

Magyar Tudomány

A Magyar Tudományos Akadémia folyóirata. Alapítva: 1840

KEZDŐLAP ARCHÍVUM IMPRESSZUM KERESÉS

» MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁSOK KOMPLEX INTEGRÁCIÓJA KISFESZÜLTSGŰ NEMLINEÁRIS HÁLÓZATOKBAN

Görbe Péter

tanszéki mérnök, Pannon Egyetem Villamosmérnöki és Információs Rendszerek Tanszék
gorbe.peter(kukac)virt.uni-pannon.hu

Magyar Attila

egyetemi docens, Pannon Egyetem • magyar.attila@virt.uni-pannon.hu

Hangos Katalin

egyetemi tanár, Pannon Egyetem • hangos.katalin(kukac)virt.uni-pannon.hu

A fukushimai nukleáris baleset óta az EU radikálisan megváltoztatta eddigi energiapolitikáját, ennek következtében sok atomerőműnek felfüggesztették a működését, és sok erőmű fejezi be működését a következő években. Ezek a változások radikálisan átrendezik az energiatermelési struktúrát a közeljövőben: a nukleáris energiatermelés jelentős csökkentése vagy leállítása miatt kieső termelőképességet minél nagyobb részben megújuló energiaforrásokból kívánják fedezni, elsődlegesen szél- és napenergia-hasznosítás – szélgenerátorok, illetve napelemek révén. A cél eléréséhez viszont nem elegendő nagykapacitású központosított erőművek létesítése, ezért jelentős szerep jut a jövőben nagy számban megjelenő háztartási (1–5 kW teljesítményű) kiserőműveknek is. A megújuló energiaforrások előre nehezen tervezhető jellege nagymértékben megnehezíti az így megtermelt villamos teljesítmény integrálását a jelenlegi villamos teherelosztó rendszerbe, ha a megújuló forrásból termelt energia eléri vagy meghaladja a teljes termelés 10%-át (Battaglini et al., 2009). A háztartási kiserőművek integrálása egy európai szintű intelligens hálózatba (smart grid) azonban ígéretes lehetőségnek tűnik (Purvins et al., 2011). Másrészt a jelentősen emelkedő olajárak és a klímaváltozás lassítása érdekében kitűzött CO₂-kibocsátáscsökkentés jelentősen érinti a közlekedési infrastruktúrát is. A lehetséges járműhajtási alternatívák között egyre gyakrabban

különböző terhelések elemeit: tisztán olajterhelés, ami a hagyományos izzókat fűtőszálakat, és az aktív teljesítményt javítással ellátott berendezéseket, induktív olajterhelés, ami a kisteljesítményű egyfázisú motorokkal ellátott terheléseket (mosógép, fűnyíró, porszívó stb.), kapacitív nemlineáris terhelés, ami az egyszerű nemlineáris kapcsolóüzemű terheléseket reprezentálja.

3.2 Villamosjármű-akkumulátor hőmérséklet-függés modellje • Alapvető cél az akkumulátor hőmérsékletfüggés figyelembe vételével (Göllei et al., 2012). A hőmérsékletfüggés különösen fontos elektromos autókban alkalmazható akkumulátoroknál, mivel széles hőmérséklet-tartományban üzemeltetik őket.

Az akkumulátorfeszültség, a töltöttségi állapot, a környezeti hőmérséklet közötti összefüggés polinomiális függvényekkel közelíthető. Mivel a polinomiális összefüggés mögött nincs jelentős, a modell adott fokszámú beállításával segítségével alkalmazható bármilyen elektromos (lineáris és nemlineáris) energiaterhelésre is. A kapcsolófeszültség 95% konfidenciaszint melletti polinomiális közelítő 2. ábra mutatja. Az akkumulátor hőmérsékletváltozása és a töltés, illetve a környezeti hőmérséklet közötti összefüggés negyedfokú polinomiális függvényekkel közelíthető. A közelítésnek természetesen a fizikailag értelmezhető környezeti hőmérséklet-, illetve töltéstartományok

merül fel a teljesen elektromos hajtású járművek (EV) elterjedése, aminek elsődleges akadálya a lítium-ion (Li) akkumulátorok jelentős tömege és ára, valamint még nem teljesen megoldott a lemerült akkumulátorok gyorsított töltése. További probléma a szélsőséges időjárási viszonyoknak (-30C° – $+80\text{C}^{\circ}$) kitett akkumulátorok pillanatnyi kapacitásának és az adott hőmérsékleten még hasznosítható tárolt töltésének meghatározása. Az elektromos járművek elterjedésével szükség lesz hőmérsékletfüggő gyorsított töltési módszerekre, melyek hőmérsékletfüggő akkumulátormodelleket igényelnének, mivel a töltési, kisütési és kapacitást megadó paraméterek erősen függnak a cellák hőmérsékletétől (Bandhauer et al., 2011; Gölle et al., 2012; Johnson et al., 2000), ezért korrekciós jellemzésükhöz a hőmérsékletet is figyelembe kell venni.

A fotovoltaikus panelek és szélgenerátorok optimális munkapontban történő üzemeltetését a költséghatékonyság és a csökkenő megtérülési idő, míg a költséges Li-akkumulátorok optimális működtetését az élettartamuk meghosszabbításának igénye teszi szükségessé. Szerencsére a két szabályozási feladat (a megújuló energiát villamos energiává alakító kiserőművek optimális üzemeltetése, és a Li-akkumulátorok optimális töltő/kisütő áramának pontos szabályozása) együttesen is kezelhető (Görbe et al., 2012).

A háztartási kiserőmű által megtermelt, de el nem fogyasztott villamos energia a transzformátorkörzet egyéb fogyasztói által felhasználásra kerül, illetve ha erre nincs igény, a transzformátoron keresztül bekerülhet a középvezetékű, esetlegesen a nagyfeszültségű villamos hálózatba is. A kiserőművek csatlakoztatására felépített szinkronüzemű inverterek alkalmasak lehetnek a kisfeszültségű hálózat kondicionálására, azaz üzemi paramétereinek (veszteség, teljesítménytényező, teljes harmonikus torzítás) javítására is. Fontos, hogy ez a kondicionálás az egyszerű hálózati betápláláshoz képest nem igényel költséges elemeket, csupán csak az inverter szabályozási struktúrájának szoftveres átalakítását.

1. Háttér és motiváció

A megújuló energiaforrások hatékony felhasználásának kritikus feltétele az időben

van értelme. A modell validálása a működési körülményekkel teljesen egyező szimulációs példakörnyezetben történt.

3.3 Szimulációs eredmények • Első lépésben a modell ellenőrzésére került sor, a maximális teljesítmény-szabályozó és a közbensőköri feszültség-szabályozó működés tesztelése céljából. A kapott eredmények későbbi szimulációk összehasonlítására referenciaként kerültek felhasználásra.

Következő lépés az inverternek az előszimulált hálózathoz való csatlakoztatása akkumulátortöltő alapjelét nullára állítva a felharmonikus szabályozót kikapcsolva a rendszer gyakorlatilag egy egyszerű hátszinkronüzemű háztartási kiserőműként működött. A feszültség esetén jelentős eltérést a referenciához képest nem nagyon tapasztalt az inverter szintén kapcsoló üzemű működtetése a jelalak kismértékű zajosodását eredményezett. Az áram természetesen jelentősen változott, az inverter áramot táplál vissza a hálózatba.

A bekapcsolt felharmonikus szabályozó futtatott szimuláció végeredményeképpen a táplálási jelalakok sokkal inkább szinuszos jellegűek, a felharmonikus szabályozó nélküli szimuláció esetén (Görbe et al., 2012).

A szimuláció során a felharmonikus szabályozó működése az idő- és a frekvenciatartományokban nyomon követhető, ahogy az adaptívgrac szabályozó az időszelvényekben adott sorrendben változtatja a komponensek amplitúdó-fázisértékeit (3., 5., 7., 9. és 11. felharmonikus) valamint ez komoly hatással volt a hibafüggvényre és a csatlakozási ponton mért THD-ra (3. táblázat). Az eredményeket az 1. táblázat összesíti a felharmonikus szabályozó működtetésével a hálózati harmonikus torzítás 14,7%-ról 5,04%-ra csökkent, míg az alkalmazott hibafüggvény értéke V_2 -ről 3,87 V_2 -re csökkent. Az akkumulátortöltés/kisütés bekapcsolása a szimulációs eredményekre nem volt hatással.

4. Diskusszió

A bemutatott eredmények alapján az elkészített multifunkcionális szabályozó alkalmas az optimális irányítására a megújuló energiaforrás elektromos hajtású jármű akkumulátorok kisfeszültségű teherelosztó hálózatok kondicionálására. Alkalmazásával a villamosenergia-igény lokálisan

változó források maximális határfokú kihasználása mind technológiai, mind pedig gazdasági értelemben (Battaglini et al., 2009). Ehhez olyan intelligens energetikai rendszerek (smart grid) (Blumsack – Fernandez, 2012) szükségesek, amelyek befolyásolni tudják a pillanatnyi termelést, a pillanatnyi energiafelhasználást, valamint az energiatárolást is. A problémát elsősorban a jelentős kapacitású és gyorsan szabályozható energiatároló egységek jelentik, egyrészt a jelentős beruházási költség miatt, másrészt komplex jogi és környezetvédelmi problémákkal járnak (például a szivattyús-tárolós vízierőművek esetében), harmadrészt pedig sok esetben a földrajzi adottságok sem teszik lehetővé létesítésüket. Az elektromos járművek elterjedésével alternatív megoldásként jöhet szóba jelentős számú elektromos jármű csatlakoztatása a helyi hálózathoz, így tekintélyes és ugyanakkor gyorsan felhasználható tárolókapacitás lenne felhasználható (Purvins et al., 2011).

A jelenlegi kisméretű hálózatok okos hálózat, vagyis smart grid alapú megközelítésének egy másik jelentős feladata a villamos energia minőségének folyamatos felügyelete és szabályozása. A háztartásokban használt mobiltelefon-töltők, notebook-tápegységek, kis teljesítményű motorvezérlők, híradástechnikai berendezések és számítástechnikai hálózati berendezések száma folyamatosan növekszik, ezzel együtt a bennük alkalmazott kisméretű fogyasztású, egyszerű kapcsoló üzemű tápegységek száma is, ami káros hatással van a villamos energia minőségére. Ezek az egyszerű kapacitív bemeneti fokozatok jelentős magasabb rendű harmonikus komponenseket hoznak létre a hálózaton, ami az eredendően szinuszos feszültség jelalaktorzulásához vezet. A felharmonikus komponensek közül a 3. és az 5. felharmonikusok rendelkeznek jelentősebb amplitúdóval. Ezek a torzító felharmonikus komponensek nem kompenzálhatók egyszerű sőt kapacitásokkal (kompenzátorokkal), és több nemkívánatos hatást is okoznak a kisméretű hálózat működésében, melyek a hálózati veszteség növekedéséhez, és bizonyos amplitúdóarány felett a hálózat hibás működéséhez is vezethetnek.

A feszültség torzulásának mérőszáma a teljes harmonikus torzítás (THD), ami a

szabályozott formában előállítható, illetve rendszer alkalmas a villamos energia minőségének javítására is. Ezen felül segítségével villamosenergia-megtakarítást, illetve a villamos energia egy részét vagy egészét fosszilis energiából állítjuk CO₂-kibocsátáscsökkenést is elérhetünk. elosztott energiatermelésből a veszteségcsökkenés az elosztó rendszerben transzformátor veszteségének megtakarítását, valamint a nagyfeszültségű és középfeszültségű távvezetékek veszteségi teljesítmény megtakarítását jelenti, mivel energiaszükségletet lokálisan a kisméretű transzformátorkörzeten belül állítjuk elő a fogyasztók számára. Magyarországon transzformátorok és a teherrel vezetőrendszer vesztesége 2008-ban az statisztikai adatszolgáltatása alapján 9,7% tehető, ami azt jelenti, hogy a teljesen elosztott termeléssel elérhető maximum veszteségcsökkenés 9,7%. Konkretebben becsléssel 5%-os megtakarítást vehetünk figyelembe. A kialakított szabályozó jelentősen csökkenti a hálózati feszültség teljes harmonikus torzítását, ami a fogyasztók összegzett áram teljes harmonikus torzítására is hatással van. Feltételezhető, hogy a fogyasztók együttes hatására a szabályozó felharmonikus áram betáplálása összegezve közel ideális, tisztán impedanciájú ohmos fogyasztóvá összegződik, így a feszültség és az áram teljes harmonikus torzítása jó közelítéssel megegyezik (Görbe et al., 2012).

A módszer alkalmazásával létrejövő harmonikus torzítás-csökkenés miatt a fázisveszteségi teljesítménye 1,75%-kal, a nullfeszültségű veszteségi teljesítménye 5,75%-kal (Görbe et al., 2012) csökkent az ideális szinuszos veszteségi teljesítményéhez képest. Az áramvezetékveszteségi teljesítményt 4%-kal figyelmeztetve az átlagos háztartás veszteségi teljesítményének csökkenése mintegy 0,3 teljes villamos energiafogyasztást tekintve eredmény eléréséhez nem szükséges a teljes beruházás, elegendő a meglévő komplex intelligens szabályozó szoftverének módosítása, az átlagos felharmonikus szabályozó implementálása. átlagos háztartás éves fogyasztását 3000 KW számolva 9 KWh veszteségcsökkenés érhető el THD-csökkentéssel, és mintegy 150

következésképpen definiálható:

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\infty} (|U_k|^2)}{|U_1|^2}}$$

ahol U_1 a feszültség alapharmonikus komponensének effektív értéke, és U_n a feszültség n -edik magasabb rendű harmonikus komponensének effektív értéke. Az esetünkben vizsgált kapacitív bemeneti fokozatú alkalmazásokban $\text{THD} > 0$ a jellemző. Ez a torzítás már jelenleg is kimutathatóan jelen van a kisfeszültségű hálózatokban, és a kisfogyasztású kapcsoló üzemű háztartási tápegységek számának emelkedésével (kompakt fénycsövek, LED-világítás stb.) folyamatosan növekszik. A nemlineáris torzított (nem szinuszos) feszültség és áram időfüggvényekkel rendelkező kisfeszültségű hálózatokban korábban is alkalmaztak aktív teljesítményszűrőket a hálózatban jelen levő áram felharmonikusok csökkentésére (Limongi et al., 2009).

2. Teljes szabályozási struktúra

A korábban felvázolt egységes szabályozási cél megvalósítása egy összetett szabályozási struktúrával érhető el, ami egyszerre alkalmas a kisfeszültségű nemlineáris hálózatban tapasztalt feszültségtorzítás csökkentésére a beinjektált felharmonikus áramkomponensek meghatározásával, a hálózatba beinjektált áram szabályozására, az akkumulátor töltő és kisütő áramának szabályozására, a közbenső köri pufferkapacitás feszültségének tartására és a hálózatbarát működési mód keretében a csatlakozási pont feszültsége effektív értékének szabályozására (1. ábra).

2.1 Maximálisteljesítmény-szabályozó • Célja az adott időpillanatban rendelkezésre álló megújuló energia költséghatékony kinyerése a beruházás megtérülési idejének csökkentése érdekében.

2.2 Felharmonikus szabályozó • A komplex szabályozási struktúra legfontosabb eleme. Az irodalomban fellelhető megoldásokkal ellentétben a torzított áram időfüggvénymérése nem alkalmazható, mivel a háztartási kiserőmű

veszteségcsökkenés érhető el az előtermelés következményeként. Figyelembe véve fosszilis energiaforrások felhasználási arányát magyarországi viszonyok között (szén 17,3%, 38,3%), illetve a használatukkal CO₂-kibocsátást (1000 g/kWh szén, 430 g gáz esetén), akkor egy átlagos háztartás esetében nemlineáris torzítás csökkentésével 4376 g/€ elosztott termelés eredményeképpen pedig 000 g/év CO₂-kibocsátáscsökkenés érhető el.

Konklúzió

A kutatás során készült egy hőmérsékletfüggő akkumulátormodell, amelynek paraméterei adatok alapján kerültek meghatározásra. A modell kialakításához alkalmazott mérési és szimulációs környezet általános, bármilyen más villamos energiaforrás hőmérsékletfüggő modell felépítésére alkalmazható. A modell validálása egy komplex energetikai rendszer modelljével történt, szimuláció segítségével történt. A modell paraméterek illeszkednek az irodalomban található fizikai és kémiai alapú modell eredményeihez.

További jelentős eredményként egy – a megújuló energiaforrást felhasználó háztartási kiserőmű akkumulátortöltő integrációjával felépülő rendszermodell is elkészült. A nagy központi erőművek alkalmazása helyett elosztott háztartási kiserőművek alkalmazásával csökkenthető villamos energiarendszer szállítási veszteség, szabályozó alkalmas a megújuló energiaforrás kinyerhető maximális teljesítmény kinyeréséhez a hálózat teljesítményegyensúlyának fenntartásában. Időben változó megújuló energiaforrások esetén az EV-akkumulátorok feltöltésére tiszta megújuló energiával, aktív teljesítménytérkompenzálására és a harmonikus torzítás kompenzálására. A komplex szabályozási szimulációs vizsgálata alapján jelentős javulás érhető el a kisfeszültségű transzformátorok feszültség- és áramjelalakjaiban, ami a jelentős csökkentésének volt köszönhető. Ennek az energiaáramlás irányának szabályozására szabályozó képes fenntartani a kisfeszültségű hálózat egyensúlyát és a feszültség stabilitását. A jelen kutatás során elért harmonikustorzítás-csökkentés megközelíti az irodalomban található értékeket, annak ellenére, hogy a mérési pontban áram-idő függvé-

jellemző módon a fogyasztásmérési pont után csatlakozik a kisfeszültségű hálózatra. Így a kompenzálni kívánt áram mérése csak külső árammérő eszköz csatlakoztatásával lenne megoldható, ami jelentősen megnövelné a telepítési költségeket. Másrészt a kompenzálni kívánt áram mérésénél nemcsak az adott háztartáson, hiszen a felharmonikus szabályozó nemcsak az adott háztartás által hozzáadott nemlineáris torzítást, hanem a kisfeszültségű transzformátorkörzet adott fázisvezetőjén lévő egyéb torzító nemlineáris háztartási és ipari fogyasztók által létrehozott felharmonikus áramkomponenseket is kompenzálja. A szabályozó a csatlakozási ponton mérhető feszültséget vizsgálja a frekvenciatartományban, és a felharmonikus komponensek amplitúdójából képez egy – a torzítást jellemző – kvadratikus hibafüggvényt, ami szigorúan monoton összefüggésben van a harmonikus torzítással. A felharmonikus szabályozó működése során adaptív (változó lépésközű) gradiens módszert használ.

2.3 Töltésvezérlő • Feladata a Li-akkumulátor adott értékű töltő/kisütő áramának szabályozása.

2.4 Közbensőköri feszültségszabályozó • A közbensőköri feszültségszabályozó felügyeli az inverter belső pufferkapacitásának feszültségét, és azt az előre beállított referenciaértéken (600 V) tartja.

2.5 Effektív feszültségszabályozó • Az áramminőség javításának érdekében a jelen rendszer smart grid és külső villamos irányító rendszer hiányában is lehetőséget ad a hálózat termelés/fogyasztás egyensúlyának fenntartására időben változó források és fogyasztók esetében is. Mivel a hálózat egészének fogyasztási/termelési viszonyairól így nincs információ, az áramminőség javításánál a kisfeszültségű transzformátorkörzet fogyasztási egyensúlyával foglalkozik. A transzformátor alul-, illetve túlterheléséről a beépítési pontban a feszültség effektív értékének mérésével tájékozódik. Alapjele a hálózati feszültség effektív értékének szabványos értéke (230 V).

3. Modellézés és szimuláció

A nemlineáris torzított hálózat modellje Matlab Simulink környezetben került implementálásra az 1. ábra irányítástechnikai struktúrájának megfelelően.

szabályozó működtetésénél nemcsak az adott háztartáson, hanem a teljes transzformátorkörzet áramminőségét javítja, és ezzel a villamos veszteségi teljesítményt és áttételes CO₂-kibocsátást is csökkenti. Az energiamegtakarítás és az emissziócsökkentés számításánál a magyar villamosenergia-hálózati statisztikai adatai felhasználásra elosztott energiatermelésből származó energiamegtakarítás egy átlagos magyar háztartás esetén elérheti az 5%-ot, ami 73 g/év CO₂-kibocsátáscsökkenésnek felel meg. A THD-kompenzációból származó energiamegtakarítás 0,3%, míg a teljes CO₂-kibocsátáscsökkenés 476 g/év.

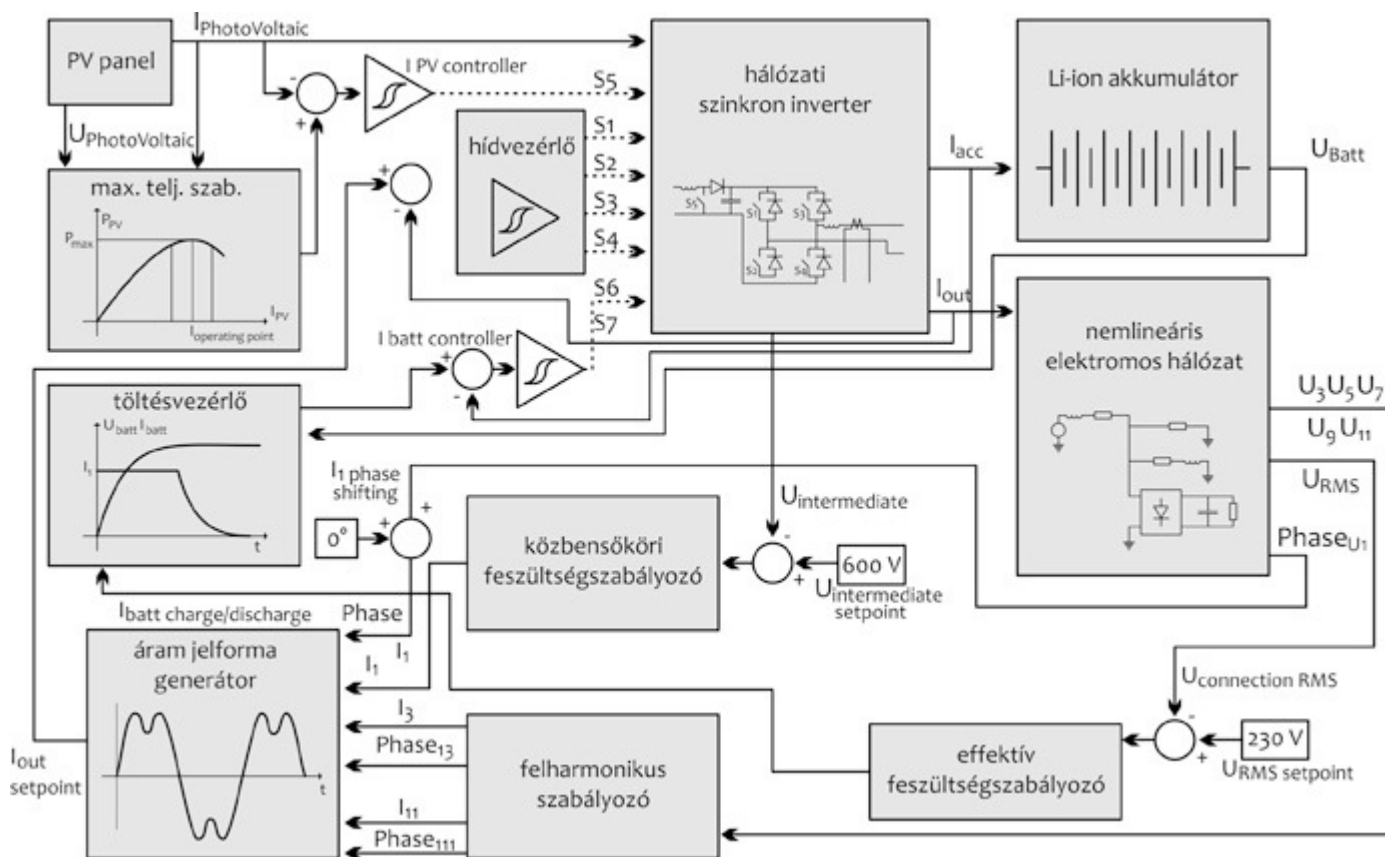
Kulcsszavak: megújuló energiaforrások, hálózat integráció, villamos hálózat, teljes harmonikus torzítás, optimális szabályozás, elektromos jármű akkumulátor, modellezés, energiatarolás

IRODALOM

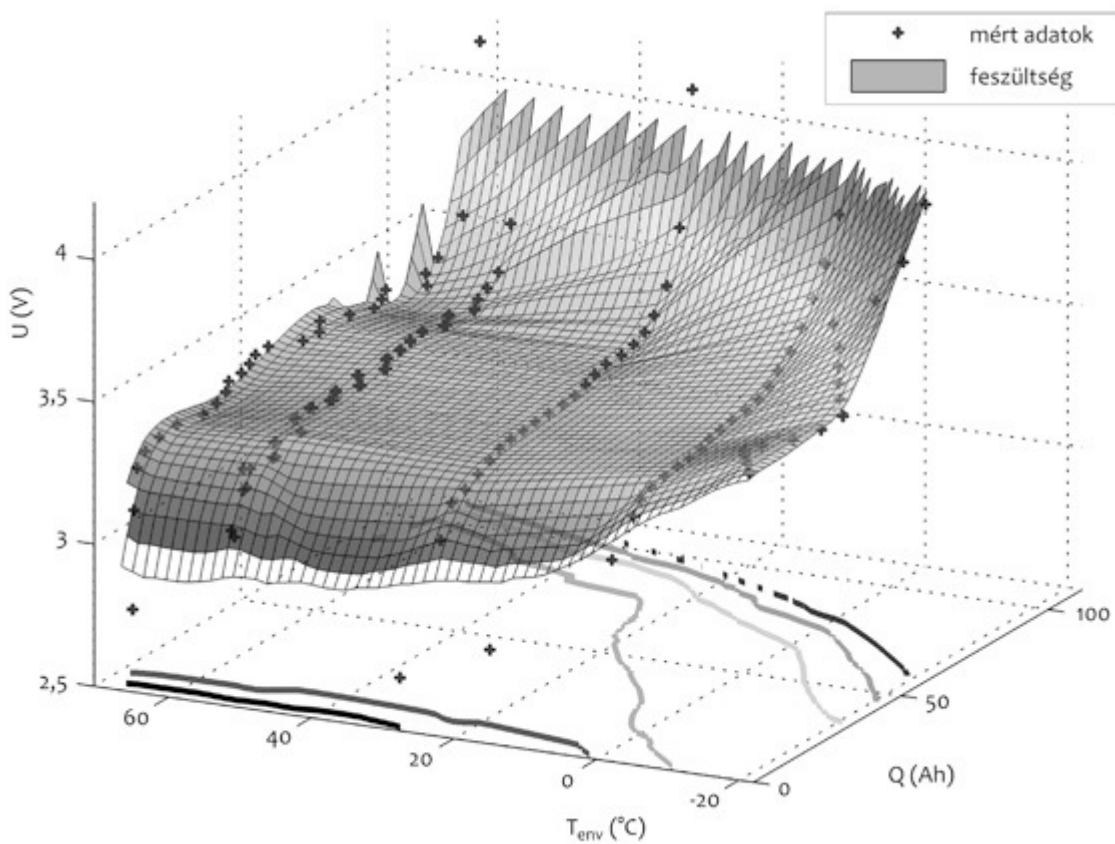
- Bandhauer, T. M. – Garimella, S. – Fuller, T. F. (2012): Critical Review of Thermal Issues in Li-Ion. *Journal of Electrochemical Society*. 158, 3, R1–R25.
- Battaglini, A. – Lilliestam, J. – Haas, A. – Patt, A. (2012): Development of SuperSmart Grids for a More Efficient Utilisation of Electricity from Renewable Sources. *Journal of Cleaner Production*. 17, 911–918.
- Blumsack, S. – Fernandez, A. (2012): Ready or Not Comes the Smart Grid! *Energy*. 37, 61–68.
- Göllei A. – Görbe P. – Magyar A. (2012): Model-based Optimization of Electrical Vehicle Batteries in Clean Energy Systems. *Journal of Cleaner Production*. in print
- Görbe P. – Magyar A. – Hangos K. M. (2012): Reduction of Power Losses with Smart Grids Fuelled by Renewable Sources and Applying EV Batteries. *Journal of Cleaner Production*. in print.
- Johnson, V. – Pesaran, A. – Sack, T. (2012): Temperature-Dependent Battery Models for High-Power Li-Ion Batteries. NREL, Montreal, Canada
- Limongi, L. – Bojoi, R. – Griva, G. – Tenconi, A. (2012): Comparing the Performance of Digital Signal Processing. *Industrial Electronics Magazine*, 3,1, 20–31.
- Purvins, A. et al. (2011): A European Supergrid for Renewable Energy: Local Impacts and Far-reaching

3.1 Nemlineáris hálózat modellje • A nemlineáris hálózat modellje tartalmazza a transzformátor és a továbbító villamos vezetékek modellje mellett a

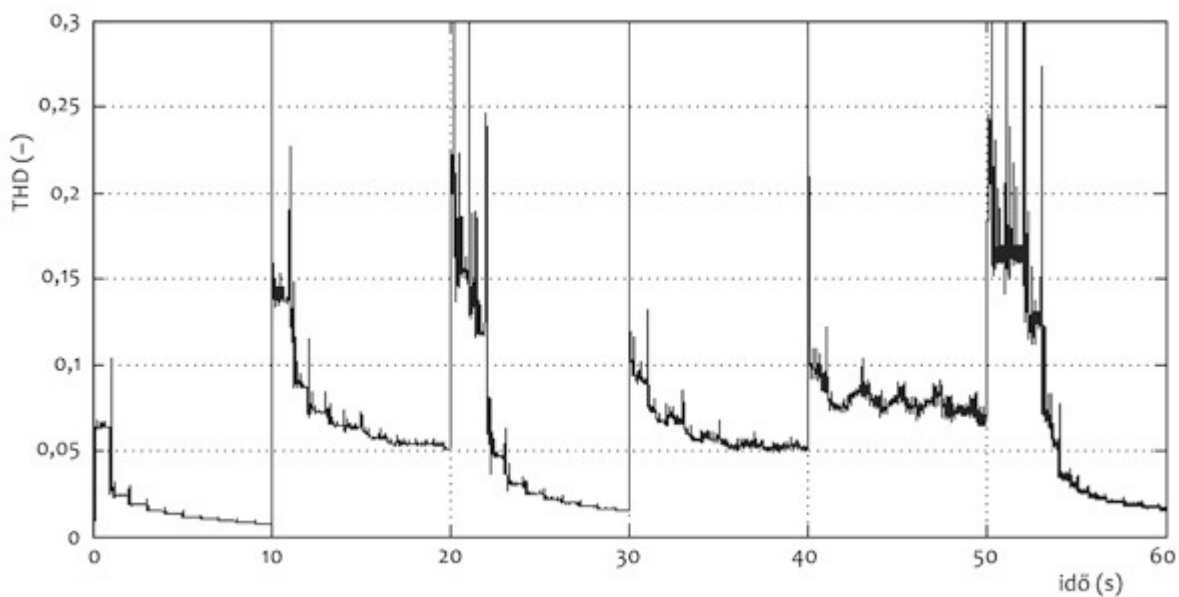
Challenges. Journal of Cleaner Production. 1909–1916.



1. ábra • A teljes szabályozási struktúra <



2. ábra • Akkumulátor kapocsfeszültsége a töltöttségi szint és a környezeti hőmérséklet függvényében <



3. ábra • A teljes harmonikus torzítás (THD) értéke a szabályozóalgorithmus működése közben <

üzemmód	IRMS	hiba	THD
inverter ki	n. a.	39,63 V ²	14,26%
felharmonikus szabályozó ki	11,58 A	47,03 V ²	14,75%
felharmonikus szabályozó be	5,65 A	3,87 V ²	5,04%

1. táblázat • Futtatási eredmények – felharmonikus szabályozó hatása <
