

# INTELLIGENS TELJESÍTMÉNYESZÁRTELÁS HIBRID SZÜNETHMENTES RENDSZEREKBE

Boros Rafael Ruben

**Abstract:** A fotovoltaikus (PV) rendszerek növekvő penetrációja és a megbízható szünetmentes megoldások iránti igény a hibrid szünetmentes áramellátó rendszerek (UPS) kifejlesztéséhez vezetett. Ezek a rendszerek a valós idejű energiagazdálkodás optimalizálása érdekében integrálják a PV energiátárolást az akkumulátoros tartalék- és hálózati energiával. Ez a tanulmány egy mesterséges neurális hálózaton (ANN) alapuló szabályozási módszert javasol a PV-integrált hibrid UPS-rendszerekhez. A javasolt stratégia dinamikusan határozza meg az optimális teljesítményelosztási arányt az akkumulátortároló és a hálózat között a valós idejű gazdasági paraméterek, a terhelési igény és az akkumulátor töltöttségi állapota (SoC) alapján. Egy központosított ANN-alapú szabályozó biztosítja az LLC konverter és az egyenirányító pontos szabályozását, stabil és hatékony teljesítményelosztást elérve. A javasolt megközelítés szimulációkkal kerülnek validálásra, és a hagyományos szabályozási módszerekhez képest jelentős javulást mutatnak a költséghatékonyság, a rendszer stabilitása és a dinamikus alkalmazkodóképesség terén. Ezek az eredmények azt mutatják, hogy az ANN-alapú szabályozás integrálása növelheti a hibrid UPS-rendszerek hatékonyságát és fenntarthatóságát. Az ANN-alapú szabályozás alkalmazásával a teljesítményelosztás hibája 1% alá csökkent, míg a közbenső kör feszültségének eltérése legfeljebb mintegy 2 V volt dinamikus körülmények között.

**Abstract:** The increasing penetration of photovoltaic (PV) systems and the need for reliable backup power solutions have led to the development of hybrid uninterruptible power supply (UPS) systems. These systems integrate PV energy storage with battery backup and grid power to optimize real-time energy management. This paper proposes an advanced energy management strategy and an artificial neural network (ANN) based control method for PV-integrated hybrid UPS systems. The proposed strategy dynamically determines the optimal power-sharing ratio between battery storage and the grid based on real-time economic parameters, load demand, and battery state of charge (SoC). A centralized ANN-based controller ensures precise control of the LLC converter and rectifier, achieving stable and efficient power distribution. Additionally, a genetic algorithm is implemented to optimize the power sharing ratio, minimizing the LCOE under varying load and electricity pricing conditions. The proposed approach is validated through simulations, demonstrating significant improvements in cost-effectiveness, system stability, and dynamic adaptability compared to conventional control methods. These findings suggest that integrating ANN-based control with optimized energy management can enhance the efficiency and sustainability of hybrid UPS systems, particularly in fluctuating energy markets. With the application of ANN-based control, the power sharing error was reduced to less than 1%, while the intermediate loop voltage deviation was less than 2 V under dynamic conditions.

**Kulcsszavak:** teljesítményelosztás, áramelosztás, hibrid szünetmentes rendszer, intelligens szünetmentes rendszer, napelem

**Keywords:** power sharing, current sharing, hybrid uninterruptible power supply, intelligent uninterruptible system, photovoltaics

## 1. Bevezetés

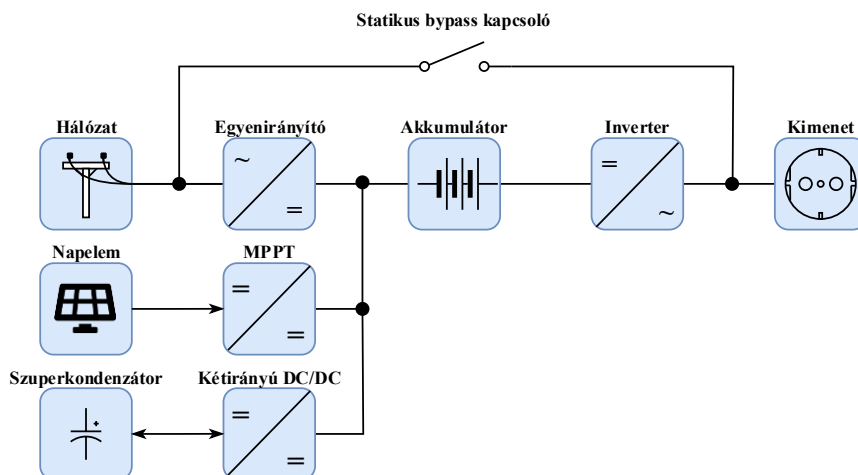
A globális közösség jelentős kihívásokkal néz szembe az egyre növekvő energiafogyasztás és a szén-dioxid-kibocsátás csökkentésének szükségessége miatt. A fenntarthatóság elérése érdekében a villamosenergia-rendszereknek alkalmazkodniuk kell az új technológiákhoz és a változó energiafogyasztási

mintákhoz. Bár a napelemek széles körű elterjedése az elmúlt évtizedben jelentős előrelépéshez vezetett, a villamosenergia-hálózatba való integrálásuk jelentős technológiai és gazdasági kihívásokat jelent. A rendszer stabilitásának biztosítása, a termelés és a fogyasztás közötti egyensúly fenntartása és a decentralizált termelés kezelése különös figyelmet igényel (Bogdanov et al., 2021; Liutak et al., 2023).

Ebben az összefüggésben a szünetmentes tápegységek, különösen a napelemeket integráló hibrid megoldások kulcsszerepet játszanak. Ezek a rendszerek nemcsak folyamatos áramellátást biztosítanak, hanem lehetőséget nyújtanak az energiagazdálkodás optimalizálására is. Az energiagazdálkodással a hibrid UPS-rendszerek gazdaságosabban üzemeltethetők, mivel a napelemek által termelt villamos energia helyben fogyasztható ahelyett, hogy a hálózatba táplálnák. Ez jelentős előnyt jelent, különösen a változó piaci körülmények között.

A megújuló energiaforrások növekvő elterjedése miatt egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a decentralizált energiaellátó rendszerek, például a mikro- és nanohálózatok, amelyek célja a helyi energiafelhasználás optimalizálása és a hálózattól való függetlenség növelése. A hibrid UPS-rendszerek és a mikrohálózatok vagy nanohálózatok számos hasonlóságot mutatnak; a kisebb rendszerek esetében azonban gyakran a hibrid UPS-rendszereket részesítik előnyben költséghatékonyságuk és egyszerűbb szabályozhatóságuk miatt, ami egyszerűbb kialakításuknak tulajdonítható. A mikrohálózatok és nanohálózatok nagyobb rugalmasságot és összetettebb szabályozási lehetőségeket kínálnak, de a fejlett szabályozás és a több energiaforrás integrálása miatt magasabb beruházási költséggel járnak. A hibrid UPS-rendszerek ideálisak, ha a helyi energiaigény kielégítése, a folyamatos áramellátás biztosítása és az egyszerű megvalósítás kulcsfontosságú szempont, különösen a kisebb méretű rendszerek esetében. Ezek a rendszerek hatékonyabbak, ha cél a napelemek által termelt energia helyi felhasználása, miközben költséghatékonyságot és egyszerű szabályozhatóságot biztosítanak.

### 1. ábra: Hibrid online szünetmentes tápegység felépítése



Forrás: Ko et al. (2019) és Oh et al. (2019) kutatásai alapján a szerző szerkesztése.

Általában a hibrid UPS-rendszer felépítése napelemeket, akkumulátortárolót és invertert tartalmaz. A napelemek a napfényt villamos energiává alakítják, amely közvetlenül felhasználható a csatlakoztatott fogyasztók táplálására, vagy akkumulátorokban tárolható későbbi felhasználásra (Pozo Jr. et al., 2022). A rendszer opcionálisan szuperkondenzátorokat és üzemanyagcellákat is tartalmazhat. Az 1. ábra egy intelligens hibrid UPS-rendszer példáját mutatja (Ko et al., 2019; Oh et al., 2019).

Jelenleg számos tudományos probléma merül fel a hibrid UPS rendszerekkel, mikrohálózatokkal és nanohálózatokkal kapcsolatban. Az egyik legnagyobb probléma a párhuzamosan kapcsolt generátorok (pl. hálózat, napelem, akkumulátor) primer és szekunder szabályozása, amikor ezek különböző arányban látják el a fogyasztókat. A szabályozást egy droop szabályozó végzi, amely a terhelésmegosztás mellett a feszültség stabilizálására is törekszik. A hagyományos droop szabályozási módszerek olyan problémákhoz vezethetnek, mint a feszültségeltérések és a gyenge terhelésmegosztás, ha a források eltérő jellemzőkkel rendelkeznek, vagy ha a vezeték impedanciája változik (Eskandari et al., 2020; Gorijeevaram Reddy et al., 2021; Wang et al., 2023). A megújuló energiatermelés változékonysága a teljesítmény gyors ingadozásához vezethet, amit a hagyományos droop-szabályozási módszerek nehezen tudnak kezelni. Ez a változékonyság jelentős feszültségeltéréseket és kihívásokat eredményezhet a rendszer stabilitásának fenntartásában (Kim et al., 2021; Wang et al., 2023). E technikai kihívások mellett a hibrid UPS-rendszerek kommunikációs követelményei is problémákat okozhatnak. Míg a droop-szabályozás decentralizált jellege miatt előnyös, a kommunikáció hiánya nehézségekhez vezethet a több forrás közötti koordinált szabályozás megvalósításában (Imran et al., 2019). Ezenkívül a droop-szabályozási paraméterek kialakítása kulcsfontosságú a hibrid UPS-rendszerek optimális teljesítményének biztosításához. A Bunker et al. szerint a megfelelő droop együtthatók kiválasztása elengedhetetlen a pontos teljesítménymegosztás és feszültségszabályozás eléréséhez (Bunker–Weaver, 2017).

A mesterséges neurális hálózatok (ANN) a hagyományos PID-szabályozók ígéretes alternatívájaként jelentek meg a hibrid UPS-rendszereken belüli teljesítménymegosztás kezelésében. Ezt az állítást különböző tanulmányok támasztják alá, amelyek kiemelik az ANN-alapú szabályozási stratégiák előnyeit, különösen az alkalmazkodóképesség, a hatékonyság és a változó működési feltételek melletti teljesítmény tekintetében. Az ANN-szabályozók egyik fő előnye, hogy képesek valós időben tanulni és alkalmazkodni, ami kulcsfontosságú a gyakran dinamikus terhelési körülményekkel szembesülő hibrid UPS-rendszerek esetében. Alatshan és társai például hangsúlyozzák, hogy az ANN-szabályozók képesek tanulni a múltbeli adatokból és megalapozott döntéseket hozni anélkül, hogy a rendszer pontos matematikai modelljére lenne szükségük, így gyors dinamikus választ biztosítanak (Alatshan et al., 2020). Ez a képesség lehetővé teszi az ANN-ok számára, hogy hatékonyan kezeljék a hibrid rendszerekben a teljesítménymegosztással kapcsolatos komplexitásokat, különösen a PID-

szabályozók statikus jellegéhez képest, amelyek fix paraméterekre támaszkodnak, amelyek nem reagálnak megfelelően a változó körülményekre (Joshi et al., 2021).

Ezenkívül az ANN-szabályozók robusztussága a nemlineáris és időben változó rendszerek kezelésében jól dokumentált. Amer és munkatársai megjegyzik, hogy az ANN-ok képesek nemlineáris, több bemenetű, több kimenetű (MIMO) rendszerek modellezésére, így különösen alkalmasak a hibrid UPS-rendszerek bonyolult dinamikájára (Amer et al., 2011). Ezt az alkalmazkodóképességet tovább fokozza az ANN-ok azon képessége, hogy valós időben optimalizálják a szabályozási stratégiákat, amint azt a mikrohálózatok energiagazdálkodásától kezdve a villamosenergia-rendszerek feszültségstabilitásának javításáig számos alkalmazásban bizonyították (Abdolrasol et al., 2021). Ezzel szemben a PID-szabályozók gyakran küzdenek a nemlinearitással, és kiterjedt hangolást igényelnek az optimális teljesítmény eléréséhez, ami időigényes és nem hatékony (Wei et al., 2019). Yang és munkatársai kiemelik, hogy az ANN-alapú szabályozók jelentősen javítják a villamosított nyomás-lengéses desztilláció teljesítményét azáltal, hogy dinamikusan alkalmazkodnak a folyamatváltozásokhoz és a nemlineáris rendszer viselkedéséhez. A hagyományos szabályozási módszerekkel ellentétben az ANN-szabályozók képesek megtanulni a rendszeren belüli összetett összefüggéseket, lehetővé téve a pontos összetétel-szabályozást és csökkentve az energiafogyasztást. Ez az alkalmazkodóképesség javítja a robusztusságot a zavarokkal szemben, és stabilabb és hatékonyabb szétválasztási folyamatot biztosít (Yang et al., 2025).

A tanulmány egy olyan új ANN-alapú centralizált napelemes, hibrid UPS rendszert javasol, amely két elosztott generátor esetén képes a teljesítménymegosztást és egyenfeszültséget stabilan beállítani. A teljesítménymegosztás alapjel tetszőlegesen változtatható 0 és 100% között. A szabályozó figyelembe veszi a terhelés nagyságát, az akkumulátor feszültségét, amelyek alapján a központi szabályozó szabályozza az elosztott generátorok helyi szabályozóját, azaz alapjelüket módosítja. A cikk továbbá egy új módszert ismertet, ami az ANN betanításához szükséges adathalmazt állítja elő.

## 2. Anyag és módszer

### 2.1. Topológia

Az alábbi alfejezetben látható a kidolgozott intelligens szabályozási stratégia, rendszertopológia. Bemutatásra kerül az automatikus rendszeridentifikáció algoritmus, amely segítségével hatékonyan lehet betanítani a mesterséges neurális hálózatot, így tehát intelligens módon a nemlineáris elektronikus átalakítókat szabályozza. Alapvetően az intelligens szabályozási stratégia olyan hibrid szünetmentes rendszerekhez alkalmazható, ahol tirisztoros gyűjtőáramkörös egyenirányítók vagy Park-vektoros szabályozóval rendelkező aktív egyenirányítók táplálják a közbenső egyenáramú kört az LLC konverterekkel párhuzamosan.

A kutatásban használt rendszer topológiája, paraméterei részletesebben megtekinthető az alábbi kutatásomban (Boros et al., 2025).

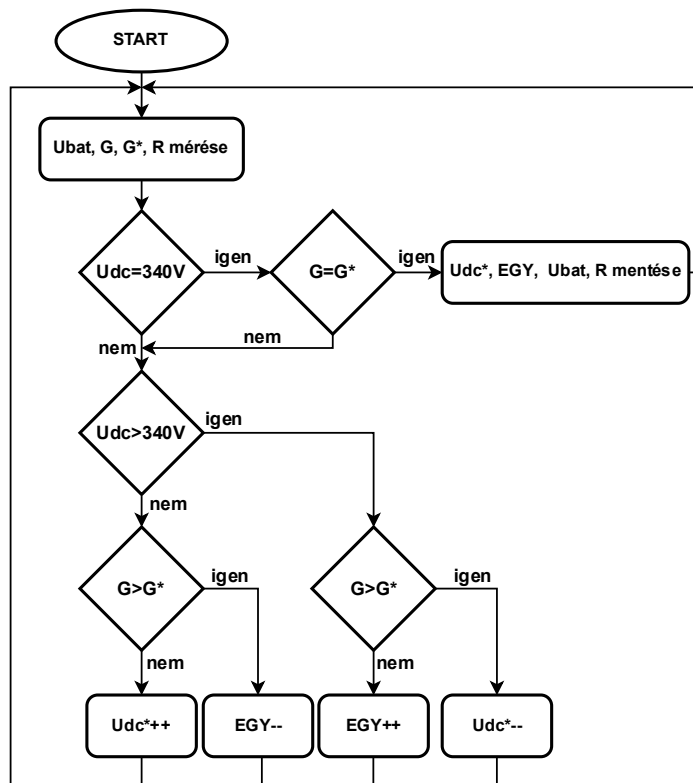


menedzsment rendszere (BMS) visszajelentést ad az akkumulátor töltő, illetve kisütőáramáról (ibat), így tehát nincs szükség külön az MPPT szabályozó irányítására, felügyeletére. A BMS továbbá képes visszacsatolást adni az akkumulátor töltöttségi állapotáról is (SoC), valamint az akkumulátor feszültségéről (ubat). Az akkumulátor feszültségéből és töltőáramából meghatározható tehát a napelem teljesítménye.

## 2.2. Identifikátor

Egy neurális hálózat hatékony működésének alapfeltétele a megfelelő mennyiségű és minőségű adathalmaz rendelkezésre állása. A tanításhoz szükséges adat mennyisége számos tényezőtől függ, amelyek közül a legfontosabbak a hálózat komplexitása, a tanulási feladat jellege, valamint az adatok sokfélesége és redundanciája. Általánosan elmondható, hogy a hálózat teljesítménye és pontossága nagymértékben összefügg a tanításhoz használt adathalmaz nagyságával és minőségével. A megfelelő teljesítmény eléréséhez az adathalmaznak tükröznie kell a rendszerben előforduló mintázatok sokféleségét.

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



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

A 2. ábrán látható, hogy a szabályozást végző neurális hálózat három bemenettel és kettő kimenettel rendelkezik. Ahhoz, hogy a neurális háló a kívánt zöldáram-

hányados és közbenső kör feszültség kívánt nagyságát beállítsa a hibrid szünetmentes rendszerben, ismernie kell az adott akkumulátor feszültséghez, közbenső egyenáramú kör feszültséghez, terheléshez tartozó helyi szabályozók (egyenirányító és LLC konverter szabályozóinak) alapjeleit. Ezek az alapjelek az egyenirányító esetén EGY paraméterrel, a LLC konverter esetén  $U_{dc}^*$  paraméterrel vannak jelölve az ábrán. A tanításhoz szükséges adathalmazt a 3. ábrán látható algoritmus állítja elő.

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:

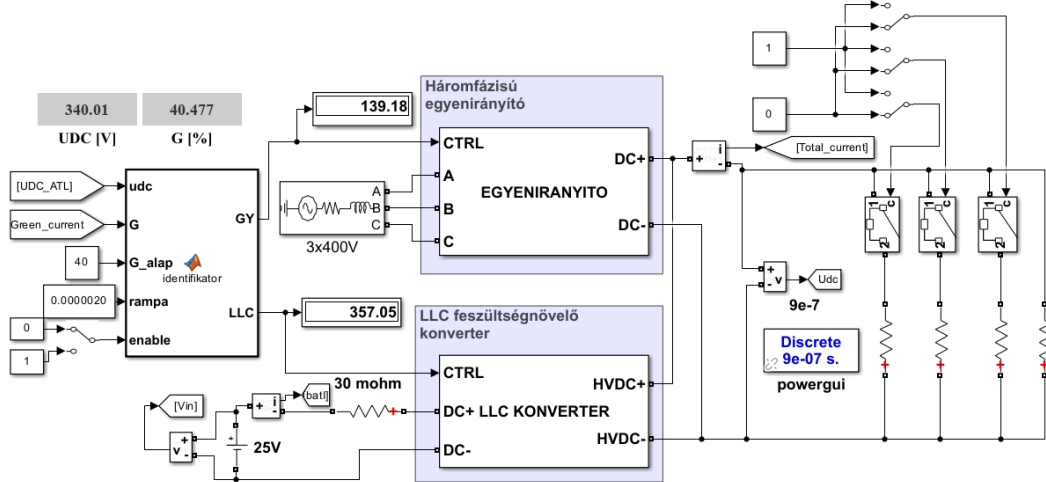
- Amennyiben  $U_{dc} < 340 \text{ V}$  és  $G > G^*$ , akkor EGY paraméter inkrementálása szükséges
- Ha  $U_{dc} > 340 \text{ V}$  és  $G < G^*$ , akkor EGY paraméter dekrementálása szükséges

Az inkrementálási és dekrementálási sebességet rámpázási módszerrel lehet beállítani.

### 2.3. Szimulációs módszerek a validáláshoz

Az alábbi alfejezet bemutatja a neurális hálóval szabályozott hibrid szünetmentes rendszer szimulációs módszereit. A szimulációk célja vizsgálni, hogy a mesterséges neurális hálóval szabályozott rendszer hogyan képes a teljesítménymegosztást és a közbenső egyenáramú kör feszültségét stabilan tartani, miközben dinamikusan változik az akkumulátor feszültsége, a terhelés és a kívánt zöldáram-hányados. Az identifikátor működése esetén a kapcsolatban a fogyasztókat ellenállások reprezentálják, több párhuzamosan kapcsolt ellenállással és megszakítóval lehet a terhelést változtatni. Az identifikátor blokk addig változtatja az egyenirányító és LLC konverter alapjeleit, amíg a kívánt  $G$  és  $U_{dc}$  érték nem jön létre a rendszerben. A tirisztoros egyenirányítóval rendelkező rendszert mutatja a 4. ábra.

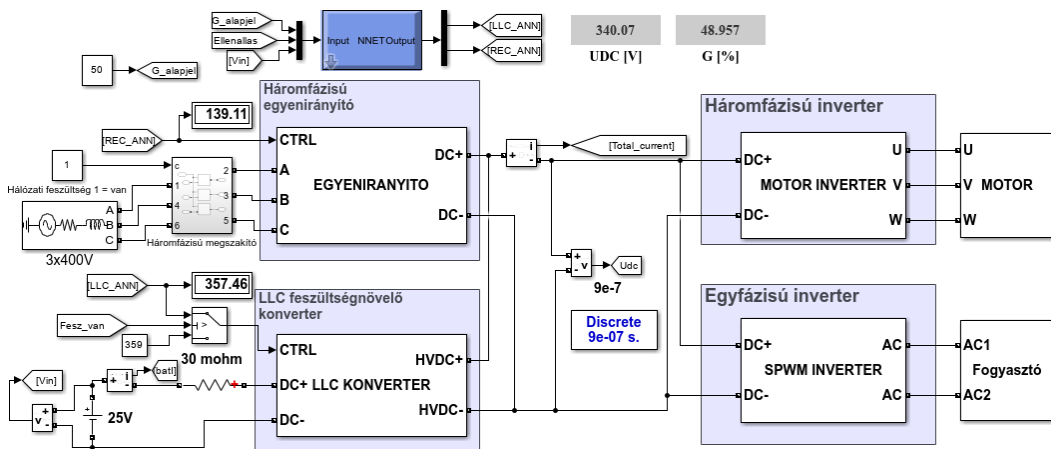
#### 4. ábra: A hibrid szünetmentes rendszeridentifikációja



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

Az identifikátor által előállított adathalmaz alapján betanított neurális hálóval szabályozott rendszer főáramköre az 5. ábrán látható, ahol tirisztoros egyenirányító foglal helyet.

#### 5. ábra: Neurális hálóval szabályozott hibrid szünetmentes rendszer főáramköre



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

A terhelőellenállás értékét a program a közbenső kör feszültségének lineáris középértékéből és áramának lineáris középértékéből számolja, Ohm-törvény segítségével, ahol a lineáris középérték 50 Hz-re van vonatkoztatva. A hálózati áramszünetet is kezeli a rendszer, ez látható az ábra bal oldalán. A háromfázisú megszakító manuális vezérléssel kikapcsolható, ekkor áramszünet jön létre, az egyenirányító ellátatlan marad. Az egyenirányító blokkon belül egy feszültségfigyelő ellenőrzi a hálózati feszültség meglétét. Amennyiben nincs

hálózati feszültség, úgy a Fesz\_van változó 0 értéket ad vissza. Ekkor az LLC konverter helyi szabályozójának küldött alapjel 359 V-ra ugrik fel és már nem a neurális hálótól kapott értékre szabályoz. A helyi szabályozó csak proporcionális szabályozót tartalmaz, így nagy az állandósult állapotú hibája, ezért szükséges megközelítőleg 359 V alapjel mintegy 340 V feszültség tartásához.

### 3. Eredmények és értékelésük

A következőkben az egyes elvégzett szimulációk célja és eredményei láthatók. A szimulációk során tirisztoros egyenirányító volt a főáramkörbe csatlakoztatva.

#### 3.1. Az 1. szimuláció - identifikáció eredménye

A szimuláció a hibrid szünetmentes rendszeridentifikálását végzi el. A szimuláció során a bemeneti paraméterek az alábbi értékek voltak:

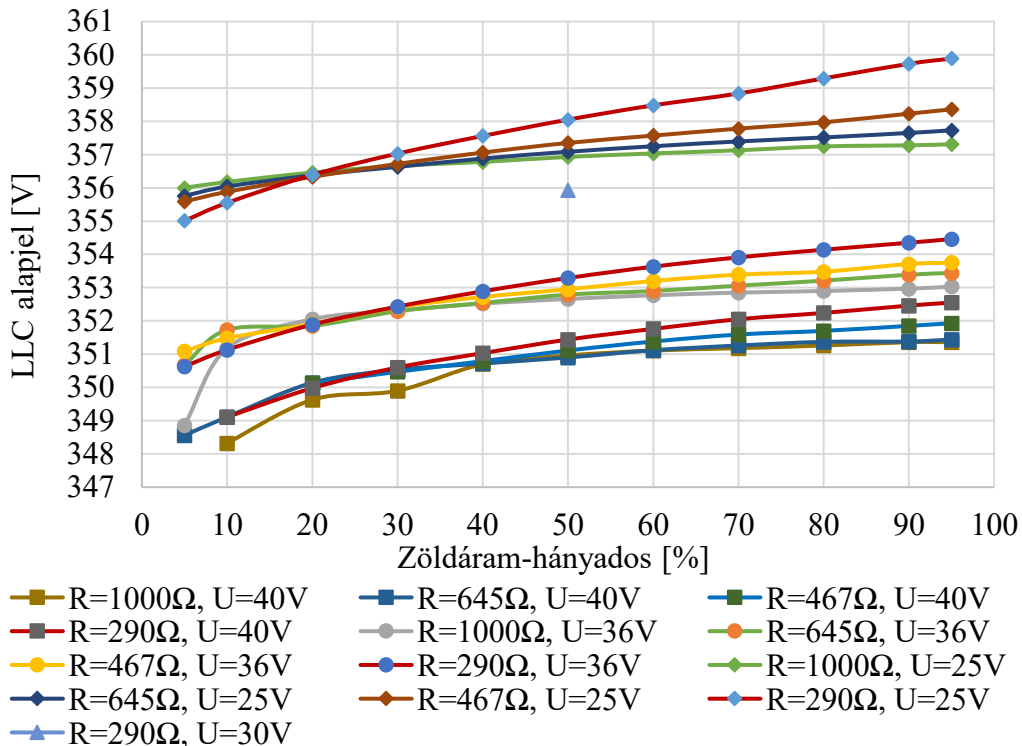
- Terhelés ( $R_t$ ): 290  $\Omega$ , 467  $\Omega$ , 645  $\Omega$ , 1000  $\Omega$ ,
- Akkumulátor feszültsége ( $U_{bat}$ ): 25 V, 30 V, 36 V, 40 V,
- Zöldáram-hányados alapjel ( $G^*$ ): 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 95%.

Amikor az akkumulátor feszültsége 30 V feszültségre volt állítva, csak egy identifikálási ciklus futott le 290  $\Omega$  terhelés, 50% zöldáram-hányados alapjel esetén. Továbbá 467  $\Omega$  terhelés, 40 V akkumulátor feszültség esetén az 5% és 10% zöldáram-hányadoshoz tartozó értékek hiányoznak, mert nem volt megvalósítható a teljesítményarány. Ugyanígy 290  $\Omega$  terhelés, 40 V akkumulátor feszültség esetén az 5% zöldáram-hányadoshoz tartozó értékek hiányoznak.

Így tehát összesen 129 ciklus jött létre. Egy ciklus eredménye tartalmazza a terheléshez, akkumulátor feszültséghez és zöldáram-hányadoshoz tartozó alapjel értékeket (EGY, UDC\*), azaz a kimeneti értékeket. Amennyiben a kívánt zöldáram-hányados kisebb, mint 5%, úgy az LLC konvertert ki kell kapcsolni. Ugyanakkor 95% zöldáram-hányados alapjel felett az egyenirányítót szükséges kikapcsolni, ennél fogva csökkennek a veszteségek és pontosabb szabályozás jön létre.

Az identifikáció eredményét a 6. ábra szemlélteti, ahol az LLC konverterhez tartozó szükséges alapjelek kerültek ábrázolásra, különböző zöldáram-hányados, terhelés és akkumulátorfeszültség esetén.

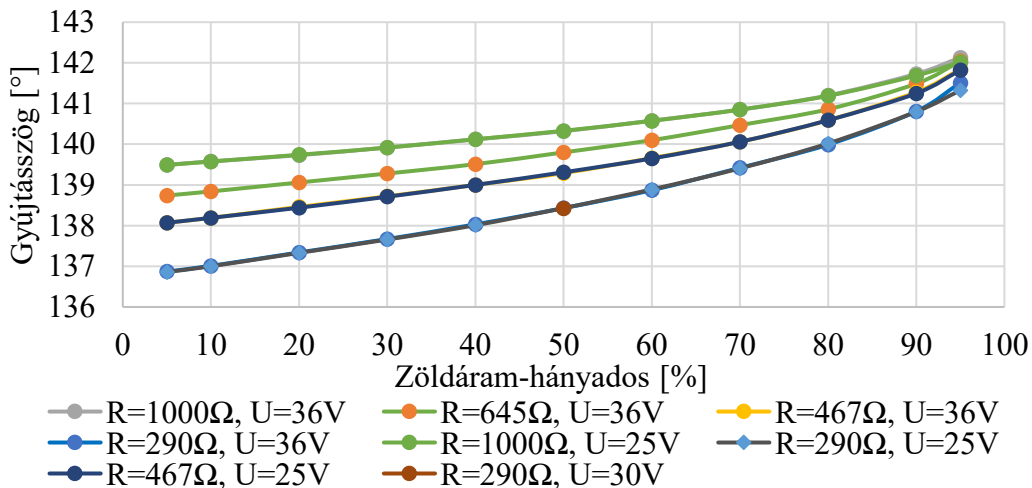
6. ábra: Az LLC konverterhez tartozó felmért alapjelek



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

A kapott egyenirányító gyűjtásszögeit a 7. ábra jeleníti meg. A szimuláció alapján megállapítható, hogy az akkumulátor feszültségének változása elhanyagolható mértékben változtatja meg a szükséges gyűjtásszöget. Ennélfogva nem került ábrázolásra mind a 129 ciklus eredménye.

7. ábra: Az egyenirányítóhoz tartozó felmért gyűjtásszögek



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

### 3.2. A neurális háló betanítása

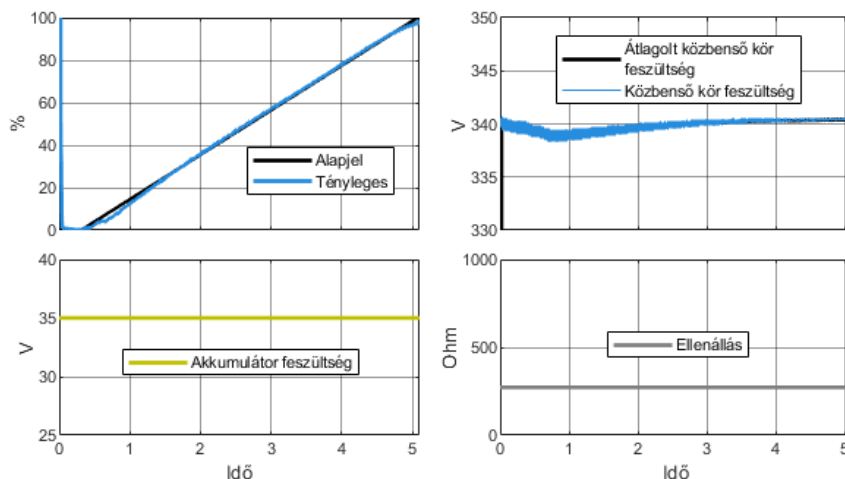
A neurális háló betanítását az 1. szimuláció eredményeinek felhasználásával lehet elvégezni. A kapott eredményeket Excel-táblázatba szükséges elmenteni. A táblázatot a neurális háló betanításakor a MATLAB szoftver importálja. Az optimális neuronok számát és a tanítási módszer kiválasztását kísérleti úton, validációs adathalmazon történő teszteléssel kell meghatározni. A betanításhoz deklarálni kell a tanítási-körök (iterációk) számát, a kívánt teljesítményt (megengedett minimális hibát), maximális validációs hibák számát tanulás közben.

Az eredmények alapján a neurális háló megfelelő konvergenciát mutat. A teljesítmény tovább növelhető a rejtett neuronok számának növelésével, azonban ekkor túltanulás jön létre. Az optimális rejtett neuronok száma 9-re adódott 129 ciklus, 3 bemeneti réteg és 2 kimeneti réteg esetén.

### 3.3. A 2. szimuláció - zöldáram-hányados rámpázása

A cél annak bemutatása, hogy a zöldáram-hányados (0-100%-os) rámpázása hogyan befolyásolja a tényleges zöldáram-hányadost és a közbenső egyenáramú kör feszültségét, miközben a terhelés és az akkumulátor feszültsége állandó marad. A 2. szimuláció eredménye látható a 8. ábrán. A zöldáram-hányados alapjel végigrámpázásával a tényleges érték minimális hibával követi az alapjelet, miközben a közbenső kör feszültsége is minimálisan változik. A létrejövő feszültség és zöldáram-hányados hibák abból erednek, hogy az identifikálás is és a tanítás is tartalmaz hibát.

8. ábra: A zöldáram-hányados rámpázásának hatása



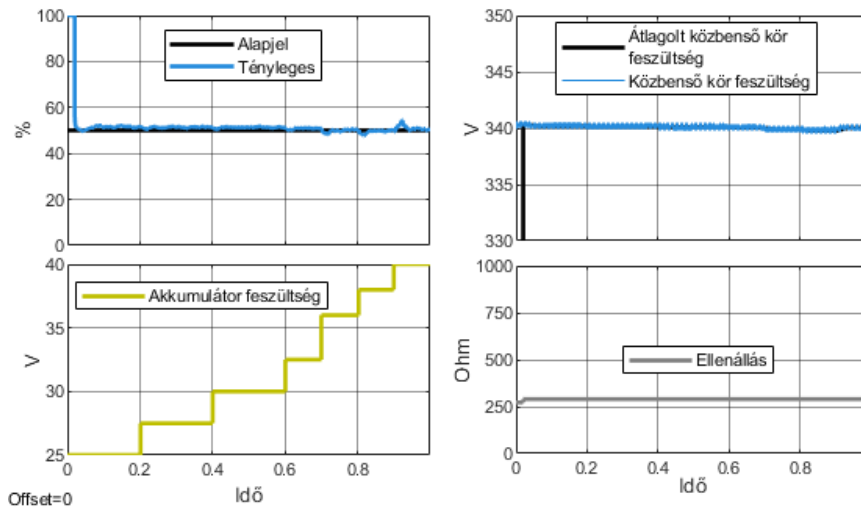
Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

### 3.4. A 3. szimuláció – akkumulátor feszültségének dinamikus változtatása

A cél annak bemutatása, hogy az akkumulátor feszültségének dinamikus változtatása milyen zavarokat okoz a tényleges zöldáram-hányadosban és a közbenső kör feszültségében, miközben a terhelés állandó. A 3. szimuláció eredménye azt mutatja

a 9. ábrán, hogy az akkumulátor feszültségének dinamikus változása elhanyagolható mértékben zavarja a közbenső kör feszültségét és a zöldáram-hányadost.

9. ábra: Az akkumulátor feszültségének dinamikus változtatásának hatása

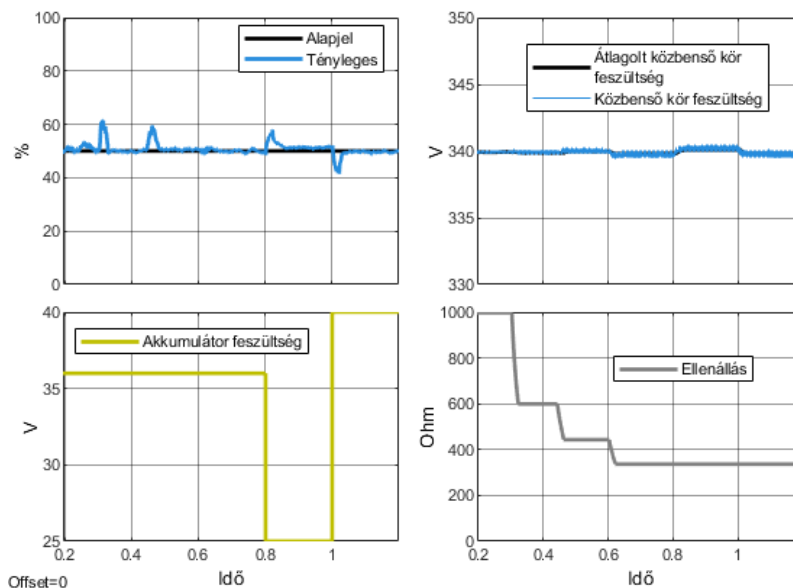


Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

### 3.5. A 4. szimuláció – terhelés és akkumulátor feszültség változtatás

A szimuláció kimutatja, hogy a terhelés és az akkumulátor feszültség változtatásával hogyan változik a tényleges zöldáram-hányados és a közbenső kör feszültség. A 10. ábrán a 4. szimuláció eredménye látható, ahol a terhelés és az akkumulátor feszültsége is dinamikusan változik.

10. ábra: A terhelés és az akkumulátor feszültség változtatásának hatása



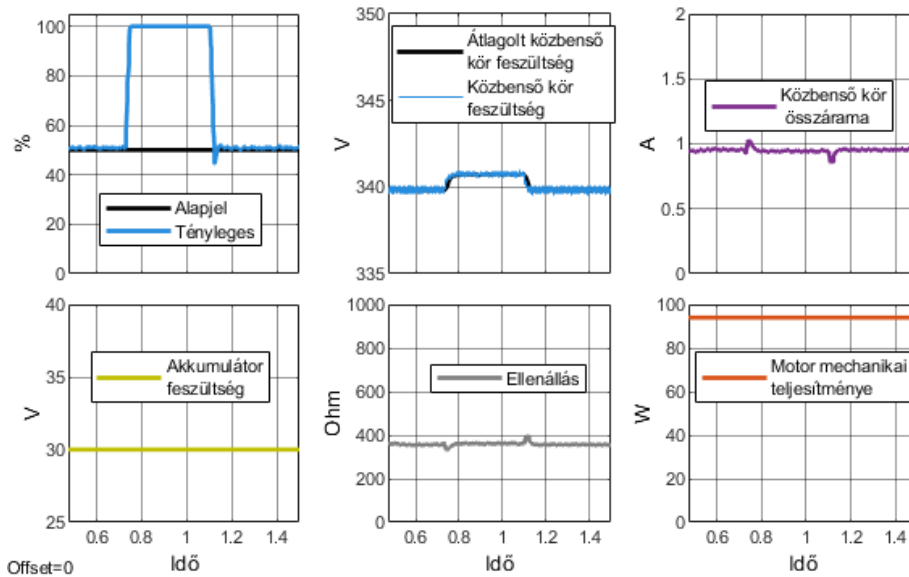
Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

A terhelés növelése során látható, hogy az ellenállás értéke véges meredekséggel csökken, ez a lineáris középértéket képző algoritmusból ered, amely 50 Hz-re átlagol. Ennek alkalmazása kulcsfontosságú, hiszen csökkenti az oszcillációkat a szabályozás során, azonban rövid idejű túllövést okoz a zöldáram-hányados tényleges értékében. Továbbá hibát az LLC konverter P szabályozója is okoz.

### 3.6. A 5. szimuláció – áramszünet hatása

Célja kimutatni, hogy áramszünet létrejöttkor és hálózat helyreállása esetén hogyan változik meg a közbenső egyenáramú kör feszültsége és árama, valamint a motor mechanikai teljesítménye, miközben a terhelés és akkumulátorfeszültség konstans. A legkritikusabb üzemállapotok áramszünetkor és hálózat helyreálláskor jönnek létre, ennek hatását vizsgálja az 5. szimuláció, amelynek eredménye a 11. ábrán tekinthető meg. Amikor áramszünet jön létre, a zöldáram-hányados következképpen 100% értéket vesz fel, mert csak az LLC konverter látja el a fogyasztókat. Ekkor a közbenső kör feszültsége kissé megemelkedik, majd, amikor a hálózati feszültség helyreáll, ismét visszatér az eredeti stabil állapotába. A két esemény során minimális zavar jelenik meg közbenső kör feszültségében, így az áramban is. A motor mechanikai teljesítménye nem változott meg.

11. ábra: Az áramszünet és a hálózat helyreállítás hatása



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

## 4. Összegzés

Összességében a szimulációs eredmények igazolják, hogy a neurális háló intelligenciája hatékonyan képes megvalósítani a dinamikus teljesítménymegosztást a hibrid napelemes szünetmentes rendszerben. Eközben biztosítja a közbenső egyenáramú kör konstans feszültségét, lehetővé téve a fogyasztók zavartalan működését a bemeneti paraméterek bármilyen változása esetén. A neurális háló

megfelelően képes működni az ismeretlen bemeneti értékek esetén is, ez is igazolja a helyes tanítási módszert és az identifikátor helyes működését. A neurális hálóval implementált centrális szabályozási topológia robusztus szabályozást tesz lehetővé az elosztott termelők között, így a bonyolult hangolási műveletek elhanyagolhatók a rendszer telepítése során. Az identifikáció folyamata automatikusan zajlik, a mérnök feladata pedig csupán a neurális háló betanítása a rendelkezésre álló adatok alapján.

A szimulációk alapján az ANN-alapú szabályozás a teljesítménymegosztást 1% hibán belül tartja, miközben a közbenső feszültség stabilizálása  $\pm 2$  V-on belül maradt különböző zavarok esetén.

A kifejlesztett intelligens szabályozási stratégia beépíthető ipari hibrid UPS rendszerekbe, különösen olyan helyeken, ahol a hálózati áramkimaradások gyakoriak, és nagy jelentősége van az energiahatékonyságnak. A módszer bevezetése minimális kézi hangolást igényel, így ideális lehet okos épületek vagy kisüzemi automatizált rendszerek számára.

A módszer jelenleg csak előre rögzített paramétertartományokra lett betanítva, így a működési határokon túl csökkenhet a pontosság. A jövőben a rendszer valós idejű újratanítása, vagy adaptív szabályozás beépítése lehet a továbbfejlesztés iránya.

## Köszönetnyilvánítás

A kulturális és innovációs minisztérium egyetemi kutatói ösztöndíj programjának a nemzeti kutatási, fejlesztési és Innovációs alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

## Irodalomjegyzék

- Abdolrasol, M. G. M., Hannan, M. A., Suhail Hussain, S. M., Ustun, T. S., Sarker, M. R., Ker, P. J. (2021): Energy Management Scheduling for Microgrids in the Virtual Power Plant System Using Artificial Neural Networks. *Energies*, 14(20): 6507. <https://doi.org/10.3390/EN14206507>
- Alatshan, M. S., Alhamrouni, I., Sutikno, T., Jusoh, A. (2020): Improvement of the performance of STATCOM in terms of voltage profile using ANN controller. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 11 (4): 1966–1978. <https://doi.org/10.11591/IJPEDS.V11.I4.PP1966-1978>
- Amer, R. A., Morsy, G. A., Yassin, H. A. (2011): ANN Controller for STATCOM to Enhance Performance of Multi-Machine Power System Including SCG. *ERJ. Engineering Research Journal*, 34 (4): 345–351. <https://doi.org/10.21608/ERJM.2011.67289>
- Bogdanov, D., Ram, M., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, A., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfán, J., De Souza Noel Simas Barbosa, L., Fasihi, M., Khalili, S., Traber, T., Breyer, C. (2021): Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120467>
- Boros, R. R., Jobbágy, M., Bodnár, I. (2025): Optimized Real-Time Energy Management and Neural Network-Based Control for Photovoltaic-Integrated Hybrid Uninterruptible Power Supply Systems. *Energies*, 18 (6). <https://doi.org/10.3390/en18061321>
- Bunker, K. J., Weaver, W. W. (2017): Multidimensional droop control for wind resources in dc microgrids. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11 (3): 657–664. <https://doi.org/10.1049/IET-GTD.2016.0447>
- Eskandari, M., Li, L., Moradi, M. H., Wang, F., Blaabjerg, F. (2020): A Control System for Stable Operation of Autonomous Networked Microgrids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35 (4): 1633–1647. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2948913>

- Gorijeevaram Reddy, P. K., Dasarathan, S., Krishnasamy, V. (2021): Investigation of Adaptive Droop Control Applied to Low-Voltage DC Microgrid. *Energies*, 14 (17): 5356. <https://doi.org/10.3390/EN14175356>
- Imran, R. M., Wang, S., Flaih, F. M. F. (2019): DQ-Voltage Droop Control and Robust Secondary Restoration with Eligibility to Operate during Communication Failure in Autonomous Microgrid. *IEEE Access*, 7: 6353–6361. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2889806>
- Joshi, Y., Kumar Maherchandani, J., Raj Joshi, R., Kumar Yadav, V. (2021): Intelligent Control Strategy to Enhance Power Smoothing of Renewable based Microgrid with Hybrid Energy Storage. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 12 (8): 3090–3100. <https://turcomat.org/index.php/turkbilmate/article/view/4148>
- Kim, D., Park, J. W., Lee, S. H. (2021): A Study on the Power Reserve of Distributed Generators Based on Power Sensitivity Analysis in a Large-Scale Power System. *Electronics*, 10 (7): 769. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS10070769>
- Ko, J. H., Choi, T. S., Ryu, J. C., Lee, H. W., Lee, J. H., Chae, H. M., Jeon, S. G., Kim, J. E. (2019): A Novel Design of UPS with Useful Customer Load Management Function. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 14 (2): 569–579. <https://doi.org/10.1007/S42835-018-00060-2/METRICS>
- Liutak, O., Baula, O., Kutsenko, V., Ivantsov, S. (2023): Energy Transformation in the Global Paradigm of Sustainable Development. *Actual Problems of Economics*. 69–76. <https://doi.org/10.32752/1993-6788-2023-1-264-69-76>
- Oh, J. H., Lee, J. H., Ryu, J. C., Lee, H. W., Chae, H. M., Kim, J. E. (2019): Operation Method for Hybrid UPS with Energy Storage System Function. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 14 (5): 1871–1880. <https://doi.org/10.1007/S42835-019-00228-4/METRICS>
- Pozo Jr., F. E. del, Bawagan, A. V., Ceruma, D. R. J. (2022): Development of Power Back-Up System using Motor Control for Large Equipment. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 9 (8): 316–324. <https://doi.org/10.22161/IJAERS.98.35>
- Wang, Y., Qiu, F., Liu, G., Lei, M., Yang, C., Wang, C. (2023): Adaptive Reference Power Based Voltage Droop Control for VSC-MTDC Systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 11 (1): 381–388. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000307>
- Wei, B., Marzabal, A., Ruiz, R., Guerrero, J. M., Vasquez, J. C. (2019): DAVIC: A New Distributed Adaptive Virtual Impedance Control for Parallel-Connected Voltage Source Inverters in Modular UPS System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34 (6): 5953–5968. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2869870>
- Yang, D., Wang, J., Cai, H., Rao, J., Cui, C. (2025): Intelligent control strategy for electrified pressure-swing distillation processes using artificial neural networks-based composition controllers. *Separation and Purification Technology*, 360: 130991. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130991>