

Metoda badania rozwoju stacji 110 kV/SN w warunkach niepewności

Streszczenie. W artykule przedstawia się metodę wyznaczania strategii rozwoju stacji 110kV/SN w miastach. Omawia się model zadania rozwoju stacji 110kV/SN w warunkach niepewności związanego z obciążeniem stacji. Jako funkcję celu przyjmuje się sumę zdyskontowanych kosztów rocznych stacji w okresie T lat. Przesławia się przykładowe wyniki obliczeń strategii rozwoju miejskiej stacji 110kV/SN.

Abstract. The method for determining the development strategy of 110kV/MV substations in the cities has been presented in the paper. It discusses the model development tasks 110kV/MV substation under conditions of uncertainty related to the power load. The target function is a sum of discounted annual cost of the substation over T years. Exemplary calculations results of development strategy of urban 110kV/MV stations were presented. (*Method of testing 110kV/MV substations development under uncertain conditions*).

Słowa kluczowe: stacja 110kV/SN, badanie rozwoju, niepewność.

Keywords: 110kV/MV substation, study of development, uncertainty.

doi:10.12915/pe.2014.11.24

Wstęp

Celowość optymalizacji planowania rozwoju i modernizacji sieci rozdzielczych lub stacji elektroenergetycznych z uwzględnieniem niepewności wynika przede wszystkim z płynących z tego tytułu korzyści ekonomicznych. Jedną z ważniejszych przyczyn uwzględnienia niepewności w optymalizacji strategii rozwoju jest niepewność przyszłych warunków pracy, a także niepewność danych wejściowych w procesie optymalizacji w tym szczególnie prognozy obciążenia RPZ [1], [5]. Podejmowanie decyzji inwestycyjnych z uwzględnieniem tej niepewności wymaga przeprowadzenia wszechstronnej analizy symulacyjnej. W artykule sformułowano zadanie optymalizacji strategii rozwoju stacji 110 kV/SN, określono funkcję kryterialną, opracowano metodę rozwiązywania zadania optymalizacyjnego, przeprowadzono badania symulacyjne i przedstawiono uogólnione wnioski.

Sformułowanie problemu optymalnego rozwoju stacji

Badania ogranicza się do typowej struktury stacji transformatorowo - rozdzielczej 110 kV/SN dwutransformatorowej jako modelu docelowego. Przyjmuje się, że struktura stacji w roku t jest określona przez $a(t) = a(v, m, n)$, gdzie: m, n są typami zainstalowanych transformatorów, v - etap rozwoju. Ze względu na ograniczoną liczbę produkowanych (różnych w sposób istotny) typów transformatorów, zamiast typu transformatora używa się jego mocy znamionowej.

Zbiór możliwych struktur stacji ($N=15$) wygląda następująco (podaje się moce znamionowe transformatorów 110 kV/SN w MVA): (0,16); (16,16); (16,20); (20,20); (20,25);

(25,25); (25,31.5); (31.5,31.5); (32,32); (32,40); (40,40); (40,63); (63,63); (63,80); (80,80).

W rozważanym modelu zakłada się, że w ciągu każdego roku struktura stacji jest stała, tj. każdorazowa wymiana transformatorów 110 kV/SN odbywa się na przełomie kolejnych lat (wynika to np. z użycia przy obliczaniu kosztów, szczytowych rocznych obciążeń stacji).

Zakłada się, że funkcjonal kryterialny jest pewnym przekształceniem procesu stochastycznego $S_0(t)$ (gdzie: $S_0(t)$ - szczytowe roczne obciążenie stacji 110 kV/SN), zależnym od wyboru decyzji d_t

$$(1) \quad K(T) = K[S_0(t), d_t]$$

Podczas optymalizacji rozwoju stacji transformatorowej 110

kV/SN rolę funkcjonu $K(T)$ pełni suma zdyskontowanych na rok 0 kosztów rocznych

$$(2) \quad K(T) = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+p)^t} K_{rs}(t, d)$$

Koszt roczny stacji 110 kV/SN przedstawia się jako funkcję o postaci:

$$(3) \quad K_{rs}(t, d) = c_1[a(t), h] \frac{S_{01}^2(t)}{S_{n_1}^2(t)} + c_2[a(t), h] \frac{S_{02}^2(t)}{S_{n_2}^2(t)} + c_3[a(t), h] + K_{wt}(t) = K_t[a(t)] + K_{wt}(t)$$

gdzie: $S_{01}(t), S_{02}(t)$ - szczytowe obciążenie roczne transformatorów 110 kV/SN, $S_{n_1}(t), S_{n_2}(t)$ - moce znamionowe zainstalowanych transformatorów,

$c_1[a(t), h] \frac{S_{01}^2(t)}{S_{n_1}^2(t)}$ - koszt strat mocy czynnej i biernej w

transformatorze pierwszym, $c_2[a(t), h] \frac{S_{02}^2(t)}{S_{n_2}^2(t)}$ - koszt strat

mocy czynnej i biernej w transformatorze drugim, $c_3[a(t), h]$

- koszty roczne stacji (terenu, budynku stacji, koszty inwestycyjne transformatorów 110 kV/SN, rozdzielni 110 kV i SN), $K_{wt}(t)$ - koszty wymiany transformatora 110 kV/SN w roku t .

W rozważanym zadaniu obciążenie stacji nie jest ściśle zdeterminowane jest procesem losowym.

W przypadku „losowości”, tj. gdy $S_0(t)$ jest procesem stochastycznym, również $K(T)$ jest zmienną losową. Niezbędne jest zatem wprowadzenie jako funkcjonu kryterialnego pewnych charakterystyk zmiennej losowej $K(T)$. Przyjmuje się trzy funkcjonu kryterialne:

1) średnie koszty zdyskontowane sieci w badanym okresie T lat

$$(4) \quad K_1(t) = E[K(T, a)]$$

2) maksymalne prawdopodobieństwo, że wybrana strategia rozwoju sieci jest strategią najlepszą w badanym okresie

$$(5) \quad K_2(T) = \max P[K(T, a^0) = \min K(T, a)]$$

gdzie: $\min K(T, a)$ oblicza się dla ustalonej realizacji procesu $S_0(t)$ po wszystkich d_t spełniających warunki techniczne.

3) minimalna wariancja kosztów rozwoju stacji

$$(6) \quad K_3(T) = \min D_k^2 [K(T, a)]$$

W celu rozwiązania zadania niezbędne jest zatem dokładniejsze zbadanie funkcjonatu kryterialnego. Koszt roczny stacji $K_r(t, d_t)$ ma postać funkcji kwadratowej w zależności od szczytowego rocznego obciążenia stacji $S_0(t)$:

$$(7) \quad \begin{aligned} K_{rs}(t, d_t) &= K_t [t, a(t)] + K_{wr}(t) = \\ &= B[a(t)] S_0^2(t) + C[a(t)] + K_{wr}(t) \end{aligned}$$

Wykorzystuje się tutaj oznaczenie przez $K_t [t, a(t)]$ sumy kosztów stałych i zmiennych, związanych z istniejącą strukturą stacji $a(t)$.

Zgodnie z warunkami technicznymi rozwoju sieci muszą być spełnione także następujące ograniczenia:

a) strategia musi być nie malejąca

$$(8) \quad \alpha(t) \geq \alpha(t-1), \quad t = 1, 2, \dots, T$$

b) w przypadku deterministycznego obciążenia $S_0(t)$ warunek dostatecznej mocy znamionowej powinien przyjąć postać

$$(9) \quad \frac{1}{3} \leq \frac{S_{n1}(t)}{S_{n2}(t)} \leq 3$$

$$(10) \quad S_0(t) \leq \frac{e}{r_t} [S_{n1}(t) + S_{n2}(t)]$$

gdzie: e - współczynnik dopuszczalnej przeciążalności transformatorów 110 kV/SN, r_t - współczynnik rezerwy.

W przypadku losowego obciążenia $S_0(t)$ warunek ten musi ulec modyfikacji. Przeprowadzone badania statystyczne [2], [4] wykazują, że można przyjąć, iż $S_0(t)$ ma rozkład normalny. Ze względu na wymagania niezawodności konieczne jest, aby warunek dostatecznej mocy znamionowej

$$(11) \quad S_0(t) \leq \frac{e}{r_t} [S_{n1}(t) + S_{n2}(t)] = S_d(t)$$

był spełniony z dostatecznie dużym prawdopodobieństwem, to jest by

$$(12) \quad P[S_0(t) \leq S_d(t)] \geq 1 - \alpha$$

gdzie: α - zadane małe prawdopodobieństwo.

Niech m, σ^2 oznacza wartość oczekiwaną i wariancję zmiennej losowej $S_0(t)$. Wielkości te wyznacza się korzystając z wyników symulacji obciążeń stacji 110 kV/SN

$$(13) \quad P[S_0(t) \leq S_d(t)] = P\left[\frac{S_0(t) - m}{\sigma} \leq \frac{S_d(t) - m}{\sigma}\right]$$

Zmienna $Y = \frac{[S_0(t) - m]}{\sigma}$ jest zmienną standaryzowaną i zgodnie z poczynionymi wyżej spostrzeżeniami ma z dobrym przybliżeniem rozkład $N(0, 1)$. Można zatem

znaleźć współczynnik f_α (z tablic statystycznych lub korzystając z odpowiednich standaryzowanych procedur) taki, by

$$(14) \quad P(Y \leq f_\alpha) = 1 - \alpha$$

i teraz nierówność (14) będzie spełniona, gdy

$$(15) \quad \frac{S_d(t) - m}{\sigma} \geq f_\alpha$$

lub po przekształceniu

$$(16) \quad [S_{n1}(t) + S_{n2}(t)] \geq \frac{r_t}{e} (m + f_\alpha \sigma)$$

Metoda optymalizacji rozwoju stacji

W zbudowanym grafie zorientowanym $G = (X, L)$,

zbiór węzłów grafu $X = \left\{ C_i^j \right\}, i = i_0^j, \dots, 15, j = 1, \dots, T; p \cup k$

składa się ze wszystkich dopuszczalnych struktur typoszeregu zainstalowanych transformatorów 110 kV/SN w okresie prognozy T ; (p, k) są wyróżnionymi punktami tego grafu.

W grafie, drogi $d(p, k)$ łączące punkt początkowy p z punktem końcowym k są rozpatrywanymi decyzjami $d(\cdot)$, uwzględniającymi warunki techniczne $d(\cdot) \in D \cap D_T$.

Jeżeli każdemu łukowi grafu przyporządkuje się liczbę dodatnią, zwaną długością $d_t(\cdot)$ łuku, wówczas otrzymana struktura $S = (X, L, d_t)$ zwana jest siecią. Jednym z zadań programowania sieciowego jest poszukiwanie drogi minimalnej w sieci, a więc takiej drogi $d_0(p, k)$ łączącej węzły (p, k) , że

$$(17) \quad d'[d_0(p, k)] = \min_{a(p, k) \in G} d[d_0(p, k)]$$

Długość drogi minimalnej jest równa minimalnemu kosztowi rozwoju stacji transformatorowo-rozdzielczej 110 kV/SN, zaś droga minimalna $d_0(p, k)$ - rozwiązaniu optymalnemu zadania rozwoju stacji w przypadku deterministycznego obciążenia $S_0(t), t = 1, \dots, T$, przy założonych obciążeniach dopuszczalnych

$$(18) \quad S_{0(dop)}(t), \quad t = 1, 2, \dots, T.$$

Formalnym zadaniem optymalnego rozwoju stacji transformatorowo-rozdzielczej 110 kV/SN jest zadanie programowania stochastycznego (D, W, X_t) , gdzie: D - oznacza zbiór decyzji dopuszczalnych, W - funkcjonal kryterialny, X_t - proces losowy.

W przypadku rozpatrywanego zadania zbiór D jest zbiorem wszystkich dróg grafu sieci $S = (X, L, d)$, łączących węzły p i k . Procesem losowym X_t w przyjętym modelu jest proces losowych obciążeń stacji $S_0(t)$ realizację, którego otrzymuje się dzięki odpowiedniemu programowi symulacyjnemu PROGN [4].

Zadaniem formalnym optymalnego rozwoju sieci rozdzielczej lub tej samej stacji 110 kV/SN są dwa zadania programowania stochastycznego:

a) (D, K_1, S_{ot}) , którego rozwiązaniem jest taka droga $a^0(k, d) \in D$, że:

$$(19) \quad K_1(T, a^0) = \min_{a \in D} E \sum_{t=1}^{T-1} (1+p)^{-t} \{B[a(t)]S_{ot}^2 + C[a(t)] + K_w[a(t)]\}$$

b) (D, K_2, S_{ot}) , którego rozwiązaniem jest taka droga $a^0(k, d) \in D$, że:

$$(20) \quad K_2(T, a^0) = \max_{a_0 \in D} P\{k(a^0, T) = \min_{a \in D} \sum_{t=1}^{T-1} (1+p)^{-t} [B(a(t))S_{ot}^2 + C[a(t)] + K_w[a(t)]]\}$$

W przypadku zadania (D, K_1, S_{ot}) rozwiązanie optymalne uzyskuje się wyznaczając drogę minimalną w sieci, gdy długość łuków oblicza się nie na podstawie wielkości obciążenia S_{ot}^2 lecz wartości oczekiwanej $E(S_{ot}^2)$. Wynika to z tego, że

$$(21) \quad \min_{a \in D} E \sum_{t=1}^{T-1} (1+p)^{-t} [B[a(t)]S_{ot}^2 + C[a(t)] + K_w[a(t)]] = \min_{a \in D, t=1}^{T-1} \sum_{t=1}^{T-1} (1+p)^{-t} [B(a(t))E(S_{ot}^2) + C(a(t)) + K_w a(t)]$$

Przebieg wartości średniej kwadratu obciążenia można wyznaczyć znając $E(S_{ot})$ oraz $D_0^2(S_{ot})$ i wówczas

$$(22) \quad E(S_{ot}^2) = D_0^2(S_{ot}) + [E(S_{ot})]^2$$

lub też bezpośrednio, znając wartości obciążenia sieci w poszczególnych symulacjach. Zgodnie z zasadami statystyki procesów przyjmuje się w miejsce wartości oczekiwanych - odpowiednie estymatory.

$$(23) \quad \hat{E}(S_{ot}^2) = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} (S_{ot}^i)^2$$

Również przy wykorzystaniu zasad statystyki procesów otrzymuje się rozwiązanie zadania (D, K_2, S_{ot}) , jeśli przyjmie się w miejsce prawdopodobieństwa pewnego zdarzenia jego estymator

$$(24) \quad \hat{P}(A) = \frac{N_{AS}}{N_S}$$

gdzie: N_{AS} - liczba symulacji, w których zaszło zdarzenie A (w naszym przypadku zdarzenie polegające na tym, że określona droga $d^0(p, k)$ była drogą najkrótszą), N_S - liczba symulacji.

Rozwiązaniem zadania (D, K_2, S_{ot}) będzie droga, która najczęściej była drogą najkrótszą (strategią rozwoju stacji o najmniejszym koszcie).

Kryteria optymalności w warunkach nieokreśloności

Osobną grupę stanowią kryteria optymalizacyjne odnoszące się do przypadków podejmowania decyzji w warunkach nieokreśloności, tzn. kiedy nie są znane rozkłady prawdopodobieństw scenariuszy, a jedynie dane są przedziały zmienności ich parametrów. Dla tego typu przypadków zakłada się najczęściej równomierny rozkład prawdopodobieństwa scenariuszy. Założenie to umożliwia bezpośrednie stosowanie metod minimaksowych przy wyborze decyzji a także innych, jak np. kryterium Hurwicza [7].

W literaturze [1], [2], [6] przedstawia się następujące kryteria optymalności i podejmowania decyzji w warunkach

nieokreśloności: Walda, Savage'a, Hurwicza i Laplace'a. Będą one przedmiotem dalszych prac autorów związanych z badaniem rozwoju sieci.

Przykładowe wyniki obliczeń dla stacji 110 kV/SN

Obciążenie stacji 110 kV/SN na wybrany okres prognozy (pięcio- i piętnastoletni) jest wyznaczone programem PROGNA [4]. Ze stukilkudziesięciu wygenerowanych prognoz z badań zostały wyłączone te prognozy obciążenia, których wartości kształtowały się poniżej wartości dopuszczalnej w którymkolwiek roku prognozy. Optymalizacji podlega plan wymiany transformatorów w stacji 110 kV/SN (tzn. termin wymiany oraz moce wymienianych jednostek transformatorowych).

Wyznaczenie optymalnej strategii rozwoju pojedynczej stacji transformatorowej 110 kV/SN zostało przeprowadzone programem WYBOR [2].

W programie WYBOR zastosowano algorytm poszukiwania najkrótszego łańcucha sieci z uwzględnieniem optymalizacji wieloetapowej. Wyniki przykładowych obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Strategia rozwoju stacji 110 kV/SN

Rok prognozy	Struktura stacji				
	Moce znamionowe transformatorów [MVA]				
	Prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych strategii rozwoju stacji				
	$p_1=0.41$	$p_2=0.20$	$p_3=0.18$	$p_4=0.11$	$p_5=0.08$
1	(16-16)	(0-16)	(0-16)	(0-16)	(0-16)
2	(16-16)	(0-16)	(0-16)	(0-16)	(0-16)
3	(16-16)	(16-16)	(0-16)	(0-16)	(0-16)
4	(16-16)	(16-16)	(16-16)	(0-16)	(0-16)
5	(16-16)	(16-16)	(16-16)	(0-16)	(0-16)
6	(16-16)	(16-16)	(16-16)	(16-16)	(16-16)
7	(16-16)	(16-16)	(16-16)	(16-16)	(16-16)
8	(16-16)	(16-16)	(16-16)	(16-16)	(16-16)
9	(16-16)	(16-16)	(16-16)	(16-16)	(16-16)
10	(16-16)	(16-16)	(16-16)	(16-16)	(25-25)
11	(16-16)	(25-25)	(25-25)	(16-16)	(25-25)
12	(25-25)	(25-25)	(25-25)	(16-16)	(25-25)
13	(25-25)	(25-25)	(25-25)	(25-25)	(25-25)
14	(25-25)	(25-25)	(25-25)	(25-25)	(25-25)
15	(25-25)	(25-25)	(25-25)	(25-25)	(25-25)

Wpływ niepewności danych wejściowych oraz stosowanej metody na wyniki obliczeń optymalizacyjnych stacji

W ocenie wpływu danych wejściowych na wyniki optymalizacji rozwoju stacji 110 kV/SN należy w szczególności wziąć pod uwagę wartość obciążeń i czas użytkowania mocy szczytowej stacji, dokładność danych opisujących strukturę oraz parametry analizowanych elementów stacji.

Czas użytkowania mocy szczytowej na poziomie węzłów sieci 110 kV może być z kolei określony na podstawie badań i pomiarów w sieciach, które podlegają procesowi optymalizacji. Przyczyną istotnych błędów może być natomiast dokładność prognozy obciążeń węzłów odbiorowych 110 kV.

W przypadku sieci 110 kV odbiorami są transformatory 110 kV/SN. Dokładność prognozy jest ściśle uwarunkowana znajomością następujących danych: rodzaju węzła odbiorczego (komunalno-bytowy, przemysłowy, trakcyjny itp.), dynamiką zmienności obciążenia, danych historycznych z lat poprzednich (obciążenie, warunki pogodowe) oraz danych prognostycznych (np. nowe inwestycje, zmiana konfiguracji sieci SN itd.).

Dokładność posiadanych informacji zależy od możliwości i dokładności zainstalowanych w sieci

przyrządów pomiarowych, przekładników oraz sprzętu teleinformatycznego. W chwili obecnej nie ma większych problemów z określeniem mocy czynnych i biernych pobieranych przez transformatory 110 kV/SN, uśrednianych w okresach 15 minutowych. Dyspozycje ruchu (mocy) mają także szczegółowe informacje na temat obciążeń dobowych czynnych i biernych linii 110 kV. Pomiarami objęte są także napięcia w stacjach (rozdzielnicach). Dodatkowo dwa razy w roku (w lipcu i grudniu) są organizowane specjalne dni pomiarowe. W trzech porach doby (dolina nocna, szczyt przedpołudniowy oraz szczyt popołudniowy) dokonuje się pomiaru przepływów mocy w całej sieci 110 kV.

Określenie dokładności prognozy mocy odbieranych w węzłach sieci 110 kV, zdaniem autorów, jest jednym z istotniejszych czynników określających dokładność wyników całego procesu optymalizacyjnego. Dlatego w analizach dokonano porównania wartości obciążeń prognozowanych z obciążeniami rzeczywiście zaistniałymi w szczycie jesiennie-zimowym i dolinie letniej dla kilku stacji 110 kV/SN jednej ze spółek dystrybucyjnych. Porównanie to pozwoliło na określenie wielkości błędów prognozy zapotrzebowania mocy przez stację 110 kV/SN.

Zmierzone i prognozowane wartości mocy czynnych i biernych kilku stacji 110 kV/SN posłużyły do wyznaczenia odpowiednich błędów prognozy obciążenia stacji. Względne błędy prognozy obciążenia dla poszczególnych stacji zostały wyznaczone na podstawie następujących wzorów:

$$(25) \quad \Delta P_{\%} = \frac{P_{pr} - P_{zm}}{P_{zm}} \cdot 100\%$$

$$(26) \quad \Delta Q_{\%} = \frac{Q_{pr} - Q_{zm}}{Q_{zm}} \cdot 100\%$$

gdzie: P_{pr} , P_{zm} - prognozowane i zmierzone moce czynne stacji;

Q_{pr} , Q_{zm} - prognozowane i zmierzone moce bierne stacji.

Średnie błędy prognozy mocy czynnej i biernej analizowanych stacji 110 kV/SN zostały przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Średnie względne błędy prognozy obciążenia stacji 110 kV/SN

Błąd prognozy	Dolina letnia	Szczyt jesiennie-zimowy
$\Delta P_{sr} [\%]$	9,4+12,5	8,2+10,3
$\Delta Q_{sr} [\%]$	22,3+25,4	19,4+22,1

Ze względu na to, że błędy prognozy mocy czynnej wyniosły kilka procent a mocy biernej kilkanaście procent, to można stwierdzić, że uzyskane rezultaty dotyczące jakości prognoz średnioterminowych obciążenia stacji są zadowalające.

Wnioski

1. Przedstawiony model matematyczny oraz algorytm jego rozwiązywania, pozwalają na optymalizację badania rozwoju stacji 110 kV/SN. Powinna się ona opierać na metodach: optymalizacji wieloetapowej, wielokryterialnej i kryteriach podejmowania decyzji w warunkach niepewności.
2. Jednym z najbardziej istotnych czynników wpływających na jakość i efektywność procesu optymalizacyjnego stacji jest wykonanie dokładnej prognozy obciążenia stacji 110 kV/SN.
3. Przy badaniu rozwoju stacji 110 kV/SN uzasadnione jest stosowanie zarówno optymalizacji jednokryterialnej, jak i optymalizacji wielokryterialnej. Optymalizacja jednokryterialna polega na minimalizacji funkcji celu będącej sumą sumarycznych kosztów stałych, strat mocy i energii elektrycznej i rekonstrukcji elementów stacji w przyjętym okresie optymalizacji. Ma ona charakter uogólniający. Optymalizacja wielokryterialna pozwala na wybór takiej strategii rozwoju stacji, która optymalizuje (minimalizuje lub maksymalizuje) wybraną jedną z funkcji kryterialnych. Strategie rozwoju stacji 110 kV/SN otrzymane za pomocą optymalizacji jedno- i wielokryterialnej, mogą być wzajemnie komplementarne.
4. Zalecane jest stosowanie optymalizacji wielokryterialnej, gdyż pozwala ona na dokładniejsze poznanie rozbudowy stacji 110 kV/SN oraz daje szansę wyboru takiego rozwiązania RPZ, które jest oczekiwane i zalecane przez decydenta.
5. Do uwzględnienia niepewności przyszłych warunków pracy stacji 110 kV/SN zaproponowano podejście scenariuszowe, a w analizie optymalizacyjnej uwzględniającej tą niepewność zastosowano kryteria wartości oczekiwanej i maximinowe.

LITERATURA

- [1]. Ault G. W. et al: Distribution System Planning in Focus, *IEEE, Power Engine*, January, (2002).
- [2]. Marzecki J.: Algorytmy obliczeniowe rozdzielczych sieci elektroenergetycznych, *Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB*, Warszawa, (2007).
- [3]. Marzecki J.: Optymalna lokalizacja miejskich stacji transformatorowo-rozdzielczych 110 kV/SN w warunkach gospodarki rynkowej, *Rynek Energii*, nr 2, (2009), 42-45.
- [4]. Marzecki J.: Wybrane zagadnienia rozwoju miejskich sieci elektroenergetycznych w warunkach tworzonego rynku energii elektrycznej, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa, (2002).
- [5]. Marzecki J.: Planowanie rozwoju miejskich Rozdzielczych Punktów Zasilających (RPZ) w warunkach ryzyka, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90(2014), nr 2, 234-237.
- [6]. Roy B.: Wielokryterialne wspomaganie decyzji, *WNT*, Warszawa, (1990).
- [7]. Rothell G.S., Gomes T.: Electricity Economics. Regulation and Deregulation, *IEEE Press*, 2012

Autorzy: dr hab. inż. Jerzy Marzecki, prof. PW; mgr inż. Bartosz Pawlicki; Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: Jerzy.Marzecki@ien.pw.edu.pl, Bartosz.Pawlicki@ien.pw.edu.pl