

Optymalizacja kosztów bilansowania systemu elektroenergetycznego przy wykorzystaniu metod heurystycznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wynik zastosowania metod heurystycznych do rozwiązania zadania SCOPF optymalizującego koszty bilansowania mocy w systemie elektroenergetycznym. Aczkolwiek zasadniczym elementem procesu obliczeniowego jest wielokrotne powtarzanie rozwiązanie układu równań rozpliwowych SEE to jednak dzięki odpowiedniemu wykorzystaniu korzystnych właściwości metod heurystycznych cały proces obliczeniowy wykazuje dobrą zbieżność i powtarzalność wyznaczonego stanu optymalnego.

Abstract. The paper presents results of the heuristic methods application to solve the SCOPF task that optimizes power balancing costs in the electric power system. Although the principal element of the calculation process is multiple iteration of the power flow equation system solution, owing to the apt application of the heuristic method the whole calculation process exhibits good convergence and repeatability of the determined optimal state. (*Optimization the electric power system balancing costs using heuristic methods*).

Słowa kluczowe: koszty bilansowania systemu elektroenergetycznego, heurystyka, optymalizacja.

Keywords: power system balancing costs, heuristic, optimization.

doi:10.12915/pe.2014.03.07

Wstęp

Historia optymalizacji w systemie elektroenergetycznym, zarówno na etapie sterownia jego pracą jak i na etapie planowania rozwoju jest prawie równie długa jak historia rozwiązywania zadania rozpliwowego. Początkowo jednak jej istota polegała na poszukiwaniu takiego rozdziału wytwarzanej w systemie mocy na pracujące zespoły wytwórcze, aby sumaryczny koszt wytwarzania był minimalny. Problem ten wiązał się z minimalizacją funkcji celu, którą była suma kosztów wytwarzania i był określony jako zagadnienie ERO (Ekonomiczny Rozdział Obciążeń). Pełna optymalizacja (kosztowa lub inna) danego stanu pracy systemu elektroenergetycznego ma jednak miejsce dopiero wtedy, gdy uwzględnione zostaną w sposób pełny warunki pracy sieci przesyłowej i związane z nimi ograniczenia.

Za funkcję celu przyjęto taką funkcję, która określa koszty bilansowania zapotrzebowania, przy czym ograniczeniami równościowymi są równania bilansu mocy czynnej i biernej w węzłach, a ograniczeniami nierównościowymi są dopuszczalne zakresy parametrów pracy SEE (napięć, prądów, przekładni transformatorów, kątów). Oprócz wskazanych wyżej ograniczeń, w zadaniu OPF można również bezpośrednio uwzględnić ograniczenia związane z bezpieczeństwem systemu w stanach awaryjnych (*Security Constrained OPF*). Rozwiązanie tak określonego zadania optymalizacyjnego jest trudne z uwagi na nieliniowy charakter układu równań opisujących węzłowy bilans mocy systemu.

W artykule przedstawiono wynik zastosowania metody symulowanego wyżarzania oraz roju cząstek do rozwiązania zadania SCOPF minimalizującego koszty bilansowania zapotrzebowania mocy w systemie elektroenergetycznym i w konsekwencji do wyznaczenia ceny węzłowej.

Za istotne osiągnięcie zaproponowanego rozwiązania autorzy uważają praktyczne zastosowanie metod należących do grupy metod optymalizacji heurystycznej, których korzystne właściwości numeryczne pozwoliły na rozwiązanie jednego z trudniejszych zadań obliczeniowych elektroenergetyki.

Założenia do obliczeń

Problem minimalizacji kosztów bilansowania systemu elektroenergetycznego rozwiązano jako nieliniowe zadanie

optymalizacyjne. Pełna optymalizacja danego stanu pracy systemu elektroenergetycznego ma jednak miejsce dopiero wtedy, gdy uwzględnione zostaną w sposób pełny warunki pracy sieci przesyłowej i związane z nimi ograniczenia [1], [3], [5].

Wprowadzając następujące oznaczenia trzech wektorów - stanu - zawierającego w sobie moduły napięć węzłowych U i ich argumenty δ

$$(1) \quad x = \begin{bmatrix} U \\ \delta \end{bmatrix}$$

który spełnia równania sieci uwzględniające wektor wymuszeń w (moce odbierane w węzłach)

$$(2) \quad w = \begin{bmatrix} P_L \\ Q_L \end{bmatrix}$$

oraz wektor sterowań s (moce generowane w węzłach)

$$(3) \quad s = \begin{bmatrix} P_G \\ Q_G \end{bmatrix}$$

można zadanie optymalizacyjne (zwane w tym przypadku zadaniem OPF – Optimal Power Flow) zapisane w postaci ogólnej

$$(4) \quad F_c(x, w, s) \rightarrow \min$$

przy ograniczeniach równościowych

$$(5) \quad g(x, w, s) = 0$$

i nierównościowych

$$(6) \quad h(x, w, s) \geq 0$$

Chcąc wyznaczyć minimalne koszty bilansowania SEE, funkcja celu zadania OPF powinna być określona następująco

$$(7) \quad F_c(s) = \sum_{j=1}^{N_c} c_{Gj} \cdot P_{Gj}$$

gdzie P_{Gj} – moc czynna generowana przez źródło przyłączone do węzła j , c_{Gj} – cena energii generowanej przez źródło przyłączone do węzła j .

Jak widać funkcja celu zawiera w sobie proste sumowanie elementów wektora sterowań odpowiadających rozpatrywanym węzłom sieci (ich liczba jest określona jako N_z). Oczywiście jest, że elementami wektora sterowań pozostają moce wszystkich pracujących w nim źródeł. Szczegółowa postać ograniczeń równościowych i nierównościowych wynika z zapisów i formuł klasycznego zadania rozpyłowego. Do ograniczeń zaliczyć należy:

- Ograniczenie nierównościowe wynikające z minimum technicznego systemu;
- Ograniczenie nierównościowe wynikające z dopuszczalnych mocy gałęziowych;
- Ograniczenie nierównościowe wynikające z dopuszczalnego salda wymiany zagranicznej;
- Ograniczenie nierównościowe wynikające z dopuszczalnych wartości napięć w węzłach sieciowych;
- Ograniczenie równościowe wynikające z bilansu mocy czynnej i biernej wytwarzanej oraz pobieranej;
- Ograniczenie wynikające z uwzględnienia kryterium N-1 (Zadanie OPF uwzględniające kryterium N-1 zalicza się do kategorii SCOPF (Security Constrained OPF).)

Mając wyznaczony koszt bilansowania zapotrzebowania SEE można pokusić się o wyznaczenie krótkookresowych cen węzłowych w poszczególnych węzłach sieci.

Zgodnie z definicją, krótkookresowa cena węzłowa oznaczana jako LMP (ang. *Locational Marginal Price*), wyraża się wzorem [6]

$$(8) \quad LMP_j = \frac{\partial K(P_G)}{\partial P_{Lj}}$$

gdzie: $\partial K(P_G)$ – minimalna zmiana kosztu bilansowania zapotrzebowania SEE, ∂P_{Lj} – zmiana mocy odbieranej w węzle j .

Klasyczna metoda rozwiązywania zadań optymalizacyjnych, przy założeniu, że funkcja celu jest wypukła w dół i różniczkowalna oraz obszar ograniczeń równościowych i nierównościowych jest wypukły, wynika z twierdzenia Kuhna-Tuckera [7]. Zgodnie z tym twierdzeniem minimum warunkowe funkcji celu w obszarze ograniczeń równościowych i nierównościowych występuje w tym samym punkcie co punkt siodłowy funkcji Lagrange'a

$$(9) \quad L(s, x, \lambda, \mu) = F_c(s, x) + \sum_{i=1}^p \lambda_i g_i(s, x) + \sum_{j=1}^m \mu_j h_j(s, x)$$

gdzie :

λ – p-elementowy wektor mnożników Lagrange'a, μ - m-elementowy wektor mnożników Kuhna-Tuckera.

Zatem cena węzłowa może być wyznaczona z zależności [6]

$$(10) \quad LMP_j = \frac{\partial L(s, x, \lambda, \mu)}{\partial P_{Lj}} = \lambda_j$$

Do rozwiązania niniejszego zagadnienia można stosować różne metody optymalizacji nieliniowej, jednak wymiar zadania utrudnia uzyskanie efektu dobrej i pewnej zbieżności procesu obliczeniowego. Sytuację utrudnia dodatkowo konieczność uwzględniania stanów N-1.

Trudności obliczeniowe, na które natrafili także autorzy niniejszego artykułu, podejmując próby stworzenia odpowiedniego oprogramowania, skłoniły ich do poszukiwania kolejnych rozwiązań alternatywnych w zakresie rozwiązania zadania OPF.

Opis metody obliczeniowej

Wobec stwierdzonych w ramach prowadzonych badań oraz potwierdzonych w wielu publikacjach trudności z szybkim uzyskaniem rozwiązania zadań typu OPF i SCOPF metodami zbliżonymi do klasycznych, skupiono uwagę na możliwości wykorzystania alternatywnych metod rozwiązywania problemów optymalizacji nieliniowej, której podstawą jest heurystyka. Metody heurystyczne nie wymagają znajomości postaci pochodnej funkcji celu, są odporne na nieciągłości tej funkcji oraz na „utknięcie” procesu obliczeniowego w lokalnym minimum. Są to metody uniwersalne, mogące być używane do obliczeń z dowolną funkcją celu [1].

W niniejszym artykule zastosowana została metoda symulowanego wyżarzania oraz roju cząstek.

Symulowane Wyżarzanie [2,5] opiera się na analogii do procesu technologicznego zwanego wyżarzaniem, który polega na nagraniu pewnej ilości stali do wysokiej temperatury, a następnie na powolnym jej schładzaniu (przechodzeniu do coraz niższego stanu energetycznego). Realizacja procesu optymalizacji przy wykorzystaniu metody symulowanego wyżarzania polega na losowym wyborze punktów z otoczenia punktu startowego, a następnie na znalezieniu takiego punktu, w którym funkcja celu przyjmuje najmniejszą wartość. Następnie następuje „obniżenie temperatury” i proces zaczyna się od nowa. Warunkiem zakończenia algorytmu jest uzyskanie temperatury mniejszej od zadanej. Ogólnie można powiedzieć, że o efektywności omawianego algorytmu decyduje w dużej mierze bardzo dobra znajomość badanego zagadnienia i w efekcie przyjęcie odpowiednich założeń co do wartości parametrów sterujących.

Ważną różnicą pomiędzy pierwotnymi metodami iteracyjnymi, a algorytmem symulowanego wyżarzania jest możliwość wyboru przez niego gorszego rozwiązania. Wybór taki jest dokonywany z pewnym prawdopodobieństwem. Dzięki temu algorytm symulowanego wyżarzania może w określonych warunkach wyjść ze znalezionej minimum lokalnego i dalej podążać w kierunku rozwiązania optymalnego. Symulowane wyżarzanie może rozwiązywać problemy silnie nieliniowo zależne. W związku z dobrym rozwiązywaniem problemów nieuporządkowanych, chaotycznych, metoda ta dużo szybciej zbiega do optymalnego rozwiązania niż inne metody heurystyczne. Algorytm jest uniwersalny, ponieważ nie jest powiązany ze szczególnymi właściwościami danego problemu – jest od niego silnie niezależny. Dzięki tej własności, może być łatwo wykorzystany do rozwiązania innego zadania.

Optymalizacja rojem cząstek [2,5] bazuje na zjawisku zwanym „zachowaniem stada”. Każdy „uczestnik stada” przyczynia się do jego zachowania. Informacje zdobyte przez jednego osobnika rozprzestrzeniają się na całe stado. Algorytm polega na losowym wygenerowaniu określonej liczby osobników (punktów), które ewoluują w kolejnych iteracjach, aż do momentu znalezienia minimum. Przenosząc ich zachowania na grunt matematyczny zakłada się, że pojedyncza cząsteczka stanowi punkt, a właściwie wektor składający się ze zmiennych niezależnych, których „położenie” i „prędkość”, w kolejnych iteracjach, są odpowiednio modyfikowane aż do spełnienia warunku stopu i uzyskania optymalnego rozwiązania. [2]. Algorytm ten świetnie nadaje się do minimalizacji funkcji o dowolnym wymiarze. Dzięki dwóm odmianom algorytmu (globalnej i lokalnej) jest możliwość sterowania procesem przeszukiwania na podstawie osiągnięć lokalnych lub globalnych, albo uwzględnienie obu równocześnie, a więc wykorzystanie pełnej informacji.

Algorytm roju cząstek, podobnie jak symulowane wyżarzanie, może rozwiązywać problemy silnie nieliniowo zależne i jest uniwersalny. Wymaga stosunkowo niewielkiej liczby parametrów sterujących procesem obliczeniowym. Często jeden zestaw parametrów może być wykorzystany do rozwiązania wielu problemów.

Do wyznaczania rozpyłów mocy użyto system obliczeniowy PowerWorld wersja 13.

Do realizacji zadania optymalizacyjnego wykorzystano natomiast środowisko Matlaba, w którym został napisany skrypt pozwalający wielokrotnie i bardzo szybko łączyć się z „silnikiem” SimAuto programu PowerWorld oraz wywołujący algorytm symulowanego wyżarzania i roju cząstek.

Ponieważ za pomocą metod heurystycznych operuje się, w trakcie obliczeń, konkretnymi wartościami funkcji celu w punkcie, toteż, w niniejszym artykule, krótkookresową cenę węzłową w wybranym węźle sieci wyznaczano jako iloraz różnicy minimalnych kosztów bilansowania i różnicy wartości mocy pobieranej w tymże węźle. Założono, że wartość tej różnicy wynosi 5 MW. Czyli obliczenia polegały na określeniu dwóch stanów optymalnych i odniesieniu

różnicy kosztów bilansowania SEE do zmiany mocy pobieranej w wybranym węźle, według zależności

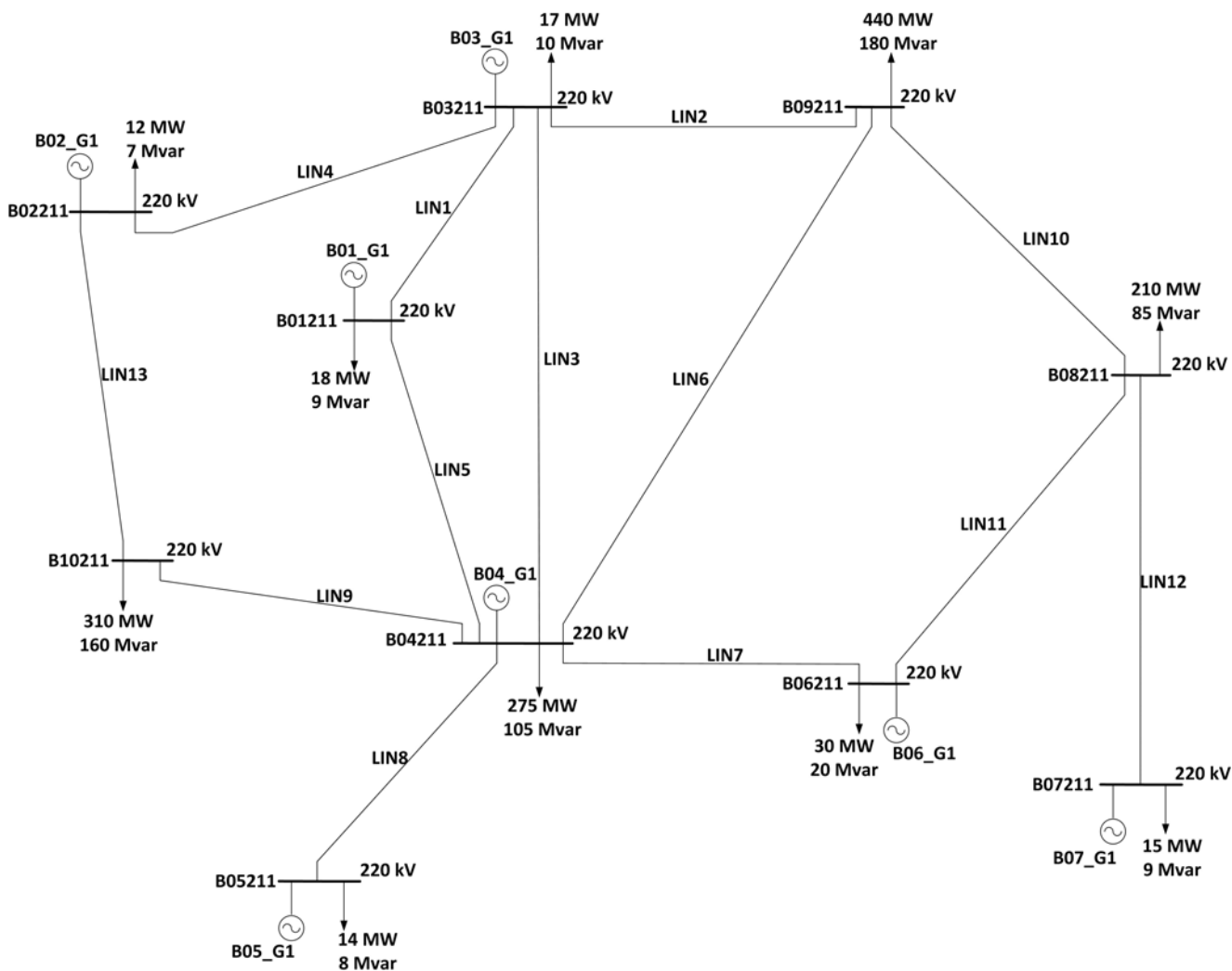
$$(11) \quad LMP_j = \frac{\Delta K(P_G)}{\Delta P_{L_j}}$$

Jest to oczywiście pewne uproszczenie, ale kompensowane tym, że w przypadku metod heurystycznych można prowadzić obliczenia na modelu zmiennoprądowym niezależnie od wymiaru zagadnienia (metody klasyczne trudno jest zastosować w przypadku dużych sieci). Wadą jest czas uzyskania rozwiązania.

Opis sieci testowej

Do obliczeń użyta została sieć testowa opracowana przez grupę roboczą CIGRE (Rys. 1).

Sieć składa się z 10 węzłów, 13 gałęzi, 10 odbiorów, 7 źródeł (w tym jedno źródło przyłączone jest do węzła bilansującego).



Rys.1. Schemat sieci testowej CIGRE

Założenia dla sieci testowej CIGRE do obliczeń optymalizacyjnych

Do obliczeń optymalizacyjnych założono sześć zmiennych podlegających optymalizacji. Przyjęto, że będą nimi wartości mocy czynnych zadawane w węzłach wytwórczych. Siódme źródło – przyłączone do węzła

bilansującego – nie podlega optymalizacji z uwagi na jego funkcję w obliczeniach rozpyłów mocy. Moc czynna generowana w nim uwzględniana jest jednak w funkcji celu, tak aby nie było ono uprzywilejowane.

Tabela 1. Lista źródeł, w których zadawana jest wartość mocy czynnej (węzeł bilansujący pogrubiono) – stan bazowy

Lp	Nazwa generatora	Moc mini małna	Moc maksy małna	Moc gene rowana	Koszt Przypadek 1	Koszt Przypadek 2
-	-	P_{min} [MW]	P_{max} [MW]	P_{gen} [MW]	c [zł/MWh]	c [zł/MWh]
1	B01_211	100	800	100	145	150
2	B02_211	100	800	100	140	150
3	B03_211	100	800	210	160	150
4	B04_211	100	1000	295,83	160	150
5	B05_211	100	800	210	140	150
6	B06_211	100	800	300	150	150
7	B07_211	100	800	150	155	150

Wyniki obliczeń uzyskane metodą roju cząstek

Stan bazowy sieci testowej CIGRE charakteryzował się brakiem przekroczeń prądowych i napięciowych. Zapotrzebowanie na moc czynną wynosiło 1342 MW. Straty mocy czynnej w tym stanie wynosiły 24,44 MW. Sumaryczna moc czynna generowana wynosiła 1365,83 MW. Sieć testowa została poddana następnie obliczeniom optymalizacyjnym pod kątem minimalizacji kosztów bilansowania zapotrzebowania mocy SEE oraz wyznaczenia cen węzłowych. Obliczenia wykonano dla dwóch przypadków. Pierwszy z nich polegał na założeniu o różnych cenach ofertowych energii elektrycznej. W drugim przypadku założono, że ceny energii we wszystkich źródłach są równe 150 zł/MWh. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2 i 3. Kolorem czarnym podano wyniki uzyskane za pomocą metody symulowanego wyżarzania natomiast kolorem czerwonym - metodą roju cząstek.

Tabela 2. Lista źródeł, w których zadawana jest wartość mocy czynnej (węzeł bilansujący pogrubiono) – stan optymalny

Lp	Nazwa generatora	Moc generowana, [MW]	
		Przypadek 1	Przypadek 2
-	-	Koszty różne	Koszty równe
1	B01_211	150,9/ 100	100,318/ 100
2	B02_211	425,13/ 429,34	162,046/ 141,536
3	B03_211	100/ 100	149,424/ 143,754
4	B04_211	100/100	491,98/518,114
5	B05_211	286,8/ 331,85	100,408/ 100
6	B06_211	208,08/ 214,49	213,958/ 209,695
7	B07_211	102,43/ 100	143,43/ 148,491
Suma		1373,39/ 1375,67	1361,564/ 1361,59
Koszt bilansowania zł		200810,2/ 200823,4	204234,6/ 204238,5

Tabela 3. Lista węzłów, wraz z ich cenami węzłowymi

Lp	Nazwa węzła	Cena węzłowa, [zł/MWh]	
		Przypadek 1	Przypadek 2
-	-	Koszty różne	Koszty równe
1	B01211	145,6/ 143	150/ 150
2	B02211	140/ 140	150/ 150
3	B03211	146,9/ 144,3	150/ 150
4	B04211	146,8/144,2	150/150
5	B05211	140/ 140	150/ 150
6	B06211	151,8/ 149,2	150/ 150
7	B07211	151,6/ 149	150/ 150
8	B08211	154,8/ 152,1	153,95/ 155,4
9	B09211	188,5/ 185,8	158/ 157,2
10	B10211	150,5/ 147,9	154,14/ 153,3

W pierwszym przypadku największa moc generowana jest przez źródło o najmniejszej cenie energii, lecz prowadzi to do powiększenia strat mocy, w stosunku do stanu bazowego. W drugim przypadku, przy jednakowych cenach energii, algorytm stara się minimalizować straty mocy, które uległy zmniejszeniu w stosunku do stanu bazowego. Charakterystyczne jest również to, że w przypadku odbiorców przyłączonych do tych samych szyn co wytwórca, w przypadku różnych cen energii, opłaca się im niekiedy kupować energię od tańszego źródła przyłączonego w innym miejscu niż dany odbiorca. W przypadku jednakowych cen bardziej opłaca się kupować energię od źródła przyłączonego najbliższej odbiorcy.

Podsumowanie

Minimalizacja kosztów bilansowania zapotrzebowania systemu elektroenergetycznego i wyznaczenie cen węzłowych jest to zagadnienie, które łączy w sobie zadanie OPF z niezawodnością funkcjonowania SEE (SCOPF). O ile wykonywanie obliczeń dla małych sieci nie jest zadaniem trudnym to w przypadku dużych systemów konieczne staje się wykorzystywanie algorytmów mających solidne podstawy matematyczne i charakteryzujących się wysoką skutecznością. Ważne jest również aby obliczenia były dokładne, nie obciążone błędami przyjętych założeń upraszczających, np. linearyzacja zadania rozpyłowego. Dlatego też warto stosować metody heurystyczne, które takich założeń nie wymagają. Obciążone jest to dłuższym czasem uzyskania wyniku, ale kompensowane dokładnością działania (obliczenia prowadzone są na modelu zmiennoprądowym).

LITERATURA

- [1] Kacejko P., Inżynieria elektryczna i informatyczna w nowych technologiach elektroenergetycznych. Lublin 2011
- [2] Michalewicz Z., Fogel D. B. Jak to rozwiązać czyli nowoczesna heurystyka. WNT, Warszawa 2006.
- [3] Kacejko P., Pijarski P., Ocena możliwości przyłączeniowych krajowej sieci przesyłowej planowanej na lata 2020-2025 w kontekście prawdopodobnych scenariuszy budowy nowych jednostek wytwórczych. Rynek Energii – 2013, nr 2 (105), vol. 105, s.42-47.
- [4] Kacejko P., Pijarski P., Możliwości podziału kosztów modernizacji na jednostki wytwórcze ubiegające się o przyłączenie. Przegląd Elektrotechniczny - 2012, NR 9a, vol. 88, s. 27-31.
- [5] Trojanowski K. Metaheurystyki praktycznie. Warszawa 2005.
- [6] Korab R. Optymalizacja operatorstwa przesyłowego w krajowym systemie elektroenergetycznym. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- [7] Amborski K. Podstawy metod optymalizacji. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2009.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko, Politechnika Lubelska, Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: p.kacejko@pollub.pl; dr inż. Paweł Pijarski, Politechnika Lubelska, Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, e-mail: p.pijarski@pollub.pl, uczestnik projektu "Kwalifikacje dla rynku pracy - Politechnika Lubelska przyjazna dla pracodawcy" współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.