

## KOMPUTEROWE METODY ANALIZY ROZPŁYWÓW MOCY W UKŁADACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

Janusz BROŻEK<sup>1</sup>, Piotr JEDYNAK<sup>2</sup>

1. Akademia Górniczo – Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel: 012 617 3772 fax: 0126345721 e-mail: jbroz@agh.edu.pl
2. Akademia Górniczo – Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, doktorant  
tel: 0517 452 740 fax: 0126345721 e-mail: majorek@gmail.com

**Streszczenie:** W artykule przedstawia się zastosowanie dedykowanych programów komputerowych do obliczeń rozptyłów mocy w systemach elektroenergetycznych. Ze względu na rozmiar zadania oraz nieliniowość równań opisujących zależności na moce węzłowe, do rozwiązania rozptyłów mocy wykorzystuje się iteracyjne metody rozwiązywania układów równań nieliniowych. Wynikiem analizy jest wektor napięć węzłowych umożliwiający obliczenie parametrów analizowanej sieci. Lokalizowanie w elektroenergetycznej sieci rozdzielczej rozproszonych źródeł mocy powoduje konieczność obliczeń rozptyłów mocy również w tej sieci. W pracy przedstawia się wyniki obliczeń rozptyłów mocy fragmentu systemu elektroenergetycznego oraz sieci rozdzielczej w której zainstalowano rozproszone źródło mocy. Przeprowadzone badania wykazały przydatność dedykowanych programów komputerowych do analizy rozptyłów mocy.

**Słowa kluczowe:** rozptyły mocy, systemy elektroenergetyczne, sieci rozdzielcze, rozproszone źródła mocy.

### 1. STAN USTALONY SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

#### 1.1. Analiza stanów ustalonych

Zadaniem systemu elektroenergetycznego (SEE) jest niezawodne dostarczanie energii elektrycznej do odbiorców przy zachowaniu wymagań i norm jakościowych.

System znajduje się w „stanie ustalonym” gdy utrzymuje napięcia węzłowe w dopuszczalnych zakresach a częstotliwość jest równa wartości synchronicznej. Stan ustalony oznacza, że w systemie moce czynne odbierane i generowane są zbilansowane.

Ze względu na ciągłą zmianę obciążenia, w systemie prowadzi się regulację bilansu mocy czynnej. Poziomy napięć węzłowych utrzymuje się w dopuszczalnych granicach przez regulację rozptyłów mocy biernej.

Parametry stanu ustalonego pozwalają stosować do symulacji i analizy procesu rozptywu mocy modele statyczne elementów sieci.

#### 1.2. Model sieci elektroenergetycznej

Modelem sieci elektroenergetycznej są odpowiednio odwzorowane elementy składowe sieci (np. transformatory, linie elektroenergetyczne) połączone ze sobą.

Model sieci wykorzystujący zasadę potencjałów węzłowych przedstawia macierzowy układ równań (1).

$$I_w = Y_w \cdot U_w \quad (1)$$

gdzie:  $I_w$  – wektor prądów węzłowych,  $U_w$  – wektor napięć węzłowych,  $Y_w$  – macierz admitancyjna węzłowa tworzona z definicji

Moce węzłowe (generowane lub odbierane) opisane są zależnością:

$$S_i = P_i + jQ_i = \underline{U}_i \sum_{j=1}^w \underline{U}_j^* \underline{Y}_{ij}^* \quad i, j=1, 2, \dots, w \quad (2)$$

gdzie:  $S_i$  – moc zespolona węzła,  $P_i$  – moc czynna węzła,  $Q_i$  – moc bierna węzła,  $\underline{U}_i$ ,  $\underline{U}_j$  – napięcia węzłowe odpowiednio węzła  $i$  oraz  $j$ ,  $\underline{Y}_{ij}$  – elementy macierzy admitancyjnej,  $w$  – liczba węzłów w systemie

W procesie obliczeń rozptyłów mocy wartości prądów węzłowych obliczane są z zależności (2). W efekcie układ równań (1) jest układem równań nieliniowych, który rozwiązuje się jedną z metod iteracyjnych do analizy równań nieliniowych.[1],[2].

#### 1.3 Parametry obliczeń rozptyłów mocy

Zbiorem wymuszeń nałożonych na sieć jest wektor mocy odbieranych wynikający z prognoz zapotrzebowania na moc:

$$S_o = [P_o; Q_o]^T \quad (3)$$

gdzie:  $S_o$  – wektor mocy odbieranych,  $P_o = [P_i; i=1, 2, \dots, l_o]$ ,  $Q_o = [Q_i; i=1, 2, \dots, l_o]$ ,  $l_o$  – liczba węzłów odbiorczych

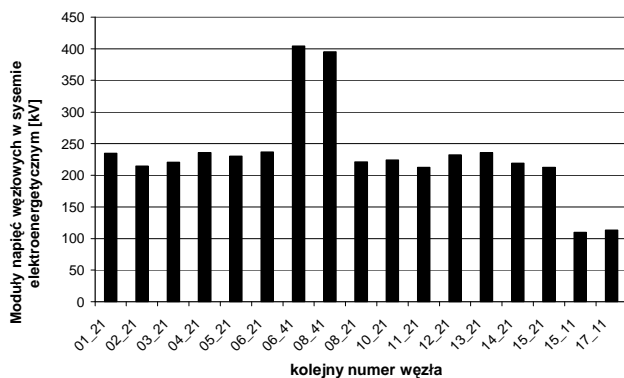
Zbiorem zmiennych sterujących jest wektor mocy generowanych:

$$S_g = [P_g; Q_g]^T \quad (4)$$

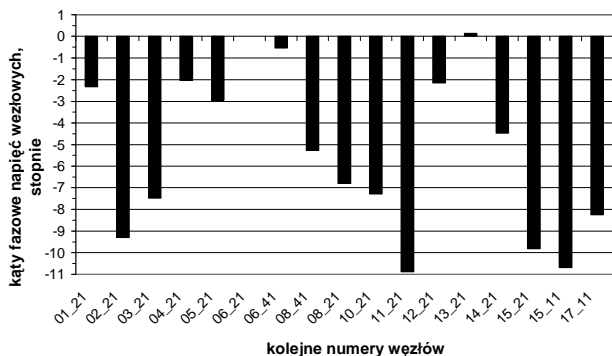


Tablica 1. Dane węzłów fragmentu systemu elektroenergetycznego (SEE)

Węzeł		Odbiór		Generacja	
nazwa	typ	MW	Mvar	MW	Mvar
01_21	2	0,0	0,0	180,0	76,9
02_21	1	-60,0	-100,0	0,0	0,0
03_21	1	-120,0	-120,0	0,0	0,0
04_21	2	0,0	0,0	200,0	104,1
05_21	1	-150,0	-160,0	0,0	0,0
06_21	4	0,0	0,0	138,6	-77,0
06_41	2	0,0	0,0	100,0	100,0
08_41	1	0,0	0,0	0,0	0,0
08_21	1	-300,0	-200,0	0,0	0,0
10_21	2	-140,0	-120,0	250,0	250,0
11_21	1	-20,0	-80,0	0,0	0,0
12_21	2	-100,0	-100,0	300,0	220,0
13_21	2	0,0	0,0	260,0	80,8
14_21	1	-160,0	-140,0	0,0	0,0
15_21	1	-40,0	-100,0	0,0	0,0
15_11	1	-70,0	-30,0	0,0	0,0
17_11	2	0,0	0,0	50,0	20,0



Rys. 3. Moduły napięć węzłowych ( $U$ ) w systemie elektroenergetycznym (rysunek 2)



Rys. 4. Kąty fazowe ( $\delta$ ) napięć węzłowych w systemie elektroenergetycznym (rysunek 2)

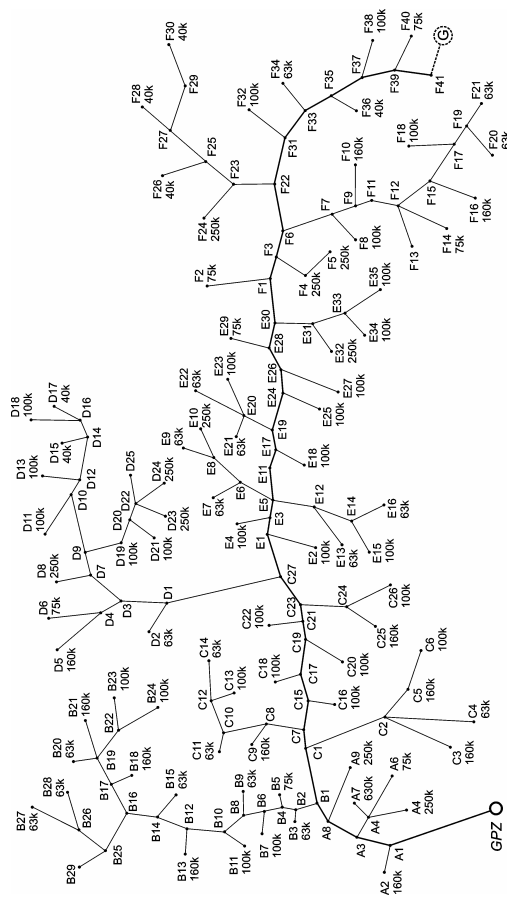
Zapotrzebowanie mocy czynnej we fragmencie SEE przedstawionego na rysunku 2 wynosi 1460 MW. Zapotrzebowanie mocy biernej wynosi 1241,57 Mvar. Straty mocy czynnej i biernej w gałęziach wynoszą odpowiednio 18,85 MW i -373,49 Mvar co wynika z generacji mocy biernej na pojemnościach doziemnych sieci. Całkowite obciążenie SEE mocą czynną i bierną to 1478,85 MW i 868,08 Mvar. Wytwarzanie mocy czynnej i biernej w węzłach SEE wynosi odpowiednio 1479,20 MW i 867,44

Mvar. Generacja mocy biernej w liniach przesyłowych 537,93 Mvar. Niezbilansowanie sieci: 0,357 MW i -0,637 Mvar.

### 2.3 Obliczanie rozplywów mocy w sieciach dystrybucyjnych

Konieczność analizy rozplywów mocy w sieciach dystrybucyjnych pojawiła się z chwilą przyłączenia do tej sieci generacji rozproszonej. Służby Spółek Dystrybucyjnych przed wydaniem „warunków technicznych” dotyczących przyłączenia dodatkowego źródła oczekiwały od potencjalnego inwestora analizy wpływu pracy tego źródła na sieć. Przy opracowywaniu tego typu analiz, bezpośrednie wykorzystanie istniejących programów komputerowych do analizy rozplywów mocy nie sprawdziło się (za małą dokładność obliczeń). Bilans mocy czynnej z dokładnością do 1 MW nie był do przyjęcia w obliczeniach sieci dystrybucyjnej [4].

Na rysunku 5 przedstawiono rozległą sieć dystrybucyjną z przyłączonym dodatkowym źródłem mocy w węzle F41.



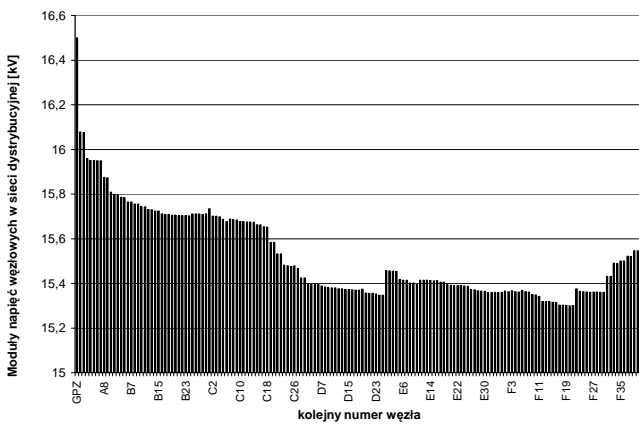
Rys. 5. Rozległa terenowa sieć dystrybucyjna (w węzle F41 przyłączono dodatkowe źródło o mocy 1MW)

Rozległy, terenowy obwód sieci 15 kV (rysunek 5) jest opisany następującymi podstawowymi parametrami: długość magistrali 22,15 km, przekrój magistrali AFL 70 mm<sup>2</sup>, długość odgałęzień 67,53 km, przekrój odgałęzień AFL 35 mm<sup>2</sup>, liczba zasilanych stacji SN/nn 83 sztuki, całkowita moc znamionowa transformatorów 9430 kVA, obciążenie w szczyście zimowym 3683,4 kVA.

Do obliczeń rozplywowych przyjęto następujące założenia:

- zaciski średniego napięcia transformatora 110/15 kV stanowią węzeł bilansujący o znanym napięciu (węzeł nr 4 w programie do rozptyłów mocy),
- obciążenie poszczególnych stacji jest proporcjonalne do udziału ich mocy znamionowej w sumie mocy znamionowych stacji przyłączonych do obwodu (węzły nr 1 w programie rozptywowym),
- obciążenie wszystkich stacji SN/nn charakteryzuje się jednakowym współczynnikiem mocy wynoszącym 0,9,
- dodatkowe źródło mocy modelowane jest jako wymuszenie mocy czynnej (węzeł nr 1 w programie rozptywowym).

Wykonano obliczenia rozptyłów mocy dedykowanym programem ROZPŁYW [5] z wykorzystaniem metody Gausa. Do elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej przyłączono lokalną elektrownię (węzeł F41) o parametrach: maksymalna moc elektrowni 1 MW, współczynnik mocy  $\cos\phi_e=1$ . Na rysunkach 6 i 7 przedstawiano moduły napięć węzłowych i kąty fazowe napięć węzłowych (wektor stanu). Liczba wykonanych iteracji: 22791 przy dokładności obliczeń – błąd względny bilansu mocy ( $P/P_n$ ) =  $9.64 \cdot 10^{-11}$ .



Rys. 6. Moduły napięć węzłowych ( $U$ ) w sieci dystrybucyjnej (rysunek 5)

### 3. WNIOSKI KOŃCOWE

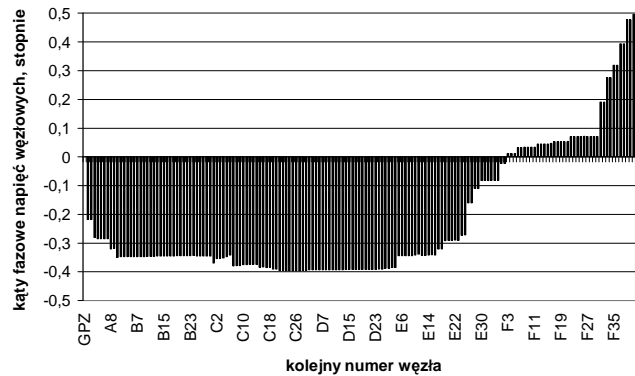
Obliczenia rozptyłów mocy w układach elektroenergetycznych są najczęściej wykonanymi obliczeniami umożliwiającymi określenie parametrów układu elektrycznego w stanach ustalonych.

Duża liczba iteracji potrzebna do obliczenia wektora stanu z dostateczną dokładnością powoduje konieczność

przewodzenia obliczeń na komputerach z wykorzystaniem odpowiednich programów rozptylowych.

Rozwój generacji rozproszonej i specyfika sieci rozdzielczej (mniejsze moce, układy sieci typu drzewo) spowodowały konieczność tworzenia programów komputerowych dedykowanych do obliczeń w tej sieci.

Przeprowadzone badania wykazały przydatność prezentowanych programów komputerowych PLANS i ROZPŁYW do analizy rozptyłów mocy.



Rys. 7. Kąty fazowe ( $\delta$ ) napięć węzłowych w sieci dystrybucyjnej (rysunek 5)

### 4. BIBLIOGRAFIA

1. Kremens Z., Sobierajski M.: Analiza systemów elektroenergetycznych. Warszawa WNT 1996, ISBN 83-240-2060-1.
2. Bergen Arthur R., Vittal V.: Power Systems Analysis. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458 2000, ISBN 0-13-691990-1.
3. Jedynek P., Janus M.: Przyłączenie dużych farm wiatrowych do sieci 110 kV. Praca dyplomowa AGH, Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki, Kraków, 2007.
4. Kacejko P.: Generacja rozproszona w systemie elektroenergetycznym, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004, ISBN 83-89246-92-9.
5. Pawłowski Ł.: Obliczanie rozptyłów prądów i mocy w sieciach elektroenergetycznych. Praca dyplomowa AGH, Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki, Kraków, 2004.

## COMPUTER METHODS OF THE ANALYSIS OF LOAD FLOW IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

**Keywords:** load flow, power systems, distribution network, dispersed generation

In the paper the application of dedicated computer programs for the calculation of the load flow in electric power systems is presented. Due to the size of the task as well as non-linearity of the equations describing the dependences of the nod-powers, the load flows are calculated with the use of an iteration-method of solving non-linear equations. The result of the calculations is a vector of no-loads enabling the computation of the parameters of the analyzed system. The installation of dispersed power sources in electric power distribution networks causes the necessity of calculating load flows also in such networks. The paper contains some results of computations of the load flows for a fragment of a power electric system and a distribution network in which there is installed a dispersed power source. The analyses show the usefulness of the dedicated computer programs for analyzing the load flow.