



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Sleisz Ádám

**Integrált klíringmodellek az
összeurópai áramtőzsde innovatív
ajánlattípusaihoz**

Tézisek

KONZULENS

Dr. Raisz Dávid

2018

1 Bevezetés

1.1 A téma elhelyezése

A villamosenergia-szektor szereplőinek – a legtöbb gazdasági vállalkozáshoz hasonlóan – szüksége van pénzügyi tőkére. Mivel a tőke mennyisége korlátozott, a megfelelő elosztás kérdése kulcsfontosságú: a piacok működésével és szabályozásával kapcsolatos szakterület mindig ennek érdekében kísérli meg a lehető legjobb kereskedelmi folyamatok, szervezeti struktúrák és regulációs döntések felderítését.

A villamosenergia-piacok különösen fontos és gazdag kutatási területet biztosítottak az elmúlt két évtizedben. Elválaszthatatlan részét alkotják az energiaszektor globális liberalizációjának, ami e kritikus szektor gazdasági hatékonyságának javítására törekszik a megfelelő műszaki biztonság fenntartása mellett.

A másnapi áramtőzsdék megjelenése és elterjedése e törekvés eredményének tekinthető. Ezek olyan nyilvános, központi felületet biztosítanak, melyen a villamos energia kereskedelme szervezeten folyhat. Minden áramtőzsde saját specifikációval rendelkezik az időbeosztás, összekapcsolási lehetőségek, ajánlatfajták, stb. szempontjából, mely tényezők miatt a tényleges megvalósításuk alapvetően különbözhet egymástól.

Az Európai Unió egy jelenleg is zajló nagy projektje az ún. Belső Energiapiac megteremtése [1]. Ennek keretében egy egyesített áramtőzsde is létrejön, amely saját klíringalgoritmussal is rendelkezik (ennek neve EUPHEMIA [2]). Az algoritmusra vonatkozó eredeti specifikáció megvalósítása ugyanakkor nem triviális, mert abban számos innovatív elem, illetve egyes tagállamok saját áramtőzsdéiről származó alkotórészek együtt kerülnek alkalmazásra.

A disszertáció hatékony optimalizálási modelleket mutat be, hogy a legnagyobb kihívást jelentő kérdések közül többet is megválaszoljon. A szóban forgó kérdések a komplex kínálati ajánlatok és az egyesített beszerzési árak megvalósításával kapcsolatosak.

1.2 Motiváció: az integrált modellek szükségessége

A problémák megfogalmazásának és a megoldási eljárásoknak a szétválasztása fontos tényező az alkalmazott optimalizálás kifejlődésében és gyors elterjedésében. Optimumkeresési problémák sok tudományterületen előkerülnek, és ennek megfelelően rendkívül sokszínű és gyakran speciális tudást képeznek le. Ugyanakkor számos pontosan meghatározott problémátípusra léteznek generikus megoldó módszerek, amelyek önmagukban is terepet szolgáltatnak a kutatáshoz (pl. [3], [4] és [5]).

A modellek formalizálását azért előnyös elválasztani a megoldási technikáktól, mert így azoknak a kutatóknak, tudományos és ipari szakértőknek (legyenek akár közgazdászok, mérnökök, szociológusok stb.), akik leírják a matematikai modelleket, nem kell ismerniük és megvalósítaniuk a megoldást kereső algoritmusok minden apró részletét. Ehelyett generikus megoldók alkalmazásával könnyen végezhetnek kísérleteket és egyszerűen összehasonlíthatják problémáik különböző változatait. A generikus keresőrutinok alkalmazásához a modelljüket viszont valamelyik adott problémaosztály sztenderd formájába kell alakítaniuk.

Ezzel párhuzamosan az is igaz, hogy ilyen keretek között a megoldási eljárásokat szolgáltató matematikusoknak nem kell képzést kapniuk minden szakterületből, ahol optimalizálásra kerül a sor. A megfelelő jellemzők és mérőszámok segítségével minden modell összehasonlítható az adott problémaosztály többi tagjával, ehhez pedig nem szükséges a korlátok és változók pontos értelmének ismerete.

A tudás és a munka ilyen megosztása különösen jótékony hatással bír ipari alkalmazások számára, mert ennek köszönhetően számos professzionális megoldó szoftver hozzáférhető a kereskedelemben. Mivel e megoldók a legkorszerűbb számítástechnikai eljárások mellett széles körű tapasztalatot is magukba foglalnak, általában gyorsan és stabilan képesek eredményeket szolgáltatni.

A villamosenergia-tőzsdék klíringjének esetében a leírt megközelítést gyakran mégsem alkalmazzák. A probléma nemkonvex elemeinek kezelése gyakran több lépésben valósul meg. Kezdetben ezeket az elemeket eltávolítjuk a modell leírásából. A megmaradó magmodellt – az EUPHEMIA esetében ezt „jólét maximalizáló problémának” nevezik [2] – generikus algoritmusokkal megoldjuk, majd az eredményeit specializált heurisztikus programrutinokban használjuk fel. E rutinok – az EUPHEMIA esetében együttesen az „ármeghatározó probléma” [2] – szolgálnak arra, hogy kijavítsák a korábban kiszervezett korlátok sérüléseit és azoknak is megfelelő megoldásokat találjanak.

A megoldás helyességének utólagos kikényszerítése számottevő visszaesést okozhat annak minőségében. Egy ilyen felépítésű algoritmusban a globális optimumkeresés csak iteratív módon valósítható meg, a jó célfüggvényértékeket és a korlátokat maradéktalanul kielégítő pontokat kereső rutinok ismételt, felváltva történő futtatásával. A folyamatban nincs olyan pillanat, amikor a megoldás minőségét és helyességét egyszerre vesszük figyelembe.

E megközelítés szerint az áramtőzsde egyes jellemzőinek kísérleti megváltoztatása a klíringprogram számára megoldhatatlan vagy rendkívül nehéz feladatot teremthet. Ha viszont mind a modellen, mind a megoldási eljárásán módosítunk, akkor nem marad könnyű módja a különböző változatok összehasonlításának. A megoldónk specializált jellegének köszönhetően a más területeken alkalmazott módszerek tapasztalatai is sokkal kevésbé használhatóak, mert nem csupán egyes folyamatbéli lépések különböznek, hanem sokszor alapvető jellemzőket (pl. optimalitási kritériumok) sem ismerünk.

A COSMOS [6] volt az első európai klíringmodell, ami a leírt viszonylatban sztenderdnek tekinthető. Megfogalmazható vegyes egészértékű kvadratikus programként, ami egy generikus megoldó algoritmusok számára kezelhető kategória. A szabványos problémák előnyös tulajdonságai hozzájárulnak az algoritmus sikeréhez szerte Európában.

Az EUPHEMIA tőzsdemodellje a COSMOS kiterjesztett, bővített változata. Ha az új elemeket be tudnánk illeszteni egy hasonló vegyes egészértékű kvadratikus problémába, akkor az imént részletezett kedvező következmények elérhetővé válnának. A disszertáció e cél elérését kísérli meg az EUPHEMIA kritikus elemeire nézve.

2 Tézisek

2.1 Első tézis

A villamosenergia-termelés jellemzői a kezdetek óta a villamosenergia-piaci döntések egyik legbonyolultabb aspektusát jelentik [7]. Az erőművek építésére, működtetésére, fenntartására és végső leállítására szánt kiadások fedezetét ideális esetben a piac biztosítja, ami azt vonja maga után, hogy a megtermelt energia minden egységéhez számos fix és változó költségelem tartozik. Ehhez általában jó néhány műszaki korlát (pl. minimális kiadott teljesítmény, terhelésváltoztatási képesség) is társul. E tényezőkből is fakad, hogy a villamos energia napi kereskedelme a legtöbb más termékhez viszonyítva igen összetett.

Az imént említett jellemzők leghátrányosabb következménye, hogy az erőművek általános gazdasági modellje nemkonvex természetű; az ilyen nemkonvex komponensek az áramtőzsdék klíringjét a gyakorlatban jelentősen megnehezítik. A nemkonvexitások bevezetése tehát elkerülhetetlen a termelők érdekeinek megfelelő megjelenítéséhez, de az általuk okozott számítási terhet a lehető leginkább mérsékelni kell. Ez a trade-off helyzet többé-kevésbé kezelhető a kínálati ajánlatok megfelelő megadásával (pl. kínálati blokkok különböző fajtái esetén).

A komplex ajánlatok egy eltérő megközelítést adnak ugyanerre a célra. Ezeknek is megvan a saját nemkonvex komponense, az ún. minimális bevételi feltétel, és ezzel képesek az energiatermelőkhöz a blokk ajánlatoknál jobban illeszkedő gazdasági modellt alkotni.

(1. tézis) *Új matematikai megfogalmazást találtam a minimális bevételi feltételekkel ellátott komplex ajánlatokhoz az összeurópai másnapi áramtőzsdén, amellyel ezeket az ajánlatokat különleges számítási heurisztikák nélkül be lehet illeszteni az európai piacklíring folyamatba. A marginális árazási logika ajánlati bevételekre gyakorolt hatását felismerve és kihasználva az új matematikai modell az eredendően nemkonvex bevételszámítást konvex esetekre bontja fel. Az eredményként előálló klíringmodellt generikus, kereskedelmi forgalomban lévő megoldó szoftverek is képesek kezelni, ezáltal pedig egyrészt kifinomultabb elemzési lehetőségek nyílnak meg, másrészt javul a minimális bevételi feltételek koncepciójának gyakorlati alkalmazhatósága. Utóbbi fejlemény segíti az energiatermelés hatékony piaci képviselését megcélzó törekvést.*

Releváns publikációim: [S2], [S3], [S4], [S5], [S7] és [S8].

2.2 Második tézis

A jelenleg működő áramtőzsdék körében két általános megközelítést figyelhetünk meg: ezekre általában európai, illetve amerikai piacmodellként hivatkozunk. Az amerikai megközelítés sokkal inkább centralizált jellegű, erős regulátori szerep és a rendszerszintű szolgáltatások integrált kereskedelme jellemzi. Fő különbség továbbá az időbeli összefüggések, a terhelésváltozási képességek kezelése is. Az amerikai tőzsdéken e tényezők figyelembe vétele eredendően viszonylag egyszerű [8], [9], az önmenetrendező termelők jelenléte miatt azonban az európai modell alig foglalkozik velük.

Az utóbbi gyakorlat a mai trendek tükrében kérdésessé vált. Kellemtelen jelenség, hogy az európai erőművek terhelésváltozási korlátait – melyek eredendően konvex jellegűek – potenciálisan instabil nemkonvex ajánlattípusokkal kell reprezentálni (pl. blokkok és smart blokkok [10]), vagy a piaci árat kell nagyon finom pontossággal becsülni ajánlattétel előtt. Emellett új elképzelések jelentek meg integrált áramtőzsdékről, amelyeken az európai szabályozási tartalékok és az energia kereskedelme párhuzamosan történne [11], [12], ez pedig a gradiens képességek konkrét figyelembe vételét mindenképp megkövetelné.

A javasolt összeurópai áramtőzsdén – valószínűleg e kihívásokra is reagálva – a komplex kínálati ajánlatokhoz terhelésváltozási feltételek is tartozhatnak. Mivel azonban ezeknek a leírása a hivatalos dokumentációban [2] igen rövid és homályos, a pontos értelmezésük és megvalósításuk lényegében nyitott kérdés.

(2. tézis) *Új matematikai megfogalmazást találtam a terhelésváltozási feltételekkel ellátott komplex ajánlatokhoz az összeurópai másnapi áramtőzsdén, melynek a beillesztése és alkalmazása nem jelenti az európai klíring folyamat átfogó módosítását. Az elemi ajánlatok elfogadási szabályai – az alapvető modellezési elvárásoknak megfelelően – biztosítják az ajánlattevők elégedettségét, azaz maximális többletet írnak elő számukra az adott piaci árak mellett. Ez az árazási séma a gradienskorlátok árnyékárainak bevezetését követeli meg, melyet az optimalizálás dualitáselmélete és az amerikai áramtőzsdéi gyakorlat is lehetővé tesz. Mivel a használt egyenletek lineárisak, az európai klíringmodell elvi számítási hatékonyságát nem rontják.*

A fő eredmények összefoglalását az [S1], [S4], [S6], [S7] és [S8] publikációk tartalmazzák.

2.3 Harmadik tézis

Az első és második tézishez kifejlesztett ajánlati modellek nem használhatóak egyszerre egy adott komplex ajánlatban, ennek fő akadálya pedig az árazási szabályokban keresendő. A minimális bevételi feltételhez szükséges bevételszámítást a szokásos marginális árazás teszi lehetővé, a terhelésváltozási feltétel viszont egyfajta indirekt árazást alkalmaz az ajánlattevői elégedettség biztosítása végett. Utóbbi esetben egy elemi ajánlat elfogadása vagy visszautasítása nem csupán az adott órás piaci ár függvénye, hanem a gradienskorlátok árnyékárjai is befolyásolják.

Azokat a komplex ajánlatokat, melyekhez minimális bevételi és terhelésváltozási feltételek is tartoznak, általános komplex ajánlatnak nevezzük. Az ajánlattevői elégedettségre ezen ajánlatok esetében nem adhatunk garanciát, mert a minimális bevételi feltétel nemkonvex jellege miatt előfordulhatnak paradox visszautasítások (ilyenkor az ajánlattevő nem a legnagyobb többletet nyeri el az adott árak ismeretében). Mindazonáltal az ajánlattevői elégedettség csorbítását továbbra is csak ilyen forgatókönyv mellett fogadjuk el; az általános komplex ajánlatok elfogadott elemi ajánlatainak a 2. tézishez kidolgozott indirekt árazást kell követnie. Ennek következtében az általános komplex ajánlatok működő modelljéhez egy módosított bevételszámítást kell bevezetnünk.

(3. tézis) *Új matematikai megfogalmazást találtam a minimális bevételi feltételekkel és terhelésváltozási feltételekkel is ellátott komplex ajánlatokhoz az összeurópai másnapi áramtőzsdén. Az új modell a minimális bevételi feltételek és a terhelésváltozási feltételek külön modelljeiből származik: e komponensek egyesítését az előnyös jellegzetességeik megőrzésével viszi végbe, azaz az előálló probléma továbbra is kezelhető konvex vegyes egészértékű kvadratikus problémákat megoldó rutinokkal és a gradienskorlátokkal kapcsolatos ajánlattevői elégedettség sem csorbul. Az új megfogalmazás kulcsfontosságú összetevője a komplex ajánlatok bevételének módosított kiszámítása, melyhez a gradienskorlátok hatását modellező segédbevételek kerültek bevezetésre.*

E fejezet eredményeit az [S4] és [S10] cikkekben tettem közzé.

2.4 Negyedik tézis

A villamosenergia-piacok csak akkor működhetnek hatékonyan, ha a résztvevők valós, torzítatlan adatokat közölnek az ajánlataikban. Bármilyen eltérés ettől az alapelvtől hátrányos lehet az egész piac számára. Ez a kijelentés a terhelésváltozási képességekre is

érvényes [13]. Az előző tézisekben bemutatott klíringmodellek kimondott célja is az, hogy az ajánlatban megadott gradienskorlátokat a legmegfelelőbb módon vegyék figyelembe.

Az igazmondásnak ez a követelménye a játékelméletből is eredeztethető, lényegében ugyanaz a fogalom, mint az általános allokációs mechanizmusok stratégiabiztossága [14]. Egy mechanizmus stratégiabiztos, ha nem kínál lehetőséget a részvevőknek a többi szereplő viselkedésének becslésén alapuló stratégiák alkotására. Egy stratégiabiztos áramtőzsdén a legjobb döntés mindig az „őszinte” ajánlattétel: a tőzsdére bekerülő többi ajánlattól függetlenül semmilyen előny nem érhető el a saját ajánlati paramétereink eltorzításával.

A 3. tézishez módosított bevételszámítás lehetővé tette az általános komplex ajánlatokra vonatkozó ösztönzések elemzését. Az első tesztek felfedték, hogy az eredeti általános komplex ajánlat koncepció váratlan következményekkel jár ilyen tekintetben.

(4. tézis) *Megmutattam, hogy – bizonyos körülmények között – a minimális bevételi feltétellel és terhelésváltozási feltétellel is ellátott komplex ajánlatok a terhelésváltozási paramétereik eltorzítására ösztönözhetik az ajánlattevőket. A gradienskorlátok szándékos alulbecslése nagyobb allokációkhoz vezet olyan időszakokban, mikor magasabb piaci árak várhatóak, ami végeredményben megnövekedett többletet jelent a valós paraméterek ajánlatban való megadásának esetéhez képest. Ez a jelenség potenciálisan hátrányos a piac számára, és megfelelő kezelést igényel a piac vagy a szabályozás átalakításával.*

2.5 Ötödik tézis

Az egyesített beszerzési árak fogalmát az olasz áramtőzsdére alkották meg, annak érdekében, hogy kezelni tudják az országon belüli árzónák között a hálózati átviteli korlátok miatt létrejövő árkülönbségeket. Ennek következtében az olasz PUN (Prezzo Unico Nazionale) rövidítés Európa-szerte használatos. Az alapötlet az, hogy a keresleti ajánlatok beadói még a zónák piaci árainak szétválása esetén is ugyanazt az árat fizetik az energiáért, ez a speciális ár – a PUN – pedig az egyes zónák áraiból számítható.

A fő probléma az, hogy a PUN definíció szerinti kalkulációja a szélesebb európai gyakorlatban működésképtelen, mert folytonos nemkonvexitást jelent a klíringmodellben. A megfelelő egyenletet bevezetve a létrejövő optimalizálási probléma a nemkonvex vegyes egészértékű nemlineáris programok tárgykörébe kerülne, ami az egyik legnehezebben megoldható problémaosztály [15]. Egy új modell megalkotására van szükség, amely kezelhető konvex vegyes egészértékű megoldók alkalmazásával.

(5. tézis) *Új matematikai megfogalmazást találtam az egyesített beszerzési árakhoz a hivatalos, összeurópai másnapi áramtőzsdén, amellyel e konstrukciót különleges számítási heurisztikák nélkül be lehet illeszteni az európai piacklíring folyamatba. Az egyesített beszerzési árak meghatározása a bevételi-kiadási egyensúly explicit kikényszerítésén keresztül történik, ehhez pedig szükségessé válik a piacra beadott összes ajánlat és a hálózati összeköttetések integrált bevételszámítása. Az új modell kompatibilis a hivatalosan támogatott ajánlatfajták és hálózati feltételek többségével. Ez az első, egyesített beszerzési árakra vonatkozó klíringmodell, amely kezelhető generikus optimalizációs szoftverek által, jelentősen bővítve ezzel a koncepció megvalósítási és elemzési lehetőségeit.*

Az alfejezettel kapcsolatos legfontosabb tudományos eredmények az [S2] és [S9] publikációkban lelhetőek fel.

3 A tézisek értéke a gyakorlatban

A létrehozott integrált áramtőzsde-klíringmodellek egyik legfontosabb erénye, hogy a piaci elemzőknek és kutatóknak komplex ajánlatok jelenlétében sem szükséges közvetlenül foglalkozniuk az áramtőzsdei folyamatok és azzal kapcsolatos kísérletek numerikus számítási vonatkozásaival; a professzionális vegyes egészértékű kvadratikus megoldók használata elégséges. Bár e szoftverek alkalmazása figyelmet és tapasztalatot kíván, ezzel együtt is jóval egyszerűbb, mint az integrált modellek nélkül elkerülhetetlen speciális heurisztikák kifejlesztése és módosítása. Az integrált modellek e tulajdonsága különösen jótékony hatású nagy léptékű ipari kutatások és alkalmazások esetén.

Az értekezés legtöbb új ötlete egy ilyen természetű kutatási projekt során merült fel. A projekt 2013 és 2015 között valósult meg, központi témája pedig a villamos energia és a szabályozási tartalékok másnapi időtávon történő összekapcsolt kereskedelme volt. Hivatalos címe: "Villamosenergia-piac modellezés, szimuláció és kísérleti rendszer fejlesztése kooptimalizációs eljárások kutatásával (PiSzéM)", azonosítója: GOP-1.1.1-11-2012-0583. A projektet a magyar kormány és az Európai Unió finanszírozta.

A kitűzött cél egy kombinált energia-tartalék kereskedelmet kezelő európai piacdesign, a hozzá tartozó klíringalgoritmus, valamint néhány egyéb segédsoftver megalkotása volt. A közös piaci platform létrejöttét igazoló legfőbb érv, hogy az energiatermelés és a tartalékok az erőművek ugyanazon képességeiből erednek, a kölcsönös hatások és függőségek figyelembe vétele pedig javítja a piaci hatékonyságot [16]. Tény, hogy a rendszerszintű szolgáltatások elkülönített piaca egyes országokban (pl. Magyarországon) sokkal kevésbé likvid, mint a független áramtőzsde, ez pedig instabil és általában igen magas tartalékletétési árat von maga után. A tartaléktermékek áramtőzsdére való bevonását ugyanakkor oly módon kell kivitelezni, ami kielégíti az összeurópai piac-összekapcsolás követelményeit.

Az utóbbi kritérium azt is magában foglalja, hogy a megtervezendő klíringmodellnek komplex ajánlatokat is tartalmaznia kell, ezért a hatékony és pontos megvalósításuk kritikussá vált. Sőt, a disszertációban szereplő javaslatok végül hasznosnak bizonyult az ún. kombinált energia-tartalék ajánlatok megalkotása során is [12]. E kombinált ajánlatok tulajdonképpen komplex ajánlatok, amelyeket bővítettünk fel- és leszállási árgörbékkel, valamint az ajánlattevő szabályozási tartományának paramétereivel. Megmaradnak ugyanakkor az eredeti komplex ajánlatok EUPHEMIA által meghatározott [2] komponenseit, pl. a minimális bevételi feltételt és a terhelésváltozási feltételt.

Az említett projekt három legfontosabb eredményterméke:

- egy piacüzemeltető szoftver, ami a lehető legjobb erőforrás-allokációt és a rendszerbiztonság javítását célozza meg;
- egy piacmegfigyelő (monitoring) eszköz az energia- és tartalékpiacon folyamatok elemzésére;
- egy kereskedői tréning-szimulátor, ami képes különböző kereskedési eseménysorok létrehozására és visszajátszására oktatási és stratégiaépítési céllal.

Az értekezés számos gyakorlati eredményét – leginkább az első három tézissel kapcsolatosakat – beépítettük az elsőként felsorolt eredménytermékbe, a piacüzemeltető szoftverbe. E szoftvert alapos teszteknek vetettük alá, illetve felhasználtuk jó néhány piaci forgatókönyv elemzéséhez [S8]. A generikus AMPL környezet vegyes egészértékű megoldóinak közvetlen alkalmazása jelentős szerepet játszott a projekt sikerében.

A kooptimalizált másnapi áramtőzsde gondolatának európai továbbvitele elsősorban nemzetközi támogatás és együttműködés függvénye.

4 A szerző hivatkozott publikációi

- [S1] Sleisz, Ádám. 2013. "Power Exchange Simulation as an Interactive Educational Tool." In International Youth Conference on Energy. doi: 10.1109/IYCE.2013.6604129.
- [S2] Sleisz, Ádám, Péter Sőrés and Dávid Raisz. 2014. "Algorithmic properties of the all-European day-ahead electricity market." In 11th International Conference on the European Energy Market (EEM14). doi: 10.1109/EEM.2014.6861275.
- [S3] Sleisz, Ádám, and Dávid Raisz. 2014. "Clearing algorithm for minimum income condition orders on European power exchanges." In Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2014 55th International Scientific Conference on, 242-246. doi: 10.1109/RTUCON.2014.6998204.
- [S4] Sleisz, Ádám, Dániel Divényi, Beáta Polgári, Péter Sőrés, and Dávid Raisz. 2015. "Challenges in the formulation of complex orders on European power exchanges." In 12th International Conference on the European Energy Market (EEM). doi: 10.1109/EEM.2015.7216673.
- [S5] Sleisz, Ádám, and Dávid Raisz. 2015. "Efficient Formulation of Minimum Income Condition Orders on the All-European Power Exchange." *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science* 59 (3): 132-137. doi: 10.3311/PPee.8582.
- [S6] Sleisz, Ádám, and Dávid Raisz. 2016. "Complex supply orders with ramping limitations and shadow pricing on the all-European day-ahead electricity market." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 83: 26-32. doi: 10.1016/j.ijepes.2016.03.061.
- [S7] Sleisz, Ádám, and Dávid Raisz. 2016. „Clearing models of complex supply orders on European power exchanges.” Alkalmazott Matematikai Konferencia, Győr.
- [S8] Polgári, Beáta, Ádám Sleisz, Péter Sőrés, Dániel Divényi, and Dávid Raisz. 2016. "Proposal of a New European Co-optimised Energy and Ancillary Service Market Design - Part II - Mathematical Model, Case Study and Prototype." In 13th International Conference on the European Energy Market (EEM).
- [S9] Sleisz, Ádám, and Dávid Raisz. 2017. "Integrated mathematical model for uniform purchase prices on multi-zonal power exchanges." *Electric Power Systems Research* 147: 10-21. doi: 10.1016/j.epsr.2017.02.011
- [S10] Sleisz, Ádám, and Dávid Raisz. „ New model and implementation of power plants' general complex orders on European electricity markets." *Journal of Electrical Engineering – Elektrotechnický časopis*, bírálólat alatt.

5 Hivatkozások

- [1] European Parliament, Council of the European Union. 2009. „Directive 2009/72/EC.” *Official Journal of the European Union* 52: 55-93. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2009.211.01.0055.01.ENG&toc=OJ:L:2009:211:FULL.
- [2] EPEX Spot, GME, Nord Pool, OMIE, OPCOM, OTE, TGE. 2016. *EUPHEMIA Public Description: PCR Market Coupling Algorithm*. <https://www.nordpoolspot.com/globalassets/download-center/pcr/euphemia-public-documentation.pdf>.
- [3] Achterberg, Tobias. 2007. *Constraint Integer Programming*. PhD Dissertation. Technical University of Berlin, Berlin.
- [4] Dey, Santanu S. 2010. *Cutting Planes in Mixed Integer Programming*. <http://www2.isye.gatech.edu/~sdey30/IntroCuttingPlanes.pdf>.
- [5] Berthold, Timo. 2006. *Primal Heuristics for Mixed Integer Programs*. Diploma Thesis, Faculty of Mathematics, Technical University of Berlin, Berlin.
- [6] APX, Belpex, EPEX Spot. 2011. *COSMOS Description: CWE Market Coupling Algorithm*. https://www.apxgroup.com/wp-content/uploads/COSMOS_public_description2.pdf.
- [7] Meeus, Leonardo. 2006. *Power Exchange Auction Trading Platform Design*. PhD Thesis, Katholieke Universiteit, Leuven.
- [8] Van Vyve, Mathieu. 2011. *Linear prices for non-convex electricity markets: models and algorithms*. http://uclouvain.be/cps/ucl/doc/core/documents/coredp2011_50web.pdf.
- [9] Wu, Tong, Mark Rothleder, Ziad Alaywan, and Alex D. Papalexopoulos. 2004. “Pricing Energy and Ancillary Services in Integrated Market Systems by an Optimal Power Flow”, *IEEE Transactions on Power Systems* 19 (1): 339-347. doi: 10.1109/TPWRS.2003.820701.
- [10] EPEX Spot. 2014. *EPEX Spot: Introduction of Smart block bids – Linked block orders and exclusive block orders*. <https://www.epexspot.com/document/25495/Smart%20blocks%20-%20presentation>.
- [11] Chatzigiannis, Dimitris I., Pandelis N. Biskas, and Grigoris A. Dourbois. 2016. “European-Type Electricity Market Clearing Model Incorporating PUN Orders.” *IEEE Transactions on Power Systems*. doi: 10.1109/TPWRS.2016.2542823.
- [12] Polgári, Beáta, Péter Sőrés, Dániel Divényi, Ádám Sleisz, Dávid Raisz. 2015. "New Offer Structure for a Co-optimized Day-ahead Electricity Market." 12th International Conference on the European Energy Market (EEM15). doi: 10.1109/EEM.2015.7216668.
- [13] Oren, Shmuel S., Andrew M. Ross. 2005. “Can we prevent the gaming of ramp constraints?,” *Decision Support Systems* 40 (3–4): 461-471. doi: 10.1016/j.dss.2004.05.008.

-
- [14] Muller, Eitan, Mark Sutterthwaite. 1983. *Strategy-Proofness: The Existence Of Dominant Strategy Mechanisms*.
<https://ideas.repec.org/p/nwu/cmsems/568.html>.
- [15] Burer, S., Letchford, A. N. 2012. "Non-convex mixed-integer nonlinear programming: A survey." *Surveys in Operations Research and Management Science* 17 (2): 97-106. doi: 10.1016/j.sorms.2012.08.001. FICO. 2009. *Xpress-Mosel User Guide: Release 3.00*.
http://www.fico.com/en/wp-content/secure_upload/Xpress-Mosel-User-Guide.pdf.
- [16] Sőrés, Péter M., Dániel Divényi, Beáta Polgári, Dávid Raisz, Ádám Sleisz. 2015. "Day-ahead Market Structures for Co-optimized Energy and Reserve Allocation." 12th International Conference on the European Energy Market (EEM15). doi: 10.1109/EEM.2015.7216667.