

dc\_2030\_22

# Komplex Nemlineáris Energetikai Rendszerek Optimalizáció Alapú Analízise és Működtetése

MTA Doktora értekezés tézisei

*Magyar Attila*

Villamosmérnöki és Információs Rendszerek Tanszék,  
Pannon Egyetem  
Veszprém  
2022

# 1. Háttér és motiváció

Részben a kibontakozó klímaválság miatti fosszilis energiaforrások csökkenése, részben a fukusimai atomkatasztrófa miatt az Európai Unió az elmúlt évtizedben megváltoztatta villamosenergia-termelési stratégiáját. Sok atomerőmű leállította a termelést. Ezek a változások nagymértékben megváltoztatták Európa-szerte az energiatermelés szerkezetét. A kieső energiatermelés jelentős részét a tervek szerint tisztán előállított megújuló energiaforrásokkal, elsősorban szél- és naperőművekkel pótolják[28]. Az ezekből az energiaforrásokból származó bemeneti teljesítmény nagy ingadozása azonban megnehezíti a rendszer integrálását a nagyobb és meglévő elektromos hálózatokba [1].

Az elmúlt évtizedekben több ország megváltoztatta az áramellátást szabályozó törvényeit, hogy lehetővé tegye a hálózatra kapcsolt inverteres rendszerek számára, hogy tartalék energiát biztosítsanak a helyi kifesztésű elektromos hálózatoknak. Ezt a teljesítményt helyileg hasznosítják, csökkentve az átvitel miatti elektromos teljesítményvesztéset. Ezen kívül a rácsos inverterek alkalmasak távvezetékek kondicionálására, pontos feszültségformák korrigálására, valamint a hálózati meddőteljesítmény javítására. Ez tovább csökkenti a veszteségeket, mivel a nemlineáris torzítás a hálózatban veszteséget okoz mind a fázisban, mind a nullavezetőben. Ez a kiegészítő funkció nem igényel költséges változtatásokat a meglévő technológián. Csak a szabályozási módszereket és a szabályozókat kell módosítani a vonal kondicionálásának lehetővé tétele érdekében. A vezérlőszoftver frissítésének költsége ebben a rendszerben elhanyagolható a berendezés cseréjének költségeihez képest.

A Földön a fenntartható életmód fontos eleme a háztartási szektor által elfogyasztott és megtermelt energia gazdaságos kezelése. A megújuló energiaforrások elterjedésével napjaink egyik legnagyobb technikai kihívása az energiatermelés és -felhasználás hatékony tervezése és irányítása. A fenntartható energiafogyasztás kihívásainak való megfelelés érdekében számos fejlesztés zajlik az intelligens hálózati technológiák zászlaja alatt. A fejlődést fontos befolyásoló tényező a villamosenergia-piac, amely folyamatosan bővül, és növekszik a rajta keresztül értékesített energia mennyisége.

A lítiumion-akkumulátorok nagy energiasűrűségük, alacsony önkisülésük és könnyű súlyuk miatt a mindennapi élet kedvelt energiaforrásai. A hordozható elektronikai eszközök (mobiltelefonok, laptopok), otthoni elektronikai cikkek, elektronikus szerszámok és elektromos járművek mind valamilyen lítiumion-akkumulátorral működnek. Az olyan alkalmazásokban, mint az elektromos járművek, az akkumulátorokat párhuzamosan és

sorosan csatlakoztatják az energiaigények kielégítése érdekében. Az akkumulátorcellák optimális teljesítményét és biztonságos működését az akkumulátorkezelő rendszer (BMS, Battery Management System) kezeli. A BMS másik lényeges szerepe a töltöttségi állapot (SOC) és az egészségi állapot (SOH) becslése. Az előbbi mennyiség az akkumulátorbank fennmaradó töltöttségéről (azaz az elektromos járművel megtehető hátralévő futásteljesítményről) tájékoztatja a vezetőt, míg az utóbbi a hátralévő töltések/kisülések számát. Csakúgy, mint bármely más akkumulátor, a lítiumion-akkumulátor teljesítménye sem állandó, hanem lassan romlik a működés során, és erősen függ a környezeti hőmérséklettől. Az akkumulátor állapota nem mérhető közvetlenül, ezért azt mérhető mennyiségek alapján kell megbecsülni.

A kvázi-polinomiális (QP) és a Lotka-Volterra modellek a nemlineáris rendszermodellek általánosan alkalmazható kanonikus formáinak egyik ígéretes jelöltjének bizonyultak, mivel a gyakorlatban előforduló sima nemlineáris rendszerek többsége ezekbe a formákba alakítható.

## 2. Irodalmi áttekintés

A szolgáltatói oldal megközelítései között szerepelnek az optimalizált árazási módszerek [15] az energiahálózat kiegyensúlyozására válaszul a kínálat változásaira (pl. a megújuló energiaforrások elérhetőségének változása miatt), valamint a változó energiafogyasztás kielégítésére. A napi árampiacon [29] optimalizált árképzés eredményeként az áramárak óráról órára [14] változhatnak. A [31] cikk szerzői az áralapú keresletre reagálva elemezték a mikrohálózatok hatását és lehetséges hozzájárulásukat a villamos energia kereslet és kínálat szabályozásához az óránkénti villamosenergia-piacon, és arra a következtetésre jutottak, hogy a hálózat hatékonysága és rugalmassága egyaránt javult. A [16] munka új keretet javasolt a decentralizált energiakoordinációhoz és -termeléshez, amely felhasználható az energiaszállítás és -áramlás ütemezésére. Ezeket a feladatokat mind energiafogyasztási, mind energiatermelési oldalról megvizsgálhatjuk, és a definiált problémára megfelelő okos megoldást lehet találni, majd a két eredmény összevonásával komplex energiagazdálkodás valósítható meg. A [32] szerzői egy olyan nyílt villamosenergia-hálózatot javasolnak, amely a főbb szereplők számára nyitott a kis léptékű tranzakciók tekintetében, és egy Lotka-Volterra alapú ökológiai modellt is javasolnak a befektető tulajdonában lévő közművek és a független áramtermelők piaci viselkedésének szimulálására.

Olyan alkalmazásokban, ahol a számítási bonyolultság (vagyis az idő) döntő fontosságú, pl. egy BMS-ben az helyettesítő áramköri modelleket

széles körben használják [27]. A [36] szerzői a nyitott áramköri feszültség-töltési állapot (OCV-SOC) jellemzésének vizsgálatával foglalkoznak különböző hőmérsékletek hatására. Az eredmények azt mutatják, hogy az OCV-SOC jelleggörbe nagymértékben függ a hőmérséklettől. A modell paraméterek és az SOC online becslési módszerét javasolja [6], elektromos járművekben, különböző hőmérsékleteken történő alkalmazásokhoz. Modelljük a vizsgált akkumulátor RC áramköri megfelelőjén alapul. A [25] kísérleti megközelítést alkalmaz az elektromos járművek akkumulátorainak elektrotermikus modelljének kifejlesztéséhez. Munkájuk alapja szintén az akkumulátor helyettesítő áramköri modellje. A [2] szerzői a hőmérséklet hatását vizsgálták kettős Kalman-szűrő alapú (állapot- és paraméterbecslés) módszerük teljesítményére.

A hálózatba történő egyfázisú árambefecskendezést főként fotovoltai-kus (PV) és szélenergiák valósítják meg. Számos tanulmány foglalkozik az energiahálózat tápellátásával, lásd például [3]. A [26] cikkben a szerző hangsúlyozza, hogy a napelemes rendszereket egyre gyakrabban alkalmazzák a világ minden táján, és ez az energiaminőségi problémák széles skálájának forrása. A teljesítménytényező-korrekciónak lehetőségével, amely a teljesítményinjektálás során előfordul, szintén foglalkozott [21],[4]. Az áram betáplálás és a nemlineáris torzításcsökkentés (harmonikus szabályozás) közötti kapcsolatot vizsgálta [18] és [19], ahol a szerzők DSP alapú áramszabályozási technikát alkalmaznak a torzítás csökkentésére aktív teljesítményszűrőkkel (APF) és a pontos nemlineáris terhelés kompenzálására.

Sok szerző foglalkozik a hálózat kiegyensúlyozatlanságának kiszámításával. A [24] egy kísérleti elosztóhálózaton alkalmazta a felharmonikus torzítást és a különböző terhelések által okozott kiegyensúlyozatlanságot, amely ugyanazon a közös csatolási ponton van. A [17] munka célja az volt, hogy felhívja a figyelmet arra a kétértelműsége, amely akkor jelentkezik, amikor egy adott feszültség-kiegyensúlyozatlanságra hivatkoznak, amely a rendszerben létezik. A feszültségkiegyensúlyozatlanság komplex jellegét kihasználva nagymértékben leszűkíthetőek azok a feszültségkombinációk, amelyek a komplex feszültségkiegyensúlyozatlansági tényező kiszámításához vezetnek. A [35] egy gyors és pontos algoritmust mutatott be az egyensúlyhiány kiszámítására.

A globális aszimptotikus stabilitás minden rendszerosztály nagyon fontos tulajdonsága. Bár a globális aszimptotikus stabilitás a lineáris időinvariáns rendszerek esetében könnyen ellenőrizhető, az általános nemlineáris rendszerek globális stabilitásának elemzése korántsem triviális, és csak speciális rendszerosztályokra kaphatunk eredményeket. Másrészt az

elektromos energiával kapcsolatos dinamikus rendszerek gyakran nemlineáris jellegűek, ami fontossá teszi az általános nemlineáris leíró modellek, például a kvázi-polinom rendszerosztály alkalmazását. A LV rendszerekkel kapcsolatos alapvető munkákat Lotka [22] és Volterra [34] javasolta, amelyek az LV formát egy populációbiológiai keretbe helyezték.

A 90-es évektől kezdve számos munka létezik a sima nemlinearitású általános nemlineáris rendszerek QP és LV modellekkel történő ábrázolásáról, pl. [11], [12] [13]. [12] létrehozta a QP rendszerek osztályának algebrai szerkezetét. Ezek ekvivalenciaosztályokra oszlanak, és minden ekvivalenciaosztályt egy Lotka-Volterra rendszer képvisel. A másik ág a Lotka-Volterra és a kvázipolinomiális rendszerek stabilitási tulajdonságával foglalkozik. Ezek lokális stabilitáselemzése megtalálható a [5]-ben, ahol a lokálisan linearizált rendszermátrixok közvetlenül meghatározhatók a QP vagy LV rendszer paramétermatrixaiból. Számos munka vizsgálja a Lotka-Volterra ragadozó-zsákmány modellek globális stabilitását, különösen periodikus megoldásokkal [30], [23]. Vannak azonban munkák a kvázipolinomiális rendszerek globális stabilitásával kapcsolatban is [10]. A fő gyengeségük az, hogy csak kicsi (3-4) dimenziós LV rendszerek kezelhetők ezekkel a módszerekkel. Stabilitáselemzésük érdekes numerikus módszerrel található a [7] dokumentumban. Másrészt a Lotka-Volterra modellek visszacsatolásvezérlésre való alkalmazása csak néhány cikkben jelenik meg [8] vagy [9], ahol a pozitív stabilizáló kontroll csak az LV egy részhalmazára javasolt. rendszerek.

Bár a Lotka-Volterra (LV) modellek eredetileg néhány, azonos élőhelyen élő faj dinamikus viselkedésének leírására alkották [22], azóta számos, a villamos energiával kapcsolatos témában is használják. A [20] cikk egy intelligens energiaállomás tervét javasolja, és a Lotka-Volterra modellt használja az energiaüzletág és az információs üzletág közötti interakciós mechanizmus elemzésére. Az eredmények azt mutatják, hogy a populációs ökoszisztémához hasonló, kölcsönösen előnyös szimbiózis kapcsolat van köztük. A [33] szerzői Lotka-Volterra modellt használva vizsgálták a fosszilis tüzelőanyagok nukleáris energiával történő helyettesítésének megvalósíthatóságát az Egyesült Államokban. A Ljapunov-függvények alkalmazásával és egyensúlyi elemzéssel bemutatták, hogy a fosszilis tüzelőanyagok fogyasztása hosszú távon a nukleáris energiafogyasztás tízszerese lesz.

### 3. Célok

A tudomány jelenlegi állásának rövid áttekintése alapján a dolgozatban bemutatott elvégzett munka céljai a következőkben foglalhatók össze:

1. **Modell alapú optimális módszerek villamos energetikai rendszerekre** A cél olyan szabályozási módszerek kidolgozása, amelyek lehetővé teszik az elektromos háztartási gépek egy osztályának költségoptimalis működését egy másnapi piaci környezetben. A modell-prediktív irányításelmélet megközelítését használva kívánom megadni folyamatosan működő elektromos háztartási készülékek költségoptimalis ütemezését.

A lítium-ion akkumulátorok hőmérsékletfüggő paramétereit az predikációs hiba minimalizálásán alapuló paraméterbecslési módszerrel becslöm meg különböző hőmérsékleteken. A különböző hőmérsékleteken meghatározott paraméterek pontbecsléseit ezután fel kívánom használni a becslt paraméterekre illesztett hőmérsékleti karakterisztikák illesztéséhez.

2. **Nem modell alapú optimalizációs módszerek villamos energetikai rendszerekre** Az elosztott villamosenergia-termelés népszerűségének növekedésével egyre elterjedtebb a (főleg megújuló forrásból származó) el nem használt villamos energia hálózatba történő visszatáplálása. A kapcsolódó kutatási cél az, hogy megtaláljuk a hálózatba történő áram visszatáplálás optimalis módját, amely mellett a teljes harmonikus torzítás csökken. Mivel nem tételezhető fel semmiféle információ a hálózatról, modell alapú módszerek nem alkalmazhatóak a probléma megoldására.

A háromfázisú hálózatban a feszültség kiegyensúlyozatlansága az áramminőség egyik fontos mutatója. A hálózatba történő optimalis áram betáplálás fenti problémáját a háromfázisú hálózat esetére fogalmazom meg és adok rá megoldást, ahol az optimalitási kritérium a feszültség kiegyensúlyozatlanságának mértéke.

3. **Általános sima nemlineáris rendszerek kvázipolinomiális és Lotka-Volterra reprezentáción és optimalizálási módszereken alapuló analízise és irányítása** Erre a célra az úgynevezett kvázi-polinomiális (QP) rendszerosztályt használom. A QP rendszereknek van egy nagyon előnyös tulajdonsága, miszerint a Ljapunov-függvényük alakja ismert. Ez jelentősen megkönnyíti az általános energiarendszerek globális stabilitásvizsgálatát, hiszen csak egy adott formájú Ljapunov-függvény megfelelő paramétereit kell megtalálni a globális aszimptotikus stabilitás bizonyításához.

Következő lépésként a QP rendszerosztályt olyan állapotvisszacsatolás alapú szabályozótervezésre használom, amely biztosítja a zárt

hurkú rendszer globális stabilitását. Felhasználva azt a tényt, hogy megfelelő visszacsatolás mellett a zárt rendszer továbbra is a QP rendszerek osztályába tartozik, ugyanaz a fent említett Ljapunov függvény használható a módszer során.

## 4. Új tudományos eredmények

A disszertáció új tudományos eredményeit a következők tézispontok foglalják össze. A kapcsolódó publikációk az egyes tézispontok végén találhatóak.

### 1. Modell alapú módszerek energetikai rendszerekre

Modell alapú módszereket dolgoztam ki a különböző energetikai rendszerek optimális működésére és paraméterbecslésére.

- (a) Folyamatosan működő elektromos háztartási készülékek egy osztályának költségoptimalis ütemezése modell prediktív optimalis ütemezési problémaként került megfogalmazásra, ahol az ütemezési változó határozza meg a rendszer bináris üzemmódját, a költségfüggvény pedig a készülék üzemeltetési költsége az óránként változó áramár ismeretében. A fenti probléma megoldására javasoltam egy elágazás és korlátozás (branch and bound) alapú heurisztikus optimalizáló algoritmust.

A heurisztikus modell prediktív ütemező algoritmusát kibővítettem, hogy a mögöttes egyszerű dinamika kulcsfontosságú paramétereinek változását követve adaptív működésre is képes legyen.

- (b) Egy predikciós hiba minimalizálásán alapuló paraméterbecslési módszert javasoltam, amely képes lítiumion-akkumulátorok hőmérsékletfüggő paramétereinek megbecslésére. A módszer alapja egy nemlineáris töltési és kisütési modell, amely a hőmérsékletfüggést a hőmérséklet, mint külső változó paraméteres függvényeként írja le. A javasolt paraméterbecslési módszer a kulcsfontosságú akkumulátor-paraméterek pontbecslését határozza meg különböző hőmérsékleteken, majd a paraméterértékek pontbecslések közötti interpolálásával megkapjuk az akkumulátor paramétereinek hőmérséklet karakterisztikáit.

*Kapcsolódó publikációk:* [38], [59], [39], [41], [40], [58], [60].

### 2. Optimalizáción alapuló beavatkozástervezés villamos hálózatokra

Villamos hálózatokban alkalmazható, közvetlen optimalizáláson alapuló nem modell alapú kompenzációs módszereket dolgoztam ki.

- (a) Ismeretlen hálózati modellel vagy topológiával rendelkező egyfázisú kiefeszültségű elektromos hálózatok teljes harmonikus torzítását csökkentésére alkalmas, direkt optimalizáláson alapuló kompenzátor struktúrát javasoltam, ahol az optimalizálási probléma költségfüggvényét a csatlakozási ponton mért feszültség felharmonikusainak függvénye. A javasolt kompenzátor struktúra a harmonikus torzítást nem szinuszos áram időfüggvény hálózatba táplálásával csökkenti, ahol a betáplált áram felharmonikusok amplitúdói és fázisai szolgálnak optimalizálási változóként az alkalmazott optimalizálási módszerhez.
- (b) Megmutattam, hogy az ideális háromfázisú és a csatlakozási ponton mért háromfázisú feszültségfázor szimmetrikus különbsége egy közvetlen optimalizáláson alapuló feszültségaszimmetria kompenzációs struktúra költségfüggvényeként szolgálhat. A feszültség aszimmetria kompenzációjának problémája ismeretlen hálózati modell esetén optimalizálási problémaként került megfogalmazásra. A módszer teljesítményét koncepcionális hálózat és inverter modell segítségével szimulációs kísérletek alapján vizsgáltam meg és arra a következtetésre jutottam, hogy a javasolt kompenzációs módszer költségfüggvényeként a szimmetrikus különbség alapú norma nagyobb mértékű aszimmetria csökkenést eredményez, mint az általánosan használt feszültség aszimmetria indikátor.

*Kapcsolódó publikációk:* [43], [46], [42] [55], [44], [45] [57], [53], [52], [54].

### 3. **Sima nemlineáris rendszerek analízise és irányítása kvázipolinom és Lotka-Volterra formában**

Új, optimalizálás alapú tervezési módszert fejlesztettem ki Lotka-Volterra reprezentációban lévő sima nemlineáris rendszerek stabilizáló visszacsatoláson alapuló szabályozására.

- (a) A kvázipolinomiális reprezentációban lévő sima nemlineáris dinamikus rendszerek globális stabilitásvizsgálatát egy lineáris mátrixegyenlőtlenség megoldhatósági problémájaként fogalmaztam meg.

- (b) Kvázipolinomiális alakban levő sima nemlineáris rendszerek globálisan stabilizáló állapotvisszacsatolás tervezési problémát fogalmaztam meg. A szabályozó egy nemlineáris állapot-visszacsatolás, mellyel a zárt rendszer kvázipolinomiális alakban marad. A problémát egy bilineáris mátrixegyenlőtlenség megoldhatósági problémájaként írtam fel. A probléma megoldására egy iteratív lineáris mátrixegyenlőtlenség alapú megoldási módszert javasoltam.

*Kapcsolódó publikációk:* [50], [61], [48], [49], [56].

## 5. Az eredmények alkalmazása és további munka

### 5.1. Modell alapú módszerek villamos energetikai rendszerekhez

A javasolt optimális heurisztikus modell prediktív ütemezési módszer különböző, hasonló dinamikájú háztartási berendezésekre (vízmelegítő, klíma stb.) alkalmazható. Az algoritmus továbbfejlesztett változatával több háztartási berendezés párhuzamosan is üzemeltethető, hogy elkerüljük a rövid fogyasztási csúcsokat ilyen készülékek egyidejű működtetésekor. A módszer kulcsfontosságú elemként szolgálhat a lakossági termelők rugalmasságában [37].

A javasolt hőmérsékletfüggő paraméterbecslési módszer a termoelektromos akkumulátormodellel együtt alapul szolgálhat a lítiumion-akkumulátorok [47] modellalapú optimális töltésszabályozási módszereihez.

### 5.2. Nem modell alapú optimális kompenzáció az elektromos hálózaton

A dolgozatban javasolt mindkét modell nélküli optimalizációs irány számos fejlesztési lehetőséget és további kutatási irányt rejt magában. A virtuális erőművek egyre szélesebb körben való elterjedésével a rendszerirányító irányítása mellett több olyan lakossági termelő is dolgozhat együtt, akik képesek az áramminőség javítására. A több készülék párhuzamos működése ugyanazon a helyi transzformátor területen szintén érdekes kérdés, amelyet a jövőben vizsgálni fogok.

A szimmetrikus különbségen alapuló kiegyensúlyozatlansági mértéket tovább vizsgálom, hogy hatékony számítási módszert találjak annak kiszámítására, hogy annak bonyolultsága (számolási ideje) elérje a teljesítményelektronikai eszközök feldolgozási időállandóját.

### 5.3. Kvázipolinomiális és Lotka-Volterra rendszerek

A robusztussági és/vagy performancia specifikációk költségfüggvényként történő megfogalmazásával lehetővé válik a tervezendő szabályozóval kapcsolatos minőségi követelmények megfogalmazása. A visszacsatolási struktúra kiválasztása is fontos kérdés, hiszen egy okos választással csökkenthető a megoldandó BMI mérete. Éppen ezért a gráfelméleti módszereken alapuló szabályozó struktúra tervezés egy másik lehetséges jövőbeli munka iránya. Megjegyzendő, hogy a kémiai reakcióhálózatok osztályának szerkezeti eredményeinek széles skálája létezik, amelyek szorosan kapcsolódnak kvázipolinom rendszerekhez [62]. Passzivitás alapú szabályozótervezést fogalmaztam meg társszerzőimmal [51]-ben, ahol a Lotka-Volterra modell entrópiaszerű Ljapunov-függvénye szolgál tárolófüggvényként.

## Hivatkozások

- [1] A. Battaglini, J. Lilliestam, A. Haas, and A. Patt. Development of supersmart grids for a more efficient utilisation of electricity from renewable sources. *Journal of Cleaner Production*, 17:911–918, 2009.
- [2] C. Campestrini, G. Walder, A. Jossen, and M. Lienkamp. Temperature influences on state and parameter estimation based on a dual Kalman filter. In *CoFAT*, 2014.
- [3] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galvan, R. C. P. Guisado, M.Á. M. Prats, J. I. Leon, and N. M. Alfonso. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: a survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(4):1003–1015, 2006.
- [4] A. Cerdeira, M.A. Alema, M. Estrada, and D. Flandre. Integral function method for determination of nonlinear harmonic distortion. *Solid-State Electronics*, 48(12):2225–2234, 2004.
- [5] R. Díaz-Sierra, B. Hernández-Bermejo, and V. Fairén. Graph-theoretic description of the interplay between non-linearity and connectivity in biological systems. *Mathematical Biosciences*, 156:229–253, 1999.
- [6] F. Feng, R. Lu, G. Wei, and C. Zhu. Online estimation of model parameters and state of charge of LiFePO<sub>4</sub> batteries using a novel open-circuit voltage at various ambient temperatures. *Energies*, 8(4):2950–2976, 2015.

- [7] I.M. Gléria, A. Figueiredo, and T.M. Rocha Filho. A numerical method for the stability analysis of quasi-polynomial vector fields. *Nonlinear Analysis*, 52:329–342, 2003.
- [8] J. L. Gouzé. Global stabilization of n-dimensional population models by a positive control. In *Proceedings of the 33rd IEEE Conf. on Decision and Control, Orlando, USA*, pages 1335–1336, 1994.
- [9] F. Grogard and J. L. Gouzé. Positive control of Lotka-Volterra systems. In *Proceedings of 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic*, 2005. on CD.
- [10] B. Hernández-Bermejo. Stability conditions and Lyapunov functions for quasi-polynomial systems. *Applied Mathematics Letters*, 15:25–28, 2002.
- [11] B. Hernández-Bermejo and V. Fairén. Nonpolynomial vector fields under the Lotka-Volterra normal form. *Physics Letters A*, 206:31–37, 1995.
- [12] B. Hernández-Bermejo and V. Fairén. Lotka-Volterra representation of general nonlinear systems. *Math. Biosci.*, 140:1–32, 1997.
- [13] B. Hernández-Bermejo, V. Fairén, and L. Brenig. Algebraic recasting of nonlinear ODEs into universal formats. *J. Phys. A, Math. Gen.*, 31:2415–2430, 1998.
- [14] R. Huisman, C. Huurman, and R. Mahieu. Hourly electricity prices in day-ahead markets. *Energy Economics*, 29(2):240–248, 2007.
- [15] C. Joe-Wong, S. Sen, S. Ha, and M. Chiang. Optimized day-ahead pricing for smart grids with device-specific scheduling flexibility. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30(6):1075–1085, 2012.
- [16] B. Y. Kim, K. K. Oh, and H. S. Ahn. Coordination and control for energy distribution in distributed grid networks: Theory and application to power dispatch problem. *Control Engineering Practice*, 43:21–38, 2015.
- [17] P. G. Kini, R. C. Bansal, and R. S. Aithal. A novel approach toward interpretation and application of voltage unbalance factor. *IEEE transactions on industrial electronics*, 54(4):2315–2322, 2007.

- [18] L. R. Limongi, R. Bojoi, G. Griva, and A. Tenconi. Comparing the performance of digital signal processor-based current controllers for three-phase active power filters. *IEEE Industrial Electronics*, 3(1):20–31, 2009.
- [19] L. R. Limongi, R. Bojoi, A. Tenconi, and L. Clotea. Single-phase inverter with power quality features for distributed generation systems. In *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, pages 313–318, 2008.
- [20] P. Liu, Y. Chai, P. Gao, and C. Zhang. Research on energy internet based on Lotka-Volterra model. In *2021 3rd International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST)*, pages 1595–1601. IEEE, 2021.
- [21] Y.K. Lo, T.P. Lee, and K.H. Wu. Grid-connected photovoltaic system with power factor correction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(5):2224–2227, 2008.
- [22] A. J. Lotka. *Elements of physical biology*. William and Wilkens, Baltimore, 1925.
- [23] Y. Luo and Z. Lu. Stability analysis for Lotka Volterra systems based on an algorithm of real root isolation. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 201:367–373, 2007.
- [24] A. D. Martin, R. S. Herrera, J. R. Vazquez, P. Crolla, and G. M. Burt. Unbalance and harmonic distortion assessment in an experimental distribution network. *Electric Power Systems Research*, 127:271–279, 2015.
- [25] M. Mathew, M. Mastali, J. Catton, E. Samadani, S. Janhunen, and M. Fowler. Development of an electro-thermal model for electric vehicles using a design of experiments approach. *Batteries*, 4(2):29, 2018.
- [26] M. J. Ortega, J. C. Hernández, and O. G. García. Measurement and assessment of power quality characteristics for photovoltaic systems: harmonics, flicker, unbalance, and slow voltage variations. *Electric Power Systems Research*, 96:23–35, 2013.
- [27] S. Panchal, M. Mathew, R. Fraser, and M. Fowler. Electrochemical thermal modeling and experimental measurements of 18650 cylind-

rical lithium-ion battery during discharge cycle for an ev. *Applied Thermal Engineering*, 135:123–132, 2018.

- [28] A. Purvins, H. Wilkening, G. Fulli, E. Tzimas, G. Celli, S. Mocci, F. Pilo, and S. Tedde. A European supergrid for renewable energy: local impacts and far-reaching challenges. *Journal of Cleaner Production*, page doi:10.1016/j.jclepro.2011.07.003, 2011.
- [29] EPEX Spot. Market data. *System price.[Verkkotietokanta][Viitattu 23.11. 2011] Saatavissa: <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/ALL1/Hourly>/<http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/ALL1/Hourly>*, 2010.
- [30] Y. Takeuchi. *Global Dynamical Properties of Lotka-Volterra Systems*. World Scientific, Singapore, 1996.
- [31] M. Tianhu, B. Jumpei, and I. Yumiko. Analysis of microgrid contributing to hour-ahead market operation through marginal day-ahead market price-based demand response. *Energy Procedia*, 118:119–127, 2017.
- [32] J. Toyoda and H. Saitoh. Proposal of an open-electric-energy-network (OEEN) to realize cooperative operations of IOU and IPP. In *Proceedings of EMPD '98. 1998 International Conference on Energy Management and Power Delivery (Cat. No.98EX137)*. IEEE.
- [33] B. H. Tsai. Modelling energy consumption and carbon dioxide emissions of fossil fuels and nuclear energy using lotka-volterra equations. *Applied Ecology and Environmental Research*, 20(2):1435–1455, 2022.
- [34] V. Volterra. Variazioni fluttuazioni del numero d'invididui in specie conviventi. *Men Acad Lincei*, 2:31–113, 1926.
- [35] H. Wen, D. Cheng, Z. Teng, S. Guo, and F. Li. Approximate algorithm for fast calculating voltage unbalance factor of three-phase power system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(3):1799–1805, 2014.
- [36] R. Zhang, B. Xia, B. Li, L. Cao, Y. Lai, W. Zheng, H. Wang, W. Wang, and M. Wang. A study on the open circuit voltage and state of charge characterization of high capacity lithium-ion battery under different temperature. *Energies*, 11(9):2408, 2018.

## A szerző publikációi

- [37] I. G. Balázs, A. Fodor, and A. Magyar. Quantification of the flexibility of residential prosumers. *Energies*, 14(16):4860, aug 2021.
- [38] R. Bálint, A. Fodor, K. M. Hangos, and A. Magyar. Cost-optimal model predictive scheduling of freezers. *Control Engineering Practice*, 80:61–69, nov 2018.
- [39] R. Bálint, K. M. Hangos, and A. Magyar. Optimal scheduling of a household refrigerator using adaptive model predictive technique. 19th International Symposium on Power Electronics 2017, Novi Sad, Serbia, October 2017. IEEE.
- [40] R. Bálint and A. Magyar. Refrigerator optimal scheduling to minimize the cost of operation. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 44(2):99–104, 2016.
- [41] R. Bálint, A. Magyar, and K. M. Hangos. Cost-optimal model predictive scheduling of home appliances. *IFAC PapersOnline*, 50(1):3344–3349, 2017.
- [42] A. Gölle, P. Görbe, and A. Magyar. Modeling and optimization of electrical vehicle batteries in complex clean energy systems. *Journal of Cleaner Production*, 34:138–145, oct 2012.
- [43] P. Görbe, A. Fodor, A. Magyar, and K. M. Hangos. Experimental study of the nonlinear distortion caused by domestic power plants. *Applied Thermal Engineering*, 70(2):1288–1293, 2014.
- [44] P. Görbe, A. Magyar, and P. Csuti. Power quality management of led light sources in frequency domain. *Chemical Engineering Transactions*, 35:1309–1314, 2013.
- [45] P. Görbe, A. Magyar, and K. M. Hangos. Line conditioning with grid synchronized inverter’s power injection of renewable sources in nonlinear distorted mains. In *10th International PhD Workshop on Systems and Control, Hluboka nad Vltavou, Czech Republic*, pages 1–6, ISBN:978-80-903834-3-2, 2009. ISBN:978-80-903834-3-2.
- [46] P. Görbe, A. Magyar, and K. M. Hangos. Reduction of power losses with smart grids fueled with renewable sources and applying EV batteries. *Journal of Cleaner Production*, 34:125–137, 2012.

- [47] Gy. Károlyi, A. I. Pózna, K. M. Hangos, and A. Magyar. An optimized fuzzy controlled charging system for lithium-ion batteries using a genetic algorithm. *Energies*, 15(2):481, jan 2022.
- [48] A. Magyar, G. Szederkényi, and K. M. Hangos. Quadratic stability of process systems in generalized Lotka-Volterra form. In *Proceedings of 6th IFAC Symposium on Nonlinear Control (NOLCOS 2004), Stuttgart, Germany*, 2003. <http://www.nolcos2004.uni-stuttgart.de>.
- [49] A. Magyar, G. Szederkényi, and K. M. Hangos. Quasi-polynomial system representation for the analysis and control of nonlinear systems. In *Proceedings of 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic*, 2005. on CD.
- [50] A. Magyar, G. Szederkényi, and K. M. Hangos. Globally stabilizing feedback control of process systems in generalized Lotka-Volterra form. *Journal of Process Control*, 2007.
- [51] L. Márton, K. M. Hangos, and A. Magyar. Passivity of Lotka-Volterra and quasi-polynomial systems. *Nonlinearity*, 34(4):1880–1899, feb 2021.
- [52] L. Neukirchner, A. Gölle, P. Görbe, and A. Magyar. Carbon footprint reduction via voltage asymmetry compensation of three-phase low voltage grid utilizing small domestic power plants. *Chemical Engineering Transactions*, 45:283–288, 2015.
- [53] L. Neukirchner, A. Gölle, P. Görbe, and A. Magyar. Voltage unbalance reduction of a local transformer area with domestic asymmetrical inverter and optimal control design. *Int. J. of Thermal & Environmental Engineering*, 12(2):129–134, 2016.
- [54] L. Neukirchner, P. Görbe, and A. Magyar. Examination of different voltage asymmetry norms under transient behavior of three-phase low voltage power systems containing small domestic power plants. In *PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven*, pages 1–6. IEEE, 2015.
- [55] L. Neukirchner, P. Görbe, and A. Magyar. Voltage unbalance reduction in the domestic distribution area using asymmetric inverters. *Journal of Cleaner Production*, 142:1710–1720, 2017.
- [56] L. Neukirchner and A. Magyar. Quasi-polynomial representation-based control of mechanical systems. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 42(2):91–95, 2014.

- [57] Görbe P., Magyar A., Fodor A., and Hangos K. M. Effect of domestic power plants to the low voltage transformer areas from the nonlinear distortion point of view. *Chemical Engineering Transactions*, 35:1303–1308, 2013.
- [58] A. I. Pózna, K. M. Hangos, and A. Magyar. Design of experiments for battery aging estimation. *IFAC-PapersOnLine*, 51(28):386–391, 2018.
- [59] A. I. Pózna, K. M. Hangos, and A. Magyar. Temperature dependent parameter estimation of electrical vehicle batteries. *Energies*, 12(19):3755, sep 2019.
- [60] A. I. Pózna, A. Magyar, and K. M. Hangos. Model identification and parameter estimation of lithium ion batteries for diagnostic purposes. In *2017 International Symposium on Power Electronics (Ee 2017)*, pages 1–6, Oct 2017.
- [61] G. Szederkényi, K. M. Hangos, and A. Magyar. On the time-reparametrization of quasi-polynomial systems. *Physics Letters A*, 334(4):288–294, jan 2005.
- [62] G. Szederkényi, A. Magyar, and K. M. Hangos. *Analysis and control of polynomial dynamic models with biological applications*. Academic Press, 2018.