

Możliwości optymalizacji konfiguracji rozległych sieci dystrybucyjnych SN i nN

Streszczenie. W artykule przedstawiono różne metody optymalizacji konfiguracji sieci oparte na danych pozyskanych z systemów GIS (między innymi wykorzystując algorytmy genetyczne). Podano wyniki obliczeń dla rzeczywistych, dużych fragmentów sieci rozdzielczych. W obliczeniach uwzględniono zarówno sieć dystrybucyjną SN jak też nN. Przeanalizowano uzyskane wyniki ze szczególnym uwzględnieniem czasów obliczeń oraz sformułowano wnioski, dotyczące między innymi możliwości wykorzystania danych pomiarowych z systemów AMI.

Abstract. Different methods for optimal network reconfiguration (heuristic algorithm, genetic algorithm), based on network data from GIS systems are presented in this paper. Calculation results for actual distribution MV and LV network are given. Results were analyzed taking into account calculations time. **(Possibilities of Optimal Distribution MV and LV Network Reconfiguration).**

Słowa kluczowe: rozdzielcze sieci elektroenergetyczne, optymalizacja konfiguracji sieci, system informatyczny.

Keywords: distribution power networks, optimal network reconfiguration, computer system.

doi:10.12915/pe.2014.09.30

Wstęp

Rozdzielcza sieć elektroenergetyczna jest najbardziej kosztownym składnikiem systemu elektroenergetycznego biorąc pod uwagę wolumen traconej energii elektrycznej. W 2010 roku straty energii w sieci dystrybucyjnej wynosiły 7857 GWh [1], co stanowi 65,7% całkowitych strat w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym. W tabeli 1 podano rozdział strat na poszczególne poziomy napięcie w ramach sieci dystrybucyjnych.

Tabela 1. Straty energii, sieć dystrybucyjna, 2010r. (na podstawie [1])

	Straty energii	Straty energii	Roczna emisja CO ₂
	[GWh]	[%]	[t]
Sieć SN i nN	7857	100,0%	6992,7
Sieć SN	3566	45,4%	3173,7
Sieć nN	4290	54,6%	3818,0

Do oszacowania wielkości rocznej emisji CO₂ przyjęto wskaźnik 0,89 kg CO₂/1 kWh. Taka wartość jest proponowana do szacowania efektów ekologicznych w konkursie ISE ogłoszonym przez NFOŚiGW.

Na podstawie powyższego zestawienia można stwierdzić, iż nieco większe straty występują w sieciach niskich napięć. Natomiast w tabeli 2 podano wielkości procentowe strat w stosunku do energii wprowadzonej do sieci na danym poziomie napięcia.

Tabela 2. Wskaźnik strat i różnic bilansowych, sieć dystrybucyjna, 2010r. [1]

	Sieć SN i nN	Sieć SN	Sieć nN
Wskaźnik strat i różnic bilansowych	7,63%	3,47%	7,32%

Zmniejszenie strat o 5% (z poziomu 7,63% do ok. 7,25%) wydaje się całkowicie możliwe z technicznego punktu widzenia. Oznaczałoby to roczne oszczędności w sieciach dystrybucyjnych na poziomie 392 GWh – czyli 78,9 mln PLN (przyjmując średnią cenę sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym w 2012r. czyli 201,36 PLN [2]). Uniknięto by także emisji 350 ton CO₂ w skali kraju. Podane szacunki wskazują jednoznacznie na

konieczność ograniczania strat w sieciach dystrybucyjnych, przy czym najefektywniejsze (pod względem ekonomicznym) będzie wykorzystanie metod bezinwestycyjnych (nie powiększających majątku sieciowego). Do takich metod zalicza się optymalizację konfiguracji sieci.

Sieci dystrybucyjne budowane są jako sieci zamknięte (choć z dużym udziałem magistrali promieniowych nie połączonych w pętle) natomiast pracują w układach otwartych. Celem optymalizacji konfiguracji sieci dystrybucyjnej jest określenie operacyjnej struktury typu drzewo minimalizującej straty energii w normalnych warunkach pracy. Można rozpatrywać również inne funkcje celu, jak np. zredukowanie przeciążeń czy poprawa profili napięciowych linii zasilających, lecz zazwyczaj minimalizacja strat energii daje również optymalne wyniki w odniesieniu do innych kryteriów.

Metody programowania matematycznego mogące być stosowane do optymalizacji konfiguracji charakteryzują się długim czasem działania, w związku z tym nadają się do wykorzystania w zadaniach o niezbyt dużej liczbie węzłów sieciowych. W praktycznych zastosowaniach w rozwiązywaniu zadania optymalizacji konfiguracji sieci rozdzielczych dominującą rolę odgrywają specjalistyczne algorytmy heurystyczne. Algorytm rozpyłowy [3] można zakwalifikować do grupy algorytmów „zachłannych”, niemniej jest bardzo prosty i szybki w zastosowaniu. W algorytmach wymiany gałęzi dokonuje się włączenia do optymalizowanej sieci jednej z wyłączonych w stanie normalnym gałęzi, czego efektem jest powstanie pętli - w takiej pętli poszukuje się jednej z gałęzi do wyłączenia. Przykłady algorytmów wymiany gałęzi przedstawiono w [4,5]. Do rozwiązania zadania stosuje się również algorytmy symulowanego wyżarzania [6,7], algorytmy genetyczne [8, 9, 10], przeszukiwanie harmoniczne [11], algorytmy rojowe [12] i inne [13].

Sformułowanie problemu

Problem optymalizacji konfiguracji sieci rozdzielczej formułuje się różnie w zależności od zastosowanej metody rozwiązywania zadania. W literaturze znaleźć można między innymi minimalizację różnicy przepływów i przepustowości w liniach zasilających analizowaną sieć promieniową [14]. Ogólnie zadanie optymalizacji konfiguracji sieci rozdzielczych sformułować można następująco:

Należy ustalić optymalne miejsca rozcięć (otwarte łączniki) w sieci rozdzielczej SN i nN tak, by zminimalizować całkowite koszty strat mocy i energii elektrycznej w przyjętym okresie optymalizacji przy spełnieniu wymaganych ograniczeń.

Zbiór ograniczeń podzielono na dwie grupy:

1. Ograniczenia dotyczące układu sieci
 - a. Zachowanie typu układu (zapewnienie zasilania w energię elektryczną wszystkich odbiorców, nie dopuszczenie do dwustronnego zasilania żadnego odbiorcy)
 - b. Zachowanie zbioru łuków wyłączonych arbitralnie
2. Ograniczenia techniczne
 - a. Zachowanie dopuszczalnych spadków napięć
 - b. Nieprzeciążenie żadnego z elementów sieci

Zachowanie typu układu (sieć promieniowa) praktycznie zrealizowano w sposób następujący:

1. Liczbę pętli w sieci wyznacza się jako:

$$(1) \quad N_{LOOPS} = N_{ARC} - (N_{NODE} - 1)$$

gdzie: N_{LOOPS} – liczba pętli w sieci, N_{ARC} – liczba wszystkich łuków w sieci, N_{NODE} – liczba wszystkich węzłów w sieci

2. Istnieje droga od węzła zasilającego do każdego węzła w sieci (przy wyznaczaniu drogi bierze się pod uwagę wyłącznie łuki czynne).

Podstawową definicją funkcji celu jest suma kosztów strat mocy i energii we wszystkich łukach optymalizowanej sieci:

$$(2) \quad K_{str} = \sum_{j=1}^n (\Delta P_j k_p + \Delta Q_j k_q + \Delta A_j k_A)$$

gdzie: K_{str} – koszt strat mocy, n – liczba łuków w sieci, ΔP_j – strata mocy czynnej w łuku j , k_p – jednostkowy koszt mocy czynnej, ΔQ_j – strata mocy bierniej w łuku j , k_q – jednostkowy koszt mocy bierniej, ΔA_j – strata energii czynnej w okresie optymalizacji T w łuku j , k_A – jednostkowy koszt energii czynnej.

Przyjęto, że o wartości kosztów strat decyduje rozptył mocy w szczycie obciążenia dla wybranego okresu optymalizacji. W procesie wyznaczania strat w sieci elektroenergetycznej uwzględnione zostały również moce (i straty mocy) bierne.

W przypadku algorytmu rozptylowego, należącego do grupy algorytmów heurystycznych bazujących na szczególnych właściwościach zadania, właściwie nie wykorzystuje się podanej postaci funkcji celu. W algorytmie tym w kolejnych krokach wyłącza się łuki najmniej obciążone, kontrolując spełnienie warunków technicznych po każdym wyłączeniu. W algorytmie tym bardzo kłopotliwe byłoby (o ile w ogóle możliwe) uwzględnianie kosztów przełączeń oraz instalacji nowych łączników.

Dla metody opartej o algorytm genetyczny funkcja celu (koszty strat mocy i energii) została rozszerzona o koszty wykonania przełączeń wraz z kosztami instalacji nowych łączników:

$$(3) \quad F = n_{pt} K_{prt} + n_{pt} K_{prt} + n_{lnn} K_{isrnn} + n_{lsn} K_{isrsn} + K_{str}$$

gdzie: n_{pt} – liczba zmian stanów łączników o stopniu zmiany stanu „łatwy”, K_{prt} – średni koszt przełączenia pojedynczego łącznika o stopniu zmiany stanu „łatwy”, n_{pt} – liczba zmian stanów łączników o stopniu zmiany stanu „trudny”, K_{prt} – średni koszt przełączenia pojedynczego łącznika o stopniu zmiany stanu „trudny”, n_{lnn} – liczba nowych łączników w sieci nN, K_{isrnn} – średni koszt zakupu i instalacji nowego łącznika w sieci nN, n_{lsn} – liczba nowych łączników w sieci SN, K_{isrsn} – średni koszt zakupu i instalacji nowego łącznika w sieci SN.

Dla metody opartej o algorytm genetyczny założono, że wejściowa konfiguracja sieci jest konfiguracją otwartą. W związku z tym liczba pętli równa jest liczbie otwartych łączników w konfiguracji wejściowej, dla których możliwa jest zmiana stanu. W pierwszej fazie rozwiązania budowana jest lista łączników znajdujących się w wygenerowanych pętlach sieci. Poszczególne pozycje w chromosomie reprezentującym pojedyncze rozwiązanie oznaczają numery otwartych łączników w pętlach. Konstrukcja osobników zapewnia spełnienie typu układu w początkowej populacji – losowane są numery łączników z kolejnych pętli przy uwzględnieniu faktu, że niektóre pętle mogą mieć części wspólne (w szczególności w sieci występują łączniki należące do dwóch pętli). Po operacjach krzyżowania i mutacji uruchamiany jest algorytm naprawczy, w wyniku którego chromosom jest tak korygowany, by zapewnić prawidłową konfigurację sieci. Dla algorytmu genetycznego przyjęto strategię elitarną – najlepszy osobnik zawsze przechodzi do następnego pokolenia.

Przykłady testowe

Odwzorowanie numeryczne dla przykładów testowych pozyskane zostało z systemu GIS.

Analizowany obszar obejmował obszar zasilania jednego GPZ-u (GPZ1).

Moce odbierane w analizowanej sieci oraz straty mocy dla konfiguracji wejściowej przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Moce odbierane dla testowanego przykładu

	Moc czynna	Moc bierna	Straty mocy czynnej
	[kW]	[kVar]	[kW]
Sieć SN	16144,6	4074,8	316,3
Sieć SN i nN	15966,7	3991,7	489,02

Odwzorowanie sieci SN nie zawierało transformatorów SN/nN. W związku z tym do obciążenia sieci SN wyznaczone zostały jako suma mocy odbieranych z sieci nN oraz straty mocy w transformatorach SN/nN.

W tabeli 4 przedstawiono dane dotyczące liczby elementów sieci.

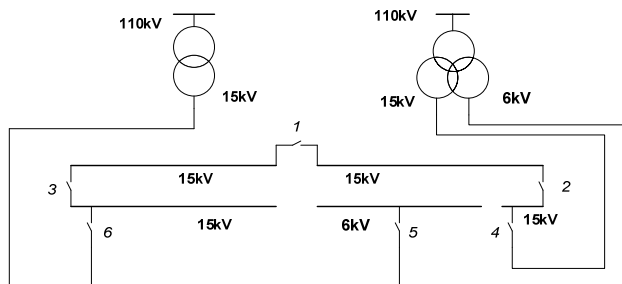
Tabela 4. Liczba elementów analizowanej sieci

	Sieć SN	Sieć Sn i nN
Liczba łuków	4599	40413
Liczba węzłów	4586	40324
Liczba łączników	650	6009
Liczba odcinków linii	1236	3464
Liczba pętli	14	90
Liczba łączników w pętlach	200	1447

W odwzorowaniach pozyskanych z systemów GIS na ogół występują łuki o zerowej rezystancji, pełniące rolę pomocniczą (głównie są to połączenia między łącznikami w

GPZ-ach i stacjach transformatorowych SN/nN. Łuki te były usuwane w procesie upraszczania odwzorowania. Schemat GPZ-u zasilającego analizowaną sieć pokazany został na rysunku 1.

Ponieważ w GPZ znajdują się dwa transformatory 110/SN, wprowadzono dodatkowe linie 110 kV (bardzo krótkie, o dużym przekroju) łączące dwie sieci (każda zasilana z oddzielnego transformatora) w jedną sieć. Założono stały podział w GPZ: otwarty łącznik nr 1 oraz zamknięte łączniki nr 2,3,4,5 i 6. Stan każdego z tych łączników został zablokowany – nie mógł ulec zmianie w procesie optymalizacji.



Rys.1. Schemat GPZ dla analizowanej sieci

Wyniki obliczeń

W prezentowanym artykule do wykonania obliczeń optymalizacyjnych wykorzystano system wspomagania rozwoju i optymalizacji pracy rozdzielczych sieci energetycznych ELGrid, opracowany w firmie Globema, przy współpracy z Instytutem Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej [15].

Obciążenia w węzłach analizowanej sieci wyznaczono na podstawie estymacji obciążeń w sieci. Estymacja została zrealizowana dla wybranego okresu w roku na podstawie danych z systemu rozliczeń odbiorców (dane o zużyciu energii) oraz dostępnych pomiarów z punktów sieci elektroenergetycznej i taryfach rozliczeniowych. Możliwe jest wykorzystanie do estymacji obciążeń (w miarę dostępności) profili odbiorców a także, w przyszłości, danych z systemów pomiarowych AMR [16].

Do wyznaczenia optymalnej konfiguracji sieci rozdzielczej wykorzystano komputer o następujących parametrach:

1. Procesor AMD Phenom™ II X6 1100T 3,31 GHz – do obliczeń wykorzystywane 4 rdzenie procesora z 6 dostępnymi
2. RAM 8 GB
3. System operacyjny Windows 7 Professional 64-bit

Zastosowano następujące metody do optymalizacji konfiguracji sieci:

AG – algorytm genetyczny

AR1 – algorytm rozptyłowy, jednokrotne wyznaczanie rozptyłów mocy

ARN – algorytm rozptyłowy, wielokrotne wyznaczanie rozptyłów mocy

ARAG – algorytm ARN wykorzystany do wyznaczenia rozwiązania wstępnego, przeprowadzenie dalszej optymalizacji algorytmem genetycznym.

ARKOR – algorytm ARN wykorzystany do wyznaczenia rozwiązania wstępnego, przeprowadzenie dalszej optymalizacji algorytmem genetycznym z blokowaniem łączników w pętach.

W przypadku algorytmu rozptyłowego, wielokrotne wyznaczanie rozptyłów mocy oznacza wykonanie obliczeń po każdym prawidłowym (z punktu widzenia konfiguracji

sieci) otwarciu łącznika. W tej metodzie obliczenia rozpoczyna się od zamknięcia wszystkich łączników, z wyjątkiem łączników otwartych dla których niemożliwa jest zmiana stanu.

Wyniki obliczeń optymalizacyjnych otrzymane dla sieci SN zasilanej z GPZ1 podano w tabeli 5. Wielkość energii została wyznaczona dla okresu połowy roku, przy przyjęciu średniego czasu trwania strat maksymalnych 1600 godzin.

Tabela 5. Wyniki obliczeń dla sieci SN

Sieć	Wielkość strat energii	Różnica strat energii	Różnica strat energii
	[kWh]	[kWh]	[%]
Wejściowa	1117585	Nd	Nd
AG	1082966	34619	3,10%
AR1	1084364	33221	2,97%
ARN	1083349	34235	3,06%
ARAG	1082966	34619	3,10%
ARKOR	1082975	34610	3,10%

W przypadku algorytmu genetycznego (AG) przyjęto zerowe koszty przełączeń. Przyjęto także liczebność populacji 40 osobników dla sieci SN, 50 dla sieci SN i nN, liczbę pokoleń 400, prawdopodobieństwo krzyżowania 0,7 oraz prawdopodobieństwo mutacji 0,1.

Tabela 6. Wyniki obliczeń dla sieci SN i nN

Sieć	Wielkość strat energii	Różnica strat energii	Różnica strat energii
	[kWh]	[kWh]	[%]
Wejściowa	2189689	Nd	Nd
AG_1	2141516	48173	2,2%
AG_2	2113050	76639	3,5%
AR1	2104292	85397	3,9%

W metodzie ARAG przyjęto takie same parametry algorytmu genetycznego jak w metodzie AG.

W przypadku metody ARKOR dokonano wstępnej optymalizacji (uzyskanie rozwiązania suboptymalnego) z wykorzystaniem algorytmu ARN. Następnie stan odległych (od otwartego) łączników został zablokowany – zmiana stanu łącznika (czyli przesunięcie rozcięcia w pętli) dopuszczone zostało wyłącznie dla trzech łączników w obie strony od łącznika otwartego. Pozwoliło to na zmniejszenie liczby analizowanych łączników z 200 (wszystkie łączniki w 14 pętach) do 98 (w każdej pętli po 7 łączników). W tym przypadku przyjęto liczbę osobników w populacji równą 2, liczbę pokoleń równą 400, prawdopodobieństwo krzyżowania równe 0,1 i prawdopodobieństwo mutacji równe 0,5. W ten sposób algorytm genetyczny o dość specyficznych ustawieniach posłużył do poprawy osiągniętego innymi metodami (algorytmem rozptyłowym) rozwiązania suboptymalnego.

Tabela 7. Wyniki obliczeń dla sieci SN – tryb inwestycyjny

Sieć	Wielkość strat energii	Różnica strat energii		Liczba nowych łączników
	[kWh]	[kWh]	[%]	
Wejściowa	1117585	Nd	Nd	Nd
AG	1065058	52527	4,70%	6

Dodatkowo, dla sieci SN wykonano obliczenia optymalizacyjne w trybie inwestycyjnym korzystając z algorytmu genetycznego. W trybie takim rozcięcia mogą być lokowane w odcinkach linii elektroenergetycznych – jest to równoznaczne z zainstalowaniem łącznika w takim odcinku linii. Do obliczeń przyjęto zerowe koszty przełączeń oraz koszt instalacji łącznika w sieci SN wynoszący 4000 PLN.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono trzy metody optymalizacji konfiguracji sieci dystrybucyjnych SN i nN. Pierwsza z nich, metoda rozpluwowa, w niewielkich sieciach (np. sieci SN) daje gorsze wyniki niż metoda oparta na algorytmach genetycznych (AG) oferując w zamian znacznie krótszy czas obliczeń. W przypadku analizowanej sieci SN czas wyznaczania rozpluwu mocy wynosił ok. 2 sekund a w przypadku sieci SN i nN 3,1 sekundy. Przy wielokrotnym wyznaczaniu rozpluwów czas potrzebny na obliczenia rozpluwowe jest równy liczbie pętli pomnożonej przez czas obliczeń pojedynczego rozpluwu (dla sieci SN – ok. 48 sekund, dla sieci SN i nN – maksimum 279 sekund). Obliczenia metodą AG trwały 240,5 sekundy dla sieci SN oraz 2853 sekund (około 47,5 minuty) dla sieci SN i nN.

Metoda ARKOR dała bardzo zbliżone wyniki (praktycznie takie same), natomiast czas obliczeń wynosił dla sieci SN:

- ARN - 48 sekund
- AG - 17 sekund
- razem około 65 sekund.

Dla sieci SN i nN próba poprawienia wyników algorytmu rozpluwowego algorytmem genetycznym nie zakończyła się sukcesem, co uznać można za zrozumiałe. Dla tej sieci wyniki osiągnięte przez algorytmy AR i AG są praktycznie bardzo zbliżone.

Należy uznać, że proponowane podejście polegające na wyznaczeniu wstępnej konfiguracji suboptymalnej a następnie poprawa uzyskanego rozwiązania algorytmem genetycznym ze specyficznymi parametrami oraz zawężenie przestrzeni poszukiwań powinno być dobrą metodą dla optymalizacji konfiguracji sieci rozdzielczych.

Głównym problemem w optymalizacji konfiguracji sieci dystrybucyjnych jest rozmiar zadania – w stosunkowo niewielkiej analizowanej sieci SN i nN znajdowało się 1447 łączników w 90 pętlach. Wydaje się, że jednym z kierunków działań powinno być zmniejszanie rozmiaru zadania, jak również analizowanie efektywności innych metod wykorzystując duże przykłady rzeczywiste sieci rozdzielczych.

Jako jedną z metod zmniejszenia rozmiarów zadania zaproponować można analizę przeciążeń przy różnej lokalizacji otwartych łączników co pozwoliłoby zawęzić przestrzeń możliwych rozwiązań zadania.

Aktualnie rozpoczyna się wdrażanie systemów pomiarowych AMI. Zakładając dysponowanie danymi dotyczącymi zużycia energii przez odbiorców z kwantyzacją 15-minutową, możliwe będzie dokładniejsze wyznaczanie strat w sieci rozdzielczej a także prowadzenie procesu optymalizacji bazując na rzeczywistych stratach w sieci.

Duży wpływ na zagadnienie ma też zwiększająca się liczba zdalnie sterowanych łączników w sieci – koszt przełączenia dla takiego łącznika można uznać za zerowy, dodatkowo też zwiększa się możliwość zmian konfiguracji sieci. Wyniki optymalizacji konfiguracji mogą posłużyć do analizy opłacalności lokalizacji łączników zdalnie sterowanych.

Należy spodziewać się także wzrostu liczby źródeł rozproszonych OZE (niesterowalnych). Źródła takie instalowane w sieci rozdzielczej wpływają na zmianę

lokalizacji optymalnych punktów rozcięć. Szybkie i efektywne metody wyznaczania optymalnych konfiguracji mogą okazać się w przyszłości bardzo przydatne.

LITERATURA

- [1] Niewiedział E., Niewiedział R., „Straty energii elektrycznej w krajowym systemie elektroenergetycznym”, *Miesięcznik SEP INPE*, 2012, nr 152
- [2] Informacja (nr 8/2013) w sprawie średniej ceny sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym za rok 2012, Prezes URE, 28 marca 2013r.
- [3] Le Gal M.: Recherche Automatique de schemats de secours dans les reseaux de distributions a moyenne tension, Paris, EdF, 1969.
- [4] Civanlar S., Grainger J. J., Yin H., Lee S. S. H., Distribution feeder reconfiguration for loss reduction, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 3, no. 3, pp. 1217–1223, Jul. 1988.
- [5] Kujaszczyk S., Automatyczne projektowanie optymalnych osiedlowych sieci elektroenergetycznych, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Elektryka*, 1972, nr 28.
- [6] Chiang H.-D., Jean-Jumeau R., Optimal network reconfigurations in distribution systems Part 2: Solution algorithms and numerical results, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 3, pp. 1568–1574, Jul. 1990.
- [7] Kulczycki J. (red.): Straty energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych, *PTPIREE*, Poznań 2009, 296-298
- [8] Nara K., Shiose A., Kitagawa M., Ishihara T.: Implementation of Genetic Algorithm for Distribution System Loss Minimum Re-configuration, *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 7, no. 3 (1992).
- [9] Strbac G., Djapic P.: A Genetic Based Fuzzy Approach to Optimization of Electrical Distribution Networks, Proceedings of the First International Conference on genetic Algorithms in Engineering Systems, GALEsia '95, 1995, University of Sheffield, *IEE Conference Publications* no. 414.
- [10] Parol M., Optymalizacja konfiguracji elektroenergetycznych sieci rozdzielczych w oparciu o systemy ewolucyjne, rozprawa doktorska, *Politechnika Warszawska*, Warszawa 1996.
- [11] Rayapudi S. R., Sadhu Venkata L. N., Manyala R. R., Srinivasa Rao A., Optimal Network Reconfiguration of Large-Scale Distribution System Using Harmony Search Algorithm, *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. 26, No. 3, August, 2011, 1080 - 1088
- [12] Miranda V., Fonseca N., EPSO — Best-of-two-worlds metaheuristic applied to power system problems, *Proc. CEC'02 Evolutionary Computation 2*, May 12–17, 2002, pp. 1080–1085.
- [13] Rabić A. Jabr, Ravindra Singh, Bikash C. Pal, Minimum Loss Network Reconfiguration Using Mixed-Integer Convex Programming, *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. 27, NO. 2, MAY 2012, 1106 – 1115.
- [14] Sawa T., Radial Network Reconfiguration Method in Distribution System using Mutation Particle Swarm Optimization, *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, June 28th - July 2nd, 2009, Bucharest, Romania
- [15] Helt P., Baczyński D., Maniecki M., Koncepcja systemu EL Grid do optymalizacji pracy i rozwoju rozdzielczych sieci energetycznych. *Przegląd Elektrotechniczny* 2011 nr 2.
- [16] Baczyński D., Parol M., Estymacja obciążeń szczytowych stacji transformatorowych SN /nN za pomocą metod statystycznych oraz metod sztucznej inteligencji, *XI Międzynarodowa Konferencja „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce” APE'03*, Gdańsk – Jurata 2003

Autorzy: dr inż. Piotr Helt, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: piotr.helt@ien.pw.edu.pl, mgr inż. Piotr Zduńczyk, Globema Sp. z o.o., ul. Włta Stwosza 22, 02-661 Warszawa, piotr.zdunczyk@globema.pl