

Szabó Dávid, Rácz Levente,
Dr. Németh Bálint, Dr. Göcsei Gábor

Fizikai és soft computing modellek összehasonlítása DLR technológia alkalmazása során

Napjainkban az átviteli hálózat egyik legfontosabb tématerülete az átviteli kapacitás növelésének lehetősége az üzembiztonság fenntartása mellett. Erre kínál költséghatékony megoldást a dinamikus távvezeték terhelhetőség (DLR) alkalmazása, amely a környezeti paraméterek valós idejű monitorozása révén teszi lehetővé a sodronyok teljes termikus kihasználását. A kutatómunkánk során különféle modellezési módszereket és azok eredményeit hasonlítjuk össze. A vizsgált fizikai modell a *kiterjesztett BME modell*, amely figyelembe veszi a csapadék hatását és lehetőséget nyújt a leginkább befolyásoló paraméter (szél) figyelembevételének új módjára. Ezzel szemben a neurális hálós számítási eljárásra épülő *BME Black box modell* a távvezetékek sodronyainak állapotát vizsgáló szenzorokon keresztül nyert minták betanulásával számítja az átviteli kapacitást.

Nowadays, one of the most important challenge in the transmission network is to increase the transmission capacity while maintaining operational safety. Dynamic Line Rating (DLR) provides a cost-effective solution for this issue, which grants the maximal thermal utilization of conductors based on real-time monitoring of the environmental parameters. In this research different modelling methods and their results are compared. The examined physical model is the *extended BME model*, which takes into account the impact of precipitation and provides a new way of taking into consideration the most influential weather parameter, the wind. Another modelling option could be the *BME Black box model* based on neural network calculation method, which determines the transmission capacity through the model learnt by the data from the installed sensors on the conductors.

Kulcsszavak: Átviteli hálózat, távvezeték terhelhetőség, DLR, modellezés, soft computing, neurális háló, Black box modell, fizikai modell

1. BEVEZETÉS

Egy távvezeték esetén a sodronyok terhelhetősége az a maximálisan megengedhető áramérték, amely megfelel az általános tervezési, valamint biztonsági kritériumoknak minden körülmény között [1][2].

Az ezredforduló előtt épített átviteli és elosztóhálózatok méretezésének fő szempontja a biztonságos üzemvitel és a magasfokú ellátásbiztonság biztosítása volt. Ennek alapvető eleme a konzervatív méretezési eljárás, melynek során a statikus terhelhetőségi érték meghatározása mellett a hálózat üzemi szintje elmarad a maximális kihasználhatóságú állapottól [2].

A jelenlegi villamosenergia-rendszer azonban átalakulóban van, melynek eredményeképpen új követelmények jelentek meg a rendszerirányítók számára. Egyrészt az energiamixben egyre nagyobb mértékben vannak jelen a megújuló energiaforrást használók, időszakosan termelő egységek, melyeknek száma vélhetően a jövőben csak növekedni fog. Másrészt a villamosenergia-piaci liberalizációja miatt változóban van a piaci környezet, illetve változnak a fogyasztói szokások és igények is. Emellett az egyes szereplők közötti interakció is egyre inkább fokozódik (fogyasztó oldali befolyásolás). Ahhoz, hogy ezeknek a változásoknak meg tudjon felelni a rendszerirányító, szükség van az átviteli hálózat fejlesztésére, a megújuló energiaforrások által jelentősen befolyásolt európai teljesítményáramlások elemzésére, valamint a villamosenergia-piac fejlesztésére [2][3].

Az átviteli hálózat fejlesztésekor egyre inkább előtérbe kerül a DLR alkalmazása, melynek számos kedvező tulajdonságát egyre több rendszerirányító ismeri fel Európában.

2. DINAMIKUS TÁVVEZETÉK TERHELHETŐSÉG

A DLR egy olyan technológia, melynek segítségével a távvezeték terhelhetőségi érték megnövelhető az üzembiztonság fenntartása mellett. A módszer alapja az a megfigyelés, hogy a sodrony terhelhetőségét meghatározza, hogy mennyi hő tud Joule-hő formájában a környezetbe disszipálni. A disszipáció mértékét pedig olyan környezeti paraméterek befolyásolják mint a napsugárzás, a szél, vagy éppen a környezeti hőmérséklet, hiszen ezek együttes hatása alakítja a sodrony hőmérsékletét.

A DLR megvalósításához valós, vagy kvázi-valós szenzormérésekre van szükség. Ezek a szenzorok a távvezeték különböző elemeire lehetnek felszerelve és mérhetik a sodronyhőmérsékletet, a mechanika feszültséget, a belógást, vagy éppen a környezeti paramétereket. Ezen felül fontos megemlíteni, hogy a szenzorok és az adatgyűjtő szerver között megfelelő kommunikációs csatornát kell kiépíteni.

A statikus terhelhetőség konzervatív becslései miatt a DLR érték az idő közel 95%-ában nagyobb, mint a statikus érték. Ezen felül további előnyökkel is rendelkezik a technológia. Egyrészt jóval

költséghatékonyabb megoldás, mint az új távvezetékek építése, valamint nem kell várni éveket a beruházás megvalósítására. Emellett egyszerűbbek a jogi vonatkozásai is, illetve nem ütközik társadalmi ellenállásba. Végül, de nem utolsó sorban növeli a rendszer megbízhatóságát és stabilitását, valamint az alkalmazásával megelőzhetőek olyan károk az átviteli hálózaton (jegesedés), amelyet extrém időjárási körülmények okoznak.

2.1 A számítás előkészületei

Fontos megjegyezni, hogy a dinamikus terhelhetőség csak olyan távvezetékek esetében alkalmazható, amelyeknél a sodrony terhelhetősége képezi a távezeték ún. gyenge pontját, azaz a többi berendezés képes biztonságos üzemvitelre a megnövelt átviteli kapacitás mellett is. Azokban az esetekben, ahol a transzformátor, különböző áram- és feszültségváltók, illetve egyéb rendszerelemek nincsenek a statikus terhelhetőség értéknél nagyobb értékre méretezve a DLR technológia nem alkalmazható. Szintén fontos megemlíteni, hogy a távvezetékek térbeli kiterjedése relatíve nagy (több száz kilométer is lehet), emiatt a környezeti paraméterek változhatnak a kiterjedés és a hely függvényében. Ezt úgy lehet kiküszöbölni, hogy a DLR számítás előtt egy kritikusoszlopköz elemzés kerül elvégzésre, mely a védőtávolságok és domborzati viszonyok figyelembevételével meghatározza a távvezeték kritikus pontjait. A továbbiakban ezek a kritikus oszlopközök reprezentálják a távvezeték egészét. Ezen két lépés nem képezi szerves részét a modellnek, annak számításaihoz már feltételezzük a kritikus oszlopközök korábbi meghatározását.

3. FIZIKAI MODELLEK

A nemzetközi szakirodalmakban megjelenő DLR modellek a sodronyok hőegyensúlyát használják fel a terhelhetőség meghatározására, amely a következő alakban írható fel [4]:

$$P_J + P_S = P_c + P_r \quad (1)$$

ahol,

P_J a Joule-hő [W/m];

P_S a napsugárzás fűtőhatása [W/m];

P_c a konvektív áramlások hűtőhatása [W/m];

P_r az elsugárzott hőveszteség [W/m].

Az (1) szerint a környezeti hűtő és fűtőhatások tartanak egyensúlyt a távvezetéken átfolyó árammal arányosan létrejövő Joule-hővel. Ebből pedig az aktuális áramterhelhetőség számítható úgy, hogy a vezetők minden időpillanatban a maximális hőmérsékleten tudjanak üzemelni.

3.1 Kiterjesztett BME modell

A kiterjesztett BME modell létrehozása során a gyakorlatban megvalósítható, az üzembiztonságot

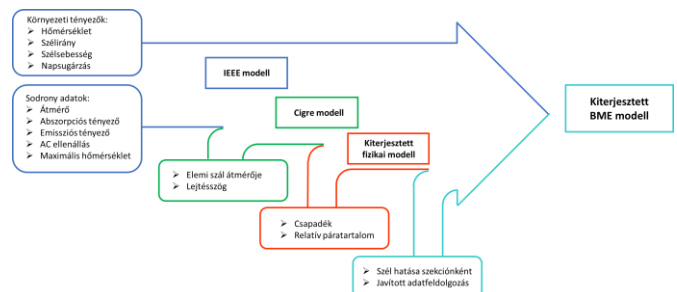
előtérbe helyező rendszer megalkotása volt a cél, amely kiküszöböli a nemzetközi szakirodalmakban lévő elhanyagolásokat. Így három új funkciót a tartalmaz modell, ezek a következők:

- Csapadék hűtőhatásának figyelembevétele
- Szél irányának szakaszonkénti figyelembevétele
- Időjárásadatok korrigált feldolgozása

A nemzetközi fizikai modellek nem tartalmazzák a sodronyra ható csapadék okozta hűtőhatást, amely egy jelentős elhanyagolást okoz a modellekben. Ennek kiküszöbölésére a BME fizikai modellje figyelembe veszi a párolgási hőveszteséget is, ezzel biztosítva átlagos mértékű csapadékinzintitás mellett 6-8 % többletterhelhetőséget [5].

Több mint 1,5 évnyi időjárásadat felhasználásával készült érzékenységtanulmány alapján megállapításra került, hogy a környezeti paraméterek közül a legnagyobb befolyással a szél bír a sodronyok hőmérsékletére. Az adatelemzés során az is kiderült, hogy a szél iránya 5 m/s alatt nagyon változékony, míg egy adott területre jellemző szélirány csak nagyobb szélességeken esetén értelmezhető. Ezek alapján fontos, hogy a több tíz kilométer hosszú távvezetékek mentén nagy mértékben változó szélirányt és a távvezeték nyomvonalában lévő töréseket is figyelembe kell venni a vezetők és a szél által közbezárt szög számítása esetén. Így a kiterjesztett BME modell a távvezeték több szakaszra osztja fel az iránytörések alapján, amellyel a leginkább befolyásoló paraméter – a szél – figyelembevétele sokkal pontosabban valósul meg.

A DLR gyakorlati alkalmazása esetén fontos, hogy a rendszerirányítók néhány órára előre tudják az adott távvezeték terhelhetőségét, ennek számolásához azonban időjárás előrejelzésre van szükség. Az Európában alkalmazott előrejelzési modellek csak 1-3 órás időbeli felbontással tudják megadni a környezeti paraméterek változását, amely azonban nem elég pontos a terhelhetőség számításához. Ennek javítása érdekében a kiterjesztett modell különféle interpolációs technikákat alkalmaz a különféle időjárási változók pontosítása érdekében. Ezáltal a DLR előrejelzés során sokkal pontosabban határozható meg a terhelhetőség [6].



1. Ábra. Kiterjesztett BME modell

4. BME BLACK BOX MODELL

4.1 Black box modellek

A jelenleg alkalmazott empirikus modellek hiányosságainak feloldására a továbbfejlesztésük mellett új modellezési eljárások is alkalmazhatóak. Ezek a korábbiaktól eltérő módon közelítik meg a DLR számítását. Ilyen modellezési eljárásra példa a BME black box modellje, amely egy neurális háló segítségével számítja ki a dinamikus terhelhetőséget [7].

A fekete doboz modellek abban különböznek a fizikai modellektől, hogy a szükséges bemenetek rendelkezésre bocsátása után nincs rálátásunk magára a kimenetképző folyamatra. Ennélfogva ez a típusú modellezés főleg matematikai, számítógépes modellezésnél használatos. Ebbe a modellezési csoportba tartoznak a különféle mesterséges intelligenciával, illetve heurisztikus folyamatokkal kalkuláló algoritmusok is [7].

4.2 A BME által kifejlesztett modell

A BME Black box modell két lépésben képes meghatározni a távvezeték dinamikus kapacitását. Az első lépésben meghatározásra kerül az adott időpillanatban a sodrony hőmérséklete, majd ebből további számítások után adódik a DLR értéke.

Az első lépésben a kritikus oszlopközökre vonatkozó valós sodronyhőmérsékletet határozzuk meg egy 4 rétegű kaszkád típusú neurális háló segítségével. A háló 4 bemenettel rendelkezik, ezek a szélesség, a napsugárzás, a környezeti hőmérséklet és a SCADA (Supervisory control and data acquisition system) áram valós értéke. A modell kimenet minden esetben a sodrony hőmérséklete. A matematikai probléma az alábbi módon írható le [8].

$$R_{emp}(\bar{w}) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k (d_i - Net(\bar{x}_i, \bar{w}))^2 \quad (2)$$

ahol,

$R_{emp}(\bar{w})$ az empirikus tapasztalati függvény [-];

(\bar{x}_i, \bar{w}) a rendszer szabad paraméterei [-];

(d_i) az \bar{x}_i vektorra adott válasz [-].

A tanításhoz szükség van olyan összefüggő adatpárookra, melyeknél adott környezeti és terhelési viszonyok mellett ismert a sodrony valós idejű hőmérséklete is. Ehhez a sodronyra felszerelt OTLM szenzorok nyújtanak segítséget, amelyek 10 perces időközönként rögzítik a sodrony hőmérsékletének értékét [9]. Ez azért előnyös, mert így minden környezeti paraméter szerepel a modellben, hiszen azok egytől-egyig hatással vannak a sodrony hőmérsékletére.

A második lépésben ebből a sodrony hőmérsékletből határozható meg az átviteli kapacitás maximális értéke, melyhez egy hőmérlég nyújt segítséget.

$$C_p \cdot m \cdot \frac{dT_{sodrony}}{dt_{sodrony}} = I^2 \cdot R \quad (3)$$

ahol,

C_p a sodrony hőkapacitása [J/K];

m a sodrony fajlagos tömege [kg/m];

$dT_{sodrony}$ a sodrony aktuális és maximális megengedett hőmérséklete közötti különbség [K];

$dt_{sodrony}$ a sodrony időállandója [s];

I a statikus értékhez képesti áramnövekmény [A];

R a sodrony fajlagos ellenállása [Ω /m].

Minden távvezetékre definiálva van egy maximális érték, amelyet, ha nem halad meg a sodrony hőmérséklete, akkor biztonságos marad az üzemvitel. Ha ebből ez értékből kivonjuk a sodrony aktuális hőmérsékletét, akkor megkapjuk azt a hőmérsékleti növekményt, amennyivel még biztonságosan megemelhető a sodronyhőmérséklet. Mivel a sodrony aktuális hőmérséklete már tartalmazza a környezeti hatások összességét, ezt a hőmérsékleti növekményt teljes mértékben a sodrony áramának megnövekedése fedezi. Ehhez az áramnövekményhez hozzáadva a SCADA áram értékét kapjuk meg a távvezeték dinamikus terhelhetősége [7].



2. Ábra. BME Black-box modell

5. ESETTANULMÁNY

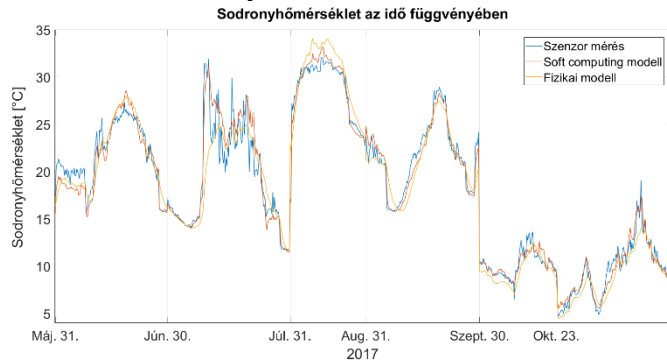
Az esettanulmány során olyan távvezeték adatai kerültek felhasználásra, amelyen egy OTLM szenzor gyűjt adatokat a sodronyhőmérsékletről, így a két modell által számolt eredmények könnyen összehasonlíthatók a valós mérési adatokkal. A felhasznált adatok egy 110 kV-os európai távvezetékéről származnak, amelyen 240/40 mm²-es ACSR sodrony került alkalmazásra.

A BME Black box modellje neurális háló alkalmazásával számítja ki a sodrony hőmérsékletét. A háló használható működéséhez ezért szükség van egy ún. tanító adathalmazra, melynek segítségével feltárható az összetartozó környezeti és terhelési paraméterek közötti összefüggés. A neurális hálók esetében a tanítási folyamat során előfordulhat a túltanítás jelensége, melynek során azt tapasztaljuk, hogy bár a tanító adatokra adódó hiba csökken, de ezzel párhuzamosan a modell hibája egyre inkább nő. Ennek megakadályozására a rendelkezésre álló adathalmazt 3 részre, tanító halmazra, validáló halmazra és kiértékelő halmazra osztottuk. A fent említett jelenség elkerülése

érdekében mindhárom halmaz hibáját nyomon követtük a tanítás során. A továbbiakban bemutatott sodronyhőmérséklet számítások olyan esetekre vonatkoznak, amelyek nem szerepeltek a tanítási folyamatban.

5.1 Sodronyhőmérséklet számítás

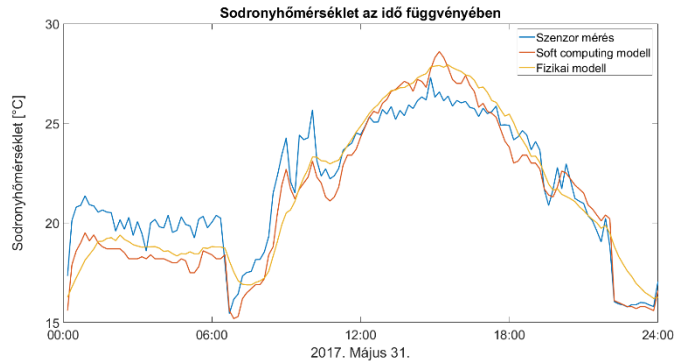
Mivel a DLR modellek a sodronyok hőegyensúlyának számításából indulnak ki így, ha ismert a sodrony aktuális áram értéke, akkor a sodronyhőmérséklet is meghatározható a terhelhetőség mellett. Erre mutat példát a 3. Ábra, ahol több napra került meghatározásra a távvezeték sodronyhőmérséklete:



3. Ábra. Sodronyhőmérséklet meghatározása több napra

A fizikai modellel számolt sodronyhőmérséklet során az átlagos eltérés 1,04 °C volt a sodronyhőmérséklettől, míg neurális háló esetén ez az érték 0,88 °C. A fizikai modell esetén fontos, hogy az időjárás adatok minél nagyobb időbeli felbontással, folyamatosan álljanak rendelkezésre. Jelen esetben az adatok időbeli felbontása 15 perc volt, azonban az adatsor helyenként hiányos volt. Hiányzó adat esetén az adott időszakra vonatkozó időbeli felbontás csökken és mivel a sodronyhőmérsékletet számoló fizikai modell az időjárás paramétereit két időpont között konstansnak veszi, ezért a modell hibája megnő. Ezzel szemben folyamatosan rendelkezésre álló adatok esetén a hiba ± 3 °C-on belül marad.

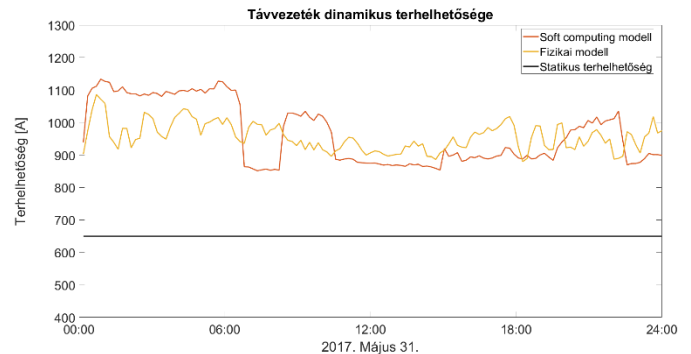
Ha egy adott napra akarjuk vizsgálni a sodronyhőmérséklet változását a két algoritmussal, akkor a 4. Ábrán bemutatott példa alapján elmondható, hogy a két módszer a nagy gradiensű változások követése során tér el nagyobb mértékben a mért értékektől. Azonban még ezekben az esetekben is 1 °C-on belül volt az átlagos hiba mindkét módszer esetén.



4. Ábra. Sodronyhőmérséklet meghatározása egy napra

5.2 Terhelhetőség számítás

A modellek másik összehasonlítási lehetősége, ha a dinamikusan meghatározott terhelhetőség értékeket vetjük össze. Az 5. Ábra mutatja a távvezeték átviteli kapacitását egy májusi napra, mely során látszik, hogy mindkét módszer szerint számolt terhelhetőség meghaladja a statikus értéket, amely ebben az esetben 650 A. Jelen esetben az aktuális napon mindkét eljárás szerint több mint 40 % többletterhelhetőséget lehet nyerni a DLR alkalmazásával. A két módszer közötti átlageltérés 75 A, amely az átlagos terhelhetőség érték kevesebb mint 8 %-a.



5. Ábra. Terhelhetőség meghatározása

6. KONKLÚZIÓ

A cikkben bemutatásra került a BME által kidolgozott kétfajta dinamikus távvezeték terhelhetőséget számoló modell, amelyek közül az egyik matematikai, a másik fizikai módszereken alapulva kalkulál. Mind a két módszer alkalmas távvezeték monitorozására, ugyanis a sodronyhőmérséklet meghatározása során 1 °C-os átlagos pontosság érhető el alkalmazásukkal. Azonban fontos megjegyezni, hogy a fizikai modell alkalmazása során kritikus a rendelkezésre álló időjárási paraméterek minősége, ugyanis hiányzó adatok, vagy nagyon kis időbeli felbontás esetén a modell pontossága nagy mértékben romlik.

A technológiák alkalmazása során a legnagyobb eltérést a használt infrastruktúra adja, ugyanis a black-box modell használatához szükséges

tanulóadatokhoz szükség van a sodronyokra szerelt szenzorok mérési eredményeire. Ezen kívül az időjárásadatok mindkét eljárás során szükségesek mind a sodronyhőmérséklet, mind pedig a terhelhetőség számítás során.

Összességében az mondható el, hogy egy DLR rendszer kiépítése során a rendelkezésre álló sodrony monitorozó szenzorok és időjárás paramétereket mérő eszközök száma határozza meg az alkalmazható számítási eljárást, amelyek hasonló pontossággal üzemelnek. Ugyanakkor lehetőség van olyan rendszer kiépítésére is, amelyben mind a két módszer működik egymással párhuzamosan, ezáltal növelve az üzembiztonságot.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

This work has been developed in the High Voltage Laboratory of Budapest University of Technology and Economics within the boundaries of FLEXITRANSTORE international project. FLEXITRANSTORE stands for „An Integrated Platform for Increased FLEXibility in smart TRANSMission grids with STORAge Entities and large penetration of Renewable Energy Sources”.

Ezen munka a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nagyfeszültségű Laboratóriumában készült a FLEXITRANSTORE nemzetközi együttműködési projekt keretein belül. A FLEXITRANSTORE célja innovatív technológiák fejlesztése, melyek növelik a már meglévő pán-Európai átviteli hálózat rugalmasságát és kapacitását.



Horizon 2020
European Union Funding
for Research & Innovation

8. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **McCall, J. C., Servatius, B.:** *Enhanced Economic and Operational Advantages of Next Generation Dynamic Line Rating Systems.* Párizs, 2016
- [2] **Michiorri, A., Nguyen, H., Alessandrini, S.:** *Forecasting for dynamic line rating.* *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52, 2015
- [3] **Electric Power Research Institute:** *Evaluation of Instrumentation and Dynamic Thermal Ratings for Overhead Lines.* 2013
- [4] **Cigré Working Group B2.43:** *Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines.* 2014.
- [5] **Pytlak, P., Musilek, P., Lozowski, E., Toth J.:** *Modelling precipitation cooling of overhead conductors.* 2011
- [6] **Halász B. G., Németh B., Rácz L., Szabó D., Göcsei G.:** *Monitoring of Actual Thermal Condition of High Voltage Overhead Lines.* 9th Advanced Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, 2018
- [7] **Rácz L., Németh B.:** *Investigation of Dynamic Line Rating Based on Neural Networks.* 15th International Conference of Young Scientist on Energy Issues, 23-28 May 2018, Kaunas, Lithuania
- [8] **Haykin, S.:** *Neural Networks, A Comprehensive Foundation.* Hamilton, Person Education, 1999. 823 p. ISBN 81-7808-300-0
- [9] **Lovrencic, V., Gabrovsek, M., Kovac, M., Gubeljak, N., Šojat, Z.:** *The contribution of conductor temperature and sag monitoring to increased ampacities of overhead lines (OHLs).* DEMSEE'15 10th International Conference on Deregulated Electricity Market Issues in South Eastern Europe. 24-25 September 2015, Budapest, Hungary