

KOMPLEX NEMLINEÁRIS ENERGETIKAI RENDSZEREK ANALÍZISE ÉS OPTIMALIZÁLÁSA

habilitációs tézisek

DR. MAGYAR ATTILA

Informatika Tudományok Doktori Iskola

Villamosmérnöki és Információs Rendszerek Tanszék
Műszaki Informatikai Kar
Pannon Egyetem
Veszprém

2016

1. Motiváció és célkitűzés

Az elmúlt másfél évtized alatt az Európai Unió radikálisan megváltoztatta korábbi energia politikáját, ami radikálisan átrendezi az energiatermelési struktúrát a közeljövőben. Több nukleáris erőműnek működése fejeződött be és ez a folyamat következő években is folytatódik. A nukleáris energiatermelés jelentős csökkentése vagy leállítása miatt kieső termelés kapacitást minél nagyobb részben megújuló energiaforrásokból kívánják fedezni, elsődlegesen napelemek illetve szélgenerátorok révén. Ezen cél eléréséhez nem elégséges nagy kapacitású központosított erőművek létesítése, hanem jelentős részben kívánnak támaszkodni az egyre nagyobb számban megjelenő háztartási kis-erőművekre. Sajnos azonban ezen megújuló energiaforrások nagymértékű bizonytalan változási jellege nagymértékben megnehezíti ezen megtermelt villamos teljesítmény integrálását a jelenleg használatos, helyenként elavult villamos teherelosztó rendszerbe, főleg ha a megújuló forrásból származó megtermelt energia meghaladja a teljes termelés 10%-át [1]. Megoldási lehetőségként merülhet fel ezen erőművek integrálása egy európai szintű intelligens hálózatba [2].

Az energiatakarékosságból kifolyólag számos országban törvényi eszközökkel is próbálják kikényszeríteni a nem energiatakarékos fogyasztók kivonását a piacról, az Európai Unió jogi szabályozással tereli a fogyasztókat az energiatakarékos világítási megoldások vásárlására. Ennek és a növekvő számú kapcsoló üzemű tápegységek alkalmazásának következményeként kisfeszültségű hálózatokban megjelent a nemlineáris torzítás (egyes országokban már a középfeszültségű hálózatokon is jelentős mértékben) aminek szintén veszteség növelő hatásai, másrésről a teherelosztó infrastruktúra üzembiztonságát veszélyeztető hatásai vannak. Ez a nemkívánatos hatás egyre jelentősebb, és már a villamos hálózatok üzemeltetőinek figyelmét is felkeltette.

Az egyre jobban elterjedő villamos jármű akkumulátorok kisfeszültségű hálózatba integrálásával létrehozott gyors átmeneti tároló kapacitás a villamos energia termelési csúcsainak elnyelésére, és a fogyasztási csúcsok ki-elégítésére szolgál [3], tehát annál nagyobb arányú sztochasztikusan változó megújuló energiaforrás arányt tesznek még tolerálhatóan kiépíthetővé, minél nagyobb összkapacitású tárolót tudunk a villamos hálózatba integrálni. Jelenleg a villamos járművekben leggyakrabban Li-ion akkumulátor modulokat [4] alkalmaznak 40 Ah-tól 200Ah kapacitásig. A kapacitás növelhető, ha pontosan tudjuk becsülni a jármű akkumulátorban éppen tárolt maradék töltést. Mivel ezek a járművek a kültéri parkoló állásokban szélsőséges hőmérsékleti viszonyoknak vannak kitéve (-30°C - $+80^{\circ}\text{C}$), ezért egy pontos,

valós mérési adatokon alapuló hőmérséklet függő modell ezt lehetővé teszi, és felhasználható a gyorsított eljárások szimulációs támogatására.

Ezen előzményekből logikus következtetés ezen alapvetően energia hatékonysági problémák integrált komplex megközelítése. Kutatási célunk egy olyan komplex rendszer modell felépítése amely egységesen kezeli a fluktuáló megújuló energiaforrások nagy arányú integrációját a már meglévő villamos infrastruktúrába és az elektromobilitás megvalósíthatóságát lokálisan előállított megújuló energiaforrásokból, miközben a megújuló energia integrációjához felhasználja az éppen nem úton lévő elektromos autók akkumulátor kapacitását a termelési-fogyasztási egyensúly fenntartásához és a hálózatba betáplált áram jelalak módosításával alkalmas a nemlineáris elemek által létrehozott torzító hatás csökkentésére, kompenzálására az áram minőség javításához.

Háromfázisú elosztóhálózatok esetében komoly problémát jelenthet a feszültség aszimmetria jelenség, mely többségében a fázisok nem egyenletes terheléséből fakad. A feszültség aszimmetria káros hatásaként a kevésbé hatékony villamosenergia felhasználás és a megnövekedett hálózati veszteség róható fel. Szintén a célok között szerepel egy olyan inverterstruktúra kialakítása a korábban említett komplex energetikai modell keretében, amely lehetővé teszi a megújuló forrásból származó villamos energia aszimmetrikus betáplálását a háromfázisú villamos elosztóhálózatba. Ezáltal megnyílna az út a hálózati aszimmetriacsökkentéssel kapcsolatos vizsgálatok előtt.

A fent említett esetekben kiserőművi méretekben elérhető eredmények kerültek előtérbe, viszont ezek mellett az is nagyon fontos szempont hogy a már üzemben levő, hagyományos erőművi környezetben működő energiaátalakító rendszerek is alkalmazhatóak legyenek az áramminőség javításában, ezáltal a villamos elosztóhálózat üzembiztonságát növelve. A szinkron motorok és generátorok fontos szerepet töltenek be az ipari alkalmazásoknál, ennél fogva számtalan összefoglaló könyv és tudományos közlemény foglalkozik a szinkron gépek szabályozási problémáival [5], [6], [7]. Ahhoz azonban, hogy a modern rendszer- és irányításelmélet eszköztára alkalmazható legyen a fent említett rendszerekre (pl. szinkron generátorok), egy megfelelő parametrikus modellre van szükségünk, ami képes leírni a szabályozni vagy elnyomni kívánt dinamikákat. Ezen modellek pontossága többek között a paraméterek helyes megválasztásától is függ. A rendszeridentifikáció (paraméterbecslés) egy újonnan megtervezett és implementált rendszer esetén könnyű, hiszen a tervezési fázisban még viszonylag nagy szabadsággal lehet vizsgálatokat végezni a rendszeren. Ezzel szemben egy már évek óta haszná-

latban levő, folyamatosan a kívánt munkapont környékén működő rendszer esetében a pereméterbecslés során komoly problémát jelenthet, hogy az elvégezhető vizsgálatok sora igencsak korlátozott. Ennek ellenére a célunk egy erőművi szinkron generátor paraméterbecslése üzemi mérésekből.

A folyamatosan emelkedő olajárak és a CO₂ kibocsátás csökkentéssel kapcsolatos korlátozások jelentősen érinti a közlekedési infrastruktúrát is. A lehetséges jármű hajtási alternatívák között egyre gyakrabban merül fel a teljesen elektromos hajtású járművek elterjedése. Ezek elterjedésének csak részben akadálya a lítium-ion akkumulátorok ma még igen jelentős tömege és költsége, jelenleg még nem teljesen megoldott a lemerült akkumulátorok gyorsított és a szélsőséges hőmérsékleti viszonyok között üzemeltetett akkumulátorok (-30C° - 80 C°) működési paramétereinek becslése és modellezése sem. Mivel a különböző valós időjárási viszonyoknak kitett akkumulátorok pillanatnyi kapacitásának és az adott hőmérsékleten még hasznosítható tárolt töltésének modell alapú becslése, valamint a hőmérsékletre szabályozott gyorsított eljárások szimulációja hőmérséklet függő villamos két-pólus modelleket igényelnének.

A rendszer- és irányításelmélet állapotter alapú módszereit [8], [9], [10], [11] manapság olyan területeken használják, mint a robusztus, LPV, és LQ irányítás. Ezen kívül az állapotter alapú technikák olyan nehezen kezelhető rendszerekre is alkalmazhatóak, mint az energetikai rendszerek, a folyamatrendszerek, nukleáris rendszerek, stb.

A nemlineáris rendszerek [12] globális stabilitásvizsgálata nehéz feladat. Olyan speciális nemlineáris rendszermodell osztályok alkalmazása, melyek elég általánosak az általános energetikai rendszerek dinamikus viselkedésének leírására, megkönnyítené ezen rendszerek analízisét, és irányítását is. A kutatásaink során többek között az úgynevezett kvázipolinomiális (QP) rendszerosztályt [13] [14] alkalmaztuk a fenti célokra. Kihasználva, hogy QP rendszerekre a Ljapunov függvény alakja ismert, leegyszerűsödik az általános nemlineáris rendszerek globális stabilitásvizsgálata, valamint a kvázipolinomiális rendszerosztály segítségével olyan szabályozótervezési feladat is felírható, amely biztosítja a zárt rendszer globális stabilitását egy adott Ljapunov függvény családra nézve [15].

a hálózat teljesítmény egyensúlyának fenntartására fluktuáló megújuló energiaforrások esetén, a villamos jármű akkumulátorok feltöltésére "tisztá" megújuló energiával, aktív teljesítmény tényező kompenzálásra és a harmonikus torzítás kompenzálására. A komplex szabályozó rendszer alapvető újdonsága a megújuló energiaforrások, villamos jármű akkumulátorok és a torzított, változó terhelésű és termelésű kisfeszültségű hálózat egy komplex rendszerben történő kezelése. A rendszer új eleme a továbbfejlesztett felharmonikus szabályozó, amely a frekvencia tartományban gyors Fourier transzformáció (FFT) alapján tájékozódik, és az aszinkron párhuzamos minta keresés gradiens módszerét a lineáris futtatás helyett diszkrét lépésekben végzi nagyobb számú felharmonikus komponensen történő beavatkozás segítségével. A komplex szabályozót Matlab szimuláció segítségével vizsgálva jelentősebb javulást sikerült elérnünk a kisfeszültségű transzformátor körzet feszültség és áram jelalakjaiban amellet hogy a szabályozó működése pontosabbá és gyorsabbá vált. Emellett a szabályozó hatékonyan képes az energiaáramlás irányának szabályozásával fenntartani a kisfeszültségű hálózat egyensúlyát és a feszültségszint stabilitását. A felharmonikus szabályozó továbbfejlesztéséből és a szabályozó rendszer komplex kiterjesztéséből adódó torzítás kompenzáció többlet magasabb, mintegy 0.28 %-ot veszteség csökkenésből adódó energia megtakarítást eredményezett egy átlagos háztartásra vetítve. [P3,P4]

2.3. Hálózati aszimmetria csökkentése megújuló energiaforrásból optimális aszimmetrikus betáplálással

A korábbiakban említett komplex szabályozóstruktúra kiterjesztésével háromfázisú inverterek esetére elvi lehetőség nyílik a villamos energia aszimmetrikus betáplálására.

A jelenleg használatos feszültség aszimmetria normákat megvizsgálva látszik, hogy azok nem minden esetben megfelelő érzékenységek a fáziseltérésre nézve, ezért egy geometria elven alapuló új normát vezettünk be a hálózati feszültség aszimmetria mérésére.

A bevezetett norma egy aszimmetrikus háromfázisú inverter segítségével lehetőséget ad a korábbi eredmények között tárgyalt optimalizációs elven működő áramminőség javító szabályozó továbbfejlesztésére. A teljes harmonikus torzítás helyett a hálózati aszimmetriával arányos új normát használva az algoritmus célfüggvényeként egy optimális feszültség aszimmetria csökkentére alkalmas szabályozót terveztünk, melynek működését szimulációs környezetben megvizsgáltuk. [P5]

3. Energiaátalakító rendszerek modellezése, analízise és identifikációja

3.1. Nemlineáris energetikai rendszerek matematikai reprezentációja kvázipolinomiális alakban

Kvázipolinom reprezentációban adott nemlineáris rendszerek globális stabilitásvizsgálatát egy lineáris mátrixegyenlőtlenség formájában fogalmaztuk meg.

Beláttuk, hogy QP, és Lotka-Volterra rendszerek esetén a Ljapunov függvény deriváltjának negativitása ekvivalens egy lineáris mátrixegyenlőtlenséggel, tehát QP- és LV rendszerek (és QP alakba ágyazott általános nemlineáris rendszerek) stabilitásvizsgálata felírható egy LMI megoldhatósági problémaként [16]. Amennyiben a modell beágyazott rendszerhez tartozik, az LMI nem szigorú.

A QP rendszerek globálisan stabilizáló kvázipolinomiális állapotvisszacsatolási problémáját felírtam egy bilineáris mátrixegyenlőtlenség formájában. Ezután átfogalmaztam olyan alakba, hogy megoldható legyen egy már létező iteratív LMI algoritmus segítségével.

Az korábbi eredményeink alapján egy globálisan stabilizáló állapotvisszacsatolás problémát fogalmaztunk meg. A feladat megoldása egy bilineáris mátrixegyenlőtlenség megoldhatósági problémájára vezet, ahol az egyik változócsoporthoz a Ljapunov függvény paramétereit tartalmazza, a másik pedig a visszacsatolás paramétereit. A felírt megoldás nem használ költségfüggvényt a BMI, mint optimalizálási probléma megoldása során; ez egy lehetséges továbbfejlesztési pont, ahol performancia, illetve robusztussági kritériumok írhatók fel költségfüggvényként. [P6] [P7]

3.2. Villamos forgógépek identifikációja

A kutatásunk célja az ipari (erőművi) környezetben működő generátorok identifikálhatóságának vizsgálata pusztán üzemi gerjesztések alkalmazásával. Köztudott, hogy a dinamikus rendszerek modell-paramétereinek meghatározásához elengedhetetlen az ún. elegendő gerjesztések használata, ami viszont üzemszerű működés alatt nem kivitelezhető. A kutatásunk során a Paksi Atomerőmű éjszakai-nappali fel- és leterhelési tranzienseinek használatával végeztünk paraméterbecslést, majd modell alapú szabályozót terveztünk az identifikált generátor modellre.

Modell verifikáció céljára lokális stabilitás analízist, valamint a gerjesztő

feszültség, a hatásos teljesítmény és a hálózati zavarásokra adott egyszerű egységugrás-válaszfüggvények vizsgálatát javasoltuk. Megállapítást nyert, hogy ezekkel a módszerekkel elvégezhető a modell verifikációja. [P8]

Ezek után érzékenységvizsgálatot hajtottunk végre a kifejlesztett dinamikus modell összes paraméterén, melynek során az állapotváltozók és a kimenetek érzékenységét vizsgáltuk a paraméterváltoztatásokra nézve. A vizsgálat eredményei alapján a dinamikus szinkron generátor modell paraméterei közül meghatároztuk az identifikálandó (identifikálható) paramétereket. [P9]

Következő lépésként passzív ipari mért adatokat használó paraméterbecslési módszert dolgoztunk ki a vizsgált ipari szinkron generátor paramétereinek becslésére terhelési tranziens adatok felhasználásával.[P10].

A paraméterbecslésnél használt hibafüggvényt a MVM Paksi Atomerőműben használt mérési és adattárolási módszerek figyelembevételével határoztuk meg figyelembe véve a különböző mérések mintavételezési idejét és pontosságát.

Az identifikált modellre alapjel követő optimális szabályozót terveztünk, amely képes a hatásos- és meddő teljesítmény alapjelek követésére, ezáltal lehetőséget biztosítva a rendszeroperátornak a meddő teljesítmény előírt értéken tartására (bizonyos határon belül). [P11]

A kvázipolinomiális reprezentációval kapcsolatos eredményeinket egy szinkron generátor nemlineáris dinamikus modelljén alkalmaztuk egy alapjelkövető szabályozótervezési probléma esetében. [P12]

3.3. Akkumulátorok hőmérsékletfüggő modellezése

Villamos jármű akkumulátor szimulációjához alkalmazható hőmérséklet függő modellt készítettünk Matlab Simulink környezetben. A modell paramétereit a mért adatok alapján határoztuk meg. A modell kialakításához alkalmazott mérési és szimulációs környezet és a modell létrehozásának általános, bármilyen más villamos két-pólus energia forrásnak (lineáris és nem lineáris) hőmérséklet függő modelljének felépítésére alkalmazható. A felépített modellt szimuláció segítségével validáltuk, valamint beillesztettük egy komplex energetikai rendszer modelljébe. Ezen modell segítségével készíthető a EV-ek akkumulátorának maradék töltését és még megtehető távolság becslését elősegítő modell bázisú rendszer. A kapott paraméterek illeszkednek az irodalomban található fizikai és kémiai alapú funkcionális megközelítésű modellek eredményeihez. [P12]

3.4. Háztartási hűtőgépek energiahatékony ütemezése modell-prediktív technikával

A kutatás célja hatékony költség-optimalis ütemezési algoritmus kifejlesztése hűtőgépek számára egy napra előre ismert villamosenergia árak figyelembe vételével. Szakaszonként affin dinamikus modell alkalmazásával írtuk le a háztartási hűtőgépek dinamikus működését. A modell két dinamikát, a hűtést és a visszamelegedést tartalmaz, mely megfelelően leírja az alapvető dinamikus jelenségeket. Modell prediktív szabályozóstruktúrát alkalmaztunk a probléma megoldására, azonban a szabályozó egyes lépéseinél használatos optimalizálási feladat specialitása miatt egy heurisztikus optimumkereső algoritmus került kifejlesztésre, amely kis komplexitás mellett képes az optimalis megoldás megtalálására, lehetővé téve a valósidejű és költségoptimalis működést.

4. További kutatási irányok

A fentiekben bemutatott eredmények és a megfogalmazott tézisek természetesen nem tekinthetők a kutatási munka végeredményeinek, a kutatómunka az alább vázolt irányokban folyik tovább.

4.1. A megújuló energiaforrások hálózati integrációja témával kapcsolatos további kutatási irányok

A smart grid hálózatokba való integrálhatóság a rendszer kiegészíthet történő kiegészítésével lehetővé válhatna a rendszerirányítás számára az áramminőség paramétereinek központi irányítása.

A rendszer modell Smart Grid Interface-el történő kiegészítésével lehetővé válna az energiaáramlás központi irányítása, a kiserőművi csoportokat egyetlen virtuális erőműként lehetne irányítani.

Azonos, vagy közeli kisfeszültségű transzformátor körzetekbe elhelyezett komplex szabályozók egymásra hatását lehetne vizsgálni.

Elosztott optimalizálási eljárást alkalmazni az egymáshoz közeli, áramminőség javító szabályozóval ellátott inverterek együttes optimalizálására.

4.2. Energiaátalakító rendszerek analízise és identifikációja témával kapcsolatos további kutatási irányok

Aktívan folytatott kutatási irány a kvázipolinomiális reprezentáción alapuló analízis és tervezési módszerek kiterjesztése, valamint olyan speciális esetekre való vizsgálata, amikor a leíró mátrixok ranghiányosak, ami numerikus problémákat jelent bizonyos esetekben.

További kutatási irányként felmerülhet a szinkron generátor további tanulmányozása és a gerjesztés szabályozó újratervezését az MVM Paksi Atomerőmű számára. A gerjesztésszabályozó egy alapegysége az atomerőmű blokk szabályozási struktúrájának, ehhez viszont a szinkron generátor dinamikus modelljét szükséges integrálni az atomerőmű primer körének meglévő szabályozás-orientált modelljéhez, amihez ki kell fejleszteni a turbina és a turbina-szabályozó modelljét is.

A további kutatási irányok között szerepel a szinkron generátor dinamikus modelljének kibővítése, hogy a hibás működési üzemmód leírására is alkalmas legyen, melyhez egy hibaérzékenységi megfigyelőt kell tervezni.

A kifejlesztett modell-analízis és identifikációs módszerek viszonylag könnyedén általánosíthatóak más típusú villamos forgógépekhez, például szinkron-,

aszinkron motorokhoz és generátorokhoz is.

A elektromos jármű akkumulátorokkal kapcsolatos aktuális és jövőbeli kutatási irány a klasszikus paraméter- és állapotbecslési módszerek (Kálmán szűrés, rekurzív paraméterbecslés) adaptálása az akkumulátor aktuális töltöttségi szintjének, és aktuális állapotának megbecslésére minél tágabb hőmérséklet tartományban, ehhez klímakamrás mérések végzésére is szükség lesz a közeljövőben.

5. A tézisekhez kapcsolódó publikációk

- [P1] Péter Görbe, Attila Magyar, Katalin M. Hangos: THD Reduction with Grid Synchronized Inverter's Power Injection of Renewable Sources, 20th International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion June 14-16. 2010 Pisa Italy, Issue Date : 14-16 June 2010, pp: 1381-1387, Location: Pisa
- [P2] Péter Görbe, Attila Magyar, Katalin M. Hangos: Low Voltage Grid Optimization with Power Injection of Renewable Sources and EV batteries, PRES'11, Chemical Engineering Transactions Volume 25, 2011 pp 893-898 ISBN: 978-88-95608-16-7, ISSN: 1974-9791, DOI:10.3303/CET1125149
- [P3] Attila Göllei, Péter Görbe, Attila Magyar: Modeling and optimization of electrical vehicle batteries in complex clean energy systems, Journal of Cleaner Production (2012), doi:10.1016/j.jclepro.2011.12.013 Online: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611005385>
- [P4] Péter Görbe, Attila Magyar, Katalin M. Hangos: Reduction of power losses with smart grids fueled with renewable sources and applying EV batteries, Journal of Cleaner Production (2012), doi:10.1016/j.jclepro.2011.12.021, Online: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611005622?v=s5>
- [P5] László Neukirchner, Attila Göllei, Péter Görbe, Attila Magyar: Voltage Unbalance Reduction of a Local Transformer Area with Domestic Asymmetrical Inverter and Optimal Control Design, Int. J. of Thermal & Environmental Engineering, Vol. 12, No.2(2016), 129-134.
- [P6] A. Magyar, G. Szederkényi and K. M. Hangos. Globally stabilizing feedback control of process systems in generalized Lotka-Volterra form. *Journal of Process Control*, 18:(1) pp. 80-91. (2008)
- [P7] K.M. Hangos, A. Magyar, G. Szederkényi. Entropy-inspired Lyapunov Functions and Linear First Integrals for Positive Polynomial Systems. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena* 10:(3) pp. 105-123. (2015)
- [P8] Attila Fodor, Attila Magyar, Katalin M. Hangos: Dynamic modeling and model analysis of a large industrial synchronous generator, Proc. of Applied Electronics 2010, Pilsen, Czech Republic, ISBN 978-80-7043-865-7, ISSN: 1803-7232, 91-96, 2010.
- [P9] Attila Fodor, Attila Magyar, Katalin M. Hangos: Parameter sensitivity analysis of a synchronous generator, Hungarian Journal of Industrial Chemistry, ISSN: 0133-0276, 38(1):21-26, 2010.

- [P10] Attila Fodor, Attila Magyar, Katalin M. Hangos: Control-oriented modeling of the energy-production of a synchronous generator in a nuclear power plant, *Energy*, 39:135–145, DOI = 10.1016/j.energy.2012.01.054, 2012.
- [P11] Attila Fodor, Attila Magyar, Katalin M. Hangos: MIMO LQ control of the energy production of a synchronous generator in a nuclear power plant, *Electric Power Components and Systems*, 42(15):1673–1682, DOI = 10.1080/15325008.2014.950359, 2014.
- [P12] Attila Magyar, Attila Fodor. Quasi-Polynomial Control of a Synchronous Generator. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*. 41:(1) pp. 51-57. (2013)
- [P13] Attila Göllei, Péter Görbe, Attila Magyar: Model-based Investigation of Vehicle Electrical Energy Storage Systems, PRES'11, *Chemical Engineering Transactions Volume 25*, 2011 pp 477-482 ISBN: 978-88-95608-16-7, ISSN: 1974-9791, DOI:10.3303/CET1125080

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] 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.
- [3] H. Mousazadeh, A. Keyhani, H. Mobli, U. Bardi, G. Lombardi, and T. el Asmar. Technical and economical assessment of a multipurpose electric vehicle for farmers. *Journal of Cleaner Production*, 17:1556–1562, 2009.
- [4] M. Zackrisson, L. Avellán, and J. Orlenius. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles - Critical issues. *Journal of Cleaner Production*, 18(15):1519–1529, 2010.
- [5] P. Vas. *Vector Control of a.c. machines*. Oxford University Press, 1990.
- [6] P. Vas. *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. Oxford University Press, 1998.
- [7] P. Vas. *Artificial-intelligence-Based Electrical Machines and Drives*. Oxford University Press, 1999.
- [8] A. Isidori. *Nonlinear Control Systems*. Springer-Verlag, 1995.
- [9] H. Nijmeijer A. J. Van der Schaft. *Nonlinear Dynamical Control Systems*. Springer, New York, Berlin, 1990.
- [10] K. J. Aström and B. Wittenmark. *Computer-controlled systems*. Prentice Hall, 1997.
- [11] K. Zhou, J. C. Doyle, and K. Glover. *Robust and optimal control*. Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [12] M.A. Henson and D.E. Seborg. *Nonlinear Process Control*. Prentice Hall, NJ, 1997.
- [13] B. Hernández-Bermejo and V. Fairén. Nonpolynomial vector fields under the Lotka-Volterra normal form. *Physics Letters A*, 206:31–37, 1995.
- [14] B. Hernández-Bermejo and V. Fairén. Lotka-Volterra representation of general nonlinear systems. *Math. Biosci.*, 140:1–32, 1997.
- [15] B. Hernández-Bermejo. Stability conditions and Lyapunov functions for quasipolynomial systems. *Applied Mathematics Letters*, 15:25–28, 2002.
- [16] C. Scherer and S. Weiland. *Linear Matrix Inequalities in Control*. DISC, <http://www.er.ele.tue.nl/sweiland/lmi.pdf>, 2000.