

## Sieci dystrybucyjne o dwukierunkowym przepływie energii

**Streszczenie.** W referacie pokazano, że istotnym źródłem zwiększania napięcia w sieciach podczas generacji energii przez źródła rozproszone jest niesymetria prądów spowodowana jednofazowymi odbiornikami energii elektrycznej. Przesyłanie energii w kierunku sieci przy wzroście napięcia powyżej dopuszczalnego jest niemożliwe i źródła energii są wyłączane, co ogranicza dwukierunkowe działanie sieci. Przetworzono wyniki pomiarów ilustrujące działanie regulatora napięcia połączonego z symetryzacją prądów co umożliwia dwukierunkowy przesyłanie energii linią niskiego napięcia.

**Abstract.** The paper shows that an important source of increasing the voltage in networks during energy generation by distributed sources is the asymmetry of currents caused by single-phase electric energy receivers. Transmission of energy towards the grid is impossible when the voltage increases above the allowable limit and energy sources are switched off, which limits the bi-directional grid operation. The measurements are presented illustrating the operation of the voltage regulator with the symmetrization of the currents, which enables the bi-directional transmission of energy (*Distribution networks with two-way energy flow*)

**Słowa kluczowe:** napięcie sieci, symetryzacja prądów, fotowoltaika, falownik.

**Keywords:** grid voltage, symmetrization of currents, photovoltaics, inverter.

### Wstęp

Rozproszone generatory energii elektrycznej zmieniają charakter działania sieci dystrybucyjnych z jednokierunkowych na dwukierunkowe. Pojawia się przy tym problem podwyższania napięcia u prosumentów, znany od wielu lat. Przegląd problemów i metod ich rozwiązania przedstawiono w [1]. Określono przyczynę spadków i wzrostów napięcia będącą występowaniem rozproszonych źródeł energii. Omówiono sposoby regulacji napięcia polegające na zwiększeniu przekrojów przewodów, zastosowaniu transformatorów z podobciążeniowym przełączaniem zaczeń, kompensacji mocy biernej i zastosowaniu magazynów energii. Pojawiły się koncepcje poprawy profilu napięć wzdłuż linii przez włączanie źródeł w odpowiednich miejscach [2] oraz włączanie aktywnych kompensatorów [3]. Pojawiły się spostrzeżenia dotyczące przepięć spowodowanych przesunięciem potencjału punktu neutralnego [4] przy niesymetrycznym obciążeniu. W wielu publikacjach analizowano wymienione metody kontroli napięcia w sieci, również z wykorzystaniem planu wyłączeń i załączeń na żądanie i stosowaniem baterii kondensatorów [5 – 15].

Istotnym efektem powodującym wzrost napięcia w sieciach nN jest niesymetria prądów, co pokazano w [16] na przykładach obliczeniowych.

W referacie przedstawiono wyniki działania regulatora napięcia na sieci nN i zaproponowano wykorzystanie falowników do fotowoltaiki w celu zapewnienia dwukierunkowej pracy sieci.

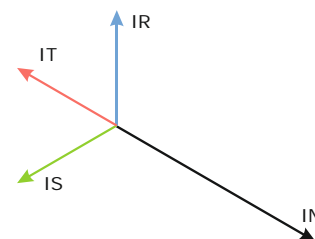
### Efekt wzrostu napięcia w sieciach dystrybucyjnych niskiego napięcia z mikroinstalacjami

Przyłączanie mikroinstalacji i małych instalacji do sieci nN odbywa się na ogólnych warunkach określonych w instrukcji ruchu i eksploatacji sieci dystrybucyjnej [17] wydawanej i uaktualnianej przez operatora działającego na określonym obszarze. Operatorzy określają możliwości przyłączania mikroinstalacji i małych instalacji [18] definiując warunki napięciowe oraz działanie instalacji przy zmianach częstotliwości sieci zasilającej. Moc instalacji jest ograniczana przy wzroście częstotliwości sieci, na co nie ma wpływu sterowanie napięciem linii. Spośród kilku warunków przyłączania istotny jest ten, który dotyczy dopuszczalnego spadku napięcia:

$$(1) \Delta u_{a\%} = \frac{S_{E\max} (R_{kPCC} \cos \varphi + X_{kPCC} \sin \varphi)}{0,01 \cdot U_n^2} \% \leq 3\%$$

gdzie  $\Delta u_{a\%}$  jest procentowym spadkiem napięcia w punkcie przyłączenia,  $S_{E\max}$  jest mocą maksymalną jednostki wytwórczej,  $R_{kPCC}$ ,  $X_{kPCC}$  są rezystancją i reaktancją sieci w miejscu przyłączenia,  $U_n$  jest napięciem znamionowym sieci,  $\varphi_{ind}$  jest kątem przesunięcia fazowego pierwszej harmonicznej prądu przy mocy indukcyjnej.

Wyrażenie (1) określa spadek napięcia wynikający z przyłączenia pojedynczej instalacji OZE w sposób nieprawidłowy. Określając dopuszczalny spadek napięcia w [18] pominięto składniki występujące w pełnym modelu linii zasilającej. Wyrażenie (1) dotyczy podwyższenia napięcia spowodowanego przyłączeniem pojedynczej instalacji generującej energię przy założeniu symetrii prądów w linii, bez uwzględniania prądu w przewodzie neutralnym. Tymczasem w sytuacji, kiedy kierunek przepływu energii w jednej fazie jest inny niż w pozostałych, na przewodzie neutralnym występuje spadek napięcia, którego wartość może nawet dwukrotnie przekraczać spadek napięcia na przewodach linii. Powoduje to zwiększenie napięcia w jednej lub dwóch fazach. Szczególnie niekorzystna jest sytuacja, w której tylko w jednej fazie jest oddawana energia do sieci, a w dwóch pozostałych jest pobierana. Wykres wskazowy prądów dla takiego przypadku pokazano na rysunku 1.

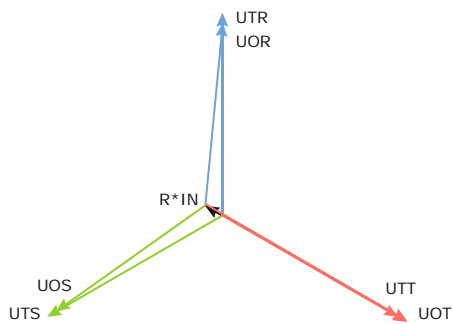


Rys.1. Wskazy prądów fazowych IR, IS, IT i przewodu neutralnego IN

Wskazy napięć fazowych pokazano na rysunku 2. Widoczne jest znaczne zwiększenie napięcia w fazie T, w której występuje wprowadzanie energii do sieci. W pozostałych fazach napięcie jest zmniejszone.

### Analiza asymetrii napięć i prądów metodą składowych symetrycznych

Powszechnie stosowanym narzędziem do analizy asymetrii w sieciach trójfazowych jest transformacja wskazów fazowych na składowe symetryczne zdefiniowana wyrażeniem:



Rys. 2. Wskazy napięć fazowych transformatora i odbiorów z uwzględnieniem spadków napięć wywołanych prądami z rysunku 1. UTx - napięcia fazowe transformatora, UOx - napięcia fazowe odbioru, R rezystancja linii

$$(2) \quad \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{bmatrix},$$

gdzie  $\underline{U}_{L1}, \underline{U}_{L2}, \underline{U}_{L3}$  są wskazami napięć fazowych,  $\underline{U}_0, \underline{U}_1, \underline{U}_2$  są wskazami składowej kolejności zerowej, zgodnej i przeciwnej, symbol  $a$  oznacza:

$$(3) \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}}.$$

Współczynnik  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  zapewnia transwersalność mocy.

Odwrotna transformacja ma postać:

$$(4) \quad \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix}.$$

Transformacje (2) i (4) stosowane są do prądów fazowych po przyjęciu odpowiednich oznaczeń.

Analiza prądów i napięć metodą składowych symetrycznych umożliwia wyjaśnienie działania pasywnych urządzeń stosowanych do poprawy jakości energii elektrycznej. Przykładem może być transformator symetryzujący opisany w [19], gdzie stwierdzono, że za pomocą tego urządzenia nie jest możliwa pełna symetryzacja prądów. Na przykład dla jednofazowego obciążenia układu trójfazowego prądy składowych symetrycznych są równe  $\underline{I}_0=0,577\underline{I}_{L1}, \underline{I}_1=0,577\underline{I}_{L1}, \underline{I}_2=0,577\underline{I}_{L1}$ . Za pomocą układu pasywnego, jakim jest transformator symetryzujący, nie można wyeliminować składowej kolejności przeciwnej.

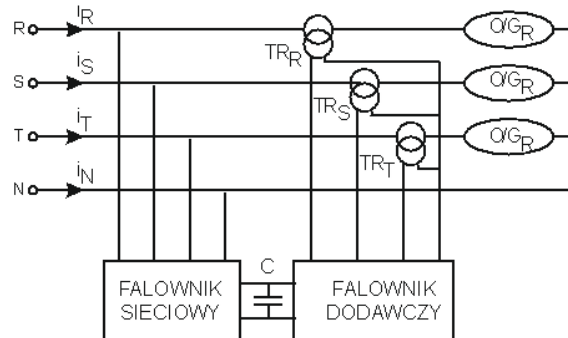
### Zależności dla regulacji napięć i symetryzacji prądów w sieciach nN z mikroinstalacjami

Układ do regulacji napięć fazowych i symetryzacji prądów pokazano na rysunku 3.

Regulacja napięć w każdej fazie odbywa się za pomocą transformatorów dodawczych, których uzwojenia wtórne włączone są szeregowo w każdej fazie jak pokazano na rysunku 3. Pierwotne strony transformatorów połączone w gwiazdę zasilane są z dodawczego czterogłęziowego przekształtnika trójfazowego.

Obwód prądu stałego falownika dodawczego zasilany jest z falownika czterogłęziowego podłączonego do sieci. Falownik sieciowy dostarcza energię do obwodu prądu stałego lub odbiera w zależności od napięć po stronie sieciowej i po stronie odbiorów. Czteroprzewodowy falownik

umożliwia niezależne dodawanie lub odejmowanie napięcia do każdej z faz linii. Transformatory dodawcze posiadają bardzo małą impedancję rozproszenia i nie wpływają na prądy zwarciove, które mogą pojawić się po stronie odbiorów.



Rys. 3. Schemat układu regulatora napięcia i symetryzatora prądów

Napięcia dodawane przez transformatory dodawcze dla regulatora zainstalowanego w głębi sieci określane są następująco:

$$(5) \quad \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1D} \\ \underline{U}_{L2D} \\ \underline{U}_{L3D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{U}_{L10} \\ \underline{U}_{L20} \\ \underline{U}_{L30} \end{bmatrix},$$

gdzie  $\underline{U}_{L10}, \underline{U}_{L20}, \underline{U}_{L30}$  są zadanymi wskazami napięć po stronie odbiorów,  $\underline{U}_{LD}, \underline{U}_{L2D}, \underline{U}_{L3D}$  są wskazami napięć dodawanych.

Wartości zadane wskazów napięć po stronie odbiorów w głębi sieci tworzą układ zawierający wyłącznie składową kolejności zgodnej. Zapewnia to symetryczne napięcia w punkcie przyłączenia.

Regulator instalowany w pobliżu transformatora może zapewniać symetryczne napięcia o zadanej wartości lub realizować funkcję kompensacji spadków napięcia na linii pomiędzy regulatorem a odbiorami zgodnie z zależnością:

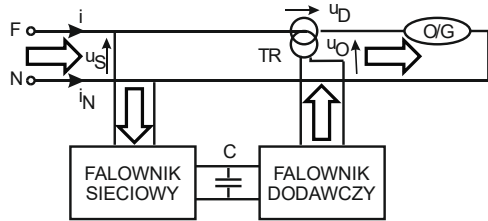
$$(6) \quad \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1D} \\ \underline{U}_{L2D} \\ \underline{U}_{L3D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_1 \underline{I}_{L10} \\ \underline{A}_2 \underline{I}_{L20} \\ \underline{A}_3 \underline{I}_{L30} \end{bmatrix},$$

gdzie  $\underline{A}_1, \underline{A}_2, \underline{A}_3$  są wektorowymi współczynnikami skali.

Odpowiednio wybrane współczynniki skali zapewniają utrzymanie wartości napięć na końcu linii w założonych przedziałach.

Falownik sieciowy włączany jest po stronie odbiorów lub po stronie sieci w zależności od warunków występujących w sieci. Przy dużej niesymetrii prądów korzystne jest włączenie falownika sieciowego po stronie odbiorów ze względu na funkcję symetryzacji prądów. Przez transformatory dodawcze płyną tylko prądy składowej zgodnej i są one mniej obciążone niż przy włączeniu falownika sieciowego po stronie zasilania.

Miejsce włączenia falownika sieciowego zależy ponadto od kierunku przepływu energii przez transformatory dodawcze. Korzystne jest takie włączenie falownika sieciowego przy dodawaniu napięcia, żeby energia potrzebna do działania falownika dodawczego płynęła bezpośrednio z sieci przez falownik sieciowy do obwodu prądu stałego. Odwrotnie, przy odejmowaniu napięcia prądy falownika sieciowego będą płynęły przez transformatory dodawcze, co powoduje dodatkowe straty. Kierunki przepływu energii pokazano strzałkami na rysunku 4.



Rys. 4. Przepływy energii dla jednej fazy

Symetryzacja prądów prowadzi do generowania w falowniku sieciowym składowych kolejności przeciwnej i zerowej o wartościach przeciwnych do wartości generowanych przez odbiory. Generowanie tych składowych wymaga dostarczania/oddawania energii z/do sieci z wykorzystaniem tylko składowej kolejności zgodnej. Moc pobierana przez odbiory jest równa:

$$(7) \quad \underline{S}_O = \underline{U}_{L1O} \underline{I}_{L1O}^* + \underline{U}_{L2O} \underline{I}_{L2O}^* + \underline{U}_{L3O} \underline{I}_{L3O}^*,$$

gdzie  $\underline{S}_O$  jest mocą zespoloną odbiorów, indeks O oznacza odbiór.

Moc dostarczana z sieci do punktu podłączenia regulatora na pokrycie mocy odbiorów jest równa:

$$(8) \quad \underline{S}_{LO} = \underline{U}_{L1L} \underline{I}_{L1L}^* + \underline{U}_{L2L} \underline{I}_{L2L}^* + \underline{U}_{L3L} \underline{I}_{L3L}^*,$$

gdzie  $\underline{S}_{LO}$  jest mocą zespoloną dostarczaną z sieci do odbiorów.

Przy założeniu, że napięcie i prąd po stronie sieci zawierają tylko składowe kolejności zgodnej prąd fazy 1 wyznaczany jest z zależności:

$$(9) \quad \underline{I}_{L1L}^* = \frac{\underline{U}_{L1O} \underline{I}_{L1O}^* + \underline{U}_{L2O} \underline{I}_{L2O}^* + \underline{U}_{L3O} \underline{I}_{L3O}^*}{3 \underline{U}_{L1L}},$$

gdzie indeks L oznacza zmienne linii zasilającej.

Prądy odbiorów w fazach linii zasilającej są równe:

$$(10) \quad \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1L} \\ \underline{I}_{L2L} \\ \underline{I}_{L3L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1L} \\ a^2 \underline{I}_{L1L} \\ a \underline{I}_{L1L} \end{bmatrix}.$$

Całkowite prądy linii są równe:

$$(11) \quad \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1L} \\ \underline{I}_{L2L} \\ \underline{I}_{L3L} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1R} \\ \underline{I}_{L2R} \\ \underline{I}_{L3R} \end{bmatrix},$$

Prądy fazowe falownika sieciowego symetryzujące prądy w sieci są różnicą pomiędzy prądami linii a prądami odborników:

$$(12) \quad \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1P} \\ \underline{I}_{L2P} \\ \underline{I}_{L3P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1O} \\ \underline{I}_{L2O} \\ \underline{I}_{L3O} \end{bmatrix},$$

lub dla składowych symetrycznych:

$$(13) \quad \begin{bmatrix} \underline{I}_{0P} \\ \underline{I}_{1P} \\ \underline{I}_{2P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{I}_1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{I}_{0O} \\ \underline{I}_{1O} \\ \underline{I}_{2O} \end{bmatrix}.$$

gdzie indeks P oznacza zmienne przekształtnika sieciowego.

Wyrażenia (5) - (12) określają wartości zespolone prądów i napięć fazowych. Użycie zapisu symbolicznego jest wygodne do określania zależności między zmiennymi,

w tym mocy. Dla analizy przetwarzania energii konieczne jest uwzględnienie funkcji czasu części rzeczywistych i urojonych w pełnym okresie napięcia sieciowego.

Z wyrażenia (13) wynika, że prądy wyjściowe przekształtnika sieciowego zawierają składową kolejności zerowej i składową kolejności przeciwnej o wartościach równej tym składowym występującym w prądach odbiorów. Wartość skuteczna składowej zerowej prądu odbiorów przy działaniu mikroinstalacji może być, z uwzględnieniem skali, dwukrotnie większa od wartości skutecznej prądu fazowego. Przyczyną są odbiorniki jednofazowe włączone do sieci, co w szczególnym przypadku może doprowadzić do sytuacji, w której moc w jednej fazie jest przesyłana w odwrotnym kierunku niż w dwóch pozostałych. Przy jednakowej wartości skutecznej prądów we wszystkich trzech fazach prąd w przewodzie neutralnym jest równy dwukrotnej wartości prądu fazowego. Jest to wskazówka dla projektowania czterogałęziowego falownika sieciowego.

### Układ regulacji napięć i prądów

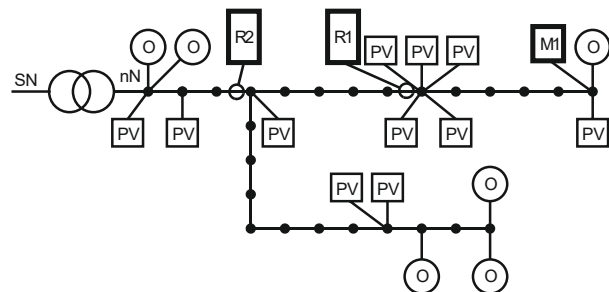
Układ regulacji napięć i prądów został zaprojektowany dla każdej fazy oddzielnie. W konfiguracji, w której przekształtnik sieciowy jest włączony za transformatorami dodatkowymi, prądy płynące przez transformatory dodatkowe są symetryczne, a suma ich wartości skutecznych jest mniejsza od sumy wartości skutecznych prądów odbiorów. W takiej konfiguracji przy podwyższaniu napięcia na odbiorach prądy zasilania układu dodawania napięcia płyną przez transformatory.

Prądy i napięcia fazowe są mierzone i filtrowane za pomocą uogólnionego integratora drugiego rzędu.

Poniższa analiza została przeprowadzona dla przypadku podwyższania napięcia na odbiorach.

Prąd linii  $\underline{I}_{L1L}$  jest równy:

$$(14) \quad \underline{I}_{L1L} = \underline{I}_{L1LO} + \underline{I}_{L1LD}.$$



Rys. 5. Schemat linii nN, O – odbiory, PV – prosumenci z instalacjami fotowoltaicznymi, R1 – miejsce włączenia regulatora w głębi sieci, R2 – miejsce włączenia regulatora przy transformatorze, M1 – miejsce monitorowania napięcia na końcu linii

Moc zespolona na wejściu do układu dodawania napięć określona jest zależnością:

$$(15) \quad \underline{S}_{L1} = \underline{U}_{L1L} \underline{I}_{L1L}^*,$$

gdzie  $\underline{S}_{L1}$  jest mocą na wejściu układu dodatkowego.

Moc zespolona na wyjściu jednej fazy układu dodatkowego z uwzględnieniem tylko składowej kolejności zgodnej jest równa:

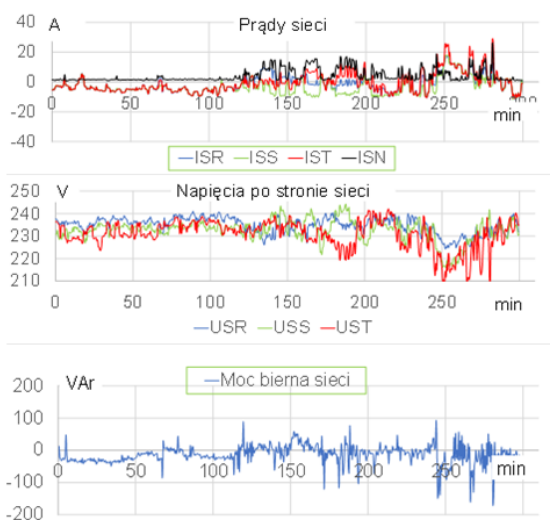
$$(16) \quad \underline{S}_{L1O} = (\underline{U}_{L1L} + \underline{U}_{L1D}) \underline{I}_{L1LO}^*.$$

Biorąc pod uwagę (14) – (16) prąd fazowy zasilania układu dodającego napięcie zawierający tylko składową kolejności zgodnej ma wartość:

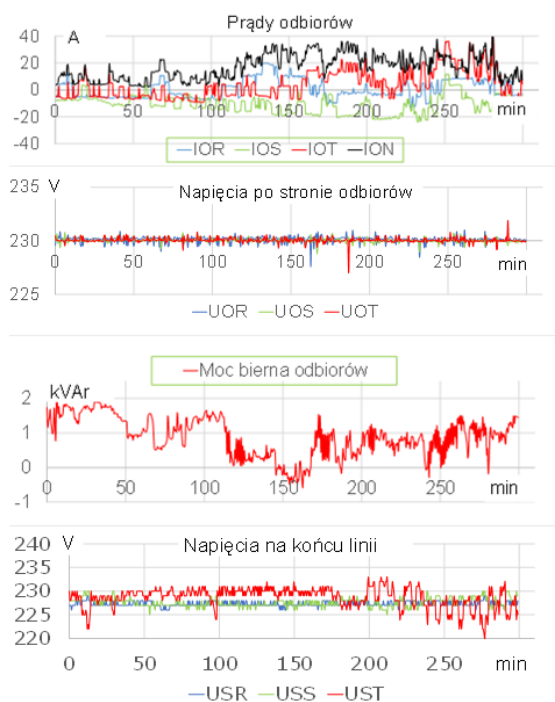
$$(17) \quad I_{L1D}^* = \frac{U_{L1D} I_{L1LO}^*}{U_{L1L}}$$

Działanie układu symetryzującego prądy sieciowe i układu dodającego napięcie jest niezależne. Prądy symetryzujące zamykają się w falowniku z wykorzystaniem pojemności obwodu prądu stałego jako magazynu energii zapewniającego przepływ prądu składowej kolejności zerowej i przeciwnej.

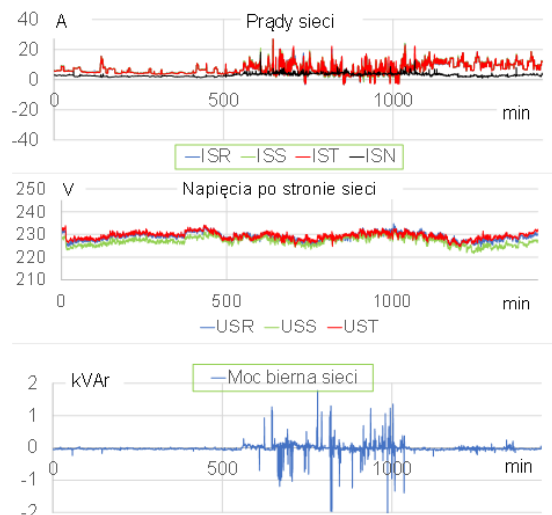
Napięcie na kondensatorze w obwodzie prądu stałego jest regulowane ze względu na niedokładności obliczeń wartości zadanych prądów i związane z tym zmiany napięcia. Dobór struktury i nastaw regulatora napięcia w obwodzie prądu stałego musi uwzględniać impulsowy charakter przepływu energii do i z kondensatora z częstotliwością równą podwójnej częstotliwości sieci zasilającej. Wyjście regulatora napięcia określa wartość prądu dodawanego do wartości zadanej prądu przekształtnika sieciowego.



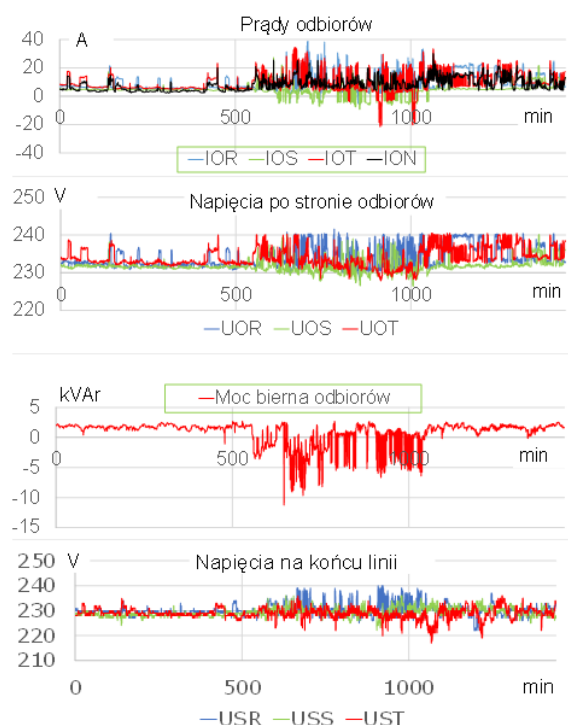
Rys. 6. Prądy, napięcia i moc bierna po stronie sieci regulatora zainstalowanego w punkcie R1



Rys. 7. Prądy, napięcia i moc bierna po stronie odbiorów regulatora zainstalowanego w punkcie R1 i napięcia na końcu linii w punkcie M1



Rys. 8. Prądy, napięcia i moc bierna po stronie sieci regulatora zainstalowanego w punkcie R2



Rys. 9. Prądy, napięcia i moc bierna po stronie odbiorów regulatora zainstalowanego w punkcie R2 i napięcia na końcu linii w punkcie M1

### Wyniki eksperymentów na linii nN

Aktywny regulator napięcia został przetestowany na linii pokazanej na rysunku 5.

Regulator włączony w dwóch miejscach linii. W miejscu oznaczonym R1 regulator pracuje w głębi linii i stabilizuje napięcie w punkcie przyłączenia. W miejscu R2 regulator nastawia napięcie w fazach w zależności od wartości prądu i kierunku przepływu energii. Przyjęto zmianę napięcia w zakresie  $\pm 10V$ . W obydwu przypadkach rejestrowano napięcia fazowe linii w punkcie M1.

Prądy, napięcia i moc bierną po stronie sieci regulatora włączonego w punkcie R1 pokazano na rysunku 6. Ujemne wartości skuteczne prądów oznaczają, że energia jest wprowadzana do sieci. Rejestracja odbywała się 28.08.2021 od godz. 6.40. Prądy są symetryczne przez większość czasu, pojawia się oddawanie energii do sieci i jednocześnie

zmienne obciążenie jednofazowymi odbiornikami. Napięcie po stronie sieci nie przekracza dopuszczalnych wartości. Moc bierna pozostaje na poziomie określonym przez dokładność regulacji. Prądy odbiorów pokazane na rysunku 7 wykazują dużą niesymetrię, widoczne jest jednoczesne pobieranie i oddawanie energii, co powoduje występowanie dużej wartości prądu w przewodzie neutralnym. Napięcie za regulatorem utrzymywane jest na stałej wartości. Po stronie odbiorów występuje moc bierna kompensowana przez regulator

Prądy, napięcia i moc bierną po stronie sieci regulatora włączonego w punkcie R2 pokazano na rysunku 8. Rejestracja odbywała się 25.03.2022 od godz. 5.58. Prądy sieci są symetryczne. Zmiany napięcia sieci wynikają ze spadków napięcia powodowanych prądami sieci oraz ze zmian napięcia w sieci SN. Moc bierna jest kompensowana poza krótkimi czasami przejściowymi. Prądy odbiorów pokazane na rysunku 9 są niesymetryczne, występuje odbiór i wprowadzanie energii do sieci. Napięcia po stronie odbiorów są nastawiane w funkcji sumy prądów obydwu linii z ograniczeniem od 220 V do 240 V. W rezultacie napięcia na końcu linii nr 1 mieszczą się w granicach od 220 V do 240 V.

Regulator działa na napięcia i prądy tylko w punkcie włączenia w obwód linii. Wartości napięć i prądów w innych punktach wynikają z podłączonych odbiorów i prosumentów. Jeżeli konieczna jest regulacja napięcia u odbiorcy, to należy zastosować oddzielny układ regulacji.

Na podstawie eksperymentów przeprowadzonych na sieci nN można zauważyć, że sieć dystrybucyjna o dwukierunkowym przepływie energii powinna być wyposażona w układy symetryzujące prądy sieciowe. Wskazane jest wyposażenie prosumentów w urządzenia symetryzujące prądy na wejściu do obiektu. Urządzeniami o takiej funkcjonalności są falowniki o topologii czterogalęzowej utrzymujące napięcia w zadanych tolerancjach.

## Podsumowanie

Zastosowanie automatycznych regulatorów napięcia zapewnia dwukierunkowy przepływ energii elektrycznej w sieci niskiego napięcia. Istotna jest symetryzacja prądów linii, co powinno być realizowane z wykorzystaniem falowników do fotowoltaiki. Regulacja napięcia w głębi sieci umożliwia dostosowanie parametrów napięciowych do przesyłanej mocy. Rozbudowane sieci wymagają instalowania regulatorów blisko transformatora dystrybucyjnego z regulacją w każdej fazie oddzielnie w zależności od prądów przepływających przez linię. Istotną funkcją regulatora jest symetryzacja prądów eliminująca spadki napięcia na przewodzie neutralnym. Zastosowanie regulatora napięcia zwiększa przepustowość linii zarówno przy przepływie energii do odbiorców jak i przy przepływie do sieci.

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Zbigniew Krzemiński, MMB Drives sp. z o.o., ul. Maszynowa 26, 80-298 Gdańsk, E-mail: zkrzem@mmb-drives.com.pl, Bartosz Kołpacki, MMB Drives sp. z o.o., ul. Maszynowa 26, 80-298 Gdańsk, E-mail: b.kolpacki@mmb-drives.com.pl.

## LITERATURA

[1] O'Gorman R. and Redfern M. A., Voltage control problems on modern distribution systems, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol.1 (2004), 662-667.

[2] AlHajri M. F., El-Hawary M. E.: Improving the voltage profiles of Distribution Networks using multiple Distribution Generation Sources. Large Engineering Systems Conference on Power Engineering 2007.

[3] Blazic B., Papic I.: Voltage profile support in distribution networks — influence of the network R/X ratio. 13th International Power Electronics and Motion Control Conference 2008.

[4] Lu Song-fu, Zhang Hong-min: Prevention and treatment to over-voltage of low voltage distribution network. Proceedings CIGRE 2010.

[5] Juhana T., Hashim T., Mohamed A., Shareef H.: A review on voltage control methods for active distribution networks. PE 2012.

[6] Li Y, Peter A Crossley A. P.: Voltage balancing in low voltage distribution networks using Scott transformers. 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED, 2013.

[7] Patel J. S., Patel R. R., Rathor S. K.: A novel approach to minimize distribution losses while improving voltage profile in primary distribution network by incorporating distributed generation in system. International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, CEEOT, 2016.

[8] Ji CH., Watson A. J., Clare J. C., Johnson C. M.: A novel full soft-switching resonant power converter for mid-feeder voltage regulation of low voltage distribution network. 18th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'16 ECCE Europe, 2016.

[9] Bedawy A., Yorino N., Mahmoud K.: Management of voltage regulators in unbalanced distribution networks using voltage/tap sensitivity analysis. International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering, ITCE, 2018.

[10] Dong J., Xue Y., Olama M., Kuruganti T., Nutaro J. and Winstead C.: Distribution Voltage Control: Current Status and Future Trends. 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG, 2018.

[11] Yin F., Zhao P., Wang Y., Li Z., Wang Y. and Xiao X.: Coordinated central and local voltage control in low voltage distribution network with photovoltaic generation. IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference, CIEEC, 2019.

[12] Chang X., Zhang M., Gao L., Mao R., Li S. and Ma N.: An Analysis Method of the Influence of Distributed PV Location on Voltage and Harmonic Distribution of the Distribution Network. 10th International Conference on Power and Energy Systems. ICPEs, 2020.

[13] Kasari P. R. and Bhattacharjee S.: A modified control approach for Voltage Source Converter to regulate voltage and power flow in Distribution Network. IEEE Region 10 Symposium TENSymp, 2020.

[14] Nakamura, Marika, et al.: Advanced voltage control method for improving the voltage quality of low-voltage distribution networks with photovoltaic penetrations. Energy Informatics, vol. 4, no. Suppl 2, 24 Sept. 2021.

[15] Gholami K. et al.: State-of-the-art technologies for volt-var control to support the penetration of renewable energy into the smart distribution grids. ELSEVIER, Energy Reports 8, July 2022.

[16] Krzemiński Z.: Regulacja napięcia w sieci nN z rozproszonymi źródłami energii. PE Nr 5/2020.

[17] Instrukcja ruchu i eksploatacji sieci dystrybucyjnej. ENERGA Operator, Gdańsk, 2019.

[18] Kryteria oceny możliwości przyłączania mikroinstalacji i małych instalacji przyłączanych do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia Operatora Systemu Dystrybucyjnego. ENERGA Operator, Gdańsk, luty 2017 r.

[19] Topolski Ł., Woźny K., Hanzelka Z.: Kompensacja asymetrii prądów i napięć powodowanej odbiornikami i odnawialnymi źródłami energii za pomocą transformatora symetryzującego w sieciach niskich napięć. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2019, nr 9..