



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamos Energetika Tanszék

Sőrés Péter Márk – MSc II. évfolyam

**Áramlás alapú kapacitáskalkulációs eljárás
alkalmazása villamosenergia-piacok
összekapcsolása során**

TDK dolgozat

TÉMAVEZETŐ:

Dr. Raisz Dávid,
egyetemi docens

BUDAPEST, 2012

"A dolgozat bemutatását a TÁMOP - 4.2.2.B-10/1--2010-0009 "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" című program támogatta."

Tartalomjegyzék

TARTALOMJEGYZÉK.....	II
ÖSSZEFOGLALÓ.....	IV
ABSTRACT.....	V
1. BEVEZETÉS	1
1.1 A FELADAT ELHELYEZÉSE	1
1.2 A DOLGOZAT FELÉPÍTÉSE	4
2. SZŰK KERESZTMETSZET KEZELÉSI ELJÁRÁSOK.....	6
2.1 A SZŰK KERESZTMETSZETEK KEZELÉSE	6
2.2 EXPLICIT KAPACITÁSAUKCIÓK	8
2.2.1 Egyedi explicit kapacitásaukciók.....	8
2.2.2 Koordinált explicit kapacitásaukció	9
2.3 IMPLICIT KAPACITÁSALLOKÁCIÓS ELJÁRÁSOK.....	10
2.3.1 Piac-szétválasztás	11
2.3.2 Piac-összekapcsolás	11
3. HÁLÓZATI KAPACITÁSOK SZÁMÍTÁSI ELJÁRÁSAI.....	15
3.1 NTC ALAPÚ KAPACITÁSKALKULÁCIÓ	15
3.2 ÁRAMLÁS ALAPÚ KAPACITÁSKALKULÁCIÓ.....	16
3.2.1 Áramlás alapú kapacitásjellemzők	17
3.2.2 Áramlásjellemzők számítása CEE régiós másnapi FBCA esetén	19
3.2.3 Kapacitásjellemzők számítása CWE FBMC esetén	20
3.2.4 Áramlás alapú korlátok az implicit allokációk során	21
3.3 PTDF SZÁMÍTÁSA DC LOAD FLOW SZÁMÍTÁS EREDMÉNYÉBŐL	21
3.4 ÁRAMLÁS ÉS NTC ALAPÚ KAPACITÁSFOGALMAK KAPCSOLATA.....	23
4. MÁSNAPI IDŐTÁVÚ SZERVEZETT VILLAMOSENERGIA-PIAC.....	25
4.1 MÁSNAPI KERESKEDEÉS.....	26
4.1.1 Órás ajánlatok.....	26
4.1.2 Blokk ajánlatok.....	27
4.1.3 Ajánlati korlátok.....	27
4.2 KLÍRING A MÁSNAPI PIACON	28
4.2.1 Vételi-eladási görbe.....	28
4.2.2 Ár és mennyiségi határozatlanság	30
5. A PIACKLÍRINGET SZÁMÍTÓ PROGRAM	31
5.1 A KLÍRINGFELADAT MATEMATIKÁJA	31
5.2 A SZOFTVER IMPLEMENTÁLÁSA MATLAB KÖRNYEZETBEN	32
5.3 A MARKET COUPLING SOLVER KLÍRINGALGORITMUSÁNAK ELEMEL.....	33
5.3.1 Bemenő adatok, állandó együtthatók.....	33
5.3.2 Az algoritmus változói	33
5.3.3 A célfüggvény.....	34
5.3.4 Piaci korlátok	35
5.3.5 Áramlás alapú hálózati korlátok	35
5.4 A KLÍRINGSZOFTVER MŰKÖDÉSE	36
5.4.1 Adatok beolvasása	37
5.4.2 STEP 1	39
5.4.3 STEP 2	39
5.4.4 STEP 3	40
5.4.5 Eredmények	40
5.5 HÁLÓZATI KORLÁTOK ELŐZETES SZŰRÉSE.....	40
5.5.1 A szűrési feladat	41
5.5.2 Áramlás alapú hálózati korlátokat szűrő algoritmus.....	41
5.5.3 Példa az előzetes szűrés működésére.....	43

5.6	HATÁRKERESZTEZŐ MENETRENDEK SZÁMÍTÁSA.....	44
5.6.1	<i>Jelenlegi megoldás a CWE régióban.....</i>	44
5.6.2	<i>Általános megoldás.....</i>	45
6.	A BŐVÍTETT PIACKLÍRING SZOFTVER ALKALMAZÁSA VIZSGÁLATOKRA.....	48
6.1	ÁRAMLÁS ALAPÚ KORLÁTOK IMPLEMENTÁLÁSÁNAK TESZTJEI.....	48
6.1.1	<i>Implementálási teszt egyszerű ajánlatokkal, két piacra.....</i>	48
6.1.2	<i>A presolver hatékonyságának vizsgálata</i>	50
6.2	ÁRAMLÁS ALAPÚ KORLÁTOK SZÁMÍTÁSA NYILVÁNOS ADATOKBÓL, HÁLÓZATSZÁMÍTÓ PROGRAMMAL.....	51
6.3	VALÓS PIAC-ÖSSZEKAPCSOLÁSOK SZIMULÁCIÓJA	53
6.3.1	<i>Piaci ajánlatok a tőzsdéken</i>	53
6.3.2	<i>Ismert, valós hálózati és kereskedelmi adatok.....</i>	53
6.3.3	<i>Izolált és korlát nélküli eredmények</i>	54
6.3.4	<i>ATC alapú összekapcsolások.....</i>	55
6.3.5	<i>Hálózati modell beállítása, áramlás alapú korlátok képzése</i>	56
6.3.6	<i>Releváns áramlás alapú korlátok, a presolver eredménye</i>	57
6.3.7	<i>AMF módosítása, jelentkező szűk keresztmetszetek vizsgálatához</i>	58
6.3.8	<i>Társadalmi jólét.....</i>	59
	ÖSSZEGZÉS.....	61
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	62
	IRODALOMJEGYZÉK	63
	ÁBRAJEGYZÉK.....	66
	TÁBLÁZATJEGYZÉK	67

Összefoglaló

Az európai villamosenergia-piacok liberalizációja mind a mai napig nem zárult le. A folyamat célja az uniós belső villamosenergia-piac (IEM) megteremtése, mely a tagállami piacok továbbéléseként ún. multi-zonális felépítésű. A közösségi jogalkotók keretjellegű iránymutatásokban határozzák meg az integráció során alkalmazandó eljárásokat. A legjelentősebb célterületen, a másnapi időtávon a célmodell a szervezett villamosenergia-piacok (tőzsdék) összekapcsolása, mely során a kereskedett energiával kapcsoltan, implicit módon kerül kiosztásra a hálózat teljesítmény-átvivő képessége. [1] A villamos infrastruktúra szűk keresztmetszetei korlátozzák az energiatőzsdék közötti és más határkeresztező szállításokat. Ezen átviteli képességek meghatározására ún. koordinált, áramlás alapú kapacitásszámítási módszert kell a jövőben bevezetni, mely – ellentétben a jelenlegi NTC alapú fogalmakkal – képes kezelni az energia-tranzakciók hatására a sűrűn aláhurkolt európai átviteli hálózat elemein elosztva megjelenő fizikai áramlásokat.

A piac-összekapcsolás és az áramlás alapú kapacitásszámítás együttes alkalmazásával jelentősen javítható a piac hatékonysága, azaz maximalizálható a célfüggvényként explicite is megjelenő osztársadalmi jólét. Munkám legfőbb célja egy a Villamos Energetika Tanszéken kifejlesztett piacklíring algoritmus továbbfejlesztése volt, mely során áramlás alapú kapacitások kezelését implementáltam. [2]

Dolgozatomban bemutatom az Európában alkalmazott, illetve bevezetni tervezett szűk keresztmetszet kezelési eljárásokat, szervezett piacokat és a kapacitáskalkulációs eljárásokat. Összevetem a két bevezetni tervezett (nyugat- és kelet-közép-európai piacrégiós) áramlás alapú eljárás fogalmait. Mindezen információkra építve kidolgoztam az áramlás alapú korlátok publikus leírásokban nem szereplő matematikai megfogalmazását, és implementáltam a MATLAB környezetben futó, összekapcsolt piacokat klíringelő programban. Az algoritmusban az eredményül szolgáló határkeresztező bilaterális tranzakciók meghatározására egy új, a régiós implementációtól független megoldást alkalmaztam. [3]

Az elkészített szoftver képességeit nemcsak egyszerűbb esetekre demonstráltam, hanem megvizsgáltam egy publikus információkból felépített, közép-európai átviteli hálózati modell kapacitásadataira is. Elemeztem a hálózati kiesések hatásait, és identifikáltam a legkritikusabb átviteli elemeket. A jelentős mennyiségű hálózati kapacitásadat hatékony és gyors feldolgozására előzetes szűrési megoldást fejlesztettem ki.

Munkám eredményeképpen a piacklíring szoftver az IEM célmodelljének megfelelő kapacitásfogalmak kezelésére is alkalmassá vált, és alapul szolgál a témában további oktatási és kutatási feladatok elvégzésére.

Hivatkozások:

- [1] Agency for the Cooperation of Energy Regulators: „Framework Guidelines on Capacity Allocation and Congestion Management for Electricity” *Published 29th July 2011*
- [2] Divényi Dániel Péter, Dr. Raisz Dávid, Sleisz Ádám, Dr. Dán András: „Szervezett villamosenergia-piac algoritmus fejlesztése és alkalmazása” *Elektrotechnika 105. évf, 2012/07-08 pp.5-7., Budapest*
- [3] Rouquie Djabali, Joel Hoeksema, Yves Langer: „COSMOS description – CWE Market Coupling Algorithm” *Final 1.1 version, 14th January 2011*

Kulcsszavak: piac-összekapcsolás, áramlás alapú kapacitásallokáció, szervezett villamosenergia-piac, szűk keresztmetszet kezelés

Abstract

Liberalization of the European electricity markets in the EU is still not finished. The aim of the development is to create an Internal Electricity Market (IEM) which has a so called multi-zonal structure as a remnant of individual member states' markets. The applicable methods for the integration process are regulated by framework guidelines approved by EU policy makers. The envisioned target model for day-ahead markets is the coupling of power exchanges. Market couplings allocate transmission capacity by implicit methods i.e. simultaneously with the traded energy. Between exchanges and other cross-border transactions are limited by congestions in the electric grid. Coordinated, flow-based capacity calculation methods should be introduced in the near future for determining these transfer capabilities which – unlike the current NTC based calculation – can assess real physical power flows occurring on the network branches of the highly meshed transmission network in the continental Europe.[1]

Market performance can be significantly improved by using market coupling and flow-based capacity calculation jointly, that is social welfare explicitly defined as an objective function can be maximized. Main contribution of my work was upgrading a market clearing algorithm written by the associates of the Department of Electric Power Engineering implementing flow-based capacity constraints [2]

In my paper I present the congestion management methods used and planned to be introduced in Europe, the power exchanges and capacity calculation procedures. I compare the two planned (Central East and Central West European) flow-based allocation process. Based on this information I presented the mathematical formulation of flow-based constraints unattainable from public descriptions and I implemented these expressions into the market coupling solver software running in MATLAB environment. The algorithm uses a new approach independent from the regional solutions to calculate the resulting cross-border bilateral transactions. [3]

I demonstrated the capabilities of the software not only for simple problems but for using capacity figures from a real load flow model of the Central European transmission grid constructed from publicly available information, too. I studied the consequences of outages and I indentified the most critical network elements. For a fast and efficient analysis of the high amount of network data I developed a prefiltering algorithm.

As a result of my work the market coupling solver software can handle the novel capacity definitions defined in the target model of the IEM and it can facilitate further research and academic projects.

References:

- [1] Agency for the Cooperation of Energy Regulators: „Framework Guidelines on Capacity Allocation and Congestion Management for Electricity” *Published 29th July 2011*
- [2] Divényi Dániel Péter, Dr. Raisz Dávid, Sleisz Ádám, Dr. Dán András: „Szervezett villamosenergia-piac algoritmus fejlesztése és alkalmazása” *Elektrotechnika 105. évf, 2012/07-08 pp.5-7., Budapest*
- [3] Rouquia Djabali, Joel Hoeksema, Yves Langer: „COSMOS description – CWE Market Coupling Algorithm” *Final 1.1 version, 14th January 2011*

Keywords: market coupling, flow-based capacity allocation, power exchange, congestion management

1. Bevezetés

1.1 A feladat elhelyezése

Modern gazdaság és társadalom elképzelhetetlen megbízható és megfelelő minőségű villamosenergia-szolgáltatás nélkül. A fejlődés eredményeképpen az addig széttagolt villamos ellátási szigetek összekapcsolódtak, létrehozva az országos méretű, egységes, állami tulajdonú hálózatokat. A villamosenergia-szolgáltatás szerepének növekedésével egyre fontosabbá vált a megbízhatóság kérdésköre is. Az 1950-es évektől kezdve az országos hálózatok között egyre több rendszerösszekötő távvezeték létesült. Ezek elsődleges szerepe az üzemvitel biztonságának növelése, a szükséges tartalékok mennyiségének csökkentése volt. Az integráció szerves folyamánként létrejöttek a szinkronjáró villamosenergia-rendszeregyesülések. (ld. 1.1 ábra).

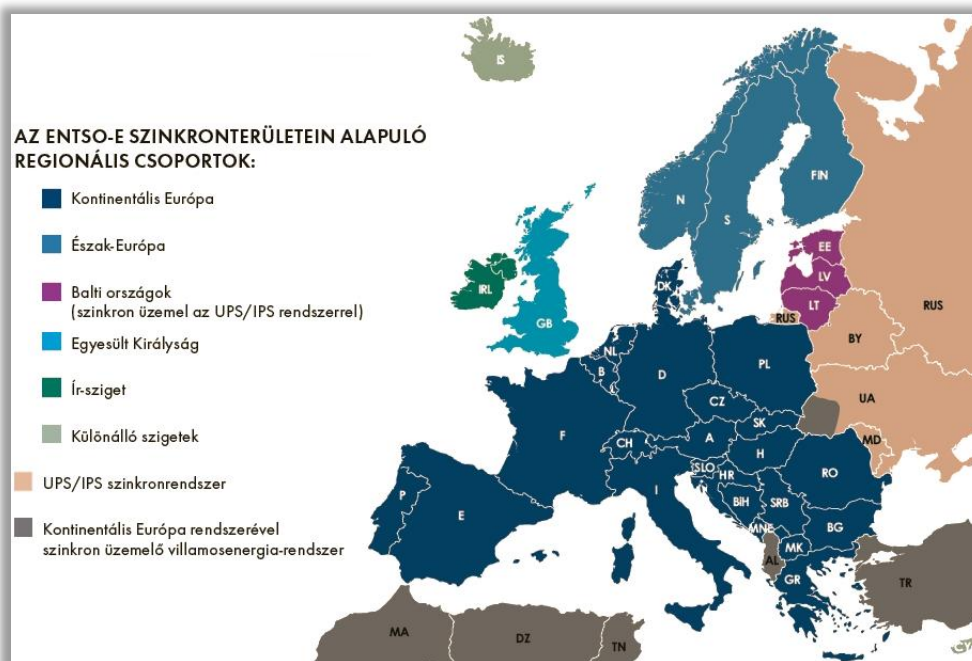
A szinergikus együttműködés lehetőségeinek szélesítése, a villamos kapcsolatok erősítése lehetővé tette az üzemszerű villamosenergia-kereskedelmet a kooperációk tagjai között. Kezdetben a monopolhelyzetű, vertikálisan integrált villamosipari vállalatok végezték ezen energiaszállításokat. A XX. sz. utolsó évtizedében államok szerepe fokozatosan csökkent a reálgazdaságban, privatizálva számos, addig állami tulajdonú energiavállalatot. A liberalizáció célja a növekvő hatékonyság, csökkenő fogyasztói árak, valamint a termékek és szolgáltatások minőségének emelkedése. A villamosipari versenypiac megteremtése azonban mind a mai napig nem zárult le, melynek elsődleges oka a szektor speciális helyzete. [1]

Ugyan a villamos energia kezelhető ugyanolyan piaci áruként, mint bármely más termék, azonban különleges sajátosságokkal rendelkezik: [2][3][4]

- A minőségi villamosenergia-szolgáltatás **stratégiai fontosságú**, tartós zavara rendkívül súlyos károkat okoz.
- A hálózaton a **villamos teljesítmények** (aggregált fogyasztások és betáplálások) **egyensúlya** minden pillanatban teljesül, mint fizikai törvényszerűség. Ahhoz, hogy ez megfelelő minőségi paraméterek mellett, illetve fenntarthatóan történjék a villamos energia előállításának a fogyasztással minden időpillanatban egyensúlyt kell tartania.
- A felmerülő **igények** mind rövidtávon, mind pedig hosszabb távon folyamatosan **változnak**, becslésük nehézségekre ütközik¹.

¹ Különösen igaz ez az erőművi beruházások során figyelembe vett 15-30 éves időtávlatra.

- A villamos energia „útja” a hálózaton nem a kereskedői szándékok szerinti, hanem az mindenkor a fizikai törvényeknek megfelelően **áramlik**.
- A termék eljuttatása csak **egyetlen** módon, az adott **hálózati infrastruktúrán** keresztül lehetséges.



1.1 ábra: Szinkronjártó villamosenergia-rendszerek Európában [1]

A villamos hálózat olyan költséges és kiterjedt, hogy nem merülhet fel az infrastruktúrák versenye, így a hálózatot üzemeltető és fejlesztő vállalatok szükségszerűen természetes monopóliumok. [2] Magyarországon a legnagyobb feszültségintű elemekből álló átviteli hálózat tulajdonosa és üzemeltetője, valamint a rendszerirányító és piacszerző feladatokat a MAVIR Zrt.² látja el.

A piacnyitás eredményeképpen a villamos energia, mint termék kereskedelme a lehető legnagyobb mértékben elválí a szállítástól és a minőség biztosításától. Így létrehozható az ideális versenyhez fokozatosan közelített, jelentős szerepű liberalizált piaci szegmens, azaz a villamos energia kereskedelme. Azonban még e részterület esetén sem lehet eltekinteni a valós fizikai korlátoktól. A rendszerösszekötő hálózati elemek kapacitása legtöbbször nem elegendő a piaci árak különbségét kiegyenlíteni igyekvő nagy volumenű határkeresztező villamosenergia-kereskedelemhez. Ezt röviden úgy

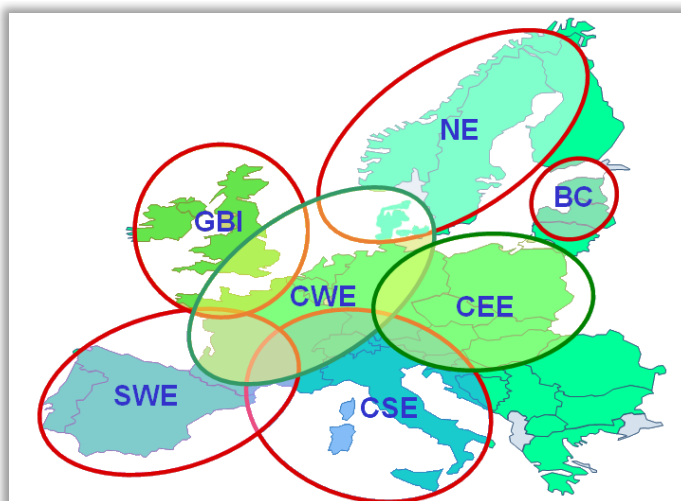
² Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt.

lehet megfogalmazni, hogy a villamos hálózat egyes elemei bizonyos esetekben **szűk keresztmetszetet**³ jelenthetnek. [2]

Mindezekből következik, hogy szükség van a korlátozott műszaki lehetőségeket figyelembe vevő kapacitásszámítási és –elosztási, azaz allokálási eljárások alkalmazására a piaci folyamatok (jellemzően a határkeresztező kereskedelem) részeként. A kapacitásallokáció kulcsszerepet játszik a rövidtávú ellátásbiztonság fenntartásában, biztosítja a várható szűk keresztmetszetek elkerülését. [5]

Az Európai Unió célja a közös, integrált villamosenergia-piac (IEM⁴) létrehozása. A fokozatos piacnyitás következtében az európai piac, a nemzeti villamosenergia-rendszerek továbbéléseként ún. több zónás (*multi-zonal*) felépítésű. A tagállami határok egyben kijelölik az IEM területi egységeinek, a zónáknak a határait is, melyeken belül a villamos energia ára azonos.

Az árzónák közötti kapcsolatot a határkeresztező kapacitások kiosztásával lehetővé tett nemzetközi villamosteljesítmény-szállítások biztosítják, így az IEM megteremtésének kulcsa a kapacitásallokációk, azaz a szűk keresztmetszetek előzetes kezelési lehetőségeinek koordinálásában van. Jelentősége miatt a jogalkotók közösségi szinten érvényes rendeleteket, irányelveket fogalmaztak meg erre a területre. Az Európai Bizottság 2006-ban módosított 1228/2003/EK rendelete alapján a koordinációt elsőként regionális szinten kell megvalósítani. [2][6]



1.2 ábra: Villamosenergia-piaci régiók az EU-ban

A regionális felosztás célja az volt, hogy a piacok integrációját kisebb, kezelhetőbb méretű régiókban lehessen fokozatosan elvégezni, majd ezen régiókat egyesítve

³ angolul: congestion

⁴ Internal Electricity Market

alakítani ki a belső piacot. Az egyes régiók egymástól függetlenül önálló megoldásokat kezdtek kialakítani a kapacitások koordinált allokációjára, mely megoldások olyannyira eltérők voltak (explicit vagy implicit megközelítés, NTC vagy áramlás alapú kapacitásszámítás, stb.), hogy ezek összekapcsolása kezdett lehetetlenné tünni.

Szükségessé vált egy definit célmodell megállapítása, melyet minden régió köteles lett követni. 2010-ben elfogadásra került a villamosipari érdekeltek által a Firenzei Fórumon tett javaslat, miszerint célmodellként a másnapi határkeresztező kapacitások allokálására az áramlás alapú kapacitásszámításra épülő ár alapú piac-összekapcsolást (FBMC⁵) kell bevezetni. [7]

Az Európai Bizottság további elképzeléseket, javaslatokat fogalmazott meg a kapacitás allokációk további (nemcsak a másnapi időtávra vonatkozó) területeire: [7]

- Hosszú távú (éves és havi) piacok: A fizikai határkapacitás jogok (PTR⁶) felől a pénzügyi jogok (FTR⁷) felé kell elmozdulni.
- Napon belüli (*intraday*) piac: „folyamatos kereskedés” a régiókon belül és a régiók között is.
- Határkapacitás-számítás: Harmonizált, koordinált kapacitás kalkuláció, közös hálózati modell alapján.

1.2 A dolgozat felépítése

Jelen tudományos diákköri dolgozat – a kitűzött részfeladatoknak megfelelően – az alábbi fő részekből áll:

- Ismertetem a szűk keresztmetszetek kezelését, megelőzését biztosító Európában alkalmazott explicit és implicit kapacitás-kiosztási eljárásokat.
- Bemutatom a nettó átviteli kapacitás és az áramlás alapú kapacitáskalkulációs megközelítést, valamint a 3.2.4 fejezetben ismertetem az általam megadott, implicit allokációk esetén alkalmazható áramlás alapú kapacitáskorlátokat leíró egyenleteket, melyeket tovább részletezek az 5.3.5 pontban.
- A másnapi szervezett villamosenergia-piacok történő kereskedelem alapvető működésének részletezése után, az elszámolási (klíring) algoritmus matematikájával foglalkozom.

⁵ Flow Based Market Coupling

⁶ Physical Transmission Right

⁷ Financial Transmission Right

- Bemutatom tanszéken fejlesztés alatt álló Market Coupling Solvert és az elvégzett, áramlás alapú korlátok kezeléséhez szükséges bővítéseket, azaz algoritmus környezetében megfogalmazott új hálózati kapacitáskorlátokat és a további adatfeldolgozó rutinokat. [8]
- Az 5.5 és 5.6 fejezetekben bemutatom dolgozatom további kontribúcióit, az előszűrési módszert, valamint a határkeresztező szállítások meghatározásának új módszerét.
- Az elkészített szoftver képességeit példaszámításokon keresztül demonstrálom, melyek nemcsak egyszerű teszt adatsorokra terjednek ki, hanem megvizsgálom a kifejlesztett előszűrés hatékonyságát, valamint egy valós kereskedési napra vonatkozó adatsorra tesztelem a program működését. A 6.2 fejezetben levezetem, hogy a publikus adatokból hogyan lehet előállítani az áramlás alapú korlátokat, alapként felhasználva egy régiós átviteli hálózati rendszermodellt.

2. Szűk keresztmetszet kezelési eljárások

Az európai villamosenergia-piac liberalizációjának célja a szabad kereskedelem korlátainak lehető legnagyobb mértékű lebontása, a belső villamosenergia-piac létrehozása. Ennek egyik fő fizikai akadályát jelenleg a határkeresztező szállításokat korlátozó infrastrukturális szűk keresztmetszetek jelentik, melyek gyakran a határmetszéken, a szomszédos rendszerirányítói hálózatokat összekötő távvezetéseken jelentkeznek. A kontinentális Európa átviteli hálózata sűrűn aláhurkolt topológiájú, és jellemzően rövid, maximum 150–200 km hosszúságú távvezetésekkel rendelkezik. Ebből adódóan a hálózati szűk keresztmetszeteket elsősorban a hálózati ágak termikus határárama jelenti (nem pedig a stabilitási korlátok). [2]

Fontos kiemelni, hogy a szűk keresztmetszetek fogalma, vagyis az, hogy milyen hálózati állapot tekinthető túlterheltnek függ a megkívánt üzembiztonsági kritériumoktól is. Általánosan alkalmazott vezérelv az ún. „**n-1**” elv, vagyis a hálózat bármely állapotában egy ún. szokásos kontingencia bekövetkezésekor is minden üzemi paraméternek határértéken belül kell lennie. Ilyen eset egyetlen távvezeték, erőművi gépegység, transzformátor, fázistoló transzformátor, 50 Mvar-nál nem kisebb söntfójtó/söntkapacitás vagy egy egyenáramú összeköttetés kiesése. [9]

Összefoglalva tehát nemcsak az adott időtávra előre jelzett szélsőséges üzemállapotok esetén előforduló szűk keresztmetszeteket kell figyelembe venni és kezelni, hanem legalább az egyszeres szokványos kiesésekkel gyengített üzemállapotokat is. [5]

2.1 A szűk keresztmetszetek kezelése

A szűkkeresztmetszet-kezelés négy lépésből áll: [10]

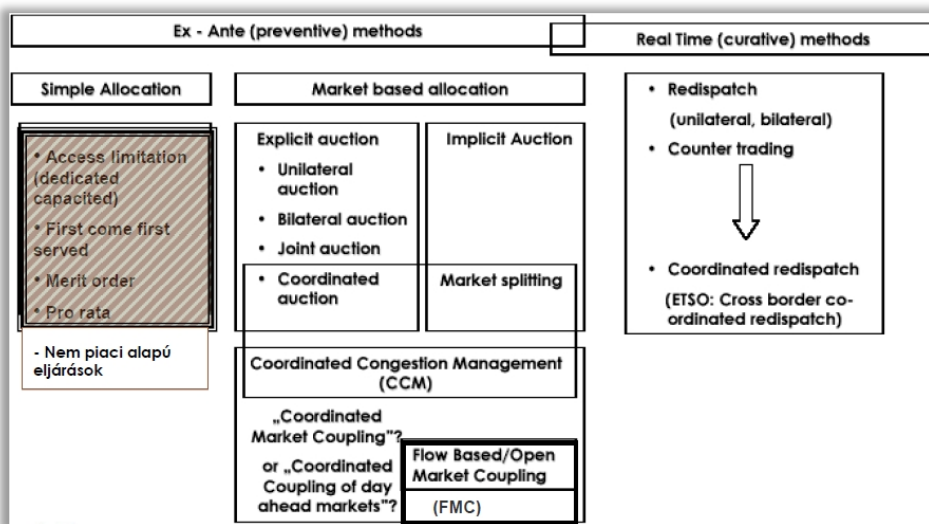
1. Elsőként a hálózat teljesítmény-átvivő képességét, átviteli kapacitását kell számszerűsíteni. Ez a kapacitás függ többek között az adott időtávra előre látható jellemző hálózati üzemállapottól (pl.: karbantartások, fogyasztások, erőművi teherelosztás), ezen előrejelzés pontosságának korlátaitól.
2. Az rendelkezésre álló kapacitások kiosztása az azt igénybe venni szándékozók között. Az allokációs eljárásokat két típusba lehet sorolni:
 - explicit módszerek, amikor a kapacitás, külön szállítási jogként, illetve
 - implicit módszerek, mely esetekben a kereskedett energiához kapcsolódóan kerül kiosztásra a kapacitás.

3. A hálózaton kialakuló szűk keresztmetszetek előrejelzése (CF⁸), a ténylegesen létrejövő kereskedelmi tranzakciók ismeretében.
4. Ha az előrejelzések miatt szükségessé válik, akkor a rendszerirányítóknak kötelességük az operatív üzemirányítás eszközeivel beavatkozni és megelőzni, vagy elhárítani a hálózati szűk keresztmetszeteket.

A kapacitások allokálásának, kiosztásának célja a meglévő, illetve várhatóan igénybe vehető hálózati átvivő képesség értékesítése a kereskedők között, a villamosenergia-rendszer biztonságos üzemének fenntartásával.

Két különböző megközelítés létezik a kapacitások számítására. Egyik az ún. NTC⁹ alapú fogalmak, amelyek a menetrendezhető szállítások volumenére közvetlenül vonatkozó fogalmak, határmetszékenként, és szomszédos rendszerirányítónként. A másik, újszerű megközelítés az áramlás alapú, melyben a kalkuláció eredménye nem a tranzakciókhoz kötött mennyiségeket, hanem a hálózat többlet szállításokra rendelkezésre álló fizikai áramlási lehetőségeit adja meg. Az allokáción kiosztott szállítási jogok és az általuk a hálózaton létrehozott áramlások közötti kapcsolatot az ún. PTDF¹⁰ tényezők adják meg. (Bővebben a kapacitáskalkulációkról ld. a 3. fejezetet)

A következő ábra összefoglalóan mutatja be az alkalmazható szűk keresztmetszet kezelési megoldásokat. Két csoportot lehet elkülöníteni: a preventív eljárásokat, vagyis a kapacitások előzetes kiosztását, valamint a valós idejű, szűkületeket feloldó, operatív beavatkozásokat. [10]



2.1 ábra: Szűk keresztmetszet kezelési módszerek összefoglalása [1]

⁸ Congestion Forecast

⁹ Net transfer capacity – nettó átviteli kapacitás

¹⁰ Power transfer distribution factors – teljesítményáramlás-eloszlási tényezők

2.2 Explicit kapacitásaukciók

Az explicit allokáció esetében a villamos energiát és a határkeresztező szállításához szükséges kapacitásjogot külön-külön, egymástól független módon kell megvásárolni. Az explicit allokáció átlátható, piaci módszere a szabadpiacon az aukció. A kapacitásaukció során a hálózathasználók szervezett keretek között ajánlatot tesznek adott időszakban rendelkezésre álló kapacitás (ATC¹¹) igénybevételére. Az aukciókban közös, hogy csak akkor kell a kiosztott kapacitásjogokért fizetni, ha a szállítási igények meghaladják a rendelkezésre álló átviteli képességet. Európában főszabályként kimondható, hogy ebben az esetben az utolsóként (akárcsak részlegesen) elfogadott igény ajánlati ára szerint köteles minden nyertes fél fizetni. A kapacitásjogok lehetnek fizikai (PTR), vagy fejlett piacok esetén finansziális átviteli jogok (FTR). [1][2][11]

2.2.1 Egyedi explicit kapacitásaukciók

Az egyedi kapacitásaukciók esetén egy eljárásban egyetlen határmetszék átviteli jogainak kiosztására kerül sor.

Egyoldali (unilaterális) kapacitásaukció

Egy adott határmetszéken a két szomszédos rendszerirányító külön-külön, független eljárás szerint allokálja a kapacitásokat, vagyis egyetlen határkeresztező szállításhoz kettő szállítási jog szükséges, független beszerzéssel,

Kétoldali (bilaterális) kapacitásaukció

A bilaterális, de nem közös aukciók jellemzője, hogy a két rendszerirányító megfelel a kiosztható határkapacitást, és független aukcióban értékesíti a „félkapacitásokat”. Mindkét fél kölcsönösen elismeri a másik részallokáció eredményét, így tulajdonképpen az adott metszék átvivő képességét saját piaci és jogi feltételrendszerük szerint allokálhatják.

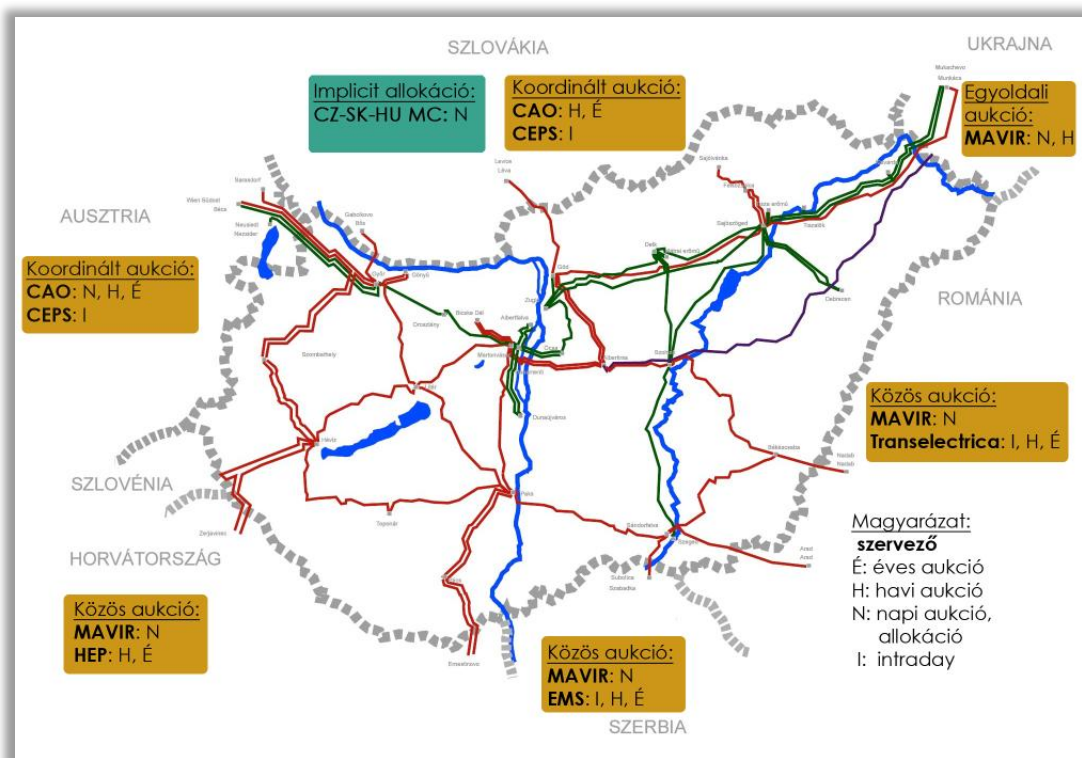
Közös kapacitásaukció

A legfejlettebb egyedi, kétszereplős explicit módszert a közös kapacitásaukciók jelentik. A teljes átvivő képességet egyetlen aukció során értékesíti a szervező, mely jellemzően időtávonként felváltva az egyik vagy másik rendszerirányító.

Jelenleg a MAVIR a szomszédos rendszerirányítóval együtt közös, explicit kapacitásaukciókat szervez a nem CEE régiós, azaz a szerb, a horvát és a román partnerekkel. Ukrajna speciális helyzete¹² miatt egyoldali kapacitásaukció történik. [11]

¹¹ Available transfer capacity

¹² Ukrajna nyugati részén, a bursztini erőmű és ellátási körzete nem jár szinkron az ország többi részével, azaz UPS/IPS rendszerrel, hanem az ENTSO-E kontinentális európai hálózatával szinkronizált.



2.2 ábra: Határkapacitások allokációja a magyarországi határmetszékeken, saját szerkesztés [1] és [11] alapján

2.2.2 Koordinált explicit kapacitásaukció

Az egyedi aukciók jelentős hátránya, hogy nincsenek összehangolva a villamosan közeli határmetszékeken az egyes aukciók, pedig a kiosztott kapacitásjogok által lehetővé tett szállítások sokszor azonos hálózati elemeken okoznak szűk keresztmetszetet. A sűrűn aláhurkolt, sok határmetszékkel rendelkező közép-európai átviteli hálózaton ez különösen súlyos probléma, melyre a regionális szinten koordinált, egységes kapacitásaukciós eljárások nyújtanak megoldást.

Az IEM megvalósítása érdekében az Európai Bizottság már 2006-ban előírta a 1228/2003/EK rendelet módosításával a koordinált kapacitásallokációs eljárások bevezetését a kitűzött régiókban, 2007. júliusi határidővel. Az egyes regionális csoportok saját 2007-től elkezdtek saját hatáskörben kidolgozni a regionális piacintegráció lépéseit.

Koordinált, áramlás alapú kapacitásaukció a CEE régióban

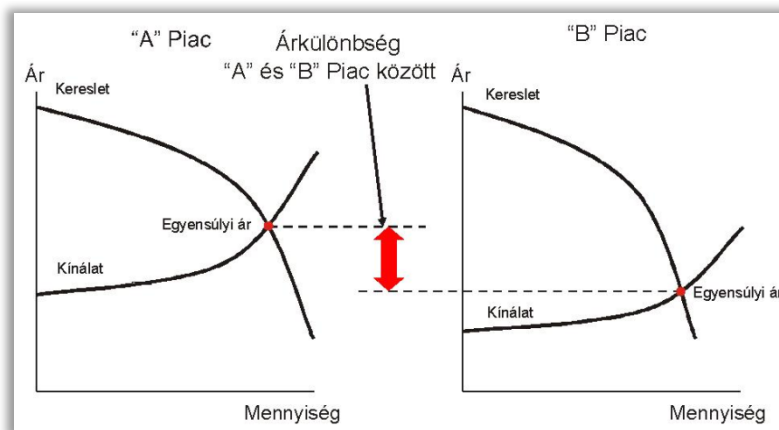
A közösségi előírásoknak megfelelően a CEE régióban érintett nyolc rendszerirányító 2006 végén írt alá szándéknyilatkozatot új, közös, koordinált explicit kapacitásallokációs rendszer kidolgozására és bevezetésére, mely feladattal a Central Allocation Office-t (CAO) bízta meg. A projekt sorozatos késéseket szenvedett, melynek oka elsősorban az volt, hogy kevesebb kapacitást lehetett allokálni így az előzetes

számítások alapján, mint az eljárásokban. A 2009-es EU-s jogsértési eljárás megindítása után átmeneti jelleggel koordinált NTC alapú aukciókat vezettek be a régióban.

2.3 Implicit kapacitásallokációs eljárások

Az implicit megközelítés esetében a határkeresztező tranzakciók során a villamos energia kereskedelme és a szállításához szükséges kapacitások értékesítése egy folyamat során történik. A kapacitások piaci módon történő allokációját az energiatőzsde klíring¹³ algoritmus végzi. Az implicit módszereket jellemzően a napi¹⁴ tőzsdei kereskedések során alkalmazzák. A napi villamosenergia-tőzsdék (szervezett piacok) a vételi és eladási igényeket szabványosított ügyletekként megfogalmazó ajánlatokat anonim módon összerendelik, a piaci és ajánlati árak viszonyától függően (ld. 4. fejezet). [13]

Az implicit aukciókon az energia árát kiszámító algoritmus figyelembe veszi az ajánlati területek közötti szállításra rendelkezésre álló kapacitás értékét is a jelentkező vételi és eladási ajánlatokkal együtt. Ebből következően az árznák aukciós ára függ az exportáló és importáló területeken a helyi kereslet és kínálat egyensúlyából adódó ún. izolált piaci ártól (MCP¹⁵) (ld. alább). Az alkalmazott számítási eljárás ideális esetben biztosítja, hogy az adás-vétel lezárultával az energia az alacsonyabb izolált egyensúlyi árral rendelkező területről a drágább piac felé áramlik (MCF¹⁶), így a kereskedés következtében a két piacon az energia ára konvergál. [1][13]



2.3 ábra: Izolált piaci egyensúlyi árak, [7] alapján

¹³ Vevők és eladók közötti pénzügyi és fizikai elszámolás, egy elszámolóház közbeiktatásával.

¹⁴ A napi energiatőzsdéken a „D” napi termékekkel a menetrendek bejelentését megelőzően, a „D-1” napon lehet kereskedni.

¹⁵ Market Clearing Price

¹⁶ Market Clearing Flow

Az implicit eljárások a kereskedési irányoktól és volumenektől függően kialakuló hálózati szűk keresztmetszeteket árdifferenciák érvényesítésével kezeli. A különbségek fenntartásával ugyanis korlátozható a határt átlépő tranzakció, pl. egy importáló országban a magasabb piaci ár miatt több helyi eladási ajánlatot lehet elfogadni. Másként az importált villamos energia ára annyival növekedik az árzóna határának átlépésekor, amennyi a két piac közötti MCP-k különbsége. Ez nem más, mint a szűkületi ár, azaz a szűk keresztmetszet használatáért fizetendő piaci ár.

A szűkületeket és az energiaajánlatokat tehát az implicit módszerek egyetlen piackonform és közgazdaságilag optimális eredményt biztosító rendszerben kezelik, így a hatékony és a megfelelő árjelzések miatt hosszú távon is fenntartható piacmodellek előzetes szűk keresztmetszet kezelési módszereit jelentik. [10][14]

Az implicit aukciók alkalmazásával több villamosenergia-piaci modell is felépíthető: lehetőség van az ún. piac-szétválasztás (*market splitting*), illetve különböző piac-összekapcsolások (*market coupling*) megvalósítására. [2][15]

2.3.1 Piac-szétválasztás

A piac-szétválasztási modellben az átviteli kapacitások implicit aukcióit egyetlen energiatőzsde végzi. Európában a skandináv Nord Pool Spot szervezett piac végzi a market splitting megvalósítását, azaz a résztvevő ajánlati területeken¹⁷ a rövid távú energia-kereskedelmet és a belső hálózati szűkületek kezelését. Ez a tőzsde képezi az aukciós árakat, melyekben megjelennek az esetleges szűk keresztmetszetek hatásai. Ha az árzónák közötti átviteli kapacitások nem elegendőek az árak kiegyenlítéséhez, akkor a területek között árkülönbségek lépnek fel, annak ellenére, hogy közös tőzsdén kereskednek, más szóval a piaci területek ár szempontjából szétválnak. [15]

2.3.2 Piac-összekapcsolás

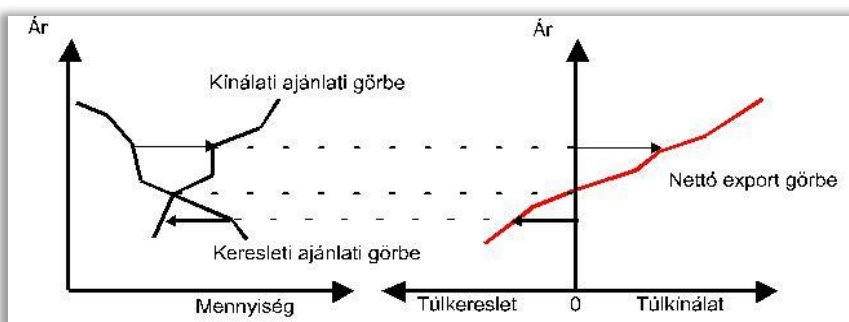
A piac-összekapcsolásban az implicit aukciókat kettő vagy több önálló áramtőzsde közösen szervezi. Az érintett rendszerirányítók által megadott kapacitások mellett a résztvevő szervezett piacok is beadják a szükséges információkat a tőzsdei ajánlatokról az összekapcsoló algoritmus működéséhez. A központi klíring eredménye megadja mind a piacok közötti kereskedésekből adódó metszék- vagy fizikai ágáramlásokat, mind az egyes területeken kialakuló piaci árakat.

¹⁷ Norvégia 5, Svédország 4, Dánia 2 árzónára felosztott, továbbá a közös tőzsdei kereskedésben vesz részt a finn és az észti szabályozási terület is.

Ár alapú piac-összekapcsolás

Az ár alapú piac-összekapcsolás esetén a központi ármeghatározás az összekapcsolt tőzsdék minden piaci adatát és szabályozását figyelembe veszi. Ehhez szükséges a piacok működésének (termékek, határidők, elszámolás) széles körű harmonizációja.

A klíring lépései szemléletesen a következő módon képzelhetők el, kettő piac összekapcsolódása esetén. A központi algoritmus elvégzi a vételi és eladási ajánlatok összesítését az egyes piaci területeken, azaz az egyes tőzsdéken, képezve a piacok kereslet-kínálati görbéjét. Az összekapcsolás nélküli piacok esetén a keresleti és kínálati görbék metszéspontjából adódó izolált egyensúlyi árak határozzák meg az összekapcsolt piacok export-import viszonyát. Az adott piaci árhoz tartozó kínálati és keresleti mennyiségek különbségéből adódik az ún. nettó export görbe, mely megadja az export céljára rendelkezésre álló villamos energia mennyiségét, az adott piaci ár függvényében (vagyis az adott MCP esetén elfogadható eladási és vételi ajánlatok összmennyiségének a különbségét).



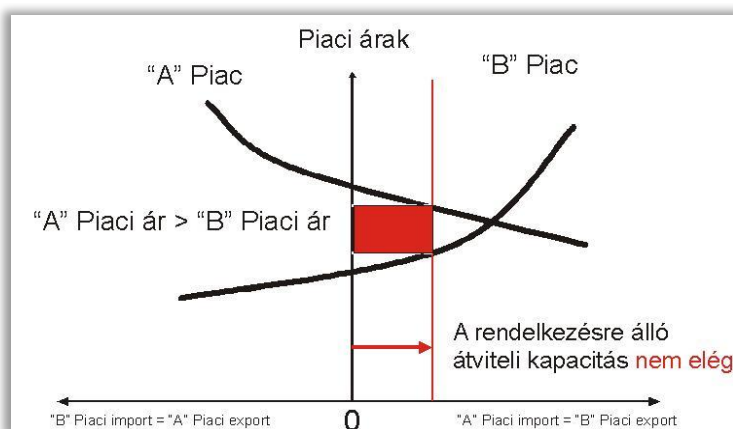
2.4 ábra: Nettó export görbe [7]

A piacok közti kétoldalú kereskedelem során az olcsóbb „B” piac exportjának mennyisége megegyezik a drágább „A” piac importjával, vagyis az egyik piac nettó export görbéjét a függőleges tengelyre tükrözve egymásba forgatható. E két görbe metszéspontja kiadja a két piac közti egyensúlyi kereskedési mennyiséget. Amennyiben ez a mennyiség alatta marad a kiosztható szabad határkeresztező kapacitás mértékének (mely NTC vagy áramlás alapú módszerek segítségével is meghatározható), akkor a két piac közös MCP-je megegyezik.

Ha azonban a kiosztható szabad határkeresztező kapacitás kevesebb az áregyensúlyt biztosító MCF-nél, vagyis a hálózatban szűk keresztmetszet alakulna ki, akkor az árak nem tudnak teljes mértékben kiegyenlítődni. Az eredetileg drágább „A” piac továbbra is drágább marad, de az energia ára már kisebb lesz, mint az összekapcsolást megelőzően.

A szűkületek árát a két piac között kialakuló árkülönbségből számíthatjuk. Az aukciószervező bevétele az árkülönbség és a kereskedett mennyiség szorzata (2.5 ábra:

piros téglalap). A központi algoritmus által meghatározott áramlásokat és piaci árakat az ebben az esetben az áramtőzsdék változtatás nélkül átveszik, az adott ár mellett végrehajtják a klíringet. [13][15]



2.5 ábra: Ár alapú implicit aukcióval összekapcsolt piacokon kialakuló piaci ár, a rendelkezésre álló kapacitások elégtelensége esetén [7]

Jelenleg ár alapon összekapcsoltak a következő európai országok energiátőzsdéi:

- Csehország (OTE), Szlovákia (OKTE), Magyarország (HUPX);
- Franciaország, (EPEXSpot), Belgium (Belpex), Hollandia (APX), Luxemburg és Németország (EEX) közöse a CWE¹⁸ Market Couplingot alkotják;
- Olaszország (GME) és Szlovénia (BSP);

A HUPX 2012. szeptember 11-én kapcsolódott a cseh–szlovák összekapcsoláshoz. [15]

Mennyiség alapú piac-összekapcsolás

Bizonyos esetekben eltérő szabályokkal működő energiapiacokat is érdemes lehet összekapcsolni a közös szervezett piaci kereskedés előnyeinek kihasználása érdekében. A központi klíringhez ugyanazon adatok szükségesek a résztvevő tőzsdéktől, mint az ár alapú összekapcsolás esetén, azonban csak a piacok közötti központilag számolt áramlások kerülnek felhasználásra az egyes kooperáló tőzsdéken, mint fix vételi és eladási ajánlatok. A következő lépésben – az eltérő eljárások és specialitások miatt – az árakat újra kiszámolják a tőzsdéken külön-külön, megtartva az egyes területek közötti tranzakciókat, energiaáramlásokat.

A résztvevő tőzsdék közötti különbségek okai a következők lehetnek: [13]

- az árak más-más pénznemben történő kifejezése;

¹⁸ Central West European, azaz kontinentális nyugat-európai régió

- az ár-, illetve mennyiségi határozatlanságok eltérő szabályok szerint kerülnek feloldásra; (ld. 4.2.2 fejezet)
- eltérő kereskedett terméktípusok (jellemzően a blokkajánlatok esetén);
- különböző kerekítési szabályok;
- az ajánlati árak szélső értékeinek eltérése (pl.: lehet-e negatív árú ajánlatot beadni).

A különböző árképzés algoritmusok miatt a mennyiség alapú piac-összekapcsolás esetén a számított árak még kapacitásszűkület nélkül is kis mértékben eltérnek az összekapcsolt tőzsdéken, árzónákban. Előállhat az a paradox helyzet, hogy a kereskedelem során az energiát a magasabb árú piac exportálja az alacsonyabb árú felé (*non intuitive flow*).

Jelenleg szoros mennyiség alapú piac-összekapcsolás elvén alapul a skandináv Nordpool és a CWE piac-összekapcsolás közötti napi kereskedelem. [15]

3. Hálózati kapacitások számítási eljárásai

A szűk keresztmetszetek kezelésének gyakorlatát alapvetően meghatározzák az alkalmazott kapacitásszámítási módszerek. Zonális felépítésű villamosenergia-piacokon mindig az egyes zónák közötti kereskedett teljesítményeket kell korlátok közé szorítani, hogy ne jelentkezessenek hálózati túlterhelődések a várható rendszer-üzemállapotokban. Attól függően, hogy a számított korlátok a metszések tranzakcióira közvetlenül vagy az egyes hálózati elemek fizikai áramlását befolyásoló hatására vonatkoznak beszélhetünk NTC alapú, illetve áramlás alapú kapacitáskalkulációról¹⁹.

3.1 NTC alapú kapacitáskalkuláció

NTC alapú allokációk kapacitásadatait rendszerint az adott határmetszékre a két szomszédos átvitelrendszer-üzemeltető egymással egyeztetve határozza meg. A számítási módszer lényege, hogy egy alapesetből kiindulva meg kell határozni azt a maximális ΔE , vizsgált irányú tranzakció változást, mely esetben még nem terhelődik túl kritikus hálózati elem. [4]

Az alkalmazott fogalmakat még 2001-ben az ETSO²⁰ ajánlásban definiálta, melyeket mind a mai napig alkalmaznak az ENTSO-E tagjai. Az ajánlás öt összefüggő fogalmat különít el: [16]

- Teljes átviteli kapacitás, TTC (Total Transfer Capacity):

Egy határmetszék teljes átviteli kapacitása az a maximálisan megköthető teljesítménycsere-program, amely egy előzetesen teljes mértékben ismert hálózati üzemállapotot feltételezve még nem okozná a biztonsági kritériumoknak sérülését („n-1” elv).

- Átviteli biztonsági tartalék, TRM (Transmission Reliability Margin):

A TTC számításának bizonytalanságait az átviteli biztonsági tartalékkal kell figyelembe venni. A mérési pontatlanságok, az üzemzavari kisegítő teljesítményáramlások és a topológiából, illetve a frekvenciaszabályozásból adódó, nem szándékolt fizikai áramlásbeli eltérések hatása számszerűsíthető a TRM-ben. A tartalék érték meghatározásának egyik módja lehet a korábbi üzemállapotok tervezett és tény áramlásainak statisztikai módszerekkel történő kiértékelése. A

¹⁹ Természetesen semmilyen kapacitásszámítás sem szakadhat el a teljesítményáramlási korlátoktól, azonban a konkrét hálózati elemekre vonatkozó áramlási határértékek, mint fogalmak az áramlás alapú módszerek sajátjai.

²⁰ European Transmission System Operators

másik megközelítés a rendszerirányítók tapasztalatán, „jó gyakorlatán” (*best practice*) alapul. A MAVIR ez utóbbit alkalmazza, pl. a 400 kV-os rendszer-összekötőket tartalmazó metszékre fixen²¹ 500 MW a TRM értéke. [17]

- Nettó átviteli kapacitás, NTC (Net Transfer Capacity):

A kötelezően betartandó biztonsági szabályokat és a számítás bizonytalanságait is figyelembe véve a maximálisan megköthető teljesítménycsere értéke két szabályozási terület között.

$$NTC = TTC - TRM \quad (3.1)$$

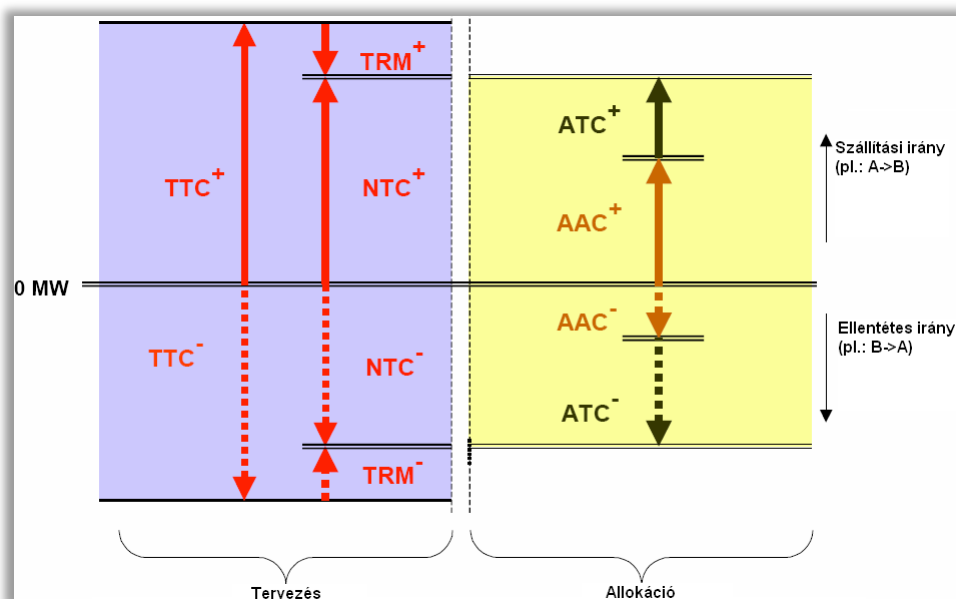
- Előzetesen lekötött kapacitás, AAC (Already Allocated Capacity):

Az AAC az adott metszékre korábban kiosztott fizikai kapacitásjogok, illetve menetrenddel bejelentett teljesítményszállítások összege.

- Rendelkezésre álló átviteli kapacitás, ATC (Available Transfer Capacity):

Az ATC a két szabályozási terület közötti NTC azon része, amely az eddigi allokációk után további kereskedelmi szállításokra még igénybe vehető:

$$ATC = NTC - AAC \quad (3.2)$$



3.1 ábra: NTC alapú átviteli kapacitás definíciók, [16] alapján

3.2 Áramlás alapú kapacitáskalkuláció

Az áramlás alapú eljárások bevezetésének alapvető célja a valós fizikai hálózat, mint a ténylegesen szűk keresztmetszetet jelentő elemek pontosabb figyelembe vétele. [2] A

²¹ Az Üzemi Szabályzat enged ettől eltérést, de ezt előzetesen közölni kell az érintettekkel.

módszer kulcs gondolata, hogy a szállítások hatására a hálózati ágakon kialakuló fizikai áramlásokra vizsgál feltételeket, nem pedig közvetlenül egyes területek közötti csereprogramokra. Emiatt a kapacitáskorlátok konkrét hálózati elemekre vonatkoznak. E megközelítést *maximum flow* (MF) módszernek nevezzük.

Minden áramlás alapú kapacitásfogalmakat alkalmazó eljárás szükségképpen koordinált is, azaz egy rendszerben történik egy régió összes belső határmetszékének kapacitásjog-allokációja.

A továbbiakban két áramlás alapú eljárást, a már említett CEE régiós explicit kapacitásjog-kiosztás (FBCA²²), és a hamarosan bevezetésre kerülő CWE régiós piac-összekapcsolás (FBMC²³) fogalmait, kalkulációs lépéseit mutatom be. A nyugat-európai kezdeményezésről a nyilvánosan elérhető dokumentumok csak minimális betekintést nyújtanak az alkalmazott számítási eljárás részleteibe, ezért a teljes kép megértéséhez szükséges a CEE régiós megoldás megismerése is. [18]

Mind a mai napig nem született kötelező érvényességű dokumentum, mely egységesítette volna a flow-based módszer fogalmait. Emiatt a CEE és a CWE megoldás más-más elnevezéseket használ azonos, vagy közel azonos fogalmakra.

3.2.1 Áramlás alapú kapacitásjellemzők

Vizsgált áramlás alapú korlát

A rendszerirányítók hatásköre az összes releváns kritikus hálózati ág (cb^{24}) megnevezése, amelyek várhatóan korlátozzák a határkeresztező kereskedelmet. A korlát része azon alapeseti vagy hálózati ág(ak) hiánya mellett üzemállapot, azaz kritikus hiányállapot (co^{25}), mely esetén a leginkább valószínű a kritikus ág túlterhelődése

Teljes áramlási lehetőség

Megadja az adott kritikus ágon átáramló hatásos teljesítmény maximális nagyságát, mely elsősorban a távvezetékek termikus terhelhetőségétől függ.

Alapeseti áramlások

A kapacitáskalkuláció alapjául szolgáló közös load flow modellben (CGM) szereplő áramlások az alapeseti áramlások. A helyzetet azonban bonyolítja, hogy előzetesen kell

²² Flow-based Capacity Allocation

²³ Flow-based Market Coupling

²⁴ Critical branch

²⁵ Critical outage

az allokációs időtávra becsülni az adott eljárásban nem szereplő, ún. külső tranzakciókat, valamint az erőművi teher-kiosztást és terhelési eloszlásokat²⁶.

Áramlási tartalékok

A számítás során elkerülhetetlenek a pontatlanságok, bizonytalanságok, ezért szükség van tartalékok fenntartására. Fontos megjegyezni, hogy számos bizonytalansági faktor nem a biztonsági tartalékon keresztül kerül leképzésre, hanem explicit módon, például a tervszerű és véletlenszerű topológia változásokat a co lista tartalmazza.

Korábban allokált kapacitásokból eredő áramlások

Figyelembe kell venni a korábbi allokációs időtávokon megszerezett kapacitásjogok, valamint bejelentett energiaszállítások áramlásigényét.

Rendelkezésre álló áramlás (AMF/RAM)

Az aukció során allokálható áramlási kapacitásokat korlátonként és irányonként megadott rendelkezésre álló áramlás adja meg.

PTDF

A teljesítmény-szállítás eloszlási tényezőinek számítása az egyes közös hálózati modelleken alapul. A PTDF mátrix elemei számszerűsítik a csereprogramok fizikai ágáramlásokat megváltoztató hatását, amely hatás a kritikus ágak és hiányállapotok vizsgált kombinációján jelentkezik.

Explicit esetben allokált PTR-ok konkrét irányítottsággal rendelkeznek, azaz ismert a forrás (A) és a nyelő (B) piaci terület, így minden lehetséges párosításra számítani kell egy-egy értéket. Azaz a PTDF definíció szerint az adott hiányállapot esetén a kritikus hálózati ágon a $\Delta F_{cb,co}$ áramlásváltozás nagyságának és az azt létrehozó ΔP termelésváltozás értékének hányadosa, adott h órában: [19]

$$PTDF_{cb,co,h}^{A \rightarrow B} = \frac{\Delta F_{cb,co}}{\Delta P} \Big|_h \quad (3.3)$$

Implicit módszereknél a beadott tőzsdei ajánlatok esetén csak a fizikai szállítás egyik, vevői vagy eladói oldalának helye ismert. Ebben az esetben a PTDF-ek az egyes piaci területek nettó exportjára vonatkoznak.

²⁶ Különösen jelentősen lehet például egy szivattyús energiatároló teljesítményfelvételének változása az óráról órára változó áru piacon, mely árat alapvetően befolyásolják a nemzetközi szállítások.

A áramlási fogalmak és rövidítés között segít eligazodni a következő táblázat:

3.1 táblázat: Áramlás alapú kapacitásfogalmak különböző elnevezései

	CEE FBCA	CWE FBMC
Kritikus hálózati ág	cb	cb
Kritikus kontingencia	co	
Teljes áramlási lehetőség	TMF	$F_{\max}$
Alapeseti áramlás	BFL	F_{ref}
Áramlási tartalék	FRM, BFRM	FRM
Korábban allokált kapacitásokból eredő áramlás	AAF, ANF	F_{ref}'
Rendelkezésre álló áramlás	AMF	
		RAM

3.2.2 Áramlásjellemzők számítása CEE régiós másnapi FBCA esetén

A rendelkezésre álló áramlásérték meghatározása több lépésben történik egy flow-based kapacitásszámítás során.

A rendszerirányítók előkészületi feladatai közé tartozik a tartalékok értékének meghatározása, mely a CEE FBCA-ban két részből áll. A „külső” csereprogramok hatására létrejövő áramlások bizonytalanságát a *base flow reliability margin* (BFRM), *flow reliability margin* (FRM) pedig minden más bizonytalanság hatását fejezi ki. [19] Minden egyes *cb/co* pároshoz a két áramlási iránynak megfelelően két AC load flow számítással meghatározott AMF érték tartozik:

- Az AMF^+ a rendelkezésre álló áramlás a hálózati ág irányítottságában.
- Az AMF^- az ellenkező, a végpont felől a kezdőpont felé irányított rendelkezésre álló áramlás. Ha ez az érték negatív, akkor további teljesítmény szállítható az ágon az irányítottsággal ellentétes irányban.

Total Maximum Flow (TMF)

Az AMF értékek számításának kiindulópontja a kritikus hálózati ág teljes maximális hatásos áramlási lehetőségének meghatározása. A TMF vizsgált elem a határáramból számítva ($I_{cb,h}^{\max}$), $\cos \varphi_{cb,h}$ ágra jellemző teljesítménytényezővel²⁷:

$$TMF_{cb,co,h} = \sqrt{3} \cdot \min(U_{\text{kezdőponti},cb,h}, U_{\text{végponti},cb,h}) \cdot I_{cb,h}^{\max} \cdot \cos \varphi_{cb,h} \quad (3.4)$$

²⁷ A szokásos érték $\cos \varphi_{cb,h} = 0,95$

Base Flow (BFL)

Az alapáramlás a kritikus hiányállapotban a vizsgált kritikus átviteli ágon átáramló hatásos teljesítmény, amely akkor jelentkezne, ha a CEE zónák között nem lenne határkeresztezõ tranzakció (*BCE*).

$$BFL_{cb,co,h} = FLOW_{cb,co,base_case,h} - BCE_{CEE,h} \cdot PTDF_{cb,co,h} \quad (3.5)$$

Net Maximum Flow (NMF)

A NMF a kritikus hálózati ágakon az a legnagyobb megengedhető hatásosteljesítmény-áramlás, amely az eljárásban szereplő piacok között kialakuló kereskedelmi tranzakciók eredményeképpen kialakulhat.

$$\begin{aligned} NMF_{cb,co,h}^+ &= TMF_{cb,co,h}^+ - FRM_{cb,h} - BFRM_{cb,co,h}^+ - BFL_{cb,co,h} \\ NMF_{cb,co,h}^- &= -TMF_{cb,co,h}^- + FRM_{cb,h} - BFRM_{cb,co,h}^+ - BFL_{cb,co,h} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Already Nominated Flow (ANF)

Az ANF a korábban elnyert kapacitások felhasználásával, az adott napra bejelentett (azaz nettósítható) szállítások által létrehozott hatásosteljesítmény-áramlás, az adott kritikus hálózati ágon:

$$ANF_{cb,co,h} = PTDF_{cb,co,h} \cdot ANTR_h \quad (3.7)$$

Available Maximum Flow (AMF)

Az eddig felsorolt, az áramlás alapú eljárások során felhasznált fogalmak és mennyiségek segítségével kiszámítható az allokációban felhasznált AMF értéke:

$$\begin{aligned} AMF_{cb,co,h}^+ &= NMF_{cb,co,h}^+ - ANF_{cb,co,h} \\ AMF_{cb,co,h}^- &= NMF_{cb,co,h}^- - ANF_{cb,co,h} \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.2.3 Kapacitásjellemzők számítása CWE FBMC esetén

Minden egyes kritikus ágra (mely a CWE esetében automatikusan tartalmazza a vizsgált kiesést is) az átvitelrendszer-üzemeltetők a következő kapacitásfogalmakat számítják:

- Maximálisan megengedhető áramlás (F_{max}): Az ág maximális wattos átvivő képessége, figyelembe véve az áramterhelhetőséget.
- Áramlási megbízhatósági tartalék (FRM): Alapértelmezett értéke: az F_{max} 10-15%-a, de vizsgálat alatt áll egy statisztikai alapú kiértékelésen alapuló FRM kalkulációs eljárás is.

Az allokáció előtti áramlásokat (F'_{ref}) megadó értéket pedig a közös load flow modell áramlási adatait (F_{ref}) és a menetrendezett szállításokat figyelembe véve a klíring előtt a piacoperátor végzi el. A rendelkezésre álló áramlási lehetőség tehát a következő:

$$RAM_{cb,h} = F_{max,cb,h} - FRM_{cb,h} - F'_{ref,cb,h} \quad (3.9)$$

A PTDF számítását a CGM segítségével szintén a piacoperátor végzi el DC load flow algoritmussal. Fontos megjegyezni, hogy az implicit megközelítés miatt csak az egyes szabályozási területek nettó exportnövekményére értelmezettek az eloszlási tényezők (ld. 3.3 fejezet).

3.2.4 Áramlás alapú korlátok az implicit allokációk során

Az elfogadható ajánlati volumenekre vonatkozóan a nettó exportokra fogalmazható meg implicit esetben a hálózati korlátok közvetlen hatása, minden X piacra:

$$RAM_{cb,co,h}^- \leq \sum_{\substack{\forall X \\ X \neq "hub"}} (PTDF_{cb,co,h}^X \cdot NEX^X) \leq RAM_{cb,co,h}^+, \forall cb/co - ra \quad (3.10)$$

Az aukciós árakra további korlátokat kell megfogalmazni, melyek biztosítják, hogy csak szűk keresztmetszet esetén alakul ki árkülönbség. A vonatkozó feltételek azonban jóval bonyolultak, ugyanis itt a korlátozó elem nem köthető egy-egy határhoz, hanem több tranzakció együttesen hozza létre a szűkületet egy vizsgált korláton. A PTDF tényezők szerint súlyozott mértékben okoznak szűkületet, így az eloszlási tényezők megjelennek az árfeltételekben is.

Az egyes korlátokra ún. *árnyék árakat*²⁸ kell számítani, melyek megadják az aukciós célfüggvény értékének változását egységnyi, a korlátozó elemen történő kapacitásnövelés hatására. Ez jelenti a szűkületi árat (*congestion price*), amelyet a szűk keresztmetszetet jelentő ágat terhelő egységnyi áramlási lehetőség felhasználásáért kell fizetnie piaci szereplőknek. Ha egy cb/co páros nem korlátozza az áramlásokat, azaz ha a (3.10) egyenlet nem teljesül egyik irányra sem egyenlőségként, akkor rá vonatkozó szűkületi ár is nulla. Ezek alapján az piacok szűkület miatt kényszerített árkülönbsége:

$$MCP^X - MCP^Y = \sum_{\forall c \in \{cb/co\}} (PTDF_{c,h}^X - PTDF_{c,h}^Y) \cdot CONG_PRICE_{c,h} \quad (3.11)$$

3.3 PTDF számítása DC load flow számítás eredményéből

Ugyan a pontos hálózatszámítást csak a teljes körű AC load flow alkalmazásával lehet elvégezni, azonban a PTDF tényezők számítása során a DC load flow algoritmus használata nemcsak a számítási igény csökkentése miatt kívánatos. Az egyszerűsített analízis lineáris egyenletek megoldásán alapul, így az eredményül kapott eloszlási tényezők is lineárisak lesznek, nem függenek a csereteljesítmények megváltozásának nagyságától. [19]

²⁸ angolul: shadow prices

A PTDF számítása a definíció (3.3) szerint történik, azaz a forrás és nyelő területek nettó exportjának ellenkező előjelű elhangolása után a vizsgált korlátokon feljegyezzük a teljesítményáramlás megváltozását és ezt az elhangolás arányában kifejezzük. A területek egyes csomópontjain a betáplálás változása az ún. *generation shift key* (GSK²⁹) szerint történik.

PTDF linearitása

A DC load flow számításból előálló PTDF tényezők linearitása két tulajdonságot jelent.

Ellenkező irányú relációkra ellentétes előjelű a PTDF: [19]

$$PTDF_{c,h}^{A \rightarrow B} = -PTDF_{c,h}^{B \rightarrow A} \quad (3.12)$$

Láncolt tranzakciók hatása megegyezik a közvetlen szállításával:

$$PTDF_{c,h}^{A \rightarrow B} + PTDF_{c,h}^{B \rightarrow C} = PTDF_{c,h}^{A \rightarrow C} \quad (3.13)$$

A linearitásból következően nem szükséges minden forrás-nyelő párra külön-külön számítani a PTDF-et, elegendő egy tetszőleges területet kinevezni referenciának, amelyhez viszonyítjuk a többi terület szaldóváltozásának hatását.

PTDF alkalmazása nettó export mennyiségekre

Az ismertett implicit módszerek –a tőzsdei klíringből adódóan– az adott területen elfogadott vételi és eladási ajánlatok összes mennyiségét adják eredményül. A piac-összekapcsolások során a klíringre kerülő vételi és eladási ajánlatok összes volumene azonos. Emiatt elegendő csak az egyik³⁰ árzónához, mint viszonyítási ponthoz, hubhoz képest a többi terület nettó exportnövekményének áramlást változtató hatását számítani. Például az előző (3.13) képlet, ha a „B” piac a referencia, akkor hub-PTDF alkalmazásával a következő alakban írható fel: [23]

$$PTDF_{c,h}^A - PTDF_{c,h}^C = PTDF_{c,h}^{A \rightarrow C} \quad (3.14)$$

LODF tényezők alkalmazása

Minden kritikusnak definiált kontingencia hatását számítani kell, de a DC load flow eredményeinek linearitása azonban itt is kihasználható. Az LODF tényező megadja, hogy egy hálózati elem kiesése esetén, az addig rajta átáramló teljesítmény milyen arányban fog megoszlan a hálózat többi elemén. (Pl. a kiesett elemre vonatkozó $LODF_{cb,co}|_{cb=co} = -100\%$).

²⁹ A GSK kifejezi, hogy a piaci terület importszaldójában történő változás hogyan oszlik meg a területet leíró hálózati csomópontok között.

³⁰ Ugyanis a hub piac nettó exportja megegyezik a többi piac nettó exportjának összegének ellentétjével.

Az alapeseti PTDF és az egyes hiányállapotokat jellemző LODF segítségével számítható a hiányállapotokhoz tartozó PTDF érték. A linearitási tulajdonságokból adódóan, egyszeres („n-1”) kiesés esetén, adott időtávra:

$$PTDF_{cb,co}^{A \rightarrow B} = PTDF_{cb,\"n-0\"}^{A \rightarrow B} + LODF_{cb,co} \cdot PTDF_{co,\"n-0\"}^{A \rightarrow B} \quad (3.15)$$

3.4 Áramlás és NTC alapú kapacitásfogalmak kapcsolata

Érdemes egy közös keretben megvizsgálni a két ismertetett kapacitásfogalmi rendszert. Sok esetben párhuzamosan kell NTC, illetve áramlás alapú fogalmakat alkalmazni (pl. FB fogalmak bevezetésének hatásvizsgálata, intraday allokációk).

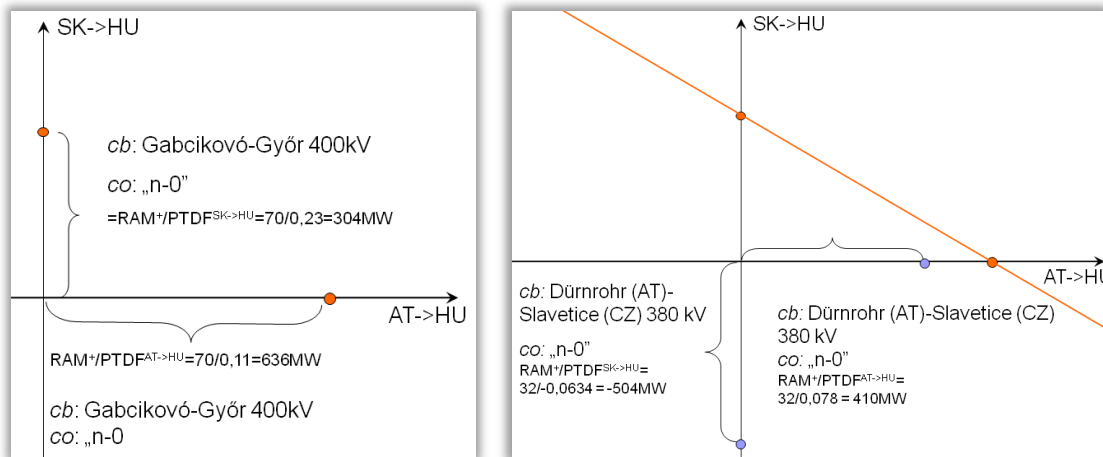
A hálózati korlátozó feltételek ábrázolása

Az áramlás alapú megközelítésre, implicit esetben a (3.10) összefüggés szerint korlát vonatkozik a nettó exportokra, amelyek az allokált kapacitások áramlásbeli összehatását kell a kritikus ágakon. Hasonló tartalmú egyenlet írható fel NTC alapú megközelítésben, az egyes metszések tranzakcióra (AC) külön-külön:

$$-ATC^{B \rightarrow A} \leq AC^{A \rightarrow B} \leq ATC^{A \rightarrow B} \quad (3.16)$$

Természetesen az itt meghatározott. relációnkénti ATC értéknek olyannak kell lennie, hogy ne legyen szűk keresztmetszet a rendszerben. Ha azonosak a biztonsági követelmények, akkor ezek tulajdonképpen ugyanazt a hálózati korlátot írják, mint az áramlás alapú kapacitáskorlátot megfogalmazó egyenlőtlenség. A két egyenlőtlenséget ábrázolhatjuk grafikusán, célszerűen két lehetséges relációra korlátozva. Így egy olyan kétdimenziós koordináta rendszert, ún. *nomogramot* kapunk, melynek origója jelenti az alapesetet (BCE), allokált kapacitások nélkül, vagyis nettó export változás nélkül.

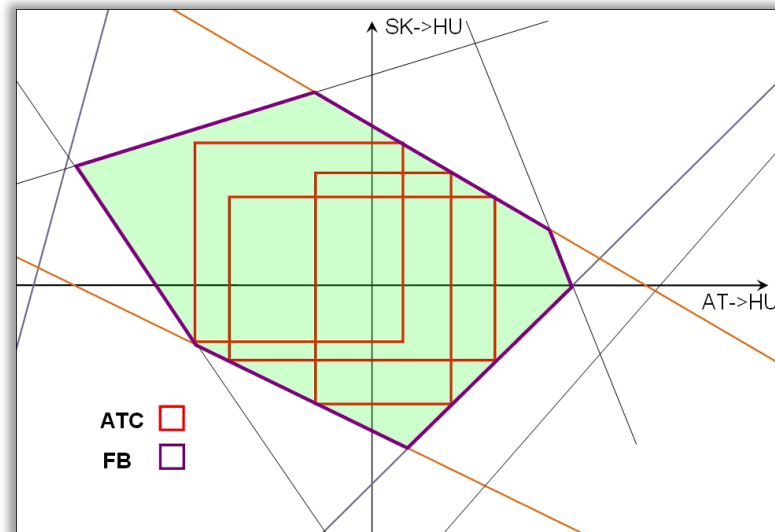
A következőben egy példával mutatom be a nomogram felépítését. Legyen a három vizsgált terület: AT, SK és HU, a hub piac pedig a magyarországi. Ekkor a koordináta tengelyek az osztrák és a szlovák terület nettó exportját adják meg. Egy „c” áramlási korlát limitálja a lehetséges maximális csereteljesítmény-változást, vagyis az origótól való eltávolodást a nomogramban. A hálózati korlátot leíró görbe tengelyekkel vett metszéspontjaiban csak az adott relációban van feltételezett szaldó eltérés.



3.2 ábra: Hálózati korlátok a nomogramban

A két felvett tengelymetszetet egy egyenessel lehet összekötni, ugyanis a feltételeket leíró egyenlőtlenségek lineárisak. Az így két félsíkra felosztott terület közül az origót tartalmazó felel meg az egyenlőtlenségnek, ez a terület adja meg az adott hálózati feltételt teljesítő lehetséges kiosztott kapacitásokat. Hasonló módon vehetőek fel a többi releváns korlátra vonatkozó egyenesek, külön-külön a két áramlási irányra.

Az egyes hálózati feltételeket teljesítő félsíkok metszete, a biztonsági terület (*security domain*) azokat a pontokat tartalmazza, melyek koordinátpárjai azon lehetséges nettó export párosításoknak felelnek meg, melyek teljesítik a hálózati feltételeket.



3.3. ábra: Hálózati biztonsági terület a nomogramban

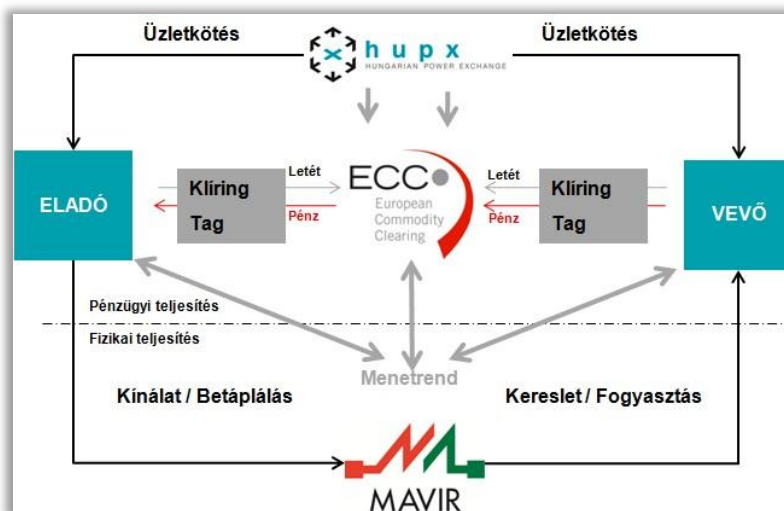
Ebbe a területbe beírt téglalapok jelentik az NTC alapú allokáció mozgásterét: a tengelymetszetek megadják a lehetséges ATC értékeket az adott metszékre és irányra. Mivel egy fix maximális kiosztható kapacitásérték jellemzi az egyes relációkat ebben az esetben, így a tengelyekre merőleges egyenesek határolják az ilyenkor lehetséges tranzakciókat reprezentáló pontthalmazt.

4. Másnapi időtávú szervezett villamosenergia-piac

A piacnyitás kiteljesedésével párhuzamosan egyre fokozottabb igény merült fel a villamos energia szektorban a klasszikus áruipiaci termékek (olaj, búza, stb.) kereskedelmében jelentős szerepet játszó szervezett piacok létrehozására. Ennek színhelyei az energiatőzsdék, melyeken anonim módon, több szereplő (termelők, eladók, kereskedők, brókerek) teljesen piackonform módon tud kereskedni a szabványosított termékekkel. [15]

A fogyasztók igényeit még rövidebb időtávokra is nehéz pontosan megbecsülni és fokozódó problémát jelent a nem szabályozható, megújuló, valamint elosztott energiatermelés terjedése is. Az energiatőzsdék tehát különösen fontos szerepet játszanak a napi, illetve napon belüli időtávokon, ugyanis ekkor a szektorban jellemző kétszereplős, OTC³¹ tranzakciók lebonyolítására nincsen elegendő idő, illetve nehéz megtalálni a megfelelő vevői vagy eladói partnert. A szervezett piaci kereskedelem nemcsak hatékony és diszkriminációmentes, hanem a valós piaci viszonyokat tükröző árjelzéseket is szolgáltat. [14]

Az energiatőzsde a felek számára garanciát is biztosít, ugyanis az elszámolásakor mind a vevő, mind az eladó közvetlenül csak a tőzsdével áll kapcsolatban. A fizikai és pénzügyi teljesítés, a klíring egy független elszámoló házon keresztül történik.



4.1 ábra: Elszámolás a magyarországi szervezett villamosenergia-piacon [20]

³¹ Over the counter, azaz nem szabványosított piaci ügyletek.

4.1 Másnapi kereskedés

A következő napra történő szállításokra vonatkozó villamos energia tőzsdei kereskedelme speciális, nem folyamatos kereskedés. A termékekre érkező vételi és eladási ajánlatokat a zárási időpontig a tőzsdei operátor összesíti, majd a klíring, a megfelelő vevői és eladói ajánlatok összerendelése egyszerre, egyetlen időpontban történik. A tőzsde a résztvevőket értesíti a beadott ajánlatok elfogadásáról vagy elutasításáról és az elszámoló házon keresztül kötelezi őket a befogadott ajánlatok teljesítésre. A szereplők a klíring ismeretében adják le a rendszerirányító felé saját mérlegkörük menetrendjét, melyben kötelesek szerepeltetni a szervezett piacon megkötött ügyleteik eredményét. [11][14]

Az európai energiatőzsdéken a másnapra vonatkozóan két alapvető villamos energia termékkel lehet kereskedni: órás vagy blokk ajánlattal.

4.1.1 Órás ajánlatok

A következő nap egy-egy órányi időtartamára vonatkozó ajánlatokat órás ajánlatoknak (*hourly order*) nevezzük, melyek ugyan a napi tőzsdék alapvető termékei. Az adott órára beadott ajánlatok egy fix vételi (negatív) vagy eladási (pozitív) q_o energiamennyiségre vonatkoznak, s két típusuk létezik: [13]

- Lépcsős ajánlat: Egyetlen p_o ajánlati árat tartalmaznak, mely a teljes q_o volumenre vonatkozik. Eladási ajánlat esetén, ha:
 - $MCP > p_o \Rightarrow$ teljes mennyiség eladásra kerül
 - $MCP < p_o \Rightarrow$ elutasításra kerül az ajánlat
 - $MCP = p_o \Rightarrow 0 \leq q \leq q_o$ mennyiséget lehet elfogadni
- Lineáris ajánlat: Kettő árat tartalmaznak, eladás esetén $p_{o0} \leq p_{o1}$. Az, hogy mely MCP-n fogadjuk el az ajánlatot, az elfogadott mennyiség arányában lineárisan változik a két árérték között, vagyis ha:
 - $MCP > p_{o1} \Rightarrow$ teljes mennyiség eladásra kerül
 - $MCP < p_{o0} \Rightarrow$ elutasításra kerül az ajánlat
 - $p_{o0} < MCP < p_{o1} \Rightarrow q = q_o \frac{MCP - p_{o0}}{p_{o1} - p_{o0}}$ mennyiséget lehet elfogadni

Vétel esetén minden fenti egyenlőtlenség értelemszerűen megfordul.

Az ajánlatok egyik klíringfeltétele lehet, hogy csak a teljes q_o mennyiséggel fogadható el. A Nordpool tőzsdén létezik egy különleges eladási forma, ún. rugalmas órás ajánlat mely esetben az eladó számára legkedvezőbb órában történhet meg a tranzakció. [15]

4.1.2 Blokk ajánlatok

A blokk vagy tömb ajánlat az adott nap legalább kettő különböző időpontjára vonatkozó óras ajánlat kombinációja, mely ajánlatok összekapcsoltak, azaz csak egyidejűleg, azonos mértékben teljesülhetnek, részben vagy egészben. A legalapvetőbb blokk ajánlat a minden órában azonos volumenű zsinór (*base*), illetve a jellemző munkaidőt lefedő csúcs (*peak*) termék. A blokkok fontos jellemzője lehet a *fill or kill* tulajdonság, vagyis, hogy egy tömböt csak teljes egészében lehet elfogadni. [20]

A legtöbb piac megengedi egyedileg definiált tömbök képzését, azaz tulajdonképpen bármely órákra vonatkozóan adhatnak be összefüggő ajánlatot a piaci szereplők. A profilos blokktermékekben pedig akár óránként más-más energiamennyiségek szerepelhetnek vételre, vagy eladásra. További különleges tömb ajánlat a láncolt blokk, mely csak akkor kerülhet klíringre, ha egy előző, „szülő” blokk el lett már fogadva. [13] A tömb ajánlatok klíringének feltételei jóval bonyolultabbak az óras ajánlatokénál, ugyanis a blokk licitárát az óras elszámoló árak blokkban szereplő mennyiségekkel súlyozott árával ($\overline{MCP}$) kell összevetni. Eladási ajánlatra:

- $\overline{MCP} > p_b$, azaz a blokk *in the money*:
ekkor teljes mennyiség eladásra kerül
- $\overline{MCP} < p_b$, azaz a blokk *out of the money*:
elutasításra kerül az ajánlat,
- $\overline{MCP} < p_b$, azaz a blokk *at the money*:
ekkor lehet részben elfogadni a tömböt, de csak ha nem *fill or kill* tulajdonságú. Részelfogadás esetén minden órára csak a felajánlott $q_{b,h}$ mennyiség azonos hányada kerül elszámolásra.

(4.3)

4.1.3 Ajánlati korlátok

Árkorlátok

Az ajánlati ár nem lehet tetszőleges, csak minimális és maximális árlimit közötti lehet. Emellett a kerekítés is adott számú tizedes jegyre történik, méghozzá a megszokott matematikai vagy pénzügyi kerekítés³² szabályai szerint.

Mennyiségi korlátok

A piactorzítást elkerülendő szereplőnként maximalizált az összes beadható ajánlat száma, valamint az egyenkénti, adott tizedes jegyre kerekített energiavolumen is.

³² angolul: financial rounding; A statisztikai torzításokat elkerülendő (csak akkor kell kerekíteni, ha az utolsó jegy nem nulla, és ez 9 féle lehet) az 5-re végződő tizedes jegyű számokat eggyel magasabb helyi értékre lefelé kell kerekíteni, ha előtte páros szám áll, különben felfelé.

Speciális feltételek

A néhány energiatőzsde (pl. spanyolországi OMEL) lehetővé teszi az ajánlatok opcionális szigorítását speciális korlátokkal. Ilyen lehet az egyes szereplőkre elfogadott ajánlatok volumenváltozásának korlátozása (gradiens korlát), a következő kereskedési napon történő terheléslefutás korlátozása, valamint minimális napi bevételi feltételek előírása. [13][22]

4.2 Klíring a másnapi piacon

A klíring feladata, hogy a nap minden órájára meghatározza a szereplőkre egyformán érvényes elszámoló árat, az MCP-t, illetve dönt az egyes ajánlatokból elfogadott mennyiségekről, a (4.1)-(4.3) összefüggések betartásával. Az algoritmus célja a társadalmi jólétnövekmény (*social welfare*) maximalizálása azáltal, hogy növeli a termelők bevételeit elvárt összeghez képest (termelői többlet) és csökkenti a fogyasztók költségét a felajánlott összeghez viszonyítva (fogyasztói többlet). Ugyan a kiértékelés óráról órára történik, de a blokk ajánlatok (és más speciális korlátok) miatt a teljes nap 24 (vagy 23/25³³) órás eredményeit egyetlen eljárásban kell kiszámítani.

4.2.1 Vételi–eladási görbe

Érdekes szemléltetni a klíring működését a más ismertetett aggregált kereslet és kínálati görbével. Ez a görbe magának az elszámolási algoritmusnak az eredménye, tehát nem ez alapján lehet kiszámítani általánosan az elfogadott ajánlatokat, ugyanis blokk, illetve flexibilis ajánlatok esetén nem tudjuk előre azt, hogy melyiket kell figyelembe vennünk az adott órában. Ez rendkívül megbonyolítja az algoritmusok működését is (ld. 5.1 fejezet).

A következő egyetlen órára vonatkozó számítási példában három-három (betűvel jelzett) vételi és (számozott) eladási órás ajánlat szerepel.

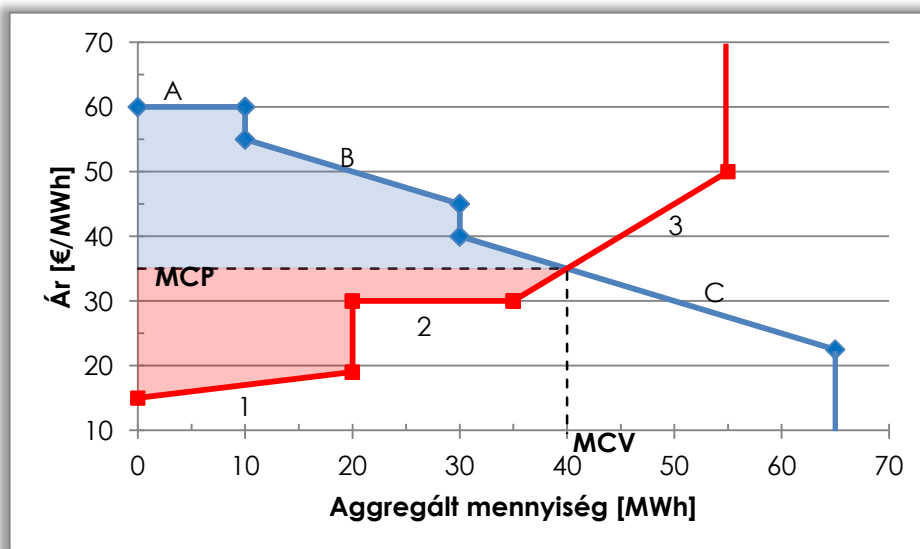
³³ A nyári, illetve a téli időszámításra való áttérések napján.

4.1 táblázat: Másnapi klíring példaszámítás ajánlati könyve

Ajánlat azonosító	q_0 [MWh]	p_0 [€/MWh]	p_1 [€/MWh]	Elfogadva?	Elfogadott q mennyiség [MWh]
A	-10	60	60	igen	-10
B	-20	55	45	igen	-20
C	-40	40	22,5	részben	-10
1	20	15	19	igen	20
2	15	30	30	igen	15
3	20	30	50	részben	5
				MCP	35 €/MWh
				MCV	40 MWh

A mennyiség szerint halmozott vételi (kék) és eladási (piros) görbék metszéspontja adja meg az MCP, valamint az adott órában összesen eladott (MCV³⁴) és megvett villamos energiát. E kettő azonos értékű, ugyanis egyetlen árzónáról van szó.

Az algoritmus célja a társadalmi jólétnövekmény maximalizálása, mely a következő ábrán a színezett területek összegével azonos. Az MCP-nél meghúzott vízszintes vonal alatti, piros terület a termelői többlet, azaz az elfogadott termelési ajánlatok ekkora összeggel kapnak többet, mint amennyit minimálisan elvártak az ajánlati árak megadásakor. Hasonlóan a kék terület a fogyasztói többletet jelenti, ugyanis a közös elszámoló ár az elfogadott mennyiségekre kisebb, mint a vevők által felkínált ár. [10]



4.2 ábra: A klíring példaszámítás keresleti és kínálati görbéi

³⁴ Market Clearing Volume,

4.2.2 Ár és mennyiségi határozatlanság

Az ismertetett egyszerű példa nagyon szemléletesen mutatja be a klíring algoritmusok lényegét. Azonban még a vizsgált legegyszerűbb, egyzónás, tisztán órás ajánlatok esetében is előfordulhat, hogy a kapott eredmény nem egyértelmű.

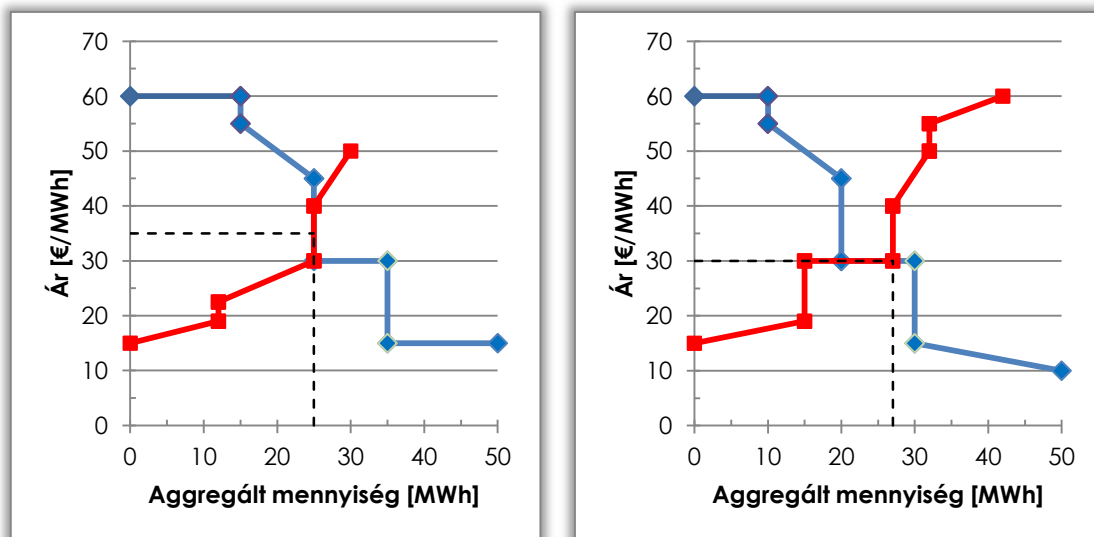
Ár határozatlanság

Ár határozatlanság, indeterminancia akkor jelentkezik, ha a kereslet–kínálat metszete függőleges vonalban jön létre. Ekkor a közös szakasz ár szerinti minimum és maximum pontja közé esik a piaci elszámoló ár. A pontos meghatározás az aukció részletszabályai szerint történik, de a legjellemzőbb MCP a szélsőértékek számtani átlaga. [20][21]

Mennyiségi határozatlanság

Hasonlóan az ár indeterminanciához, ha vízszintes vonalban történik a vételi és eladási görbe metszete, akkor mennyiségi határozatlanság jelentkezik. Alapelv ebben az esetben a kereskedett mennyiség maximalizálása, hiszen így lehet biztosítani a társadalmi jólétnövekmény további növelését, ha feltételezzük, hogy az ajánlati árak tartalmazzák a szereplők ügylettől elvárt profitját. [20][21]

A következő ábra példát mutat a két határozatlanságra. A baloldali esetben az ár a 30 és 40 €/s ár számtani átlaga, 35€/MWh, míg a jobboldali esetben a mennyiség a maximális, 27 MWh.



4.3 ábra: Ár és mennyiségi indeterminancia és feloldásuk

5. A piacklíringet számító program

A klíringet végrehajtó program kulcsszerepet játszik az implicit szűk keresztmetszet kezelésben. Tulajdonképpen minden korábbi lépés (a kapacitáskalkuláció, a tőzsdére beadott ajánlatok, a sajátos piaci korlátozó feltételek, stb.) egyetlen helyen, az elszámolást elvégző algoritmusban „fut össze”. A klíringfeladat tehát összetett, ráadásul időkorlátos helyzetben kell megoldani: az ajánlatok benyújtási határideje és az eredmények publikálása között mindössze 20-40 perc áll rendelkezésre. [18][20]

5.1 A klíringfeladat matematikája

A tőzsdei elszámolás matematikailag egy optimalizációs feladat, a lineáris programozás egy speciális változata, az ún. *mixed integer quadratic programming* (MIQP) feladat. Kanonikus alakban a következőképpen fogalmazható meg: [24][25]

$$\min_x f(x), \quad f(x) = \frac{1}{2} x^T Q x + c^T x \quad (5.1)$$

Azaz az $f(x)$ célfüggvényt kell minimalizálni, x változóvektor megfelelő megválasztásával. Q szimmetrikus mátrix az $f(x)$ másodfokú, míg c^T sorvektor a lineáris együtthatóit tartalmazza. A változóvektor elemeire betartandó lineáris egyenlőtlenségek és egyenletek, valamint egészértékűségi feltételek vonatkoznak:

$$Ax \leq b, \quad Ex = d, \quad x_i \in \{X_i\} \quad (5.2)$$

A feladat nehézsége

Az MIQP feladatok esetén a megoldás legnagyobb nehézségét az egészértékű feltételek jelentik. Az ilyen típusú változók (pl. *fill or kill* ajánlatok, indikátorváltozók) számának növekedésével a probléma mérete a lehetséges variációk számával, azaz exponenciálisan növekszik. Belátható, hogy a feladat NP-nehéz probléma, azaz a gyakorlatban gondot okoz a feladat skálázása, különösen a szűkös rendelkezésre álló futási idő miatt.

A MIQP feladatok gyakran alkalmazott megoldási módja az ún. *branch and bound* eljárás. A módszer lényege, hogy az egészértékű változók lehetséges értékei szerint egy bináris fát járunk végig. Minden egyes csomópontban kiszámítjuk az adott értékre rögzített *integer* korlát esetén az elérhető legjobb megoldást. Ez nagyon gyorsan megkapható, mindössze csak egy klasszikus (folytonos) lineáris optimalizációs feladatot kell megoldani úgy, hogy a nem rögzített változókat is folytonosnak feltételezzük. A módszer előnye, hogy minden elágazásra megadja a célfüggvény lehetséges maximális értékét, így az elágazásokhoz érve csak a legelső elemekre kell számítani a célfüggvény

optimumát, majd a kedvezőbb irányba tovább haladni az egészértékű változók rögzítésével (BFS³⁵ bejárás). Előnye a még az eljárásnak, hogy az egyes csomópontokban már megkaphatunk szuboptimális, de működő megoldásokat a keresett változóvektorra, valamint felső becslést is lehet mondani a még elérhető célfüggvény érték javulásáról. Tehát ha a probléma bonyolultsága miatt túl sok időt igényelne az optimális megoldás megkeresése, még akkor is rendelkezésre áll felhasználható, ismert társadalmi jólétvesztéssel járó szuboptimális megoldás. A veszteség jellemzően ebben az esetben azonban így is kisebb annál, mintha törölni kellene az aukciót és helyette más vészmegoldási (*fall back*) eljárásokat kellene alkalmazni. [21]

A klíring esetében további nehézséget okoznak az ún. paradox módon visszautasított blokk ajánlatok (PRB³⁶). Ezen termékekre az elfogadás feltétele órás átlagárakon alapul (ld. (4.3) összefüggés), így egyszerre több órányi MCP-re van hatással egy blokk elfogadása. Előfordulhat olyan eset, hogy a célfüggvény növelése érdekében el kellene fogadni egy ajánlatot, azonban az emiatt kiszorított órás ajánlatok miatt módosuló, blokkra vonatkozó átlagárak miatt már nem lehetne elfogadni a blokkot, paradox módon. A COSMOS algoritmus előnyben részesíti ebben az esetben a nagyobb blokkokat, így csak a legkisebb volumenekre korlátozódik a PRB jelenség. [21]

5.2 A szoftver implementálása MATLAB környezetben

A továbbiakban a tanszéken kifejlesztett Market Coupling Solver (MCS) MATLAB környezetben fejlesztett szoftvert fogom bemutatni, melyet áramlás alapú korlátok kezelésével bővítettem. Terjedelmi okokból jelen dolgozatban sajnos nem tudom teljes egészében, részleteiben bemutatni az elkészített szoftvert. Az ismertetésben az általam hozzáadott új elemekre fókuszálok, valamint a működés átfogó megértéshez elengedhetetlenül szükséges további részekre.

A program alapvetően a CWE MC által alkalmazott COSMOS klíring algoritmusban lefektetett alapelveket (*branch and bound* algoritmus, az ajánlatok paraméterei, piaci korlátok) alkalmazza, de sor került bizonyos módosításokra egyrészt az algoritmus hatékonyságának javítására, másrészt pedig további funkciók kerültek implementálásra. Ez utóbbi csoporthoz tartozik természetesen minden áramlás alapú fogalommal kapcsolatos szoftverelem, hiszen a COSMOS leírás mindösszesen pár sorban foglalkozik a témával, a CWE FBMC publikus dokumentumai pedig – bár a

³⁵ Breadth-first search

³⁶ Paradoxically rejected blocks

FBMC bevezetésének hatásait részletesen szemléltetik – magáról az algoritmus matematikai megfogalmazásáról csak az alkalmazandó alapelveket mutatják be. [8][21]

A MCS program a MATLAB környezetében fut és a matematikai programcsomag nyelvén íródott. A klíringfeladat megoldásához egy külső toolbox, az IBM CPLEX optimalizációs eszköztár szolgáltatásait veszi igénybe a szoftver.

5.3 A Market Coupling Solver klíringalgoritmusának elemei

A következőkben a szoftver magjának, a CPLEX által megoldott optimalizációs feladat megfogalmazását, részleteit adom meg.

5.3.1 Bemenő adatok, állandó együtthatók

A klíringalgoritmus a következő adatokat használja fel:

- q_o : az „o” indexű óras ajánlat mennyisége (pozitív eladásra, negatív vételre)
- p_{oo} : az „o” indexű óras ajánlat kezdő ára, amelyen az ajánlat elfogadása elkezdődik
- p_{oi} : az „o” indexű óras ajánlat végső ára, amelyen az ajánlatot már teljes mértékben el kell fogadni
- $q_{b,h}$: a „b” indexű blokk ajánlat „h” órára beadott ajánlati mennyisége
- $PTDF_{c,m,h}$: Teljesítmény eloszlási tényező, „c” indexű kritikus ág áramlásának megváltozása, „m” piac nettó export növekményére, adott „h” órában
- $AMF_{P_{c,h}}$ $AMF_{N_{c,h}}$: A „c” kritikus ág többlet áramlásának korlátai, adott „h” órában, pozitív ($_P$), azaz az ág irányítottságának megfelelően, illetve vele ellentétes, negatív irányban ($_N$) (AMF_N előjele a programban negatív)

5.3.2 Az algoritmus változói

A feladatban a keresett változókat az egyes ajánlatok elfogadási mértéke jelenti. Ezek ismeretében minden más szükséges klíringjellemző számítható. A matematikai megfogalmazás teljességéhez még szükséges az MCP-k és a szűkületi árak megkeresése is. Az algoritmus a következő pontokban felsorolt mennyiségek értékét keresi a célfüggvény értékének maximalizálásához. Fontos azonban megjegyezni, hogy az egyes részlépesek során (ld. 5.4 fejezet) nem minden változó szerepel az optimalizációban.

Folytonos változók

- $0 \leq ACCEPT_o \leq 1$ az „o” indexű óras ajánlat elfogadásának mértéke
- $0 \leq ACCEPT_b \leq 1$ az „b” indexű blokk ajánlat elfogadásának mértéke

- $PriceSettlement_m < MCP_{m,h} < MaxPrice_m$
az „ m ” piac „ h ” órában érvényes elszámoló ára
- $CONG_PRICE_{c,h}$ A „ c ” kritikus ágon a torlódási ár³⁷, „ h ” órában

Bináris változók, indikátorok

Bizonyos korlátokat csak a változók adott értékei esetén kell betartani, mely feltételes korlátokat ún. indikátorváltozók felvételével lehet kezelni. A klíringalgoritmusban a következő bináris változók szerepelnek:

- $ACCEPT_b \in \{0,1\}$ a „ b ” indexű *fill or kill* típusú blokk ajánlat elfogadása
- $indACC0, indACC1$: indikátorváltozók az órás ajánlatok feltételes korlátaikhoz
 - $indACC0_o$: értéke HAMIS $\Leftrightarrow ACCEPT_o = 0$ (5.3)
 - $indACC1_o$: értéke HAMIS $\Leftrightarrow ACCEPT_o = 1$ (5.4)
- $indPBL$: indikátorváltozók a parciális blokk ajánlatok korlátaikhoz
 - $indPBL_b$: értéke HAMIS $\Leftrightarrow ACCEPT_b = 0$ (5.5)
- $indCNWFP, indCNWFN$: indikátorváltozók $CONG_PRICE$ feltételes korlátaikhoz:
 - $indCNWFP_{c,h}$: értéke IGAZ $\Leftrightarrow CONG_PRICE_{c,h} > 0$ (5.6)
 - $indCNWFN_{c,h}$: értéke IGAZ $\Leftrightarrow CONG_PRICE_{c,h} < 0$ (5.7)

5.3.3 A célfüggvény

A célfüggvény a társadalmi jólét növekményének maximalizálása, azaz az elfogadott vételi ajánlatokból beérkező és az eladási ajánlatokra kifizetett összeg maximumát keressük. Értéke a változók másodfokú (*quadratic*) függvénye:

$$\begin{aligned}
 \max \left(\sum_o -p_{o0} ACCEPT_o q_o - \sum_o (p_{o1} - p_{o0}) ACCEPT_o^2 q_o \right. \\
 \left. - \sum_b p_b ACCEPT_b \sum_h q_{b,h} - \sum_b (p_{b1} - p_{b0}) ACCEPT_b^2 \sum_h q_{b,h} \right. \\
 \left. + 10^{-6} \sum_{vétel} q_o ACCEPT_o + 10^{-4} \sum_{vétel} ACCEPT_b \sum_h q_{b,h} \right) \quad (5.8)
 \end{aligned}$$

Az első sor tagjai az elfogadott órás, míg a második soré pedig az elfogadott blokk ajánlatokból eredő célfüggvény értéket adják. Az utolsó két tag csak mennyiségi indeterminancia esetén jut szerephez (a szorzó tényezők miatt), s biztosítják a kereskedett mennyiség maximalizálását, a blokk ajánlatok preferálásával (ld. 4.2.2 és 5.1 fejezetet).

³⁷ Ha pozitív irányban van szűkület, akkor az értéke pozitív, ha pedig az irányítottsággal ellentétesen fellépő áramlásra jelent szűk keresztmetszetet a c ág, akkor a $CONG_PRICE$ értéke negatív.

5.3.4 Piaci korlátok

A piaci korlátok a termékek 4.1.1 és 4.1.2 fejezetekben leírt elfogadási szabályainak matematikai megfogalmazását adják. Az órás termékekre a következő korlátok vonatkoznak:

CMK1

Órás ajánlatot csak akkor lehet elfogadni, ha nyereséget termel:

$$ACCEPT_o > 0 \Rightarrow q_o(MCP_{m,h} - p_{o0}) \geq 0 \quad (5.9)$$

CMK2

Órás ajánlatot biztosan vissza kell utasítani, ha veszteséget termelne:

$$q_o(p_{o0} - MCP_{m,h}) > 0 \Rightarrow ACCEPT_o = 0 \quad (5.10)$$

CMK3

Lineáris órás ajánlat részleges elfogadásának szabálya:

$$0 < ACCEPT_o < 1 \Rightarrow MCP_{m,h} = p_{o0} + (p_{o1} - p_{o0})ACCEPT_o \quad (5.11)$$

CMK4

Órás ajánlatot teljesen el kell fogadni, ha végső ára eladás esetén a kialakult ár fölött, vétel esetében az alatt van:

$$q_o(p_{o1} - MCP_{m,h}) < 0 \Rightarrow ACCEPT_o = 1 \quad (5.12)$$

CMK5

A CMK1-4 piaci korlátokat egyetlen korláttal is meg lehet fogalmazni, melyben a feltételes korlátok miatt szükséges indikátorváltozók is szerepelnek. A korlátban szerepel egy *BIG* segédváltozó, amely mindig egy indikátorváltozó együtthatója, értékére teljesül, hogy $BIG > MCP_{max}$. Emiatt azt adott korlát mindig az indikátorváltozó értéke szerint érvényesül.

$$\begin{aligned} -\overline{indACC1_o} BIG &\leq sign(q_o)(p_{o0} + (p_{o1} - p_{o0})ACCEPT_o - MCP) \\ &\leq \overline{indACC0_o} BIG \end{aligned} \quad (5.13)$$

5.3.5 Áramlás alapú hálózati korlátok

A klíringalgoritmusban a flow-based fogalmak alkalmazásához a következő korlátokat kell felvenni (vö. 3.2.4 fejezet):

CNW5

Kirchoff-törvény a teljes piac-összekapcsolásra. (Egyes piacokra nem lehet felírni, ugyanis a piaci területek fizikai határait nem lehet megfeleltetni a kritikus ágak egy részhalmazának.) A piaci területek nettó exportjának összege nulla.

$$\sum_m NEX_{m,h} = 0 \quad (5.14)$$

A piacok nettó exportja pedig az elfogadott órás és blokk ajánlatok ajánlati mennyiségének előjelhelyes összegével egyezik meg:

$$\sum_m \left(\sum_o ACCEPT_{o,m} q_{o,m} + \sum_b ACCEPT_{b,m,h} q_{b,m,h} \right) = 0 \quad (5.15)$$

CNW6

Minden hálózati ágon az áramlásnak AMF_N és AMF_P közé kell esnie, minden órában.

Ez a feltétel is a piacok nettó exportjával fejezhető ki (minden órára és korlátra):

$$\begin{aligned} AMF_N_{c,h} &\leq \sum_m PTDF_{c,m,h} \left(\sum_o ACCEPT_{o,m} q_{o,m} + \sum_b ACCEPT_{b,m,h} q_{b,m,h} \right) \\ &\leq AMF_P_{c,h} \end{aligned} \quad (5.16)$$

CNW7

A $CONG_PRICE$ nem nulla következményei az áramlásra (szigorú egyenlőséggé válik a CNW6 egyik egyenlőtlensége):

$$CONG_PRICE_{c,h} < 0 \xrightarrow{\overline{indCNWFN}} AMF_N_{c,h} = \sum_m PTDF_{c,m,h} * NEX_{m,h} \quad (5.17)$$

$$CONG_PRICE_{c,h} > 0 \xrightarrow{\overline{indCNWFP}} AMF_P_{c,h} = \sum_m PTDF_{c,m,h} * NEX_{m,h} \quad (5.18)$$

Vagyis, ha az áramlás értéke szigorúan kisebb, mint $AMF_P_{c,h}$, akkor $indCNWFP = 0$, azaz $CONG_PRICE_{c,h} \leq 0$; és fordítva.

CNW8

A torlódási árak és a piaci árak összefüggéseit fejezi ki e korlát. A torlódási árak MCP -t növelő hatása a szűk keresztmetszetektől mentes helyzethez képest: $\Delta MCP_m = \sum_c PTDF_{c,m,h} * CONG_PRICE_{c,h}$ Két tetszőleges piac közötti árkülönbség tehát:

$$\begin{aligned} MCP_{m_1,h} - MCP_{m_2,h} &= \Delta MCP_{m_1} - \Delta MCP_{m_2} \\ &= \sum_c (PTDF_{c,m_1,h} - PTDF_{c,m_2,h}) * CONG_PRICE_{c,h} \end{aligned} \quad (5.19)$$

Célszerű egy referenciapiacot választani, amelyhez képest az áreltéréseket fogjuk viszonyítani. Legyen ez az első piac, ekkor minden órában és minden további piacra:

$$MCP_{m,h} - MCP_{1,h} = \sum_c (PTDF_{c,m,h} - PTDF_{c,1,h}) * CONG_PRICE_{c,h} \quad (5.20)$$

Ha a „hub” piacunk a PTDF számításakor az első piac, akkor a rá vonatkozó összes $PTDF_{c,1,h} = 0$. Így azonos MCP és PTDF „hub” piac választása esetén:

$$MCP_{m,h} - MCP_{1,h} = \sum_c PTDF_{c,m,h} * CONG_PRICE_{c,h} \quad \forall m - re \quad (5.21)$$

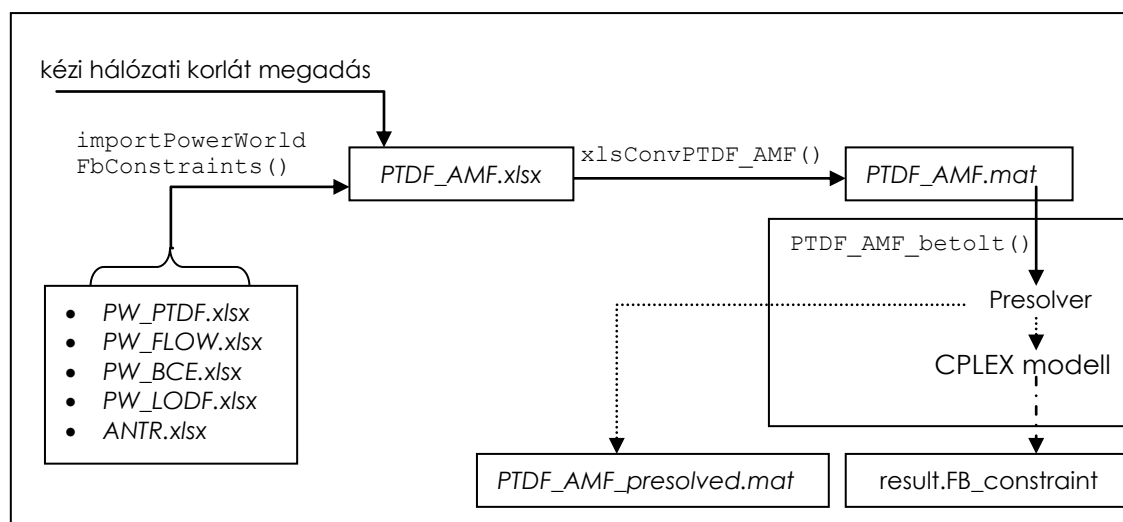
5.4 A klíringszoftver működése

A Market Coupling Solver főprogram felépítése három részre osztható. Elsőként a beállító paraméterek szerinti konfiguráció történik meg, majd bemeneti *.mat*

adatfájlokból felépül az alkalmazott adatstruktúra (5.4.1). A második szakaszban a szimulált napok szerint ciklusba szervezve történik a klíring kiszámítása (5.4.2-5.4.4). Az utolsó programrész pedig elvégzi a nyers adatok rendezését, az eredmények visszaadását. (5.4.5). A számítást végző fő MATLAB függvényt a bemeneti adatfájlokat *.xlsx* formátumból előállító további szkriptek egészítik ki (5.4.1). Lehetőség van a Power World hálózatszámító programcsomag adatainak automatizált feldolgozására, a flow-based korlátok számítására.

5.4.1 Adatok beolvasása

Az áramlás alapú hálózati korlátok viszonylag nagy méretű bemeneti adatfájlokat igényelnek. Minden egyes lehetséges szűkületet az összekapcsolt piacok számánál eggyel több számadat jellemez. Az utólagos ellenőrizhetőség és más adatforrások (akár a kézi korlátdefiniálás) egyszerű alkalmazása érdekében a korlátok egy Excel-táblázatban (*PTDF_AMF.xlsx*) találhatóak. A következő ábra bemutatja a flow-based korlátok beolvasásának folyamatát, az eredményül kapott fájlokat, valamint az alkalmazott beolvasó szkripteket és függvényeket.



5.1 ábra: Áramlás alapú kapacitásadatok kezelése a MCS-ben
(egyetlen szimulált kereskedési nap esetére)

A főprogram futásához szükséges *.mat* fájlok előállítása több lépcsőben történik. A közvetlenül szükséges táblázat kétféleképpen állhat elő: a PowerWorld által generált fájlokból, vagy manuálisan megadva, más adatforrásokat felhasználva.

importPowerWorldFbConstraints()

E szkript végzi a hálózati modell eredményeinek feldolgozását, és a szükséges formátumú kapacitásadatok számítását. Ehhez a következő adatokat használja fel:

- Alapeseti PTDF tényezők értéke, az összes relációra (*PW_PTDF.xlsx*)

- Áramlási adatok a hálózati elemeken (*PW_FLOW.xlsx*)
- Modellben szereplő teljesítménycserék (*PW_BCE.xlsx*)
- Távfűtési kiesési teljesítmény eloszlási tényezők (*PW_LODF.xlsx*)

A 6.2 fejezet részletesen bemutatja a hálózatszámító programcsomag alkalmazását és az áramlás alapú korlátok számítását a publikus adatokból.

xlsConvPTDF_AMF()

A következő lépés a főprogram által gyorsan kezelhető *PTDF_AMF.mat* fájl előállítás a korlátokat tartalmazó táblázatból. A *xlsConvPTDF_AMF()* szkript nem pusztán a táblázatban egyetlen napra szereplő adatokat olvassa be, hanem ha az első táblázatban több kerekedési nap van megadva, akkor annak megfelelően feldolgoz minden további *PTDF_AMF_D[2...x].xlsx* fájlt is. Az adott napra vonatkozó táblázatban a *main* munkalap tartalmaz beállítási adatokat, mely alapján vonatkozhat minden kereskedési órára a *H1* munkalapon megadott FB adatsor, valamint engedélyezhető az *AMF_resetting* munkalap szerint a *H[1...24]* munkalapon megadott maximálisan allokalható áramlások módosítása.

A szkript lefuttatásával a *PTDF_AMF.mat* struktúrát kapjuk meg, melynek mezői:

- INFO: Az alapadatokat adja meg (órák, napok, szűkületek és piacok száma)
- MARKET_NAMES: Piacok neveit sorrendben tartalmazó cella
- CONG_NAMES: FB korlátok neveit sorrendben megadó cella
- Logikai engedélyező „flagek” részprogramok futásához: *IS_AMF_RESETTING*, *IS_MARKET_CONSISTENCY*, *IS_PTDF_AMF_CONSISTENCY*
- MARKET_NEIGHBOUR: Piacok közötti szomszédsági mátrix (ld. 5.6)
- PTDF: Teljesítmény eloszlási tényezők, naponként egy-egy 3 dimenziós (órák, szűkületek, piacok) tömböt tartalmazó cellába rendezve
- AMF: Áramlási korlátok naponként egy-egy 3 dimenziós (órák, szűkületek, irány) tömböt tartalmazó cellába rendezve

PTDF_AMF_betolt()

A főprogram ciklusának részeként futó függvénynek a feladata az adott napra vonatkozó PTDF és AMF tömbök előállítása. A megfelelő cellaelem kiválasztásán túl számos hibaellenőrző rutin és az előszűrő algoritmus is része e programrészletnek.

A már említett konzisztencia ellenőrzések a következő hibakiszűréseket végzik:

- Adatkonzisztencia: A *PTDF_AMF.mat*-ban és a főprogram beállításakor megadott adatok egyezőségének ellenőrzése (piacok száma, órák száma, stb.)
- Piackonzisztencia: A két helyen megadott piacnevek egyezőségének ellenőrzése. Ha csak a sorrendjük más a főprogram *options* struktúrájában, akkor ennek megfelelően átrendezi a szubrutin a *PTDF* oszlopait.

elemibidek_betolt()

Hasonlóan a hálózati adatokat betöltő függvényhez a piaci ajánlatokat is a szimulált kereskedési naponként tölti be az *elemibidek_betolt()* függvény a beállítások, *scenario* mezőjének részeként megadott könyvtárban található *.mat* fájlokból. Naponkénti és piaconkénti bontásban a forrásfájlok a tartalmazzák az egyes elemi ajánlatok volumenét (q_0), kezdő és végső árát (p_0, p_1) valamint a termék, azaz az óra azonosítót ($H[1...24]$).

5.4.2 STEP 1

A megvalósított klíringalgoritmus tulajdonképpen három lépésben („STEP”) végzi el az összekapcsolt piacok elszámolási feladatának kiszámítását.

A STEP 1 során a CPLEX egy egyszerűsített feladatot old meg. Az első lépés során nincsenek explicit módon figyelembe véve az árváltozók (*MCP* és *CONG_PRICE*), azaz eredményként tehát csak az egyes ajánlatokra allokkált mennyiségek kerülnek meghatározásra. Mivel így kihagyható az indikátorváltozók felvétele, valamint a korlátok jelentős része is kimarad (pl. a CNW6-8), így rendkívül gyorsan megoldható optimalizációs feladatot kapunk.

5.4.3 STEP 2

A második lépésben a STEP1 eredményeiből kiindulva történik a tőzsdén kialakuló árak valamint a korátokra jellemző szűkületi felárak meghatározása. Mindezek során a szükséges kerekítési lépéseket is elvégzi a program, illetve a nettó exportok számítását is. A lépés során az eredményeket egy a MATLAB beépített függvényeit alkalmazó programrész határozza meg.

Fontos kiemelni, hogy csak akkor lehet a STEP 1-2-vel kiszámítani a piaci árakat, ha egyik áramlás alapú korlát sem bizonyul szűk keresztmetszetnek a piac-összekapcsolásban, vagyis minden zónában azonosak az árak. Ha van szűkület, akkor szükség van a STEP 3-ra. Továbbá bizonyos esetekben a *fill or kill* attribútummal rendelkező blokkok esetén elképzelhető, hogy a STEP 1 eredményeként megkapott

allokált mennyiségekre nem létezik olyan MCP megoldás, amely az összes feltételt kielégítené³⁸ (PRB, ld. 5.1 fejezet). Ez esetben is végre kell hajtani a harmadik lépést.

5.4.4 STEP 3

A STEP 3 során az árak és mennyiségek egyetlen optimalizálási feladat megoldásával kerülnek meghatározásra. A feladat bonyolultsága miatt a lépés időigénye jelentős lehet. Ekkor az összes, az előző fejezetben ismertetett változó, indikátor és korlát szerepel a megoldandó CPLEX feladatban. A nagyszámú bináris változó jelentősen megnöveli a számítási igényt.

Az optimalizációs feladat sikeres megoldása esetén, a STEP 2-höz hasonlóan külön MATLAB szubrutin végzi el a beállított szabályok szerint az egyes piacokon a kerekítéseket és így az MCP-k és szűkületi felárak korrekcióját is.

5.4.5 Eredmények

A CPLEX modell megoldása és a kerekítések elvégzése után még szükség van a nettó exportok, a határkeresztező tranzakciók (ld. 5.6 fejezet) és a szűkületként jelentkező elemek azonosítására. A klíring végleges eredményeit a MATLAB főprogram egy `result` visszatérési értékben adja meg. Ha lefut az áramlás alapú korlátok előzetes szűrése, akkor a program külön `.mat` fájlba menti a szűrt hálózati korlátokat tartalmazó `PTDF_AMF` adatstruktúrát. A szűrés vizualizációját biztosítja az áramlás alapú korlátok által alkotott kétdimenziós nomogramok kirajzolásának lehetősége.

5.5 Hálózati korlátok előzetes szűrése

Az optimalizációs probléma definiálásakor számos korlátot kell felvenni. Külön csoportot alkotnak az áramlás alapú kapacitásokkal kapcsolatos egyenletek. Ezek mindegyike ugyanazon változókra ad megkötést, mint a piaci korlátok. Emiatt a teljes klíringfeladat megoldásakor a redundáns feltételek kiszűrése rendkívül nehéz, ráadásul a később feleslegesnek bizonyuló korlátok indokolatlanul növelik a megoldandó CPLEX modell változóinak számát (különösen az indikátorváltozók számát a feltételes korlátok miatt). Ahogyan az a 6.1.2 fejezetben ismertetett numerikus számítás időigényének változásából látható jelentős szerepe van az ismertetett előzetes szűrésnek a MCS főprogram futásának gyorsításában.

³⁸ Mivel az első lépés során olyan fill or kill blokkok is elfogadásra kerülhettek, melyek ugyan összességében növelik a társadalmi jólétet, de egyedileg nézve az adott blokk veszteséges lenne.

5.5.1 A szűrési feladat

A lineáris egyenlőtlenségrendszerek egyszerűsítésének feladata nem újszerű igény. Számos módszer létezik ezen előszűrési (*presolver*) részfeladat megoldására, – azonban ahogyan az eljárások összehasonlítását elvégző Paulraj S. és Sumathi P. 2010-es tanulmányának eredményeiből is kitűnik – az alkalmazott szűrési algoritmustól nemcsak a szükséges számítási, illetve memória igény függ, hanem az egyszerűsítés hatékonysága, a redundánsként azonosított korlátok száma is! [28] Emiatt sem célszerű tisztán a CPLEX beépített presolver módszereire hagyatkozni, hiszen a korlátok egy részhalmaza jól kezelhető és hatékonyan egyszerűsíthető.

Mindemellett a releváns hálózati korlátok megtalálása nemcsak egy matematikai feladat, mely megoldásával az algoritmus gyorsítható. A kiszűrt, illetve a szükséges korlátoknak a hálózattervezési és kapacitástervezési eljárásokra visszaható jelentése is van. Például, ha egy korlát sohasem jelenik meg a releváns korlátok közelében, akkor megvizsgálandó, hogy egyáltalán kritikus elemnek tekintendő-e a továbbiakban. A releváns korlátokat is két csoportba sorolhatjuk:

- Egyetlen piac exportnövekménye esetén releváns szűkület
- Csak több piac nettó export növekményének kölcsönhatása esetén releváns szűkület

Az első csoportba az adott piac rendszerét üzemeltető rendszerirányító által közvetlenül felügyelendő szűkületek tartoznak, legyen az saját vagy idegen hálózatbeli elem. A második csoportba tartozó korlátok esetében a koordinált üzem-előkészítés kiemelt jelentőségű, hiszen csak két (vagy több) piac együttesen fellépő, bizonyos értékű export-import pozíciója esetében jelentenek szűk keresztmetszetet.

5.5.2 Áramlás alapú hálózati korlátokat szűrő algoritmus

Az implementált szűrési algoritmus elvét a nomogramok segítségével lehet szemléltetni. A hálózati korlátok által definiált biztonságos zóna a lehetséges nettó exportok számától függően $M-1$ dimenziójú, ha a piacok száma M (a „hub”-ra történő nettósítás miatt). Redundáns szűkületi feltételnek tekintjük azt a síkot, melynek minden pontja távolabb helyezkedik el az origótól, mint egy másik sík, az adott térrészben³⁹.

Belátható, hogy elegendő a korlátokat a tengelymetszetekkel, mint adatokkal jellemezni. Ezen metszéspontok egyben megadják, hogy az adott hálózati ág mennyi

³⁹ A koordináták előjele által meghatározott tér- 2^{M-1} -ed rész, azaz például 4 piac esetén ténnyolcad.

többlet exportot enged a tengelynek megfelelő piac esetében szállítani a „hub” piac felé, feltéve, hogy a többi résztvevő terület szaldója pontosan nulla (azaz az ún. nem szimultán hálózati kapacitásokat (NSC⁴⁰) adja meg).

Az előszűrő részprogram a fent meghatározott két csoportnak megfelelően azonosítja a releváns korlátokat, minden egyes órára vonatkozóan külön-külön. Elsőként minden piacra azonosítja a nem szimultán kapacitásokra vonatkozó lényeges hálózati feltételeket, azaz a tengelymetszéspontok közül az origóhoz legközelebbieket. Második lépésben pedig az eddig azonosított korlátokon felüli, nem elhagyható egyenlőtlenségeket jelöli meg az algoritmus. Ilyen egy korlát, ha az általa definiált hipersík tengelymetszéspontjai közül legalább az egyik közelebb van az origóhoz, mint a többi releváns szűkület esetében az egyes szűkületenként számított, azonos tengelyhez tartozó metszéspont.

Fontos kiemelni, hogy egyetlen hálózati szűkület kettő egyenlőtlenséget foglal magában, azonos lineáris együtthatókkal (*PTDF*), a két áramlási irányra együttesen (*AMF_P* és *AMF_N*) (ld. (5.16)). Emiatt egy adott „*h*” órában, a „*c*” korláthoz tartozó *PTDF_{h,c}* nemcsak a piacok szerinti elemei előjeleinek megfelelő térrészben, hanem az azzal ellentétes térrészre vonatkozóan is képez egy hipersíkkal korlátot. Az implementált algoritmus ezen jellegzetesség alapján halad végig a korlátokon, hiszen csak az azonos térrészben „megtalálható” síkok esetében van értelme a tengelymetszetek összevetésének.

Az áramlás alapú hálózati adatokat beolvasó MATLAB függvény presolver modulja (a szoftver ilyen értelmű beállítása esetén) elvégzi a releváns korlátok identifikálását, és az előszűrt korlátokat a bemeneti fájlra utaló fájlnev alatt elmenti. A szűrt korlátok között nem szerepelnek azok, melyek egyetlen órában sem bizonyultak relevánsnak. Továbbá a csak bizonyos órákban redundáns korlátokra az adott órákban $AMF^{\pm} = \pm\infty$ kerül beállításra, tehát a CPLEX szoftver számára is könnyen azonosíthatóvá válnak ezek a nem releváns feltételek.

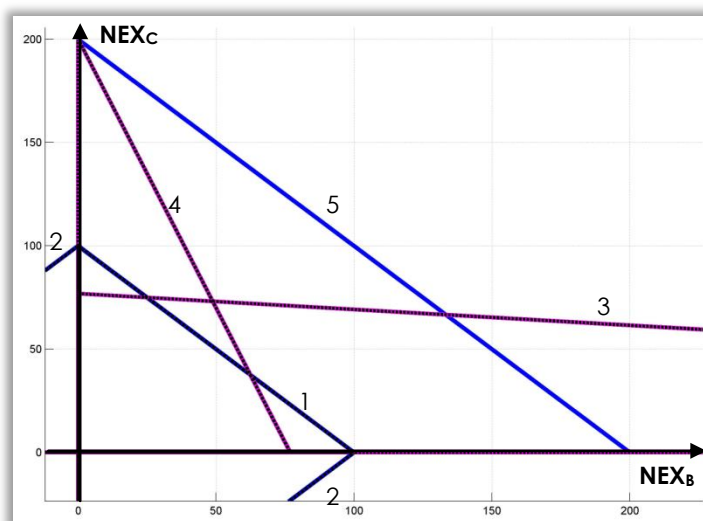
⁴⁰ Non-simultaneous capacity

5.5.3 Példa az előzetes szűrés működésére

5.1 táblázat: Az előzetes szűrés működése: példában szereplő korlátok

Kontingencia azonosító	PTDF				
	A (hub)	B	C	AMF+	AMF-
1	0	1	1	100	-100
2	0	1	-1	100	-100
3	0	-0,1	-1,3	100	-100
4	0	1,3	0,5	100	-100
5	0	1	1	200	-200

A következő ábrán egy a táblázatban megadott három (A, B és C) piacra vonatkozó egyszerű korlátokra, az I. térszövedre szorítkozóan szemléltetem⁴¹ az implementált presolver működését.



5.2 ábra: Példa az előzetes szűrés működésére
(fekete színnel pontozva a releváns korlátokat)

Ha elvégezzük a nomogram felrajzolását, akkor látható, hogy az első csoportba tartozik releváns korlátok közül 3. és 4. (magenta színnel jelölve), ugyanis ezeknek van az origóhoz legközelebbi tengelymetszetük. Az 1-es korlát jól láthatóan a második csoportba tartozik, hiszen van egy-egy olyan tengelymetszete, mely közelebb van, mint a 3. vagy 4. korlát adott metszéspontja. A többi térszöved (egyébként szimmetrikus) képéből következően ugyanez igaz a 2. egyenlőtlenségpárra is. Az 5. korlát pedig elhagyható.

⁴¹ Az áttekinthetőség érdekében az egyes korlátokat reprezentáló egyenesek csak a releváns térszöved végéig kerültek megrajzolásra. Az egyenlőtlenségek természetesen a teljes síkon érvényesek, csak a releváns korlátok kiválasztása történik a szemléletesen térszövedekre korlátozott módon.

5.6 Határkeresztező menetrendek számítása

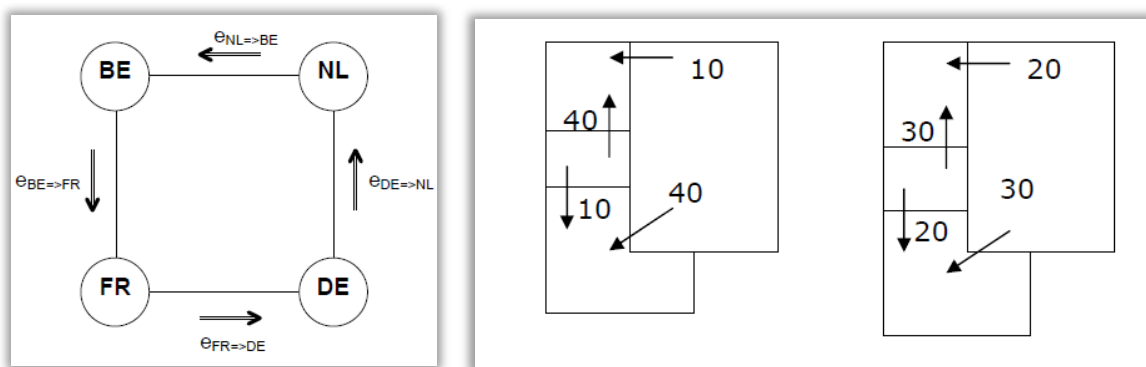
Az átviteli kapacitások implicit allokálására alkalmazott áramlás alapú aukciós eljárás esetén a leíró egyenletekben nem jelennek meg a határkeresztező tranzakciók, hiszen ezeket nem közvetlenül kell korlátozni, mint az NTC alapú eljárásban. Sőt elvileg olyan kritikus ágakat tartalmazó lista is elképzelhető (főleg a presolver futása után), amely nem tartalmazza a határmetszéket alkotó hálózati elemeket.

A jelenlegi európai villamosenergia-piacban a nemzetközi kereskedelmi tranzakciókat határkeresztező menetrendek bejelentésével lehet végrehajtani, illetve beilleszteni az együttműködő, lokális piacokra. Tehát mindenképpen szükséges a villamosan szomszédos szabályozási területek között a menetrendek képzése (BEC⁴²), a rendelkezésre álló nettó export mennyiségekből. Egyszerűen belátható azonban, hogy ez a számítás nem egyértelmű a lehetséges huroktranzakciók miatt.

A jelen fejezet elején röviden ismertetem a jelenleg alkalmazott BEC algoritmust, majd pedig bemutatom az általam a MCS-ben alkalmazott új módszert.

5.6.1 Jelenlegi megoldás a CWE régióban

A nyugat-közép-európai régiós Franciaország, Belgium, Hollandia és Németország másnapi tőzsdéinek összekapcsolása jelenleg NTC alapú kapacitásfogalmak szerint kezeli a hálózati korlátokat. A határmetszések lehetővé tesznek egy huroktranzakciót $FR \rightarrow BE \rightarrow NL \rightarrow DE \rightarrow FR$ irányban, így a BEC nem triviálisan egyértelmű.



5.3 ábra: Határmetszések a CWE régióban;
példa azonos⁴³ nettó exporthoz tartozó tranzakciókra [26]

Az eljárás a nettó exportokból indul ki, majd iteratív algoritmussal ad olyan menetrendeket, melyek négyzetösszege minimális és teljesítik az ATC-vel megadott

⁴² Bilateral Exchange Computation

⁴³ A két esetben 50 MWh-t importál Hollandia és Franciaország, míg Németország és Belgium ugyanennyit exportál

metszék korlátokat. Fontos cél a határkeresztező tranzakció volumenének minimalizálása, hiszen így jóval nagyobb lehetőség marad az intraday piacokon a kereskedésre. [26]

A jelenleg alkalmazott megoldás hátránya, hogy ebben a formában csak olyan összekapcsolásokban működik, melyekben az árzónák közötti metszékeket reprezentáló szomszédsági gráfban egyetlen egy kör képezhető, tehát speciálisan csak a CWE MC részeként működik.

A hamarosan bevezetni kívánt áramlás alapú megközelítés esetére a BEC algoritmus jelenleg fejlesztés alatt áll. [18][26]

5.6.2 Általános megoldás

A határkeresztező menetrendek számítása tulajdonképpen egy olyan egyenletrendszer megoldását jelenti, mely jellemzően nem oldható meg egzaktul. A kiindulási adatot az árzónák nettó exportjai adják, melyekre a hálózati korlátok eredetileg vonatkoznak. Mivel a klíringszámítás eredményeként kapjuk meg ezeket a területi pozíciókat, így azok biztosan teljesítik az előírt hálózati korlátokat.

További bemenetet jelent még a határmetszékeket rögzítő adatsor. A MCS szoftverben ez utóbbit az árzónák, piacok közötti kapcsolatot leíró MARKET_NEIGHBOUR szomszédsági mátrix jelenti. Ebből képezhető egy B mátrix, mely leképzi a határmetszéki csereprogramok ($\underline{be}$) és a nettó exportok viszonyát⁴⁴

$$M \cdot E [B]^{E \times 1} \underline{be} = M \cdot 1 NEX \quad (5.22)$$

Például a B mátrix e . sora a következőképpen néz ki, amely az $i. \rightarrow j$. piac között definiált e . csereprogram nettó exportokat befolyásoló hatását adja meg:

$$\dots [B]_{ei} = 1 \quad \dots [B]_{ej} = -1 \quad \dots \quad (5.23)$$

A BEC számítási feladat tehát azon C mátrix megkeresését jelenti, melyre:

$$[C] NEX = \underline{be}. \quad (5.24)$$

és a csereprogramokra teljesül, hogy négyzetes értelemben minimálisak értékűek, azaz $\sum_e \underline{be}_e^2$ minimális.

Az (5.22) összefüggés csak akkor oldható meg egyértelműen a nettó exportokra a menetrendek ismeretében, ha B invertálható. Ehhez szükséges feltétel, hogy négyzetes legyen a mátrix, vagyis a piacok száma (M) egyenlő kell legyen a határok számával (E).

⁴⁴ A jobb felső indexben jelölve a mátrixok dimenzióját

Ráadásul $\|B\| = 0$ is szükséges lenne az inverz létezéséhez, ami az (5.23) alapján láthatóan csak $M = E = 2$ -re teljesül triviálisan. Általánosan $E = (M - 1) \dots \frac{M(M-1)}{2}$ lehet, ahol a két szélsőérték az egyszerűen összefüggő, valamint a teljes gráfhoz tartozik.

B klasszikus inverze tehát nem írható fel a gyakorlati esetek többségében. A lineáris algebra egyik fejezete azonban foglalkozik az alul, illetve túlhatározott egyenletrendszerek közelítő megoldásával. Ebben az esetben a négyzetes értelemben vett minimális hibával járó leképztést, azaz a keresett C mátrix az eredeti B mátrix ún. általánosított, vagy Moore-Penrose pszeudoinverze, jelben: [27]

$$[C]_{NEX} = [B]^+_{NEX} = \widehat{be} \quad (5.25)$$

A pszeudoinverzrel kapott megoldás az eredeti, tetszőleges dimenziójú B mátrixot tartalmazó, kiindulási (5.22) egyenletrendszer esetén a minimális abszolút értékű optimális megoldás. Az így kapott $\widehat{be}$ becslőre tehát teljesül a négyzetes értelemben vett minimalitási követelmény. (Az általánosított inverz számítása rutin művelet a MATLAB környezetében, a `pinv()` függvény segítségével.)

A pszeudoinverzrel történő megoldás előnye tehát, hogy tetszőleges számú metszékkel összekapcsolt, összefüggő piaci területek között működik, bármilyen elképzelhető határelrendezés esetére ad megoldást. További pozitívum, hogy egzaktul, egyetlen lépésben pontosan számítható eredményt ad, nem szükséges iteratív eljárással fokozatosan közelítve keresni az optimum pontot.

Optimális határkeresztező menetredek módosítása intraday időtávon

Természetesen a négyzetes értelemben vett optimális megoldás nem feltétlenül egyezik meg az egyes relációk aktuális piac árkülönbségeknél, keresettségnek megfelelő súlyozással⁴⁵. Előfordulhat, hogy a szállítási órák közeledtével, az intraday piacon az eredetileg azonos másnapi árú területek árai szétváltnak. Azaz a napi allokáción még szűkület nélkül működő elemeken egy NTC kapacitásokkal működő, rövidebb kereskedési időtávon többlet szállítási igény jelentkezik. Koordinált intraday piac esetén lehetőség van a bilaterális csereprogramok módosításával többlet mozgásteret biztosítani bizonyos preferált relációkban a napon belüli kereskedéshez.

Ha az árzónák kapcsolatát reprezentáló gráfban van kör, akkor e mentén az érintett metszéken előjelhelyesen azonos mértékben módosítva a csereprogramokat a nettó

⁴⁵ Egy későbbi feladatként megvizsgálandó a B mátrix elemeinek 1-től eltérő felvétele, mely implicit módon magában hordozná az egyes metszék intraday árszozonyoktól függő prioritizálását.

exportok megváltoztatása nélkül lehetséges bizonyos relációkban kereskedési lehetőségeket felszabadítani a napon belüli piac részére. Ezzel a módszerrel bizonyos mértékben feloldható az NTC alapú fogalmak kötöttsége, mely a relációk közötti implicit kapacitásfelosztás miatt következik be (ld. *security domain*, 3.4 fejezet).

6. A bővített piacklíring szoftver alkalmazása vizsgálatokra

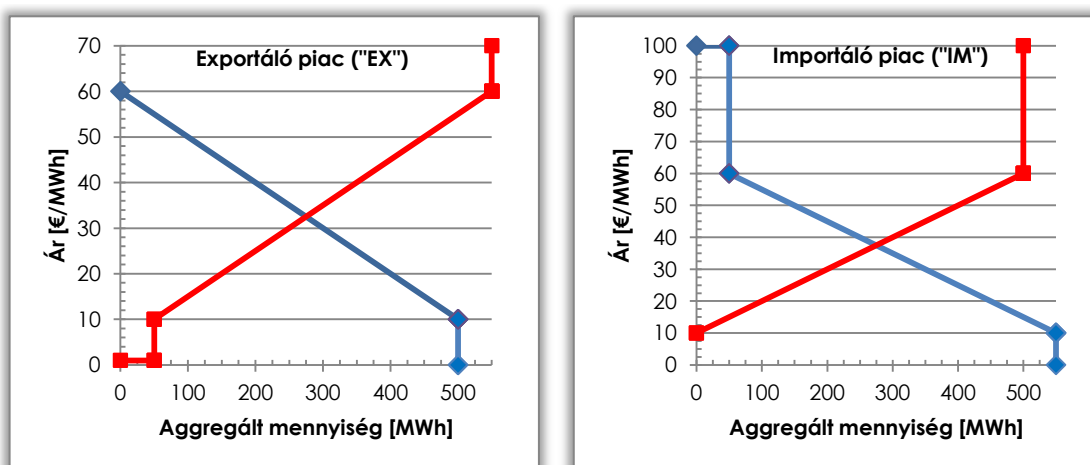
E fejezetben ismertetem az elkészített program keretrendszerében elvégzett numerikus vizsgálatokat. Elsőként bemutatom a legegyszerűbb eseteket, melyekkel a megvalósítás pontosságát teszteltem, majd pedig egy valós hálózati, illetve piaci ajánlati adatsorokra vonatkozó szimulációt.

6.1 Áramlás alapú korlátok implementálásának tesztjei

Az összetett klíringalgoritmus helyes működését célszerű volt elsőként a lehető legegyszerűbb esetekre ellenőrizni. A referencia eredményeket nemcsak kézzel lehetett ebben az esetben könnyen kiszámítani, hanem az áramlás alapú korlátoknak megfelelő ATC kapacitások mellett is lefutattam az eredeti, [8] cikkben ismertetett algoritmust.

6.1.1 Implementálási teszt egyszerű ajánlatokkal, két piacra

Elsőként óránként és piaconként három elemi ajánlat klíringjét számítottam a MCS-rel, két piac összekapcsolására. Az izolált ajánlati vételi és eladási görbe a következőképpen alakult a felvett két ± 500 MWh-s lineáris, valamint egy árelfogadó jellegű ajánlatra:



6.1 ábra: Kétpiacos implementálási teszt aggregált ajánlati görbéi
(az „exportáló” és „importáló” piacra)

Legyen az első piac az exportáló („EX”), vagyis ahol a két lineáris ajánlat mellett egy 50 MWh volumenű 1 €/MWh-s ajánlati árú eladási bid szerepel. Az importáló („IM”) piacon pedig ugyanekkora mennyiségre egy 100 €/MWh-s vételi ajánlat szerepel harmadikként, minden órában az ajánlati könyvben.

Elsőként az izolált, illetve a szűkület nélküli⁴⁶ összekapcsolt piacokra számítottam a klíringet. Az utóbbi esetre külön-külön ATC és FB esetre⁴⁷, ugyanis a megoldási algoritmus nem azonos a két esetben. ATC alkalmazása esetén külön kezeltek a piacok, végtelen áteresztőképességű határokkal, míg az áramlás alapú esetben a teljes összekapcsolásra kell felírni az elfogadott vételi–eladási volumenek egyensúlyát (vö. (5.15) összefüggés), és majd közvetve a nettó export pozíciókat mozgatva keresi meg az algoritmus az optimumot.

6.1 táblázat: Eredmények hálózati korlátok nélkül

	Izolált		Összekapcsolt (ATC)		Összekapcsolt (FB)	
	EX	IM	EX	IM	EX	IM
Piac	EX	IM	EX	IM	EX	IM
MCP [€/MWh]	32,5	37,5	35	35	35	35
MCV [MWh]	275	275	300	250	300	250
MCF (EX→IM) [MWh]	n.é.		50		50	

Az izolált eredmények⁴⁸ megfelelnek a 6.1 ábra aggregált görbéin szereplő metszéspontok koordinátaival. Összekapcsolt esetben pedig mindkét algoritmus azonos eredményt ad: a két 50 MWh-s ajánlat a határon keresztül lesz átszállítva és a piacokon a fennmaradó két-két ajánlat metszéspontja adja a 35 €/MWh-s MCP-t. Természetesen szűkület hiányában az árak teljesen kiegyenlítődték.

A következő vizsgálatban már aktív hálózati korlátokat alkalmaztam. Az ATC az első órákban folyamatosan növekszik 0 MW-ról 60 MW-ra, 10 MW-s lépcsőkben, a kihasznált EX→IM, vagyis pozitív irányban. Ezzel ekvivalens áramlás alapú korlátokat definiáltam a *PTDF_AMF.xlsx* bemeneti adatfájlban.

6.2 táblázat: Ekvivalens hálózati korlátok

Óra azonosító	ATC korlátok	Áramlás alapú korlátok				
	Metszék ATC-je [MW]	Szűkület neve	PTDF ^{EX}	PTDF ^{IM}	AMF ⁺	AMF ⁻
H1	0	n1	0	-1	0	-1000
H2	10	n2	0	-1	10	-1000
H3	20	n10	0	0,5	1000	-10
H4	30	n9	0	1	1000	-30
H5	40	n7	0	-0,2	8	-1000
H6	50	n1	0	-1	50	-1000
H7	60	n4	0	0,1	1000	-6

⁴⁶ options.Scenario.Coupling értéke 0 izolált, 1 pedig szűkület nélküli összekapcsolásra

⁴⁷ options.Scenario.Type értéke 0 ATC, 1 pedig flow-based hálózati korlátok esetén

⁴⁸ Minden órában azonos eredményt kapunk, hiszen a három-három ajánlat teljesen azonos a 24 órára.

Minden órában összesen 10 db („n1...n10”) flow-based szűkület lett felvéve. A fenti táblázatban nem szereplő korlátok nem relevánsként lettek felvéve, azaz $PTDF^{IM}=1$ és $\pm 1000\text{MW}$ -os AMF értékkel. A klíring eredményét mutatja be a következő táblázat a definiált korlátokat tartalmazó első hét órára:

Óra	ATC algoritmus				FB algoritmus			
	ATC [MW]	MCP_{EX} [€/MWh]	MCP_{IM} [€/MWh]	MCF [MW]	Aktív korlát sorszáma	MCP_{EX} [€/MWh]	MCP_{IM} [€/MWh]	MCF [MW]
H1	0	32,5	37,5	0	1	32,5	37,5	0
H2	10	33,0	37,0	10	2	33,0	37,0	10
H3	20	33,5	36,5	20	10	33,5	36,5	20
H4	30	34,0	36,0	30	9	34,0	36,0	30
H5	40	34,5	35,5	40	7	34,5	35,5	40
H6	50	35,0	35,0	50	1	35,0	35,0	50
H7	60	35,0	35,0	50	-	35,0	35,0	50

Az eredmények a vártak megfelelően tökéletesen megegyeznek, hiszen teljesen azonos piaci ajánlatok mellett a különböző módon leírt hálózati korlátok is pontosan ugyanakkora MCF-t engednek meg a két árzóna között.

6.1.2 A presolver hatékonyságának vizsgálata

Elvégeztem az előszűrés hatékonyságának numerikus vizsgálatát, mely során véletlenszerűen felvett hálózati korlátokra teszteltem az MCS futási idejét ki-, illetve bekapcsolt előszűréssel. Az összesen 30 db hálózati korlát forrása a *PTDF_AMF.xlsx*, melyben az eloszlási tényezők -1 és 1 közé eső véletlen számok (Excel függvényvel), az AMF értékei pedig -75...+75 MW-tal kerültek perturbálásra az *AMF_settings* munkalap beállításai alapján.

A vizsgált 5 eset közötti különbséget a táblázatkezelőben a képletek újraszámításával módosuló $PTDF$ tényezők, valamint az AMF értékek ismételt módosítása jelenti, vagyis teljesen véletlenszerűek a korlátok. A piaci ajánlatok három összekapcsolt piacra vonatkoznak a futási idő tesztje során. A 24 órára összesen több mint 1600 egyedi ajánlat beadása került szimulálásra. Nemcsak a futási idő, hanem a klíringeredmények is újabb ellenőrzésre kerültek a teszt által. Minden esetben azonos piaci árakat és kereskedett mennyiséget szolgáltatott az MCS az előszűrés alkalmazásától függetlenül, ez is alátámasztja a presolver implementációjának helyességét.

6.3 táblázat: Az előzetes szűrés hatása a futási időre

Eset sorszáma	Futási idő előszűrés nélkül [s]	Futási idő előszűréssel [s]	Kiszűrt korlátok száma
1	137,7	70,9	19
2	146,3	80,7	21
3	110,9	65,2	18
4	112,6	72,6	14
5	123,0	78,3	17
átlag:	126,1	73,5	
gyorsulás:	42%		

A vizsgált komplex esetben már jelentős hatással van az egyszerűnek tekinthető előszűrési eljárás a futási időre, pedig a CPLEX pontosan ugyanazon saját presolver metódusokat alkalmaz mindkét esetben!

6.2 Áramlás alapú korlátok számítása nyilvános adatokból, hálózatszámító programmal

Az áramlás alapú kapacitásfogalmakkal operáló piacklíring szoftver fontos fejlesztési lépése volt, hogy képes legyen egy valós hálózatszámító programból származó adatok feldolgozására és kezelésére. A választás a Power World load flow számító program-csomagra esett, ugyanis korábbi tanulmányaim során már dolgoztam e szimulátorral.

Szakdolgozati munkám részeként elkészült egy közép-európai átviteli hálózati rendszermodell a Power Worldben, mely a valós topológiát tartalmazza. A modell ugyan publikus adatokra épül, azonban a dolgozatban leírt módszereket követve a szűkebb régióban vett áramlásokat, jellemző szűk keresztmetszeteket a program jó közelítéssel vissza tudja adni. [29]

Alapeset beállítása

A rendszermodellben az alapeset beállítása főként az alapszcenário szerinti csereprogramok és fizikai áramlások beállítását jelenti. A határkeresztező menetrendek beállítása során a ténylegesen megvalósult fizikai áramlásokhoz lehet hangolni az erőművi betáplálások eloszlását, melyet elvégezve a modell tükrözi a valós üzemállapotot.

PTDF számítása

Az alapeseti PTDF tényezők könnyen előállíthatóak a Power World segítségével, tetszőleges szabályozási területek közötti szállításra vonatkoztatva. Az implicit allokációhoz hub piacra vetített eloszlási faktorok szükségesek, melyet az

`importPowerWorldFBConstraints()` függvény számítja ki, a (3.12) és (3.13) összefüggések többszöri automatikus alkalmazásával.

AMF számítása

Rendelkezésre álló áramlásértéket nem lehet közvetlenül a programcsomaggal számítani. Érdekes felidézni, hogy pontosan hogyan is számítható az AMF egy hálózati ág esetén, ismerve a szimulátorban szereplő terhelhetőségi határértéket (S_{max}), valamint az alapeseti fizikai ágáramlást ($F_{cb,co,base_case}$).

A (3.4) összefüggés emlékeztet a meddő teljesítmények figyelembevételére, azaz $TMF_{cb,co} = S_{max} \cos \varphi_{cb}$. A teljesítménytényező értéke rendszerint 0,95. [19]

A (3.8) összefüggésbe, vagyis az AMF kifejtésébe behelyettesítve NMF kifejtését, összevonva FRM-et és BFRM-et, valamint irányszimmetrikusnak tekintve a TMF-et:

$$AMF_{cb,co}^+ = TMF_{cb,co} - FRM_{cb,co} - BFL_{cb,co} - ANF_{cb,co} \quad (6.1)$$

A BFL (3.5) és az ANF (3.7) behelyettesítésével:

$$AMF_{cb,co,h}^+ = TMF_{cb,co} - FRM_{cb,co} - F_{cb,co,base_case,h} + PTDF_{cb,co,h} \cdot BCE_{belső,h} - PTDF_{cb,co,h} \cdot ANTR_h \quad (6.2)$$

Az ellenkező irányra vonatkozóan elvégezve a behelyettesítést:

$$AMF_{cb,co,h}^- = -TMF_{cb,co} + FRM_{cb,co} - F_{cb,co,base_case,h} + PTDF_{cb,co,h} \cdot BCE_{belső,h} - PTDF_{cb,co,h} \cdot ANTR_h \quad (6.3)$$

A fenti két összefüggés alapján számítja az AMF-et a korlátokat importáló szkript. A TMF, F és FRM a FLOW.xlsx adataiból, a BCE pedig a BCE.xlsx adataiból számítható. Az FRM arányát fixen a TMF 15%-ában rögzítettem, minden hálózati elemre, ugyanis a MAVIR 500 MW-os TRM-et alkalmaz a 400 kV-os összeköttetéseket tartalmazó határmetszerekre vonatkozóan, amely két rendszerösszekötő esetén is az elvi maximális kapacitás kb. 20%-a! A CWE FBMC esetén pedig 10% az FRM alapértelmezett értéke. [17][18] Az AMF számításához a nominált szállításokat (ANTR-t) pedig az ATC és NTC adatokból tudjuk kiszámítani (ld. a 6.3.2 pontban).

Kiesések hatása

Az „n-1” elv értelmében nemcsak az alapeseti hálózatra kell megelőzni a szűk keresztmetszeteket, hanem legalább az egyszeres hiányállapotokra is meg kell adni a korlátokat. A kiesések hatásait a linearitás miatt az LODF tényezők segítségével lehet gyorsan számítani. Mivel már a PTDF tényezők esetében is DC load flow-t alkalmaztunk, így ez az egyszerűsítés nem jár további pontosságvesztéssel. Kontingencia esetén megváltoznak a PTDF tényezők és az ágak áramlásai, ld. (3.15).

6.3 Valós piac-összekapcsolások szimulációja

A célkitűzésnek megfelelően elvégeztem egy piac-összekapcsolás napi klíringjét valós piaci ajánlatok és a hálózatmodellből származó, reális számú hálózati korlát együttesére. A választás a cseh, szlovák és magyar tőzsdék összekapcsolásnak, áramlás alapú korlátokkal történő szimulációjára esett, melyhez részletes adatok álltak rendelkezésre.

6.3.1 Piaci ajánlatok a tőzsdéken

A tőzsdék által órás felbontásban publikált kereslet-kínálati görbéből a tanszéken fejlesztett módszer segítségével kinyerhetők az órás termékekre adott ajánlatok. Az általam elérhető visszafejtett ajánlatok közül a legfrissebb adatok 2012 májusának első hetére vonatkoztak. [8]

Ezek közül 2012. május 4-ét választottam szimulálandó napként, mely egy pénteki nap volt. Ezzel a választással nemcsak a kereskedési nap (D), hanem az alapeset összeállításául szolgáló D-2 nap is, azaz május 2-a is hétköznapi munkanapra esett, így a lehető legközelebbi nap szolgált referenciaként a hálózati adatok szempontjából.

A vizsgált piac ajánlati adatsora tekintélyes méretű, a három tőzsdére összesen 7140 db elemi ajánlat került szimulációra.

6.3.2 Ismert, valós hálózati és kereskedelmi adatok

Bár a publikus adatokból nem lehet teljes értékű, óráról órára hajszálpontos hálózati modellt felépíteni, azonban az elérhető információkat rendszerben szemlélve kellően részletes képet lehet felépíteni a rendszer állapotáról.

Az ENTSO-E honlapjának része az ún. *transparency platform*, mely egy közös felületen jeleníti meg többek között a tagországok szűk keresztmetszet kezeléssel kapcsolatos publikált adatait. A kapacitásadatok közül a vizsgált CZ→SK és SK→HU metszésekre a publikált NTC a május 2-4-ig terjedő időszakban állandó volt és megfelelt a szokásosan elérhető hálózati kapacitásnak. Azaz a vizsgált napokon nem jelentkezett releváns hálózati kiesés, mely indokolta volna az átviteli lehetőségek szűkítését, vagyis az átviteli hálózat minden elemét bekapcsolt állapotúnak vehetjük fel. Emellett a portálon megtalálhatóak a menetrendezett csereprogramok, valamint a ténylegesen kialakult fizikai áramlások is, mely az alapeset előállításához szükséges. [30]

A napi ATC-kre vonatkozóan két adatforrás közül naprakész adatokat. A CZ-SK piac-összekapcsolásra vonatkozóan a szlovákiai rendszerirányító DAMAS portálja publikálja a rendelkezésre álló (ATC_d), valamint az implicit módon allokkált (AAC) kapacitásokat. A

CAO honlapján pedig a májusban még explicit módon allokkált szlovák-magyar határ napi kapacitásadatai találhatóak meg. [31]

6.4 táblázat: A szimulált napon NTC és ATC_d kapacitásadatok

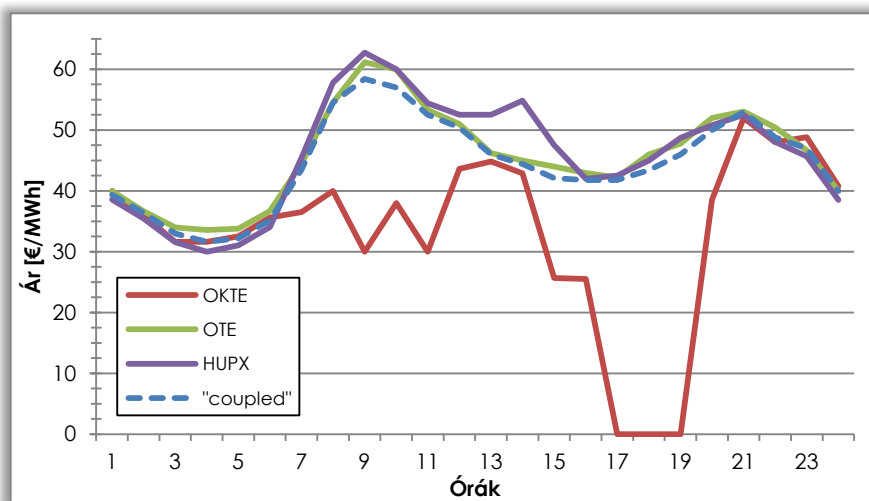
Reláció	SK → HU [MW]	HU → SK [MW]	SK → CZ [MW]	CZ → SK [MW]
NTC	1100	800	1200	1750
ATC_d	132-337	1553-1768	1879-2481	469-1071

Az órás felbontású ATC_d -t nemcsak az áramlás alapú korlátokkal való összevethetőség miatt fontos ismerni, hanem segítségével kiszámítható a hosszú távú jogokból felhasznált kapacitás is. A D-2 napon este 18 óráig kell megtenni a CAO-nál az éves és havi PTR-okra a menetrendi bejelentést. Ha $ATC_d < NTC$, akkor abban az irányban:

$$ANTR_h = AAC_h = NTC - ATC_{d,h} \quad (6.4)$$

6.3.3 Izolált és korlát nélküli eredmények

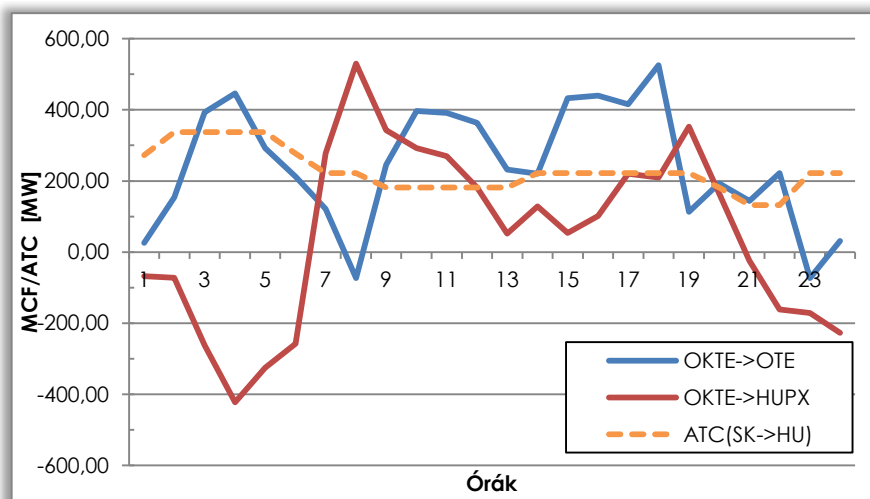
Érdekes elsőként az adott napi piaci viszonyokat megvizsgálni, a jellemző árak és áramlási irányok szempontjából. Ehhez elegendő az izolált piaci árakat, valamint a korlát nélküli összekapcsolásokban szereplő áramlásokat és a közös MCP-t számítani.



6.2 ábra: Izolált és korlát nélküli összekapcsolt piaci árak a vizsgált napon

Megfigyelhető a szlovák piac (OKTE) izolált árainak jelentős eltérése a közel együtt futó magyar (HUPX), cseh (OTE), valamint az összekapcsolt („coupled”) piacokon kialakuló árakhoz képest.

A 6.3 ábra bemutatja, hogy ha nem volna hálózati korlát, akkor az árkiegyenlítő milyen határkeresztesző áramlással járna a vizsgált két metszéken. Az OKTE piac a teljes összekapcsolásban szinte folyamatosan exportáló, míg a HUPX nappal (6 órában az ATC-t meghaladóan) importáló, a nap többi részében pedig exportáló volna.

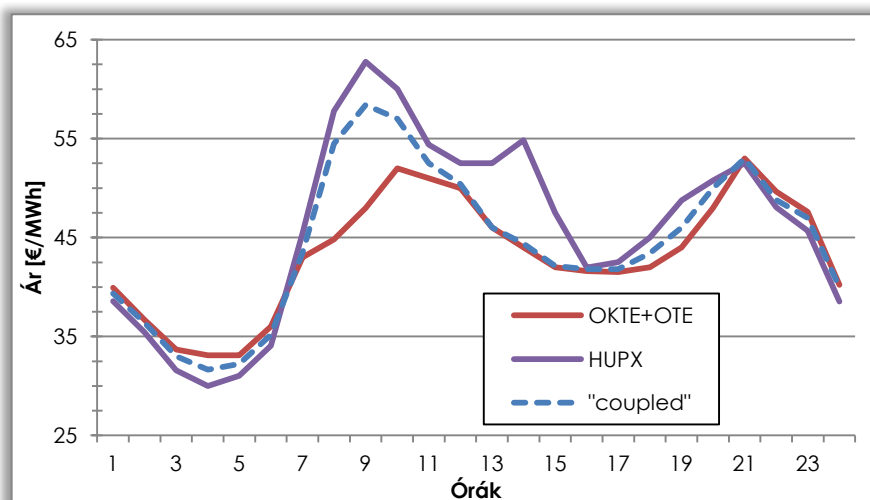


6.3 ábra: Árkiegyenlítéshez szükséges áramlások a vizsgált napon

6.3.4 ATC alapú összekapcsolások

Tényleges piaci szituáció

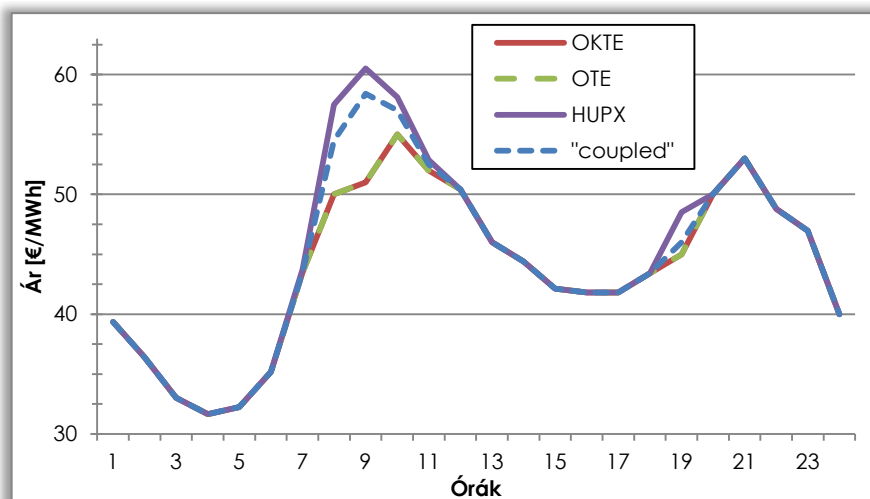
2012. május 4-én csak a CZ-SK piacok voltak ár alapon összekapcsolva, a HUPX izoláltan működött. A nap során jellemző szlovák exportot nem korlátozta egyik órában sem a legalább 1800 MW-os ATC_d , így kiegyenlítődtek a két piacon az árak. A vizsgált napon a valóságos tőzsdei árak a következőképpen alakultak:



6.4 ábra: A vizsgált napon kialakuló tőzsdei árak, és az elérhető optimum („coupled”)

CZ-SK-HU piac-összekapcsolás

Ha az adott napon működött volna a teljes CZ-SK-HU piac-összekapcsolás, akkor – változatlanul feltételezve az ajánlatokat – összesen hat órában (H7-11 és H19) elszakad a HUPX ára a cseh-szlovák közös ártól, ugyanis az SK→HU relációban az ATC_d nem elegendő az árkiegyenlítéshez (6.3 ábra).



6.5 ábra: Árak ATC alapú CZ-SK-HU piac-összekapcsolás esetén

6.3.5 Hálózati modell beállítása, áramlás alapú korlátok képzése

A szakdolgozatomban leírt módszerekkel a rendszermodellt a referencia nap, azaz 2012. május 2-a, H12-es órájának megfelelően konfiguráltam, vagyis beállítottam a tranzakciókat, területei fogyasztásokat, valamint összevettem a kialakuló fizikai áramlásokat az ENTSO-E honlapján publikált adatokkal. Az alapeseti teljesítménycsere nettósított és SK hub-ra vonatkoztatott értéke CZ: 714 MW, HU: -1017 MW volt, vagyis a megszokott észak-dél irányú tranzakciós irányoknak megfelelő volt.

Az eredményül kapott *PW_PTDF*, *PW_FLOW*, *PW_LODF*, *PW_BCE*, valamint a (6.4) szerint számított nominált tranzakciókat tartalmazó *ANTR* táblázatokból automatikusan generálta az importáló szkript a *PTDF_AMF.xlsx* táblázatot. Az előállított, 283 elemű *cb* lista csak az alapesetet tartalmazta, így a vártan megfelelően nem jelentkezett szűk keresztmetszet a klíring során. A hálózatnak teljesítenie kell az „n-1” elvet, így csak az „n-0” állapotot tekintve jellemzően rendkívül nagy kapacitásokat számolhatnánk.

Egyszeres hiányállapotok generálása

Elvégeztem az egyszeres hiányállapotok, mint lehetséges kritikus kontingenciák felvételét az áramlás alapú korlátok közé. Ez összesen közel 283^2 esetet jelentett volna, így csak bizonyos feltételek teljesülése esetén lett felvéve a hiányállapot. Az esetszűrést mind *PTDF*, mind pedig *LODF* tényezőkre elvégeztem: alapesetben legalább 1%-ot⁴⁹ érnie egyik piacra az eloszlási tényezőnek, míg a kiesésre vonatkozóan legalább 5%-ot az átterhelődési aránynak. Az első feltételt teljesítő elemek száma 72

⁴⁹ A *PTDF*-re vonatkozó 3%-os limit esetében is még ugyanazon releváns korlátokat kapnánk még az alapeseti kontingenciák esetében is.

volt a modellben, és összesen további 978 db egyszeres kiesés melletti korlátra teljesült a második feltétel is.

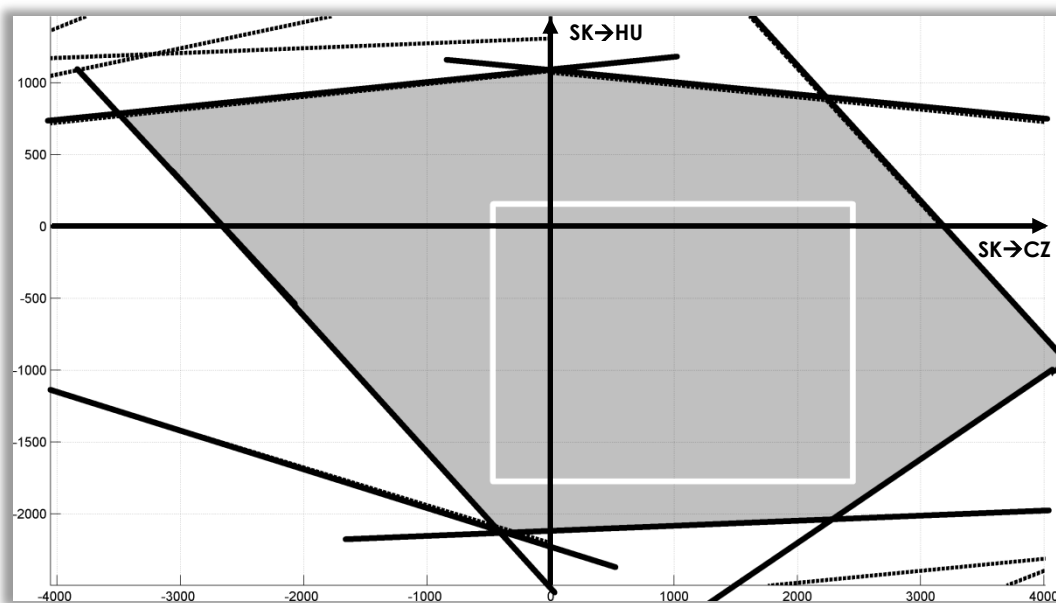
6.3.6 Releváns áramlás alapú korlátok, a presolver eredménye

A több mint 1050 korlát közül azonban most is csak néhány, összesen 14 korlát bizonyult relevánsnak valamely órában. A 6.5 táblázatban a H12 órára jellemző áramlási adatokkal találhatók meg ezen kritikus ág – hiányállapot kombinációk. A kritikus ágak fele a Magyarországra északról belépő nagymértékű tranzit miatt jelentkezik, elsősorban a győri 400 kV-os összeköttetéseken, valamint a szlovák-ukrán rendszerösszekötőn (*Velky Kapusany–Munkacsevo*). Ráadásul ezen elemekre a legnagyobb a PTDF tényezők értéke, a HUPX nettó export változásának a negyede, harmada. Három releváns korlát bizonyult 1. típusnak, az 5.5.1 fejezet felosztása szerint, a vizsgált órában, kettő kis kapacitású 220 kV-os távvezeték, valamint a Győr-Gönyű összeköttetés, a Göd-Levice határkeresztező összeköttetés hiányában.

6.5 táblázat: Releváns áramlás alapú korlátok a szimulációs napon

Szűrt korlátok sorszáma	Kritikus ág	Kritikus hiányállapot	Típus	PTDF ^{CZ}	PTDF ^{HU}	AMF ⁺	AMF ⁻
1	Deák2-Sajószöged2	"n-0"	1	0,7%	7,6%	81,1	-404,4
2	Oroszlány2-Győr2	"n-0"	2	-1,6%	10,7%	238,4	-419,3
3	WienSO2-Győr2	"n-0"	2	1,3%	-3,8%	145,2	-106,3
4	Lemesany4-Lemesany2	"n-0"	1	13,3%	14,1%	421,4	-354,2
5	Győr-Gönyű	"n-1": Göd-Levice	1	1,2%	-35,2%	746,5	-461,0
6	Munkacsevo-V.Kapusany	"n-1": Göd-Levice	2	9,3%	35,2%	1051,1	-775,7
7	Győr-Gönyű	"n-1": Litér-Hévíz	2	2,8%	-30,6%	921,4	-331,4
8	Győr-Gönyű	"n-1": Győr-Szombathely	2	2,4%	-28,8%	761,4	-534,5
9	Győr-Gönyű	"n-1": Győr-Gabčíkovó	2	3,6%	-19,8%	1075,8	-354,1
10	Munkacsevo-V.Kapusany	"n-1": Győr-Gönyű	2	8,1%	28,5%	867,2	-864,8
11	Munkacsevo-V.Kapusany	"n-1": Rosiori4-Rosiori2	2	8,5%	26,0%	829,7	-846,7
12	Slavetice-Dürrrohr_I	"n-1": Slavetice-Dürrrohr_II	2	6,0%	-10,3%	345,4	-1833,4
13	St.Peter-Pleinting	"n-1": Tauern_A2-Tauern_B2 (PST)	2	-2,0%	1,0%	720,0	-126,4
14	St.Peter-Pleinting	"n-1": Zell3-Zell2	2	-2,3%	1,4%	706,8	-153,6

A több korlát gyors áttekintéséhez érdemes a nomogramot alkalmazni. A következő ábrán a fenti korlátokból képzett nomogram látható, melybe együttesen felvettem (fehér téglalappal) az adott órában ténylegesen elérhető *ATCd* értékeket a két határmetszékre vonatkozóan. Láthatóan jellegre helyes eredményt kaptunk a közelítő load flow modell alkalmazásával is.



6.6 ábra: Nomogram az összes áramlás alapú korlátra és az ATC korlátok

A piacklíring végrehajtásakor a korlát nélküli áreredményeket kaptam vissza, hiszen láthatóan a szimulált flow-based korlátok a csak néhány órában szűkös ATC-nél is jóval nagyobb hálózati mozgásteret engednek meg.

6.3.7 AMF módosítása, jelentkező szűk keresztmetszetek vizsgálatához

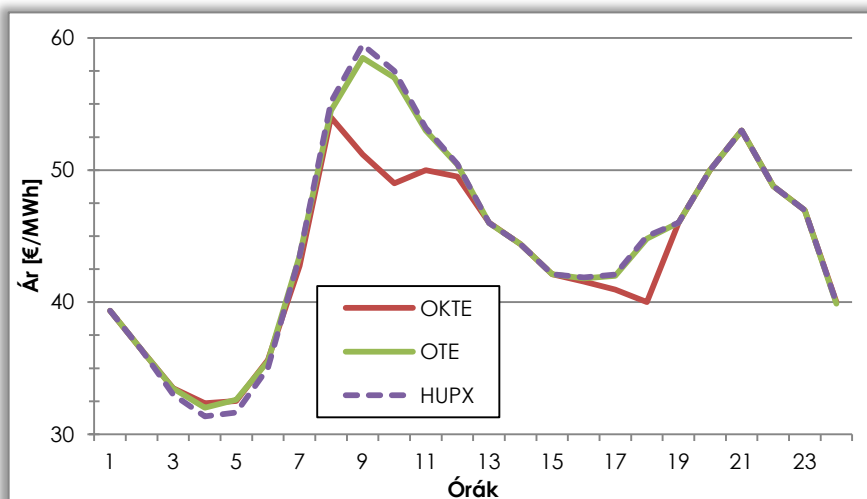
Elvégeztem a szimulált adatsorok módosítását, hogy biztosan jelentkezzen szűk keresztmetszet és így kényszerűen végrehajtsódjon a STEP3 programrész is. A megvizsgált valós bemeneti adatmennyiségű példára kb. 8-10 perces futási idővel számolhatunk, hiszen e lépés a teljes optimalizációs feladatot magában foglalja, az összes indikátorváltozóval együtt. A feladat ugyan számításigényes, mégis a MCS lehetővé teszi a bonyolult piacklíring szokványos számítógépeken történő lefuttatását.

A korlátok megszorítása egyszerűen történt: a *PTDF_AMF.xlsx*-ben engedélyeztem az *AMF_resettinget* és 0,2-es skálázó faktort állítottam be minden órára. Ezáltal összesen 13 órában alakult ki szűk keresztmetszet a szimulációban.

Az áramlás alapú kapacitáskorlátok jellegéből adódik, hogy egy órában csak egyetlen egy korlát jelent majd szűk keresztmetszetet, a szűkületi felára pedig a PTDF-ek

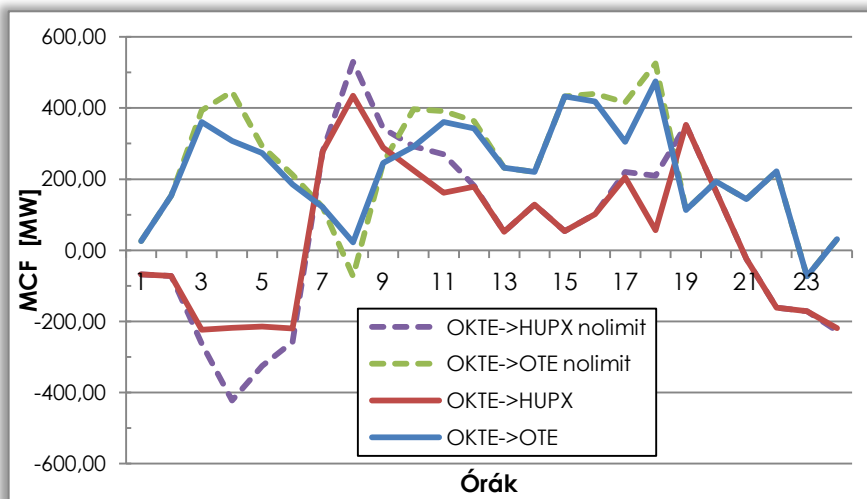
arányában fog megoszlani az árznák MCP felárain. Az elszámoló árak alakulását mutatja be a 6.7 ábra.

Látható, hogy a szűk keresztmetszettel terhelt órákban az OKTE piac ára jelentősen lecsökken a közel azonos cseh és magyar MCP-hez képest. A PTDF tényezők előjele azonos e korlátokra (1. és 4. korlát), így az OTE többlet importja is korlátozott, azaz nem csak a SK→HU határ mentén válnak szét az árak!



6.7 ábra: Piacok árkülönbsége flow-based szűkültre

Ezzel párhuzamosan a metszék áramlások – melyet új elemként pszeudoinvertet alkalmazó algoritmussal számít a program – a következőnek adódtak:



6.8 ábra: MCF alakulása flow-based szűkület esetén

6.3.8 Társadalmi jólét

A klíring célfüggvénye a társadalmi jólét növekménye, vagyis ezt maximalizálja az ajánlatok elfogadásával az algoritmus. A social welfare tulajdonképpen a piaci szereplők számára elért többlet, melyet a napi kereskedés biztosított, az adott hálózati

kapacitáskorlátok betartásával. Ha megvizsgáljuk a szimulált esetekben a célfüggvény értékét, akkor e nyereséget számszerűsíthetjük is:

6.6 táblázat: Társadalmi jólét növekménye a szimulált esetekben

Eset	Célfüggvény értéke [$\times 10^7$ €]	Piac-összekapcsolásból eredő növekmény [€]
Izolált piacok	1,0984	0
Korlát nélküli összekapcsolás	1,1063	79000
CZ-SK MC + HUPX (ATC)	1,1049	65000
CZ-SK-HU MC (ATC)	1,1061	77000
CZ-SK-HU FBMC eredeti hálózati modell adatok	1,1063	79000
CZ-SK-HU FBMC redukált kapacitás	1,1060	76000

A nyers social welfare az árelfogadó ajánlatok limitára miatt 10 millió €-s nagyságrendű. Az összekapcsolási módok által elért társadalmi haszonértékek összevetéséből látható, hogy a hálózati kapacitások korlátozott volta sem eredményezi az ideális, korlát nélküli összekapcsoláshoz képesti jelentős, hatékonyságbeli elmaradást. Sokkal lényegesebb az együttműködés bővítése, szélesítése. Erre figyelmeztet a 3. és 4. eset közötti markáns különbség, az elért fogyasztói és termelői többletek összege között.

A tőzsdék integrációja azonban nem előzheti meg a piaci struktúra számos egyéb elemeinek a harmonizációját. E kulcsfontosságú összehangolási folyamat irányítását, koordinálását vette át az Európai Unió saját hatáskörébe a 3. energiacsomag nemzeti joganyagokba történő átültetésével. Az ACER és ENTSO-E közösségi szervezetek célja az egységes belső integrált villamosenergia-piac megteremtése, melynek legfőbb eleme a dolgozatom fő témája, a szervezett, másnapi időtávú villamosenergia-piacok áramlás alapú kapacitásfogalmakat alkalmazó ár alapú összekapcsolása. [7]

Összegzés

Dolgozatomban összefoglaltam a BME Villamos Energetika Tanszéken kifejlesztett piacklíring algoritmus áramlás alapú kapacitásfogalmakkal történő bővítését megcélzó munkámat. Ennek részeként áttekintést adtam az európai villamosenergia-piacon alkalmazott szűk keresztmetszet kezelési módszerekről, az NTC, illetve az áramlás kapacitásfogalmak rendszeréről és számítási módjokról. A hálózati átvivő képesség implicit módon történő kiosztásának, valamint a másnapi szervezett energiapiacok ismertetésével a piacklíringet végrehajtó szoftver működési környezetét, az alkalmazott elveket határoltam körül.

Mindezen információkra építve algoritmus szintjén is kidolgoztam az áramlás alapú piac-összekapcsolások klíringjét, mely egy ún. *mixed-integer quadratic programming* típusú optimalizációs feladatot eredményez. A fő célkitűzést teljesítve elkészítettem a MATLAB környezetben futó szoftver bővítését, mely nemcsak egyszerűbb adatstruktúrákat, hanem a valós gyakorlatban előforduló mennyiségben is képes kezelni a piaci ajánlatokat, illetve a hálózati korlátokat. A szoftver futásának gyorsítása érdekében a *flow-based* korlátokat szűrő megoldást fejlesztettem ki. Továbbá a határkeresztező csereprogramok meghatározására is új, pszeudoinvert szállításán alapuló algoritmust alkalmaztam. Az elkészített program képességeinek demonstrálására nemcsak egyszerűen áttekinthető tesztadatokra, hanem egy valós kereskedési napra is elvégeztem az összekapcsolt HUPX, OKTE és OTE piacok klíringjének szimulációját. Munkám eredményeképpen a piacklíring szoftver a belső villamosenergia-piac (IEM) célmodelljének megfelelő kapacitásfogalmak kezelésére is alkalmassá vált, és alapul szolgál a témában további oktatási és kutatási feladatok elvégzésére.

A klíringszimulátort kettő irány mentén kell továbbfejleszteni a jövőben. Egyrészt a meglévő funkcionalitások implementálását kell tovább optimalizálni a futási idők csökkentése érdekében. Másrészt pedig új képességeket kell felvenni, a 2015-re megvalósítani tervezett IEM részeként alkalmazott, közös *European Price Coupling* algoritmus jelenleg formálódó leírása alapján. Az új funkciók közé tartozik a két kapacitásfogalom kevert alkalmazását jelentő hibrid, illetve az áramlás alapú fogalmak esetén lehetséges igényként felmerülő, minden villamos határra ún. intuitív (FBIMC) piac-összekapcsolások klíringje. Emellett a piaci ajánlatok oldaláról is folyamatosan új termékek és kötıtségek (tetszőleges profilos blokk és flexibilis órás ajánlatok, gradiens korlátok, stb.) merülnek fel, a közös rendszerbe felveendő elemként.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Dr. Raisz Dávidnak, konzulensemnek, hogy szakmai iránymutatásaival, tanácsaival segítette munkámat.

Köszönettel tartozom továbbá Divényi Dánielnek, hogy segített a piacszimulátor programozástechnikai részleteinek feltárásában a fejlesztés során.

Irodalomjegyzék

- [1] Bertalan Zsolt: „Nemzetközi együttműködés és határkeresztező villamosenergia-kereskedelem” *Előadás – BME – Villamosenergia-piac és minőség szabályozás, 2012. február 22., Budapest* <http://www.vet.bme.hu/okt/mscm/ver/piacmin/index.htm> (2012.02.29.)
- [2] Gordos Péter: „Villamos energia határkeresztező kereskedelme az Európai Unió belső villamosenergia-piacán, főbb akadályok, továbblépési lehetőségek” *Ph.D. értekezés, Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest, 2004*
- [3] Bertalan Zsolt: „A villamos energia piacának működése” *Előadás – BME – Villamosenergia-piac és minőség szabályozás, 2012. február 6., Budapest* <http://www.vet.bme.hu/okt/mscm/ver/piacmin/index.htm> (2012.02.10.)
- [4] Göllöncsér Péter, Sulyok Zoltán: „A magyar villamosenergia-rendszer átviteli kapacitásának számítása I. rész” *Elektrotechnika 2004/3. szám pp. 66-69.*
- [5] ENTSO-E: „Network Code on Capacity Allocation and Congestion Management” *Draft for consultation 23rd March 2012* <https://www.entsoe.eu/resources/network-codes/capacity-allocation-and-congestion-management/> (2012.04.05.)
- [6] 714/2009/EK rendelet (2009. július 13.) a villamos energia határokon keresztül történő kereskedelme esetén alkalmazandó hálózati hozzáférési feltételekről és az 1228/2003/EK rendelet hatályon kívül helyezéséről <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:211:0015:0035:HU:PDF> (2012.04.23.)
- [7] Sárközi Réka: „A piac-összekapcsolás útja” *Magyar Villamos Művek Közleményei 2011/3-4. szám, pp.34-40.* http://www.mvm.hu/hu/szakmai-informaciok/szakmai_kiadvanyok/mvm-kozlemenyek/Documents/2011/mvm_kozlemenyei_2011_3_4.pdf (2012.03.17.)
- [8] Divényi Dániel Péter, Dr. Raisz Dávid, Sleisz Ádám, Dr. Dán András: „Szervezett villamosenergia-piac algoritmus fejlesztése és alkalmazása” *Elektrotechnika 105. évf, 2012/07-08 pp.5-7., Budapest*
- [9] ENTSO-E: Draft Network Code for Operational Security according to Regulation (EC) No 714/2009 on conditions for access to the network for cross-border exchanges in electricity *05th April 2012*, <https://www.entsoe.eu/resources/network-codes/operational-security/> (2012.04.24.)
- [10] CONSENTEC GmbH – Frontier Economics Ltd.: „Analysis of Cross-Border Congestion Management Methods for the EU Internal Electricity Market” *Final Report 2004. június*

- [11] MAVIR Zrt.: „A Magyar Villamosenergia-rendszer Kereskedelmi Szabályzata és Mellékletei” <http://www.mavir.hu/web/mavir/kereskedelmi-szabalyzat> (2012.04.15.)
- [12] CAO: „Binding Rules for Coordinated Auction of Transmission Capacity in the CEE-Region including Annexes 28.10.2011” http://central-ao.com/images/stories/upload/Auctions2011/auction_rules_28_11_2011_binding.pdf (2012.04.30.)
- [13] Divényi Dániel: „Szervezett villamosenergia-piac, piac-összekapcsolások” *Előadás – BME – Villamosenergia-piac és minőségsszabályozás, 2012. március 14., Budapest* <http://www.vet.bme.hu/okt/mscm/ver/piacmin/index.htm> (2012.03.22.)
- [14] François Boisseleau: „The role of power exchanges for the creation of a single European electricity market: market design and market regulation” *doktori értekezés, 2004, University of Paris IX Dauphine*
- [15] Nordic Power Market: „The day-ahead market - Elspot” <http://www.nordpoolspot.com/How-does-it-work/> (2011.05.01.)
- [16] ETSO: „Definitions of Transfer Capacities in liberalised Electricity Market” 2001. április https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/ntc/entsoe_transferCapacityDefinitions.pdf (2012.05.03.)
- [17] MAVIR: „A magyar villamosenergia-rendszer Üzemi Szabályzata” *Közzétéve: 2012, január 2.* <http://www.mavir.hu/web/mavir/uzemi-szabalyzat> (2012.05.03.)
- [18] CWE Enhanced Flow-Based MC feasibility report – *final version 2.0, 19th October 2011* <http://www.belpex.be/index.php?id=95> (2012.02.18.)
- [19] CAO – Consentec: „Concept of the Technical Parameters Calculation for the Flow Based Capacity Allocation in the CEE Region” http://www.central-ao.com/images/stories/upload/tech_params_concept_30092009.pdf (2012.05.05.)
- [20] Hungarian Power Exchange: „Letöltés/Szabályzatok” http://hupx.hu/trading/download_center/szabalyzatok.html (2012.05.07.)
- [21] Rouquia Djabali, Joel Hoeksema, Yves Langer: „COSMOS description – CWE Market Coupling algorithm” *Final 1.1 version, 14th January 2011,* http://www.belpex.be/uploads/Market_Coupling/COSMOS_public_description.pdf (2012.02.18.)
- [22] OMEL: „Markets and products – Daily electricity markets – Bid presentation” <http://www.omie.es/en/home/markets-and-products/electricity-market> (2012.05.07.)
- [23] Louyrette, J.; Trotignon, M.; "European Market Couplings: Description, modelling and perspectives," *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest* , vol., no., pp.1-6, June 28th 2009-July 2nd 2009

-
- [24] E. D. Andersen, K. D. Andersen: "Presolving in linear programming," *Mathematical Programming. Series B*, vol. 71, no. 2, pp. 221–245, 1995.
- [25] Jorge Nocedal, Stephen J. Wright: *Numerical Optimization* (2006, 2nd ed.). New York: Springer-Verlag. p. 449. ISBN 978-0-387-30303-1.
- [26] European Market Coupling Company (EMCC): „A report for the regulators of the CWE region and other stakeholders on the final design of the MC solution” *Project Document November 2010* http://www.tennet.org/images/CWE%20ATC%20MC%20project%20documentation_tcm41-18715.pdf (2012.03.11.)
- [27] Wettl Ferenc: „Lineáris algebra” *egyetemi előadási segédanyag*, pp. 320-326. 2011 <http://www.math.bme.hu/~wettl/okt/linalg/2011/00la.0.73.2.pdf> (2012.04.22.)
- [28] Paulraj S., Sumathi P.: „A Comparative Study of Redundant Constraints Identification Methods in Linear Programming Problems” *Department of Mathematics, Madras Institute of Technology Campus*, <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2010/723402/> (2012.09.05.)
- [29] Sörös Péter Márk: „Átviteli hálózati rendszermodell készítése a közép-európai régióra a Power World program felhasználásával áramlás alapú kapacitásallokáció várható hatásainak vizsgálatához” *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem szakdolgozat* – 2010, Budapest
- [30] ENTSO-E: Transparency platform <http://entsoe.net/>
- [31] SEPS: DAMAS Energy System – <https://dae.sepsas.sk/>

Ábrajegyzék

1.1 ábra: Szinkronjáró villamosenergia-rendszerek Európában [1].....	2
1.2 ábra: Villamosenergia-piaci régiók az EU-ban.....	3
2.1 ábra: Szűk keresztmetszet kezelési módszerek összefoglalása [1].....	7
2.2 ábra: Határkapacitások allokációja a magyarországi határmetszéken, saját szerkesztés [1] és [11] alapján	9
2.3 ábra: Izolált piaci egyensúlyi árak, [7] alapján	10
2.4 ábra: Nettó export görbe [7].....	12
2.5 ábra: Ár alapú implicit aukcióval összekapcsolt piacokon kialakuló piaci ár, a rendelkezésre álló kapacitások elégtelensége esetén [7]	13
3.1 ábra: NTC alapú átviteli kapacitás definíciók, [16] alapján	16
3.2 ábra: Hálózati korlátok a nomogramban.....	24
3.3 ábra: Hálózati biztonsági terület a nomogramban	24
4.1 ábra: Elszámolás a magyarországi szervezett villamosenergia-piacon [20].....	25
4.2 ábra: A klíring példaszámítás keresleti és kínálati görbéi	29
4.3 ábra: Ár és mennyiségi indeterminancia és feloldásuk.....	30
5.1 ábra: Áramlás alapú kapacitásadatok kezelése a MCS-ben (egyetlen szimulált kereskedési nap esetére)	37
5.2 ábra: Példa az előzetes szűrés működésére (fekete színnel pontozva a releváns korlátokat).....	43
5.3 ábra: Határmetszék a CWE régióban; példa azonos nettó exporthoz tartozó tranzakciókra [26].....	44
6.1 ábra: Kétpiacos implementálási teszt aggregált ajánlati görbéi (az „exportáló” és „importáló” piacra)	48
6.2 ábra: Izolált és korlát nélküli összekapcsolt piaci árak a vizsgált napon.....	54
6.3 ábra: Árkiegyenlítéshez szükséges áramlások a vizsgált napon	55
6.4 ábra: A vizsgált napon kialakuló tőzsdei árak, és az elérhető optimum („coupled”).....	55
6.5 ábra: Árak ATC alapú CZ-SK-HU piac-összekapcsolás esetén	56
6.6 ábra: Nomogram az összes áramlás alapú korlátra és az ATC korlátok.....	58
6.7 ábra: Piacok árkülönbsége flow-based szűkültre	59
6.8 ábra: MCF alakulása flow-based szűkület esetén	59

Táblázatjegyzék

3.1 táblázat: Áramlás alapú kapacitásfogalmak különböző elnevezései	19
4.1 táblázat: Másnapi klíring példaszámítás ajánlati könyve	29
5.1 táblázat: Az előzetes szűrés működése: példában szereplő korlátok	43
6.1 táblázat: Eredmények hálózati korlátok nélkül.....	49
6.2 táblázat: Ekvivalens hálózati korlátok	49
6.3 táblázat: Az előzetes szűrés hatása a futási időre	51
6.4 táblázat: A szimulált napon NTC és ATC_d kapacitásadatok	54
6.5 táblázat: Releváns áramlás alapú korlátok a szimulációs napon	57
6.6 táblázat: Társadalmi jólét növekménye a szimulált esetekben	60