

TEORIA GIER W TECHNICIE BILANSOWANIA MOCY CZYNNEJ W MIKROSIECIACH NISKIEGO NAPIĘCIA

GAME THEORY TECHNIQUES FOR BALANCING ACTIVE POWER IN A LOW-VOLTAGE MICROGRID

Jarosław Affelt^{1*}, Józef Lisowski²

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81-87, 81-581 Gdynia

¹ Studium Doktoranckie, e-mail: jaffelt@wp.pl

² Katedra Automatyki Okrętowej, e-mail: j.lisowski@we.am.gdynia.pl

* Adres do korespondencji/Corresponding author

Streszczenie: W artykule podjęto problem opracowania koncepcji rozproszonego zarządzania popytem energii elektrycznej w mikrosieciach niskiego napięcia z użyciem algorytmu wykorzystującego elementy teorii gier. Takie rozwiązanie może być stosowane jako podstawowy sposób bilansowania mocy czynnej oraz jako system awaryjny w przypadku przejścia sieci w tryb pracy izolowanej lub w inteligentnych sieciach elektroenergetycznych w sytuacji utraty komunikacji pomiędzy sterownikami.

Słowa kluczowe: teoria gier, mikrosieci, bilansowanie mocy, rozproszone zarządzanie popytem.

Abstract: The article discusses the problem of developing a concept of fully distributed Demand Side Management in a low-voltage microgrid, using an algorithm based on game theory. The following solution can be used as a primary method to maintain the balance of active power and as a backup system in a case of switching the microgrid to isolated mode, and also in Smart Power Grid in a situation where there is a loss of communication between the controllers.

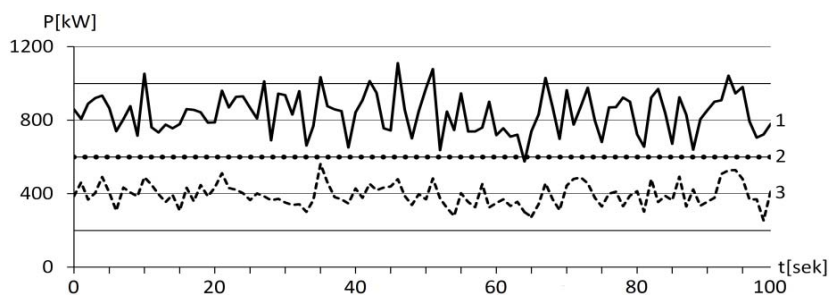
Keywords: game theory, microgrid, demand side management.

1. WSTĘP

Rosnący niedobór energii elektrycznej wymusza poszukiwanie nowych rozwiązań zarówno w zakresie wytwarzania, jak i zarządzania popytem. Elementem komplikującym rozwiązanie wskazanych problemów jest konieczność dążenia do jak największego udziału ekologicznych źródeł energii w procesie wytwarzania energii elektrycznej. W większości generacja oparta na odnawialnych źródłach charakteryzuje się naturalną zmiennością mocy i należy ją zaklasyfikować do grupy źródeł

niesterowalnych i nieprzewidywalnych. Wymienione cechy nie stanowią problemu w przypadku synchronicznej pracy mikro sieci z ogólnodostępną, sztywną siecią dystrybucyjną, z której można uzupełniać niedobór energii generowanej przez własne źródła. Sytuacja ulega zmianie w momencie przejścia w tryb pracy wyspowej. Duża fluktuacja popytu w połączeniu ze zmiennością generacji energii elektrycznej może doprowadzić do poważnych zaburzeń pracy sieci, łącznie z utratą ciągłości zasilania. Aby nie dopuścić do takiej sytuacji oraz utrzymać wymagane parametry zasilania, przeprowadza się odciążanie sieci. Zazwyczaj polega ono na odłączeniu wcześniej wytypowanych, mniej ważnych odbiorników bez analizy aktualnego bilansu mocy. Takie rozwiązanie rozproszonego zarządzania popytem DSM (z ang. *Demand Side Management*), podyktowane prostotą i skutecznością działania, zmniejsza w sposób znaczący komfort odbiorców energii oraz nie wykorzystuje optymalnie posiadanych możliwości. Do obliczeń przyjmuje się sterowalne i przewidywalne źródła energii elektrycznej oraz zakłada maksymalny pobór energii przez podłączone odbiorniki.

Rysunek 1 przedstawia przebiegi w czasie: 1 – zapotrzebowania na energię elektryczną wszystkich odbiorników, 2 – mocy rezerwowego zespołu prądowłórczego, 3 – zapotrzebowania na energię elektryczną odbiorników I i II kategorii.



Rys. 1. Krzywa obciążenia symulowanej mikro sieci

Fig. 1. The load curve in the simulated microgrid

W najprostszym wariantcie odciążania w momencie przejścia mikro sieci w tryb pracy izolowanej pozostaną załączone tylko odbiorniki kategorii I i II, co oznacza uśrednione wykorzystanie mocy zespołu prądowłórczego na poziomie 65,1%.

W literaturze przedmiotu można znaleźć opisy bardziej zaawansowanych sposobów bilansowania mocy. Wiele z nich opiera się na teorii gier, gdzie najczęściej zadanie optymalizacji pracy mikro sieci jest rozpatrywane jako problem optymalizacji jednokryterialnej o charakterze ekonomicznym – tj. jako problem minimalizacji kosztów związanych z dostawą energii elektrycznej do odbiorców lub maksymalizacji przychodów uzyskanych ze sprzedaży energii elektrycznej [Parol 2013]. Oznacza to, że w momentach szczytowego zapotrzebowania na energię elektryczną jej cena rośnie, co zachęca odbiorców do ograniczenia jej

zużycia lub przesunięcia go poza fazę szczytową, a w okresach kiedy występuje nadmiar energii i cena jest niska – do jej magazynowania. Takie rozwiązanie jest w pełni funkcjonalne i potwierdziło w praktyce swoją skuteczność, ma jednak kilka znaczących wad i ograniczeń. Do największych należy zaliczyć koszt budowy i eksploatacji systemu.

Według amerykańskich szacunków [Gellings 2011] w celu stworzenia w pełni funkcjonalnej inteligentnej sieci elektroenergetycznej na terenie USA potrzebne są nakłady w wysokości od 338 do 476 mld USD. Dla lepszego zobrazowania przedstawionych liczb można dodać, że jest to równowartość ceny 100 bloków elektrowni jądrowej o mocy 1000 MW razem z paliwem. Dane te są zaprzeczeniem idei przyświecającej powstaniu inteligentnej sieci elektroenergetycznej SPG (z ang. *Smart Power Grid*). Początkowa koncepcja zakładała stworzenie systemu, pozwalającego na bilansowanie mocy w okresach szczytowych, co przyczyniłoby się do uniknięcia wielomiliardowych nakładów inwestycyjnych celem zaspokojenia krótkotrwałego zapotrzebowania na energię elektryczną.

Kolejną wadą oraz ograniczeniem jest konieczność posiadania stałej łączności pomiędzy uczestnikami sieci. Konieczność komunikowania się sterowników generuje zagrożenia, polegające na podejmowaniu błędnych lub nieoptymalnych decyzji w przypadku zakłóceń bądź utraty łączności.

Bardzo realnym zagrożeniem są cyberataki. Z informacji podanych przez Departament Audytu i Bezpieczeństwa Polskich Sieci Elektroenergetycznych wynika, że każdego dnia w Polsce na system teleinformatyczny przeprowadzanych jest od kilkuset do kilku tysięcy prób różnego rodzaju ataków, wejść lub skanowania portów. Przykład cyberataku na sieć SPG, polegający na wprowadzeniu do sieci fałszywych informacji o bieżącej cenie energii elektrycznej oraz skutki jego działania, opisano w pracy [Amini 2015]. Przedstawione zagrożenia wymuszają redundancje kanałów łączności oraz zabezpieczenie ich przed próbami nieautoryzowanego dostępu. Pociąga to za sobą dalszy wzrost i tak już olbrzymich oraz niewspółmiernych do przewidywanych korzyści kosztów budowy i eksploatacji inteligentnych sieci zasilania.

W dalszej części artykułu przedstawiono propozycję algorytmu, wykorzystującego elementy teorii gier, który na podstawie pomiarów wybranych wskaźników jakości energii elektrycznej podejmuje autonomicznie decyzję o podłączeniu lub odłączeniu odbiorników w celu zbilansowania mocy i utrzymania ciągłości zasilania.

2. ENERGIA ELEKTRYCZNA – TOWAR CZY DOBRO SPOŁECZNE?

Jest to fundamentalne pytanie, na które należy udzielić sobie odpowiedzi już na pierwszym etapie projektowania systemu bilansowania energii. Czy dostęp do energii ma być równy dla wszystkich odbiorców czy tylko dla tych, którzy są gotowi zapłacić za jej dostawę cenę rynkową? Powyższe pytanie jest szczególnie

zasadne w sieciach, w których wytwórca i odbiorca energii elektrycznej są oddzielnymi podmiotami. Metoda optymalizacji o charakterze ekonomicznym może również znaleźć zastosowanie w systemach izolowanych, gdzie wytwórca i konsument jest tym samym podmiotem gospodarczym. Jako przykład takiej sytuacji można podać statek w drodze, fabrykę lub szpital, który przeszedł na zasilanie awaryjne. W takiej sytuacji wirtualne pieniądze mogą określać przydzielony priorytet zasilania poszczególnych odbiorników. Niewątpliwą zaletą tej metody jest niezmienność algorytmu działania bez względu na to, czy sieć pracuje w stanie normalnym czy wyspowym. Wadą wspomnianą już wcześniej jest konieczność posiadania stałej łączności pomiędzy sterownikami. Inną możliwością jest potraktowanie energii jako dobra wspólnego i wspólna dbałość o jej jakość. W tym momencie pojawia się tzw. tragedia wspólnego pastwiska, czyli sytuacja, w której wszyscy użytkownicy mają nieograniczony dostęp do zasobów i czerpią z nich korzyści, ale nie ponoszą kosztów ich eksploatacji. Przykładem takiej działalności może być połów ryb, czy też korzystanie z powietrza w atmosferze Ziemi.

Nadmierna eksploatacja może doprowadzić do wyczerpania zasobów lub ich zniszczenia, a w konsekwencji niezdatności do dalszego użytku. W kontekście rozpatrywanego tutaj problemu będzie to nadmierne obciążenie sieci prowadzące do zaburzeń parametrów energii elektrycznej, w ostateczności zaś do utraty zasilania. Takie dylematy powstają w sytuacji, kiedy decydem jest człowiek, a słabości i pokusa zysku przez jednostki może doprowadzić do tragedii ogółu.

Teoria gier została opracowana w celu matematycznego opisu zasad podejmowania decyzji przez człowieka. Złożoność, nieprzewidywalność oraz częsty brak racjonalności ludzkich decyzji powoduje, że naukowcy wciąż nie są zgodni co do wielu fundamentalnych problemów. Podobnych ułomności i dylematów nie posiadają poprawnie zaprogramowane komputery, dbające o dobro wspólne i równomiernie rozkładające niedogodności i straty powstałe w wyniku ograniczeń. Najważniejszą zaletą systemu opartego na mikroprocesorach jest przewidywalność i powtarzalność decyzji w określonych zewnętrznych uwarunkowaniach.

3. GRA PRZECIWKO NATURZE JAKO MECHANIZM BILANSOWANIA

Bilansowanie mocy w sieci jest procesem ciągłym i wymaga spełnienia równości mocy wytwarzanej P_{gen} i mocy odbieranej P_{odb} w dowolnym przedziale czasu Δt :

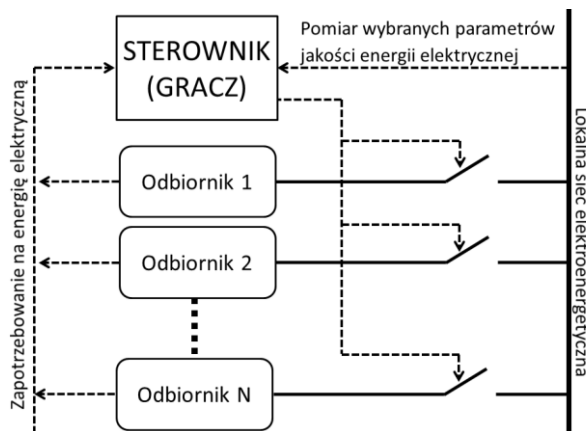
$$\int_{t \in \Delta t} P_{gen}(t) dt = \int_{t \in \Delta t} P_{odb}(t) dt \quad (1)$$

Dla uproszczenia i lepszej przejrzystości wzorów straty energii podczas przesyłu zostały pominięte. Rzeczywiste bilansowanie w warunkach pracy mikrosieci jest procesem dyskretnym. Stanowi to rezultat skokowych zmian obciążenia oraz

bezwładności regulatorów sterowalnych źródeł energii elektrycznej. Z powyższego wynika, że równość (1) można zapisać w postaci:

$$\sum_{i=0}^n P_{gen(i)}(\Delta t) = \sum_{j=0}^m P_{odb(j)}(\Delta t) \quad (2)$$

Naruszenie stanu równowagi $P_{gen} = P_{odb}$, spowodowane skokowymi zmianami obciążenia oraz dyskretnym procesem regulacji, powoduje zaburzenia polegające m.in. na zmianie częstotliwości oraz zniekształceniu prądów i napięć. Jest to cecha charakterystyczna dla systemów wyspowych, gdzie występuje ograniczona, niewielka liczba źródeł energii i niespotykany w innych przypadkach stosunek mocy pojedynczego odbiornika do źródła energii elektrycznej. Z powyższego powodu poziom zaburzeń parametrów energii elektrycznej w izolowanych systemach znacznie przekracza poziom zaburzeń w dużych, połączonych systemach elektroenergetycznych [Mindykowski 2004]. Cecha ta została wykorzystana do prognozowania stanu obciążenia sieci i podejmowania decyzji o załączeniu lub odłączeniu poszczególnych odbiorników. W celu wypracowania prawidłowej decyzji przez sterownik konieczne jest stałe monitorowanie parametrów energii elektrycznej oraz właściwa ich interpretacja.



Rys. 2. Uproszczony schemat architektury gałęzi mikrosieci

Fig. 2. Simplified scheme of the microgrid branch architecture

Kolejnym ważnym krokiem jest zaimplementowanie elementów sztucznej inteligencji, pozwalającej na przewidywanie zmian parametrów energii elektrycznej po załączeniu lub odłączeniu odbiorników o określonej mocy. W grze przeciw naturze biorą udział dwaj gracze: A – sterownik i B – natura jako gracz nieracjonalny, który sam nie jest zainteresowany wynikiem gry. Jako naturę można również potraktować zbiór graczy o nieznannej funkcji użyteczności, macierzy wypłat i zbiorze możliwych strategii. Z opisaną sytuacją mamy do czynienia w przypadku podejmowania decyzji odnośnie do bilansowania mocy przez autonomiczny sterownik, nieposiadający łączności z pozostałymi uczestnikami sieci.

Gracz A nie dysponuje informacjami o liczbie oraz mocy podłączonych źródeł energii elektrycznej, nie wie również, ile odbiorników i jakiej mocy podłączonych jest do sieci. W grze przeciwko naturze gracz musi podejmować decyzje jedynie na podstawie informacji o jej stanie i własnej macierzy wypłat. Do wstępnych badań, mających na celu potwierdzić lub zanegować przydatność teorii gier do bilansowania mocy, został wybrany algorytm oparty na kryterium Hurwicza [Hurwicz 1951], polegający na wyznaczaniu dla każdej strategii średniej ważonej W na podstawie zależności:

$$W = \alpha[\max] + (1 - \alpha)[\min] \quad (3)$$

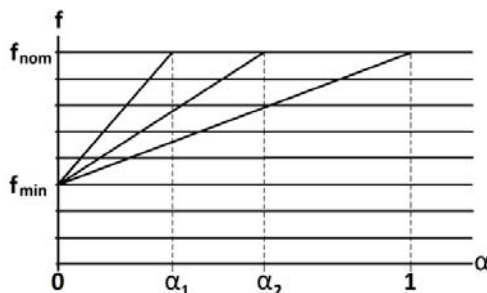
gdzie:

α ($0 \leq \alpha \leq 1$) – współczynnik optymizmu,

\max i \min – odpowiednio maksimum i minimum wiersza z macierzy wypłat [Straffin 2001].

W trakcie gry wybierana jest strategia, dla której średnia ważona W jest największa. Dla $\alpha \rightarrow 0$ kryterium Hurwicza pokrywa się z kryterium Walda [Wald 1951] i strategia gry jest skrajnie pesymistyczna, zakładająca najmniej korzystną sytuację dla gracza. Gdy $\alpha \rightarrow 1$, mamy do czynienia ze skrajnym optymizmem i założeniem, że zajdzie sytuacja najbardziej korzystna dla gracza. Jako parametr określający stan natury oraz podstawę do wyznaczenia współczynnika optymizmu α przyjęto częstotliwość sieci, gdy $f \rightarrow 50$ Hz, to $\alpha \rightarrow 1$.

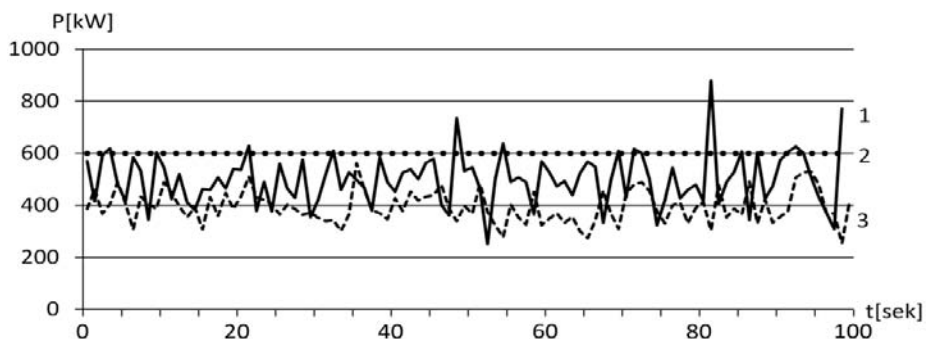
Bilansowanie mocy jest grą cykliczną o nieskończonym horyzoncie czasowym. Sygnałem do rozpoczęcia gry dla poszczególnych graczy jest wykrycie zmiany stanu natury (zmiana częstotliwości sieci) lub zgłoszenie przez odbiornik zmiany zapotrzebowania na energię elektryczną. Cykliczność gry pozwala na zaimplementowanie w algorytmie elementów sztucznej inteligencji. W badanym przykładzie współczynnik α obliczano z równania liniowego, w którym współczynnik kierunkowy wyznaczany był w procesie uczenia maszynowego pod nadzorem (rys. 3). Pozwoliło to na ograniczenie optymizmu sterownika, co skutkowało znacznie rzadszym przekraczaniem dopuszczalnego obciążenia zespołu prądotwórczego.



Rys. 3. Wyznaczanie współczynnika optymizmu α w procesie uczenia maszynowego

Fig. 3. Determination of the coefficient optimism α in the process of machine learning

Rysunek 4 przedstawia wykresy: 1 – zapotrzebowania na energię elektryczną odbiorników załączonych przez sterownik, wykorzystujący algorytm uwzględniający elementy teorii gier, 2 – mocy rezerwowego zespołu prądotwórczego, 3 – zapotrzebowania na energię elektryczną odbiorników I i II kategorii, otrzymane w wyniku przeprowadzenia 100 rozgrywek przez 10 graczy.



Rys. 4. Krzywa obciążenia symulowanej mikro sieci po rozegraniu 100 rozgrywek

Fig. 4. The load curve in the simulated microgrid after playing 100 games

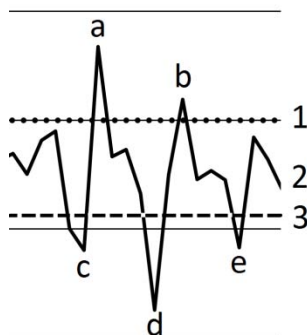
W wyniku przeprowadzonych obliczeń osiągnięto uśrednione obciążenie zespołu prądotwórczego o wartości równej 82,4%. Należy zauważyć, że w rozgrywkach numer 49, 82 i 100 obciążenie sieci w znaczący sposób przekroczyło dopuszczalne wartości. W rzeczywistych warunkach spowodowałyby to odłączenie zespołu prądotwórczego od sieci i utratę ciągłości zasilania.

Na powyższą sytuację składa się kilka przyczyn – pierwszą z nich jest niejednoznaczność wyników obliczeń, wykorzystujących regułę Hurwicza. Reguła ta bierze pod uwagę tylko maksymalną i minimalną wartość występującą w macierzy wypłat bez uwzględnienia rozkładu pozostałych wartości, co może prowadzić do rezultatów niezgodnych z oczekiwaniami i preferencjami gracza.

Kolejnym problemem mogącym wpływać na nieprawidłowe decyzje sterownika jest dobór współczynnika optyimizmu α . W trakcie obliczeń zaobserwowano, że nawet niewielkie zmiany wartości współczynnika α powodują istotne zmiany w wyborze strategii.

Ostatnią przyczyną, mogącą mieć największy wpływ na ewentualne błędy w wyborze strategii, jest „zbiorowy optymizm”. Stan ten został pokazany na rysunku 5, gdzie oznaczono przez: 1 – moc zespołu prądotwórczego, 2 – moc odbiorników załączonych przez sterownik, 3 – uśrednione zapotrzebowanie na energię elektryczną odbiorników I i II kategorii. Polega on na jednoczesnym, szybkim wzroście współczynnika α u dużej liczby graczy A (sterowników), co przekłada się na szybki wzrost obciążenia sieci. Konsekwencją takiego działania jest pogorszenie wskaźników jakości energii elektrycznej, prowadzące do roze-

grania kolejnej gry, w której mamy do czynienia ze „zbiorowym pesymizmem” i gwałtownym odciążeniem sieci. Takie decyzje graczy prowadzą do niekontrolowanego wzrostu oscylacji obciążenia i utraty stabilności systemu.



Rys. 5. Fragment wykresu obrazujący moment powstania „zbiorowego optymizmu”

Fig. 5. Part of the graph showing the birth of collective optimism

Punkty *a* i *b* wskazują moment „zbiorowego optymizmu” i przekroczenie dopuszczalnego obciążenia zespołu prądotwórczego, natomiast punkty *c*, *d* i *e* wskazują „zbiorowy pesymizm”, powodujący odłączenie od sieci priorytetowych odbiorników. Jednym z możliwych rozwiązań powyższego problemu może być wprowadzenie losowego opóźnienia reakcji graczy na zmianę stanu natury.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy rozważania pozwalają stwierdzić, że istnieje możliwość bilansowania, czyli znalezienia równowagi pomiędzy mocą generowaną i pobieraną, za pomocą algorytmu, wykorzystującego elementy teorii gier. Uzyskane rezultaty są o 17,3% lepsze od standardowego modelu odciążania sieci. Pozwala to na efektywniejsze zarówno z punktu widzenia technicznego, jak i ekonomicznego wykorzystanie źródeł energii elektrycznej. Zastosowane w obliczeniach kryterium Hurwicza w czystej postaci może prowadzić do błędnych i nieoczekiwanych wyników. W dalszych badaniach należy skupić się na rozwiązaniach hybrydowych, polegających na połączeniu kilku reguł gry wzajemnie się uzupełniających i kontrolujących wybór strategii. Duży nacisk należy położyć również na implementację w programie elementów uczenia maszynowego. Stałe obserwowanie natury, sieci energetycznej i zmian jej parametrów może pozwolić na obliczenie prawdopodobieństw wystąpienia określonych stanów.

LITERATURA

- Amini, S., 2015, *Dynamic Load Altering Attacks in Smart Grid*, Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), IEEE Power & Energy Society.
- Gellings, C., 2011, *Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid*, Electric Power Research Institute USA.
- Hurwicz, L., 1951, *Optimality Criteria for Decision Making under Ignorance*, Statistics, no. 370.
- Mindykowski, J., 2004, *Dlaczego problem jakości energii elektrycznej w systemach okrętowych zasługuje na szczególną uwagę?* „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 6.
- Parol, M., 2013, *Mikrosieci niskiego napięcia*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Straffin, P.D., 2001, *Teoria gier*, Wydawnictwo Naukowe SCHOLAR, Warszawa.
- Wald, A., Wofowitz, J., 1951, *Two Methods of Randomization in Statistics and Theory of Games*, Annals of Mathematics, vol. 53, s. 581–586.