

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



MISKOLCI
E G Y E T E M
UNIVERSITY OF MISKOLC

**INTELLIGENS HIBRID NAPELEMES SZÜNETMENTES
RENDSZER KIDOLGOZÁSA ÉS VIZSGÁLATA**

TÉZISFÜZET

KÉSZÍTETTE:

Boros Rafael Ruben

Okleveles villamosmérnök,
Atomerőművi üzemeltetési szakmérnök

**HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI
ISKOLA**

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ:

Prof. Dr. Szigeti Jenő
egyetemi tanár, DSc

TUDOMÁNYOS VEZETŐ:

Prof. Dr. Bodnár István
egyetemi tanár



GÉPÉSZMÉRNÖKI
ÉS INFORMATIKAI KAR

Miskolc, 2025



Tartalom

1.	BEVEZETÉS	1
1.1.	A TÉMA AKTUALITÁSA ÉS A TUDOMÁNY JELENLEGI ÁLLÁSA	1
1.2.	A DISSZERTÁCIÓ CÉLJA	5
2.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	7
2.1.	HIBRID NAPELEMES SZÜNETMENTES RENDSZER	7
2.1.1.	MÓDSZERTANI PROBLÉMAFELVETÉS	7
2.1.2.	KUTATÁSI EREDMÉNYEK	8
2.1.3.	AZ 1. TÉZIS MEGFOGALMAZÁSA	10
2.2.	INTELLIGENS DINAMIKUS TELJESÍTMÉNYMEGOSZTÁS	11
2.2.1.	MÓDSZERTANI PROBLÉMAFELVETÉS	11
2.2.2.	KUTATÁSI EREDMÉNYEK	12
2.2.3.	A 2. TÉZIS MEGFOGALMAZÁSA	15
2.3.	OPTIMALIZÁLT DINAMIKUS ENERGIAMENEDZSMENT	16
2.3.1.	MÓDSZERTANI PROBLÉMAFELVETÉS	16
2.3.2.	KUTATÁSI EREDMÉNYEK	17
2.3.3.	A 3. TÉZIS MEGFOGALMAZÁSA	22
3.	ÖSSZEFOGLALÁS	23
4.	SAJÁT PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA	26
4.1.	A DISSZERTÁCIÓHOZ KÖTHETŐ MINŐSÉGI PUBLIKÁCIÓK	26
4.2.	A DISSZERTÁCIÓHOZ KÖTHETŐ EGYÉB PUBLIKÁCIÓK: ...	27
5.	FELHASZNÁLT IRODALMAK	28

1. BEVEZETÉS

1.1. A téma aktualitása és a tudomány jelenlegi állása

Az intelligens napelemes, hibrid szünetmentes rendszerek és annak optimalizált dinamikus energiamenedzsmentje viszonylag új és interdiszciplináris kutatási terület. A téma megköveteli a gazdasági és technológiai kutatások magas szintű, folyamatos végzését. A szünetmentes, energiatárolós, napelemes rendszerek integrálását már a 2000-es években megfontolták és kutatni kezdték, azonban előrelépések csak az utóbbi évtizedben történtek. Ugyanis ekkor nőtt meg az igény az optimalizálásra, energiamenedzsmentre a megnövekedett fogyasztás és megújuló energiaforrások alkalmazása miatt. A hibrid szünetmentes rendszerek célja, hogy rövid ideig lássa el a fogyasztókat áramkimaradás esetén. A hibrid megnevezés abból adódik, hogy a rendszer többféle energiatárolót kombinál, így üzembiztosabbá, diverzebbé válik az ellátás. Az energiamenedzsment rendszer dönti el, hogy melyik energiatárolóból vagy mely elektronikus átalakítóval lássa el a fogyasztókat az inverter. Az energiamenedzsment feladata alapvetően, hogy gazdaságosan, maximális hatásfokkal biztosítsa az energiát a fogyasztók felé. Ehhez szükséges az energiatárolók kezelése, termelők optimalizálása, gazdasági modellek kidolgozása, továbbá üzemmódok kiválasztása.

A hibrid, szünetmentes rendszerek dinamikus energiamenedzsmentje tehát a megújuló energiaforrások fokozódó alkalmazása és az energiaigények növekedése miatt vált egyre kiemelkedőbb kutatási területté. Ennek hatására született meg az igény a fejlett szabályozási és optimalizálási módszerek kidolgozására, amelyek célja, hogy a

rendszerek gazdaságos és megbízható működést biztosítsanak különféle működési feltételek mellett. Ehhez hasonlóan, az egyenfeszültségű nano- és mikrohálózatok fejlesztése is folyamatos innovációt igényel, hiszen ezek a hálózatok nem csupán energiaforrások diverzifikálásával, de a központi hálózattal való hatékony együttműködés révén is hozzájárulnak a fenntartható energiamenedzsment megvalósításához.

A mikro- és nanohálózatok jelenlegi fejlettsége hosszú folyamat eredménye volt. Korábban Nassef és munkatársai kutatásában megjelent a kétirányú teljesítmény szabályozás a hálózat és a mikrohálózat között [1]. Továbbá Chen és munkatársai az egyenfeszültség szabályozásának témakörében ért el eredményeket. Ismertették, hogy két termelő hogyan látja el egyszerre a fogyasztót, hogyan lehet ezt kiegyenlíteni és ezt mérésekkel bizonyította [2]. Energiamenedzsment stratégiára is készült kutatás, Zhang és munkatársai a termelők (napelem, akkumulátor, szuperkondenzátor) közötti teljesítményegyensúly folyamatos fenntartását szabályozzák kutatásukban [3]. Mindemellett különböző üzemállapotokat mutatnak be, amely az energiaáramlásokra vonatkozik. Rendszerstabilitási problémát okoz sajnos, hogy a különböző üzemállapotok esetén az egyenfeszültség mintegy 10 V-ot változik, miközben nagymértékű oszcillációk jönnek létre.

A jövőben is nagyon népszerű kutatási téma lesz az egyenfeszültségű mikro- és nanohálózatok témaköre. Ez köszönhető annak, hogy jelenleg a villamos hálózatokba az energiatárolók integrálása egyre nagyobb számban történik. A korábbi kutatások során a rendszerstabilitás nem volt kielégítő. Továbbá a rendszerbe integrált párhuzamosan működő termelők közötti terheléseloszlást fejleszteni kellett, főleg abban az esetben, ha változik a fogyasztás nagysága, vagy a környezet gyakorol

hatást a termelőkre. Erre a célra kutatták ki az adaptív vagy kettős hurkú terhelésfüggő droop-szabályozást [4], [5]. A droop-szabályozás kritikus szerepet tölt be a hálózat stabilitásának megőrzésében, valamint a terhelés dinamikus elosztását segíti.

Jelenleg, 2024-ben is releváns kutatási téma a droop-szabályozás, hiszen az előző algoritmusok tranziensekre adott válasza meglehetősen lassú, ezzel a kérdéssel Yang és munkatársai foglalkoztak [6]. A jövőbeli kutatások fontos irányvonalát képi a droop-szabályozás, kiegészítve az energiamenedzsmenttel. Mindegyik kutatásban probléma, hogy hagyományos PID szabályozókkal és ezekkel kombinált, nehezen hangolható Fuzzy-szabályozóval vagy bonyolult modellezési eljárásokkal, számítások alapján hangolják be a rendszert. Kanwal és munkatársai neurális hálóval kombinált csúszómód droop-szabályozást valósítottak meg autonóm mikrohálózatokhoz [7]. Ebben a kutatásban már megjelenik a mesterséges neurális háló, de csak előrejelzéseket végez a napelem termelésére vonatkozóan. Összességében a jelenlegi kutatások arra fókuszálnak, hogy az egyenfeszültség minőség mutatóit optimalizálják, ha megváltoznak a környezeti paraméterek. Nem veszik figyelembe ez esetben, hogy gazdaságilag milyen módon érdemes vételezni a villamos energiát a tárolókból és termelőkből.

Az olyan fogyasztók, amelyek idősoros (negyedórás) elszámolásban vételezik a villamos energiát, megfontolják a napelemek telepítését, hovatovább energiamenedzsmentet, különféle stratégiákat kényszerűek alkalmazni a költségek csökkentésének érdekében. Az energiamenedzsment egy magasabb szintű és lassabb szabályozás a droop-szabályozáshoz képest. Az energiamenedzsment előre tervez, például a várható időjárást veszi figyelembe, vagy az energiaigényeket

veszi alapul. Bhavsar és munkatársai 2015-ben olyan kutatást adtak ki, amelyben a DC mikrohálózat egy statikus kapcsolóval leválasztható a hálózatról, a kapcsolót az energiamenedzsment algoritmus szabályozza [8]. Az ilyen jellegű szabályozással az a probléma, hogy nem törekszik optimumra, azonban lehetséges, hogy valamennyi villamos energia vételezése csökkentené az energiaköltséget. Santos Neto és munkatársai 2020-ban technikai megközelítésből ismertették, hogy érdemes a DC mikrohálózatot összekötni az AC hálózattal. Bemutatták, hogy az AC hálózathoz vételezett energiát és a DC termelők által termelt energiát különböző arányban optimális felhasználni [9]. Ez a megoldás közvetve csökkenti az akkumulátorok és az egyes rendszereszmek élettartamát, mindemellett a hálózati függőséget csökkenti, ellenben a szerzők nem vették figyelembe a gazdasági aspektusokat. Várhatóan a közeljövőben az idősoros (negyedórás) elszámolást a perces elszámolás váltja majd fel, így olyan menedzselési eljárásokat, algoritmusokat szükséges kutatni, amelyek dinamikusan avatkoznak be a DC mikro- és nanohálózatokba. Ugyanakkor nem csak az idősoros elszámolásból eredő menedzselés jelent kihívást, hanem a csúcsterhelésből létrejövő többletköltség is. Ez a fogyasztókat arra ösztönzi, hogy csökkentsék a rendszerterhelést. Nemcsak a fogyasztók szempontjából szükséges az optimalizált energiamenedzsment alkalmazása, hanem a hálózat szempontjából is. Kétségtelen, hogy ez hozzájárul a hálózat megbízhatóságának növeléséhez. Shahid ismertette tanulmányában, hogy milyen módon lehet a hálózathoz csatlakoztatni egy hálózat-interaktív mikrohálózati rendszert [10]. Az ő rendszere szigetüzemben és hálózatsatoltan is képes működni, miközben zavartalanul látja el a mikrohálózatra csatlakozó fogyasztókat. Az eredmények alapján elmondható, hogy a rendszer

hatásfoka, a villamosenergia ellátás minősége kitűnő, miközben a rendszer a teljesítménytényezőt is javítja. Ellenben a kutatás a gazdasági aspektusokkal nem foglalkozott.

Bár a jelenlegi kutatások jelentős előrelépést értek el a DC mikro- és nanohálózatok stabilitásának és teljesítményoptimalizálásának terén, számos kihívás továbbra is fennáll. A jövőbeli kutatásoknak nemcsak a meglévő technológiai problémákra kell választ találniuk, mint például a droop-szabályozás okozta tranziensek, hanem figyelembe kell venniük az energiaelosztás gazdasági aspektusait is, amely szerint a teljesítménymegosztást dinamikusán kell szabályozni. A következő években várhatóan növekedni fog az energiatároló rendszerek integrálása, valamint az idősoros elszámolási rendszerek bevezetése akár lakossági fogyasztókhoz is, amely további nyomást gyakorol az energiamenedzsment rendszerek fejlesztésére. Így a kutatók olyan új algoritmusokat és menedzsment stratégiákat keresnek, amelyek képesek a dinamikusán változó környezeti és piaci feltételekhez igazodva biztosítani a hálózatok stabilitását és gazdaságos működését.

1.2. A disszertáció célja

Céлом a jelen doktori disszertációban a mérés- és irányítástechnikai információs rendszerek témacsoport keretein belül egy intelligens hibrid napelemes szünetmentes rendszert kidolgozni, amely integrálja a különálló rendszereket, mint a napelemeket, szünetmentes tápegységeket és szünetmentes aszinkron motorhajtásokat. Továbbá ehhez a kombinált rendszerhez a központi szabályozó egység az algoritmusát, blokk-sémáját dolgozom ki, amely droop-szabályozás nélkül valósítja meg a teljesítménymegosztást, feszültség-szabályozással egyesítve. Kétféle

szabályozási stratégiát dolgozok ki a központi szabályozóhoz. Az egyik stratégia hagyományos PID szabályozókat foglal magában, a másik stratégia pedig intelligens, mesterséges neurális hálóval implementálja a teljesítménymegosztást és a feszültségszabályozást a rendszerben. Célom a neurális hálóhoz egy új algoritmus kidolgozása, amely megkönnyíti a betanítást. Szimulációkkal megvizsgálom a PID szabályozókkal és a neurális hálóval működtetett hibrid napelemes szünetmentes rendszer érzékenységét, ezen belül is a keletkező káros tranzienseket, felharmonikusokat. Validálás céljából megvalósítom a kézi szabályozású hibrid napelemes szünetmentes rendszert is, és mérések alá vetem szintén érzékenységvizsgálat céljából. A mérésekhez saját tervezésű elektronikus átalakítókat implementálok, így olyan paramétereket változtathatok, amelyeket gyári berendezések használata esetén nincs lehetőség módosítani. A mérések célja annak bizonyítása, hogy a kidolgozott rendszer a gyakorlatban is megvalósítható.

A kidolgozott centrális szabályozási stratégiákhoz olyan energiamenedzsment rendszert hozok létre, amely egy új gazdasági modell alapján állítja be a teljesítménymegosztást, vagyis előállítja a centrális szabályozó számára a teljesítménymegosztás alapjelét. Az általam kifejlesztett gazdasági modell és számítási módszerek lehetővé teszik, hogy az energiamenedzsment mindig a lehető legalacsonyabb villamosenergia-egységköltséget biztosítsa a rendszerben, miközben hozzájárul az akkumulátor élettartamának maximalizálásához.

2. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az alábbi fejezetben a módszertani problémafelvetések, az elért új tudományos eredmények és a tézisek kerülnek bemutatásra.

2.1. Hibrid napelemes szünetmentes rendszer

2.1.1. Módszertani problémafelvetés

A hibrid szünetmentes rendszerek fejlesztése során a fő kihívás a különböző energiaforrások (hálózat, akkumulátor és napelem) integrációja és a megfelelő teljesítménymegosztás biztosítása. A hagyományos szünetmentes tápegységek jellemzően egy egyenirányítóból, akkumulátorból és inverterből állnak, míg a napelemes rendszerek különálló energiaellátási megoldást kínálnak. A jelenlegi ipari gyakorlatban ezek a rendszerek egymástól függetlenül működnek, annak ellenére, hogy egy közös egyenáramú hálózat alkalmazásával hatékonyabb és költséghatékonyabb integráció lenne megvalósítható.

A szakirodalomban elterjedt megoldások elsősorban droop-szabályozást alkalmaznak a teljesítménymegosztás biztosítására mikro- és nanohálózatok esetén. Ez a módszer azonban feszültségingadozást és instabilitási problémákat okozhat, különösen nemlineáris termelők és változó terhelés esetén. A kisebb méretű, nem autonóm hibrid rendszerek esetében a droop-szabályozás elhagyható lenne, azonban nincs egyértelmű módszertan arra, hogy droop nélkül hogyan valósítható meg egy stabil teljesítménymegosztás két elosztott elektronikus átalakító esetén.

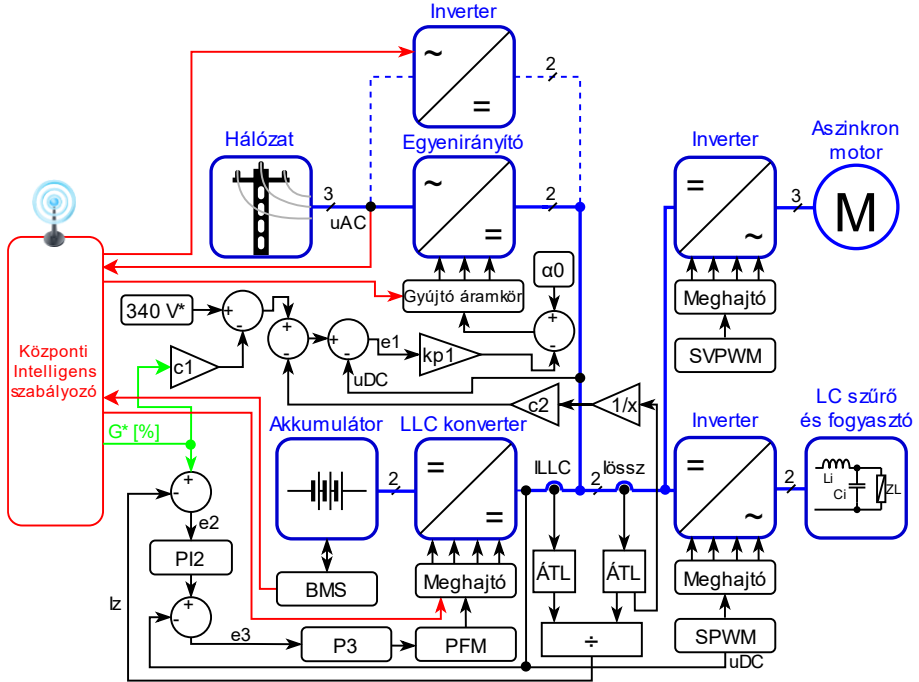
A kutatás során számos módszertani probléma merült fel. Jelenleg nem létezik tudományosan megalapozott módszertan a droop-szabályozás nélküli teljesítménymegosztásra két elosztott termelő esetén a napelemmel kombinált szünetmentes rendszerekben, ami jelentős szabályozási kihívást jelent. A droop-szabályozás elhagyása új szabályozási stratégiát tesz szükségessé, amely stabil működést biztosít változó terhelési viszonyok és eltérő energiaforrások mellett. További módszertani problémát jelent a régebbi, tirisztoros egyenirányítóval működő szünetmentes rendszerek kompatibilitása a modern napelemes rendszerekkel, mivel az egyenirányítók hálózati torzításokat okozhatnak, amelyeket az új szabályozási megközelítésnek figyelembe kell vennie.

A problémák megoldására egy centralizált szabályozási stratégiát dolgoztam ki, amely egy központi vezérlő segítségével dinamikusan állítja be az egyenirányító és az LLC konverter működését, biztosítva a stabil feszültségszabályozást és a kívánt teljesítménymegosztást. A kidolgozott szabályozási stratégiát MATLAB/Simulink környezetben validáltam, majd laboratóriumi kísérleteket is végeztem érzékenységvizsgálat céljából. Az eredmények igazolták, hogy a centralizált szabályozás hatékonyabb és stabilabb megoldást nyújt, mint a hagyományos droop-alapú megközelítések, és lehetővé teszi a szünetmentes és napelemes rendszerek költséghatékony integrációját.

2.1.2. Kutatási eredmények

Ebben az alfejezetben a kidolgozott centrális szabályozási módszer kerül bemutatásra, amely az *1. ábrán* látható. Az ábrán látható paramétereket időben az *1-4. képletek* írják le, amelyek csak akkor teljesülnek, amennyiben az *5. egyenlet* igaz, továbbá a háromfázisú

feszültségrendszer szimmetrikus, azaz a három vonali feszültség (U_{RS} , U_{ST} , U_{TR}) ekvivalens.



1. ábra: Centrális szabályozási stratégia hibrid napelemes szünetmentes rendszerhez, tirisztoros egyenirányítóval

$$e_2(t) = G^*(t) - \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i_{LLC}(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T i_{össz}(t) dt} \quad (1)$$

$$e_3(t) = \left(K_{p2} e_2(t) + K_{i2} \int_0^T e_2(t) dt \right) - u_{DC}(t) \quad (2)$$

$$f_{sw}(t) = \left(K_{p3}e_3(t) + K_{i3} \int_0^T e_3(t) dt \right) \quad (3)$$

$$\alpha(t) = a_0 - K_{p1} \left(\left(U_{DC}^* - c_1 \cdot G^*(t) \right) - \frac{c_2}{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{óssz}}(t) dt} \right) - u_{DC}(t) \quad (4)$$

$$U_{0DC} < \sqrt{2} \cdot U_{RS} \cdot \sin \frac{2\pi}{3}, \quad (5)$$

ahol: U_{0DC} a konstans egyenfeszültség átlagértékét jelenti.

2.1.3. Az 1. tézis megfogalmazása

Olyan új centralizált szabályozási stratégiát dolgoztam ki hibrid napelemes szünetmentes rendszerekhez, amely droop-szabályozás nélkül teljesítménymegosztást tesz lehetővé. Tirisztoros hálózati egyenirányítóval és LLC konverterrel táplált közbenső egyenáramú körhöz alkalmazható, miközben a primer és a szekunder szabályozási szinteket is megvalósítja a szabályozó.

A tézishez kapcsolódó saját publikációk: [S1], [S2], [S3], [S4], [S5], [S7], [S8], [S9], [S10], [S11], [S12]

2.2. Intelligens dinamikus teljesítménymegosztás

2.2.1. Módszertani problémafelvetés

A hibrid szünetmentes rendszerek stabil és hatékony működésének alapvető követelménye a közbenső egyenáramú kör feszültségének stabilitása, amely közvetlen hatással van mind a teljesítménymegosztásra, mind az energiahatékonyságra. Az előző fejezetben bemutatott centralizált, droop-szabályozás nélküli szabályozási stratégia megbízható megoldást kínál a rendszer szabályozására, amelyben a P és PI szabályozók megfelelő dinamikai viselkedést biztosítanak. A szabályozás hatékonyságát és stabilitását azonban jelentősen befolyásolja a szabályozók hangolása, amely komplex és időigényes folyamat, különösen változó terhelési viszonyok és megújuló energiaforrások esetén.

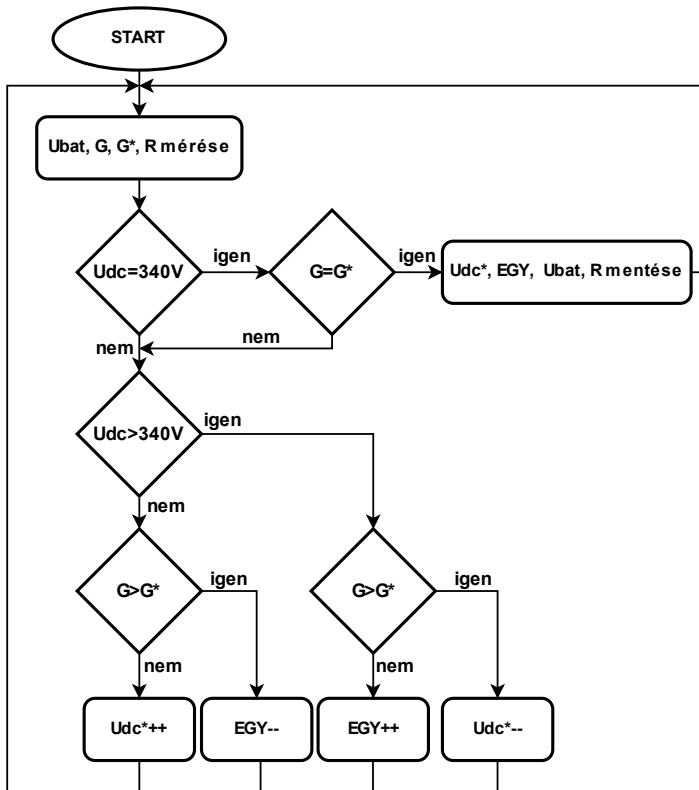
A kutatás során több módszertani kihívás merült fel, amelyek közvetlenül befolyásolják a rendszer stabilitását és hatékonyságát. A közbenső egyenáramú kör feszültségstabilitásának biztosítása kiemelten fontos a rendszer működése szempontjából, különösen dinamikus változó terhelési és termelési feltételek mellett. A szabályozási stratégia kulcseleme a P és PI szabályozók megfelelő hangolása, amely jelentős kihívást jelent, mivel egyensúlyt kell teremteni a gyors dinamikai válasz és az alacsony állandósult állapotú hiba között.

A hagyományos PID szabályozók finomhangolása mind manuális, mind automatizált módon időigényes feladat, és nem minden esetben képes megfelelő alkalmazkodásra változó működési körülmények mellett. Ezért egyre nagyobb figyelmet kapnak a modern

szabályozástechnikai megközelítések, például a neurális háló alapú szabályozás, amely lehetőséget kínál az adaptív vezérlés megvalósítására. Ezáltal csökkenthető a feszültségingadozás, javítható a fogyasztók ellátásának minősége, valamint biztosítható a dinamikus teljesítménymegosztás, amely elengedhetetlen a rendszer hatékony működéséhez. A problémák megoldására a kutatás során egy intelligens szabályozási stratégiát dolgoztam ki, amely a hagyományos P és PI szabályozók helyett adaptív, intelligens szabályozási megoldásokat alkalmaz a közbenső egyenáramú kör feszültségének stabilizálására. A módszer csökkenti a kézi paraméterhangolás szükségességét, miközben növeli a szabályozási rendszer reakcióképességét és stabilitását. Az új szabályozási stratégia hatékonyságát MATLAB/Simulink szimulációk segítségével igazoltam. Az eredmények alapján az intelligens szabályozás stabilabb és alkalmazkodóképesebb működést biztosít, mint a kizárólag hagyományos PID szabályozók alkalmazása.

2.2.2. Kutatási eredmények

A hibrid szünetmentes rendszer és a hozzá tartozó intelligens szabályozási stratégia a 2. ábrán látható. A főáramkört a hálózat, az egyenirányító, az akkumulátor, az LLC konverter, és az inverterek alkotják. A főáramkörben az egyenirányítót és az LLC konvertert szükséges szabályozni a teljesítménymegosztás és a közbenső egyenáramú kör feszültség stabilizálása érdekében. Ezen konvertereket egy mesterséges neurális hálózaton alapuló egység szabályozza, amelynek bemenetei a zöldáram-alapjel (G^*), terhelőellenállás (R_t) és az akkumulátor feszültsége (u_{bat}). Az ábrán aktív egyenirányító foglal helyet, azonban tirisztoros egyenirányító is felhasználható.



3. ábra: *Identifikátor algoritmus tirisztoros egyenirányítós, hibrid szünetmentes rendszerhez*

Az algoritmus elindulásakor bekéri a kívánt zöldáram-hányados alapjelet és megméri az akkumulátor feszültségét, a zöldáram-hányados nagyságát, a terhelés nagyságát. Ezután komparálja a közbenső egyenáramú kör feszültségét a kívánt értékkel (pl. 340 V). Amennyiben nem egyenlő, úgy szintén egyenlőséget vizsgál. Ha az U_{dc} feszültség nagyobb, mint 340 V és a zöldáram-hányados nagyobb, mint a kívánt érték, akkor növeli a tirisztoros egyenirányító esetén a gyújtásszöget. Ha

a G nagyobb, mint a kívánt érték (G^*), akkor pedig az LLC konverter alapjelét csökkenti, és így tovább. A folyamat addig fut, amíg a közbenső kör feszültség és a zöldáram-hányados nagysága el nem éri a kívánt értéket. Amennyiben ez megtörténik, az algoritmus elmenti a konverterek alapjeleit, az akkumulátor feszültséget és a terhelés nagyságát. Az algoritmust több akkumulátor feszültség, terhelés és zöldáram-hányados alapjel esetén le kell futtatni úgy, hogy lefedje a rendszerben előfordulható értékeket és szélsőértékek esetén is legyen az adathalmazban érték.

Aktív (Park-vektoros szabályozású) egyenirányító esetén minimális módosítás szükséges az algoritmusban. Amennyiben $U_{dc} < 340 \text{ V}$ és $G > G^*$, akkor EGY paraméter növelése szükséges. Továbbá, ha $U_{dc} > 340 \text{ V}$ és $G < G^*$, akkor EGY paraméter csökkentése szükséges

Az inkrementálási és dekrementálási sebességet rámpázási módszerrel lehet beállítani.

2.2.3. A 2. tézis megfogalmazása

Olyan új centrális szabályozási módszert dolgoztam ki hibrid napelemes szünetmentes rendszerekhez, amely mesterséges neurális hálóval szabályozza a közbenső egyenáramú kör feszültségét és a teljesítménymegosztást a hálózati egyenirányító és LLC konverter között, droop-szabályozás alkalmazása nélkül. Kidolgoztam egy olyan új identifikátor algoritmust, amely segítségével a neurális háló egyszerűen betanítható. A kidolgozott szabályozási módszer megvalósítja a primer és szekunder szabályozási szinteket.

A tézishez kapcsolódó saját publikációk: [S6]

2.3. Optimalizált dinamikus energiamenedzsment

2.3.1. Módszertani problémafelvetés

A hibrid napelemes szünetmentes rendszerek működésének optimalizálása dinamikus energiagazdálkodási stratégiát igényel, amely valós időben képes meghatározni az egyes energiaforrásokból történő teljesítménymegosztást. A szabályozás célja a zöldáram-hányados folyamatos beállítása, amely nemcsak az üzemi paramétereket, hanem a gazdasági tényezőket is figyelembe veszi.

A jelenlegi kutatások alapján egyértelmű, hogy a hibrid napelemes szünetmentes rendszerek energiamenedzsmentje nem veszi figyelembe az egyes termelők, elektronikus átalakítók és energiatárolók teljes életciklusára vonatkozó fajlagos energiaköltséget (LCOE). Az LCOE mutató kiszámítása azonban elengedhetetlen a hosszú távon gazdaságosan üzemeltethető rendszerek kialakításához. Az energiamenedzsment egyik legnagyobb kihívása, hogy a különböző berendezések beruházási és üzemeltetési költségeit összehangolja az aktuális energiatermelési és fogyasztási adatokkal.

A kutatás során több módszertani kihívás merült fel, amelyek közvetlenül befolyásolják az energiamenedzsment hatékonyságát. Jelenleg az energiamenedzsment rendszerek nem alkalmazzák az LCOE-alapú döntéshozatalt, így a teljesítménymegosztás optimalizálása nem veszi figyelembe az egyes energiaforrások valós gazdasági hatékonyságát. Ennek következtében a rendszer működése nem mindig biztosítja a legkedvezőbb gazdaságosságot és energiahatékonyságot hosszú távon.

A problémák megoldásához szükséges egy dinamikus energiamenedzsment modell kidolgozása, amely képes az üzemi és gazdasági paraméterek együttes figyelembevételével meghatározni az optimális zöldáram-hányadost. Ezáltal biztosítható, hogy a rendszer nemcsak műszakilag stabil, hanem gazdaságilag is fenntartható legyen, figyelembe véve az egyes energiaforrások beruházási és üzemeltetési költségeit.

2.3.2. Kutatási eredmények

Az alábbi alfejezetben a kidolgozott gazdasági modellhez tartozó egyenletek kerülnek bemutatásra, amelyek alapján a szünetmentes rendszer gazdaságilag optimális munkapontra történő szabályozása megvalósul.

$$C_{\Delta bat} = \frac{20}{Ciklus_x} [\%]$$

$$t_{dis} = \frac{C_{bat}}{I_{bat}^k} [h]$$

$$C_{real} = t_{dis} \cdot I_{bat} = \frac{C_{bat}}{I_{bat}^k} \cdot I_{bat} [Ah]$$

$$E_{real} = \frac{U_{batnom} \cdot C_{real}}{1000} [kWh]$$

$$\frac{C_{real}}{kWh} = \frac{E_{real} \cdot DoD}{100} [kWh]$$

$$C_{\Delta real} = \frac{C_{\Delta bat}}{C_{real}} \left[\frac{\%}{kWh} \right]$$

$$K_{té} = \frac{C_{\Delta real}}{20} \cdot K_{bebat} \left[\frac{Ft}{kWh} \right]$$

$$K_{té} = \frac{10^5}{\overline{Ciklus}_x} \cdot K_{bebat} \left[\frac{Ft}{kWh} \right]$$

$$U_{batnom} \cdot \frac{C_{bat}}{I_{bat} \cdot k} \cdot I_{bat} \cdot DoD$$

$$K_{reg}(I_{bat}, DoD) = c_0 + c_1 \cdot I_{bat} + c_2 \cdot DoD + c_3 \cdot I_{bat}^2 + c_4 \cdot DoD^2 +$$

$$+ c_5 \cdot I_{bat} \cdot DoD + c_6 \cdot I_{bat}^3 + c_7 \cdot DoD^3 + c_8 \cdot I_{bat}^2 \cdot DoD +$$

$$+ c_9 \cdot I_{bat} \cdot DoD^2 + c_{10} \cdot I_{bat}^4 + c_{11} \cdot DoD^4 +$$

$$+ c_{12} \cdot I_{bat}^3 \cdot DoD + c_{13} \cdot I_{bat} \cdot DoD^3 + c_{14} \cdot I_{bat}^2 \cdot DoD^2 \left[\frac{Ft}{kWh} \right]$$

$$K_{PV0} = \frac{G_{PV0}}{100} \cdot K_{regrealPV0}(I_{batrealPV0}, DoD) + \left(1 - \frac{G_{PV0}}{100} \cdot K_{grid} \right) \left[\frac{Ft}{kWh} \right]$$

$$I_{batrealPV0} = \frac{P_{tot} \cdot 1000}{U_{bat}} \cdot \frac{G_{PV0}}{100} \cdot \frac{100}{\eta_{LLC}} =$$

$$= \frac{P_{tot} \cdot 1000}{U_{bat}} \cdot \frac{G_{PV0}}{\eta_{LLC}} [A]$$

$$\eta_{LLC} = f \cdot \left(1 - e^{-g \cdot \frac{P_{tot}}{P_N} \cdot 100} \right) [\%]$$

$$K_{PV} = \frac{K_{bePV}}{E_{25év} \cdot \eta_{töltés}} \left[\frac{Ft}{kWh} \right]$$

$$K_{LLC} = \frac{K_{beLLC}}{365 \cdot 24 \cdot T_{LLC} \cdot P_{LLC}} \approx \frac{K_{beLLC}}{E_{25\acute{e}v}} \left[\frac{Ft}{kWh} \right]$$

$$K_{\ddot{O}PV0} = \frac{G_{PV0}}{100} \cdot (K_{PV} + K_{LLC} + K_{regrealPV0}) + \\ + \left(1 - \frac{G_{PV0}}{100} \cdot K_{grid} \right) \left[\frac{Ft}{kWh} \right]$$

$$G_{OPTPV0} = e_1 P_{tot}^6 + e_2 P_{tot}^5 + e_3 P_{tot}^4 + e_4 P_{tot}^3 + \\ + e_5 P_{tot}^2 + e_6 P_{tot} + e_7$$

$$G_{PV} = \begin{cases} \frac{100 \cdot (P_{PV} + P_{batPV0})}{P_{tot}}, & \text{ha } G_{PV} \leq 100 \text{ [\%]} \\ 100, & \text{ha } G_{PV} > 100 \end{cases}$$

$$P_{batPV0} = P_{tot} - P_{gridPV0} \text{ [kW]}$$

$$P_{gridPV0} = P_{tot} - \left(\frac{G_{PV0}}{100} \cdot P_{tot} \right) \text{ [kW]}$$

$$P_{batPV0} = P_{tot} \cdot \frac{G_{PV0}}{100} \text{ [kW]}$$

$$I_{batrealPV} = \begin{cases} \frac{100 \cdot I_{k\acute{i}v\acute{a}nt}}{\eta_{LLC}}, & \text{ha } I_{batrealPV} \geq 0 \text{ [A]} \\ I_{k\acute{i}v\acute{a}nt}, & \text{ha } I_{batrealPV} < 0 \end{cases}$$

$$\eta_{LLC} = f \cdot \left(1 - e^{-g \cdot \left(\frac{P_{tot}}{P_N} \cdot G_{PV} \right)} \right) \text{ [\%]}$$

$$I_{kívánt} = \frac{1000 \cdot P_{batPV}}{U_{bat}} [A]$$

$$P_{batPV} = P_{tot} - P_{grid} - P_{PV} [kW]$$

$$P_{grid} = \begin{cases} 0, & \text{ha } P_{PV} \geq P_{gridPV0} \\ P_{tot} - P_{PV} - P_{batPV0}, & \text{ha } P_{PV} < P_{grid0} \end{cases} [kW]$$

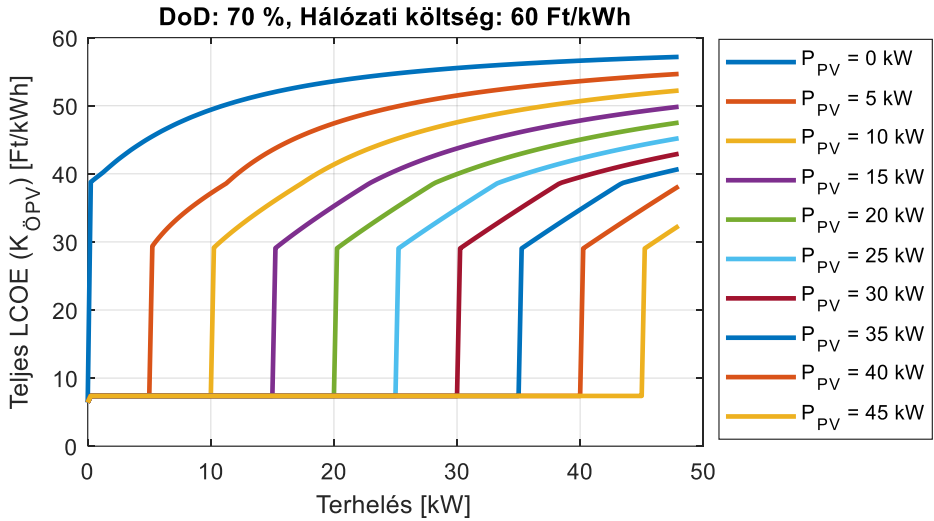
$$K_{\ddot{O}PV} = \frac{G_{PV}}{100} \cdot (K_{PV} + K_{LLC} + K_{regrealPV}) + \\ + \left(\frac{100 - G_{PV}}{100} \cdot K_{grid} \right) \left[\frac{Ft}{kWh} \right], \\ \text{ha } I_{batrealPV} \geq 0$$

$$K_{\ddot{O}PV} = K_{PV} + K_{LLC} \left[\frac{Ft}{kWh} \right], \quad \text{ha } I_{batrealPV} < 0$$

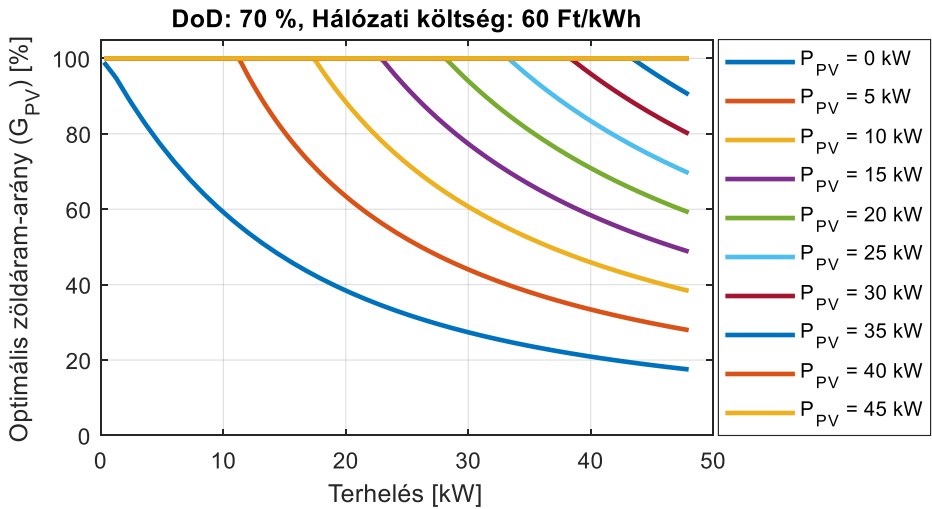
$$K_{\ddot{O}PV} = 0 \left[\frac{Ft}{kWh} \right], \quad \text{ha } P_{tot} = 0$$

$$G_{PV} = \begin{cases} 0, & \text{ha } K_{grid} \leq 0 \\ \frac{100 \cdot (P_{PV} + P_{batPV0})}{P_{tot}}, & \text{ha } K_{grid} > 0 \end{cases} [\%]$$

A 4. és 5. ábra egy példarendszer esetén szemlélteti, hogyan változik az összesített LCOE (összegységköltség) és a teljesítménymegosztás (zöldáram-hányados) a terhelés, a hálózati költség és a napelem teljesítményének függvényében, ha a DoD értéke 70%.



4. ábra: Összesített LCOE a terhelés függvényében, különböző napelem termelések esetén



5. ábra: Optimális zöldáram-hányados a terhelés függvényében, különböző napelem termelések esetén

2.3.3. A 3. tézis megfogalmazása

Új gazdasági modellt és számítási módszert dolgoztam ki hibrid napelemes szünetmentes rendszerek gazdaságilag optimális üzemeltetésére, amelynek alapján az energiamenedzsment határozza meg a két párhuzamosan működő generátor teljesítménymegosztását. A modell alapján valós időben lehet szabályozni az elosztott generátorokat, miközben figyelembe veszi a hálózati energia díját és a rendszerelemek teljes életciklusra vonatkoztatott fajlagos energiaköltségét. Mindemellett számításba veszi az aktuális villamos paramétereket (fogyasztást, termelést, akkumulátorfeszültséget) is. Mindezeket figyelembe véve történik a gazdaságilag optimális munkapontra való szabályozás.

A 3. tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S6], [S13]

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásom korai szakaszában megállapítottam, hogy a napelemes rendszerek, szünetmentes tápegységek és szünetmentes motorhajtások egy hálózatba történő integrálása jelentős mértékben csökkentheti a rendszer beruházási költségeit. E döntést tovább erősítette az is, hogy Magyarországon az elmúlt időszakban a napelemes rendszerekre vonatkozó jogszabályi környezet jelentős és dinamikus változásokon ment keresztül, amelyek érdemben befolyásolták mind a lakossági, mind az ipari beruházásokat. Először a kisméretű lakossági rendszerekkel foglalkoztam, azonban idővel egyre több lehetőséget láttam az ipari rendszerekben, ahol idősoros elszámolás van érvényben, ugyanis a megtakarított költségek itt magasabbak.

A hosszas irodalomkutatás révén arra jutottam, hogy a mikrohálózatok és nanohálózatok kombinálják az előbb említett rendszereket, mindemellett önálló szabályozható egységként kell működjének. Továbbá saját magukat képesnek kell lenniük teljes mértékben ellátni villamos energiával, diverz módon. Mivel egyik célom a beruházási- és üzemeltetési költségek csökkentése, így a mikrohálózatok és nanohálózatok továbbfejlesztése számomra nem volt releváns, hiszen belátható, hogy nagyon magas kezdeti költségekkel rendelkeznek. Így végül a hibrid szünetmentes rendszerek kutatásával foglalkoztam, amelyek a gyakorlatban egyszerűbben és költséghatékonyabban létesíthetők.

A szisztematikus irodalomkutatás rávilágított arra, hogy a hibrid szünetmentes rendszerekben és így a mikrohálózatokban és

nanohálózatokban is kritikus kérdés az egyes elektronikus átalakítók, fogyasztók, termelők együttműködése. Amennyiben egyszerre több rendszerelem táplálja meg a fogyasztót, vagy fogyasztókat, úgy a teljesítménymegosztás szabályozása és a minőségi villamos energia biztosítása kritikussá válik. A teljesítménymegosztást droop-szabályozókkal valósítják meg, amelynek stabilitása szintén sarkalatos kérdés. Megállapítottam, hogy kisebb rendszerek esetén érdemes lehet a droop-szabályozók nélkül megvalósítani a teljesítménymegosztást. Ezért dolgoztam ki olyan szabályozási stratégiákat, amelyek egyszerűbben valósítják meg a teljesítménymegosztást, miközben a közbenső egyenáramú kör feszültségét is stabilizálják. Így munkásságom során kidolgoztam a hagyományos PID és neurális hálóval kiegészített szabályozókból álló szabályozási stratégiákat. Ezeket a szabályozási stratégiákat tesztek alá vettem, amelynek eredményei azt bizonyítják, hogy mindkét szabályozási módszer megfelelően működik. A neurális háló révén intelligens szabályozás valósul meg, és pontosabban képes tartani a közbenső egyenáramú kör feszültségét változó körülmények között, mint a PID szabályozó.

Céлом volt egy olyan energiamenedzsment kidolgozása a szabályozási módszerekhez és a rendszer topológiájához, amely révén elérhető az üzemeltetés során létrejövő gazdaságilag optimális munkapont. Kidolgoztam egy új gazdasági és optimalizálási modellt, amely segítségével meghatározható a felhasznált villamos energia LCOE-ja az egyes rendszerelemeket figyelembe véve. Kimutatásokkal is igazoltam, hogy érdemes a napelemes hibrid szünetmentes rendszerekben a teljesítménymegosztást valós időben szabályozni,

számos paraméter függvényében. Az irodalomkutatás során nem találtam olyan publikációt, amelyben az egyes rendszerelemek LCOE-ja, a terhelések, a termelések és a hálózati energiaár alapján állították volna be a teljesítménymegosztást, így ez is új kutatási területnek mondható. Az optimalizálás eredményeként az akkumulátorok élettartama is nő, így összegzésként elmondható, hogy nemcsak költséghatékonyabb, hanem fenntarthatóbb szünetmentes rendszerek is megvalósíthatók a gyakorlatban. Merem azt állítani, hogy a jövőben a negyedórás elszámolást sokkal dinamikusabb időintervallumok váltják majd fel, ennél fogva az energiamenedzsment rendszerek alkalmazása még fontosabbá válik.

A jövőben még számos kutatás folytatható az intelligens, napelemes, hibrid szünetmentes rendszer témájában. További vizsgálatok szükségesek az energiamenedzsment algoritmus finomhangolására, különösen a valós idejű döntéshozatal és a prediktív szabályozás területén. Az energiamenedzsment figyelembe vehetné a várható időjárást, a várható villamos energia díját, fogyasztási szokásokat, tervezett leállásokat stb. Az intelligens szabályozás identifikációs algoritmusát érdemes lenne továbbfejleszteni három vagy több elosztott generátorra is. Ebben az esetben már érdemes lenne összehasonlítani a droop-szabályozás hatékonyságával is. Az elkövetkező években a megújuló energiaforrások egyre nagyobb térnyerése miatt várható, hogy a hasonló rendszerek intelligensebbé és hatékonyabbá válnak, így a fejlesztések gyakorlati alkalmazásai még nagyobb jelentőséget kapnak.

4. SAJÁT PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

4.1. A disszertációhoz köthető minőségi publikációk

- [S1] R. R. Boros és I. Bodnár, „LLC Resonant Converter Design and Simulation for PV Motor Drives”, in *22nd International Carpathian Control Conference (ICCC 2021)*, 2021, o. 1–5. (**Scopus, WoS**, független hivatkozások száma: 2)
- [S2] R. R. Boros és I. Bodnár, „Grid and PV Fed Uninterruptible Induction Motor Drive Implementation and Measurements,” *ENERGIES*, vol. 15, no. 3, 2022. (**Scopus, WoS, Q1, IF: 3.2**, független hivatkozások száma: 4)
- [S3] R. R. Boros és I. Bodnár, „Photovoltaic Fed Grid-Tie Inverter Design and Simulation”, in *2022 23rd International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 2022, o. 162–166. (**Scopus, WoS**, független hivatkozások száma: 1)
- [S4] R. R. Boros és I. Bodnár, „Uninterruptible induction motor drive in combination with an off-grid solar inverter”, in *Proceedings of the 2023 24th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 2023, o. 364–369. (**Scopus, WoS**)
- [S5] R. R. Boros és I. Bodnár, “Effect of SPWM Inverter in Combination with Solar Uninterruptible Induction Motor Drive,” *ENERGIES*, vol. 16, no. 13, 2023. (**Scopus, WoS, Q1, IF: 3.0**, független hivatkozások száma: 1)
- [S6] R. R. Boros, M. Jobbágy, és I. Bodnár, “Optimized Real-Time Energy Management and Neural Network-Based Control for Photovoltaic-Integrated Hybrid Uninterruptible Power Supply Systems,” *ENERGIES*, vol. 18, no. 6, 2025. (**Scopus, WoS, Q1, IF: 3.0**)

4.2. A disszertációhoz köthető egyéb publikációk:

- [S7] R. R. Boros, „LLC rezonáns konverter tervezése és szimulációja,” *MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE*, vol. 11, no. 4, pp. 198–207, 2021.
- [S8] R. R. Boros, „Szünetmentes aszinkron motor hajtás integrálása szigetüzemű inverterbe,” in *Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2022: konferencia előadások publikációi*, 2022, pp. 56–59.
- [S9] R. R. Boros és I. Bodnár, „Napeleminverter tervezése és szimulálása,” *ACTA ACADEMIAE NYIREGYHAZIENSIS*, vol. 7, pp. 81–85, 2022.
- [S10] R. R. Boros és I. Bodnár, „Napelemes szünetmentes aszinkron motorhajtás szigetüzemű inverterrel,” *JELENKORI TÁRSADALMI ÉS GAZDASÁGI FOLYAMATOK*, vol. 18, no. Különszám, pp. 91–104, 2023.
- [S11] R. R. Boros, N. Szabó, és I. Bodnár, „Napelemes szünetmentes aszinkron motorhajtás minőségi paramétereinek a vizsgálata,” in *XXVI. Tavaszi Szél Konferencia 2023*, 2023, pp. 520–539.
- [S12] R. R. Boros, I. Bodnár, „Intelligens szabályozó beágyazása kombinált napelemes szünetmentes rendszerbe,” in *XXXIX. Kandó Konferencia 2023*, 2024, pp. 31–43.
- [S13] R. R. Boros, I. Bodnár, „Dinamikus energiamenedzsment napelemes szünetmentes tápegységekhez,” in *120 éves az Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék elnevezésű Jubileumi Konferencia kiadványa*, 2024, pp. 17–32.

5. FELHASZNÁLT IRODALMAK

- [1] M. I. Nassef, H. A. Ashour, és H. Desouki, „Battery-less hybrid micro-grid power management using bi-directional three phase power converter”, *2015 IEEE 1st International Conference on Direct Current Microgrids, ICDCM 2015*, o. 19–25, júl. 2015, doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152003.
- [2] F. Chen, R. Burgos, D. Boroyevich, és W. Zhang, „A nonlinear droop method to improve voltage regulation and load sharing in DC systems”, *2015 IEEE 1st International Conference on Direct Current Microgrids, ICDCM 2015*, o. 45–50, júl. 2015, doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152008.
- [3] F. Zhang és mtsai., „Power management strategy research for DC microgrid with hybrid storage system”, in *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, IEEE, jún. 2015, o. 62–68. doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152011.
- [4] M. A. Ghalib, E. G. Shehat, J. Thomas, és R. M. Mostafa, „Adaptive droop control for high-performance operation in low-voltage DC microgrids”, *Electrical Engineering*, köt. 101, sz. 4, o. 1311–1322, dec. 2019, doi: 10.1007/S00202-019-00869-8/FIGURES/15.
- [5] M. Nasir, M. Anees, H. Abbas Khan, és J. M. Guerrero, „Dual-loop control strategy applied to the cluster of multiple nanogrids for rural electrification applications”, *IET Smart Grid*, köt. 2, sz. 3, o. 327–335, szept. 2019, doi: 10.1049/iet-stg.2019.0098.
- [6] C. Yang, F. Gao, és B. Zhang, „An Improved Nonlinear Droop Control Strategy in DC Microgrids”, *IEEE Trans Power Electron*, köt. 39, sz. 5, o. 5058–5073, máj. 2024, doi: 10.1109/TPEL.2023.3349027.
- [7] S. Kanwal, M. Q. Rauf, B. Khan, és G. Mokryani, „Artificial neural network assisted robust droop control of autonomous microgrid”, *IET Renewable Power Generation*, köt. 18, sz. 7, o. 1346–1369, máj. 2024, doi: 10.1049/RPG2.12739.

- [8] Y. S. Bhavsar, P. V. Joshi, és S. M. Akolkar, „Energy management in DC microgrid”, in *2015 International Conference on Energy Systems and Applications*, IEEE, okt. 2015, o. 209–213. doi: 10.1109/ICESA.2015.7503341.
- [9] P. J. dos Santos Neto, T. A. S. Barros, J. P. C. Silveira, E. Ruppert Filho, J. C. Vasquez, és J. M. Guerrero, „Power management techniques for grid-connected DC microgrids: A comparative evaluation”, *Appl Energy*, köt. 269, o. 115057, júl. 2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.115057.
- [10] A. Shahid, „Power quality control in grid-interactive micro-power systems”, *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2016*, o. 966–970, 2016, doi: 10.1109/ICRERA.2016.7884479.