

ZARZĄDZANIE PRACĄ MINISYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO NISKIEGO NAPIĘCIA ZE WZGLĘDU NA MINIMALNĄ MOC STRAT

Sławomir Cieślik

Słowa kluczowe: smart-grid, elektroenergetyczne sieci dystrybucyjne, zarządzanie energią

Streszczenie. Rozwój inteligentnych elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych (smart-grid) musi przynosić wymierne korzyści, a nie tylko satysfakcję z gromadzenia bardzo dużych ilości danych, z którymi nie wiadomo co zrobić. W Polsce stoimy przed koniecznością opracowania nowej koncepcji systemu energetycznego, uwzględniającej fakt braku paliw kopalnych (może już w roku 2050). W koncepcji nowego systemu zmianie ulegnie wiele kwestii, również dotyczących zarządzania pracą minisystemów elektroenergetycznych. Operator utraci monopolistyczną pozycję i będzie musiał zarządzać pracą mikrosystemów elektroenergetycznych z wymiernymi korzyściami dla wszystkich interesariuszy. W artykule omówiono problem zarządzania pracą mikrosystemu elektroenergetycznego niskiego napięcia z dyskusją dotyczącą straty energii elektrycznej oraz mocy strat.

1. WSTĘP

Problem koncepcji przyszłego polskiego systemu elektroenergetyki został poruszony przez autora w artykule [1]. Aktualne prognozy wystarczalności paliw kopalnych na świecie wskazują, że przy zakładanym poziomie zużycia energii, węgla wystarczy na ok. 130 lat, ropy naftowej na 50 lat i gazu ziemnego również na ok. 50 lat. Mowa jest o zasobach światowych, i w tym kontekście perspektywa nawet 100 lat jest już bardzo bliska. Czynnikiem decydującym w pozyskiwaniu paliw kopalnych będą koszty ich wydobywania (nie licząc nawet kosztów dodatkowych związanych z ich spalaniem), które rosną, ponieważ „łatwe” do wydobywania złoża się kończą już teraz. W związku z tym zasadne jest założenie, że w roku 2050 nie będzie już żadnych paliw kopalnych i w tej perspektywie należy określić nową strukturę i nowe zasady funkcjonowania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego.

Nowy Krajowy System Elektroenergetyczny powinien opierać się na trzech filarach: 1) zdecydowanie zwiększonej efektywności energetycznej wszystkich teraźniejszych i przyszłych obszarów (sektorów) wytwarzania, przesyłania, magazynowania i użytkowania energii elektrycznej, 2) źródłach energii odnawialnej z możliwie największą sprawnością energetyczną (wyeliminowanie wielostopniowego przetwarzania energii, w tym spalania na rzecz przetwarzania jednostopniowego) oraz 3) wykorzystaniu sztucznej inteligencji i technik wirtualizacji do optymalnego, w tym znaczeniu efektywnego zarządzania systemem wytwarzania, przesyłania, magazynowania i użytkowania energii elektrycznej. Te trzy filary muszą być osadzone na mocnym gruncie pod względem następujących, wszystkich trzech aspektów: energetycznym, środowiskowym i ekonomicznym. Wszystkie działa-

nia w tym zakresie muszą obowiązkowo uwzględniać te trzy elementy. Z tego wynika cały katalog działań w różnych obszarach nauki oraz zaawansowanej techniki i inżynierii, których celem jest opracowanie: 1) koncepcji nowego polskiego systemu elektroenergetycznego (tego, który będzie w roku 2050) oraz 2) trajektorii, drogi transformacji polskiej energetyki ze stanu teraźniejszego do stanu postulowanego w roku 2050.

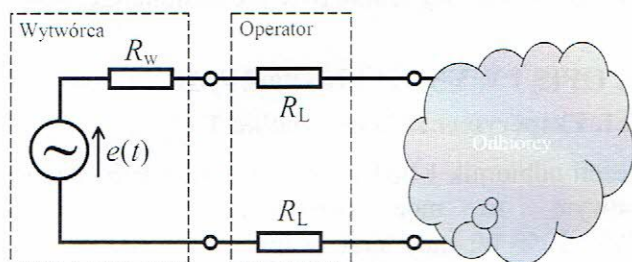
Jednym z kluczowych aspektów jest prognoza i rzeczywisty poziom popytu na energię elektryczną w nowym systemie elektroenergetycznym. Aby móc przewidywać zmiany zapotrzebowania na energię do roku 2050, należy ocenić, czy czynniki zwiększające popyt, tj. rosnąca liczba urządzeń, elektromobilność itp. będą miały silniejszy wpływ niż czynniki zmniejszające popyt na energię, związane z efektywnością energetyczną. Na podstawie analiz dla niemieckiego systemu elektroenergetycznego, które znajdują odzwierciedlenie m.in. w zapisach dokumentu [2], można dowiedzieć się, że w pięciu na dziewięć scenariuszy dotyczących przyszłej niemieckiej energetyki zakłada się w horyzoncie lat 2030-35 niewielki spadek (!), a w czterech pozostałych utrzymanie lub niewielki wzrost konsumpcji energii elektrycznej. Zatem niezbędne jest zwiększenie poszanowania energii i dbanie o jak najmniejsze straty. Jest to wyzwanie dla operatorów przyszłych mikrosystemów elektroenergetycznych, zwłaszcza na niskim napięciu.

2. CHARAKTERYSTYKA PRZYPADKÓW

Rozpatrzmy przykładowy mikrosystem elektroenergetyczny, w którym mamy dwóch interesariuszy świadczących usługi wytwarzania (Wytwórca) i przesyłu (dystrybucji) energii elektrycznej (Operator) dla grupy pozostałych interesariuszy (Odbiorcy). Na po-

trzeby studium przypadków, zajmować będziemy się tylko wybranymi zagadnieniami energetycznymi z pominięciem zagadnień rozliczeń finansowych pomiędzy interesariuszami.

W pierwszej części rozpatrujemy minisystem elektroenergetyczny, którego schemat zastępczy przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat zastępczy rozpatrywanego minisystemu elektroenergetycznego

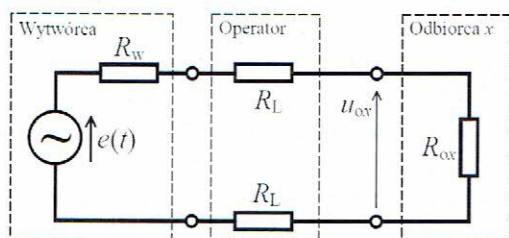
Dane są stałe wartości rezystancji wewnętrznej źródła napięcia $R_w = 325 \text{ m}\Omega$ oraz rezystancji jednej żyły linii $R_L = 418 \text{ m}\Omega$. Napięcie źródłowe opisane jest wzorem

$$e(t) = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_e), \quad (1)$$

gdzie: E_m – amplituda napięcia źródłowego, której wartość znamionowa E_{mN} jest równa 325 V (amplituda napięcia jest regulowana przez Operatora, możliwość zmian w przedziale $(0,85-1,2) \cdot E_{mN}$); ω – pulsacja napięcia, stała wartość $314 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$; ψ_e – faza początkowa napięcia, stała wartość 0,292 rad.

2.1. Przypadek 1

W pierwszym przypadku rozpatruje się przyłączenie Odbiorcy 1 (rys. 2, $x = 1$), który charakteryzuje się stałą wartością mocy czynnej $P_{o1} = 3250 \text{ W}$. Znamionowe napięcie odbiornika wynosi $U_{No1} = 230 \text{ V}$, ale odbiornik ten pracuje prawidłowo w przedziale napięć od $(0,5-1,2) \cdot U_{No1}$. Opis tego typu odbiorów oraz ich schematy zastępcze przedstawiono w [3,4].



Rys. 2. Schemat zastępczy rozpatrywanego minisystemu elektroenergetycznego, przypadki 1 i 2

Wymagania odbiorców energii elektrycznej w nowym systemie elektroenergetycznym są następujące: 1) odbiorniki Odbiorców muszą pracować poprawnie, 2) straty energii elektrycznej w liniach oraz źródle muszą być jak najmniejsze. Drugie wymaganie wy-

nika ze zwiększenia świadomości Odbiorców o funkcjonowaniu systemu elektroenergetycznego, zwłaszcza aspektów zwiększenia efektywności energetycznej i to w każdym sektorze związanym z energią elektryczną (wytwarzanie, przesyłanie, dystrybucja, magazynowanie i użytkowanie). Nowy system elektroenergetyczny i zmiana świadomości konsumentów/prosumentów wymusi diametralną zmianę wymagań Odbiorców względem Operatorów.

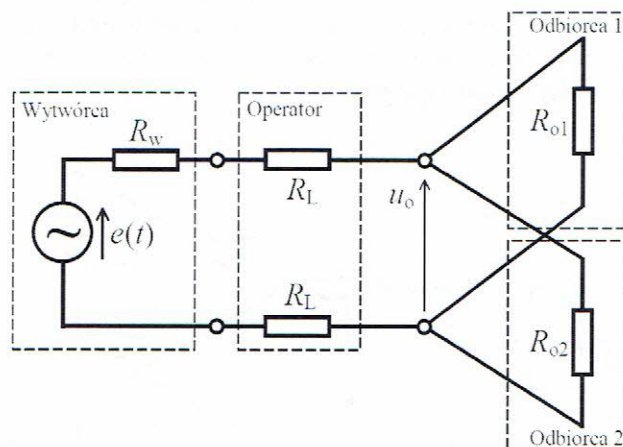
Odbiorca nie ma wpływu na zarządzanie pracą rozpatrywanego minisystemu elektroenergetycznego. Tylko Operator może oddziaływać na zmianę amplitudy napięcia w źródle.

2.2. Przypadek 2

W drugim przypadku rozpatruje się przyłączenie Odbiorcy 2 (rys. 2, $x = 2$), który charakteryzuje się stałą wartością rezystancji $R_{o2} = 16,277 \Omega$ (takiej, przy której odbiornik 1 pracował przy znamionowym napięciu). Znamionowe napięcie odbiornika wynosi $U_{No2} = 230 \text{ V}$, ale odbiornik ten pracuje prawidłowo w przedziale napięć od $(0,9-1,1) \cdot U_{No2}$. Wymagania Odbiorcy 2 są identyczne jak podane dla przypadku 1.

2.3. Przypadek 3

W trzecim przypadku rozpatruje się przyłączenie Odbiorców 1 i 2 we wspólnym węźle (rys. 3). Charakterystyki odbiorów 1 i 2 są takie same jak podano w opisie przypadków 1 i 2.



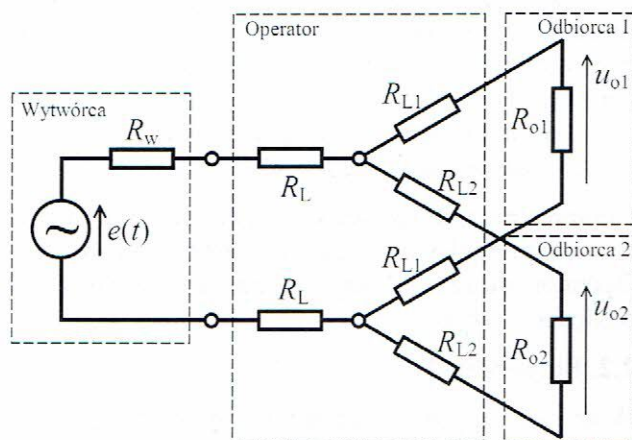
Rys. 3. Schemat zastępczy rozpatrywanego minisystemu elektroenergetycznego, przypadek 3

Obaj Odbiorcy są zainteresowani tym, aby ich odbiorniki pracowały poprawnie oraz żeby straty energii w linii oraz źródle były jak najmniejsze.

2.4. Przypadek 4

W czwartym przypadku rozpatruje się przyłączenie Odbiorców 1 i 2 po rozgałęzieniu linii L na dwa odcinki, odpowiednio L1 ($R_{L1} = 313 \text{ m}\Omega$) i L2 ($R_{L2} = 2 \cdot R_{L1} = 626 \text{ m}\Omega$). Schemat pokazano na rys. 4.

Charakterystyki odbiorów 1 i 2 są takie same jak podano w opisie przypadków 1 i 2. Fragment linii L jest również taki sam.

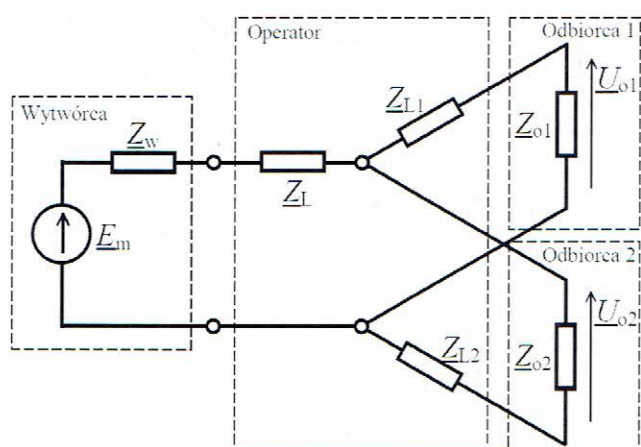


Rys. 4. Schemat zastępczy rozpatrywanego minisystemu elektroenergetycznego, przypadek 4

Obaj Odbiorcy są zainteresowani tym, aby ich odbiorniki pracowały poprawnie oraz żeby straty energii w linii oraz źródle były jak najmniejsze.

2.5. Przypadek 5

W piątym przypadku rozpatruje się przyłączenie Odbiorców 1 i 2 po rozgałęzieniu linii L ($R_L = 321 \text{ m}\Omega$; $X_L = 72,3 \text{ m}\Omega$) na dwa odcinki, odpowiednio L1 ($R_{L1} = 225 \text{ m}\Omega$; $X_{L1} = 50,6 \text{ m}\Omega$) i L2 ($R_{L2} = 385 \text{ m}\Omega$; $X_{L2} = 86,8 \text{ m}\Omega$). Dane są stałe parametry źródła napięcia ($R_w = 10,1 \text{ m}\Omega$; $X_w = 39,6 \text{ m}\Omega$). Napięcie źródłowe określone jest wzorem (1) ze wszystkimi danymi wymienionymi po tym wzorze. Schemat analizowanego mikrosystemu pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Schemat zastępczy rozpatrywanego minisystemu elektroenergetycznego, przypadek 5

Odbiorca 1 posiada odbiornik charakteryzujący się stałą wartością mocy czynnej $P_{o1} = 8125 \text{ W}$, przy $\text{tg}\phi_{o1} = 0,150$. Znamionowe napięcie odbiornika wynosi $U_{No1} = 230 \text{ V}$, ale odbiornik ten pracuje prawidłowo w przedziale napięć od $(0,5-1,2) \cdot U_{No1}$.

Odbiornik 2 charakteryzuje się stałymi wartościami rezystancji $R_{o2} = 6,25 \Omega$ oraz reaktancji $X_{o2} = 1,94 \Omega$. Znamionowe napięcie odbiornika wynosi $U_{No2} = 230 \text{ V}$, natomiast odbiornik ten pracuje prawidłowo w przedziale napięć od $(0,9-1,1) \cdot U_{No2}$.

Obaj Odbiorcy są zainteresowani tym, aby ich odbiorniki pracowały poprawnie, przy tym żeby straty energii w linii oraz źródle były jak najmniejsze.

3. OPIS I WYNIKI EKSPERYMENTÓW

3.1. Eksperyment dla przypadku 1

Jeżeli odbiornik 1 będzie zasilany napięciem znamionowym, to moc odbiornika będzie równa $P_{o1} = 3250 \text{ W}$; moc strat w linii $\Delta P_L = 167 \text{ W}$; moc strat źródła $\Delta P_w = 65 \text{ W}$ oraz moc źródła napięcia $P = 3482 \text{ W}$. W tym przypadku amplituda napięcia źródła jest równa $348,5 \text{ V}$ ($1,072 \cdot E_{mN}$). Warunki pracy odbiornika są spełnione, ale sumaryczna moc strat nie będzie minimalna, zatem nie jest spełnione drugie, z wymienionych w sekcji 2.1 tego artykułu, wymaganie Odbiorcy 1. Aby spełnić to wymaganie należy zminimalizować natężenie prądu płynącego przez źródło i linię. W tym prostym układzie rozwiązanie jest tylko jedno, mianowicie zwiększenie amplitudy napięcia źródłowego tak, aby nie przekroczyć dopuszczalnych górnych wartości tego napięcia oraz napięcia zasilającego bezpośrednio odbiór 1. Wówczas otrzymamy następujące wyniki: moc odbiornika będzie równa $P_{o1} = 3250 \text{ W}$; moc strat w linii $\Delta P_L = 129 \text{ W}$; moc strat źródła $\Delta P_w = 50 \text{ W}$ oraz moc źródła napięcia $P = 3429 \text{ W}$. Amplituda napięcia źródła jest równa $390,0 \text{ V}$ ($1,2 \cdot E_{mN}$), natomiast napięcie zasilania odbiornika jest równe $261,3 \text{ V}$ ($1,136 \cdot U_{No1}$).

W kontekście energii elektrycznej, jeżeli potrzeba jest określonej ilości energii, np. do wykonania pracy, w tym przypadku założmy $6,5 \text{ kWh}$, to w tego typu odbiorniku, niezależnie od wartości napięcia zasilającego, odbiornik musi pracować przez 2 godziny. Pracując w tym czasie przy napięciu znamionowym spowoduje straty energii równe $0,464 \text{ kWh}$, natomiast pracując w warunkach optymalnych straty te będą równe $0,358 \text{ kWh}$ (77%). Gdyby napięcie w źródle było na poziomie minimalnym ($0,85 \cdot E_{mN}$), to straty energii będą równe $0,814 \text{ kWh}$ (175%, względem zasilania napięciem znamionowym; 227%, względem zasilania w warunkach optymalnych).

3.2. Eksperyment dla przypadku 2

Jeżeli odbiornik 2 będzie zasilany napięciem znamionowym, to uzyskamy takie same wartości, jak podane w pierwszej części punktu 3.1. Aby spełnić wymagania Odbiorcy 2 należy zminimalizować natężenie prądu płynącego przez źródło i linię. W tym prostym

układzie również rozwiązanie jest oczywiste, i tylko jedno, mianowicie zmniejszenie amplitudy napięcia źródłowego tak, aby nie przekroczyć dopuszczalnych dolnych wartości tego napięcia oraz napięcia zasilającego bezpośrednio odbiór 2. Wówczas otrzymamy następujące wyniki: moc odbiornika będzie równa $P_{o2} = 2632$ W; moc strat w linii $\Delta P_L = 135$ W; moc strat źródła $\Delta P_w = 53$ W oraz moc źródła napięcia $P = 2820$ W. Amplituda napięcia źródła jest równa $313,6$ V ($0,965 \cdot E_{mN}$), natomiast napięcie zasilania odbiornika jest równe $207,0$ V ($0,9 \cdot U_{No2}$). W ten sposób uzyskuje się również to, że odbiór 2 pracuje przy możliwie najniższej wartości napięcia zasilania, co przy stałej wartości rezystancji powoduje, że pracuje z minimalną mocą.

W kontekście energii elektrycznej, jeżeli do wykonania pracy potrzebne jest zużycie energii równej $6,5$ kWh, to ten typ odbiornika musi pracować przez 2 godziny zasilany napięciem znamionowym. Natomiast w warunkach optymalnych musi pracować przez $2,47$ godziny. Pracując w czasie 2 h przy napięciu znamionowym spowoduje straty energii równe $0,464$ kWh, natomiast pracując w warunkach optymalnych ($2,47$ h) straty te nie zmieniają się, będą równe $0,464$ kWh. Przy maksymalnej wartości napięcia na odbiorniku 2, czas pracy będzie równy $1,65$ h, a straty energii elektrycznej będą takie same.

Zauważmy, że w zależności od charakterystyki odbiornika reakcja Operatora jest jakościowo skrajnie różna w celu zminimalizowania mocy strat. W przypadku 1 zwiększa się amplitudę napięcia źródłowego, w przypadku 2 zmniejsza. W kontekście strat energii elektrycznej otrzymuje się wymierny efekt tej reakcji tylko dla odbioru 1.

3.3. Eksperyment dla przypadku 3

Jeżeli odbiorniki 1 i 2 będą zasilane napięciem znamionowym (napięcie zasilania tych dwóch odbiorników jest takie samo), to uzyskamy dla odbiorów takie same wartości, jak podane w pierwszej części punktu 3.1, ale moce strat w linii i wewnątrz źródła będą czterokrotnie wyższe ($\Delta P_L = 668$ W; $\Delta P_w = 260$ W), co powoduje, że moc źródła napięcia $P = 7428$ W. Dla takiego stanu napięcie źródłowe wynosi $371,7$ V ($1,144 \cdot E_{mN}$).

Dla spełnienia wymagań obu Odbiorców już w tym przypadku nie da się skrajnie zwiększyć amplitudy napięcia źródła lub skrajnie obniżyć. Problem ten można rozwiązać formułując klasyczne zagadnienie optymalizacyjne.

Funkcją celu jest moc strat w linii oraz we wnętrzu źródła napięcia

$$\Delta P_{\Sigma} = (R_w + 2 \cdot R_L) \cdot I_L^2, \quad (2)$$

gdzie I_L jest to natężenie prądu (wartość skuteczna) płynącego w linii, uzależnione od zmiennej decyzyjnej, którą jest amplituda napięcia źródłowego E_m .

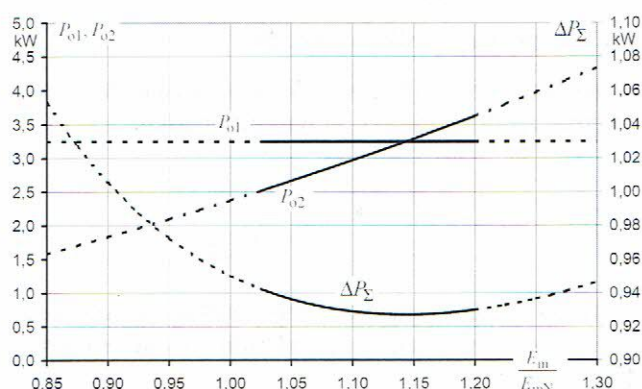
Warunki ograniczające zestawiono w postaci następującego układu równań i nierówności

$$\begin{cases} I_L = I_{o1} + I_{o2} \\ \frac{E_m}{\sqrt{2}} = (R_w + 2 \cdot R_L) \cdot I_L + R_{o2} \cdot I_{o2} \\ R_{o2} \cdot I_{o2} = \frac{P_{o1}}{I_{o1}} \\ 207 \leq R_{o2} \cdot I_{o2} \leq 253 \\ 276,25 \leq E_m \leq 390 \end{cases}, \quad (3)$$

gdzie I_{o1} i I_{o2} – natężenie prądów (wartość skuteczna), płynących odpowiednio przez odbiór 1 i 2.

Rozwiązując zagadnienie optymalizacyjne, opisane wzorami (2) i (3), otrzymuje się następujące wyniki: moce odbiorników będą równe $P_{o1} = P_{o2} = 3250$ W; moc strat w linii $\Delta P_L = 668$ W; moc strat źródła $\Delta P_w = 260$ W oraz moc źródła napięcia $P = 7428$ W. Amplituda napięcia źródła jest równa $371,7$ V ($1,144 \cdot E_{mN}$), natomiast napięcie zasilania odbiorników 1 i 2 jest równe $230,0$ V ($1,0 \cdot U_{No1}$ oraz $1,0 \cdot U_{No2}$). Zatem w tym przypadku rozwiązaniem optymalnym jest zasilanie obu odbiorników przy znamionowej wartości napięcia.

Zależność mocy odbiorników oraz sumarycznej mocy strat w funkcji amplitudy napięcia źródłowego, w analizowanym mikrosystemie elektroenergetycznym dla przypadku 3, przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Moc odbiorów oraz moc strat (straty wewnątrz źródła i straty w linii) w zależności od amplitudy napięcia źródłowego, przypadek 3

Na rysunku 6, przerywanymi liniami zaznaczono fragmenty zależności, które mogą być rozpatrywane tylko teoretycznie z powodu: z lewej strony, wartość napięcia zasilania odbiornika 2 jest mniejsza od do-

puszczalnej dolnej granicy ($U_0 < 0,9 \cdot U_{N02}$), czyli nie jest spełniony czwarty z warunków ograniczających w układzie (3); z prawej strony, wartość napięcia źródłowego jest większa od dopuszczalnej ($E_m > 1,2 \cdot E_{mN}$), czyli nie jest spełniony ostatni z warunków ograniczających w układzie (3).

W kontekście energii elektrycznej, jeżeli do wykonania pracy potrzebne jest zużycie energii równej 6,5 kWh, to odbiorniki muszą pracować przez 2 godziny, w obu opisanych przypadkach. W tym stanie pracy każdy z Odbiorców energii spowoduje straty energii elektrycznej równe 0,928 kWh. Jednak, gdyby odbiorniki pracowały zasilane napięciem maksymalnym (ograniczeniem jest tutaj napięcie odbioru 2), przy założeniu, że włączane są w tym samym czasie, to odbiornik 2 na pobranie energii 6,5 kWh potrzebuje 1,65 h, powodując tym samym straty energii równe, w jego udziale 0,847 kWh. W tym samym czasie odbiornik 1, w swoim udziale spowoduje straty energii równe 0,700 kWh. Jeżeli po tym czasie odbiornik 2 zostanie wyłączony, to odbiornik 1 musi pracować jeszcze przez 0,35 h. Jeżeli napięcie zostanie na tym samym poziomie ($1,1 \cdot U_{N02}$), to odbiornik spowoduje straty energii równe 0,066 kWh. Jeżeli dla pracującego już tylko jednego odbiornika 1 zwiększy się napięcie do możliwie maksymalnej wartości (ograniczeniem będzie tutaj górna granica napięcia źródłowego), to spowoduje to straty energii równe 0,062 kWh.

Podsumowując, praca odbiorników w warunkach optymalnych pod względem mocy strat spowoduje łączne straty energii równe 1,856 kWh. Praca obu odbiorników w warunkach zasilania możliwie największym napięciem, powoduje łączne straty energii elektrycznej równe 1,613 kWh (dla $1,1 \cdot U_{N02}$) lub 1,609 kWh (dla $1,2 \cdot E_{mN}$).

3.4. Eksperyment dla przypadku 4

Funkcją celu również jest moc strat w liniach oraz we wnętrzu źródła napięcia, w tym przypadku

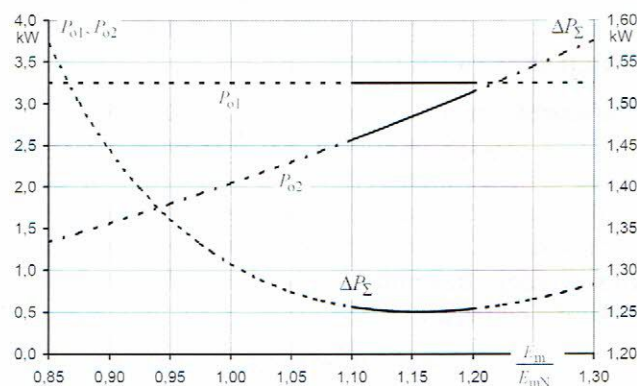
$$\Delta P_{\Sigma} = (R_w + 2 \cdot R_L) \cdot I_L^2 + 2 \cdot R_{L1} \cdot I_{O1}^2 + 2 \cdot R_{L2} \cdot I_{O2}^2 \quad (4)$$

Warunki ograniczające dla tego przypadku zestawiono w postaci następującego układu równań i nierówności

$$\begin{cases} I_L = I_{O1} + I_{O2} \\ \frac{E_m}{\sqrt{2}} = (R_w + 2 \cdot R_L) \cdot I_L + (R_{O2} + 2 \cdot R_{L2}) \cdot I_{O2} \\ (R_{O2} + 2 \cdot R_{L2}) \cdot I_{O2} = \frac{P_{O1}}{I_{O1}} + 2 \cdot R_{L1} \cdot I_{O1} \\ 207 \leq R_{O2} \cdot I_{O2} \leq 253 \\ 115 \leq \frac{P_{O1}}{I_{O1}} \leq 276 \\ 276,25 \leq E_m \leq 390 \end{cases} \quad (5)$$

Rozwiązując zagadnienie optymalizacyjne, opisane wzorami (4) i (5), otrzymuje się następujące wyniki: moce odbiorników będą równe $P_{O1} = 3250$ W i $P_{O2} = 2879$ W; moc strat w linii $\Delta P_L = 1000$ W; moc strat źródła $\Delta P_w = 251$ W oraz moc źródła napięcia $P = 7382$ W. Amplituda napięcia źródła jest równa 375,3 V ($1,155 \cdot E_{mN}$), natomiast napięcia zasilania odbiorników 1 i 2 są równe, odpowiednio 224,0 V ($0,974 \cdot U_{N01}$) oraz 216,5 V ($0,941 \cdot U_{N02}$).

Zależność mocy odbiorników oraz sumarycznej mocy strat w funkcji amplitudy napięcia źródłowego, w analizowanym mikrosystemie elektroenergetycznym dla przypadku 4, przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Moc odbiorów oraz moc strat (straty wewnątrz źródła i straty w linii) w zależności od amplitudy napięcia źródłowego, przypadek 4

Na rysunku 7, przerywanymi liniami zaznaczono fragmenty zależności, które należy interpretować jak w poprzednim przypadku.

Interesującą kwestią jest podział kosztów za straty energii wewnątrz źródła oraz w liniach na poszczególne Odbiorców. Odbiorca 1 musi pokryć w całości koszty strat w odcinku linii L1 oraz w części k1 koszty strat wewnątrz źródła oraz w odcinku linii L. Odbiorca 2 musi pokryć w całości koszty strat w odcinku linii L2 oraz w części k2 koszty strat wewnątrz źródła oraz w odcinku linii L. Wyznaczenie części k1 i k2 wynika z następujących wzorów:

$$\Delta P_{wL} = (R_w + 2 \cdot R_L) \cdot I_L^2, \quad (6)$$

$$\Delta P_{wL} = (R_w + 2 \cdot R_L) \cdot (I_{o1} + I_{o2})^2, \quad (7)$$

$$\sqrt{\Delta P_{wL}} = \sqrt{R_w + 2 \cdot R_L} \cdot (I_{o1} + I_{o2}), \quad (8)$$

stąd

$$k1 = \frac{\sqrt{R_w + 2 \cdot R_L}}{\sqrt{\Delta P_{wL}}} \cdot I_{o1} = \frac{I_{o1}}{I_L}, \quad (9)$$

$$k2 = \frac{\sqrt{R_w + 2 \cdot R_L}}{\sqrt{\Delta P_{wL}}} \cdot I_{o2} = \frac{I_{o2}}{I_L}. \quad (10)$$

W analizowanym przypadku, Odbiorca 1 ma $k1 = 0,52$ oraz Odbiorca 2 ma $k2 = 0,48$ udziału w stratach wewnątrz źródła oraz w odcinku linii L, które to udziały powinny skutkować również w aspekcie finansowym.

3.5. Eksperyment dla przypadku 5

Funkcja celu wyrażona jest następującą zależnością (odnośnie do schematu zastępczego przedstawionego na rys. 5)

$$\Delta P_{\Sigma} = (R_w + R_L) \cdot I_L^2 + R_{L1} \cdot I_{o1}^2 + R_{L2} \cdot I_{o2}^2. \quad (11)$$

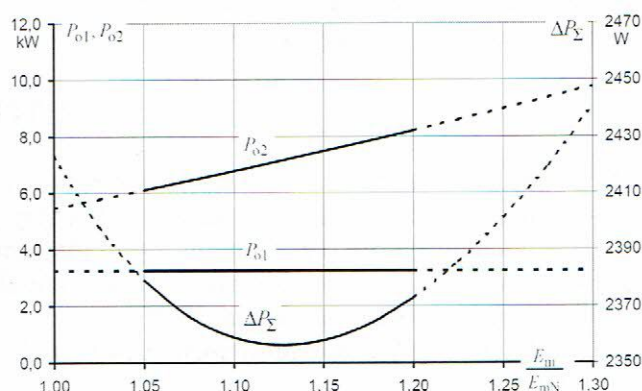
Warunki ograniczające dla tego przypadku zestawiono w postaci następującego układu równań i nierówności

$$\left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{1}{Z_w + Z_L} + \frac{1}{Z_{L1} + Z_{o1}} + \frac{1}{Z_{L2} + Z_{o2}} \right) \cdot \underline{U} = \\ & \quad = \frac{E_m}{\sqrt{2} \cdot (Z_w + Z_L)} \\ & \quad \underline{U} = (Z_{L1} + Z_{o1}) \cdot I_{o1} \\ & P_{o1} + P_{o1} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{o1} \cdot j1 = \underline{U} \cdot \frac{Z_{o1}}{Z_{L1} + Z_{o1}} \cdot I_{o1}^* \\ & 207 \leq Z_{o2} \cdot I_{o2} \leq 253 \\ & 115 \leq Z_{o1} \cdot I_{o1} \leq 276 \\ & 276,25 \leq E_m \leq 390 \end{aligned} \right. , \quad (12)$$

gdzie: $\underline{U}$ jest to napięcie w węzle rozgałęzienia linii (rys. 5).

Rozwiązując zagadnienie optymalizacyjne, opisane wzorami (11) i (12), otrzymuje się następujące wyniki: moce odbiorników będą równe $P_{o1} = 8125$ W i $P_{o2} = 7153$ W, natomiast sumaryczna moc strat wynosi 2356 W. Amplituda napięcia źródła jest równa 366,4 V ($1,127 \cdot E_{mN}$), natomiast napięcia zasilania odbiorników 1 i 2 są równe, odpowiednio 226,4 V ($0,984 \cdot U_{No1}$) oraz 221,4 V ($0,963 \cdot U_{No2}$).

Zależność mocy odbiorników oraz sumarycznej mocy strat w funkcji amplitudy napięcia źródłowego, w analizowanym mikrosystemie elektroenergetycznym dla przypadku 5, przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Moc odbiorów oraz moc strat (straty wewnątrz źródła i straty w linii) w zależności od amplitudy napięcia źródłowego, przypadek 5

Na rysunku 8, przerywanymi liniami zaznaczono fragmenty zależności, które należy interpretować jak w poprzednim przypadku.

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono dyskusję kilku prostych przypadków dotyczących zagadnienia zarządzania pracą mikrosystemów elektroenergetycznych ze względu na minimalną moc strat. Racjonalne zarządzanie pracą mikrosystemów elektroenergetycznych jest jednym z kluczowych elementów przyszłego polskiego systemu elektroenergetycznego, w którym już nie będzie dostępnych paliw kopalnych. W tych postulowanych warunkach, znaczenie będzie miało poszanowanie energii elektrycznej na każdym etapie w systemie elektroenergetycznym. Te wartości, które wydają się stosunkowo niewielkie, w tych nowych warunkach będą miały znaczenie (dla przykładu, obecnie w wykorzystaniu źródeł energii odnawialnej „walczy” się nawet o ułamek procenta sprawności).

Do wprowadzenia nowego systemu elektroenergetycznego niezbędna jest diametralna zmiana wyobrażenia o funkcjonowaniu tego typu systemów. Rozbudowywana już obecnie (choć nie wykorzystana właściwie) infrastruktura tzw. inteligentnych sieci dystrybucyjnych będzie w przyszłości częścią inteligentnych systemów zarządzania pracą mikrosystemów elektroenergetycznych.

Poruszony w artykule problem optymalizacji mocy strat w przykładowym mikrosystemie elektroenergetycznym, w kontekście strat energii elektrycznej w elementach tego systemu, pokazuje, że z punktu widzenia globalnego optymalizacja mocy strat nie zawsze przyniesie oczekiwane rezultaty w kontekście

strat energii elektrycznej. Jednak pracy i zapotrzebowania (harmonogramu pracy) odbiorów przyłączanych do sieci elektroenergetycznej nie można w zasadzie przewidzieć. Zatem racjonalnym rozwiązaniem jest minimalizacja mocy strat w mikrosystemach elektroenergetycznych. W relacjach pomiędzy interesariuszami systemu elektroenergetycznego najważniejsza

jest transparentność zasad stosowanych głównie w rozliczeniach finansowych. Na to wpływ mają stosowane algorytmy zarządzania. Jeżeli zostaną one zaakceptowane, to rozliczenia można będzie poddać kontroli i ocenie w zastosowaniu.

LITERATURA

- [1] Cieślak S.: *Urządzenia oraz usługi elektroenergetyczne i informatyczne w polskim systemie elektroenergetycznym przy braku paliw kopalnych*. Materiały XXII Sympozjum „Współczesne Urządzenia oraz Usługi Elektroenergetyczne, Telekomunikacyjne i Informatyczne”, Poznań, 20-21 listopada 2019 r., str. 26-29.
- [2] Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung”. Abschlussbericht, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Januar, 2019.
- [3] Cieślak S.: *Wpływ mikroinstalacji prosumenckich na zużycie energii przez odbiorniki*. ElektroInfo, 1-2, 2016, str. 34-37.
- [4] Cieślak S.: *Wpływ zmiany napięcia w sieciach dystrybucyjnych niskiego napięcia na zużycie energii elektrycznej*. Materiały XVIII Sympozjum „Współczesne urządzenia oraz usługi elektroenergetyczne, telekomunikacyjne i informatyczne”, Poznań, 2015, str. 26-29.

ENERGY LOSSES IN THE LV POWER NETWORK WITH PROSUMER MICROINSTALLATIONS

Key words: microgeneration, prosumer microinstallations, smart-grid, LV power network, distributed generation

Summary. The advantage of distributed generation in power systems is the reduction of electric power losses in these systems. Power loss in particular elements of power distribution network with distributed generation may decrease or increase. There is a borderline state of system operation, caused by the work of generating units with oversized power in comparison to receivers. Achieving this state leads to reduction of total energy loss. In the article author characterizes the parameters of this borderline state of system operation and prove that the idea of prosumer microinstallations allows to achieve aforementioned advantages.

Sławomir Cieślak, dr hab. inż., profesor nadzwyczajny w Instytucie Inżynierii Elektrycznej na Uniwersytecie Technologiczno-Przyrodniczym w Bydgoszczy. Jego zainteresowania naukowe dotyczą modelowania matematycznego i symulacji komputerowej złożonych układów elektromechanicznych i elektroenergetycznych, w tym symulatorów cyfrowych układów elektroenergetycznych pracujących w czasie rzeczywistym z realnymi obiektami technicznymi (np. regulatory cyfrowe) oraz zagadnień funkcjonowania systemów elektroenergetycznych, szczególnie z generacją rozproszoną. Autor i współautor ponad 120 artykułów i referatów naukowych oraz 3 monografii naukowych. Jest autorem lub konsultantem ponad 350 opracowań związanych z przyłączaniem jednostek wytwórczych do systemu elektroenergetycznego. E-mail: slavcies@utp.edu.pl