Hivatalos bírálói vélemény

Magyar Attila: "Optimization Based Analysis and Operation of Complex Nonlinear Energy Systems"
(Komplex nemlineáris energetikai rendszerek optimalizáció alapú analízise és működtetése)

c. MTA doktori (DSc) értekezésről

A fosszilis energiaforrások csökkenése és a kibontakozó klímaválság új igényeket támasztott a műszaki gyakorlatban a hálózatra kapcsolt inverteres rendszerek működtetése és optimalizálása, a háztartási szektor által igényelt energia gazdaságos kezelése, továbbá az elektromos járművek akkumulátor celláinak biztonságos üzemeltetése területén. Az értekezés eme területek néhány fontos gyakorlati és irányításelméleti kérdésével foglalkozik.

Az értekezés bevezetésre, az alkalmazott módszerek előzetes áttekintésére, a saját eredmények bemutatására, a következtetésekre és függelékre tagozódik Terjedelme a hivatkozásokkal együtt 114 oldal, ebből a függelék 13 oldal, a hivatkozások 13 oldal. Az új eredményekkel 3 fejezet foglalkozik, ezek végén az összesítés (Summary) röviden összefoglalja a fontosabb eredményeket. Külön fejezetbe (Colclusion) került az új tudományos eredmények felsorolása. Ezeket jobb lett volna a három fejezetnél az összesítésekben szétbontva szerepeltetni, hiszen odavalók. A következtetések rész tekinthető egy angol nyelvű tézisfüzet domináns részének, kiegészítve a bevezetésben szereplő célkitűzésekkel. A magyar nyelvű tézisfüzet lényegében ennek a szerkezetnek felel meg.

Az 1. fejezet (bevezetés) az értekezés célkitűzéseit fogalmazza meg. Három területet jelöl ki főbb kutatási irányként, ezek: 1) Modellalapú optimalizálás energetikai rendszerekben. 2) Modellt nem használó optimalizálás villamos energetikai rendszerekben. 3) Kvázi-polinomiális (QP) és Lotka-Volterra (LV) modellel leírható sima nemlineáris dinamikus rendszerek analízise és optimális irányítása.

A 2. fejezet (előkészítés) az értekezésben fontos szerepet játszó definíciókat és az irodalomból átvett előzetes tudományos eredményeket tekinti át a villamos energiarendszerek, a nemlineáris dinamikus rendszerek aszimptotikus stabilitása és az alkalmazott optimalizálási eszközök területén. Ezek a részek megkönnyítik a későbbi saját eredmények (3-5. fejezetek) megértését a részterületeken kevésbé jártas olvasók számára. Az energiarendszerek területén foglalkozik a háromfázisú villamos hálózatok teljesítményének minőségi jellemzésével fazor-technikát használva, a teljes harmonikus torzítás (THD) jellemzésével, a feszültség kiegyenlítettlenség kérdésével (pozitív, negatív és zéró feszültség-szekvenciák, CVUF komplex kiegyenlítettlenségi faktor) és az elektromos piac előzetes 24-órás jellemzésével, amelyeket később a prediktív irányításoknál használni fog. Bemutatja a vizsgált időinvariáns nemlineáris rendszereket állapotteres alakban (ODE) és bemenet-affin alakban, az egyensúlyi helyzet Lyapunov stabilitásának jellemzését (Lyapunov-függvény, pozitivitás, disszipativitás), ezeken belül a QP és LV rendszerek definícióját, továbbá a vizsgált nemlineáris rendszerek beágyazását QP és LV alakú rendszerek körébe. Az alkalmazott optimalizálási technikák körében megfogalmazza az optimalizálási feladatot korlátozások esetén, megadja a modellprediktív optimalizálási feladatot és

blokksémáját, az aszinkron párhuzamos mintakeresési (APPS) technikát és algoritmusát, valamint a robusztus irányításoknál felhasznált lineáris (LMI) és bilineáris (BMI) mátrixegyenlőtlenségek értelmezését, továbbá utal arra, hogy BMI-k megoldására a későbbiekben a MATLAB környezetben elérhető TomLab/PENBMI szoftvert fogja használni.

A 3. fejezet a jelölt által a modellezés, identifikáció és az optimális energiarendszerek működése területén elért eredményeket mutatja be háztartási hűtőgépek energiahatékony ütemezése, akkumulátor cellák modellezése és paramétereinek hőmérsékletfüggő becslése területén. Megadja a terület részletesebb irodalmi előzményeit majd rátér a saját eredményekre.

Megadja a hűtőgép blokksémáját, jeleit és kétállapotú állapotmodelljét. Az állapotváltozók a hűtőgép belső terének léghőmérséklete (Ta) és a hűtőfolyakdéktól elválasztó fal hőmérséklete (Tw). A hűtőfolyadék hőmérsékletének Tc hatása az S(t) bináris jellel ki- és bekapcsolható. A modell paraméterei a hőátadási tényezők (Kw, Ko, Kx, Kc) és a hőkapacitások (Ca, Cw). A cél a 24-órás energiafogyasztás optimalizálása, ahol az óránként változó energia árak táblázata előzetesen éjféltől rendelkezésre áll, a korlátozások Ta és Tw min-max értéktartományai. A folytonosidejű állapotegyenlet mátrixai A1, B1 (on-mód) és A2, B2 (off-mód) ismertek, a rendszerről diszkrétidőre lehet áttérni megválasztott mintavételezési idő mellett. A jelölt megfogalmazta a költségfüggvényt, az alsó-felső korlátokat, ahol az S(t) irányítás a mintavétel ütemében változik, az árak azonban csak óránként. Az optimum probléma megoldására heurisztikus optimális ütemezési algoritmust ad meg, amely 3 szabályon alapul és branch and bound (B&B) elvet használ (Algorithm 2), részei az inicializálás, elágazás és korlátozás (a 3 szabály szerint külön-külön). Megad egy adaptív kiterjesztést is, amelyben a fő paraméter a Ca hőkapacitás (változik a hűtőszekrény tartalmának változásakor betétel és kivét esetén). A Ca paraméter online becslése lényegében gyökmeghatározás a diszkrétidejű modellből képzett Ta(Ca) függvény megváltozásából biszektor módszerrel. Az adaptív kiterjesztés Algoritmus 3-ban lett megfogalmazva. Illusztrációként bemutatásra került egy szimulációs vizsgálat (Case Study) 300s mintavételi idő esetén, a részletes vizsgálat paramétereit az A.1 függelék tartalmazza. Az eredményeket a bemutatott ábrák és táblázatok kielégítően illusztrálják. Az optimalizáláshoz szükséges topt idő a H={1h,2h,3h,4h} predikciós horizontok esetén viszonylag kicsit függ a horizont méretétől (kisebb, mint 2s).

Az ebben a fejezetben vizsgált másik probléma esetén megadja az akkumulátor cella hőmérsékletfüggő modelljét, a levezetésnél felhasználva Tremblay-Dessaint (2009) feltételeit. A két állapotváltozó a kivehető q(t) töltéskapacitás és az i(t) akkumulátor áram egytárolós taggal megszűrt if(t) értéke. A kimenő jel az akkumulátor vb(t) feszültsége, amely a feszültséggenerátor vocv(t) értékének és a belső ellenálláson eső Ri(t) feszültségnek az összege, Q jelöli a teljesen töltött akkumulátor töltését. Megadja a töltés üzemmódra és kisütés üzemmódra az állapotegyenleteket. Az akkumulátor nominális paramétereit egy adott típusú Samsung akku adatlapjából (lásd Table 3.5 az értekezésben és [77]) vette át a további vizsgálatokhoz. Ha T az akku hőmérséklete, akkor a paraméterek az Arrhenius törvény alapján a T-től függő K1, K2 és K3, amelyek rendre szorzatai az adatlapból átvett referencia értéknek és egy-egy exponenciális függvénynek. Az exponensben rendre alpha1, alpha2 és beta paraméterek szerepelnek, megszorozva az 1/T-1/Tref reciprok különbségekkel. A teljes töltés Q(Te) és az E0(T) konstans

potenciál rendre lineárisan függ a Te-Tref és T-Tref hőmérséklet különbségektől. A részleteket a (3.17)-(3.26) egyenletek tartalmazzák. A vizsgálatok során T konstans külső változó volt a töltések és a kisütések során. A jelölt a parméterérzékenységi vizsgálatokat két lépésben végezte el. Először a vizsgálatok konstans hőmérséklet esetén a (3.17)-(3.19) egyenletek alapján a 0°C-50°C tartományban 6 fokozatban történtek 0-100% töltés/kisütés között PRBS áram jellel, mintavételi idő 160s, Tref=25°C. A költségfüggvény predikciós horizontra normalizált értéke kvadratikusan büntette a vb szimulált és becsült értéke közötti hibát. A paraméterbecslési eredményeket az értekezés külön táblázatban és ábrában mutatja be a töltési és a kisütési üzemmódokra az E0, K1, K2, Q paraméterek meghatározására (R azonos a nominális értékkel). Második lépésben történt a referencia értékek és a paraméterek hőmérsékletfüggő együtthatóinak meghatározása. Az akku-paraméterek két csoportra oszthatók. Az első csoportba tartozik E0 és Q, amely lineárisan függ a hőmérséklettől, míg a második csoportban K1 és K2 exponenciálisan függ a hőmérséklettől. Probléma, hogy a cella hőmérséklete nem mérhető. Ezért további pótlólagos feltételek lettek bevezetve. A paraméterbecslést szimulációval végezte MATLAB Optimization Toolbox környezetben (lsqnonlin függvényt és trust region reflective algorimust használva), ennek során a paraméterek változási tartománya ismert volt. Az ábrák és táblázatok jól dokumentálják az elektro-termál akkumulátor modell és a paraméterbecslés hatékonyságát szimulációs környezetben.

A 4. fejezet komplex energiarendszerek modellt nem használó optimális üzemeltetésének kérdéseivel foglalkozik. Két kérdéskört vizsgál: megújuló energiarendszerekben: a teljes harmonikus torzítás (THD) hatásának csökkentését optimalizálással egyfázisú rendszerben és a hálózat aszimmetriájának kompenzálását háromfázisú rendszerben.

A THD hatásának csökkentésére egy magasszintű kompenzálási struktúrát javasol. A helyi felhasználónál a villamosenergia kétirányban áramlik: ha szükséges, energiát vesz fel a hálózatból, de ha felesleges energiája van, akkor visszatáplálja a felesleget a hálózatba. Megadja a struktúra elvi blokkvázlatát megújuló (itt napelemes PVE) energiaforrás és akkumulátor cella esetén, amely direkt optimalizáláson alapul. A kapcsolat a hálózattal a teljesítménymérőn keresztül történik, ezért az áram hullámalakja nem határozható meg egykönnyen, arra a feszültség hullámalakjából és a teljesítmény indikátorokból lehet következtetni. A beavatkozás fontos része egy IGBT transisztor hídkapcsolás, amely induktivitáson keresztül kapcsolódik a hálózathoz. A villamos hálózatba történő beavatkozásra az inverter iout(t) áramát választja, a hálózat vnet(t) feszültség válaszjelére alapozza a költségfüggvény számítását, és az optimalizálás kimenőjele az inverter áramjelének hullámalakja. Megadja a grid-típusú napelemes energiaforrás inverter modelljét, a kompenzálási struktúra részletes blokkvázlatát és a struktúra komponenseinek részfeladatait. A költségfüggvényt az alapharmonikus mellett a feszültségben keletkező 3,5,7,9-edik felharmonikusok fazorjai abszolút értékének négyzetösszegére alapozza. Felteszi, hogy a hálózat vnet(t) kimeneti feszültsége a felharmonikus áram-fazorkomponensek ismeretlen nemlineáris függvénye. A THD torzítások kompenzálásának optimalizálásra az APPS numerikus keresésen alapuló módszert választotta, lásd Algorithm 4, amelyben N(q) a költségfüggvény értéke, N(q-1), ..., N(q-4) a horizonton belül a memóriában tárolt értékek, mk és nk megválasztható súlyok, amelyek részt vesznek a keresési irányok és a lépésközök változtatásában. A kísérleteknél a hálózatot háromféle kapacitív terhelés esetén a Simple Electrical blockset egy simulink modellje

helyettesíti (lásd A.2 függelék). A szimulációs vizsgálatok eredményeit a fejezet 4 ábrája és 2 táblázata illusztrálja.

A háztartások lehetséges megújuló energiaforrásai rendszerint rendszertelenül vannak elosztva, a konverterek rendszerint nem egyfázisúak, ami indokolja a második kérdéskör vizsgálatát a háromfázisú hálózat aszimmetriájának kompenzálására. Az értekezés egy magasszintű struktúrát javasol a kiegyenlítettlenség kompenzálására. A beavatkozó jelet az inverter (ia,ib,ic) áramai alkotják, amelynek hatása megjelenik az elektromos hálózat (va,vb,vc) mért feszültségeiben, amelyet egy aszimmetria indikátor analizál. A cél a háromfázisú feszültségjelek aszimmetriájára alapozott költségfüggvény minimalizálása révén a komponensek fazorjai közötti aszimmetria megszüntetése optimalizálással. Mivel a villamos hálózat folyamatosan változik és nem identifikálható a modellje, ezért csak numerikus optimalizáláson alapuló módszerek jöhetnek számításba a csatlakozási ponton. Az aszimmetria mérésére a feszültségfazorok nominális és aktuális értéke közötti geometriai eltérés jellemzője választható, ahol a nulla hiba esete megfelel az ideális esetnek (szimmetriának). A jelölt a hibajelre alapozott prediktív irányítást javasol, amelynek megadja a részletes blokkvázlatát (Figure 4.10). A numerikus optimalizálás részleteit az APPS-VU elvű Algorithm 5 foglalja össze. Az optimalizálás kimenete az (ia,ib,ic) fazor, amely definiálja a háromfázisú áramforrás inverter hullámalakját, lásd Neukircher-Göllei-Görbe-Magyar (2015). Az értekezésben javasolt módszert szimulációs vizsgálatok eredményei illusztrálják (lásd még A.2 függelék). A szimulációs modellben a feszültség mérési eredmények egy egyetemi labor valódi teljesítményelektronikai rendszeréből érkeztek a reális viszonyok jobb közelítésére. Itt kell megjegyezni, hogy az ezzel kapcsolatos mondat első fele nincs befejezve (lásd p.71 alja). Az eredményeket 3 ábra illusztrálja a fejezetben, ebből az utolsó ábra különféle feszültségindikátorok hatását is összehasonlítja.

Az 5. fejezet nemlineáris rendszerek QP és LV elvű reprezentációjának analízisével és optimalizáláson alapuló irányításával foglalkozik. Két kérdést vizsgál, ezek a sima rendszerek globális stabilitása és a globálisan stabil állapot-visszacsatolás tervezése.

A globális stabilitásanalízis területén megmutatja, hogy a Lotka-Volterra rendszerosztályban entrópia-elvű Lyapunov függvény választható az egyensúlyi pont stabilitásvizsgálatához, ha az egyensúlyi pont az int(R+n) pozitív ortánsból való. Megadja erre az esetre a V(x) Lyapunov függvényt és annak idő szerinti deriváltját, amelynek disszipatívitása (nem-növekvő tulajdonsága) két LMI megoldhatóságával ekvivalens. Ha van megoldás, akkor a trajektóriák korlátosak és globálisan stabilak lesznek.

A globális stabilizáló állapot-visszacsatolás Magyar-Szederkényi-Hangos (2005) eredménye szerint kimenet-visszacsatolás alakjában kereshető, amely megfogalmazható az (5.7) BMI alakjában. Mivel a benne szereplő M mátrix rangja nem maximális, ez a megoldás meghatározását nehézzé teszi. A jelölt a BMI megoldására iteratív LMI technikát (ILMI) javasol. A feladatot előbb az (5.9) BMI alakra hozza az M0, Theta és K mátrixok bevezetésével, majd átírja egy azzal ekvivalens (5.12) stabilizáló LTI kimenet-visszacsatolás tervezési feladattá, amelyben M0=A az állapotmátrix, Theta=B, K=FC és P az ismeretlen mátrix változó. Az iteratív megoldás részletes lépéseit Algorithm 6 foglalja össze. Ha M0=BA rangja nem maximális, akkor kisebb korrekció

szükséges. Néha konvergenciaproblémák is felléphetnek Cao-Lam-Sun (1998) szerint, ha az algoritmusban szereplő alpha paraméter nem konvergál a minimumhoz.

Az (5.7) BMI-vel nem írható elő, mi legyen az egyensúlyi pontja a zárt rendszernek, csupán a kiadódó zárt rendszer globális stabilitása biztosítható. Az egyensúlyi pontot a kiadódó zárt hurkú QP rendszerből kell meghatározni. Ha a kiindulási QP teljesen aktuált, akkor az egyensúlyi pont egy lineáris egyenletrendszer megoldásából számítható.

Az értekezés egy egyszerű fermentálási feladat keretében illusztrálja a visszacsatolás tervezését. Ilyen feladat lép fel biomasszából kinyerhető energiarendszerekben is. A vizsgálat néhány részlete az A.4 függelékbe került.

A 6. fejezet (konklúziók) és a Függelék tekintetében a bírálói véleményt már fentebb megfogalmaztam.

Formai szempontból elmondható, hogy a bíráló szerint az értekezés jó angolsággal lett megírva. Gépelési hibák előfordulnak ugyan és néhány helyen van karakter duplázás is. Talán a p.71. oldal alján a már jelzett befejezetlen mondat volt kissé zavaró. A magyar nyelvű tézisfüzet viszont lehetett volna igényesebb és érthetőbb, hiszen ott kevésbé szigorúak az oldalszám előírások. Zavaró, hogy az értekezésben és a tézisfüzetben mások a tézisekhez tartozó publikációk számozásai. Az értekezésben a tézisekhez tartozó saját publikációk sorszáma [119]-től kezdődik, a magyar nyelvű tézisfüzetben [37]-től. Célszerű lett volna a saját publikációkat új listában indítani azonos számozással mindkét helyen, pl. [S1], [S2] stb.

Az értekezés hiteles adatokat tartalmaz.

A tézisek értékelése

Az értekezés tézisei a 3-5. fejezetek eredményeire épülnek és három téziscsoportba foglalva lettek megfogalmazva. Értékelésükkel már foglalkoztam fentebb, kitérve bizonyos részletkérdésekre is. Itt elsősorban a magyar nyelvű tézisfüzetet követve foglalom össze értékelésemet és nyilatkozom a tézisek elfogadásáról az alábbi megfogalmazásban.

Az 1. téziscsoport modell alapú módszereket mutat be a különböző energetikai rendszerek optimális működésére és paraméterbecslésére. a) Folyamatosan működő elektromos háztartási készülékek költségoptimális ütemezésére modellprediktív ütemezést alkalmaz az éjfél után rendelkezésre álló következő napi és óránként változó áramköltség alapján. Az ütemező jel bináris, értéke az óránál finomabb mintavételi idő ütemében változhat. Az optimalizálás elágazás és korlátozás (B&B) elvű. b) A lítium-akkumulátorok paramétereinek becslése a predikciós hiba minimalizálásán alapul. Követi a hőmérsékletváltozást és meghatározza a lineárisan és exponenciálisan változó paraméterek karakterisztikáit.

A 1. tézist elfogadom új tudományos eredménynek.

A 2. téziscsoport optimalizáláson alapuló beavatkozás tervezést mutat be villamos hálózatok esetén. A módszer nem igényli a rendszer modelljének ismeretét, a kompenzálás tervezése numerikus optimalizáláson alapul. a) Egyfázisú kisfeszültségű hálózatokban a felharmonikusok által okozott torzítás csökkentésére hierarchikus felépítésű kompenzátor struktúrát ad meg. Az

optimalizálás költségfüggvénye a csatlakozási ponton mért feszültség felharmonikusainak függvénye. A kompenzátor a torzítást az optimalizálás eredményeként kapott áram-időfüggvény hálózatba táplálásával csökkenti. Az optimalizálás változói az áramfelharmonikusok amplitúdói és fázisai (fazorjai). b) Háromfázisú hálózatok aszimmetriájának csökkentése alapozható a csatlakozási ponton mért ideális és aktuális feszültségfazorok közötti hibára. A kompenzátor tervezésekor a költségfüggvényben a hiba jellemzésére választható a geometriai szimmetrikus különbségen alapuló norma. Ismeretlen hálózati modell esetén az optimalizálást a kifejlesztett struktúra esetén közvetlen numerikus optimalizálás végzi. Konvencionális villamos hálózat és inverter modell esetén szimulációs kísérletekkel igazolva lett, hogy a fenti normán alapuló kompenzátor tervezés nagyobb mértékű aszimmetria csökkenést eredményez, mint a gyakorlatban általánosan használt feszültség aszimmetria indikátorok esetén.

A 2. tézist elfogadom új tudományos eredménynek.

A 3. téziscsoport sima nemlineáris dinamikus rendszerek kvázi-polinomiális (QP) és Lotka-Volterra (LV) osztálya esetére mutat be új rendszeranalízis és szabályozó tervezési módszereket. a) A QP reprezentációjú rendszerek globális stabilitásvizsgálatát egy lineáris mátrixegyenlőtlenség (LMI) megoldhatósági problémájaként fogalmazza meg. b) A QP alakú rendszerek esetén a globálisan stabil szabályozó egy nemlineáris állapot-visszacsatolás, amellyel a zárt rendszer QP alakban marad. A szabályozótervezés egy bilineáris mátrixegyenlőtlenség (BMI) megoldhatósági problémájaként írható fel. A probléma numerikus megoldására az iteratív lineáris mátrixegyenlőtlenségen (ILMI) alapú módszert javasolja.

A 3. tézist elfogadom új tudományos eredménynek.

Publikáltság: A tézisek eredményei publikálva lettek 2003-2022 között rangos nemzetközi folyóiratokban (10), angol nyelvű hazai folyóiratban (2), rangos nemzetközi konferenciákon (3) és könyvben (1). Az összesen 16 publikáció mindegyike többszerzős (2-4 szerző), közöttük a jelölt 3 esetben az első szerző. Az első szerzős publikációk a 3. téziscsoporthoz tartoznak. Az 1. téziscsoport eredményei 2016-2019, a 2. téziscsoporté 2009-2017, a 3. téziscsoporté 2003-2014 között lettek publikálva.

Kérdések a Jelölthöz:

1. A 3. tézis eredményei 5 helyen lettek publikálva. Ebből 4 helyen szerepelnek társszerzőként MTA doktora fokozattal rendelkező kutatók is. Kérem elhatárolni a 3. tézisen belül az elsőszerzős publikációi körében a saját eredményeit a társszerzőkétől.

2. A 3. tézis témájában hosszú fejlődés tapasztalható napjainkkal bezárólag, lásd a hivatkozott publikációk az értekezés számozása szerint, pl. a [16] (ILMI), vagy a [41] (QP rendszerek) régebbi publikációk. Melyek a főbb változások az előzmények és a jelölt saját eredményei között ebben a folyamatban? Várhatók-e újabb eredmények és numerikus technikák abban a tekintetben, hogy kimenet-visszacsatolás esetén a zárt rendszer egyensúlyi pontja ne kiadódó érték legyen, hanem eltolható az alapjelnek megfelelően a nyílt pozitív ortánsban a globális stabilitás érdekében és/vagy csökkenteni lehessen a zavarójel hatását?

3. A 2. tézis vonatkozásában mik a lehetőségek nagyobb napelemes rendszerek esetén a kísérletezésre a betápláló egységek és a villamos hálózat kapcsolati pontjain a teljesítmény függvényében a vonatkozó szabványok és/vagy ajánlások figyelembevételével? Vannak-e ésszerű határok a teljesítmény és a költségek tekintetében?

Nyilatkozat: **A doktori művet nyilvános vitára alkalmasnak tartom.**

Budapest, 2023. január 17.

Lantos Béla

Lantos Béla

a műszaki tudomány (MTA) doktora