

## STRATY MOCY W SIECIACH DYSTRYBUCYJNYCH Z GENERACJĄ ROZPROSZONĄ

Janusz BROŻEK<sup>1</sup>, Wojciech BĄCHOREK<sup>2</sup>, Waldemar SZPYRA<sup>3</sup>

1. Akademia Górniczo – Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel: 012 617 3772 fax: 012 634 57 21 e-mail: jbroz@agh.edu.pl
2. Akademia Górniczo – Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel: 012 617 2599 fax: 012 634 57 21 e-mail: wojbach@agh.edu.pl
3. Akademia Górniczo – Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel: 012 617 3247 fax: 012 634 57 21 e-mail: wszpyra@agh.edu.pl

**Streszczenie:** Wprowadzenie dodatkowego źródła mocy czynnej (generacji rozproszonej GR) do układu zasilania elektroenergetycznej sieci średniego napięcia zmienia jej stan pracy. Praca dodatkowych źródeł mocy czynnej GR również wpływa na straty mocy i energii w sieci, przy czym końcowy efekt, w postaci zmniejszenia lub zwiększenia strat, zależy od mocy źródła i miejsca jego lokalizacji w sieci elektroenergetycznej.

**Słowa kluczowe:** elektroenergetyczna sieć dystrybucyjna, straty mocy i energii, źródła rozproszone.

### 1. WSTĘP

Generacja rozproszona (GR) (skrót, ang. DG - dispersed generation, distributed generation), to źródła mocy czynnej zlokalizowane w otoczeniu odbiorców. W artykule zakłada się, że są to źródła, których generacja nie jest uzależniona od czynników losowych (np. meteorologicznych), a ich moc maksymalna nie przekracza 5 MW.

Praca dodatkowych źródeł GR w sieci elektroenergetycznej może zmniejszyć odchylenia napięcia w sieci oraz zwiększyć niezawodność dostawy energii. W przypadku sieci o zbyt dużych odchyleniach napięcia lub zbyt małej pewności zasilania budowa lokalnych źródeł energii stanowi alternatywę dla modernizacji istniejącej sieci lub/i nowych inwestycji sieciowych.

Praca GR wpływa również na straty mocy i energii w sieci, przy czym końcowy efekt w postaci zmniejszenia lub zwiększenia strat zależy od mocy źródła i miejsca jego lokalizacji w sieci elektroenergetycznej [1].

Badanie wpływu pracy lokalnego źródła mocy na straty mocy można wykonać następującymi sposobami:

- 1) Obliczenie rozptyłu prądów i mocy w sieci elektroenergetycznej dla dwóch wariantów pracy sieci (układ z włączonym i wyłączonym dodatkowym źródłem mocy) i porównanie otrzymanych wyników ze względu na straty mocy. Metoda wymaga pełnych informacji o sieci elektroenergetycznej potrzebnych do wykonania obliczeń rozptyłów mocy (*metoda rozptyłów*).
- 2) Estymacja strat mocy w sieci elektroenergetycznej w oparciu o model liniowy sieci (równomierne obciążenie

na całej długości linii) z dodatkowym źródłem mocy GR. Metoda wykorzystuje informacje o obciążeniu i strukturze obwodu (wartość prądu wpływającego do obwodu, długość i rezystancja linii) oraz dane dotyczące mocy i miejsca lokalizacji źródła GR w sieci. Obliczenia dają wyniki przybliżone (*metoda estymacji*).

- 3) Szacowanie wpływu generacji rozproszonej na zmianę strat w sieci. Obliczenia bazują na parametrach (rezystancji) układu oraz na informacjach o przepływach energii przez elementy sieci. Obliczenia dają wyniki przybliżone (*metoda szacowania*).

### 1.1. Założenia przyjęte do obliczeń

Dla przeprowadzenia ilościowej analizy strat mocy w sieciach dystrybucyjnych średniego napięcia (SN) zawierających źródła generacji rozproszonej przyjęto następujące założenia:

- (1) znane są parametry poszczególnych odcinków toru głównego i odgałęzień linii średniego napięcia;
- (2) znane są moce znamionowe transformatorów w stacjach SN/nn;
- (3) dodatkowe źródła mocy przyłączane są do wybranych węzłów sieci SN;
- (4) obciążenie wszystkich stacji SN/nn charakteryzuje się jednakowym współczynnikiem mocy  $\cos\varphi = 0.9$ ;
- (5) obciążenie stacji transformatorowych SN/nn jest iloczynem mocy znamionowej transformatora i stopnia obciążenia obwodu (stopień obciążenia obwodu jest tu rozumiany jako stosunek mocy wpływającej do obwodu do sumy mocy znamionowych transformatorów);
- (6) dodatkowy generator jest modelowany jako źródło mocy czynnej przyłączone do wybranego węzła sieci rozdzielczej SN.

### 1.2. Model elektroenergetycznej sieci rozdzielczej

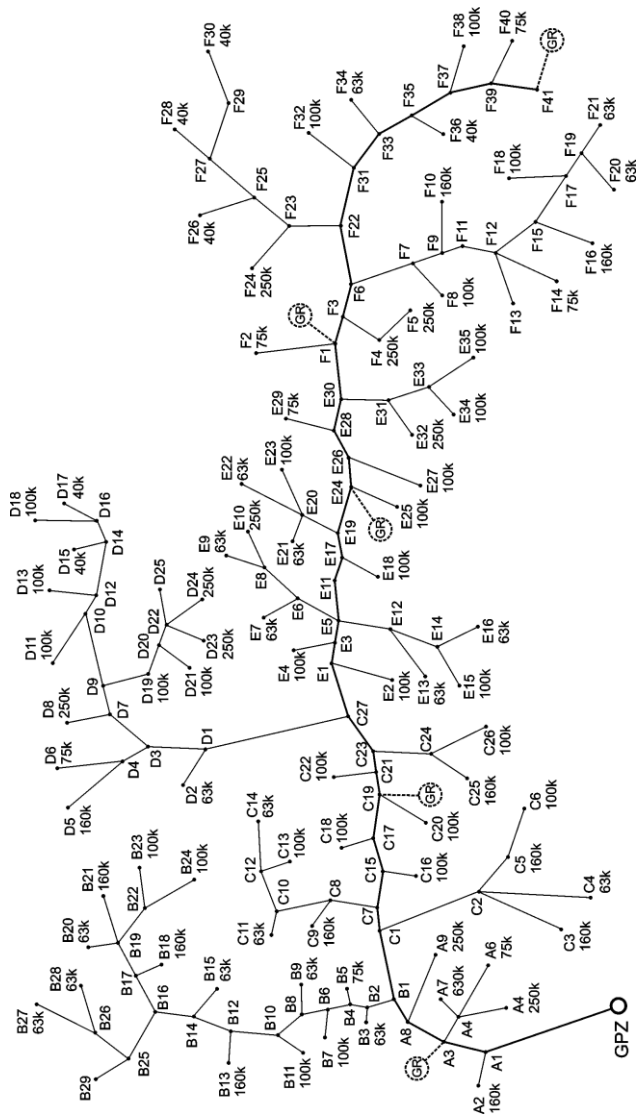
Na rysunku 1 przedstawiono plan sieci elektroenergetycznej typu drzewo o następujących parametrach:

- długość magistrali – 29 km,

- przekrój przewodów magistrali – AFL 70 mm<sup>2</sup>,
- długość odgałęzień – 67,53 km,
- przekrój przewodów odgałęzień – AFL 35 mm<sup>2</sup>,
- liczba zasilanych stacji SN/nn – 83 sztuk,
- całkowita moc znamionowa transformatorów SN/nn – 9430 kVA,
- obciążenie w szczycie zimowym – 3683,4 kVA.

Do tej sieci planuje się włączenie elektrowni o następujących parametrach:

- moc przyłączanych elektrowni: 0,37; 1,0; 2,0; 3,0; 3,75 lub 5,0 MW,
- współczynnik mocy  $\cos\phi = 1$  w całym zakresie generacji (0,37 ÷ 5,0 MW).



Rys. 1. Obwód terenowej sieci dystrybucyjnej średniego napięcia wraz z podaną lokalizacją przyłączenia rozproszonych źródeł mocy GR

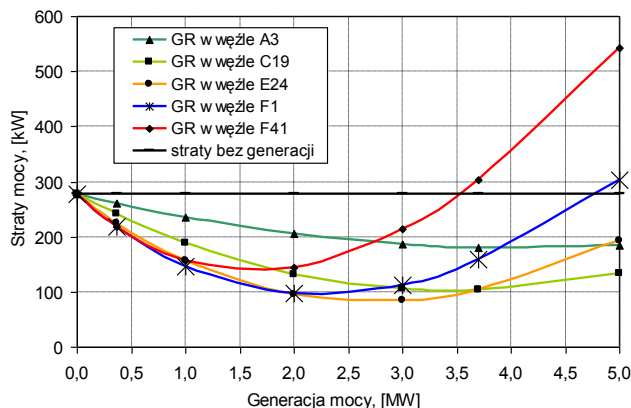
Punkty przyłączenia dodatkowych źródeł (GR) pokazano na rysunku 1.

## 2. BADANIA WPLYWU DODATKOWYCH ŹRÓDEŁ MOCY NA STRATY MOCY W SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

### 2.1. Analiza wpływu dodatkowego źródła mocy na straty mocy w sieciach elektroenergetycznych przy zastosowaniu programów do obliczeń rozpliwów mocy, (metoda rozpliwów)

Dla wyznaczenia strat mocy w sieci dystrybucyjnej w zależności od mocy i miejsca lokalizacji źródła mocy wykorzystano dedykowane programy do obliczeń rozpliwu mocy i prądów w sieci średniego napięcia [2], [3].

Na rysunku 2 pokazano zależność strat mocy czynnej w sieci SN od mocy dostarczanej przez dodatkowe źródło przyłączone w wybranych punktach toru głównego sieci. Liniją przerywaną zaznaczono straty mocy w analizowanej sieci bez dodatkowych źródeł GR.



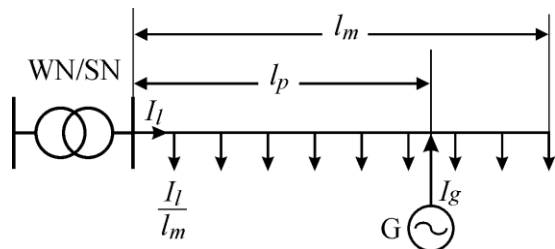
Rys. 2. Straty mocy czynnej w sieci SN po przyłączeniu dodatkowych źródeł mocy GR w wybranych punktach toru głównego sieci

Zgodnie z oczekiwaniami, straty mocy w sieci z dodatkową generacją zależą od lokalizacji źródła i jego mocy. Dodatkowe źródło o mocy nie większej niż szczytowe obciążenie obwodu zmniejsza straty mocy w obwodzie. Źródło o mocy większej niż obciążenie szczytowe obwodu może spowodować zwiększenie strat mocy w obwodzie w przypadku jego lokalizacji w odległym od GPZ węźle sieci. Wpływ źródła na straty energii zależy od wzajemnej relacji zmienności obciążenia odbiorów oraz zmienności mocy dostarczanej przez źródło.

### 2.2. Estymacja strat mocy w sieci elektroenergetycznej o obciążeniu równomiernie rozłożonym wzdłuż linii z dodatkowym źródłem mocy, (metoda estymacji)

Rozważa się magistralę linii średniego napięcia o długości  $l$  pobierającą z GPZ prąd  $I_l$  [4]. Do tej magistrali w odległości  $l_p$  od GPZ przyłącza się lokalne źródło energii dostarczające do niej prąd  $I_g$ . Model rozważanej sieci przedstawia rysunek 3.

Straty mocy czynnej  $\Delta P$  w takiej sieci oblicza się z zależności (1). Wpływ na zmianę strat mocy  $\Delta\Delta P$  dodatkowego źródła w sieci elektroenergetycznej o obciążeniu równomiernym, oblicza się z zależności (2).



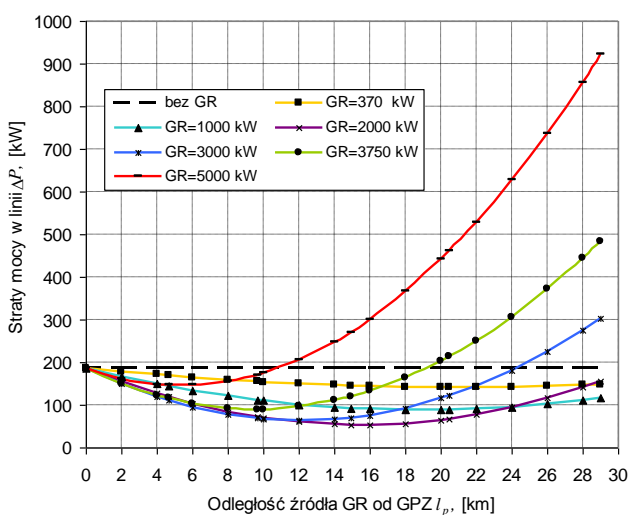
Rys.3. Magistrala z obciążeniem rozłożonym równomiernie i lokalnym źródłem energii

$$\Delta P = \left\{ \begin{array}{l} I_l^2 l_m + 3I_g^2 l_p - 6I_l I_g l_p \times \\ \left( \cos \varphi_l \cos \varphi_g + \sin \varphi_l \sin \varphi_g \right) \left( 1 - \frac{l_g}{2l_m} \right) \end{array} \right\} r_0 \quad (1)$$

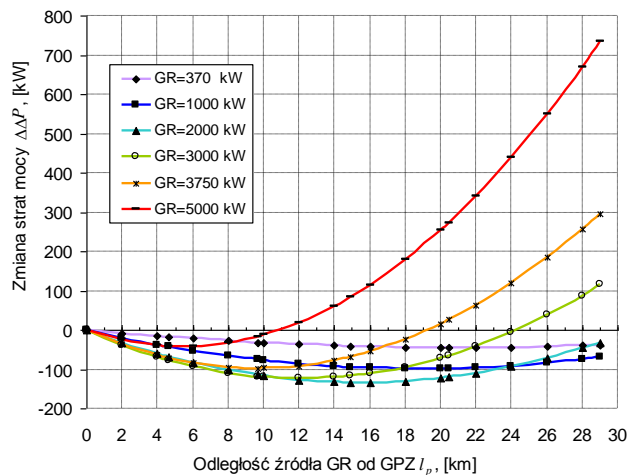
$$\Delta \Delta P = \left\{ \begin{array}{l} 6I_l I_g l_p \left( \cos \varphi_l \cos \varphi_g + \sin \varphi_l \sin \varphi_g \right) \times \\ \left( 1 - \frac{l_p}{2 \cdot l} \right) - 3l_p I_g^2 \end{array} \right\} r_0 \quad (2)$$

gdzie:  $I_l$  – moduł prądu wpływającego do linii z GPZ, [A];  $I_g$  – moduł prądu wpływającego do linii lokalnego źródła, [A];  $\cos \varphi_l$  – współczynnik mocy prądu wpływającego do linii z GPZ;  $\cos \varphi_g$  – współczynnik mocy prądu wpływającego do linii z lokalnego źródła;  $l_p$  – odległość punktu przyłączenia lokalnego źródła od GPZ, [km];  $l_m$  – długość toru głównego sieci, [km];  $r_0$  – rezystancja jednostkowa, [ $\Omega$ /km].

Dla danych modelu sieci z rysunki 1 wyliczono straty mocy  $\Delta P$  według zależności (1) oraz znamię strat mocy  $\Delta \Delta P$  z zależności (2) w funkcji odległości dodatkowego źródła od GPZ dla różnych wartości  $l_p$  oraz od wielkości mocy generowanej przez źródło ( $P_{GR} \in \{370, 1000, 2000, 3000, 3750, 5000\}$  kW). Wyniki przedstawiono na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Straty mocy czynnej  $\Delta P$  w sieci elektroenergetycznej (model liniowy) w funkcji odległości punktu przyłączenia źródła od GPZ przy różnych wartościach mocy dostarczanej przez źródło mocy czynnej



Rys. 5. Zmiany strat mocy czynnej  $\Delta \Delta P$  w sieci elektroenergetycznej (model liniowy) w funkcji odległości punktu przyłączenia źródła od GPZ przy różnych wartościach mocy dostarczanej przez źródło

### 2.3. Metoda szacowania wpływu generacji rozproszonej na zmniejszenie strat mocy i energii w sieciach rozdzielczych, (metoda szacunkowa).

Straty obciążeniowe (prądowe) w elemencie sieci oblicza się z zależności:

$$\Delta P_{obc} = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_p + \Delta P_Q \quad (3)$$

gdzie:  $R$  – rezystancja linii, [ $\Omega$ ];  $P$  – przesyłana moc czynna, [MW];  $Q$  – przesyłana moc bierna, [Mvar]  $U$  – napięcie międzyfazowe, [kV];  $\Delta P_p$  – straty mocy czynnej pochodzące od przepływu mocy czynnej, [MW];  $\Delta P_Q$  – straty mocy czynnej pochodzące od przepływu mocy biernej, [MW].

Stosowanie wzoru (3) wymaga znajomości rozplywu mocy. Nie znając rozplywu mocy, straty mocy czynnej  $\Delta P_p$  wywołane przepływem mocy czynnej  $P$ , można obliczyć według [5] w sposób uproszczony (szacunkowy), przy czym:

- zakłada się, że moc czynna dodatkowego źródła jest znacznie mniejsza od mocy czynnej płynącej w sieci w węzle przyłączenia,
- zmniejszenie strat mocy i energii od generacji rozproszonej oblicza się z następujących zależności:

$$\Delta P_p = k_p \cdot P \quad (4)$$

gdzie:  $k_p$  – współczynnik strat mocy czynnej od przepływu mocy czynnej  $P$ , oblicza się w zależności (współczynniki strat układu złożonego z  $n$  szeregowych elementów, są równe sumie  $n$  współczynników):

$$k_p = \frac{\partial \Delta P}{\partial P} = \frac{2RP}{U^2} \quad (5)$$

Korzystając ze wzorów (4, 5) można obliczyć wpływ przepływu mocy na zmianę strat mocy czynnej w obwodzie, a więc również od mocy wprowadzonej do sieci rozdzielczej przez źródła generacji rozproszonej.

Współczynnik strat  $k_p$  jest zależny między innymi od wielkości przepływu mocy czynnej  $P$ , która jest zmienna w czasie. Wygodnie jest, więc operować pojęciem średniej mocy  $P_{sr}$ :

$$P_{sr} = \frac{A}{T} \quad (6)$$

gdzie:  $A$  – energia przepływająca przez element sieci w rozpatrywanym okresie czasu  $T$ .

Wzór na współczynnik  $k_p$  przyjmie postać:

$$k_p = \frac{2A R}{U^2 T} \quad (7)$$

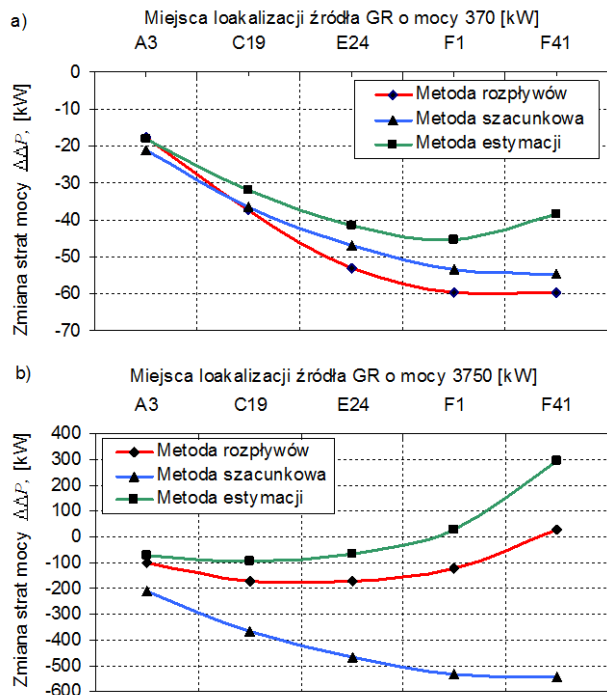
Dla danych modelu sieci z rysunku 1 obliczono straty mocy  $\Delta P$  wg zależności (4) oraz straty mocy  $\Delta\Delta P$  dla dwóch wartości mocy generowanej (GR) 370 kW i 3750 kW. Wyniki obliczeń przedstawia rysunek 6.

#### 2.4. Porównanie metod

Dla porównania wyników obliczeń otrzymywanych przy użyciu wymienionych metod wykonano obliczenia dla danych sieci elektroenergetycznej (rysunek 1). Wyniki przedstawiano na rysunkach 6a i 6b.

### 3. WNIOSKI KOŃCOWE

- Dodatkowe źródło mocy GR w sieci dystrybucyjnej zmienia rozpliw mocy w tej sieci, co wiąże się ze zmianą – najczęściej zmniejszeniem – strat mocy. Wielkość zmian zależy od miejsca lokalizacji w sieci dodatkowego źródła, jego mocy oraz stopnia obciążenia sieci (rysunek 6a i b).
- Źródła GR o mocach porównywalnych z obciążeniem szczytowym sieci i zlokalizowane daleko od GPZ, mogą zwiększyć straty mocy w sieci (rysunek 6b).
- Dokładne obliczenia strat mocy w sieciach dystrybucyjnych z dodatkowym źródłem GR o dowolnej mocy i lokalizacji w sieci, wymagają stosowania dedykowanych programów do obliczeń rozpliwów mocy.
- Przedstawione metody „szacunkowa” i „estymacji”, mogą być stosowane tylko do obliczeń przybliżonych. Wyniki uzyskiwane tymi metodami są zbyt rozbieżne w odniesieniu do wyników uzyskiwanych metodą „rozpliwów” (rysunki 6a i b).



Rys. 6. Porównanie, uzyskanych różnymi metodami, wyników obliczeń zmiany strat mocy  $\Delta\Delta P$  w sieci elektroenergetycznej z dodatkowym źródłem GR w zależności lokalizacji źródła: a) moc źródła GR 370 kW; b) moc źródła GR 3 750 kW

### 4. BIBLIOGRAFIA

1. Praca zbiorowa pod red. Jerzego Kulczyckiego: Straty energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych, Poznań PTPiRE 2009, ISBN 978-83-925667-1-7.
2. Brożek J.: Wpływ generacji rozproszonej na straty mocy i energii w elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej, Przegląd Elektrotechniczny Nr 9 2006, s.101-103, ISSN 0033-2097.
3. Kremens Z., Sobierajski M.: Analiza systemów elektroenergetycznych, Warszawa WNT 1996, ISBN 83-204-2060-1.
4. Szypra W.: Uproszczony model sieci do obliczania strat mocy i spadków napięcia w terenowej sieci rozdzielczej średniego napięcia. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Optymalizacja w Elektroenergetyce”, Jachranka, 7-8 października 1999, s. 125-134.
5. Kulczycki J.: Metoda obliczania wpływu generacji rozproszonej na straty w sieciach rozdzielczych. Materiały III Konferencja Naukowo Techniczna, Straty energii elektrycznej w spółkach dystrybucyjnych, Jelenia Góra, 20-21 października 2005, s. 85-88.

## POWER LOSS IN DISTRIBUTION NETWORKS WITH DISPERSED GENERATION

**Keywords:** electric power distribution network, power loss, dispersed generation

The addition of an active power source (of dispersed generation) to a medium voltage electric power network changes the state of its operation. In the paper, the influence of dispersed generation on the active power loss in distribution network is analyzed. The results show that the changes of active power loss in an electric power network with dispersed generation depend on the source's load and its location within the network.