Raport Badawczy

Research Report

RB/34/2015

Zarządzanie energią w pracy wyspowej mikrosieci: zarządzanie konsumpcją energii oraz sprawiedliwy podział mocy produkcyjnych

W. Radziszewska

Instytut Badań Systemowych
Polska Akademia Nauk

Systems Research Institute
Polish Academy of Sciences

POLSKA AKADEMIA NAUK

Instytut Badań Systemowych

ul. Newelska 6

01-447 Warszawa

tel.: (+48) (22) 3810100

fax: (+48) (22) 3810105

Kierownik Zakładu zgłaszający pracę:
Prof. dr hab. inż. Zbigniew Nahorski

Warszawa 2015

INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Weronika Radziszewska

Zarządzanie energią w pracy wyspowej mikrosieci: zarządzanie konsumpcją energii oraz sprawiedliwy podział mocy produkcyjnych.

WARSZAWA 2015

Spis treści

Rozdział 1

Wstęp

Praca wyspowa mikrosieci - bez podłączenia do sieci dystrybucyjnej - jest zagadnieniem złożonym, gdyż ze względu na właściwości sieci elektrycznych wymaga idealnego bilansowania energii produkowanej i zużywanej. W części przypadków nie będzie możliwe zbilansowanie ze względu na chwilowe deficyty lub nadmiary energii elektrycznej, wtedy należy wymusić pożądane zachowania urządzeń, np. przeprowadzić planowane włączenia i wyłączenia poszczególnych urządzeń w mikrosieci. Pojawia się tu szereg problemów: produkcja energii ze źródeł odnawialnych jest tylko do pewnego stopnia przewidywalna, zużycie energii przez konsumentów jest szybko zmienne w czasie, a niektóre urządzenia są bardzo wrażliwe na chwilową zmianę parametrów prądu. Zarządzanie energią w tym przypadku można podzielić na dwa zagadnienia: zarządzanie produkcją i zarządzanie konsumpcją energii.

Zarządzanie produkcją wymaga ciągłego monitorowania możliwości wytwórczych źródeł, określania możliwości regulacyjnych i poziomu naładowania zasobników energii (o ile takie zasobniki są dostępne). Zarządzanie produkcją to problem decyzyjny: które źródło sterowalne, w jakim zakresie i czasie ma pokrywać zapotrzebowanie mikrosieci. W przypadku nadpodaży energii w pierwszej kolejności musi być zmniejszony punkt pracy źródeł, a w dalszej kolejności nadmiar energii musi być zmarnowany. W przypadku braku energii, musi zostać ograniczona konsumpcja.

Zarządzanie konsumpcją wymaga zamodelowania urządzeń i ustalenia priorytetów i mechanizmów ich wyłączania i włączania. Problem nie ogranicza się tylko do określenia ile mocy zużywa poszczególne urządzenie, ale musi także być wzięte pod uwagę okres włączania i wyłączania urządzenia (np. bezpieczne wyłączenie komputera może trwać nawet kilka minut).

Jeżeli rozważane są mikrosieci z wieloma właścicielami (podmiotami sterującymi) zagadnienie to obejmuje także problem sprawiedliwego ponoszenia kosztów przez producentów w mikrosieci w celu zbilansowania popytu i podaży. Koszt jest tu rozumiany zarówno dosłownie – jako koszt paliwa do źródeł energii oraz koszt w postaci niemożliwości w użytkowaniu sprzętu, gdy występuje deficyt energii.

W kolejnym rozdziale zostanie przedstawiona koncepcja mikrosieci. Rozdział 3 opisany zostanie problem bilansowania mocy. W kolejnym rozdziale zostaną opisane problemy występujące przy pracy mikrosieci w trybie wyspowym jak nadprodukcja energii elektrycznej i zbyt duży popyt. Rozdział 5 rozważa możliwości systemów informatycznych do bilansowania energii w mikrosieci w trybie wyspowym. Ostatni rozdział podsumowuje niniejszą pracę.

Rozdział 4

Praca wyspowa mikrosieci

Cechą charakterystyczną mikrosieci jest pojedyncze podłączenie do sieci dystrybucyjnej i w przypadku wyposażenia mikrosieci w źródła energii możliwość pracy w trybie wyspowym. Tryb wyspowy to sytuacja, gdy mikrosieć nie jest podłączona do sieci dystrybucyjnej. W takim wypadku zarówno z niedoborami energii elektrycznej, jak i z jej nadmiarem mikrosieć musi poradzić sobie wewnętrznie.

Mikrosieci mogą być nigdy nie podłączone do sieci (na przykład, gdy nie ma dostępu do infrastruktury energetycznej). W tym przypadku ważne jest planowanie i zarządzanie energią, ale także taki dobór źródeł i odbiorów energii elektrycznej, żeby bilansowanie było możliwe. Przykłady tego typu mikrosieci to np. mikrosieć wyspy Bornholm w Danii [3], wyspy Kythnos w należącej do Grecji [8], laboratorium Tecnalia w Hiszpanii [15]. Wymienione mikrosieci charakteryzuj się dużą liczbą sterowalnych źródeł energii elektrycznej (np. wyspa Bornholm jest wyposażona w 14 generatorów diesla, 1 na olej, 1 generator pracujący na mieszance paliwa, węgla i drewna oraz 2 turbiny na biogaz) lub zasobników energii elektrycznej (np. wyspa Kynthos, na której jest zainstalowane 53 kWh zasobnik bateryjny). Wszystkie mikrosieci są kontrolowane przez systemy informatyczne typu SCADA (np. dla wyspy Bornholm są to dwa systemy: ABB Network Manager i Vestas Online).

Jednakże są też mikrosieci, które tylko w wyjątkowych przypadkach będą przechodzić w tryb pracy wyspowej, będzie to sytuacja awaryjna. Taką mikrosiecią jest np. mikrosieć centrum naukowo-konferencyjnego opisana w [13]. Jest to przypadek, gdy mikrosieć ma niewystarczające zasoby własne do wyprodukowania wystarczającej ilości energii lub, gdy mikrosieć jest

wyposażona w dużą liczbę źródeł odnawialnych. Przy dużej liczbie paneli fotowoltaicznych i mikroturbin wiatrowych wystąpi sytuacja, że w słoneczny i wietrzny dzień źródła produkują duże ilości energii (występuje sytuacja nadprodukcji), a w zimowy i bezwietrzny dzień nie mogą zasilić własnych odbiorów mikrosieci.

Istnieją też mikrosieci pośrednie pomiędzy przedstawionymi w poprzednich akapitach sytuacjami, czyli mikrosieci, które mogą być podłączone do sieci dystrybucyjnej, ale są od niej odłączane z różnych względów, przy czym niekoniecznie są to sytuacje awaryjne. Przyczyną takiego odłączenia może być umowa z siecią dystrybucyjną, która wymaga odłączenia w pewnych przypadkach. W takim wypadku mikrosieć wspomaga zarządzanie siecią dystrybucyjną, poprzez niwelowanie pewnej części zużycia energii elektrycznej lub nie wprowadzanie dodatkowej energii do sieci.

Schemat przejścia w stan pracy wyspowej zależy od sytuacji w której się ten stan zmienia: czy jest to przejście planowane, czy nieplanowane (na przykład w przypadku awarii sieci dystrybucyjnej). W przypadku planowanego przejścia w tryb pracy wyspowej jest możliwość naładowania zasobników energii, wyłączenia części odbiorów oraz włączenia źródeł energii mikrosieci. W przypadku nieplanowanego przejścia w tryb wyspowy należy w pierwszej kolejności uruchomić urządzenie (źródło), które będzie źródłem fazy dla wszystkich urządzeń, utrzymać mikrosieć do czasu włączenia wszystkich potrzebnych źródeł energii (o ile były wyłączone) oraz wyłączyć pewną część odbiorów. Przy czym decyzja, które urządzenia konsumujące energię mają być wyłączone może być różna zależnie od powodu przejścia w stan pracy wyspowej.

W stanie pracy w trybie wyspowym, może się zdarzyć, że bilansowanie jest niemożliwe ze względu na nadmiar lub niedobór energii elektrycznej. W kolejnych sekcjach zostaną opisane sposoby podejścia do tych niezbilansowań.

4.1 Nadprodukcja energii elektrycznej

Jeżeli konsumpcja energii elektrycznej jest za mała w stosunku do ilości energii produkowanej przez źródła to występuje sytuacja nadprodukcji energii elektrycznej. Taka sytuacja występuje w przypadku, gdy mikrosieć jest wyposażona w mikro źródła energii odnawialnej, które są niesterowalne. Przykładowo: jest piękny, wietrzny dzień, a mikrosieć jest wyposażona w panele fotowoltaiczne i mikroturbiny wiatrowe. Tę energię można zmagazynować (o

ile są dostępne wystarczająco pojemne zasobniki energii elektrycznej), można zmniejszyć produkcję ze źródeł (o ile jest to możliwe) lub można zmarnować energię poprzez włączenie pewnych urządzeń. Wszystkie te akcje są uzasadnione, ale w pewnych sytuacjach. Kolejne sekcje rozpatrują poszczególne możliwe akcje.

4.1.1 Nadprodukcja: Magazyny energii elektrycznej

Magazyny energii elektrycznej są bardzo ważnym elementem w mikrosieciach energetycznych. Jak opisał [19] powyżej pewnej ilości baterii nie tylko nie ma problemu ze zbilansowaniem mikrosieci, ale także ilość szczytów energetycznych. W opracowaniu [10] są omówione technologie przechowywania energii w bateriach. Baterie mają określoną pojemność, która ogranicza ile energii bateria może zmagazynować. Sprawność baterii jest wypadkową sprawności dwukrotnej konwersji energii AC/DC, DC/AC przez przekształtnik energoelektroniczny, strat związanych z magazynowaniem energii (zjawisko powolnego samorozładowywania się baterii), temperatury (temperatura zmienia pojemność baterii), wpływ szybkości rozładowywania na pojemność. Zarządzanie baterią musi uwzględniać długoterminowe planowanie, a przynajmniej znajomość profili zużycia energii i produkcji energii, aby ładować w momencie dostępności energii, a rozładowywać baterię, gdy tej energii zabraknie.

Innymi zasobnikami energii elektrycznej są koła zamachowe - źródła magazynujące energię w postaci energii kinetycznej. Mogą one przejąć i oddać bardzo duże ilości energii, ale niestety w bardzo krótkim czasie.

W przypadku pracy wyspowej mikrosieci bateria ma szczególne znaczenie, gdy następują przeplatające się okresy nadprodukcji energii ze źródeł własnych mikrosieci i deficyt energii (zbyt duża konsumpcja energii elektrycznej). Wtedy bateria będzie realizować naprzemiennie cykle ładowania i rozładowywania. W przypadku długotrwałego niezbilansowania działanie baterii musi być wspomagane innymi metodami zapewnienia równości podaży i popytu. Baterie obecnie można kupić w relatywnie niewysokiej cenie, np. baterie oferowane przez Tesla [16].

Ciekawym rozwiązaniem jest użycie baterii samochodu elektrycznego jako element bilansowania energii elektrycznej w mikrosieci. W tej sytuacji samochód elektryczny ma dwie role: środka transportu i baterii mikrosieci. Najbardziej popularnymi modelami samochodów elektrycznych są pojazdy hybrydowe podłączane do sieci (ang. *plug-in hybrid electric vehicle (PHEV)*), które mają baterię dającą co najmniej 4kWh energii, mogą być ładowane

przez standardowe gniazdko elektryczne [7]. W przypadku jeżeli taki samochód jest potrzebny jako środek lokomocji, jest konsumentem energii elektrycznej, gdyż jego bateria musi zostać przed podróżą naładowana do pewnego poziomu. Z kolei jeżeli wiadomo, że pojazd będzie stacjonarny przez dłuższy czas, to tym czasie może zostać wykorzystany jako bateria w mikrosieci [18]. Wymaga to większego planowania poziomu naładowania baterii z uwzględnieniem niepewności co do stanu sieci i czasu planowanego odjazdu.

4.1.2 Nadprodukcja: Zmniejszenie produkcji

Zmniejszenie produkcji ze źródeł jest drugim sposobem zbilansowania mikrosieci w przypadku nadmiaru podaży. Żeby tego dokonać mikrosieć musi być wyposażona w źródła sterowalne typu mikroturbiny gazowe, spalinowy silnik prądotwórczy. Pewne modele małych, jak i dużych turbin wiatrowych mają możliwości regulacyjne poprzez zmianę konta nachylenia łopatek wiatraka. Także niektóre typy paneli fotowoltaicznych mogą odwrócić się od słońca, aby zmniejszyć poziom irradiancji i tym samym produkować mniej energii elektrycznej. Niektóre urządzenia mogą zostać odłączone od sieci i tym samym nie produkować energii wcale (np. niektóre mikroturbiny wiatrowe). Tego typu działania są możliwe tylko w ograniczonym zakresie - niewiele mikroźródeł odnawialnych ma możliwości regulacyjne, a biorąc pod uwagę popularność tych rozwiązań, można się spodziewać przewagi tego typu urządzeń.

4.1.3 Nadprodukcja: Marnowanie energii

Obecnie w bardzo niewielu pracach rozważa się możliwość marnowania energii, wynika to z założenia, że dużo częściej występuje sytuacja deficytu energii niż jej nadmiaru. Marnowanie energii jest ostatecznością, występującą w sytuacji, gdy nie można zmniejszyć wielkości produkcji energii. Szczególnym przypadkiem marnowania energii jest przekształcanie jej w energię cieplną, którą można magazynować.

W celu odpowiedniego zmarnowania energii przed wystąpieniem nadprodukcji należy określić, które urządzenia i w jakim zakresie będą włączane i na jaki punkt pracy.

4.2 Zbyt duży popyt

Jeżeli mikrosieć nie może być zbilansowana z powodu niewystarczających mocy produkcyjnych to energia pobierana jest z sieci dystrybucyjnej (o ile mikrosieć jest podłączona do tej sieci), a w przypadku pracy wyspowej trzeba zmniejszyć popyt. Jeżeli niedostatek energii jest sytuacją powtarzającą się w pewnych warunkach – można to przewidzieć i przygotować mikrosieć na takie zdarzenie. W tym przypadku należy rozplanować zużycie, tak aby przenieść część konsumpcji energii na termin późniejszy. Jeżeli zbyt duży popyt będzie nieplanowany (np. w przypadku zbiegu okoliczności) system musi odciąć pewne urządzenia, aby zapewnić ciągłość działania systemu. W kolejnych sekcjach są omówione obydwa zagadnienia.

4.2.1 Zbyt duży popyt: Planowanie zużycia

Zużycie energii w warunkach domowych lub małych firm jest szybko zmienne i mało przewidywalne ze względu na czynnik ludzki. Jednakże zachowania ludzi są w pewnym stopniu powtarzalne i okresowe. Znając pewien schemat zachowania osób w określonych porach dnia pozwala naszkicować profil dobowy zużycia prądu. Do tego wymagane są długoterminowe badania z informacją co i dlaczego dana osoba robi. Bazując na tych informacjach można wyznaczyć pewien mechanizm predykcyjny, który będzie określał zużycie prądu w ciągu doby i szacował czy wystąpi sytuacja deficytu energii elektrycznej.

Jeżeli jest zagrożenie, że taka sytuacja będzie miała miejsce system powinien zgłosić to użytkownikowi i zaproponować zmianę rutyny, tak aby zmniejszyć deficyt w określonych okresach dnia. Przykładem takiego zdarzenia może być sytuacja, gdy nie jest możliwe jednoczesne włączenie pralki, elektrycznego podgrzewacza do wody i piekarnika, bo spowoduje to zbyt duże zużycie prądu. Użytkownik powinien zdecydować o zrezygnowaniu z jednej z tych czynności lub przesunięciu jej na późniejszy termin.

System informatyczny może pełnić rolę doradczą, sugerując, które z urządzeń należy rozważyć w pierwszej kolejności do wyłączenia. Automatyzacja tego procesu jest tylko częściowo możliwa, gdyż muszą istnieć urządzenia, które pozwolą systemowi informatycznemu na sterowanie ich pracą (choćby ograniczoną do informacji o deficycie energii), oraz musi być to zgodne z wolą użytkownika.

4.2.2 Zbyt duży popyt: Zmniejszanie zużycia

Zmniejszenie niepotrzebnego zużycia prądu (marnowanie prądu) powinno być stosowane nie tylko przy mikrosieciach i pracy wyspowej, ale zawsze. Wiele energii jest marnowane przez nieświadomość użytkowników, lub przez niepotrzebne włączanie pewnych funkcjonalności urządzeń (np. urządzenia w trybie stand-by) [6]. Nawet jeżeli energia nie jest niepotrzebnie marnowana, często można zastąpić pewne urządzenia bardziej energooszczędnymi. Jest to zmiana długoterminowa, wymagająca poniesienia pewnych kosztów. W przypadku posiadania odpowiednich urządzeń konsumowania energii elektrycznej trzeba aktywnie zarządzać energią elektryczną.

4.2.3 Zbyt duży popyt: Przesuwanie zużycia w czasie

Zarządzanie zużyciem energii (DSM –*Demand-Side Management*)jest obecnie bardzo szeroko badaną dziedziną [12, 21]. W modelu DSM ogranicza się zapotrzebowanie na odbiór energii w czasie niedoboru mocy wyłączając odbiorniki zgodnie z zadanymi priorytetami. Pomysł ten był stosowany w 1940 r. w Niemczech, a po wojnie w Polsce, szczególnie w końcowych latach planu 6-letniego. Ograniczano wtedy odbiory w zakładach przemysłowych, a nawet zakazywano włączania w godzinach szczytu urządzeń domowych pobierających większą moc, w tamtych czasach głównie żelazek i kuchenek elektrycznych. Obecnie trwają intensywne prace nad zautomatyzowaniem DSM, czyli stworzenia urządzeń, które poprzez komunikację z siecią będą decydowały o przesunięciu zużycia energii elektrycznej bez ingerencji użytkownika. Aktualne prace na ten temat można znaleźć w [2].

Innym rozwiązaniem, nastawionym na większy udział odbiorników energii w wypracowaniu rozwiązania, jest model DSB (*Demand-Side Bidding*) [17], w którym źródła energii podają do centralnego urządzenia sterującego w mikrosieci co 15 min. możliwość wytwarzania energii i jego cenę minimalną (koszt + zysk) na następna godzinę, a odbiorniki starają się o zakup energii z poszczególnych źródeł, podając wielkość potrzebnej energii oraz jej priorytet. W pracy [17] rozważano tylko dwa priorytety: wysoki (zakup konieczny) lub niższy, w którym są dwie opcje: zakup, jeżeli cena jest odpowiednio niska, lub możliwość przesunięcia zakupu po ustalonej cenie na następny okres. Rozwiązanie powstałego systemu aukcyjnego przeprowadza się centralnie stosując metodę *unit commitment* i używając listy priorytetów. W modelu DSB urządzenie ma wpływ na rozwiązanie przez podanie priorytetu. W ten sposób

uczestniczy ono w końcowej decyzji o pokryciu zapotrzebowania w sieci.

Rozdział 6

Podsumowanie

Tematyka sieci inteligentnych („*smart grid*") jest bardzo szeroka i jest bardzo popularnym tematem badań, co skutkuje jej bardzo dynamicznym rozwojem. W tej pracy ograniczono się do pewnego podzbioru tematyki, czyli do badań nad zarządzaniem energią w mikrosieci w trybie pracy wyspowej.

Mikrosieć jest bardzo szeroko rozważanym zagadnieniem, jednak stosunkowo niewiele naukowców rozważa pracę mikrosieci w trybie wyspowym. Jest to zagadnienie bardzo skomplikowane w przypadku niewystarczająco elastycznych źródeł mocy w mikrosieci. Ogólne i niezawodne rozwiązanie wymaga planowania, zarówno zużycia energii elektrycznej, jak i produkcji (punktów pracy źródeł sterowalnych), oraz dodatkowego mechanizmu bilansującego krótkoterminowe odchylenia od planu.

W tej pracy opisano podstawowe problemy występujące w pracy wyspowej mikrosieci. Jest to kontynuacja badań nad zarządzaniem energii w mikrosieci i praca ta stanowi wstęp do zaimplementowania systemu zarządzania energią w mikrosieci w trybie pracy wyspowej.

Pokazano możliwe rozwiązania problemu nadprodukcji energii elektrycznej i deficytu energii elektrycznej. Do prawidłowego i efektywnego rozwiązania problemu bilansowania powinny być użyte wszystkie podane mechanizmy, zarówno ograniczające lub przesuwające popyt, jak i zarządzające podażą.

Kontynuacją pracy będzie zaimplementowanie mechanizmów zarządzania urządzeniami w celu osiągnięcia zbilansowania mikrosieci w ekstremalnych warunkach.

Bibliografia

[1] A. Agnetis, G. Dellino, P. Detti, G. Innocenti, G. de Pascale, and A. Vicino. Appliance operation scheduling for electricity consumption optimization. In *CDC-ECE*, pages 5899–5904. IEEE, 2011.

[2] V.S.K.M. Balijepalli, V. Pradhan, S.A. Khaparde, and R. M. Shereef. Review of demand response under smart grid paradigm. In *Innovative Smart Grid Technologies - India (ISGT India), 2011 IEEE PES*, pages 236–243, Dec 2011.

[3] Bornholm Island. `https://building-microgrid.lbl.gov/bornholm-island`.

[4] R. G. Harley and J. Lian. Computational intelligence in smart grids. *IEEE Computational Intelligence Applications in Smart Grid*, pages 8–15, 2011.

[5] N.D. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, and Ch. Marnay. Microgrids: An overview of ongoing research, development, and demonstration projects. *IEEE Power & Energy Magazine*, 5(4):78–94, 08/2007 2007.

[6] International Energy Agency. More data, less energy: Making network standby more efficient in billions of connected devices. Technical report, International Energy Agency, 2014.

[7] F. M. R. Islam. *Impact and Utilization of Emerging PHEV in Smart Power Systems*. PhD thesis, School of Engineering and Information Technology, The University of New South Wales, Canberra, Australia, 2013.

[8] Kythnos Island. `https://building-microgrid.lbl.gov/kythnos-island`.

[9] Junghoon Lee, Gyung-Leen Park, Sang-Wook Kim, Hye-Jin Kim, and Chang Oan Sung. Power consumption scheduling for peak load reduction in smart grid homes. In *Proceedings of the 2011 ACM Symposium on Applied Computing*, SAC '11, pages 584–588, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[10] D. Linden and T. Reddy. *Handbook Of Batteries*. McGraw-Hill handbooks. McGraw-Hill Education, 2001.

[11] P. Pałka, W. Radziszewska, and Z. Z. Nahorski. Balancing electric power in a microgrid via programmable agents auctions. *Control and Cybernetics*, 4(41):777–797, 2012.

[12] R. Palma-Behnke, C. Benavides, E. Aranda, J. Llanos, and D. Saez. Energy management system for a renewable based microgrid with a demand side management mechanism. In *Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG), 2011 IEEE Symposium on*, pages 1–8. IEEE, 2011.

[13] M. Parol, J. Wasilewski, T. Wójtowicz, and Z. Nahorski. Low voltage microgrid in a research and educational center. In *CD Proceedings of the Conference Elektroenergetika ELEN 2012*, page 15, September 2012.

[14] W. Radziszewska, Z. Nahorski, M. Parol, and P. Pałka. Intelligent computations in an agent-based prosumer-type electric microgrid control system. In L. T. Kóczy, C. R. Pozna, and J. Kacprzyk, editors, *Issues and Challenges of Intelligent Systems and Computational Intelligence*, volume 530 of *Studies in Computational Intelligence*, pages 293–312. Springer, 2014.

[15] Tecnalia Microgrid Laboratory. `https://building-microgrid.lbl.gov/tecnalia-microgrid-laboratory`.

[16] Tesla Motors. Powerwall. `http://www.teslamotors.com/powerwall`.

[17] A. G. Tsikalakis and N. D. Hatziargyriou. Centralized control for optimizing microgrids operation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(1):241–248, 2008.

[18] P. Vytelingum, T. D. Voice, S. D. Ramchurn, Alex Rogers, and N. R. Jennings. Agent-based micro-storage management for the smart grid. In

Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Volume 1, AAMAS '10, pages 39–46, Richland, SC, 2010. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.

[19] Perukrishnen Vytelingum, Sarvapali D. Ramchurn, Thomas D. Voice, Alex Rogers, and Nicholas R. Jennings. Trading agents for the smart electricity grid. In *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: volume 1 - Volume 1*, AAMAS '10, pages 897–904, Richland, SC, 2010. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.

[20] J. Wasilewski, M. Parol, T. Wojtowicz, and Z. Nahorski. A microgrid structure supplying a research and education centre - Polish case. In *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on*, pages 1–8, 2012.

[21] D. Westermann and A. John. Demand matching wind power generation with wide-area measurement and demand-side management. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 22(1):145–149, 2007.

[22] M. Wooldridge. *Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2001.