

## OPTIMALIZACJA POZIOMÓW NAPIĘĆ I ROZPŁYWÓW MOCY BIERNEJ W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM Z WYKORZYSTANIEM LOGIKI ROZMYTEJ – REFERAT KONFERENCYJNY

Jacek KLUCZNIK<sup>1</sup>, Krzysztof DOBRZYŃSKI<sup>2</sup>, Zbigniew LUBOŚNY<sup>3</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel: 58 347 17 98 fax: 58 347 18 98 e-mail: j.klucznik@ely.pg.gda.pl
2. Miejsce pracy  
tel: 58 347 17 98 fax: 58 347 18 98 e-mail: k.dobrzynski@ely.pg.gda.pl
3. Miejsce pracy  
tel: 58 347 20 98 fax: 58 347 18 98 e-mail: z.lubosny@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** Referat prezentuje zagadnienia związane ze sterowaniem poziomami napięć w systemie elektroenergetycznym. Rozważane jest autorska metoda optymalizacji rozptywu mocy biernej, prowadząca do poprawy warunków napięciowych w systemie elektroenergetycznym i ograniczenia strat mocy czynnej. Opracowana metoda optymalizacyjna bazuje na procedurze opartej o logikę rozmytą, wspomaganą algorytmem gradientowym. Metoda została zaimplementowana w programie PLANS i poddana weryfikacji.

**Słowa kluczowe:** logika rozmyta, optymalizacja, system elektroenergetyczny.

### 1. WSTĘP

Optymalizacja rozptyłów mocy w systemie elektroenergetycznym, u której podstaw leży dobór odpowiednich poziomów napięć w węzłach wytwórczych i wynikające z nich poziomy napięcia w węzłach wytwórczych oraz generacja mocy biernej w węzłach wytwórczych są reprezentowane przez stosunkową wąską grupę publikacji. Publikacje dotyczące w/w problematyki cechuje fakt, że metoda zbiorów rozmytych stanowi dodatek, narzędzie oceny stanu pracy systemu dla właściwego algorytmu optymalizacji. Nie napotkano w literaturze metody optymalizacji wykorzystującej wprost zbiory rozmyte w procesie poszukiwania najlepszego rozwiązania problemu. W publikacjach spotyka się tandem: logika rozmyta i algorytm optymalizacyjny, gdzie wskaźniki oparte o zbiory rozmyte do służą ocenie stanu systemu uzyskanego w wyniku optymalizacji, dając przesłanki do kolejnego kroku optymalizacji.

Niniejszy referat podejmuje tematykę wykorzystania zbiorów rozmytych w celu optymalizacji napięć w systemie elektroenergetycznym. Postawionym przez autorów celem optymalizacji jest uzyskanie właściwych poziomów napięć w węzłach systemu oraz ograniczenie strat mocy czynnej. Jednocześnie zaproponowana metoda musi być możliwa do zaimplementowania w komercyjnych programach służących do obliczeń poziomów napięć i rozptyłów mocy.

### 2. ALGORYTM DZIAŁANIA PROPONOWANEJ METODY ZBIORÓW ROZMYTYCH

Proponowana metoda optymalizacji napięć i generacji mocy biernej opiera się o wykorzystanie logiki rozmytej. Jednakże same mechanizmy logiki rozmytej nie są wystarczające do przeprowadzenia efektywnego procesu optymalizacji. Dlatego zaproponowano algorytm, w którym funkcje logiki rozmytej wykorzystywane są do oceny uzyskiwanych wyników, a metoda poszukiwania optymalnego rozwiązania bazuje na procedurach z grupy algorytmów gradientowych. Taka kombinacja logiki rozmytej i algorytmu gradientowego daje możliwość implementacji w standardowych programach rozptylowych do analiz systemów elektroenergetycznych, jak np. program PLANS.

W metodzie optymalizacja jest wykonywana według trzech zasadniczych kryteriów o różnych priorytetach, które ogólnie mogą być określone jako:

1. Doprowadzić w systemie do stanu, w którym napięcia we wszystkich węzłach będą zawierać się w dopuszczalnym przedziale, pomiędzy wartościami granicznymi właściwymi dla danego węzła.
2. Jeżeli punkt 1 jest spełniony doprowadzić do stanu, w którym praca systemu elektroenergetycznego odbywa się przy minimum strat mocy czynnej.
3. Jeżeli nie możliwe jest zapewnienie właściwych poziomów napięć we wszystkich węzłach systemu doprowadzić do stanu, w którym napięcia węzłów zagrożonych będą najbardziej zbliżone do wartości granicznych.

Aby spełnić powyższe cele optymalizacji konieczna jest ocena poziomów napięć i wartości strat mocy w sieci oraz ocena wpływu sterowania generatorami (w zakresie generacji mocy biernej) i transformatorami (w zakresie zmiany przekładni) na zmienność napięć i strat mocy. Do przeprowadzenia tej oceny wykorzystano wskaźniki bazujące na logice rozmytej.

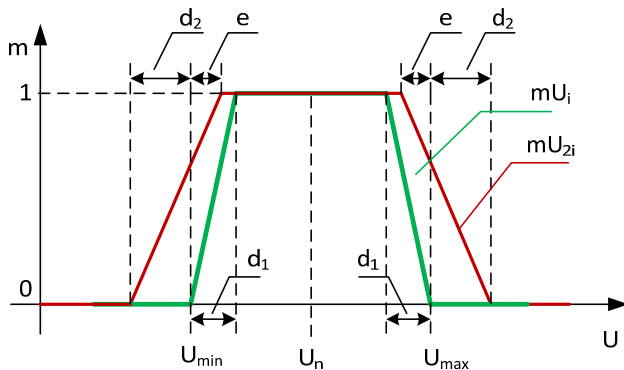
Podstawowym wskaźnikiem zaproponowanym do oceny napięcia w dowolnym  $i$ -tym węzle jest wskaźnik  $mU_i$ , definiowany zgodnie z rysunkiem 1 (kolor zielony). Wskaź-

nik ten przyjmuje wartość 1 jeżeli napięcie w  $i$ -tym węzle jest w dopuszczalnych granicach, z przyjętym zapasem  $d_1$ , tj.  $U_{\min i}(1+d_1) \leq U_i \leq U_{\max i}(1-d_1)$ . Dla wartości napięcia  $U_i \leq U_{\min i} \cup U_i \geq U_{\max i}$  wskaźnik przyjmuje wartości 0, zaś dla pozostałych napięć wartość z zakresu  $0 \div 1$ , zgodnie z rysunkiem 1.

Dla analizowanego systemu wprowadza się globalny wskaźnik  $mU$  będący iloczynem wskaźników dla poszczególnych węzłów:

$$mU = \prod_{i=1}^n mU_i \quad (1)$$

gdzie  $n$  jest liczbą węzłów systemu podlegających optymalizacji.



Rys. 1. Kształt funkcji przynależności napięć węzłowych

Powyższy wskaźnik, przy założeniu małej wartości współczynnika  $d_1$  (przyjęto wartość 1%) daje wyraźną informację o jakości napięć w systemie. Wartość  $mU$  równa 1 oznacza właściwe poziomy napięcia we wszystkich  $n$  węzłach systemu. Wartość równa 0 oznacza, że w dowolnym węzle panuje niewłaściwe napięcie. Z kolei wartość z zakresu  $0 \div 1$  mówi, że napięcie w przynajmniej jednym węzle jest zbliżone do wartości granicznych.

Jednak, jeżeli w analizowanym systemie obserwuje się w stanie początkowym, przy rozpoczęciu optymalizacji,

wartości napięć wykraczające poza dopuszczalne granice zmienności napięć wskaźnik  $mU$  (przyjmujący wówczas wartość zero) staje się niemiernodajny, nie dający informacji w jakim kierunku podążać, aby uzyskać właściwe poziomy napięcia. Dlatego konieczne jest wprowadzenie drugiego wskaźnika napięcia, także opartego o logikę rozmytą. Kształt funkcji przynależności oznaczonej jako  $mU_{2i}$  definiowany jest podobnie jak wskaźnika  $mU_i$ , ale inny jest obszar, w którym wskaźnik przyjmuje niezerowe wartości. Kształt wskaźnika oraz wielkości, które go definiują, przedstawiono na rysunku 1 kolorem czerwonym.

W algorytmie optymalizacyjnym, którego wyniki działania prezentowane są w niniejszym referacie, przyjęto wartości współczynników:

- $d_2 = 10\%$  – zakładając, że jeżeli napięcia odbiegają więcej niż 10% od wartości granicznych to algorytm optymalizacyjny nie jest rozpoczynany i konieczna jest interwencja użytkownika w celu wprowadzenie niezbędnych korekt w systemie.
- $e = 0,25\%$  – aby uzyskać „zakładkę” pomiędzy funkcjami przynależności potrzebną ze względu na wykorzystywany algorytm optymalizacji.

Do globalnej oceny systemu w zakresie zbyt dużych i zbyt małych napięć stosowany jest wskaźnik mówiący o „odległości” napięcia wszystkich węzłów od wartości granicznej. Ma on następującą postać:

$$mU_2 = \sum_{i=1}^n (mU_{2i} - 1)^2 \quad (2)$$

Wartość wskaźnika  $mU_2$  wynosząca zero świadczy o tym, że napięcia we wszystkich analizowanych węzłach są poprawne, tj.  $U_i > U_{\min i} \cap U_i < U_{\max i}$

Ostatnim wskaźnikiem wykorzystywanym w optymalizacji jest wartość start mocy czynnej (oznaczana dalej jako  $P_{\text{loss}}$ ). Wartość ta nie podlega fuzyfikacji i wykorzystywana jest w algorytmie optymalizacji bez dalszych przekształceń.

Tabela 1. Wskaźniki optymalizacji metody zbiorów rozmytych ( $n_{\text{gen}}$  – liczba węzłów wytwórczych podlegających optymalizacji,  $n_{\text{tran}}$  – liczba transformatorów podlegających optymalizacji,  $\Delta U$  – przyrost napięcia zadanego generatora,  $\Delta \vartheta$  – przyrost przekładni zadanej transformatora).

Wstępna optymalizacja napięć	Zasadnicza optymalizacja napięć	Optymalizacja strat mocy czynnej
$[mU_2] = \begin{bmatrix} f(U_{\text{zad}1} \pm \Delta U) \\ \dots \\ f(U_{\text{zad}n_{\text{gen}}} \pm \Delta U) \\ f(\vartheta_{\text{zad}1} \pm \Delta \vartheta) \\ \dots \\ f(\vartheta_{\text{zad}n_{\text{tran}}} \pm \Delta \vartheta) \end{bmatrix}$	$[mU] = \begin{bmatrix} f(U_{\text{zad}1} \pm \Delta U) \\ \dots \\ f(U_{\text{zad}n_{\text{gen}}} \pm \Delta U) \\ f(\vartheta_{\text{zad}1} \pm \Delta \vartheta) \\ \dots \\ f(\vartheta_{\text{zad}n_{\text{tran}}} \pm \Delta \vartheta) \end{bmatrix}$	$[P_{\text{loss}}] = \begin{bmatrix} f(U_{\text{zad}1} \pm \Delta U) \\ \dots \\ f(U_{\text{zad}n_{\text{gen}}} \pm \Delta U) \\ f(\vartheta_{\text{zad}1} \pm \Delta \vartheta) \\ \dots \\ f(\vartheta_{\text{zad}n_{\text{tran}}} \pm \Delta \vartheta) \end{bmatrix}$
Kryterium optymalizacji		
min( $mU_2$ )	max( $mU$ )	min( $P_{\text{loss}}$ )

Algorytm optymalizacji opiera się o ocenę kierunku zmian wskaźników, które wynikają ze zmian napięcia zadane w węzłach wytwórczych oraz ze zmian przekładni transformatorów. Dla każdego kroku optymalizacji poszukuje się wartości wskaźników ( $mU$ ,  $mU_2$  i  $P_{\text{loss}}$ ) przy zmianach napięć zadanych kolejnych generatorów ( $U_{\text{zad } i}$ ) i przekładni kolejnych transformatorów ( $\vartheta_{\text{zad } i}$ ). W zależności od obliczonego wskaźnika różnie definiowane jest kryterium optymalizacji. Sposoby obliczania wskaźników, oraz kryteria optymalizacji zestawiono w tabeli 1.

Przy wstępnej optymalizacji napięć oblicza się wskaźniki  $mU_2$ , a następnie spośród zbioru wskaźników wybierana jest **minimalna** wartość wskaźnika  $mU_2$  wskazująca, w którym generatorze lub transformatorze, i w jakim kierunku (zwiększyć lub zmniejszyć) należy zmienić wartość zadaną.

Z kolei przy zasadniczej optymalizacji napięć oblicza się wskaźniki  $mU$ , a następnie spośród zbioru wskaźników wybierana jest **maksymalna** wartość wskaźnika  $mU$  wskazująca, w którym generatorze lub transformatorze, należy zmienić wartość zadaną.

Wreszcie przy optymalizacji strat mocy czynnej oblicza się wskaźniki  $P_{\text{loss}}$ , a następnie spośród zbioru strat mocy czynnej wybierana jest **minimalna** wartość strat  $P_{\text{loss}}$  wskazująca, w którym generatorze lub transformatorze, należy zmienić wartość zadaną.

### 3. WERYFIKACJA DZIAŁANIA METODY

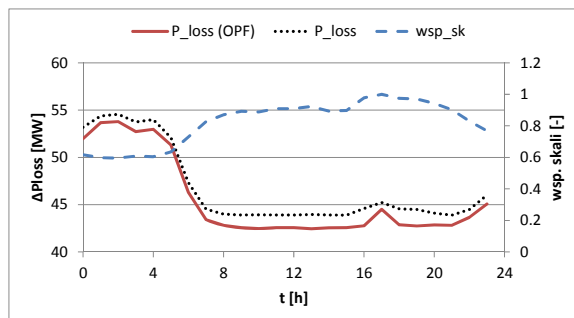
Zaprezentowany algorytm optymalizacji poziomów napięć i rozpyłów mocy biernej został zaimplementowany w programie PLANS z wykorzystaniem języka makropoleczeń, a następnie poddany badaniom na testowym systemie 28 węzłowym.

Założono, że analizowany jest stan, w którym system podlega dobowym zmianom obciążenia, podobnym jak ma to miejsce w KSE. Prezentowane wyniki obejmują więc okres 24h, w którym w każdej godzinie występuje inne zapotrzebowanie na moc. W analizach zakłada się, że obciążenie wszystkich węzłów odbiorczych zmienia się (co do mocy czynnej i biernej) zgodnie z przyjętym współczynnikiem skali w zakresie  $0,6 \div 1,0$ .

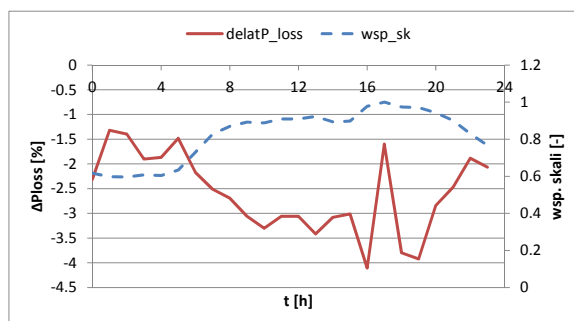
Na rysunku 2 przedstawiono przebieg zmienności wartości strat mocy czynnej w ciągu doby, w testowym systemie elektroenergetycznym. Na wykresach porównano wartości strat dla stanu wyjściowego, tj. stanu wynikającego z zadanych napięć i mocy generowanych w węzłach wytwórczych oraz przyjętych obciążeń, ze stanem będącym wynikiem działania algorytmu optymalizującego. Wyniki oznaczane jako (OPF) donoszą się do stanu, gdzie wartości napięć w węzłach wytwórczych (i tym samym generacja mocy biernej przez jednostki wytwórcze) oraz wartości przekładni transformatorów zostały ustalone na drodze optymalizacji. Dla wygodniejszej oceny efektywności metody na rysunku 3 przedstawiono względną różnicę pomiędzy stratami mocy w systemie bez optymalizacji i po dokonaniu optymalizacji proponowaną metodą.

Na kolejnych rysunkach (rys. 4 i 5) przedstawiono wyjściowe oraz uzyskane w wyniku optymalizacji wartości napięcia w węzłach wytwórczych i dwóch wybranych węzłach odbiorczych. Dla uproszczenia analizy otrzymanych wyników w referacie prezentowane są jedynie wyniki dla dwóch wybranych węzłów odbiorczych – tych, w których

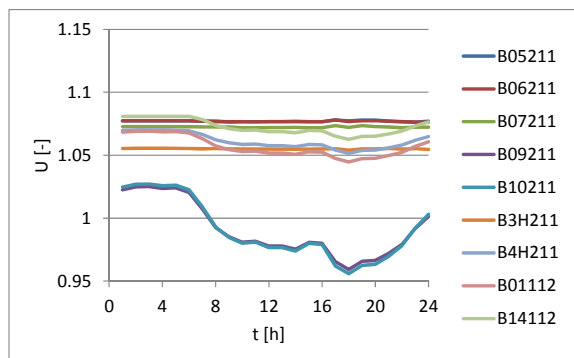
obserwuje się najniższe poziomy napięcia. Są to węzły B09211 i B10211.



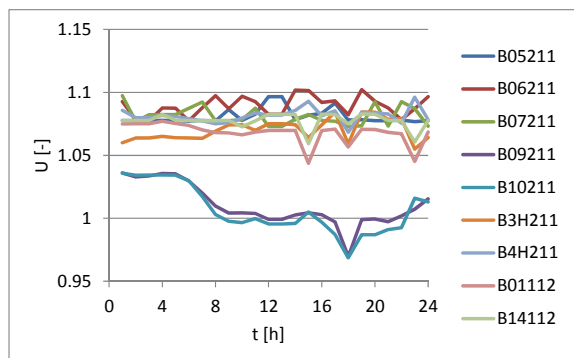
Rys. 2. Zmienność dobowa - straty mocy czynnej przed i po optymalizacji.



Rys. 3. Zmienność dobowa - względne straty mocy czynnej po optymalizacji.



Rys. 4. Zmienność dobowa napięć wybranych węzłów przed optymalizacją



Rys. 5. Zmienność dobowa napięć wybranych węzłów po optymalizacji

Uzyskane wyniki wskazują, że przyjęty algorytm optymalizacji jest w stanie zmniejszyć straty mocy czynnej

w badanym systemie od wartości 1,5% do 4% względem strat w systemie nie poddanym optymalizacji, a jednocześnie poprawie ulegają profile napięcia w węzłach odbiorczych. Zmniejszenie strat uzyskiwane jest poprzez ustalenie optymalnych wartości napięć w węzłach wytwórczych, generalnie wyższych niż w wariancie gdy system nie podlega optymalizacji.

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

W wyniku wykonanych badań można ocenić przydatność zaproponowanego algorytmu do sterowania poziomami napięć i rozpyłkami mocy biernej w systemie. Oceniając działanie algorytmu można sformułować następujące wnioski.

- Dzięki zaproponowanej metodzie możliwe jest ograniczenie strat mocy czynnej w zakresie dochodzącym do około 5%.
- Jeżeli w wyniku optymalizacji uzyskuje się w pewnych przypadkach zwiększenie strat mocy czynnej, to stan uznany za optymalny zawsze charakteryzuje się poziomami napięć spełniających ograniczenia dopuszczalnych poziomów w węzłach lub jest do niego możliwie najbardziej zbliżony.
- Zastosowana metoda optymalizacji charakteryzuje się algorytmem możliwym do implementacji w dowolnym komercyjnym programie obliczającym rozpyły mocy i poziomy napięć.
- Zastosowana metoda jest wrażliwa na punkt startowy, gdyż jako metoda z rodziny gradientowych ma tendencję do znajdowania lokalnych ekstremów nieliniowej funkcji celu rozpiętej na  $n$  wymiarowej płaszczyźnie sterowania jednostkami wytwórczymi i transformatorami.
- Jako punkty startowe dla metody zalecane są wyższe poziomy napięcia, wówczas algorytm optymalizacyjny ma większe szanse na znalezienie stanu zbliżonego do optymalnego.
- Zaproponowana metoda jest w stanie przeprowadzić proces optymalizacji napięć również wówczas, gdy w stanie początkowym napięcia pojedynczego węzła lub wielu węzłów wychodzą poza przedział dopuszczalnych napięć w węzłach.
- Proponowana metoda charakteryzuje się umiarkowaną szybkością działania, co nie wyklucza możliwości wykorzystania jej do optymalizacji dużych systemów elektroenergetycznych. Szybkość działania metody obniża się, jeżeli poziomy napięć w węzłach drastycznie odbiegają od przedziału dopuszczalnych napięć.

- Zastosowanie funkcji celu opartych o zbiory rozmyte pozwala dość łatwo rozbudować metodę o nowe ograniczenia – np. ustalenie zapasu mocy biernej dla źródeł wytwórczych, ocenę obciążenia elementów systemu, czy inne.
- Zaproponowane rozmyte wskaźniki oceny stanu systemu elektroenergetycznego mogą być stosowane z innymi metodami optymalizacyjnymi, np. genetycznymi, które są bardziej odporne na wykrywanie lokalnych ekstremów.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Bansal, R.C., Bibliography on the fuzzy set theory applications in power systems (1994-2001), Power Systems, IEEE Transactions on, vol.18, no.4, pp.1291-1299, Nov. 2003
2. Momoh J. A., Tomsovic K.: Overview and literature survey of fuzzy set theory in power systems, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995.
3. Zajczyk R., Lubośny Z., Klucznik J., Kowalak R., Małkowski R., Dobrzyński K., Zbroński A.: Optymalizacja gospodarki mocą bierną w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym, Umowa zawarta w dniu 20.06.2011 roku, w Poznaniu pomiędzy: Polskim Towarzystwem Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej a Politechniką Wrocławską.
4. Ameli, M.T., Shokri, V., Shokri, S., Using Fuzzy Logic & Full Search for Distributed generation allocation to reduce losses and improve voltage profile, Computer Information Systems and Industrial Management Applications (CISIM), 2010 International Conference on , vol., no., pp.626-630, 8-10 Oct. 2010
5. Eremia M., Simon P., Petricica D., Gheorghiu D.: Some Aspects of Hierarchical Voltage – Reactive Power Control, IEEE 2001.
6. J. Wood and B. F. Wollenberg, Power Generation Operation and Control, New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 1996, pp. 39,517.
7. Kujszczyk S., Brociek S., Flisowski Z., Gryko J., Nazarko J., Zdun Z.: Elektroenergetyczne układy przesyłowe, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
8. X. Lin, A. K. David and C. W. Yu, "Reactive power optimization with voltage stability consideration in power market systems", IEE proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 150, no. 3, pp. 305-310, May 2003.

### VOLTAGE AND REACTIVE POWER LOAD FLOW OPTIMISATION IN THE POWER SYSTEM USING FUZZY LOGIC– CONFERENCE PAPER

**Key-words:** fuzzy sets, optimisation, electric power system

The paper presents the issues related to the voltage levels control in the power system. An authors' method of optimization of reactive power flow, leading to the improvement of the voltages in the power system and reducing active power losses is considered. The method is based on the process optimization using fuzzy logic, supported by a gradient search algorithm. The method has been implemented and verified on PLANS software.