

## METODA ANALIZY WIELOKRYTERIALNEJ DO PLANOWANIA ROZWOJU SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ ŚREDNIEGO I NISKIEGO NAPIĘCIA

Paweł BUĆKO<sup>1</sup>, Jerzy BURIAK<sup>1</sup>, Krzysztof DOBRZYŃSKI<sup>1</sup>, Marcin JASKÓLSKI<sup>1</sup>,  
Piotr SKOCZKO<sup>2</sup>, Piotr ZIELIŃSKI<sup>2</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
tel.: 58 347 1781; e-mail: pawel.bucko@pg.gda.pl;  
tel.: 58 347 2034; e-mail: jerzy.buriak@pg.gda.pl  
tel.: 58 347 1798; e-mail: krzysztof.dobrzynski@pg.gda.pl  
tel.: 58 347 1254; e-mail: marcin.jaskolski@pg.gda.pl
2. Energa-Operator SA, ul. Marynarki Polskiej 130, 80-557 Gdańsk  
tel.: 58 347 30 13; e-mail: piotr.skoczko@energa.pl  
tel.: 58 778 80 35; e-mail: piotr.zielinski@energa.pl

**Streszczenie:** Przedstawiono metodę wspomagającą decyzje w zakresie wyboru wariantu przyłączenia odbioru do sieci elektroenergetycznej dystrybucyjnej niskiego napięcia lub średniego napięcia oraz mikrogeneracji do sieci niskiego napięcia. Wybierany jest wariant o najniższej wartości miernika oceny syntetycznej, która jest obliczana jako średnia ważona z wartości mierników oceny syntetycznej wyznaczonych dla każdego z trzech rozpatrywanych okresów czasowych. Z kolei miernik oceny syntetycznej; dla każdego z wariantów, ale obliczany w pojedynczym okresie czasowym; jest średnią ważoną mierników ocen cząstkowych, wyznaczanych z zastosowaniem ośmiu przyjętych kryteriów. Metodę zaimplementowano w skoroszytcie kalkulacyjnym Microsoft Excel i zastosowano do analizy złożonych przypadków przyłączenia odbioru lub mikrogeneracji.

**Słowa kluczowe:** planowanie rozwoju, system elektroenergetyczny, operator systemu dystrybucyjnego, przyłączanie odbiorcy

### 1. WPROWADZENIE

Planowanie rozwoju systemu elektroenergetycznego niskiego napięcia (nn) i średniego napięcia (SN), uwzględniające uwarunkowania techniczne i ekonomiczne, jest złożonym procesem. Wpływ na to ma wielość kryteriów, które Operator Systemu Dystrybucyjnego (OSD) musi wziąć pod uwagę przy podejmowaniu decyzji o przyłączeniu odbioru lub mikrogeneracji do systemu elektroenergetycznego. Dla tego istotnym zagadnieniem zarówno badawczym, jak i praktycznym staje się opracowanie metody analizy wielokryterialnej, która wspomagałaby podejmowanie decyzji w przypadku rozpatrywania wielu wariantów przyłączenia odbioru lub mikrogeneracji. Metody wielokryterialne stosuje się w elektroenergetyce. W pracy [1] zaproponowano kilka takich metod. Pierwszą z nich jest nieparametryczna estymacja brzegowa (ang. Data Envelopment Analysis (DEA)), która opracowana została przez Charnesa, Coopera i Rhodesa [2]. Pozwala ona na zastosowanie programowania liniowego do oceny miar relatywnej jednostki decyzyjnej DMU (ang. Decision Making Unit). Istotą metody jest odniesienie efektywności ocenianych wariantów inwestycyjnych do krzywej efektywności. Programowanie liniowe stosuje się do optymalizacji wielowymiarowego problemu przedstawionego w postaci odniesienia efektów do nakładów, bazującego na koncepcji miary produktywności (ang.

*productive efficiency*) Farrela [3]. Metoda ta nie wymaga znajomości wag, gdyż stanowią one rozwiązanie modelu, spełniające kryterium optymalizacji, które polega na maksymalizacji efektów lub minimalizacji nakładów.

Drugi typ metod to wielokryterialne metody rankingowe, które pozwalają na dokonywanie wyboru najlepszego wariantu projektu inwestycyjnego na podstawie wielu kryteriów oceny. Określa się je jako metody z grupy ELECTRE (fr. *Elimination et Choix Translation Realite*), ponieważ była ona pierwszą z tego typu metod, a pozostałe stanowią jej modyfikacje. Wykorzystuje się te metody do oceny sytuacji decyzyjnej, w której mamy do czynienia z ze skończoną liczbą projektów, z punktu widzenia wielu kryteriów, które mogą być zarówno ilościowe, jak i jakościowe. Ostateczna ocena ma charakter ilościowy. Aby możliwe było porównanie wariantów przyjmuje się wspólną skalę ocen wg poszczególnych kryteriów, która ma charakter liczb przypisanych poszczególnym stanom, np. dostateczny, średni, dobry, bardzo dobry, itp. Dowolny wariant może być oceniony z zastosowaniem każdego z kryteriów. Efektem tej oceny będą grafy skierowane, które odpowiadają poszczególnym kryteriom. Ostateczną ocenę podejmuje się na podstawie sporządzonego grafu syntetycznego, stanowiącego swego rodzaju kompromis pomiędzy ocenami uzyskanymi z zastosowaniem wszystkich kryteriów, biorących udział w ocenie [1].

Trzeci typ metod to hierarchiczna analiza problemowa – AHP (ang. *Analytic Hierarchy Process*). Metody te pozwalają na uwzględnienie ryzyka i niepewności w procesie inwestowania w elektroenergetyce. znajduje zastosowanie we wspomaganie decyzji na podstawie wielu kryteriów. W przypadku zastosowania tej metody problem decyzyjny ma strukturę hierarchiczną, a poszczególnym kryteriom oceny przypisuje się wagi. Dzięki temu możliwe jest uporządkowanie wielokryterialnego problemu decyzyjnego, a w efekcie możliwe jest opracowanie rankingu wariantów inwestycyjnych [1]. W metodzie tej stosuje się wieloetapowy proces decyzyjny, którego efektem jest uszeregowanie wariantów inwestycyjnych w formie struktury drzewiastej (w pierwszym etapie) oraz ich ocenę (w drugim etapie). Przypisanie wag ma tu szczególne znaczenie. Metoda ta może być stosowana do oceny efektywności inwestowania

w elektroenergetyce, między innymi z uwagi na możliwe uwzględnienie uwarunkowań rynkowych.

Metodę analizy wielokryterialnej zastosowano również do szacowania maksymalnej generacji rozproszonej w systemie elektroenergetycznym [4].

## 2. METODA

### 2.1. Założenia

Zaproponowano metodę oceny wariantów przyłączenia odbioru lub źródła mikrogeneracji. Została ona opracowana do analiz złożonych przypadków przyłączenia odbioru do sieci średniego napięcia (SN) lub do sieci niskiego napięcia (nn) lub przyłączenia mikrogeneracji do sieci nn. Uwzględniono w niej horyzont planowania rozwoju sieci nn (5 lat) i sieci SN (10 lat). Metoda umożliwia przeprowadzenie obliczeń w trzech punktach na osi czasu, t.j. w okresie początkowym ( $t_1$ ), odpowiadającym momentowi przyłączenia rozpatrywanego obiektu; okresie pośrednim ( $t_2$ ), odpowiadającym połowie horyzontu planowania i okresie końcowym horyzontu planowania ( $t_3$ ). Horyzont planowania uwzględnia rozwój sieci dystrybucyjnej nn lub SN w formie wskaźników wzrostu mocy zapotrzebowanej w węzłach systemu elektroenergetycznego.

Zaproponowano zestaw ośmiu kryteriów technicznych i ekonomicznych oceny wariantu przyłączenia odbioru lub mikrogeneracji. Wybór kryteriów zależy od typu przyłączanego obiektu (odbior/mikrogeneracja) oraz poziomu napięcia sieci, do której przyłączany jest obiekt. Kompletny zestawienie kryteriów przedstawia się następująco: 1) nakłady inwestycyjne na realizację przyłączenia, 2) średnie koszty roczne związane z przyłączeniem nowego obiektu, 3) roczne straty energii elektrycznej czynnej w elementach układu sieciowego, 4) poziom napięcia w miejscu dostarczania energii, 5) dopuszczalne obciążenie elementu systemu elektroenergetycznego, 6) dynamiczna zmiana napięcia, 7) skuteczność ochrony przeciwporażeniowej, 8) stosunek mocy zwarciowej w miejscu przyłączenia źródła mikrogeneracji do jego mocy znamionowej.

### 2.2. Kryterium decyzyjne

Zaproponowano kryterium decyzyjne w postaci minimalizacji funkcji kryterialnej, będącej miarą syntetycznej oceny wariantu.

$$Z = \min k_w = \min \{k_{W_1}, k_{W_2}, k_{W_3}\} \quad (1)$$

gdzie:  $w$  – indeks wariantu ( $w = W_1, W_2, W_3$ ),  
 $k_w$  – wartość miernika oceny syntetycznej (funkcji kryterialnej) obliczona dla wariantu  $w$ .

Wprowadzono ograniczenie liczby wariantów przyłączenia do trzech. Obliczenia miernika oceny syntetycznej dokonano dwuetapowo. Najpierw obliczono miernik oceny dla każdego z trzech punktów na osi czasu, będący średnią ważoną mierników ocen cząstkowych, obliczanych dla każdego z kryteriów, z uwzględnieniem funkcji kar dla kryteriów 4–8:

$$k_{w,t} = \sum_{i=1}^{i=3} h_i \cdot k_{i,w,t} + \sum_{i=4}^{i=8} h_i \cdot \alpha_{i,w,t} \cdot k_{i,w,t} \quad (2)$$

gdzie:  $k_{w,t}$  – wartość miernika oceny syntetycznej (funkcji kryterialnej) obliczona dla wariantu  $w$  i w każdym okresie czasu  $t$ ,

$i$  – indeks miernika (kryterium) cząstkowej oceny wariantu przyłączenia odbioru/mikrogeneracji,

$h_i$  – waga dla kryterium  $i$  cząstkowej oceny wariantu przyłączenia odbioru lub mikrogeneracji,  
 $\alpha_{i,w,t}$  – wartość funkcji kary dla miernika  $i$  cząstkowej oceny w wariantcie  $w$ , w okresie czasu  $t$ ,  
 $k_{i,w,t}$  – wartość miernika oceny cząstkowej wariantu inwestycyjnego  $w$ , obliczona dla kryterium  $i$ , w okresie czasu  $t$ .

Następnie dla każdego wariantu obliczano średnią ważoną z mierników oceny syntetycznej uzyskanych w poszczególnych punktach czasu. Obliczenia tego dokonywano, aby użytkownik metody podejmował decyzję na podstawie pojedynczej wartości miernika obliczanego dla każdego z wariantów, a nie na podstawie trójki tych wartości:

$$k_w = \sum_{t=t_1}^{t=t_3} k_{w,t} \cdot \beta_t \quad (3)$$

gdzie:  $t$  – indeks okresu czasowego ( $t_1, t_2$  i  $t_3$ ),  
 $\beta_t$  – waga dla miernika oceny cząstkowej w okresie czasu  $t$ .

W obu przypadkach liczenia średniej ważonej, suma wag musi być równa 1 dla zestawu kryteriów, które brane są pod uwagę przy odpowiednim typie analizy (SN/nn, odbiór/mikrogeneracja).

### 2.3. Mierniki ocen cząstkowych

Mierniki ocen cząstkowych opracowano tak, aby możliwe było uwzględnienie ich za pomocą średniej ważonej. Dla trzech pierwszych kryteriów (o charakterze ekonomicznym) dokonano normalizacji wskaźników oceny cząstkowej:

$$k_{1,w,t} = \frac{K_{nd,w,t}}{\sum_{w=W_1}^{w=W_3} K_{nd,w,t}} \quad (4)$$

$$k_{2,w,t} = \frac{K_{r,w,t}}{\sum_{w=W_1}^{w=W_3} K_{r,w,t}} \quad (5)$$

$$k_{3,w,t} = \frac{\Delta E_{w,t}}{\sum_{w=W_1}^{w=W_3} \Delta E_{w,t}} \quad (6)$$

gdzie:  $K_{nd,w,t}$  – nakłady inwestycyjne na realizację przyłączenia w wariantcie  $w$ ,

$K_{r,w,t}$  – średnie koszty roczne dostawy energii elektrycznej w wariantcie  $w$  przyłączenia, w roku  $t$  [zł/a],

$\Delta E_{w,t}$  – roczne straty energii elektrycznej czynnej w wariantcie  $w$ , w roku  $t$ .

Dla kryteriów 4–6 poszukiwano wartości maksymalnych miernika oceny cząstkowej obliczanych dla poszczególnych węzłów lub elementów systemu elektroenergetycznego:

$$k_{4,w,t} = \max \frac{\Delta U_{\%w,t,m}}{\Delta U_{dop\%,w}} \quad (7)$$

$$k_{5,w,t,m} = \max_m \frac{I_{obc,w,t,m}}{I_{dd,w,t,m}} \quad (8)$$

lub

$$k_{5,w,t,m} = \max_m \frac{I_{obc,w,t,m}}{I_{nTD,w,t,m}} \quad (9)$$

$$k_{6,w,t,m} = \frac{d_{w,t,m}}{d_{\max,w}} \quad (10)$$

gdzie:  $\Delta U_{dop\%,w}$  – dopuszczalna procentowa wartość spadku napięcia w ciągu zasilającym dla wariantu  $w$ ,  
 $\Delta U_{\%,w,t,m}$  – procentowa wartość spadku napięcia w wariantcie  $w$ , w okresie czasu  $t$  i w węźle  $m$  systemu elektroenergetycznego,  
 $I_{obc,w,t,m}$  – prąd obciążenia elementu systemu elektroenergetycznego  $m$  (linii/transformatora), w wariantcie  $w$ , w okresie czasu  $t$ ;  
 $I_{dd,w,t,m}$  – obciążalność cieplna długotrwała linii elektroenergetycznej  $m$  ciągu zasilającego, w wariantcie  $w$ , w okresie czasu  $t$ ,  
 $I_{nTD,w,t,m}$  – prąd znamionowy dolnej strony transformatora  $m$ ,  
 $d_{w,t}$  – dynamiczna zmiana napięcia w punkcie przyłączenia w wariantcie  $w$ , w okresie czasu  $t$ ,  
 $d_{\max,w}$  – maksymalna dopuszczalna zmiana napięcia w punkcie przyłączenia, dla wariantu  $w$ .

Dla kryteriów 7 i 8, miernik oceny jest z kolei stosunkiem wartości referencyjnej, stanowiącej dolną granicę dopuszczalności dla tego wskaźnika, do jego wartości obliczonej:

$$k_{7,w,t} = \frac{I_{a(5s),w,t}}{I''_{k \min,w,t}} \quad (11)$$

$$k_{8,w,t} = \frac{\left( \frac{S''_{k,w,t}}{S_{n,w,t}} \right)_{\min}}{\frac{S''_{k,w,t}}{S_{n,w,t}}} = \frac{20}{\frac{S''_{k,w,t}}{S_{n,w,t}}} \quad (12)$$

gdzie:  $I''_{k \min,w,t}$  – prąd zwarciovowy minimalny w wariantcie  $w$ , w okresie czasu  $t$ ,  
 $I_{a(5s),w,t}$  – wartość prądu zadziałania zabezpieczenia, zainstalowanego na początku ciągu zasilającego, odczytana z charakterystyki czasowo-prądowej tego zabezpieczenia dla czasu 5 s;  
 $S''_{k,w,t}$  – moc zwarciovowa w punkcie przyłączenia, w wariantcie  $w$  i okresie czasu  $t$ ;  
 $S_{n,w,t}$  – moc znamionowa źródła mikrogeneracji w wariantcie  $w$ , w okresie czasu  $t$ ;  
 $(S''_{k,w,t}/S_{n,w,t})_{\min}$  – minimalny dopuszczalny stosunek mocy zwarciovowej w punkcie przyłączenia źródła mikrogeneracji do jego mocy znamionowej.

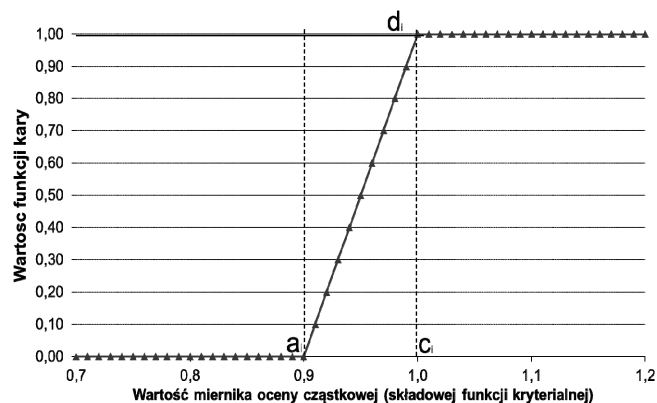
#### 2.4. Funkcje kar

Mierniki ocen cząstkowych dla kryteriów 4–8 zostały tak sformułowane, aby przyjmowały wartości z zakresu  $(0, 1)$ , jeżeli wartość wskaźników oceny cząstkowej będzie w przedziale wartości dopuszczalnych. Aby uwzględnić fakt ograniczenia wartościami dopuszczalnymi wskaźników (minimalnymi lub maksymalnymi) oraz określić w jakim przypadku należy kryterium brać pod uwagę, wprowadzono funkcję kary. Umożliwia ona obliczenie współczynnika określającego, w jakim stopniu dane kryterium jest istotne z punktu widzenia syntetycznego miernika oceny. Częściowo tę funkcję pełni waga dla kryterium, ale nie uwzględnia ona poziomu istotności kryterium. Użytkownik może zdecydować od jakiej wartości wskaźnika oceny, dane kryterium (miernik oceny cząstkowej) będzie miało wpływ na syntetyczną ocenę wariantu. Ustawia minimalny poziom istotności miernika oceny cząstkowej ( $a_i$ ), odpowiednio bliski jego wartości dopuszczalnej ( $c_i$ ) oraz wartość maksymalną funkcji kary ( $d_i$ ) dla wartości miernika oceny cząstkowej większej lub równej od jego wartości

dopuszczalnej. Proponujemy następujące sformułowanie funkcji kary:

$$\alpha_{i,w,t}(k_{i,w,t}) = \begin{cases} 0, & \text{dla } k_{i,w,t} \leq a_i \\ \frac{d_i}{c_i - a_i} \cdot (k_{i,w,t} - a_i), & \text{dla } a_i < k_{i,w,t} < c_i \\ d_i, & \text{dla } k_{i,w,t} \geq c_i \end{cases} \quad (13)$$

Przebieg zmienności przykładowej funkcji kary zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg zmienności funkcji kary dla wybranego kryterium

Jeżeli wartość miernika oceny cząstkowej jest poniżej minimalnego poziomu istotności ( $a_i$ ), wartość funkcji kary wynosi zero, a kryterium nie jest istotne dla oceny syntetycznej wariantu. Jeżeli jednak wartość minimalnego poziomu istotności zostanie przekroczona, wartość funkcji kary narasta do osiągnięcia wartości dopuszczalnej miernika oceny cząstkowej ( $c_i$ ). Wówczas wartość funkcji kary przyjmuje wartość maksymalną ( $d_i$ ). W tym przedziale kryterium ma wpływ na ocenę syntetyczną a jednocześnie jest akceptowane przez użytkownika. Jeżeli dopuszczalna wartość miernika oceny cząstkowej zostanie przekroczona, funkcja kary pozostanie na poziomie maksymalnym. W takim przypadku wariant będzie niedopuszczalny, jeżeli przekroczenie wartości dopuszczalnej miernika nastąpiło w pierwszym okresie analizy (momencie przyłączenia). Jeżeli przekroczenia wartości dopuszczalnych nastąpią w kolejnych okresach czasowych, wariant będzie dopuszczalny, funkcja kary pozostanie na poziomie maksymalnym (zazwyczaj równym 1), ale wzrośnie powyżej jednego wartość miernika, pomnożona przez wagę i wartość funkcji kary, będzie skutkować wzrostem wartości miernika oceny syntetycznej wariantu i może on nie zostać wybrany jako najlepszy, ponieważ wariant optymalny to ten o najmniejszej wartości miernika oceny syntetycznej.

#### 3. WNIOSKI KOŃCOWE

Implementacji metody dokonano w formie pakietu skoroszytów kalkulacyjnych Microsoft Excel. Skoroszyty mogą być wykorzystywane do wielowariantowych analiz przyłączenia odbioru do sieci elektroenergetycznej dystrybucyjnej nn i SN oraz przyłączenia mikrogeneracji do sieci nn.

#### 4. BIBLIOGRAFIA

1. Kamrat W.: Metody oceny efektywności inwestowania w elektroenergetyce, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2004
2. Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.: Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research* 2 (1978), s. 429–444
3. Farell M.J.: The Measurement of Productive Efficiency, *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, vol. 120, No. 3 (1957), s. 253–290
4. Dobrzyński K.: Szacowanie maksymalnej mocy generacji rozproszonej w systemie elektroenergetycznym, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2014

#### THE METHOD OF MULTI-CRITERIA ANALYSIS FOR THE SELECTION OF POWER DISTRIBUTION GRID CONNECTION VARIANT

We present the method supporting decision concerning the selection of the variant for low voltage (LV) and medium voltage (MV) grid connection of electricity consumer or low voltage grid connection of micro-generation. The selection is made on the basis of the value of objective function that is minimized and constitute a weighted average of sub-criteria functions. Calculation of the values of criteria functions is performed for three time periods i.e. present, the middle of planning horizon, the end of planning horizon. Additionally, we calculate a single value of criteria function for each variant i.e. weighted average of criteria functions calculated for each time period. The method was implemented in Microsoft Excel workbooks and applied in Energa-Operator SA power distribution company to perform complex multi-variant analyses of grid connections of electricity consumers (MV and LV grid) and micro-generation (LV grid).

**Keywords:** development planning, power system, power distribution operator, grid connection