Válasz Dr. Szabó Zoltán professzor úr bírálatára

Mindenekelőtt szeretném megköszönni Dr. Szabó Zoltán professzor úrnak az értekezésem alapos és gondos átolvasását, támogató bírálói véleményét, valamint elgondolkodtató kérdéseit és észrevételeit. Sajnálom, hogy a dolgozatban olyan sok elírás és pontatlanság maradt bent, ami megnehezítette a bírálói munkáját, ezért elnézést kérek.

A bírálatban megfogalmazott kérdéseire válaszaim a következők.

Kérdés: *Ami az APPS algoritmust illeti: egy ész nélküli keresés (blind search) nem feltétlenül lesz hatékonyabb attól, hogy párhuzamosan, több szálon végezzük. Ezt erősíti a 2.3.2 szakasz utolsó mondata is, ami így hangzik: ... With the following pattern followed the local minima of f shall eventually be reached in an undetermined number of steps. Már edzett olvasóként fel sem tűnik, hogy itt f az J. Egyrészt gondolom a szerző itt a megelőző algoritmusra és nem a következő üres sorra utalt, másrészt kérdésként merül fel, hogy akkor miért épp ezt az algoritmust választotta?*

Válasz: A 2. tézisben bemutatott eredmény központi eleme egy koncepcionális kompenzátor struktúra, amely változó paraméterekkel és topológiával rendelkező hálózat esetén is alkalmazható. A javasolt módszer létjogosultsága egy nagy részletességű dinamikus szimulációs modellen került igazolásra, a tézis eredményei is ezeken a szimulációs eredményeken alapulnak. A javasolt kompenzációs struktúra egyik eleme egy optimumkereső eljárás, amelynek keresési tere a hálózatba betáplált áramjelalak paraméterei, költségfüggvénye pedig a hálózat csatlakozási pontján mérhető feszültségből számolt minőségi mutató. Tetszőleges olyan optimalizációs eljárás alkalmazható, amely nem igényli a költségfüggvény deriváltjának ismeretét. Az értekezésben szereplő eredményeket az aszinkron párhuzamos mintakereső (APPS) eljárás alkalmazásával értem el. A választásnak a kutatás egy korai fázisában a Simulink szoftverkörnyezetben való egyszerű implementálhatóság volt a fő oka, ez a szempont azóta nem áll fenn, így gyakorlatilag bármilyen, a fenti szempontnak megfelelő algoritmusra cserélhető, valamint a párhuzamos végrehajtás sem szükséges ebben az alkalmazásban. A MADS (Mesh Adaptive Direct Search) algoritmus [1] valószínűleg egy szerencsésebb választás lenne, mivel jobban konvergál, mint az értekezésben említett mintakereső algoritmus. A tézisben javasolt módszer továbbfejlesztése szempontjából fontos kérdés a korlátok kezelése, mivel egyrészt a betáplálható teljesítményt korlátozza a megújulókból vagy energiatároló egységekből elérhető teljesítmény, másrészt

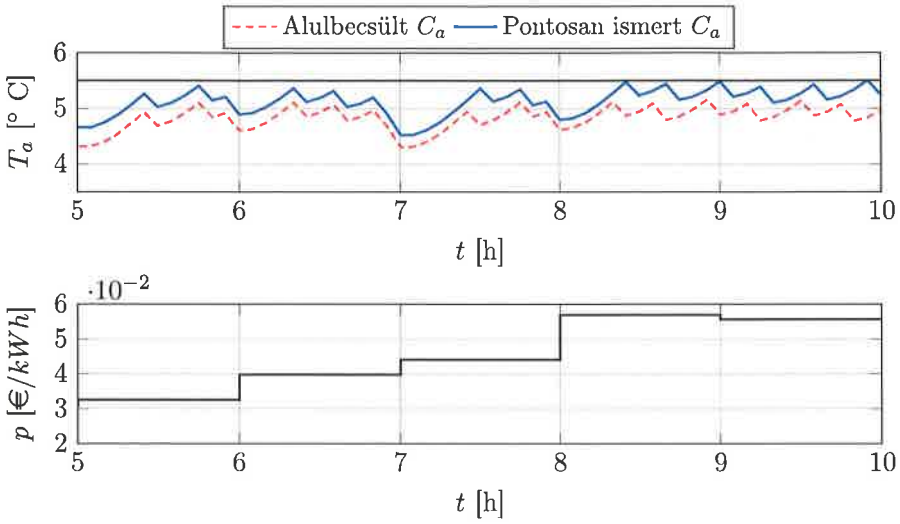
vannak olyan műszaki, árammminőségi, üzembiztonsági előírások, melyek szintén korlátozást jelentenek a betáplált áramjelre nézve. Az alkalmazott mintakereső algoritmus és az alternatívaként javasolt MADS algoritmus is alkalmas korlátok kezelésére.

Megjegyzés: *A fejezet utolsó mondatához egy megjegyzés: attól még, hogy az irányítási feladatokat BMI alakban fogalmazzuk meg, azokat a legritkább esetben oldjuk meg BMI-ként (pld. statikus output feedback), épp a konvexitás hiánya és az ebből következő problematikus numerikus tulajdonságok miatt. Ezért az ... there exist practically applicable and effective algorithms for BMI solution... kitétel igényel némi magyarázatot.*
Válasz: Köszönöm szépen a tisztázó megjegyzést, az idézett mondat valóban problémás. Az állítás első fele állja csak meg a helyét, hiszen léteznek ugyan módszerek, amelyekkel gyakorlatban meghatározhatjuk BMI-k megoldásait, de ezek többségében iteratív eljárások [2], LMI alapú koordinátakereső algoritmusok [3], konvex relaxáción alapuló eljárások [4], azaz valóban nem közvetlenül BMI-ként oldják meg a problémát. Az állítás második fele, miszerint egy BMI-t hatékonyan meg tudunk oldani, valóban erős túlzás volt, hiszen egy NP-nehéz problémáról beszélünk. Ahogy az az értekezés 5. fejezetében látszik, én sem közvetlenül oldottam meg a bilineáris mátrixegyenlőtlenséget, hanem egy iteratív LMI alapú [2] eljárást alkalmaztam.

Kérdés: *Miért épp a hűtőszekrényekre esett a választás? Mekkora megtakarítás várható globálisan, feltéve, hogy a javasolt módszert alkalmazzák elég nagy számban? Mennyire függ ez a külső tényezőktől (például piaci szabályozás, árképzés, stb.) illetve a belső tényezőktől (modell paramétereinek ismerete)? Nincs részletezve, de gondolom a külső szabályzókat (ársávok) valamilyen kommunikációval kapja a szabályzó. Felmerült-e az algoritmus illesztése egy magasabb szintű (hálózatot érintő) szabályozási rendszerhez?*
Válasz: A hűtőszekrény egy kézenfekvő alkalmazási terület volt, mivel minden háztartásban megtalálható, másrészt a kutatás kiindulási fázisában hűtőszekrényről állt rendelkezésre megfelelő minőségű mérési adatsor, amely alapján identifikálható volt a modell.

Nagy számú eszközzel végzett szimulációs kísérleteket nem végeztem, mivel háztartási szintű megtakarítás elérése volt a cél. Globális esetben az elért eredmény valószínűleg nagyban függ a piaci környezettől, illetve ezesetben valószínűleg nem költség, hanem fogyasztás megtakarítás lenne a cél. Egy háztartáson belül több arra alkalmas eszközt alkalmazva a megtakarítás összegződik. Az 1. ábrán megfigyelhető a javasolt módszer egyik jellemző tulajdonsága, miszerint áremelkedés előtt nagyobb mértékben hűt, ezáltal költségmegtakarítást érve el, csökkenő árszint mellett viszont gyakorlatilag nincs számottevő előnye a módszernek. Monoton növekvő óránkénti napi áramár mellett lehet tehát a legnagyobb költségmegtakarítást elérni a javasolt modell prediktív eljárással. Az értekezésben szereplő 3.4 táblázatban található egy szakirodalmi adat, amely alapján az 1. (a) tézisben vázolt adaptív

módszerrel 9,7 %-os költségmegtakarítás érhető el a hagyományos, tehát árinformációval nem rendelkező szabályozáshoz képest.



1. ábra. A heurisztikus ütemezés eredménye pontosan ismert és pontatlan C_a hőkapacitás paraméterértékek mellett $H = 2\,\mathrm{h}$ predikciós horizont esetében. A felső ábrán fekete vízszintes vonal jelzi a hőmérséklet korlátot (5,5 ° C). Az alsó ábra a villamosenergia árszinteket mutatja.

Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy léteznek ipari méretű "hűtőszekrényparkok", például élelmiszerboltok hűtőpultjai, illetve mélyhűtött árukat készítő és forgalmazó vállalatok hűtőházai, amelyekben az energiafelhasználás a háztartási méreteknél tapasztalhatóhoz képest több nagyságrenddel nagyobb lehet. Ezek az ipari méretű hűtőrendszerek is jól leírhatóak és kezelhetőek a javasolt módszerrel. Ezeknél a fenti megtakarítás már jelentős tétel lehet.

A belső tényezők közül a legjobban a modell valós paramétereinek ismeretétől függ a költségmegtakarítás, hiszen a névleges paraméterek üres eszközhöz tartoznak, és ezekkel a paraméterekkel túlságosan konzervatív viselkedést mutat az algoritmus. Az 1. ábrán jól megfigyelhető, hogy alulbecsült paraméter (belső levegő hőkapacitás) mellett a javasolt modell prediktív eljárás feleslegesen alacsony hőmérsékleten tartja a belső levegő hőmérsékletét, amíg a pontosan ismert paraméter mellett a módszer jobban megközelíti a korlátot, azaz nem hűt feleslegesen. Ezért is kulcsfontosságú az adaptív változata a módszernek, amely folyamatosan újrabecsli a paraméterek értékét.

A kutatás során azzal a kérdéssel, hogy az ütemező kitől és milyen formában kapja a másnapi piaci árakat, nem foglalkoztam komolyabban. A probléma ezen részét azzal a feltételezéssel kezeltem, hogy tetszőleges időpontban 24 órára előre ismertek az óránkénti ársávok. A gyakorlatban egy

IoT eszközzel, vagy egy okosotthon rendszerrel ami képes kommunikálni az arra alkalmas háztartási gépekkel és képes az árampiaci adatok elérésére, ez könnyedén megvalósítható.

Az algoritmus illesztése egy lakossági flexibilitási modellhez [5] fog történni a jövőben. A flexibilitást itt abban az értelemben használjuk, hogy a lakossági termelő-fogyasztók (prosumerek) esetében meghatározható, hogy az adott pillanatban mekkora értékkel tudják növelni, vagy csökkenteni a villamosenergia fogyasztást (vagy betáplálást). Ez egy háztartásra nézve nem nagy érték ugyan, de pl. az elosztóhálózat üzemeltetője által aggregált módon már egy figyelemreméltó tétel lehet az árampiacon.

Megjegyzés: *(4.2) itt alul van specifikálva. Ennek megoldása egyértelműen* $v_{net}^{i} = 0$. *Nincs felsorolva, hogy mik a a korlátozó feltételek, mire nézve optimalizálunk, egyáltalán, mi a feladat formalizált megfogalmazása.*

Válasz: Az értekezésben szereplő (4.2) egyenlet (az alábbi (1) egyenlet) valóban csak a költségfüggvénye a megoldandó optimumfeladatnak.

$$J_{PQ}(v_{net}) = \sum_{k=3,5,7,9} |v_{net}^{[k]}|^2 \tag{1}$$

Itt $v_{net}^{[k]}$ a feszültség 3., 5., 7. és 9. felharmonikus komponensét jelenti. Az optimális érték valóban $v_{net}^{[k]} = 0$ lenne ($k = 3, 5, 7, 9$), ami azt jelenti, hogy a hálózati feszültségjelalak gyakorlatilag szinuszos.

Az optimalizálás a hálózatba táplált $i_{out}(t)$ áramjelalakra nézve történik, nevezetesen a 3., 5., 7. és 9. áram felharmonikus amplitúdóját és fázisát változtatjuk a keresés során. A betáplált áram a (2) jelalak formájábanban áll elő

$$i_{out}(t) = |i^{[1]}| \sin(\omega_1 t + \angle i^{[1]}) + \sum_{k=3,5,7,9} |i^{[k]}| \sin(\omega_k t + \angle i^{[k]}), \tag{2}$$

ahol $i^{[1]}$ az áram alapharmonikus $\omega_1 = 2\pi f$ körfrekvenciával ($f = 50\,\mathrm{Hz}$), valamint $i^{[k]}$ reprezentálja a k. áramfelharmonikust $\omega_k = k\,\omega_1$ körfrekvenciával. A keresés ebben a jelosztályban történik, az egyfázisú inverter által aktuálisan visszatáplált áram jelalak mindig az épp aktuális amplitúdó-fázis paraméterek alapján kerül előállításra. A hálózat válasza a költségfüggvényben alkalmazott v_{net} csatlakozási ponti feszültség formájában adódik, ezután értékelhető ki a költségfüggvény.

Kérdés: *Hogyan választotta meg az algoritmusban szereplő paramétereket? Mennyi ideig futott az algoritmus? A vázolt algoritmusok praktikusan végtelen ciklusok: mi volt a leállási kritérium? Miből gondolja, hogy a kapott eredmény optimális, illetve hogyan lehet becsülni a tényleges performanciát (pld. a robusztusság viszonylatában)?*

Válasz: Az APPS keresőalgoritmus egyik legfontosabb paramétere a

$$\mathcal{D} = \{\boldsymbol{d}_1, \ldots, \boldsymbol{d}_p\}$$

keresési irányok halmaza. A munka során tapasztalati úton kerültek beállításra az értékek a két alkalmazási terület esetén külön-külön.

A javasolt algoritmus folyamatosan fut, valóban végtelen ciklusban, hiszen a csatlakozási pont mögötti hálózat folyamatosan és véletlenszerűen változik a fogyasztók és termelők számunkra ismeretlen viselkedésétől függően. Ez azt jelenti, hogy a minimalizálandó költségfüggvény nem csak az általunk adott beavatkozástól, hanem számtalan egyéb zavarástól is függ, és akár ugyanarra a beavatkozásunkra adott válasz is megváltozhat, továbbá az elméleti optimumot soha nem érjük el, csak megközelíteni tudjuk. Ilyen körülmények között a robusztusság becslésére csak az értekezés 4.6 ábráján is ismertetett szimulációs alapú, időben változó nemlineáris terhelésekre adott válasz formájában volt lehetőség.

Kérdés: *Van-e valami módszer, javaslat, a használt iteratív algoritmus paramétereinek megválasztására?*
Válasz: A [2] cikkben ismertetett, eredetileg statikus kimenet visszacsatolás tervezésre alkalmazott iteratív LMI alapú eljárást alkalmaztam és fogalmaztam át a Lotka-Volterra rendszerek állapotvisszacsatolás tervezésére. Az algoritmus legfontosabb paramétere a $\boldsymbol{Q}$ mátrix, amelynek megválasztásáról [2] anyagban javasolt értéket a kvázipolinomiális visszacsatolástervezés problémára adaptálva határoztam meg. A gyakorlati tapasztalatok alapján azonban $\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{I}$ választás mellett is konvergál a módszer.

Végül ismét köszönöm az alapos és részletes bírálatot és kérem válaszaim elfogadását.

Veszprém, 2023. május 23.

Magyar Attila

Hivatkozások

[1] C. Audet and J. Dennis. Mesh adaptive direct search algorithms for constrained optimization. In *SIAM J. Opt*, 17(1):188–217, 2006.

[2] Cao, Yong-Yan and Lam, James and Sun, You-Xiam. Static output feedback stabilization: an ILMI approach. *Automatica*, 34(12):1641–1645, 1998.

[3] E. Simon, P. R-Ayerbe, C. Stoica, D. Dumur and V. Wertz. LMIs-based coordinate descent method for solving BMIs in control design. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1):10180–10186, 2021. https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.00464

[4] M. Kheirandishfard, F Zohrizadeh, R Madani. Convex Relaxation of Bilinear Matrix Inequalities Part I: Theoretical Results. *2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2018, Miami , USA. https://doi.org/10.1109/CDC.2018.8619567

[5] I. G. Balázs, A. Fodor and A. Magyar. Quantification of the flexibility of residential prosumers. *Energies*, 14(16):4860, 2021. https://doi.org/10.3390/en14164860