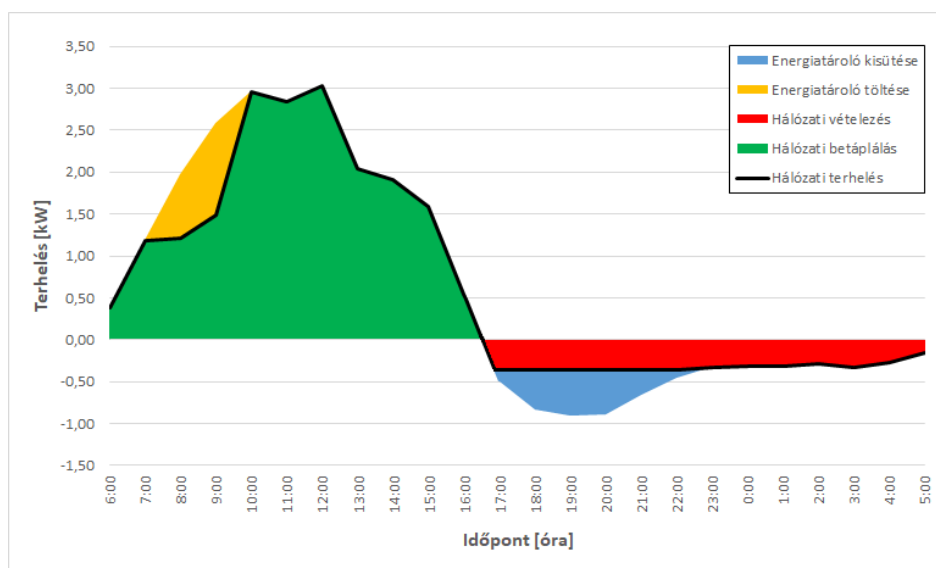
Globális határteljesítmény helyett napi teljesítményküszöb is használható, azonban ehhez a termelési- és fogyasztási adatok ismerete elengedhetetlen. Ebben az esetben a csúcserő az egymás utáni napokban eltérő, míg a százalékos határérték azonos. A scenárió lényege annak a százalékos határértéknek a meghatározása, amely eltérő teljesítményküszöbök mellett is képes mind a hálózat, mind pedig a prozumer érdekeit képviselni. Jelen stratégia a gyakorlatban azonban nem megvalósítható, hiszen a napi (pozitív) hálózati csúcsterjesítményt előrejelzések nélkül nem lehet meghatározni, ezért ebben a dolgozatban ez a módszer, mint alternatíva kerül megemlítésre, nem kerül részletes tárgyalásra.



12. ábra: Teljesítményforgalom rögzített pozitív határteljesítmény esetén (2. scenárió)

Feltételezve azt, hogy olyan ingatlan tulajdonosok fektetnek tőkét fotovoltaikus rendszerek telepítésébe, akik az átlagnál magasabb energiafogyasztással rendelkeznek vagy időközben a

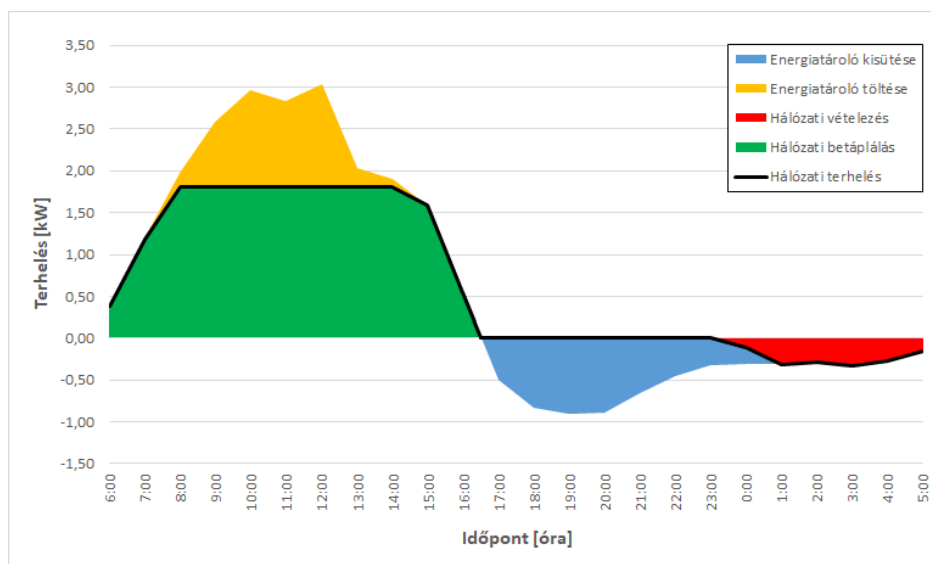
beruházásuk megtérülése érdekében a fűtési-hűtési rendszerüket elektrifikálják, megfontolandó a betáplálási teljesítménycsúcsok (pozitív) mellett a vételezési teljesítménycsúcsok (negatív) levágása is. A fenti két scenárióhoz hasonlóan egy meghatározott pozitív teljesítményküszöb átlépése esetén kerül az energiatároló feltöltésre, azonban az energiatároló kisütésére nem a már megszokott módon, hanem egy bizonyos negatív határteljesítmény alatt kerül sor (13. ábra). Globális teljesítményküszöbök megválasztása esetén (3. scenárió) gyakrabban előfordulhat az, hogy a prozumer vagy az elosztóhálózati engedélyes számára fontos feltételek nem teljesülnek. Jelen stratégia esetében is megvizsgálásra, illetve hőtérképen ábrázolásra kerül, hogy milyen határérték mellett lehet a két fél elvárásait teljesíteni. A vizsgálatban a globális negatív csúcserték a fotovoltaikus rendszer beépített teljesítményének a felében (2,5 kW) lett meghatározva, hiszen a fogyasztás lényegesen egyenletesebb, mint a naperőművi termelés. Globális határteljesítmények helyett alkalmazhatók napi teljesítményküszöbök is, habár ebben az esetben is szükségesek előrejelzések a stratégia gyakorlati megvalósíthatóságához.



13. ábra: Teljesítményforgalom rögzített határteljesítmények esetén (3. scenárió)

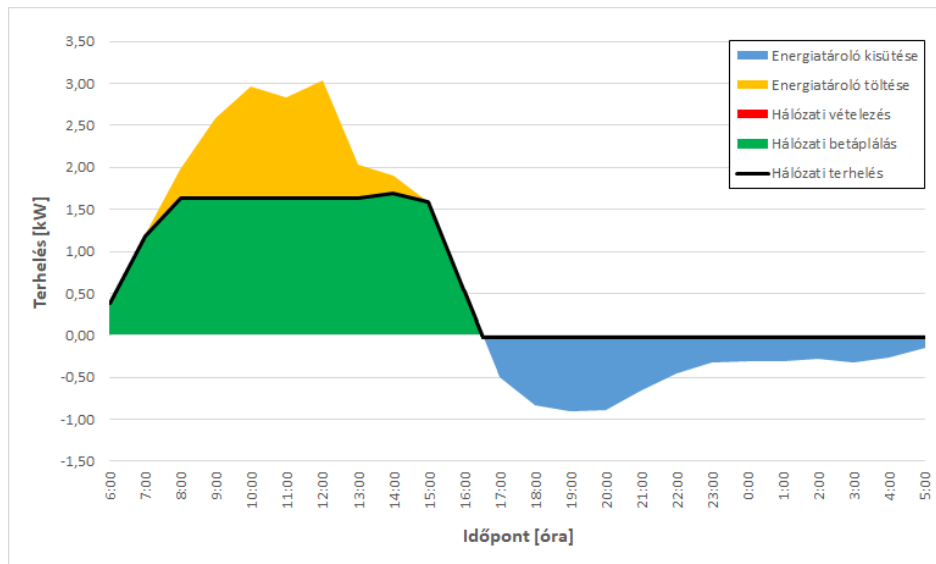
Tekintettel arra, hogy a napi terhelési csúcsertékeket pontos előrejelzések nélkül kizárólag ideális esetben – historikus termelési és fogyasztási adatok ismeretében – lehet meghatározni, a további scenáriókban a fent említett névleges teljesítményértékek, mint globális csúcsertékek kerülnek felhasználásra. A hálózati teljesítménycsúcsok levágása eddig konstans százalékos határérték és konstans csúcserték mellett vált lehetővé, azonban ezen értékek nem megfelelő megválasztása esetén a fizikai energiatárolóval szemben támasztott elvárások nem teljesíthetők. Annak érdekében, hogy mind a teljesítménycsúcsok levágása, mind az energiatároló feltöltése megvalósítható legyen, a csúcslévágási (pozitív) teljesítményküszöböt úgy kell meghatározni,

hogy a csúcslévágással egyidejűleg az energiatároló feltöltése is bekövetkezzon. Jelen stratégia (4. szcenárió) lényege – a határérték folyamatos csökkentése (0,01%-os lépésekben) mellett – annak a pozitív határteljesítménynek a megállapítása, amely érték feletti termeléssel az energiatároló teljes mértékben feltölthető. Ebben a stratégiában az energiatároló kisütése igényfüggő, vagyis nincs konkrét teljesítményértékhez kötve (14. ábra).



14. ábra: Teljesítményforgalom eltérő pozitív határteljesítmény esetén (4. szcenárió)

Korábban említésre került, hogy egy háztartási méretű fotovoltai rendszerrel rendelkező ingatlan energiafogyasztása az átlagosnál feltételezhetően magasabb, melynek következtében meggondolandó a negatív teljesítménycsúcsok levágása is. A fenti szcenárióban ismertetett módszer elvét követve ez úgy valósítható meg a legkedvezőbben, ha az energiatároló kisütését adott negatív határteljesítmény alatti igények kielégítésére ütemezzük. Jelen tárolási stratégia (5. szcenárió) alapelve – a határérték folyamatos csökkentése (0,01%-os lépésben) mellett – annak a negatív határteljesítménynek a meghatározása, amely érték alatti fogyasztással az energiatároló teljes mértékben kisüthető (15. ábra). A határteljesítmény abban az esetben is meghatározásra kerül, ha a fizikai energiatároló nincs a maximálisan megengedett töltöttségen. A negatív csúcslévágási határérték a pozitív csúcslévágási határérték meghatározását követő 12. órában kerül meghatározásra. A vizsgálati időszak elcsúsztatásával lehetővé válik, hogy a negatív teljesítményküszöb megválasztására a mélyvölgyi terhelés is befolyással legyen. Ha a kisüthető villamosenergia mennyisége a fogyasztásnál magasabb – vagyis az energiaigények a energiatárolóból kielégíthetők –, a negatív határteljesítmény nem kerül meghatározásra.

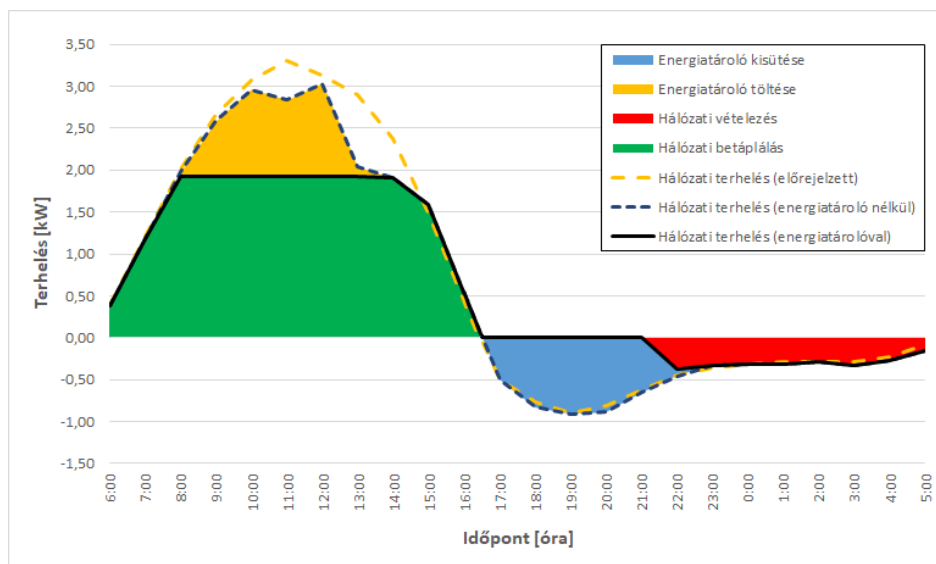


15. ábra: Teljesítményforgalom eltérő határteljesítmények esetén (5. scenárió)

Tudatában annak, hogy a bemutatott, szabályozott energiatárolási stratégiák a termelési- és fogyasztási adatok pontos ismeretében működnek ideálisan, a háztartási méretű hibrid rendszer energiaáramainak jövőbeni meghatározásához előrejelzésekre célszerű támaszkodni. Ügyelve továbbra is a hálózati teljesítménycsúcsok levágására, a határteljesítmények megválasztása az energiatároló maximális kihasználásának figyelembevétele mellett kell megtörténnjen. Mindkét szempontnak a legutoljára ismertetett két energiatárolási stratégia tesz eleget. Jelen dolgozatban a fotovoltaikus rendszer termelésének becsléséhez háromféle előrejelzés kerül felhasználásra: perzisztencia előrejelzés (6-7. scenárió), AROME regionális előrejelzés (8-9. scenárió) és ECMWF globális előrejelzés (10-11. scenárió). Megbízható fogyasztás előrejelzés hiányában az ingatlan fogyasztásának előrejelzéséhez kizárólag a perzisztencia előrejelzést lehet bevetni. Valamennyi adatforrás tekintetében egy teljes vizsgálati nap (24 óra) az előrejelzés hossza. A perzisztencia előrejelzés esetében egy adott napra előrejelzett termelési- és fogyasztási értékek az előző nap tapasztalati értékeivel egyeznek meg. Ennek értelmében az első vizsgálati napra (január 1.) perzisztencia előrejelzés nem adható, ezért az első vizsgálati nap az összes felsorolt scenárióban – a referenciaeset is beleértve – eltávolításra kerül.

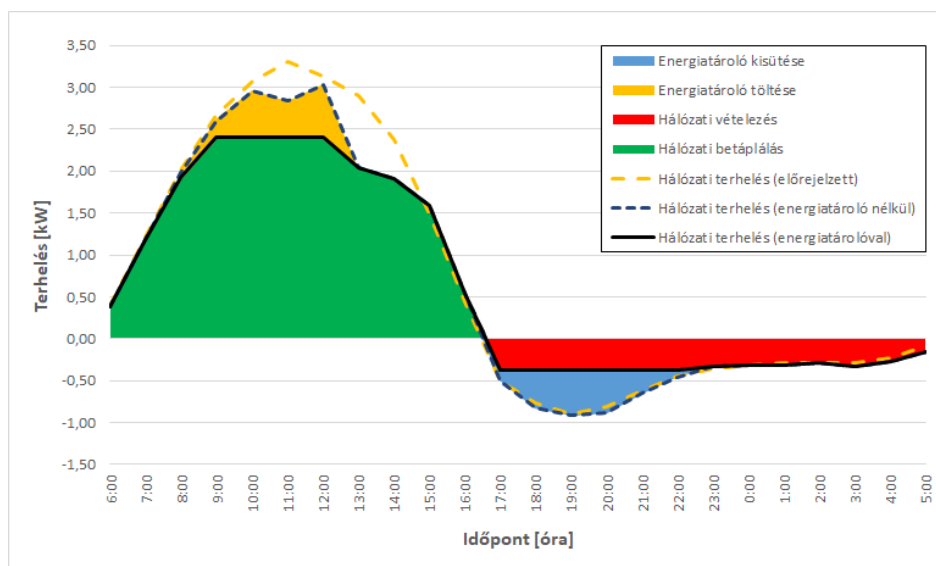
A termelés- és fogyasztás előrejelzéseken alapuló stratégiákban – a hatodik scenárióhoz hasonlóan – egy globális csúcsteljesítményhez (a hibrid inverter teljesítménye) keressük azt a százalékos csúcslevágási határértéket, amellyel az energiatároló teljes mértékben megtölthető. Előfordulhat azonban, hogy az előrejelzések pontatlansága miatt túl magas határérték kerül meghatározásra, melynek következtében az energiatároló nem tud az elvárásoknak megfelelően feltöltődni. Túl alacsony határérték választása esetén az energiatároló feltételezetően megtelik, azonban a teljesítménycsúcsok bizonyos időszakokban nem kerülnek levágásra (16. ábra). Az

előrejelzések hibáinak mérséklése érdekében a töltések és a kisütések után várható töltöttségi szint megbecslésre kerül. A becsült töltöttségi szint azonban magában hordozza az előrejelzések bizonytalanságait, ezért az – historikus adatok ismeretében – a minimális vagy maximális töltöttségi szint elérése esetén korrigálásra kerül. A kisütés várható értéke a hetedik stratégiához hasonlóan a csúcslevágási határérték meghatározását követő 12. órában kerül meghatározásra.



16. ábra: Teljesítményforgalom előrejelzések alapján (6., 8. és 10. scenárió)

Feltételezve továbbra is azt, hogy az energiatároló a negatív teljesítménycsúcsok levágására is alkalmazható, az előrejelzéseken alapuló stratégiáknál is megvizsgálandó ennek lehetősége. Hasonlóan a legutóbb bemutatott stratégiákhoz, a negatív teljesítménycsúcsok levágása mellett az energiatároló megtöltése is ugyanolyan fontos szempont (17. ábra). Jelen stratégia esetében a fent bemutatott stratégiák (6., 8., 10., scenárió) feltételezései egyaránt érvényesek.



17. ábra: Teljesítményforgalom előrejelzések alapján (7., 9. és 11. scenárió)

A dolgozatban korábban bemutatott és megvizsgálni kívánt stratégiákat a lenti táblázat foglalja össze (3. táblázat). A táblázat nem tartalmazza a napi teljesítményküszöb deklarálásán alapuló, megemlítés szintjén létező energiatárolási stratégiákat.

3. táblázat: Jelen dolgozatban bemutatott, illetve megvizsgált scenáriók

Sorszám	Rövid leírás	Célkitűzés
0.	Energiatároló nélküli fotovoltaikus rendszer	referencia
1.	Irányítás nélküli (magára hagyott) energiatárolás	energiatároló megtöltése
2.	Globális határérték szerinti csúcslevágás (pozitív)	csúcslevágás
3.	Globális határérték szerinti csúcslevágás (pozitív, negatív)	csúcslevágás
4.	Energiatároló megtöltése csúcslevágással (pozitív)	csúcslevágás + energiatároló megtöltése
5.	Energiatároló megtöltése csúcslevágással (pozitív, negatív)	csúcslevágás + energiatároló megtöltése
6.	Energiatároló megtöltése csúcslevágással perzisztencia előrejelzések alapján (pozitív)	csúcslevágás + energiatároló megtöltése
7.	Energiatároló megtöltése csúcslevágással perzisztencia előrejelzések alapján (pozitív és negatív)	csúcslevágás + energiatároló megtöltése
8.	Energiatároló megtöltése csúcslevágással AROME termelés előrejelzés alapján (pozitív)	csúcslevágás + energiatároló megtöltése
9.	Energiatároló megtöltése csúcslevágással AROME termelés előrejelzés alapján (pozitív és negatív)	csúcslevágás + energiatároló megtöltése
10.	Energiatároló megtöltése csúcslevágással ECMWF termelés előrejelzés alapján (pozitív)	csúcslevágás + energiatároló megtöltése
11.	Energiatároló megtöltése csúcslevágással ECMWF termelés előrejelzés alapján (pozitív és negatív)	csúcslevágás + energiatároló megtöltése

3.3. Kiértékelés szempontrendszere

A dolgozat előző fejezetében bemutatott scenáriók vizsgálata, illetve a használni kívánt adattömbök feldolgozása egy kifejezetten erre a célra, Python környezetben (Spyder IDE 5.4.1) kifejlesztett algoritmussal történik. Mint ahogy az korábban megemlítésre került, a prozumer amennyiben beruház egy fizikai energiatárolóba, a háztartási méretű fotovoltaikus kiserőműve által megtermelt villamosenergia részarányát kívánja növelni a helyi (éves) fogyasztásában. Ennek sikeressége legegyszerűbben egy olyan arányszám használatával mutatható ki, amely a közvetlenül elfogyasztott fotovoltaikus termelés, illetve a fizikai energiatárolóba betárolt, majd kisütött villamosenergia összegét hasonlítja össze az ingatlan teljes energiaigényével [44]. Tekintettel arra, hogy a felhasznált adatok órás felbontásúak, a vizsgálatok során kapott teljesítményértékek átváltás nélkül energiamennyiségként kezelhetők a (2). számú egyenletben, illetve a későbbiekben részletezett összefüggésekben egyaránt.

$$SSR [\%] = \frac{\sum_{i=24}^{8759} (P_{direkt_PV_i} + P_{tároló_kisütés_i}) [kW]}{\sum_{i=24}^{8759} (P_{fogyasztás_i}) [kW]} * 100 [\%], \quad (2)$$

ahol

SSR : a fotovoltaikus rendszer teljes részaránya az éves energiafogyasztásban [%]

P_{direkt_PV} : a helyi fogyasztásban közvetlenül felhasznált össztermelés [kW]

$P_{tároló_kisütés}$: a fizikai energiatárolóval kielégített összes fogyasztás [kW]

$P_{fogyasztás}$: a képzeletbeli lakóépület összes (éves) villamosenergia-igénye [kW]

A közcélú villamosenergia-hálózatra csatlakozók, illetve az elosztóhálózati engedélyesek számára nem az energiaforgalom csökken(t)ése az elsődleges szempont, hanem a fotovoltaikus betáplálás és a hálózati vételezés abszolút (csúcs)teljesítményének a mérséklése. A hálózati terheléseloszlás megállapítására megoldást nyújthat az éves hálózati terhelés átlagának, illetve szórásának kiszámítása. A hálózat számára a háztartási méretű (hibrid) fotovoltaikus rendszer teljesítménye annál kedvezőbb, minél kisebb az éves hálózati terhelés átlaga, illetve szórása. Jelen dolgozatban a hálózati terhelés átlaga és szórása külön-külön mind a pozitív (betáplálási), mind a negatív (vételezési) irányban, illetve együttesen is kiszámításra kerül. A hálózati terhelés átlagát (számtani középértékét) a (3). számú egyenlet felhasználásával lehet meghatározni. A középérték számításánál használt hálózati terhelés ($P_{KIF_hálózati_i}$) előjelhelyesen tartalmazza a hálózati betáplálás és -vételezés teljesítményét.

$$\overline{P_{KIF_hálózati}} [kW] = \frac{\sum_{i=24}^{8759} P_{KIF_hálózati_i} [kW]}{8760-24}, \quad (3)$$

ahol

$\overline{P_{KIF_hálózati}}$: az éves hálózati terhelés számtani középértéke [kW]

$P_{KIF_hálózati_i}$: a hálózati terhelés adott vizsgálati időszakban (órán) [kW]

A hálózati terhelés szórását a (4). számú egyenlet felhasználásával lehet kiszámítani. Irányra bontott szórás számításakor csak a megegyező előjelű terhelések kerülnek számításba.

$$\sigma_{P_{KIF_hálózati}} [kW] = \sqrt{\frac{\sum_{i=24}^{8759} (P_{KIF_hálózati_i} - \overline{P_{KIF_hálózati}})^2}{8760-24}}, \quad (4)$$

ahol

$\sigma_{P_{KIF_hálózati}}$: a hálózati terhelés szórása a teljes naptári évre vonatkozóan [kW]

Jelen dolgozatban a hálózati terhelés számtani középértékén és szórásán felül kiszámításra kerül a hálózati terhelések négyzetösszege mindkét irányban, illetve együttesen is. A hálózat igénybevételének négyzetes vizsgálatára azért szükséges elsősorban, hogy a hálózati terhelések nagysága a vizsgált scenáriók kiértékelésekor hangsúlyozva legyen. A bemutatott stratégiák, illetve a hálózat tekintetében a minél kisebb négyzetösszeg a kedvezőbb. A hálózati terhelés négyzetösszegének meghatározásához az (5). számú összefüggés alkalmazható:

$$NE [kW^2] = \sum_{i=24}^{8759} (P_{KIF_hálózati_i} [kW])^2, \quad (5)$$

ahol

NE : a hálózati terhelés négyzetes eltérése a teljes naptári évre vonatkozóan $[kW^2]$

$P_{KIF_hálózati_i}$: a hálózati terhelés adott vizsgálati időszakban (órában) $[kW]$

A hálózati terhelés átlagán, szórásán és négyzetösszegén túl az elosztóhálózati engedélyes számára az úgynevezett abszolút csúcsterhelés értéke is kifejezetten fontos. A dolgozatban az abszolút csúcsterhelést a hálózati betáplálások maximuma és a hálózati vételezések minimuma fejezi ki. A kiefeszültségű villamosenergia-hálózat tekintetében az a kedvezőbb, ha ezek az értékek minél közelebb helyezkednek el a nullához. A fizikai energiatároló csúcslevágási teljesítményét azonban az abszolút csúcsterhelésből közvetlenül nem lehet meghatározni, ezért a teljes vizsgálati időszak hálózati terheléseit – mind a betáplálási, mind a vételezési – célszerű tartamdiagramon megjeleníteni. A hálózati teljesítménycsúcs levágása annál sikeresebb, minél alacsonyabb és minél kisebb meredekségű a tartamdiagram teljesítménygörbéje. A dolgozatban – a scenáriók összehasonlíthatósága érdekében – egy-egy egyesített tartamdiagram kap helyet, kiemelve a pozitív és a negatív abszolút csúcsterheléshez közeli értékeket.

A háztartási méretű (hibrid) fotovoltaikus rendszer fogyasztásban mért szerepének, illetve az energiatároló kihasználtságának mértéke mellett ugyanolyan fontos a prozumer számára, hogy az energiatároló élettartamára a sorozatos töltések és kisütések milyen befolyással vannak. A dolgozatban a töltések és kisütések hatásának meghatározása az úgynevezett egyenértékű töltési-kisütési ciklusszám, illetve az összes mélyciklusszám szerint történik. A mélyciklusszám az energiatároló esetében arra vonatkozik, hogy az energiatároló a vizsgált időszakban hányszor lett feltöltve és kisütve a korábban meghatározott töltöttségi szintekre (20% → 80% → 20%). A töltési-kisütési ciklusszám egyenértékűsítése azért szükséges, mert a részleges töltések és kisütések hatásait nem lehet közvetlenül mérni.

Napjainkban a háztartási méretű prozumerok éves villamosenergia-fogyasztását még szaldó képzésével határozzák meg, amelyhez a fogyasztásmérő által rögzített értékeket – vagyis az összes betáplálást és összes vételezést – kell egymásból kivonni. A bruttó elszámolás életbe lépésekor a hálózatba betáplált és a hálózathoz vételezett villamosenergia-mennyisége eltérő egységen kerül elszámolásra, ezért a mérőállás rögzítése önmagában nem lesz elegendő a villamosenergia-költségek pontos meghatározásához. A prozumer számára elengedhetetlen az éves energiaköltség ismerete, hiszen az energiatárolás beruházásának megtérülési idejét ez alapján tudja megbecsülni. A közcélú hálózaton mérhető fel- és le irányú energiaforgalmat az egyes vizsgálati órákban tapasztalt betáplálási- és vételezési teljesítmények összegeként lehet külön-külön meghatározni. Éves energiaköltség a kapott fel- és le irányú villamosenergia-forgalom a megadott egységgel szorozva, majd a két értéket egymásból kivonva kapható. Piaci alapú elszámolás esetén az éves energiaköltség úgy számítható ki, hogy az adott órában tapasztalható energiaforgalom és az adott órához tartozó piaci ár szorzatát összegezzük. Hálózati betáplálás esetén az órás energiaköltség előjele negatív, hálózati vételezés esetén pedig pozitív. Amennyiben az éves energiaköltség előjele negatív, a prozumer felé a kereskedőnek fizetési kötelezettsége keletkezik. A megtérülési idő kiszámításához célszerű a referenciaeset (0. scenárió) éves energiaköltségét összevetni a tárolási stratégiákban kapott értékekkel.

A bemutatott, előrejelzéseken alapuló stratégiák átfogó értékeléséhez nélkülözhetetlen az előrejelzések pontosságának megállapítása különféle hibamutatók számításával. A dolgozatban háromféle mutató kerül definiálásra: az átlagos hiba (MBE), az átlagos abszolút hiba (MAE), illetve az átlagos négyzetes hiba gyöke (RMSE). Tekintettel arra, hogy a fogyasztás előrejelzése valamennyi stratégia esetében perzisztencia előrejelzésen alapul, a fent említett hibamutatók kizárólag a termelés előrejelzésekre kerülnek kiszámításra. A termelés előrejelzések átlagos hibája (MBE) a (6). számú összefüggést használva határozható meg. Egy termelés előrejelzés akkor tekinthető pontosnak, ha az MBE hiba értéke nulla. Negatív érték a termelési adatok alulbecslésére, pozitív érték a termelési adatok túlbecslésére utal [45].

$$MBE_{termelés_előrejelzés} = \frac{1}{8760-24} * \sum_{i=24}^{8759} (P_{előrejelzett_i} - P_{mért_i}), \quad (6)$$

ahol

$MBE_{termelés_előrejelzés}$: a termelés előrejelzés átlagos hibája [kW]

$P_{előrejelzett_i}$: egy adott órában előrejelzett fotovoltaiikus termelés [kW]

$P_{mért_i}$: egy adott órában tapasztalt fotovoltaiikus termelés [kW]

A termelés előrejelzések átlagos abszolút hibája (MAE) a (7). számú egyenletet használva számítható ki. Hibátlan előrejelzés esetén a MAE értéke nulla. Ha a MAE értéke nem nulla, akkor a nullához legközelebb álló előrejelzés számít a legpontosabbnak [46].

$$MAE_{termelés_előrejelzés} = \frac{1}{8760-24} * \sum_{i=24}^{8759} |P_{előrejelzett_i} - P_{mért_i}|, \quad (7)$$

ahol

$MAE_{termelés_előrejelzés}$: a termelés előrejelzés átlagos abszolút hibája [kW]

$P_{előrejelzett_i}$: egy adott órában előrejelzett fotovoltaikus termelés [kW]

$P_{mért_i}$: egy adott órában tapasztalt fotovoltaikus termelés [kW]

A dolgozatban használt termelés előrejelzések átlagos négyzetes hibájának gyöke (RMSE) a lenti, (8). számú összefüggést felhasználva állapítható meg. Jelen hibamutató kiszámítását követően az az előrejelzés számít a pontosabbnak, amelynek RMSE hibája alacsonyabb [45].

$$RMSE_{termelés_előrejelzés} = \sqrt{\frac{1}{8760-24} * \sum_{i=24}^{8759} (P_{előrejelzett_i} - P_{mért_i})^2}, \quad (8)$$

ahol

$RMSE_{termelés_előrejelzés}$: a termelés előrejelzés átlagos négyzetes hibájának gyöke [kW]

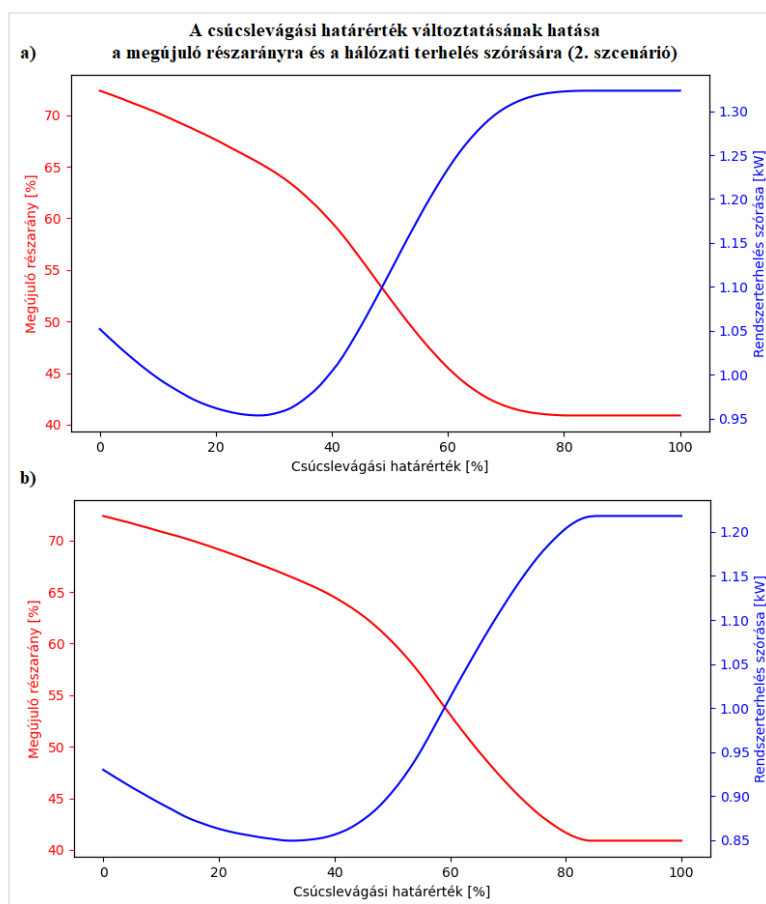
$P_{előrejelzett_i}$: egy adott órában előrejelzett fotovoltaikus termelés [kW]

$P_{mért_i}$: egy adott órában tapasztalt fotovoltaikus termelés [kW]

4. EREDMÉNYEK, KIÉRTÉKEELÉS

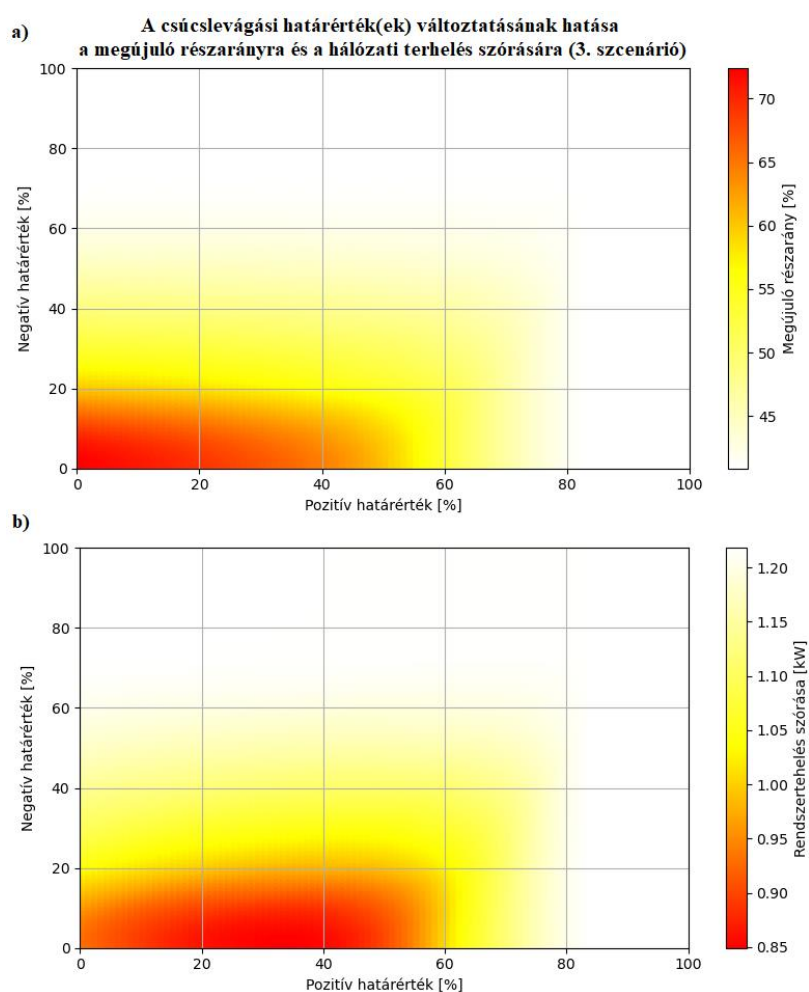
4.1. Előrejelzések nélküli, ideális stratégiák

Korábban említésre került, hogy a globális csúcslevágási határteljesítmény, pontosabban a globális határérték megválasztásának a megújuló részarányra és a hálózati terhelés szórására való hatása grafikusan kerül megjelenítésre (18. ábra). A részletes eredmények azt mutatták, hogy kizárólag a betáplálási teljesítménycsúcsok levágása esetén (2. scenárió) a legnagyobb megújuló részarány 0%-os határértéknél (72,37%), a legkisebb szórás 27%-os határértéknél (0,954 kW) található a nagyobb teljesítményű inverter használatakor (5 kW_{AC}). Kisebb inverter teljesítmény (3,5 kW_{AC}) esetén a legnagyobb megújuló részarány szintén 0%-os határértéknél (72,37%), a legkisebb szórás pedig 33%-os határértéknél (0,849 kW) tapasztalható. Jól látható, hogy a megújuló részarány minden esetben növekszik a határérték csökkentésével. A hálózati terhelés szórása a fenti határérték(ek)ig csökken, az(ok) alatt pedig emelkedik, ennél fogva a csúcslevágás hatékonyságának javítása érdekében az említett határérték(ek) használata javasolt. Jelen dolgozatban a fenti mutatók vizsgálatához szintén ezen értékek kerültek felhasználásra.



18. ábra: A csúcslevágási határérték megváltoztatásának hatása a megújuló részarányra, illetve a közcélú villamosenergia-hálózat terhelésének szórására (2. scenárió) mind a nagyobb (a), mind a kisebb (b) teljesítményű inverter használata esetén

Mind a pozitív, mind a negatív globális határérték megváltoztatásának hatása a megújuló részarány és a hálózati terhelés szórásának alakulására egy hőterképen került szemléltetésre (19. ábra). A lenti hőterképeken a sötétebb színű pontok a kedvezőbb, a világosabbak pedig a kedvezőtlenebb értékeket reprezentálják. Felismerve azt, hogy a fenti ábrán bemutatott görbék jellegre megegyeznek, ebben a dolgozatban csak a szemléletesebb hőterkép kerül bemutatásra. Nagyobb inverter (5 kW) beépítése esetén a legnagyobb megújuló részarány 0%-os pozitív határérték és 0%-os negatív határérték (72,37%), míg a legkisebb terhelési szórás 27%-os pozitív határérték és 0%-os negatív határérték (0,954 kW) megválasztásakor érhető el. Kisebb teljesítményű inverterrel (3,5 kW) a legnagyobb megújuló részarány 0%-os pozitív határérték és 0%-os negatív határérték (72,37%), a legkisebb szórás pedig 33%-os pozitív határérték és 1%-os negatív határérték (0,849 kW) megválasztása esetén érhető el. Tudatában annak, hogy a legmagasabb megújuló részarány ebben a stratégiában (illetve a korábbiakban is) csúcselevágás nélkül érhető el, ezért a kapcsolódó táblázatok értékeinek (4-5. táblázat) meghatározásához a legkisebb szóráshoz tartozó határértékek lettek felhasználva.



19. ábra: A határérték változtatásának hatása a megújuló részarányra (a), illetve a hálózat terhelésének szórására (b) (3. szcenárió) kisebb méretű (3,5 kW_{AC}) inverter használata esetén

A dolgozatban megvizsgált, a termelési- és fogyasztási adatok ismeretén alapuló (ideális) stratégiák – a prozumer számára releváns mutatószámok – eredményeit a lenti táblázat tartalmazza inverter-teljesítményekre bontva (4. táblázat). A referenciaesetben (0. scenárió), azaz a hagyományos, fizikai energiatároló nélkül működő fotovoltaikus rendszer esetében a közvetlen fotovoltaikus fogyasztás az egész éves villamosenergia-igény (5651 kWh) mintegy 40,89%-át biztosította. A későbbiekben használt, úgynevezett megújuló részarány a közvetlen fotovoltaikus fogyasztás és az energiatárolóból kisütött villamosenergia mennyiségének az éves villamosenergia-igényhez viszonyított arányát jelenti. Mint látható, mindkét inverter méretezés esetében a legmagasabb megújuló részarány (72,37%) a legegyszerűbb energiatárolási stratégia (1. scenárió) esetében érhető el, azonban ez a stratégia rendelkezik a legnagyobb egyenértékű töltési-kisütési ciklusszámmal is. Tudatában annak, hogy a fizikai energiatároló esetében – 0,005%-os ciklusdegradáció mellett (2. táblázat) – összesen 4000 töltési-kisütési ciklus lett feltételezve, a fent említett ciklusszám több mint 13 év üzemelést tesz lehetővé. Bruttó elszámolás esetén a prozumer a nagyobb teljesítményű inverter és a fent megjelölt kapacitású energiatároló használatával – a referenciaesethez viszonyítva – évente mindössze 55483 Ft villamosenergia-költséget takarít meg, amely nem teszi lehetővé az ilyen beruházások közeli megtérülését [47]. Piaci elszámolás alkalmazása esetén a „magára hagyott” energiatárolási stratégia 82,28 euró hozamot eredményez, amely a Magyar Nemzeti Bank által közzétett éves euró középárfolyam (391,33 Ft/€) alapján mindössze 32199 Ft bevétele növekedést jelent a referenciához képest [48]. Piaci elszámolásban a prozumer számára a legmagasabb hozamot a negyedik scenárió kínálja (122,17 euró), azonban ideális eset révén a stratégia a gyakorlatba nem áttűtethető, ezáltal ez a bevétel a valóságban nem realizálható. Globális csúcsteljesítmény megválasztása esetén (2-3. scenárió) – a hálózati terhelés szórásának csökkentésére is figyelve – mintegy 65,52%-os megújuló részarány érhető el a nagyobb teljesítményű hibrid inverterrel. A két energiatárolási stratégia megújuló részaránya azért azonos, mert ugyanaz a csúcslevágási teljesítménykülöbség (27%, azaz 1,35 kW) eredményezte a legalacsonyabb kétirányú (betáplálási és vételezési) terhelési szórást. A lítium ion akkumulátor kihasználtságának növelését és a teljesítménycsúcsok levágását szorgalmazó stratégiák (4-5. scenárió) a legegyszerűbb tárolási stratégiához közeli megújuló részarányt tennének lehetővé, azonban a termelési- és fogyasztási adatok pontos ismerete nélkül a gyakorlatban nem megvalósíthatóak.

Kisebb inverter méretezési tényezőjű fotovoltaikus rendszer telepítése esetén, a referencia scenáriót (0. scenárió) és a legegyszerűbb energiatárolási stratégiát (1. scenárió) tekintve egyedül az energiaköltségekben tapasztalható változás. A bruttó energiaköltségek emelkedését, illetve a piaci alapú elszámolás hozamainak csökkenését a hibrid inverter teljesítményének

csökkenése okozta. Nagyobb inverter-teljesítmény (5 kW) mellett 7418,2 kWh villamosenergia előállítására lenne megvalósítható, amely a kisebb teljesítményű inverter (3,5 kW) alkalmazása esetén 7026,1 kWh-ra módosulna. A megújuló részarány mindkét scenárióban megegyezik a nagyobb inverterrel szerelt rendszer értékeivel, amelyből az a következtetés vonható le, hogy a hibrid inverter teljesítményének csökkenése miatt levágott fotovoltaikus termelési csúcsértékek nem járultak hozzá a megújuló részarány emelkedéséhez. Globális határteljesítmény szerinti csúcslevágás (2-3. scenárió) esetében a nagyobb inverter méretezésű rendszerhez képest kedvezőbb megújuló részarány tapasztalható, amely kizárólag az alacsonyabb határértéknek (33%, azaz 1,155 kW) köszönhető. A fenti két stratégia eredményei azért térnek el minimálisan egymástól, mert a 3. scenárió vonatkozásában a negatív csúcslevágási határérték nem nulla (1%, azaz -0,025 kW). A 4. és 5. stratégiákban – a referenciához, az egyszerű energiatároláshoz és a nagyobb inverterrel szerelt rendszer azonos stratégiáiban kapott értékekhez hasonlóan – kizárólag az energiaköltségekben tapasztalható érdemi változás, ugyanis az energiatároló ugyanolyan mértékben került kihasználásra a háztartási méretű fotovoltaikus rendszer termelési csúcsaitól függetlenül. Ebből arra lehet következtetni, hogy az energiaigények kielégítését a kisebb teljesítményű inverter is azonos mértékben tudja biztosítani.

4. táblázat: A prozumer számára releváns teljesítménymutatók az ideális scenáriókban (a legnagyobb megújuló részaránnyal rendelkező stratégia pirossal lett kiemelve)

Inv. méret	Eset-szám	Megújuló részarány (%)	Energiatároló részaránya (%)	Egyenértékű ciklusszám (db/év)	Mélyciklus-szám (db/év)	Bruttó energia-költség (HUF/év)	Piaci energia-költség (EUR/év)
5 kW	0.	40,89	-	-	-	96472	-404,06
	1.	72,37	31,48	300	266	40989	-486,34
	2.	65,52	24,63	234	179	53067	-497,22
	3.	65,52	24,63	234	179	53067	-497,22
	4.	71,18	30,29	288	154	43085	-526,23
	5.	72,30	31,41	299	259	41108	-508,49
3,5 kW	0.	40,89	-	-	-	98475	-308,25
	1.	72,37	31,48	300	266	42995	-390,82
	2.	66,35	25,46	242	185	53605	-402,08
	3.	66,26	25,37	241	164	53759	-399,38
	4.	71,18	30,29	288	153	45090	-428,06
	5.	72,30	31,41	299	258	43114	-410,25

A kiefeszültségű villamosenergia-hálózatra csatlakozók és az elosztóhálózati engedélyes tekintetében lényeges mutatók eredményeit a következő oldalon található táblázat tartalmazza inverter-teljesítményekre és stratégiákra bontva (5. táblázat). Korábban megemlítsük, hogy a prozumer számára legkedvezőbb megújuló részarányt és energiaköltséget a figyelmet nem igénylő energiatárolási stratégia (1. scenárió) eredményezné, azonban a közcélú hálózat

tekintetében ez rendelkezik a legkedvezőtlenebb pozitív irányú (hálózati betáplálás) mutatókkal (szórás, négyzetes eltérés) valamennyi ideális tárolási stratégiához képest. Annak ellenére, hogy a 2. és a 3. scenárió esetében a globális csúcslevágási határérték a legkisebb pozitív és negatív irányú (összterhelési) szórás alapján került kiválasztásra, a nagyobb méretű inverter (5 kW) esetében egyáltalán nem, a kisebb méretű inverter (3,5 kW) tekintetében minimális csökkenés tapasztalható az abszolút pozitív csúcserőben. Ebből arra lehet következtetni, hogy globális határérték kiválasztása esetén az energiatároló nem minden esetben képes az abszolút csúcsokat (elsősorban a nyári időszakban) lekezelni, és az energiatároló idő előtti feltöltődése miatt nem levágott betáplálási teljesítménycsúcsok a kisfeszültségű villamosenergia-hálózaton váratlan teljesítmény-növekedést eredményezhetnek, amelynek lesabályozása számottevően nehezebb, mint az állandóan magas, ámde kisebb ingadozású teljesítménycsúcsoké. Jól látható, hogy az 5. scenárió esetében a legalacsonyabb a hálózati terhelés szórása, abszolút csúcsa (pozitív és negatív irányban egyaránt), illetve a terhelések négyzetes, nullától való eltérésének mértéke, ugyanis a határértékek az energiatároló töltöttségi szintjétől függően kerülnek meghatározásra. Ily módon a hirtelen teljesítmény-ingadozások elkerülhetők, az abszolút teljesítménycsúcsok pedig jelentős mértékben csökkenthetők. Annak ellenére, hogy ez az (ideális) scenárió rendelkezik a legkedvezőbb mutatókkal, a termelési- és fogyasztási adatok pontos ismerete nélkül ez az energiatárolási stratégia a gyakorlatban nem megvalósítható.

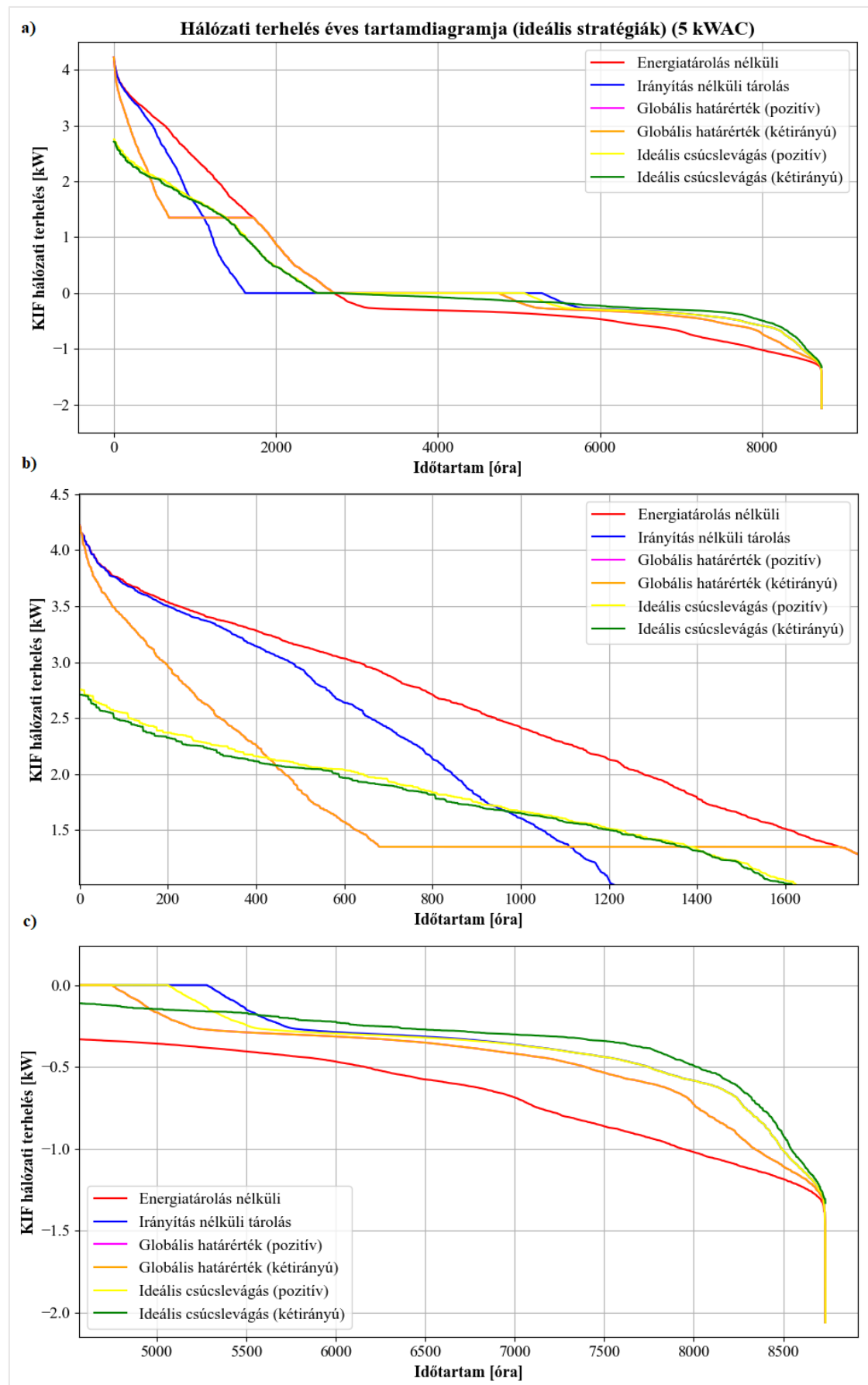
5. táblázat: A hálózat tekintetében releváns teljesítménymutatók az ideális scenáriókban (a legkisebb kétirányú szórással rendelkező stratégia pirossal lett kiemelve)

	Eset- szám	Absz. poz. csúcs (kW)	Absz. neg. csúcs (kW)	Össz- terh. szórás (kW)	Össz. négyz. elt. (kW ²)	Poz. terh. átlag (kW)	Poz. terh. szórás (kW)	Poz. négyz. elt. (kW ²)	Neg. terh. átlag (kW)	Neg. terh. szórás (kW)	Neg. négyz. elt. (kW ²)
5 kW	0.	4,22	-2,06	1,32	15651	1,87	1,16	13232	-0,55	0,31	2420
	1.	4,22	-2,06	1,05	10027	1,22	1,19	9088	-0,26	0,27	939
	2.	4,22	-2,06	0,95	8305	1,36	0,86	7028	-0,32	0,29	1277
	3.	4,22	-2,06	0,95	8305	1,36	0,86	7028	-0,32	0,29	1277
	4.	2,75	-2,06	0,87	7000	1,24	0,77	6040	-0,27	0,26	961
	5.	2,71	-1,33	0,84	6571	1,22	0,75	5808	-0,26	0,25	763
3,5 kW	0.	3,04	-2,06	1,22	13177	1,73	0,98	10757	-0,55	0,31	2420
	1.	3,02	-2,06	0,93	7772	1,07	0,97	6833	-0,26	0,27	939
	2.	2,98	-2,06	0,85	6520	1,20	0,71	5286	-0,31	0,29	1234
	3.	2,98	-2,06	0,85	6518	1,20	0,71	5305	-0,32	0,32	1212
	4.	2,13	-2,06	0,78	5509	1,10	0,63	4548	-0,27	0,26	961
	5.	2,04	-1,33	0,75	5113	1,08	0,61	4349	-0,26	0,25	764

A stratégiák eredményességét és a fizikai energiatároló teljesítményét a fenti eredményeken kívül érdemes tartamdiagramon keresztül is megvizsgálni (20. ábra). A tartamdiagram(ok) vonatkozásában is elmondható, hogy a megjelenített görbék a két inverter-teljesítmény esetében jellegre megegyeznek, ezért csak a szemléletesebb – a nagyobb inverter – kerül bemutatásra. A tartamdiagram kiértékelésében a lenti táblázatban feltüntetett eredmények segítséget nyújtanak (6. táblázat). A táblázatban szereplő „nulla terhelések mennyisége” arra az éves óraszámra utal, amikor sem hálózati betáplálás (pozitív), sem hálózati vételezés (negatív) nem tapasztalható. A referencia szcenárió (piros görbe) esetében jól látható, hogy a dolgozat vizsgálati időszakában a termelés egyszer sem egyenlíti ki teljesen a fogyasztást, ezáltal a villamosenergia-hálózaton mindig tapasztalható terhelés. A prozumer számára legkedvezőbb energiatárolási stratégia (kék görbe) nélkülözi a leghosszabb ideig (3658, illetve 3671 óra) a közcélú hálózatot, mivel az energiatároló alapvetően a napkelte és napnyugta körüli terheléseket szolgálja ki. A nagyobb inverter használata esetén a globális határértékeken alapuló energiatárolási stratégiák görbéi (magenta és narancs görbe) egybeesnek a megegyező teljesítménykülöbség következtében. Jól látható, hogy a pozitív határteljesítmény feletti rész nem minden órában került levágásra: a nagyobb inverternél az esetek 39,5%-ban (1723 órából 680-szor), a kisebb inverternél pedig az előfordulások 36,8%-ban (1853 órából 682-szer) nem lett levágva. A 4. és 5. stratégia (sárga és zöld görbe) kapcsán észrevehető, hogy a betáplálás (pozitív irány) teljesítménye lényegesen alacsonyabb (kisebb abszolút pozitív csúcs), illetve egyenletesebb (kisebb meredekségű görbe). Megfigyelhető az is, hogy az 5. stratégia görbéje (zöld) mind a pozitív, mind a negatív tartományban a nullához közelebb helyezkedik el – a 4. szcenárióhoz viszonyítva (sárga) –, ezért az említett energiatárolási stratégiának előrejelzésekkel való közelítése javasolt, hiszen az eredmények alapján ez a stratégia felel meg legjobban a prozumer és a hálózat érdekeinek.

6. táblázat: A tartamdiagram kiértékelését segítő mutatószámok (ideális stratégiák)

Inverter méret	Eset-szám	Stratégia neve	Abszolút poz. csúcs (kW)	Abszolút neg. csúcs (kW)	Nulla terhelések mennyisége (óra)
5 kW	0.	Energiatárolás nélküli	4,22	-2,06	0
	1.	Irányítás nélküli tárolás	4,22	-2,06	3658
	2.	Globális határérték (pozitív)	4,22	-2,06	2028
	3.	Globális határérték (negatív)	4,22	-2,06	2028
	4.	Ideális csúcslevágás (pozitív)	2,75	-2,06	2552
	5.	Ideális csúcslevágás (kétirányú)	2,71	-1,33	301
3,5 kW	0.	Energiatárolás nélküli	3,04	-2,06	0
	1.	Irányítás nélküli tárolás	3,02	-2,06	3671
	2.	Globális határérték (pozitív)	2,98	-2,06	2089
	3.	Globális határérték (negatív)	2,98	-2,06	0
	4.	Ideális csúcslevágás (pozitív)	2,13	-2,06	2551
	5.	Ideális csúcslevágás (kétirányú)	2,04	-1,33	301



20. ábra: A dolgozatban megvizsgált ideális scénáriók tartamdiagramja (5 kW_{AC}) a teljes vizsgálati intervallumban (a), illetve a pozitív (b) és a negatív csúcsok (c) közelében

4.2. Előrejelzéseken alapuló, realisztikus stratégiák

Említve lett, hogy az ideális energiatárolási stratégiák közül az energiatároló legnagyobb mértékű kihasználtságára, illetve a pozitív és negatív teljesítménycsúcsok levágására irányuló energiatárolási stratégiát (5. scenárió) termelés- és fogyasztás előrejelzések alapján érdemes megvalósítani, illetve közelíteni. A termelés- és fogyasztás előrejelzésen alapuló (realisztikus) stratégiák eredményeit – illetve a prozumer számára fontos mutatók értékeit – a lenti táblázat inverter-teljesítményekre bontva tartalmazza (7. táblázat). A táblázatban látható eredmények azt mutatják, hogy a legnagyobb megújuló részarányt a realisztikus esetek közül az AROME termelés előrejelzésen és perzisztencia fogyasztás előrejelzésen alapuló, pozitív csúcslevágást megvalósító energiatárolási stratégia (8. scenárió) biztosította. Jelen stratégia a fenti megújuló részarányt mind az első, mind pedig az ötödik scenárióhoz képest is kevesebb töltési-kisütési ciklusszám és mélyciklusszám felhasználásával teszi lehetővé, amely a fizikai energiatároló ciklusélettartamát több mint egy évvel (14,5 évre) hosszabbítja meg. Annak ellenére, hogy bruttó elszámolásban magasabb villamosenergia-költséggel kell számolni, piaci elszámolásban bevételnövekedés tapasztalható mind az első, mind pedig az ötödik stratégiához képest. A prozumer tekintetében az AROME előrejelzés használata javasolt annak ellenére, hogy mind a perzisztencia előrejelzésen (6-7. scenárió), mind az ECMWF előrejelzésen (10-11. scenárió) alapuló energiatárolási stratégiák kedvezőbb ciklusélettartamot tesznek lehetővé.

7. táblázat: A prozumer számára releváns teljesítménymutatók a realisztikus scenáriókban (zölddel kiemelve a legkedvezőbb ideális-, míg pirossal a legkedvezőbb realisztikus stratégia)

Inv. méret	Eset-szám	Megújuló részarány (%)	Energiatároló részaránya (%)	Egyenértékű ciklusszám (db/év)	Mélyciklusszám (db/év)	Bruttó energia-költség (HUF/év)	Piaci energia-költség (EUR/év)
5 kW	0.	40,89	-	-	-	96472	-404,06
	1.	72,37	31,48	300	266	40989	-486,34
	5.	72,30	31,41	299	259	41108	-508,49
	6.	65,71	24,82	236	146	52728	-501,22
	7.	65,37	24,48	233	121	53326	-491,15
	8.	69,77	28,89	275	202	45566	-510,08
	9.	68,94	28,05	267	133	47037	-495,63
	10.	67,66	26,77	255	159	49287	-508,50
	11.	67,90	27,02	257	121	48863	-496,95
3,5 kW	0.	40,89	-	-	-	98475	-308,25
	1.	72,37	31,48	300	266	42995	-390,82
	5.	72,30	31,41	299	258	43114	-410,25
	6.	66,50	25,62	243	145	53331	-407,04
	7.	66,16	25,28	240	119	53933	-396,76
	8.	69,46	28,57	272	176	48124	-415,50
	9.	68,78	27,90	265	125	49313	-401,10
	10.	67,18	26,29	250	130	52143	-412,71
	11.	67,57	26,68	254	106	51454	-401,39

A kisfeszültségű villamosenergia-hálózatra csatlakozók és az elosztóhálózati engedélyes tekintetében releváns mutatók eredményei az alábbi táblázatban lettek összesítve (8. táblázat). Jól látható, hogy az abszolút pozitív csúcsterhelés, a teljes hálózati terhelés szórása és négyzetes eltérése az ECMWF termelés előrejelzésen és perzisztencia fogyasztás előrejelzésen alapuló, pozitív és negatív csúcslevágást megvalósító energiatárolási stratégia (11. scenárió) esetében – mindkét inverter-teljesítmény tekintetében – a legkedvezőbb a hálózat számára. Negatív irányú csúcslevágás esetén azonban az AROME előrejelzésen alapuló stratégia (9. scenárió) bizonyult kedvezőbbnek, hiszen mind az abszolút negatív csúcsteljesítmény, mind pedig a negatív irányú terhelési mutatók (átlag, szórás, négyzetes eltérés) tekintetében jobban teljesített. Feltételezve azt, hogy az elosztóhálózati engedélyes a negatív irányú (vételezési) terhelések kezelésére fel van készítve, így nem elsődleges szempont a negatív irányú csúcsok levágása. Könnyen észrevehető azonban az, hogy a perzisztencia előrejelzés – mindkét időjárás-alapú előrejelzéshez hasonlítva – kedvezőtlenebb eredményekhez vezetett, ezért a jelen alkalmazási területen érdemes a lehetőségekhez mérten valós előrejelzésekre támaszkodni.

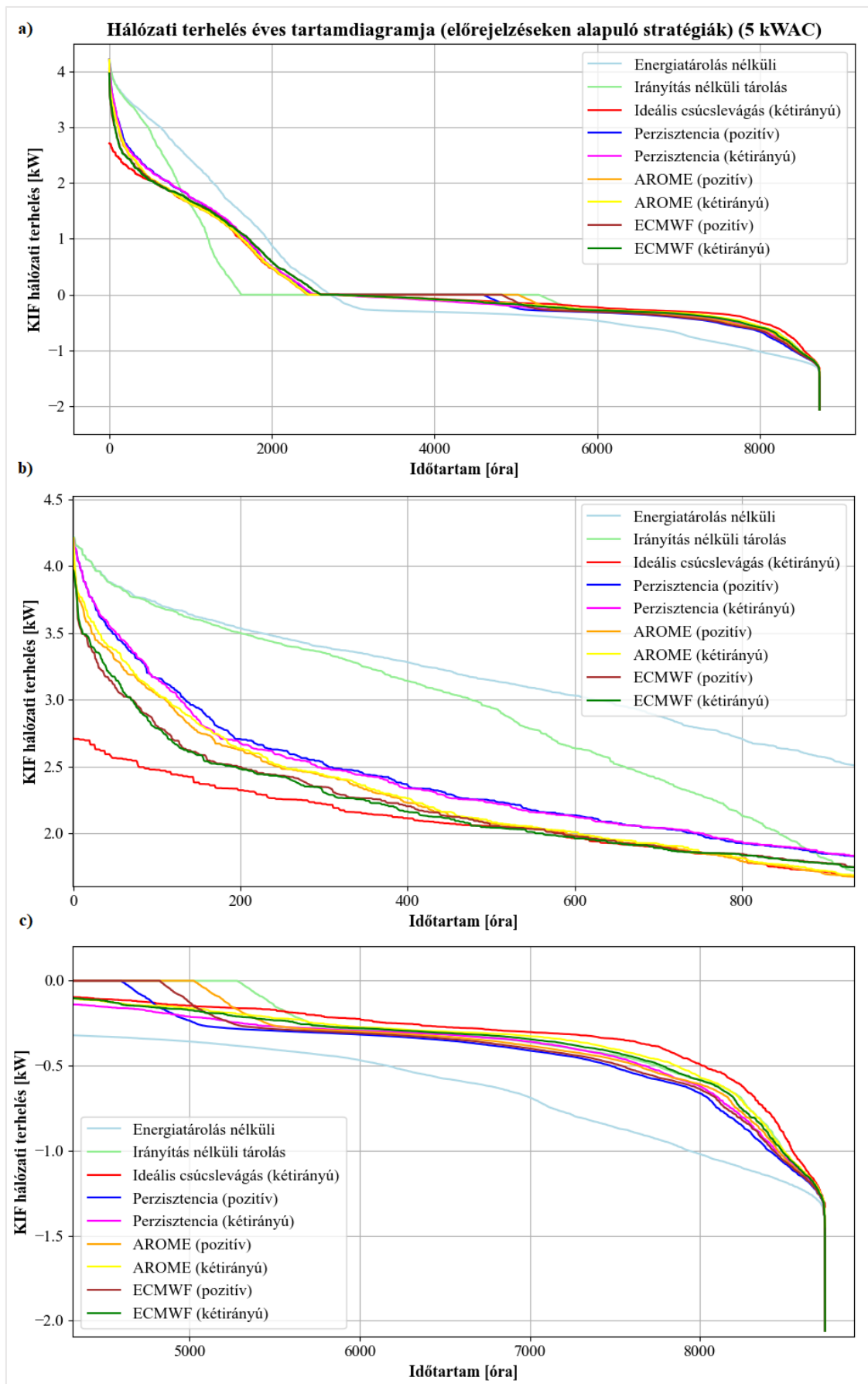
8. táblázat: A hálózat tekintetében releváns teljesítménymutatók a realisztikus scenáriókban (zölddel kiemelve a legkedvezőbb ideális-, míg pirossal a legkedvezőbb realisztikus stratégia)

	Eset- szám	Absz. poz. csúcs (kW)	Absz. neg. csúcs (kW)	Össz- terh. szórás (kW)	Össz. négyz. elt. (kW ²)	Poz. terh. átlag (kW)	Poz. terh. szórás (kW)	Poz. négyz. elt. (kW ²)	Neg. terh. átlag (kW)	Neg. terh. szórás (kW)	Neg. négyz. elt. (kW ²)
5 kW	0.	4,22	-2,06	1,32	15651	1,87	1,16	13232	-0,55	0,31	2420
	1.	4,22	-2,06	1,05	10026	1,22	1,19	9088	-0,26	0,27	939
	5.	2,71	-1,33	0,84	6571	1,22	0,75	5808	-0,26	0,25	763
	6.	4,21	-2,06	0,98	8729	1,36	0,91	7523	-0,32	0,27	1206
	7.	4,21	-1,48	0,97	8595	1,36	0,90	7516	-0,32	0,27	1079
	8.	4,05	-2,06	0,92	7725	1,27	0,85	6679	-0,28	0,27	1046
	9.	4,21	-1,45	0,92	7741	1,29	0,86	6819	-0,29	0,26	922
	10.	3,97	-2,06	0,92	7776	1,32	0,81	6645	-0,30	0,27	1131
	11.	3,97	-2,06	0,91	7572	1,31	0,81	6592	-0,30	0,27	980
3,5 kW	0.	3,04	-2,06	1,22	13177	1,73	0,98	10757	-0,55	0,31	2420
	1.	3,02	-2,06	0,93	7772	1,07	0,97	6833	-0,26	0,27	939
	5.	2,04	-1,33	0,75	5113	1,08	0,61	4349	-0,26	0,25	764
	6.	3,00	-2,06	0,87	6796	1,20	0,74	5624	-0,31	0,27	1172
	7.	3,00	-1,48	0,86	6666	1,20	0,74	5625	-0,32	0,27	1042
	8.	2,98	-2,06	0,82	6120	1,13	0,69	5068	-0,28	0,27	1052
	9.	2,98	-1,45	0,82	6077	1,15	0,69	5155	-0,29	0,26	922
	10.	2,94	-2,06	0,83	6279	1,18	0,67	5138	-0,31	0,27	1141
	11.	2,94	-2,06	0,82	6028	1,17	0,66	5041	-0,30	0,27	986

Hasonlóan az ideális stratégiákhoz, az energiatároló teljesítményét, illetve a stratégiák eredményességét a fenti eredményeken kívül tartamdiagram alapján is érdemes megvizsgálni (21. ábra). A lenti tartamdiagram tekintetében is kijelenthető, hogy a bemutatott görbék a két inverter-teljesítmény esetében jellegre azonosak, így a könnyebb szemléltetés érdekében csak a nagyobb teljesítményű inverterre vonatkozó görbék kerülnek megjelenítésre és tárgyalásra. A tartamdiagramról nehezen leolvasható, a kiértékelést azonban támogató mutatószámok a lenti táblázatban lettek feltüntetve (9. táblázat). A viszonyítás kedvéért a referenciaeset (világoskék görbe) és a legegyszerűbb energiatárolási stratégia (világoszöld görbe) is szemléltetésre kerül. A tartamdiagramról könnyen leolvasható, hogy az abszolút pozitív csúcs közelében az ECMWF előrejelzésen alapuló stratégiák (barna és zöld) közelítik meg a legjobban az ideális, előrejelzés nélküli scenáriót (piros görbe), azonban az abszolút negatív csúcshoz közeli tartományban az AROME előrejelzésen alapuló, kétirányú csúcslevágást szorgalmazó (9. scenárió) stratégia teljesített jobban (sárga görbe) mindkét inverter-teljesítmény esetében. Megfigyelhető az is, hogy a perzisztencia előrejelzéseken alapuló stratégiák (6-7. scenárió) a lenti táblázat és a tartamdiagram szerint minden tekintetben kedvezőtlen eredményeket produkáltak. Fontos megemlíteni, hogy a realisztikus scenáriók közül az AROME termelés előrejelzésen alapuló energiatárolási stratégiák ritkábban veszik igénybe a kifestültségű villamosenergia-hálózatot. Kiemelendő továbbá, hogy az AROME alapú, csak pozitív csúcslevágásra irányuló stratégia biztosította a legnagyobb megújuló részarányt is. Annak ellenére, hogy egyes mutatók szerint az ECMWF előrejelzés használata kedvezőbb, az AROME előrejelzés használata javasolt.

9. táblázat: A tartamdiagram kiértékelését segítő mutatószámok (realisztikus stratégiák)

Inverter méret	Eset-szám	Stratégia neve	Abszolút poz. csúcs (kW)	Abszolút neg. csúcs (kW)	Nulla terhelések mennyisége (óra)
5 kW	0.	Energiatárolás nélküli	4,22	-2,06	0
	1.	Irányítás nélküli tárolás	4,22	-2,06	3658
	5.	Ideális csúcslevágás (kétirányú)	2,71	-1,33	301
	6.	Perzisztencia (pozitív)	4,21	-2,06	2102
	7.	Perzisztencia (kétirányú)	4,21	-1,48	250
	8.	AROME (pozitív)	4,05	-2,06	2586
	9.	AROME (kétirányú)	4,21	-1,45	310
	10.	ECMWF (pozitív)	3,97	-2,06	2224
	11.	ECMWF (kétirányú)	3,97	-2,06	190
3,5 kW	0.	Energiatárolás nélküli	3,04	-2,06	0
	1.	Irányítás nélküli tárolás	3,02	-2,06	3671
	5.	Ideális csúcslevágás (kétirányú)	2,04	-1,33	301
	6.	Perzisztencia (pozitív)	3,00	-2,06	2176
	7.	Perzisztencia (kétirányú)	3,00	-1,48	263
	8.	AROME (pozitív)	2,98	-2,06	2525
	9.	AROME (kétirányú)	2,98	-1,45	307
	10.	ECMWF (pozitív)	2,94	-2,06	2147
	11.	ECMWF (kétirányú)	2,94	-2,06	202



21. ábra: A dolgozatban megvizsgált realisztikus scenáriók tartamdiagramja (5 kW_{AC}) a teljes vizsgálati intervallumban (a), illetve a pozitív (b) és a negatív csúcsok (c) közelében

4.3. Termelés előrejelzések pontossága

A 3.3. fejezetben ismertetett hibamutatók eredményei (10. táblázat) alapján kijelenthető, hogy a bemutatott háztartási méretű fotovoltaikus (hibrid) rendszer esetében az ECMWF időjárás-előrejelzésen alapuló termelés előrejelzés számít a legpontosabbnak (MAE és RMSE) mindkét inverter-teljesítmény tekintetében, habár a termelési értékek minimálisan túlbecsültek (MBE = 0,04, illetve MBE = 0,05). A termelés előrejelzések átlagos abszolút hibájára (MAE) és az átlagos négyzetes hiba gyökére (RMSE) az inverter méretezési tényező 0,7-re való csökkentése egyértelműen kedvezően hatott, amelyet Dr. Mayer Martin János kutatása is alátámaszt [49]. A termelés előrejelzések átlagos hibájánál (MBE) az AROME előrejelzés tekintetében minimális javulás, az ECMWF előrejelzés vonatkozásában minimális romlás jelentkezett. A perzisztencia előrejelzés tekintetében mind az átlagos abszolút hiba (MAE), mind pedig az átlagos négyzetes hiba gyöke (RMSE) észrevehetően kedvezőtlenebb, mint a numerikus időjárás-előrejelzéseken alapuló termelés előrejelzések azonos hibamutatói. A perzisztencia előrejelzés vonatkozásában az átlagos hiba vizsgálata nem indokolt, hiszen minden esetben a megelőző nap termelési- és fogyasztási adatai vannak felhasználva előrejelzésre, így a teljes vizsgálati időszakban a hibák kiegyenlítik egymást. Mindezek ellenére a perzisztencia előrejelzés használata csak abban az esetben ajánlott, hogyha (numerikus) időjárás előrejelzésen alapuló termelés előrejelzés nem áll rendelkezésre, illetve ha annak beszerzése és implementálása olyan kiadásokkal jár, amelyet a prozumer nem tud, esetleg nem kíván külső anyagi források (támogatások) nélkül bevállalni.

10. táblázat: A dolgozatban használt előrejelzések hibamutatói (jelen alkalmazási területen a legpontosabb termelés előrejelzés pirossal lett kiemelve)

Inverter méret	Stratégia	MAE (termelés)	MBE (termelés)	RMSE (termelés)
5 kW	Perzisztencia (pozitív)	0,35	0,00	0,80
	Perzisztencia (kétirányú)	0,35	0,00	0,80
	AROME (pozitív)	0,23	-0,06	0,52
	AROME (kétirányú)	0,23	-0,06	0,52
	ECMWF (pozitív)	0,20	0,04	0,46
	ECMWF (kétirányú)	0,20	0,04	0,46
3,5 kW	Perzisztencia (pozitív)	0,31	0,00	0,72
	Perzisztencia (kétirányú)	0,31	0,00	0,72
	AROME (pozitív)	0,20	-0,04	0,48
	AROME (kétirányú)	0,20	-0,04	0,48
	ECMWF (pozitív)	0,17	0,05	0,43
	ECMWF (kétirányú)	0,17	0,05	0,43

5. DISZKUSSZIÓ

A 3.2. fejezetben részletesen bemutatott scenáriók elemzéséből kiderült, hogy a prozumer számára legkedvezőbb kimenetelű energiatárolási stratégiának a legkevesebb erőforrást igénylő (1. scenárió) bizonyult. A kisfeszültségű villamosenergia-hálózat üzemeltetése tekintetében az ECMWF alapú termelés előrejelzést alkalmazó, kétirányú teljesítménycsúcs-levágást előtérbe helyező (11. scenárió) energiatárolás tekinthető a leginkább célravezetőnek a gyakorlatban megvalósítható stratégiák közül. Mindkét oldal érdekeit az AROME alapú termelés előrejelzést alkalmazó, a pozitív terhelési csúcsok (betáplálás) levágását előnyben részesítő (8. scenárió) energiatárolási stratégia veszi a leginkább figyelembe. Feltételezve azt, hogy az elosztóhálózati engedélyes a negatív irányú (vételezési) terheléseket könnyebben tudja lekövetni, a fogyasztói igények mérséklése kevésbé indokolt, és kevésbé eredményes a stratégiák tekintetében. Annak ellenére, hogy az ECMWF alapú termelés előrejelzés pontosabbnak bizonyult (MAE, RMSE), az AROME alapú termelés előrejelzés tekinthető kedvezőbbnek a dolgozatban megjelölt alkalmazási területen a numerikus időjárás-előrejelzés érzékenysége miatt [37].

Globális csúcslevágási határteljesítmény megválasztása esetén mindkét félnek mindenképp számolnia kell a stratégia nem kívánatos hatásaival. A magas csúcslevágási határérték kizárólag a hálózatnak (és üzemeltetőjének), az alacsony pedig kizárólag a prozumernek kedvez(het). Magas határérték kiválasztása esetén az energiatároló az év jelentős részében kihasználatlanná válhat, ezért a prozumer alapvetően nem érdekelt a betáplálási csúcsainak csökkentésében. A fizikai energiatároló kihasználtságának növelése érdekében alacsony határérték megválasztása szükséges, ám az energiatároló feltöltődésekor – különösen a nyári hónapokban – a betáplálási csúcsok nem levághatók, amely a hálózaton hirtelen teljesítménynövekedést okozhat.

Jelen kutatás továbbá rávilágított arra, hogy egy kisebb teljesítményű inverter használata a megújuló részarányra szinte alig gyakorolt negatív hatást, ellenben a hálózat üzemeltetése tekintetében fontos mutatók (abszolút csúcs, számtani középérték, szórás, négyzetes eltérés) kiemelkedően kedvező irányba mozdultak el. Ezen állítás alapján kijelenthető, hogy a hibrid inverter megfelelő méretezése kifejezetten alkalmas a pozitív teljesítménycsúcsok levágására. Annak ellenére, hogy ebben a kutatásban az energiaátalakítás (hibrid inverter) hatásfoka nem lett figyelembe véve, a fenti következtetés helytálló. A hibrid inverter hatásfokának számításba vétele feltételezhetően a kisebb teljesítményű inverter előnyeit emelte volna ki még jobban.

A dolgozatban megvizsgált scenáriók eredményei alapján kijelenthető, hogy a háztartási méretű (fotovoltaikus) kiserőművekre alkalmazandó bruttó elszámolási rendszer nem ösztönzi a prozumereket az energiatárolásra. Egy fizikai energiatároló beruházási költségét a realizálható

éves energiaköltség-csökkenés nem képes belátható időn belül megtéríteni. Ilyen beruházásokat alapvetően pályázati támogatásokra alapozva érdemes megvalósítani, azonban a finanszírozás önmagában nem ad indítékot az energiatároló optimalizálására. A hálózati terhelési csúcsok levágására való ösztönzéshez egy külön elszámolási rendszer megalkotása szükséges. További probléma, hogy a fotovoltaiikus rendszerrel rendelkező lakossági fogyasztók (prozumerek) sem a szaldó elszámolásban, sem a jövőbeli bruttó elszámolásban nem érdekeltek a fogyasztásuk befolyásolásában, illetve csökkentésében.

A termelés- és fogyasztás előrejelzéseken alapuló stratégiák vizsgálata során kiderült, hogy a kifejezetten erre a célra készített modell rendkívül érzékeny a tároló napközbeni kisütésére. Amennyiben a termelés előrejelzés nem jelez elő egy olyan mértékű termelés csökkenést, amely az energiaigények kielégítéséhez az energiatároló napközbeni kisütését kívánja meg, akkor a modell – kizárólag azokban az esetekben, ahol negatív irányban is csúcslevágással számol – nem megfelelő csúcslevágási határértéket határoz meg. Ennek az a magyarázata, hogy a modell a feltételezett csúcslevágások alapján állapítja meg az energiatároló majdani töltöttségi szintjét, amelyre hivatkozva választ csúcslevágási határértéket a fogyasztói oldalon (negatív irányban). Ha az előrejelzés téved, és napközben váratlan kisütés következik be, akkor a modell hibás töltöttségi szintet követ addig, amíg a tároló el nem éri a töltöttségi szint valamelyik határát.

A dolgozatban nem került megvizsgálásra, hogy az energiatároló kapacitása milyen hatást gyakorol a bemutatott scenáriók esetében vizsgált mutatószámokra. További kutatást igényel az is, hogy milyen gazdasági ösztönzők szükségesek ahhoz, hogy egy energiatároló beruházási költsége egy jól behatárolható időkereten belül megtérüljön.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozatban bemutatott scenáriókból kiderült, hogy a prozumer számára legkedvezőbb kimenetelű energiatárolás eléréséhez nincs szükség az energiatárolón kívül más erőforrásra. A villamosenergia-hálózat jogszabályban meghatározott határértékeinek betartásához a háztartási méretű fotovoltaiikus rendszerek betáplálási teljesítménycúcsainak levágását kell ösztönözni. A közcélú hálózat és a prozumerek érdekei között az előrejelzéseken alapuló energiatárolási stratégiák teremtették meg a kompromisszumot. Háztartási méretű alkalmazásban a regionális, numerikus időjárás előrejelzésen (OMSZ AROME) alapuló energiatárolási stratégia tekinthető a legkedvezőbbnek elsősorban az időjárás előrejelzés érzékenysége miatt.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal.** „Nem engedélyköteles kiserőművek és háztartási méretű kiserőművek adatai” (2023) <https://mekh.hu/download/0/63/51000/HMKE-2023Q2.xlsx>
- [2] **Varjú, V., Topić, D., Bodor, Á., Grünhut, Z.** „Napelemes energia és környezet: A napelemes energiatermelés komplex feltételrendszere Magyarországon, a magyar–horvát határtérségben, és leckék a globális térből” (2014) MTA KRTK Regionális Kutatások Intézete. <https://www.researchgate.net/publication/306101842>
- [3] **Haffner, T.** „A megújuló energiaforrások alkalmazása a villamosenergia és hőtermelésre I. Napenergia, szélenergia, vízenergia”. (2017) Közép-Európai Közlemények, 10(1). sz., 99-114. o. <https://ojs.bibl.u-szeged.hu/index.php/vi kekkek/article/view/12414>
- [4] **EU-Solar Nyrt.** „Napelem panel felépítése, működése és szerepe a rendszerben” <https://www.eu-solar.hu/blog/napelem-panel/>
- [5] **Schultz, G.** „Renewable Energy”. előadásjegyzet (2018. október) Hochschule Karlsruhe
- [6] **Lipták, R., Bodnár, I.** „Napelemes villamosenergia-termelő rendszerek”. (2020) Multidiszciplináris Tudományok, 10. köt. 4. sz. 434–443. o. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.4.49>
- [7] **Dr. Mayer, M. J.** „Napenergia és geotermia hasznosítás”. jegyzet (2022) Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
- [8] **Gerse, K..** „Energiatárolók”. (2020) Akadémiai Kiadó. <https://doi.org/10.1556/9789634544937>
- [9] **Hussinger, P.** „Renewable Energy Storage”. jegyzet (2019) Hochschule Karlsruhe
- [10] **Wu, B.** „What are redox flow batteries and why are they important?”. (2021) Imperial College London. <https://youtube.com/watch?v=t9zwgL7UpDA>
- [11] **Dr. Tokody, D., Schottner, K., Ady, L., Haddad, R., Ágoston, G., Csordás, A., Martin, J. Szabó, R.** „Háztartási méretű energiátárolás fejlesztési lehetőségei Magyarországon”. (2022) Magyar Mérnöki Kamara. https://www.mmk.hu/kamarai-tudastar/Haztartasi_meretu_energiatarolas.pdf
- [12] **Nemzeti Jogszabálytár.** „2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról” (2023) <https://njt.hu/jogszabaly/2007-86-00-00>
- [13] **Dr. Hartmann, B.** „A villamosenergia-ipar szereplői”. (2021) Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. Smart grid technológiák és alkalmazások jegyzet
- [14] **Európai Számvevőszék.** „Az energiátároláshoz nyújtott uniós támogatás - tájékoztatás” (2019) Az Európai Unió Kiadóhivatala https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/BRP_ENERGY/BRP_ENERGY_HU.pdf
- [15] **Portfolio.** „Már jurtára is lehet napelemet telepíteni, így lesz igazán zöld az energia” (2021) <https://www.youtube.com/watch?v=E1r9ekfKhqE>
- [16] **E.ON Hungária.** „Bizonyította hatékony működését az E.ON első, közcélú energiátároló egysége Leveleken - Az új technológia a jövő energiahálózatának egyik alapelemét jelentheti” (2018) <https://www.eon.hu/hu/rolunk/sajtoszoba/sajtokozlemenyek/elso-kozcelu-energiatarolo-leveleken.html>

- [17] **E.ON Hungária.** „Levelek - Magyarország első közcélú energiatároló egysége” (2018) <https://www.youtube.com/watch?v=00f5XMe7zIo>
- [18] **Dr. Hartmann, B., Táci, I.** „Energiatárolás esettanulmányok”. (2021) Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. Smart grid technológiák és alkalmazások jegyzet
- [19] **MVM Hálózat.** „A jövő energiatárolóit teszteli az MVM Csoport” (2021) <https://www.mvmhalozat.hu/aktualitasok/20360>
- [20] **INFOWARE Zrt.** „Az MVM ünnepélyesen felavatta az NKM területén létesített zombói smart grid rendszert, melynek megvalósításában az INFOWARE is részt vett” (2020) https://www.infoware.hu/hirek_589
- [21] **E.ON Hungária.** „Energiakonténer” (2016) <https://www.youtube.com/watch?v=ssl65HkdmWA>
- [22] **KONTAKT-Elektro Kft.** „Hidrogén alapú energiakonténer” (2021) https://www.kontakt-elektro.hu/wp-content/uploads/2021/03/hidrogen_alapu_energiakontener.pdf
- [23] **Huawei Technologies Co. Ltd.** „FusionSolar lakossági intelligens PV- és ESS-megoldás” (2023) <https://solar.huawei.com/hu/professionals/residential>
- [24] **Naplopó Kft. Webáruház.** „Smart String Energiatároló rendszer” (2023) <https://www.naploposhop.hu/custom/naplopo/image/data/pdf/Huawei/LUNA2000-5-15-S0-HU.pdf>
- [25] **Samsung SDI Ltd.** „ESS Batteries by Samsung SDI - Top Safety & Reliability Solutions” (2019) https://www.samsungsdi.com/upload/ess_brochure/201902_Samsung%20SDI%20ESS_EN.pdf
- [26] **Panasonic Corporation of North America.** „What we do” (2023) <https://na.panasonic.com/us/what-we-do>
- [27] **Panasonic Corporation of North America.** „Solar Panels” (2023) <https://na.panasonic.com/us/energy-solutions/solar/>
- [28] **Panasonic Corporation of North America.** „Battery Storage” (2023) <https://na.panasonic.com/us/energy-solutions/battery-storage/>
- [29] **Panasonic Corporation of North America.** „EVERVOLT Home Battery” (2023) <https://na.panasonic.com/us/energy-solutions/battery-storage/evervolt-battery-storage-system/evervoltr-home-battery>
- [30] **Panasonic Eco Systems of North America.** „EVERVOLT home battery” (2023) https://ftp.panasonic.com/solar/brochure/home_battery_sheet.pdf
- [31] **Tesla Inc.** „Powerwall” (2023) <https://www.tesla.com/powerwall>
- [32] **Tesla Inc.** „Megapack” (2023) <https://www.tesla.com/megapack>
- [33] **Tesla Inc.** „Powerwall” (2023) https://digitalassets.tesla.com/tesla-contents/image/upload/powerwall-2-ac-datasheet-en-na_001
- [34] **Mercedes Benz.** „Mercedes-Benz Energy Storage Home” (2023) <https://www.mercedes-benz.com/content/dam/brandhub/mercedes-benz-energy/service/downloads/energy-storage-home-1st-generation/sales-folder/Mercedes-Benz-Energy-Storage-Home.pdf>
- [35] **Mayer, M. J.** „Influence of design data availability on the accuracy of physical photovoltaic power forecasts” (2021) Solar Energy 227. sz., 532-540. o. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.044>

- [36] **Czétány L., Vámos, V., Horváth, M., Szalay, Zs., Mota-Babiloni, A., Deme-Bélafi, Zs., Csoknyai, T.** „Development of electricity consumption profiles of residential buildings based on smart meter data clustering,, (2021) *Energy and Buildings* 252. sz. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111376>
- [37] **Mayer, M. J., Yang, D., Szintai, B.** „Comparing global and regional downscaled NWP models for irradiance and photovoltaic power forecasting: ECMWF versus AROME” (2023) *Applied Energy* 352. sz. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121958>
- [38] **National Oceanic and Atmospheric Administration.** „Persistence Forecast” (2023) <https://forecast.weather.gov/glossary.php?word=persistence%20forecast>
- [39] **Magyarország Kormánya.** „Magyar Közlöny” 129. sz. (2023) <https://magyarkozlony.hu/dokumentumok/15cb808c782394fa4902bccb92e31175d9b742a/letoltes>
- [40] **Portfolio.** „Lantos Csaba bejelentette az új napelemes elszámolási szabályokat, újra pályázatot hirdet a kormány” (2023) <https://www.youtube.com/watch?v=NdWfZTzOy-I>
- [41] **MVM Next Energiakereskedelmi Zrt.** „Lakossági egyetemes szolgáltatói egységárak,, (2023) <https://www.mvmnext.hu/aram/pages/aloldal.jsp?id=791>
- [42] **HUPX Zrt.** „Másnapi piac - Historikus adatok” (2023) <https://hupx.hu/hu/piaci-adatok/dam/historikus-adatok>
- [43] **Mayer, M. J.** „Háztartási méretű napelemes rendszer méretezése”. (2022) Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. Napenergia és geotermia hasznosítás jegyzet
- [44] **Campana, P. E., Landelius, T., Andersson, S., Lundström, L. Nordlander, E., He, T., Zhang, J., Stridh, B., Yan, J.** „A gridded optimization model for photovoltaic applications” (2020) *Solar Energy* 202. sz., 465-484. o. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.076>
- [45] **Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change Turkish State Meteorological Service.** „Model Evaluation” (2023) <https://www.mgm.gov.tr/FTPDATA/arastirma/toz/sdswa/DescriptiveInformation.pdf>
- [46] **Magyarországi Viharvadászok és Viharkárfelmérők Közhasznú Egyesülete.** „Előrejelzések verifikációja II.” (2023) https://www.szupercella.hu/elorejelzesek_verifikacioja_2
- [47] **Tóth-Kovács, G.** „Energiatárolás háztartási méretű kiserőművek esetén - esettanulmány” (2022) Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. energetikai projektfeladat
- [48] **Magyar Nemzeti Bank.** „Árfolyamok” (2023) <https://www.mnb.hu/arfolyam-letoltes?year=2022>
- [49] **Mayer, M. J.** „Impact of the tilt angle, inverter sizing factor and row spacing on the photovoltaic power forecast accuracy” (2022) *Applied Energy* 323. sz. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119598>