

Kiserőművek egységes ágensalapú modellezése rendszerirányítási szempontból

TÉZISFÜZET

Divényi Dániel Péter

Konzulens: Dr. Dán András

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék



2014

TÉMAKÖR BEVEZETÉSE

A villamosenergia-rendszer teljesítményegyensúlyának fenntartása a rendszerirányító feladata. A piaci folyamatok hatására a hazai erőműstruktúra jelentősen átalakult, melynek következtében egyre kevesebb a rendszerszabályozásba bevonható erőművi teljesítmény. Ugyanakkor fokozatosan elterjed az elosztott villamosenergia-termelés, Magyarországon is több száz kiserőmű kapott engedélyt az elmúlt évtizedben. A kiserőművek rendszerszabályozásba való bevonása egyesével nyilvánvaló szervezési/technikai nehézségekbe ütközik, ugyanakkor szabályozási központokba szerveződve egy, összességében nagyteljesítményű virtuális erőműként tudnak részt venni a teljesítményegyensúly fenntartásában.

A hazai kiserőművek technológiai megoszlása igen sokszínű. A beépített villamos kapacitás majdnem fele gázmotoros egységekből származik, körülbelül ötöde (biomassza, hulladék, vagy gáztüzelésű kazánra épülő) gőzturbinát alkalmaz, és szintén közel ötödét a szélerőművek adják. Nem elhanyagolható a gázturbinás, illetve kombinált ciklusú erőművek kapacitása sem. Az alkalmazott technológia szabja meg egy adott kiserőmű esetén figyelembeveendő műszaki korlátokat, s így igen erősen befolyásolja a napi üzemvitel kialakítását. A kiserőművek általános vizsgálatában további nehézséget okoz, hogy egy-egy kiserőműben akár többféle technológiájú gépegységet is üzemeltethetnek. A kapcsoltan hőenergiát termelő erőművek üzemvitelében a helyi hőigény kiszolgálása prioritást élvez a villamosenergia-termeléssel szemben. Ráadásul a hőigény jellege, valamint a helyi távhőrendszer kialakítása és nagysága mind kiserőmű-specifikus. A villamosenergia-piac liberalizációjából adódóan a kérdést profitorientált megközelítésben kell tárgyalni. Nemcsak a villamosenergia-piac árainak alakulása, hanem a kapcsolt erőművek esetén a helyi távhő-, illetve az üzemanyagárak is befolyásolják az üzemvitel gazdaságossági paramétereit. Végül a hatályos jogrendszer (kötelező átvételi rendeletek, távhőrendeletek, villamosenergia-törvény) is hat egy-egy kiserőmű viselkedésére.

Összességében tehát egy-egy kiserőmű üzemvitelét alapvetően befolyásolják az alkalmazott energia-termelési technológiák, az esetleg kiszolgált távhőrendszer aktuális hőigénye, valamint az aktuális piaci környezet és jogi szabályozás. Ebből következően egy virtuális erőmű üzemének optimalizálása, mely akár 40-60 kiserőművet is magába foglalhat, lényegesen bonyolultabb probléma, mint egy hasonló teljesítményű, de technológiailag csak pár blokkból álló nagyerőmű leírása.

A hazai szabályozási nehézségek miatt a szabályozási központok illetve az egyes kiserőművek vizsgálata speciális magyar probléma. Ugyanakkor a villamosenergia-szektorban alakuló trendek szerint az elosztott energiatermelés súlya növekedni fog a jelenlegi centrális erőművekkel szemben. Az ún. microgridekben a helyi energiaigényt a földrajzilag közel elhelyezkedő kis energiatermelő egységekből fedezik. A microgridek energiamedzsentjének nemzetközi szakirodalma igen kiterjed. A cikkekben, több technológiát alkalmazó energiatermelő egységek üzemének összehangolását vizsgálják. A microgridek energiamedzsentje, illetve a hazai szabályozási központok optimális irányításának problémája nagy átfedést mutat. Így az értekezés eredményei nem csak a jelen problémáira koncentrálnak, hanem egyben nagyobb távlatokra is tekinthetnek.

Kutatásom célkitűzése egy olyan kiserőmű-modell létrehozása, mely a lehető legtöbb, az üzemvitelt befolyásoló piaci és műszaki tényezőt figyelembe véve képes egy kiserőmű viselkedését szimulálni, így hozzájárulni az optimális üzemvitel meghatározásához.

Kiemelt elvárás volt a modell felé, hogy ne csak az aktuális rendszerszabályozási problémára fókuszáljon, hanem kellő rugalmasságot biztosítson a kiserőművek egyébirányú vizsgálataira is. A kialakítandó

modell tehát legyen könnyen paraméterezzhető, illetve illeszthető más kérdések vizsgálatára, a figyelembevett szempontok és technológiák ne legyenek kőbe vésve. Ez nemcsak a hosszútávú elképzelésekhez való igazodás miatt (ld. microgridok) volt célszerű; a jogi és piaci környezet változása középtávon sem elhanyagolható (ld. kötelező átvétel alakulása az elmúlt öt évben). A modellben tehát legyen lehetőség a piaci és jogi környezet átalakítására, a figyelembevett technológiák és az üzemeltetési szempontok megváltoztatására, bővítésére vagy esetleg negligálására.

SZAKIRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ ÉS AZ ÚJSZERŰSÉG SPECIFIKÁLÁSA

A kiserőművek rendszerszabályozásba való bevonása igen szűk szakirodalommal rendelkezik, sokkal jellemzőbb microgridok szintjén végzett energiamenedzsment kérdésének kutatása. A területen született fontosabb publikációkat értekezésem 3. fejezetében foglaltam össze: a tézisfűzetben csak három kutatóhely legfontosabb eredményeit emelem ki.

Az értekezésben elsőként tárgyaltam az athéni kutatóközpont tevékenységét. 2005-ben bemutatott multiágens keretrendszerüket [24] több másik kutatóintézet alkalmazta kiindulási alapként saját modelljéhez. Később különböző algoritmusokat publikáltak más-más optimalizálási technikát alkalmazva [25-27], illetve a görög szigetvilág egy-egy szigetén megvalósított multiágens rendszerre alapozott microgrid pilot projekthez kapcsolódóan jelentek meg cikkeik [31-32].

A szingapúri T. Logenthiran nevéhez kapcsolódó kutatási tevékenység szintén a görög alapmodellre épít [36-38]. A kutatók az amerikai piacokon alkalmazott unit-commitment eljárást alkalmazzák az egyes elosztott energiatermelő egységek gazdaságilag is optimális üzemének irányítására. A bemutatott LRGA algoritmus számos műszaki szempontot képes figyelembe venni.

Végül a Portói Egyetem GECAD munkacsoportja végez kiemelkedő tevékenységet a piacok multiágens modellezésében. 2003-ban létrehozott [43], s az azóta folyamatosan bővített és továbbfejlesztett [44-45] ún. MASCEM alapmodelljük célja a piaci szereplők viselkedésének, illetve egymásra hatásának vizsgálata. Az egyes szereplőket modellező ágensek saját korlátjaik és célfüggvényük alapján próbálnak érvényesülni a piacon, melyhez számos algoritmust publikáltak [46-49]. Részletesen foglalkoztak a több kiserőművet tömörítő, ún. Virtuális Erőmű Ágensek (VPP) belső algoritmusával [50-52].

A szakirodalmi áttekintés után a következőket állapítottam meg:

1. A kutatások eltérő részletességgel tárgyalják az egyes energiatermelő egységek műszaki korlátait. A legtöbb esetben mellőzik az összetett rendszereket (pl. kombinált ciklusú gázturbinák), egyetlen esetben sem vizsgálnak olyan kiserőműveket, ahol több gépegység azonos gazdasági érdek alá tartozik. Jellemzően külön-külön technológiaspecifikus algoritmust mutatnak be az egyes egységek üzemeltetésére. Más esetekben ún. generikus kiserőműveket tételeznek fel, ahol adott paraméterhalmaz feltételezésével (pl. P_{min} , P_{max} , fix- és változó költség) egységes algoritmussal működtetik a kiserőműveket. Ekkor azonban a technológiai korlátokat igen leegyszerűsítve veszik figyelembe.

Az értekezésemben bemutatott módszert alkalmazva technológiaspecifikus korlátokat részletesen figyelembe lehet venni – akár komplex, több gépegységes rendszerek esetén is –, miközben a kialakított keretrendszernek köszönhetően egységes, technológiától független algoritmus implementálható az erőművek viselkedésének modellezésére.

→ 1. tézis, az értekezés 4. fejezete, illetve alább a Technológiák általánosítása c. szakasz.

2. A szakirodalomban bemutatott módszerek általában egy konkrét alkalmazáshoz javasolnak valamilyen szempontból optimális megoldást adó módszert. Az alkalmazások során figyelembevett szempontok a kutatás jellegéből adódóan általában túl általánosak, s nem képesek speciális szempontokat (pl. Magyarországon a KÁT mérlegkör elvárásai) kezelni. A célfüggvény általában tisztán profitmaximalizálás, ellentétben a valóságban felmerülő másodlagos célfüggvényekkel (pl. szerződéses hőigény kielégítése).

Ezt a problémát sikerült kezelni az értekezésemben kidolgozott új algoritmussal, melynek eredménye a figyelembevett szempontok áttekinthető, de rugalmas kezelése. A kialakításnak köszönhetően az üzemtervező algoritmus tetszőleges piaci környezetben lévő és eltérő technológiákat is alkalmazó kiserőműre alkalmazható, miközben a célfüggvényben a profit mellett más tényezők is figyelembe vehetők.

→ 2. tézis, az értekezés 6. fejezete, illetve alább a Rugalmas szempontrendszer c. szakasz.

3. A bemutatott szakirodalmak különböző adaptív módszereket alkalmaznak a multiágens modellek algoritmusában. Egy-egy ágens tanulóképessége, illetve alkalmazkodása a hivatkozott forrásokban az ajánlattételi stratégiára vonatkozik: miként határozza meg az adott egység energiaárát egy változó micropiacon úgy, hogy az megfeleljen a rövid- és hosszútávú érdekeknek. Azonban a technológiaspecialitások figyelembe vétele ezekben az esetekben elhanyagolt, az adaptivitás nem ügyel a műszaki korlátok között is adaptív működésre. Továbbá a prezentált algoritmusok nem veszik figyelembe a hőigényt, mely hazánkban, a jelentős kapcsolt energiatermelés miatt fontos műszaki és egyúttal gazdasági tényező.

Fenti hiányosságok kiküszöbölésére kutatásaim során kidolgoztam egy megerősítéses tanulást alkalmazó módszert. A kiserőművet modellező ágens így üzemtervezésekor figyelembe veszi a műszaki korlátokat is, beleértve a hőszolgáltatásból adódó megkötéseket. Az adaptív megközelítésnek köszönhetően pusztán költségparaméterek ismeretében az ágens a profitvisszajelzésekre alapozva képes megbecsülni az adott kiserőmű – amortizációs és indítási költségeket is figyelembevevő – profitmaximumát eredményező üzemi terhelést.

→ 3. tézis, az értekezés 7. fejezete, illetve alább az Adaptív viselkedés c. szakasz.

MÓDSZERTAN

A kiserőművek üzemvitelének leírását ágensalapú megközelítésben modelleztem. Az ágenstechnológia kereteit S. Russel és P. Norvig „Mesterséges intelligencia modern megközelítésben” c. könyve szerint értelmeztem. Az értekezés 5.2. fejezetében (40. oldaltól) bemutatom a kialakított PEAS keretrendszert — performance (teljesítménymérték), environment (környezet), actuators (beavatkozók), sensors (érzékelők) —, mely gyakorlatilag a probléma ágensnyelven történő megfogalmazását jelenti. A megvalósított keretrendszerbe különböző ágenseket ültetve vizsgálható a folyamat.

Az alkalmazott kutatási módszer általánosságban az irodalomkutatás eredményeképpen megfogalmazott hiányosságok felismerése, azok megszüntetése céljából az új elemek kezelésére létrehozott szoftverkörnyezetek kialakítása, majd az új eredmények tézisekbe való megfogalmazása. A szoftverfuttatások eredményeit a valóságos kiserőművek adataival összevetve validáltam a fejlesztési elképzelések gyakorlati alkalmazhatóságát. (A tézisekhez tartozó szoftvert a mellékletben ismertetem.)

A kidolgozott modellben minden esetben csak egy-egy ágenszt vizsgállok, melyek az egyes kiserőművek irányítására törekednek. Az értekezésben bemutatott módszerek a szakirodalomban publikáltak

multiágens modellek számára képezhetnek olyan alapot, amellyel alkalmassá tehetők a bonyolult kiserőművi technológiák és piaci viszonyok egységes kezelésére.

A technológiák sokszínűségét a beavatkozók általánosításával kezelem (1. tézis), a figyelembe vett szempontok rugalmas paraméterezhetőségére egy hasznosság alapú ágensprogramot mutatok be (2. tézis). Az ágensprogram működése számos, sokszor fiktív paraméter beállítását igényli, mely megkönnyítéséhez tudásbázis alapú megerősítéses tanulást implementáltam (3. tézis). Az alkalmazott módszereket az egyes téziseknél részletezem.

Az 1. tézis alapjai és a tézis ismertetése: TECHNOLÓGIÁK ÁLTALÁNOSÍTÁSA

(részletesen az értekezés 4. fejezetében, 23-29. oldal)

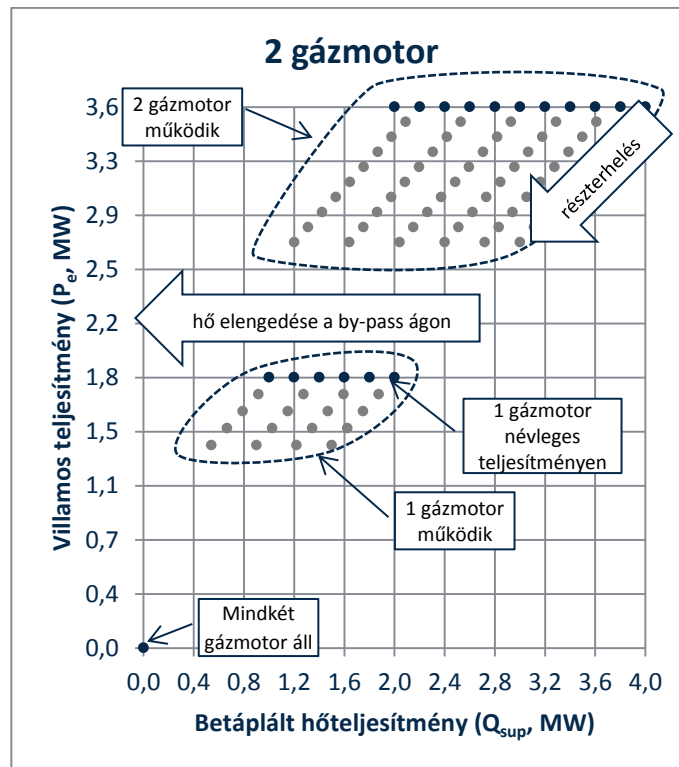
Bevezetés

A különböző energiatermelési technológiák más-más műszaki korlátokat jelentenek az üzemvitel számára. Magyarországon a legelterjedtebb a gázmotoros energiatermelés (kis egységteljesítmény, nagy gradiens, részterhelésen is magas hatásfok), mely jellemzően lakossági távhőigényt szolgál ki. A gázturbinás energiatermelés legtöbbször kombinált ciklusú erőművekben jellemző, melynek különböző generációit eltérő hatékonyság és komplexitás jellemzi. Jellemzően azonban nagyobb teljesítményű, lassabban szabályozható erőművekről van szó, melyek ipari gőz előállítására is képesek. Végül a biomassza-, illetve hulladéktüzelésű kazánokat és a hozzájuk kapcsolódó gőzturbinákat kell megemlíteni, melyek még kisebb gradiensképeséggel jellemezhetők. A gőzturbinák esetében üzemeltetési szempontból meg kell különböztetni a kondenzációs, ellennyomású és elvételes gőzturbinákat. A kapcsolatos hőt termelő gépegységeken túl a szélerőművek jelentenek még jelentős beépített kapacitást a hazai elosztott energiatermelésben.

Módszertan

A technológiákból fakadó műszaki korlátok tehát specifikusak. Ráadásul egy-egy kiserőműben akár eltérő technológiát alkalmazó gépegységek is lehetnek, melyekre összehangolt módon kell a gazdasági szempontból optimális üzemvitelt meghatározni. Technológiaspecifikus algoritmusok fejlesztése helyett – mely egyébként a szakirodalomban is jellemző – kidolgoztam egy állapot alapú megközelítést. Ebben olyan, általános attribútumokkal jellemzett üzemállapot-struktúrát alakítottam ki, melyre alapozva egységes, technológiától független algoritmus fejleszthető. Az üzemállapotok attribútumai minden szükséges információt tartalmaznak az algoritmus számára – többek között jellemző teljesítmény, üzemelő gépegységek, hatásfok, hőtermelés, stb... –, ugyanakkor minden kiserőmű esetén ugyanaz az attribútum-struktúra áll az algoritmus rendelkezésére. A technológiaspecifikus kérdéseket állapotter legenerálásakor veszem figyelembe, amikor a kiserőmű által elérhető és alkalmazható üzemállapotokat határozom meg. Egy kiserőmű állapotterét mutatja a 1. ábra, melyen feliratok magyarázzák az egyes diszkrét állapotok műszaki indokoltóságát. Az értekezésben több állapotteret is bemutattam a különböző technológiák esetére (27. oldal és Függelék A.).

A modell alkalmazhatóságának kibővítésére kidolgoztam az átmeneti állapotokat arra az esetre, amikor gépegységek terhelésváltoztatásainak időigénye nem elhanyagolható, vagy éppen a vizsgálat tárgyát képezi. Az állapot-attribútumok közé felvettem a megelőző üzemállapot gépegységeinek aktuális terhelését, melyből – lineáris közelítéssel – az átmenetek számíthatók. A kiserőművek üzemállapot-váltásainak leképezésére így kialakított módszer megtartja az állapot-attribútumok technológia-függetlenségét, ugyanakkor nem növeli az állapotok számát.



1. ábra: Példa két gázmotoros kiserőmű állapotterére

Eredmények

A módszer alapján tetszőleges kiserőmű állapotterének kialakítása után generikus algoritmus írható egy-egy elvégzendő vizsgálathoz. Az értekezésben megvizsgáltam több technológiát alkalmazó erőmű esetén az elérhető fel- és leirányú teljesítménytartományt, a szabályozás becsült költségét, illetve hatását az erőmű aggregált hatásfokára. Tetszőlegesen kiválasztott erőművekre megvizsgáltam az együttes igénybevétel esetén elérhető gradienst. Az eredmények értelemszerűen a szimulált erőművektől függenek, azonban az elvégzett vizsgálatokból a következő általános megállapítások tehetők:

	LE IRÁNY		FEL IRÁNY		Hatásfok csökkenés
	Teljesítmény	Ár [Ft/kWh]	Teljesítmény	Ár [Ft/kWh]	
gázmotorok	jelentős	[-10; -9]	jelentős	[20; 25]	4-12%
komb. ciklusú	jelentős	[-13; -9]	jelentős	[10; 15]	0-1%
kazán+gőzturb.	elhanyagolható		elhanyagolható		

1. táblázat: Az állapotalapú megközelítésre építő egyszerűsített vizsgálatok eredményeinek összefoglalása

Tézismegfogalmazás

I. tézis:

A különböző technológiákat alkalmazó energiatermelő egységekre kidolgozott állapot-alapú általánosító módszer lehetővé teszi a technológiai sajátosságok üzemtervező algoritmusból történő kiküszöbölését. Ezáltal az összes kiserőműre technológiától függetlenül ugyanaz az azonos lépéseket követő algoritmus fejleszthető egy adott probléma vizsgálatára. A technológiai specialitásokat mindazonáltal az eddig ismert eljárásoknál nagyobb részletességgel, az ún. állapotter előállításakor előzetesen veszem figyelembe, azokat az állapotter jellege, illetve az általánosállapot-attribútumok értéke tartalmazza.

I. tézis 1. altézis:

A modell alkalmazhatóságának kibővítésére kidolgoztam egy módszert, mely az általános állapotokat, az azok alkalmazását megelőző időpontban érvényes gépegység szintű terhelésekkel egészíti ki, és így az állapot-alapú általánosító módszert alkalmassá teszi a különböző gépegységek terhelésváltoztatásának technológiafüggetlen kezelésére.

Publikációs tevékenység

Az első tézisemet a [S5] folyóiratban ismertettem, kapcsolódó publikációim: [S1]-[S4].

A 2. tézis alapjai és a tézis ismertetése:

RUGALMAS SZEMPONTRENDSZER

(részletesen az értekezés 6. fejezetében, 48-56. oldal)

Bevezetés

A kiserőművek optimális üzemvitelét több tényező befolyásolja, melyek együttes figyelembevételére van szükség a megfelelő döntéshozatalhoz. Egy-egy kiserőmű esetén más-más szempontok lehetnek mérvadóak, ugyanakkor – például a jogi szabályozás, vagy a piaci környezet változása miatt – egy-egy szempont súlya jelentősen megváltozhat. A kutatás során az alábbi szempontrendszert állítottam fel, (mint a kiserőművek üzemét befolyásoló tényezőket):

- Profitmaximalizálás: függ a villamosenergia- és hőenergia-bevételektől, valamint a változó és fix költségektől. A bevételeket alapvetően meghatározza, hogy az adott termék milyen piacon kerül eladásra (pl. villamosenergia-értékesítés a szervezett villamosenergia-piacon, bilaterális szerződés keretében, vagy a kötelező átvételi (KÁT) mérlegkörben).
- Hőszolgáltatás: az aktuális hőigény, illetve a helyi távhőrendszer modellezése, a hőigénytől való átmeneti eltérés indokolhatósága.
- Hatásfok: az egykori KÁT mérlegköri tagság, majd később a támogatott távhőár feltétele.
- Gépegységkezelő: a gépegységek műszaki specifikációjának megfelelő üzemeltetés (terhelésváltoztatás gyakorisága, indítási idő, napi ciklusok száma, előírt karbantartások).
- Üzemanyag-fogyasztás: a másnapi menetrendben megadott napi üzemanyag-mennyiség be-tartása.
- Hőtároló: esetleges hőtároló töltésének és kiürítése ütemezése.
- Időjárás: szél-erőművek esetén.

Módszertan

Az üzemvitel meghatározásához hasznosságorientált ágensprogramot implementáltam. Az ágensprogram moduláris felépítésű a szempontok rugalmas kezelésének elvárása miatt. Egy adott időszakra három lépésben választja ki az optimális – első tézisben bemutatott általános – üzemállapotot. A fenti szempontok figyelembevételére külön-külön stratégiákat implementáltam, melyek mind csak a saját szempontrendszerük szerint hatnak az ágensprogram futására. Az első lépésben az ágensprogram kizárja a fizikailag nem elérhető állapotokat. A második lépés a minősítés, mely során azokat az egyébként elérhető üzemállapotokat szűri ki, melyek kiválasztása korábbi tapasztalatok, vagy egy nyomós érv miatt egyáltalán nem valószínű. A minősített állapotokra végül harmadik lépésben hasznosságot számít, s a legnagyobb hasznosságot ígérő üzemállapotot választja ki az üzemeltetésre. A hasznosságszámításra részhasznosság-alapú eljárást javasoltam, melyben egy üzemállapot teljes hasznossága a stratégiák által számított normalizált részhasznosságok súlyozott összege. A részhasznosságot számító képleteket stratégiánként kell megfogalmazni.

A stratégiák mindhárom lépésben részt vehetnek. A kialakított struktúra előnye, hogy az ágensprogram minden esetben egy adott vizsgálatra ráhangolható (mind az alkalmazott stratégiák, mind a részhasznosságot meghatározó képletek, mind a részhasznosság-súlyok tekintetében). Az értekezésben bemutatom, hogy ennek a flexibilitásnak köszönhetően milyen hatékonysággal lehetett a stratégiaalapú ágensprogramot a folyamatosan változó piaci és jogi környezetre alkalmazni.

Lehetőség adódik az egyes részhasznosság számítások adaptívá tételére is, melyhez javasoltam egy, a profitvisszajelzésekre alapozott módszert. Ennek következtében azonban az önálló részhasznosságot számító profit stratégia értelmét veszti.

Eredmények

Az ágensprogram segítségével modelleztem a kiserőművek napi aggregált villamosenergia-termelését, valamint azt összehasonlítottam az adott időszakban ténylegesen mért üzemmel (57. oldal). Ekkor a kiserőművek váratlan kieséseit is figyelembevettem. Ezen korai eredmények csak egy gyenge validációt adtak.

A validációt egy-egy kiserőműre is elvégeztem, összehasonlítva a modell által kiadott menetrendet, az adott kiserőmű, adott napon ténylegesen beadott menetrendjével (59. oldal). A vizsgálatokat számos kiserőműre, többféle alkalmazott technológiára vonatkozóan elvégeztem. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy a paraméterek finomhangolásával a háromlépéses, stratégiaalapú ágensprogram bármely kiserőműre ráhangolható, függetlenül annak technológiájától, vagy a modellezett évszaktól.

Végül számos vizsgálatot végeztem szabályozási kérdések vizsgálatára, melyek alapján a következő alapvető megállapításokat tettem. A részletes eredményeket [S4] és [S8] publikációim tartalmazzák.

- A különböző irányokban elérhető tartalékteljesítmény mennyisége: lefelé irányban az akkori szekunder szabályozási igényt a kiserőművek 90%-ban képesek lettek volna kiszolgálni, de nyáron kevesebb az elérhető teljesítmény. Felirányú tartalék gyakorlatilag nem elérhető.
- A szabályozási igények között eltelt idő nem csökkenti a leirányú tartalékok rendelkezésre állását, a felirányú tartalékok esetén azonban ez kimutatható.
- A hosszabb időre vonatkozó szabályozási igények mindkét tartalék esetén csökkentik a kiserőművek teljesítőképességét.

- Az egyes kiserőművek szabályozási képessége alapján prioritási sorrendet állítottam fel a rendszerintegrálásba történő bevonásra vonatkozóan: melynek elején túlnyomóan gázmotors technológiát alkalmazó erőművek voltak.

Tézismegfogalmazás

II. tézis:

Az elosztott energiatermelő egységek üzemének tervezése és irányítása során számos műszaki és gazdasági szempontra tekintettel kell lenni. A hasznosságorientált ágensprogram keretrendszerére alapozva a kiserőművek üzemének tervezésére kidolgozott háromlépéses algoritmus lehetővé teszi a szempontok rugalmas kezelését és súlyozását. A módszer a szabályozási központok – valamint microgrid irányítórendszerek – számára nyújt az eddigieknél testre szabhatóbb döntéstámogatási eszközt, mivel minden egyes termelőegység eltérő üzemeltetési szempontjaira hasonló struktúrájú, de szabadon paraméterezhető és hangolható optimalizálási célfüggvény határozható meg.

Publikációs tevékenység

A részhasznosság-alapú ágensprogramot szintén a [S5] publikációban jelentettem meg, további kapcsolódó publikációim: [S4]-[S8], [S10].

A 3. tézis alapjai és a tézis ismertetése:

ADAPTÍV VISELKEDÉS

(részletesen az értekezés 7. fejezetében, 67-83. oldal)

Bevezetés

A piaci árak, a hőigény változása miatt egy kiserőműnek folyamatosan alkalmazkodnia kell aktuális környezetéhez. A részhasznosság-alapú ágensprogram hasznosságszámítása a megvalósítástól függően, a stratégiák szintjén biztosít bizonyos mértékű adaptivitást, de annak célfüggvénye (a részhasznosságok súlyozott összege) nehezebben értelmezhető. A részhasznosság-alapú ágensprogram így elsősorban egy-egy kiserőmű üzemének leírására lett kialakítva. A kiserőmű üzemi méréseinek ismeretében hangolhatók az ágensprogram súlyai és egyenletei. A megfelelően hangolt ágenssel megvizsgálható, hogy miként változik üzemvitele a szempontrendszer módosulásával. Ugyanakkor egy kiserőmű optimális üzemvitelének meghatározására – mely akár eltérhet a gyakorlatban tényleges, tehát mért üzemtől – más módszer szükséges.

A jövőre vonatkozó kutatási feladatok esetén nem áll rendelkezésre mérés, hanem fiktív kiserőműveket és fiktív környezetet tételezünk fel. Esetleg a kiserőmű paraméterei adottak, de a környezete teljesen más viselkedésre ösztönzi. Ezekre a teljesen ismeretlen helyzetekre szükséges egy olyan algoritmus, mely könnyen értelmezhető célfüggvénnyel optimalizál. A profitalapú célfüggvényből fakadóan az eredmények értelmezhetőbbé válnak, az esetleges furcsa viselkedések oka könnyen elemezhető. Az ismeretlen környezethez történő alkalmazkodás csak adaptív algoritmussal alakítható ki, melyet ebben az esetben nem stratégiaszinten, hanem a kiserőművek szintjén szükséges megvalósítani.

Módszertan

A módszer – bár valójában önállóan is működő képes – a háromlépéses ágensprogram hasznosság-számítására javasol egy tudásbázis-alapú megerősítéses tanulást alkalmazó eljárást. A tudásbázis-alapú megerősítéses tanulás modelljét a következők szerint alakítottam ki (részletesen az értekezés 67-83. oldalán):

- Az ágens energetikai helyzetét, illetve piaci pozícióját feleltetem meg a Mesterséges intelligencia c. könyv szerinti állapotoknak.
- Egy napot a villamosenergia-piac mérési elszámolási időintervallumának megfelelően 96 negyedóra bontva kezelek, ennek megfelelően szekvenciális állapotokat tételezek fel.
- Egy állapot jutalma az adott állapotban realizált profit.
- Az állapotok közötti átmenetekhez költségeket rendeltem a terhelésváltoztatások és indítások költségeinek megjelenítésére.
- A modell erőforrás igényének csökkentése céljából a jutalmakat szeparáltan tárolom (részletek az értekezés (22) egyenlete), az állapot-átmeneti modellt cselekvéstől függetlenül kezelem (értekezés (23) egyenlete).
- Az ágensprogram harmadik lépésében az egyes üzemállapotokhoz rendelt hasznosságot a folyamatosan frissülő tudásbázis alapján képezem (értekezés (45) egyenlete).

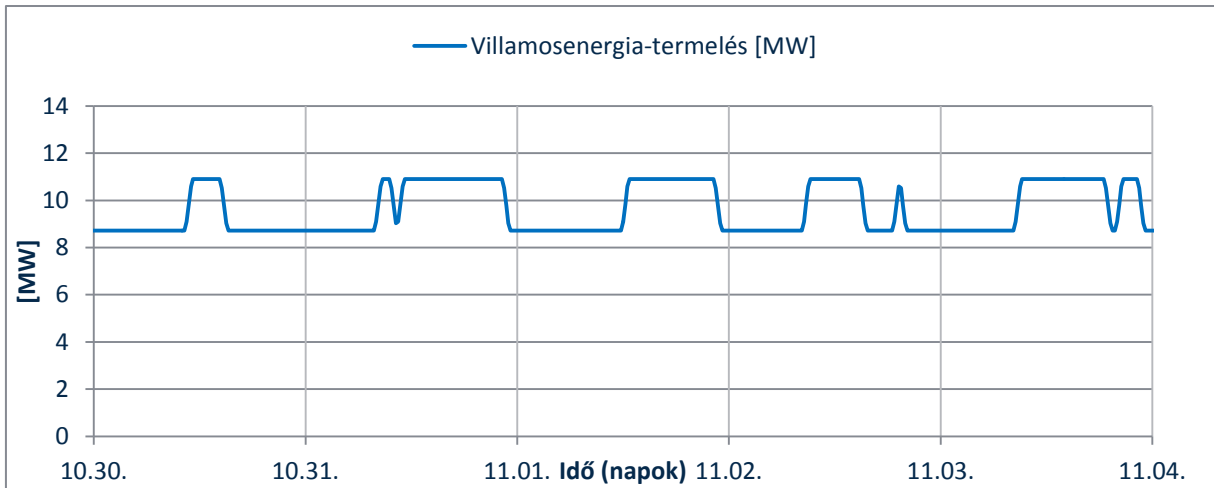
A jutalmak szeparált tárolása, illetve a leegyszerűsített állapot-átmeneti modell miatt a környezet felderítése, illetve annak változásának észlelése nagyságrendekkel kevesebb időt igényel. Ennek elősegítése érdekében az ágensprogramba külön felderítő szándékú cselekvéseket is előirányoztam, mely a ritkán, vagy régen alkalmazott állapotok frissítését írja elő ((41)-(43) egyenletek).

A tudásbázis alapú megközelítés egyedülálló a tématerületen. A Q-tanulással szemben – melyre egy vonatkozó publikációt találtam a szakirodalomban – a tudásbázis alapú módszer előnye, hogy komplex környezetekben hatékonyabban működik, képes hosszabb távú előretekintéssel meghatározni a hasznosságértékeket. Ezzel szemben hátránya a nagy erőforrás igény, mely miatt nagy terek kezelésére hamar alkalmatlanná válik. Az alkalmazott módszerek: a „jutalmak szeparált tárolása”, valamint „az állapot-átmeneti modell egyszerűsítése” a tár- és erőforrásigény csökkentését szolgálja.

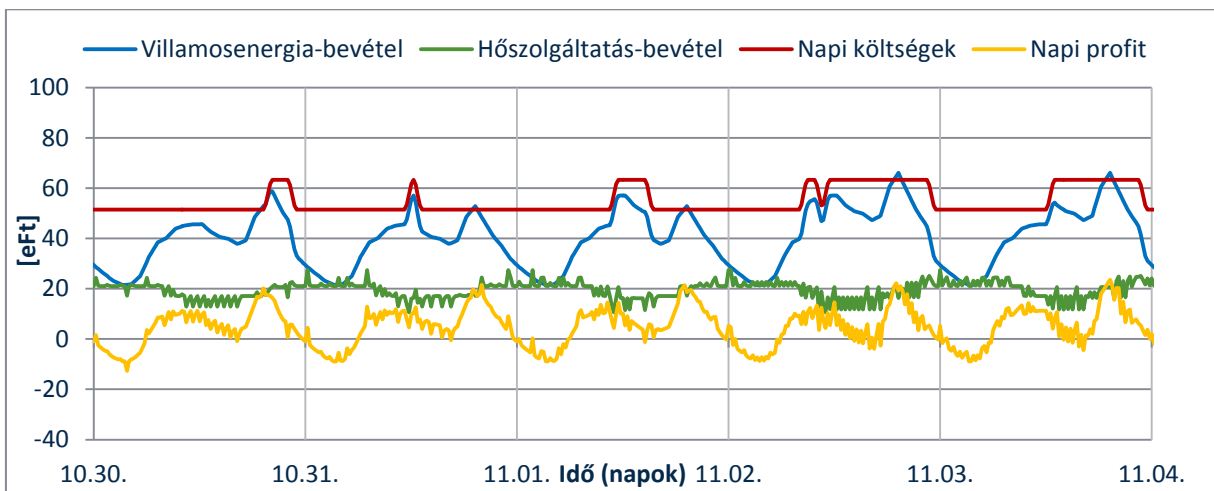
Eredmények

A megerősítéses tanulásra alapozott ágensprogrammal többféle technológiát alkalmazó kiserőmű üzemét elemeztem, eltérő piaci és jogi környezetben, más-más évszakokban. A villamosenergia-termelésen túl bemutattam a hőtermelés, illetve a napi profit alakulását is (ld. a 2-4. ábrákat).

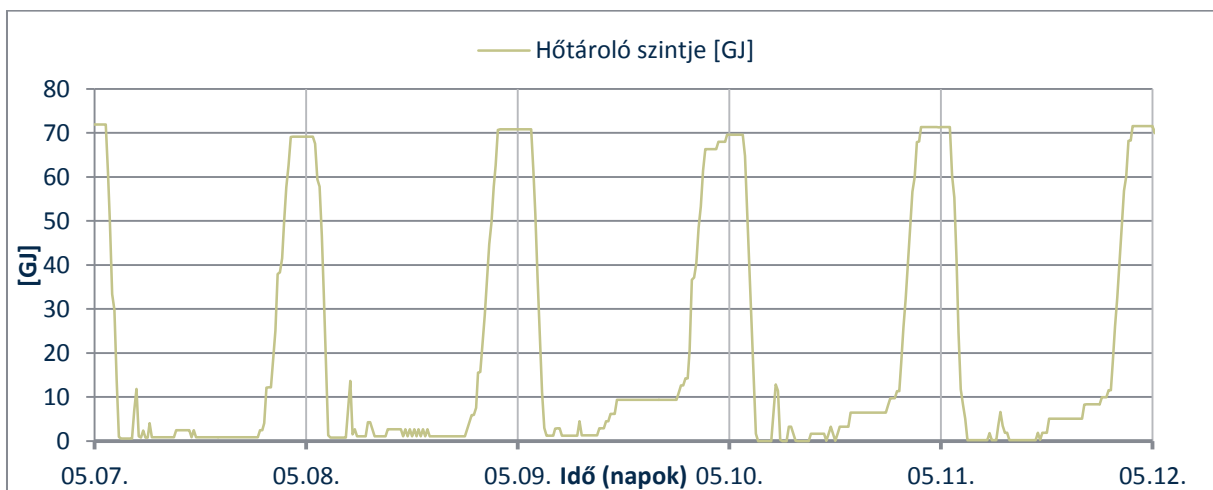
- A 2. ábrán egy gázmotoros erőmű villamosenergia-termelését szimuláltam, melyet részletesen elemeztem az értekezés 85-88. oldalán.
- A 3. ábrán ugyanezen vizsgálatra vonatkozóan a gázmotor negyedórás bevételeit, kiadásait, valamint profitját mutatom be, mely tartalmazza az erőmű indítási és terhelésváltoztatási költségeit is.
- A 4. ábra egy kora nyári időszakban működő KÁT-os elszámolási körben működő erőműre szimulált (megtanult) hőtároló töltöttségi szintet mutatja be. A vizsgálatot az értekezés 89-91. oldalán részleteztem.



2. ábra: Gázmotoros erőmű szimulált villamosenergia-termelése kiválasztott őszi időszakban



3. ábra: Gázmotoros erőmű szimulált bevételei és kiadásai, valamint profitja a kiválasztott őszi időszakban



4. ábra: Kötelező átvételben üzemelő kapcsolatos hő termelő kiserőmű hőtároló szintjének alakulása

Tézismegfogalmazás

III. tézis:

Az egyes elosztott energiatermelő egységek üzemének irányítására létrehoztam egy tudásbázis alapú megerősítéssel tanuló alkalmazó algoritmust, mely a műszaki korlátok figyelembevétele mellett a profitmaximalizálásra törekszik. A kialakított keretrendszer kezdeti információigénye a kiserőmű valós technikai és költségparamétereire szorítkozik, majd tanulási ciklusok futtatásával pusztán a profitvisszajelzésekre alapozva képes egy sokváltozós dinamikus környezetben működő tetszőleges kapcsolt technológiát alkalmazó kiserőmű üzemvitelének profitorientált meghatározására. A tudásbázis alapú megközelítés – a számítási igény csökkentése miatt bevezetett egyszerűsítésekkel együtt – sikeresen alkalmazható az összetett probléma megoldására.

Publikációs tevékenység

A megerősítéssel tanuló alkalmazó ágensprogramot a [S13] publikációban mutattam be, a témához kapcsolódó további publikációim: [S10]-[S12].

GYAKORLATI ALKALMAZHATÓSÁG

A bemutatott eszközökkel az elosztott energiatermelést érintő kutatási, modellezési és szimulációs feladatok elvégzéséhez adok támogatást. Mivel az elosztott energiatermelés technológiai palettája igen sokszínű, ezért a vonatkozó vizsgálatok hamar szembesülnek a technológiai sokféleség kezelési problémájával. Az értekezés szakirodalmi összefoglalója szerint egy-egy erőmű viselkedésének leírása nem fókuszterület, sokkal inkább az egyes kiserőművek közötti kommunikáció, vagy a kiserőműveket tömörítő virtuális erőmű optimális allokációja jelenti a vizsgálat tárgyát. Ebből következően a legtöbb vizsgálat leegyszerűsíti a kérdést, akár technológiától független, akár technológiafüggő egyszerű folyamatokra.

Az általánosállapot-alapú modell ezt a problémát oldja fel. Gyakorlatilag a módszer a technológiai specialitásokat algoritmus szinten szeparálja az üzemállapot kiválasztásának feladatától. Így egy lényegesen bonyolultabb probléma megoldása helyett azt két kisebb problémára fordítja le: általános állapotok legenerálása technológiai korlátok alapján, valamint algoritmus implementálása általános állapotokra alapozva. A kettő közötti átmenetet az első feladat kimenete, az állapottér adja. A bemutatott ágensprogramok lehetővé teszik a tényleges, szekvenciális döntések szimulációját is.

Az elosztott energiatermelés egyes erőműveihez állapottereket rendelve a technológiai specialitásokat a kutatók figyelembe vehetik anélkül, hogy erre komolyabb algoritmusokat kéne implementálni. Egy egyszerűbb, vagy akár a bemutatott összetettebb generikus algoritmusokkal (mely az állapottér által leszűkített lehetőségek között lépdel) az erőművek üzeme könnyen tervezhető, modellezhető és szimulálható. Az algoritmus célja és tényleges megvalósítása az adott vizsgálatától függ, mely lehet a szakirodalomban egyre népszerűbb microgridek energiamenedzsmentje, vagy akár egy-egy adott igény energiaellátásának optimális tervezése. Az állapotalapú általánosításra építő ágensprogramok esetén egy-egy ágenssel modellezhető a microgrid szél-erőműve, napeleme, vagy éppen kapcsolt termelőegysége. A helyi hőigény figyelembevétele mellett vizsgálható az egyes technológiák optimális részaránya a helyi fogyasztás megfelelő minőségű kielégítésére.

A hazai villamosenergia-rendszerben a kiserőművi szabályozási központok számára nyújtanak segítséget a tézisek. A szabályozási központok online módon követik a területileg szétszórta különböző, jellemzően gázmotoros erőművek üzemét. A központokban a rendszerirányítástól érkező szabályozói igények kiszolgálására saját diszpécser szolgálatot működtetnek. A szabályozási központok irányításához döntéstámogatási rendszerek fejleszthetők, melyek nagyban építhetnek a bemutatott állapotteretes módszerre, valamint a háromlépéses adaptív ágensprogramra. Még abban az esetben is, ha az egységek túlnyomó többsége gázmotor, mivel az első tézis nem csak a technológiákat, hanem gyakorlatilag a géptípusokat is általánosítja. Az egyes erőművekre előzetesen ráhangolt (részhasznosságok egyenlete, súlya) ágensmodelleken, vagy a számukra felépített tudásbázis alapján a diszpécser döntése előzetesen modellezhető, melynek eredménye így segítséget nyújthat az esetleges szabályozási kérdések meghozatalához. Továbbá a szabályozási piacon alkalmazandó ajánlattételi stratégiához a modell segítségével további információk gyűjthetők (rendelkezésre álló teljesítmény, rendelkezésre állási díj).

A harmadik tézis egy-egy kiserőműre vonatkozatható tudásbázis alapú költségkövetkeztetései csak mindig az aktuális állapotra, illetve rövidtávú előrejelzésre alkalmazhatók, mely így azonban döntéstámogató eszközként szolgálhat a szabályozási központokban a kialakítandó, magasabb szintű modellhez. A kiserőművek aktuális helyzetét követő modelleken megvizsgálhatók a fel-, illetve leirányú szabályozások hatása. A kiserőmű villamos teljesítményének egy adott alapjelet adva a modell megbecsülheti a szabályozási igény teljesítésének várható hatásait:

- mennyi idő alatt szabályoz az alapjelre a kiserőmű,
- adott esetben mennyi a hőrendszerben található tartalék,
- milyen költségei vannak az átterhelésnek, a megváltozó üzemanyag fogyasztásnak,
- összességében mekkora a bekövetkező profitváltozás, melyet a szabályozási piaci bevételeknek kompenzálnia kell.

Az algoritmust minden szabályozási központra lefuttatva a ténylegesen szabályozandó erőmű kiválasztását segítheti az eredmény. Hosszabb távú terveim szerint egy saját fejlesztésű, szabályozási központokat modellező multiágens keretrendszert dolgozok ki, amely munkában nagymértékben tudok támaszkodni a disszertációmban ismertetett eredményekre.

PUBLIKÁCIÓS LISTA

- [S1] Divényi Dániel: *Kiserőművek rendszerintegrációjának ágensalapú modellezése*, 57. MEE Vándorgyűlés kiadványában, Siófok, 2010., 1-2. oldal.
- [S2] Dániel Divényi, András Dán: *Simulation of Integration of Distributed Generation into Power System Control*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ) kiadványában, Granada, Spanyolország, 2010., 1-5. oldal.
- [S3] Dániel Divényi: *Kapcsolt kiserőművek modellezése és szimulációja*, VIK60 - Erősáram a fiatalok szemével kiadványában, Budapest, 2010., 1-2. oldal.
- [S4] Divényi Dániel, Dán András: *Rendszerszintű tartalékképzés kiserőművek bevonásával*, Energiagazdálkodás, 2011. kötet, 4. példány, 11-14. oldal, 2011. június.
- [S5] Dániel Divényi, András Dán: *Agent-based Modeling of Distributed Generation in Power System Control*, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 886-893. oldal, 2013. október.
- [S6] Divényi Dániel, Dán András: *Smart Gridok adaptív modellezése*, II. Mechwart András Ifjúsági Találkozó kiadványában, Budapest, 2012.
- [S7] Divényi Dániel, Vokony István, és Dán András: *Smart Gridok adaptív modellezése*, Elektrotechnika, 105. kötet, 6. példány, 13-15. oldal, 2012. június.
- [S8] Dániel Divényi, András Dán: *Simulation Results of Cogeneration Units as System Reserve Power Source Using Multiagent Modeling*, 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP) kiadványában, Hersonissos, Görögország, 2011., 1-7. oldal.
- [S9] Dániel Divényi, János Divényi: *Wind Speed Simulator Based on Wind Generation Using Autoregressive Statistical Model*, Electrotehnica Electronica Automatica, 60. kötet, 2. példány, 72-78. oldal, 2012. március.
- [S10] Dániel Divényi, András Dán: *Adaptive Multiagent Model Based on Reinforcement Learning for Distributed Generation Systems*, 1st Workshop on Intelligent Agent Technology, Power Systems and Energy Markets (IATEM) kiadványában, Bécs, Ausztria, 2012., 1-5. oldal.
- [S11] Divényi Dániel: *Adaptív menetredezés ADP algoritmus alkalmazásával*, III. Mechwart András Ifjúsági Találkozó, Mátraháza, 2013., 1-2. oldal.
- [S12] Divényi Dániel, Dán András: *Megerősítéses tanulás alkalmazása az egységes kiserőmű modellben*, 60. MEE Vándorgyűlés, Mátraháza, 2013., 1-2. oldal.
- [S13] Dániel Divényi, András Dán: *Knowledge-based Reinforcement Learning for Distributed Energy Resource Agents*, IEEE Transactions on Power Systems (2. bíráló alatt).

A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT PUBLIKÁCIÓK

(az értekezéssel összhangban alkalmazott számozással)

- [24] Aris Dimeas, Nikos Hatziargyriou: *Operation of a Multiagent System for Microgrid Control*, IEEE Transactions on Power Systems, 20. kötet, 3. példány, 1447-1455. oldal, 2005. augusztus.
- [25] Aris Dimeas, Nikos Hatziargyriou: *Agent based Control for Microgrids*, IEE Power Engineering Society General Meeting kiadványában, Tampa, Florida, USA, 2007., 1-5. oldal.
- [26] Aris Dimeas, Nikos Hatziargyriou: *Multi-Agent Reinforcement Learning for Microgrids*, IEEE Power and Energy Society General Meeting kiadványában, Minneapolis, Minnesota, 2010., 1-8. oldal.
- [27] Despoina, Dimeas, Aris Koukoulou, Nikos Hatziargyriou: *Scheduling Algorithms for Agent Based Control and Scheduling of Microgrids*, 16th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP) kiadványában, Hersonissos, 2011., 1-5. oldal.
- [31] Aris Dimeas, Nikos Hatziargyriou: *Design of a MAS for an Island System*, International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP) kiadványában, Niigata, Japán, 2007., 1-3. oldal.
- [32] S. J. Chatzivasiliadis, Nikos Hatziargyriou, és Aris Dimeas: *Development of an agent based intelligent control system for microgrids*, IEEE Power and Energy Society General Meeting kiadványában, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2008., 1-6. oldal.
- [36] Thillainathan Logenthiran, Dipti Srinivasan, és David Wong: *Multi-Agent Coordination for DER in MicroGrid*, IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies kiadványában, Singapore, Szingapúr, 2008., 77-82. oldal.
- [37] Thillainathan Logenthiran, Dipti Srinivasan, és Ashwin Khambadkone: *Multi-agent System for Energy Resource Scheduling of Integrated Microgrids in a Distributed System*, Electric Power Systems Research, 81. kötet, 1. példány, 138-148. oldal, 2011. január.
- [38] Thillainathan Logenthiran, Dipti Srinivasan: *Short term generation scheduling of a microgrid*, IEEE TENCON kiadványában, Cambridge, 2009., 1-6. oldal.
- [43] Isabel Praca, Carlos Ramos, és Zita Vale: *MASCEM: a multiagent system that simulates competitive electricity markets*, IEEE Intelligent Systems, 18. kötet, 6. példány, 54-66. oldal, 2003.
- [44] Gabriel Santos, Tiago Pinto, Hugo Morais, Zita Vale, és Isabel Praca: *Multi-Agent Simulation of Continental, Regional, and Micro Electricity Markets*, 23rd International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA) kiadványában, Bécs (Ausztria), 2012., 331-335. oldal.
- [45] P. Oliveira, T. Pinto, H. Morais, és Z. Vale: *MASGrIP – A Multi-Agent Smart Grid Simulation Platform*, IEEE Power and Energy Society General Meeting kiadványában, San Diego, USA, 2012., 1-8. oldal.
- [46] Zita Vale, Tiago Pinto, Isabel Praca, és Hugo Morais: *MASCEM: Electricity Markets Simulation with Strategic Agents*, IEEE Intelligent Systems, 26. kötet, 2. példány, 9-17. oldal, 2011.
- [47] T. Pinto, Z. Vale, F. Rodrigues, I. Praca, és H. Morais: *Multiagent system for adaptive strategy formulation in electricity markets*, IEEE Symposium on Intelligent Agent (IA) kiadványában, Paris, 2011., 1-8. oldal.
- [48] Tiago Pinto, Zita Vale, Rodrigues F., Isabel Praca, és Hugo Morais: *Cost dependent strategy for electricity markets bidding based on adaptive reinforcement learning*, 16th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP) kiadványában, Hersonissos (Görögország)ú, 2001., 1-6. oldal.
- [49] J. Barreto, I. Praca, T. Pinto, Sousa T.M., és Z. Vale: *Adapting meeting tools to agent decision*, IEEE Conference on Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS) kiadványában, Singapore, 2013., 32-39. oldal.
- [50] P. Oliveira, T. Pinto, H. Morais, Z. Vale, és I. Praca: *MASCEM - An Electricity Market Simulator providing Coalition Support for Virtual Power Players*, 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems kiadványában, Curitiba, 2009., 1-6. oldal.
- [51] P. Oliveira, T. Pinto, Praca I., Z. Vale, és H. Morais: *Intelligent Micro Grid Management using a Multi-Agent Approach*, IEEE Powertech kiadványában, Grenoble, Franciaország, 2013., 1-6. oldal.
- [52] Z. Vale és társai: *Scheduling distributed energy resources in an isolated grid – An artificial neural network approach*, IEEE Power and Energy Society General Meeting kiadványában, Minneapolis, USA, 2010., 1-7. oldal.