

dr inż. Mirosław Popławski
Zakład Logistyki
Instytut Zarządzania i Marketingu
Politechniki Białostockiej

PRZEGLĄD ZASTOSOWAŃ ZBIORÓW ROZMYTYCH W ELEKTROENERGETYCE

Układy elektroenergetyczne stanowią liczne zbiory elementów o zróżnicowanych wartościach parametrach technicznych i niejednorodnej strukturze. Zasadnicze znaczenie przy analizie tych układów ma dostępność i wiarygodność danych pomiarowych oraz danych związanych z aktualną konfiguracją elektroenergetycznych sieci zasilających. W artykule przedstawiono przykłady zastosowań teorii zbiorów rozmytych do rozwiązywania problemów decyzyjnych i obliczeniowych, występujących w systemach elektroenergetycznych.

1. WPROWADZENIE

Elektroenergetyczne układy zasilające i rozdzielcze są strukturami o dużej liczbie elementów składowych, na pracę których mogą mieć wpływ różne nieprzewidziane wydarzenia i sytuacje. W niektórych przypadkach próbuje się te niejasności i niejednoznaczności opisać za pomocą reguł probabilistycznych. Takie postępowanie prowadzi jednak często do popełniania dużych błędów przy obliczeniach lub podejmowania błędnych decyzji. Jest to częściowo spowodowane tym, że niektóre wielkości i parametry mają prawdziwie rozmytą naturę i trudno jest w takiej sytuacji stosować kategorie i metody statystyki matematycznej [10, 29].

Największą trudność przy rozwiązywaniu problemów występujących w rzeczywistych układach elektroenergetycznych stanowi zgromadzenie a następnie efektywne wykorzystanie danych wejściowych o parametrach technicznych i obciążeniach poszczególnych elementów rozpatrywanego układu. Nowe możliwości przy rozwiązywaniu tych problemów stwarza zastosowanie teorii zbiorów rozmytych [2, 3, 11, 16, 26, 30, 31,].

W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie zastosowaniem TEJ do rozwiązywania różnorodnych problemów występujących w układach elektroenergetycznych, co znalazło wyraz w licznych publikacjach na ten temat [1, 4, 6, 14, 15, 22, 32, 36, 41, 47]. Uzyskane dotąd rezultaty stosowania tej metody są obiecujące, lecz teoria zbiorów rozmytych nie jest jeszcze powszechnie akceptowana. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest często niezrozumienie koncepcji oraz nadmierne oczekiwania co do wyników i obszaru stosowalności metody. Brak jest również opracowanych i łatwo dostępnych programów. Wskazuje się potrzebę zwracania większej uwagi na konieczność dokładnego zrozumienia podstawowych zasad teorii zbiorów rozmytych oraz określenie zakresu zadań, których rozwiązanie możliwe jest przy jej użyciu [12, 18, 23, 27].

Przy wykorzystaniu teorii zbiorów rozmytych do rozwiązywania praktycznych problemów algorytm postępowania składa się z reguły z następujących kroków [28]:

1. Opis problemu wyjściowego. Problem do rozwiązania należy najpierw określić słownie i, jeśli to możliwe, matematycznie.
2. Zdefiniowanie dla wszystkich zmiennych progów charakteryzujących je pod względem akceptowalności przyjmowanej wartości. Dla każdej zmiennej rozmytej istnieje pewna specyficzna wartość, określona przy użyciu wiedzy empirycznej, przy której stopień satysfakcji decydenta jest największy. Możliwe jest odchylenie od tej wartości kosztem zmniejszenia stopnia satysfakcji aż do wartości całkowicie nieakceptowalnej. Te dwie wartości, odpowiadające maksymalnemu i minimalnemu stopniowi satysfakcji, nazywane są progami zmiennej rozmytej.
3. Kwantyzacja rozmyta. W oparciu o progi określone w pkt. 2 tworzy się odpowiednie rodzaje funkcji przynależności. Istnieje wiele różnych funkcji przynależności. Najczęściej stosuje się trójkątną, trapezową lub paraboliczną postać tej funkcji. Kształt funkcji przynależności powinien odzwierciedlać zmiany w stopniu satysfakcji decydenta przy zmianach wartości rozpatrywanych zmiennych rozmytych.
4. Selekcja reguł i operacji rozmytych przyjętych do analizy. Z praktycznego punktu widzenia dobór operacji rozmytych powinien być przeprowadzony w taki sposób, aby uzyskane wyniki i ich interpretacja zgadzały się z wiedzą i intuicją ekspertów. Najczęściej stosuje się reguły analizy rozmytej zdefiniowane przez L. A. Zadeha [46].

Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych obejmuje wiele dziedzin, w których występują problemy niepewnych danych, niejednoznacznie sformułowanych celów projektowych lub optymalizacji decyzji w procesach sterowania. Dzięki właściwościom zbiorów rozmytych możliwe jest częściowe wyeliminowanie tych trudności.

W przypadku analizy układów elektroenergetycznych często zachodzi potrzeba rozwiązania problemu związanego z dwoma lub więcej konfliktowymi celami. Do takich celów można zaliczyć: ekonomię przesyłu energii elektrycznej i odpowiednio wysoki poziom bezpieczeństwa, wzrost zużycia energii elektrycznej i minimalizacja kosztów jej wytwarzania, rozbudowę systemu elektroenergetycznego i ograniczenie do minimum wpływu inwestycji energetycznych na środowisko naturalne. Zastosowanie reguł analizy rozmytej w takim przypadku zapewnia uzyskanie rozwiązań w postaci alternatyw dla wielu atrybutów wybranych celów oraz pozwala przeanalizować istniejące cele konfliktowe projektując dla każdego z nich odpowiednie wagi [33, 34].

2. PRZEGLĄD ZASTOSOWAŃ W ELEKTROENERGETYCE

Obecne zastosowania teorii zbiorów rozmytych w elektroenergetyce skupiają się głównie na tematyce systemów ekspertowych, układów regulacji i sterowania oraz planowania rozwoju sieci elektroenergetycznych [28].

Systemy ekspertowe mogą być wykorzystane do tworzenia bazy reguł umożliwiających optymalne planowanie rozwoju systemu elektroenergetycznego [8,24] oraz projektowania układów zasilających [25].

W pracach [17, 31, 47] zaprezentowano zastosowanie wielkości i reguł analizy rozmytej do szacowania i predykcji obciążeń w węzłach-punktach odbioru. Powstałe na bazie teorii zbiorów rozmytych modele estymacji obciążeń służą zarówno do prowadzenia obliczeń w sieciach elektroenergetycznych, jak i do wspomagania procesów decyzyjnych związanych ze sterowaniem pracą systemów elektroenergetycznych oraz planowaniem ich rozwoju.

Praca [11] opisuje proces projektowania struktury elektroenergetycznej sieci rozdzielczej. Wielkością wynikową do dalszych analiz jest oszacowanie niezbędnej liczby stacji transformatorowych. Algorytm działania opiera się w tym przypadku na przedstawieniu danych wejściowych, takich, jak liczba odbiorców, charakterystyka rodzaju odbiorców, średnie zapotrzebowanie na energię elektryczną, obszar zasilania, w postaci wielkości rozmytych. Następnie, przy zastosowaniu reguł rozmytych, określa się optymalne usytuowanie oraz liczbę stacji transformatorowych, niezbędnych do efektywnego zrealizowania dostaw energii elektrycznej do rozpatrywanego obszaru.

Logika rozmyta znalazła również swoje zastosowanie w układach sterowania wzbudzeniem maszyn synchronicznych [14] oraz przy analizie stabilności i niezawodności pracy generatora [38]. Analiza oparta na teorii zbiorów rozmytych umożliwia przedstawianie stanów pracy generatorów jako zmiennych lingwistycznych.

W artykule [5] przedstawiono interaktywną wieloobiekтовую metodę optymalnego planowania przepływu mocy biernej w systemie elektroenergetycznym. Jako czynniki optymalizowane wykorzystuje się ekonomiczne warunki eksploatacji, margines bezpieczeństwa systemu oraz odchylenie napięcia. Są one reprezentowane w postaci liczb rozmytych. Podobne zagadnienia, dotyczące kontroli poziomu napięcia, poruszane są w pracach [41,42,43].

Artykuł [28] prezentuje m.in. osiągnięcia w dziedzinie prac nad stabilizatorami rozmytymi układów elektroenergetycznych. Stabilizatory te zapewniają zmniejszenie niepożądanych oscylacji w pracy układu, powstałych np. na skutek zakłóceń lub przerw w zasilaniu. Elementami takich stabilizatorów są regulatory oparte na regułach analizy rozmytej. Zaletą regulatorów rozmytych jest ich interpolacyjna natura zasad kontroli, w wyniku czego wymagają one mniej reguł niezbędnych do prawidłowego działania, niż regulatory oparte na wiedzy empirycznej.

Wykorzystanie rozmytej estymacji obciążeń do optymalizacji procesu przywrócenia zasilania w sieci rozdzielczej przedstawiono w [21]. Obciążenia opisuje się za pomocą zmiennych lingwistycznych (bardzo duże, duże, średnie, itp.), które są reprezentowane przez liczby rozmyte. Algorytm rozwiązania problemu polega na zlokalizowaniu miejsca uszkodzenia i izolacji obszaru zasilanego z tego punktu. Następnie szacuje się obciążenie w punkcie rozgałęzienia. Po stwierdzeniu, czy uszkodzeniu uległo rozgałęzienie, czy linia zasilająca, przeprowadza się próby wznowienia zasilania. Przedstawiona metoda została zweryfikowana we fragmencie rzeczywistego systemu elektroenergetycznego Tajwanu.

Z wielu innych zastosowań teorii zbiorów rozmytych w elektroenergetyce należy wspomnieć o wykorzystaniu jej do analizy niezawodności układów w ogólnej praktyce inżynierskiej [4], analizy niezawodności pracy sieci rozdzielczych [37], estymacji strat energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych nn [35] oraz realizacji modułu decyzyjnego w cyfrowych zabezpieczeniach elektroenergetycznych [15].

3. PODSUMOWANIE

Teoria zbiorów rozmytych traktowana jako narzędzie do analizy układów elektroenergetycznych jest bardzo pożytecznym uzupełnieniem konwencjonalnych metod i reguł matematycznych. Jej zaletą jest zapewnienie spójności pomiędzy danymi wejściowymi, z reguły niedokładnymi i niepewnymi, oraz wielkościami wynikowymi, przedstawianymi w postaci rozmytej, a więc odpowiadającymi rzeczywistości. Ta koherentność wejść i wyjść świadczy o przydatności tej teorii do analizy układów elektroenergetycznych w warunkach ograniczonego dostępu do danych pomiarowych i wiedzy o parametrach i obciążeniach poszczególnych elementów systemu elektro-

energetycznego. Zastosowanie reguł analizy rozmytej w wielu przypadkach umożliwia skonkretyzowanie istniejących problemów i zadań oraz w znaczny sposób zwiększa efektywność prowadzonych obliczeń [7, 37, 44, 45]. Rezultaty badań nad zastosowaniem tej teorii w wielu dziedzinach nauki i techniki pozwalają przypuszczać, że dzięki swym możliwościom do modelowania niepewności i niedokładności danych wejściowych oraz opisu zależności między nimi będzie ona powiększała zakres swoich zastosowań.

LITERATURA

- [1] Adams R.N., Kagan N.: *Electrical Power Distribution Systems Planning Using Fuzzy Mathematical Programming*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 16, No 3, 1994.
- [2] Bandemer H., Gottwald S.: *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Methods with Applications*. John Wiley and Sons, 1995.
- [3] Bonissone P.P., Badami V., Chiang K.H., Khedkar P.S., Marcelle K.W., Schutten M.J.: *Industrial Applications of Fuzzy Logic and General Electric*. Proceedings of the IEEE, Vol. 83, No. 3, March 1995.
- [4] Bowles J.B., Pelaez C.E.: *Applications of Fuzzy Logic to Reliability Engineering*. Proceedings of the IEEE, Vol. 83, No. 3, March 1995.
- [5] Chen Y.-L., Liu C.-C.: *Interactive Fuzzy Satisfying Method for Optimal Multi-Objective VAR Planning in Power Systems*. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 141, No. 6, November 1994.
- [6] Chow M.Y., Tram H.N.: *Application of Fuzzy Logic Technology for Spatial Load Forecasting*. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 12, No. 3, August 1997.
- [7] Dash P.K., Liew A.C.: *Anticipatory Fuzzy Control of Power Systems*. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 142, No. 2, March 1995.
- [8] David A.K., Rongda Z.: *An Expert System with Fuzzy Sets for Optimal Planning*. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 6, No. 1, February 1991.
- [9] Dubois D., Prade H.: *Operations on fuzzy numbers*. Int. J.Syst.Sci., Vol. 9, 1978.
- [10] Ghosh A.K., Lubkeman D.L., Jones R.H.: *Load Modeling for Distribution Circuit State Estimation*. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, April 1997.
- [11] Herlender K., Styczyński Z.: *Projektowanie struktur sieci elektroenergetycznych z wykorzystaniem reguł rozmytych*. III Sympozjum „Metody Matematyczne w Elektroenergetyce” Zakopane, listopad 1993.
- [12] Kacprzyk J.: *Wieloetapowe podejmowanie decyzji w warunkach rozmytości*. PWN, Warszawa, 1983.
- [13] Kacprzyk J.: *Zbiory rozmyte w analizie systemowej*. PWN, Warszawa, 1986.
- [14] Kasztenny B.: *Sterowanie wzbudzeniem generatora synchronicznego w stanach awaryjnych z zastosowaniem regulatora rozmytego*. VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, Gliwice-Kozubnik, 16-17 września 1993.
- [15] Kasztenny B.: *Rachunek zbiorów rozmytych w części decyzyjnej cyfrowego zabezpieczenia elektroenergetycznego*. III Sympozjum „Metody Matematyczne w Elektroenergetyce” Zakopane, 10-12 listopada 1993.

- [16] Kauhaniemi K.: *Fuzzy Models and Techniques for the Calculation of Radial Distribution Networks*. Proceedings of Joint International Power Conference Athens Power Tech, IEEE/NTUA, Athens, Greece, 5-8 September, 1993.
- [17] Kenarangui R., Seifi A.: *Fuzzy Power Flow Analysis*. Electric Power Systems Research, No. 29, 1994.
- [18] Kim E., Park M., Ji S., Park M.: *A New Approach to Fuzzy Modeling*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 5, No. 3, August 1997.
- [19] Kosko B.: *Neural Networks and Fuzzy Systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 1992.
- [20] Kujarczyk Sz., Nazarko J., Charytoniuk W., Broadwater R.P.: *The Effect of Expert Evaluations on the Deficiency of Decision Processes in Power Distribution Systems*. Joint International Power Conference Athens Power Tech, IEEE/NTUA, Athens, Greece, September 5-8, 1993.
- [21] Kuo H.-C., Hsu Y.-Y.: *Distribution System Load Estimation and Service Restoration Using a Fuzzy Set Approach*. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, October 1993.
- [22] Liang R.-H., Hsu Y.-Y.: *Fuzzy Linear Programming: an Application to Hydroelectric generation scheduling*. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 141, No. 6, November 1994.
- [23] Lygeros J.: *A Formal Approach to Fuzzy Modeling*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 5, No. 3, August 1997.
- [24] Manusov V.Z., Petrushev S.B.: *Applying Technique of Fuzzy Sets in Expert Systems*. VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, Gliwice-Kozubnik, 16-17 września 1993.
- [25] Mendel J.M.: *Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial*. Proceedings of the IEEE, Vol. 83, No. 3, March 1995.
- [26] Miranda V., Pereira J., Saraiva J.T.: *Experience in State Estimation Models for Distribution Systems Including Fuzzy Measures*. Stockholm Power Tech, International Conference on Electric Power Engineering, Royal Institute of Technology and IEEE Power Engineering Society, Stockholm, Sweden, June 18-22, 1995.
- [27] Miranda V., Saraiva J.T.: *Impacts in Power System Modelling from Including Fuzzy Concepts in Models*. Joint International Power Conference Athens Power Tech, IEEE/NTUA, Athens, Greece, September 5-8, 1993.
- [28] Momoh J.A., Ma X.W., Tomsovic K.: *Overview and Literature Survey of Fuzzy Set Theory in Power Systems*. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995.
- [29] Nazarko J.: *Modeling of Electrical Power Distribution Systems*. Białystok Technical University Publisher, Białystok, 1993.
- [30] Nazarko J., Pełto N., Popławski M.: *Obliczanie strat energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych nn w ujęciu teorii zbiorów rozmytych*. Materiały Ogólnopolskiego Sympozjum „Systemy ekspertowe, sieci neuronowe i zbiory rozmyte w elektroenergetyce” NEF'95, Białystok-Supraśl, 18-19 października 1995.
- [31] Nazarko J., Zalewski W.: *An Application of the Fuzzy Sets Theory to Power Distribution Systems Calculations*. Archiwum Energetyki, tom XXV, nr 1-2, 1996.
- [32] Nazarko J., Popławski M., Zalewski W.: *Możliwości zastosowań teorii zbiorów rozmytych w elektroenergetyce*. Materiały VII Ogólnopolskiego Konwersatorium CIR'94 „Sztuczna inteligencja i

cybernetyka rozwoju”, Siedlce, 19-20 września 1994.

- [33] Nazarko J., Zalewski W.: *Koncepcja zastosowania teorii zbiorów rozmytych do obliczeń elektroenergetycznych sieci rozdzielczych*. Materiały VII Międzynarodowej Konferencji „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, Gdańsk, 12-14 czerwca 1995.
- [34] Nazarko J., Zalewski W.: *The Application of Fuzzy Sets Theory to Power Distribution Systems Calculations*. International AMSE Symposium „Systems Analysis, Control & Design” SYS’95, Brno, Czech Republic, July 3-5, 1995.
- [35] Popławski M.: *Estymacja strat energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych niskiego napięcia*. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1998.
- [36] Ross T.J.: *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. McGraw-Hill, Inc. 1995.
- [37] Seitz Th., Haubrich H.H., Montebaur A.: *Reliability Analysis of Distribution Networks with Local Generation Using Fuzzy Sets*. Joint International Power Conference Athens Power Tech, IEEE/NTUA, Athens, Greece, September 5-8, 1993.
- [38] Sobieszczański S.: *Informatyczny system obliczeń sieci śn i nn ORS*. Energetyka, Nr 3, 1989.
- [39] Souflis J.L., Machias A.V., Papadias B.C.: *An Application of Fuzzy Concepts to Transient Stability Evaluation*. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 4. No. 3, August 1989.
- [40] Szydłowski H.: *Teoria pomiarów*. PWN, Warszawa, 1981.
- [41] Tomsovic K.: *A Fuzzy Linear Programming Approach to the Reactive Power/Voltage Control Problem*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, February 1992.
- [42] Tso S.K., Zhu T.X., Zeng Q.Y., Lo K.L.: *Fuzzy Set Approach to Dynamic Voltage Security Assessment*. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 142, No. 2, March 1995.
- [43] Tso S.K., Zhu T.X., Zeng Q.Y., Lo K.L.: *Fuzzy Reasoning for Knowledge-Based Assessment of Dynamic Voltage Security*. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 143, No. 2, March 1996.
- [44] Yager R.R., Filev D.P.: *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*. WNT, Warszawa, 1995.
- [45] Yen J., Langari R., Zadeh L.A.: *Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*. IEEE Press, NY 1995.
- [46] Zadeh L.A.: *Fuzzy sets*. Information and Control, No. 8, 1965
- [47] Zalewski M.W.: *Modelowanie obciążeń szczytowych miejskich stacji transformatorowych SN/nn z wykorzystaniem teorii zbiorów rozmytych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1997.