

ENERGOELEKTRONICZNY REGULATOR NAPIĘCIA W SIECI ENERGETYCZNEJ ZE ŹRÓDŁAMI ODNAWIALNYMI

Zbigniew KRZEMIŃSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
e-mail: zbikrzem@pg.edu.pl

Streszczenie: Podłączanie odnawialnych źródeł energii do sieci energetycznych niskiego napięcia powoduje powstawanie problemów zmienności napięcia, zwłaszcza w przypadku dużych odległości od transformatora zasilającego. W skrajnych przypadkach zachodzi konieczność redukcji mocy generowanej przez źródło ze względu na podwyższenie napięcia spowodowane spadkami napięcia przy oddawaniu energii do sieci. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie energoelektronicznego regulatora napięcia składającego się z dwóch falowników, z których jeden służy do dodawania, za pomocą transformatora dodawczego, napięcia o regulowanej małej amplitudzie. Drugi falownik służy do dostarczania energii czynnej do układu regulacji oraz do korekty poboru mocy biernej w założonym zakresie. W referacie pokazano zastosowanie regulatora do stabilizacji napięcia sieci nN z generacją rozproszoną opartą na odnawialnych źródłach energii.

Słowa kluczowe: regulacja napięcia, sieć elektroenergetyczna, odnawialne źródło energii.

1. WSTĘP

Sieci elektroenergetyczne zbudowane są obecnie przy założeniu, że przepływ energii odbywa się od Głównego Punktu Zasilającego (GPZ) do odbiorcy końcowego przez sieć średniego napięcia (SN) i niskiego napięcia (nN). Założenie to nie może być przyjmowane, jeżeli odbiorcami końcowymi są prosumenci posiadający instalacje generujące energię z odnawialnych źródeł energii (OZE), ponieważ pojawiają się nowe problemy. W krótkich okresach występuje zmiana kierunku przepływu energii związana z produkcją przekraczającą zapotrzebowanie prosumenta. Powoduje to zmianę kierunków spadków napięcia i niejednokrotnie konieczność ograniczania mocy lub nawet wyłączenia OZE, zwłaszcza w przypadku długich linii, gdzie napięcie na transformatorze zasilających jest ustawiane na poziomie o kilka procent wyższym od znamionowego. Dostosowanie długich odcinków linii zasilających do pracy przy odwrotnym kierunku przepływu mocy może być związane z dużymi kosztami modernizacji. Nie można w takiej sytuacji zastosować regulatora napięcia na końcu linii, ponieważ nie ma możliwości zmniejszenia napięcia przy odwrotnym kierunku przepływu energii. Problematyka zwiększenia możliwości przyłączania źródeł OZE w sieciach terenowych o małej gęstości rozmieszczenia odbiorców i występujących długich odcinkach linii zasilających jest przedstawiona w literaturze [1, 2].

2. PRZYŁĄCZANIE MIKROINSTALACJI I MAŁYCH INSTALACJI DO SIECI DYSTRYBUCYJNEJ NISKIEGO NAPIĘCIA

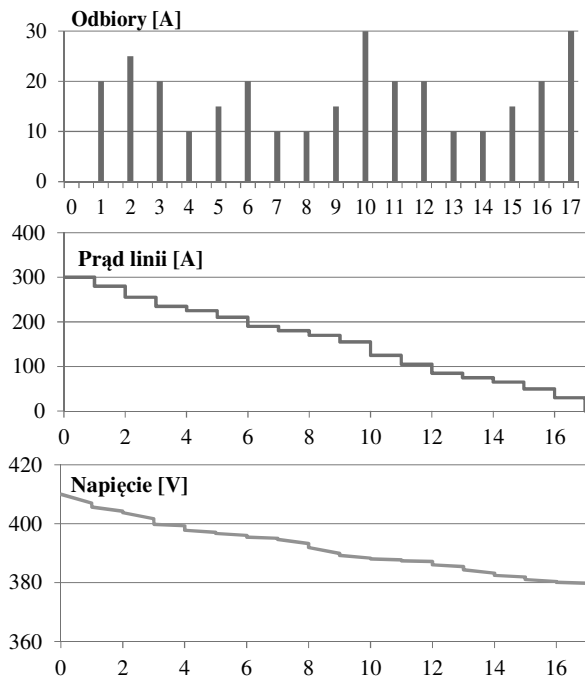
Przyłączanie mikroinstalacji i małych instalacji do sieci niskiego napięcia odbywa się na ogólnych warunkach określonych w instrukcji ruchu i eksploatacji sieci dystrybucyjnej [3] wydawanej przez operatora działającego na określonym obszarze. Operatorzy dokładnie określają możliwości przyłączania mikroinstalacji i małych instalacji [4]. Spośród kilku warunków istotny jest ten, który dotyczy dopuszczalnego spadku napięcia:

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

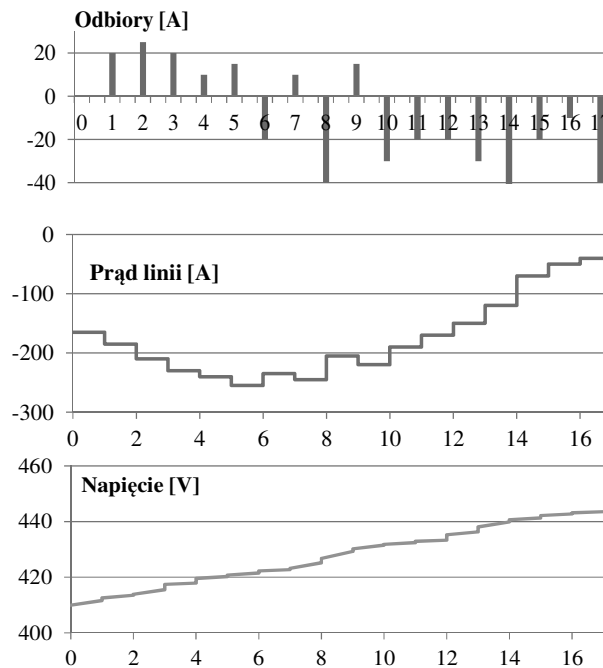
gdzie $\Delta u_{a\%}$ jest spadkiem napięcia w punkcie przyłączenia w %, $S_{E_{max}}$ jest mocą maksymalną jednostki wytwórczej, R_{kPCC} , X_{kPCC} są rezystancją i reaktancją sieci w miejscu przyłączenia, U_n jest napięciem znamionowym sieci, φ_{md} jest kątem przesunięcia fazowego pierwszej harmonicznej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

Wyrażenie (1) określa w sposób uproszczony spadek napięcia wynikający z przyłączenia pojedynczej instalacji OZE. Określając dopuszczalny spadek napięcia w [4] pominięto składniki napięcia występujące w pełnym modelu linii zasilającej.

Warunek (1) jest dla pojedynczej instalacji OZE zazwyczaj spełniony. Włączenie większej liczby instalacji OZE może spowodować problemy wynikające z sumowania spadków napięcia. Znak spadków napięcia wywołanych przyłączeniem OZE jest przeciwny do spadków napięcia spowodowanych odbiorami energii i powoduje w niekorzystnych warunkach wzrost napięcia w linii powyżej dopuszczalnego limitu.



Rys. 1. Prądy odbiorów, prąd linii zasilającej i napięcie wzdłuż linii bez włączonej generacji z OZE



Rys. 2. Prądy odbiorów, prąd linii zasilającej i napięcie wzdłuż linii z włączoną generacją z OZE

Na rysunku 1 pokazano prądy odbiorów, prąd linii i napięcie wzdłuż linii bez włączonych instalacji OZE. Parametry linii dobrano tak, żeby wyjaśnić zagadnienia związane z przyłączaniem OZE. Ustawienie na stałe odczepy transformatora zapewnia utrzymanie spadku napięcia na końcu linii w dopuszczalnych granicach. Na początku linii napięcie jest wyższe od znamionowego, natomiast na końcu linii napięcie może być niższe od znamionowego, ale utrzymane w dopuszczalnych granicach. Włączenie kilku małych instalacji OZE kompensuje prądy odbiorów i spadek napięcia na końcu linii jest zmniejszony.

Włączenie większej ilości instalacji OZE do linii zasilającej może doprowadzić do sytuacji pokazanej na rysunku 2. Ustawione na stałe odczepy transformatora ustalają napięcie na zaciskach transformatora na 410. Każda z kilku mikroinstalacji OZE podłączonych do linii spełnia warunek (1), ale ich ilość i rozmieszczenie powoduje, że spadki napięcia na poszczególnych odcinkach linii zmieniają znak i powodują przekroczenie dopuszczalnego napięcia na końcu linii. Taka sytuacja może występować zwłaszcza w przypadku instalacji fotowoltaicznych, które przy odpowiednich warunkach pracują z pełną mocą w czasie

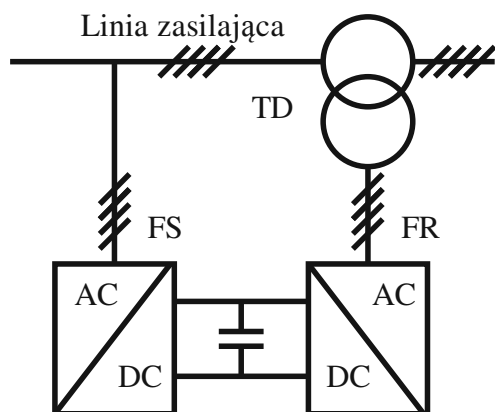
zmniejszonego obciążenia linii. Z powodu zwiększenia napięcia powyżej dopuszczalnego instalacje OZE podłączone na końcu linii muszą być wyłączone lub muszą pracować z ograniczoną mocą.

Przekroczenie dopuszczalnego napięcia na końcu linii zasilającej pokazane rysunku 2 może być zlikwidowane przez zmianę zacsepów transformatora. Jeżeli na zaciskach transformatora napięcie zostanie obniżone do 390 V, to na końcu linii napięcie spadnie do prawie 410 V. Po zaprzestaniu generowania energii przez źródła odnawialne ustawienie odcsepów transformatora musi być przywrócone.

Przełączanie odcsepów transformatora może odbywać się bezprzerwowo z zastosowaniem tyrystorowego przełącznika. Przełączanie odcsepów za pomocą układu tyrystorowego umożliwi skokową zmianę napięcia na zaciskach transformatora, jednak wymaga zastosowania układu składającego się z wielu elementów.

3. ENERGOELEKTRONICZNY REGULATOR NAPIĘCIA

Jednym ze sposobów regulacji napięcia w linii zasilającej jest użycie transformatora dodatkowego, którego uzwojenia wtórne włączone są w szereg z przewodami fazowymi linii zasilającej. Pierwotna strona transformatora dodatkowego włączana jest do linii zasilającej za pomocą łączników lub za pomocą falownika. Na rysunku 3 pokazano ogólny schemat energoelektronicznego układu regulacji napięcia z transformatorem dodatkowym. Regulator napięcia z transformatorem dodatkowym może być włączany przy transformatorze zasilającym linię nN, na końcu linii, lub w środku linii. Rola regulatora działającego w różnych miejscach włączenia do linii jest podobna. Napięcie w obwodzie pośredniczącym DC regulowane jest za pomocą falownika napięcia FS włączonego do sieci. Transformator dodatkowy zasilany z falownika FD może zmniejszać lub zwiększać napięcie w punkcie włączenia do sieci. Wartość



Rys. 3. Energoelektroniczny regulator napięcia

Dodawanego napięcia jest ograniczana do $\pm 10\%$ napięcia znamionowego linii, co powoduje, że moc transformatora dodatkowego i zasilającego go falownika FR wynosi 10% mocy przesyłanej przez linię. Falownik napięcia FS włączony do sieci służy do regulowania napięcia w obwodzie DC układu i ma moc równą co najmniej 10% mocy transformatora zasilającego linię. Kierunek przepływu mocy w falownikach FS i FR zależy znaku napięcia dodawanego do napięcia sieci.

4. WARUNKI ENERGETYCZNE PODCZAS PRACY REGULATORA NAPIĘCIA

Odpowiedni wybór parametrów falowników w regulatorze napięcia umożliwia zastosowanie dodatkowych funkcjonalności zapewniających obniżenie strat energii w linii zasilającej. Regulator może równocześnie z regulacją napięcia linii realizować:

- kompensację mocy biernej,
- symetryzację prądów płynących w fazach linii zasilającej,
- kompensację harmonicznych prądu generowanych przez odbiorniki,
- symetryzowanie napięcia w fazach w punkcie włączenia.
- utrzymanie napięcia linii w dopuszczalnym zakresie powyżej wartości znamionowej.

Regulacja mocy biernej pobieraną z sieci przed punktem włączenia transformatora odbywa się przez odpowiednieysterowanie falownika FS włączonego do sieci i zwiększenia jego mocy. Zmniejszenie strat w linii w wyniku kompensacji mocy biernej jest oczywiste.

Symetryzację obciążenia w fazach umożliwia zastosowanie falownika FS włączonego do sieci jako czteroprzewodowego. Niesymetria prądów w fazach sieci jest źródłem dodatkowych strat przy przesyłaniu określonej mocy. Straty w odcinku linii trójfazowej o rezystancji R są dla prądów symetrycznych równe:

$$\Delta P_s = 3I_{sym}^2 R \quad (2)$$

gdzie R jest rezystancją fazy, I_{sym} jest prądem przy symetrycznym obciążeniu, ΔP_s są stratami w linii przy symetrycznym obciążeniu.

Niesymetrię prądów określono przez współczynniki wagowe n_1, n_2, n_3 , których suma jest równa 3 i współczynnik n_0 będący wartością względną prądu zerowego. Współczynniki wagi określają stosunek prądu fazy przy obciążeniu niesymetrycznym do wartości prądu przy tej samej mocy i obciążeniu symetrycznym. Straty w linii dla jednakowych rezystancji faz i przewodu zerowego są równe:

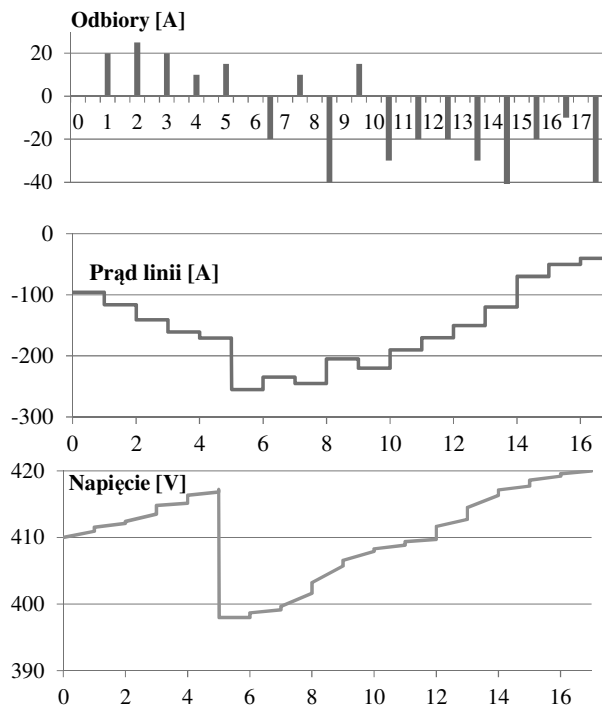
$$\Delta P_{ns} = (n_0^2 + n_1^2 + n_2^2 + n_3^2) I_{sym}^2 R, \quad (3)$$

gdzie ΔP_{ns} są stratami w sieci przy niesymetrycznym obciążeniu. Stosunek strat przy obciążeniu niesymetrycznym do strat przy obciążeniu symetrycznym n_{ss} jest następujący:

$$n_{ss} = \frac{\Delta P_{ns}}{\Delta P_s} = \frac{(n_0^2 + n_1^2 + n_2^2 + n_3^2)}{3}. \quad (4)$$

Tablica 1. Współczynniki rozkładu prądów przy niesymetrycznym zasilaniu i zwiększenie strat w procentach

n_1	n_2	n_3	n_0	$n_0^2 + n_1^2$	Zwiększenie
1,00	1,00	1,00	0,00	3,00	0%
1,20	0,90	0,90	0,30	3,15	5%
1,60	0,80	0,60	0,92	4,40	47%
2,00	0,60	0,40	1,51	6,80	127%
2,50	0,50	0,00	2,29	11,75	292%
3,00	0,00	0,00	3,00	18,00	500%



Rys. 4. Prądy odbiorów, prąd linii zasilającej i napięcie wzdłuż linii z włączoną generacją z OZE i regulatorem napięcia odejmującym napięcia w punkcie przyłączenia odbioru 5

				$+n_2^2 + n_3^2$	strat
1,00	1,00	1,00	0,00	3,00	0%
1,20	0,90	0,90	0,30	3,15	5%
1,60	0,80	0,60	0,92	4,40	47%
2,00	0,60	0,40	1,51	6,80	127%
2,50	0,50	0,00	2,29	11,75	292%
3,00	0,00	0,00	3,00	18,00	500%

Przykładowe wyniki obliczeń dodatkowych strat spowodowanych niesymetrią pokazano w Tablicy 1. Przyjęto różne wartości rozkładu prądów fazowych i wyznaczono wartość współczynnika n_0 dla składowej zerowej płynącej przez przewód neutralny. Moc strat w linii jest proporcjonalna do sumy kwadratów współczynników wagowych. W ostatniej kolumnie tabeli pokazano procentowy wzrost strat przy niesymetrycznym przesyłaniu energii. Istotne zwiększenie strat występuje, gdy w jednej fazie płynie prąd o 50% większy od prądu przy przesyłaniu symetrycznym.

Czteroprzewodowy falownik umożliwia ponadto eliminację wybranych harmonicznych z prądu linii. Jest to szczególnie istotne w przypadku linii czteroprzewodowej, w której często występują obciążenia jednofazowymi odbiornikami z wejściem prostownikowym. Występują przy tym prądy o częstotliwości równej wielokrotności trzeciej harmonicznej. Prądy te sumują się w przewodzie neutralnym powodując straty energii i odkształcenia napięcia.

Dodatkowym efektem jest niesymetria napięcia powodowana niejednakowymi spadkami napięcia wywoływanych niesymetrycznymi prądami fazowymi. Falownik regulacyjny FR wykonany jako czteroprzewodowy umożliwia dodawanie niesymetrycznego napięcia do linii zasilającej.

Regulator napięcia umożliwia utrzymywanie podwyższonego napięcia wzdłuż linii zasilającej. Przesłanie tej samej mocy przy wyższym napięciu wiąże się z obniżeniem prądu. Jeżeli prąd zmniejszy się o 5%, to straty

w odpowiednim odcinku linii spadną o ok. 10%, co może stanowić 0,5% przesyłanej mocy.

Energoelektroniczny regulator napięcia składa się z połączonych szeregowo elementów przetwarzających energię. Sprawności filtru sieciowego, falownika sieciowego, falownika regulacyjnego i transformatora dodatkowego są wysokie, jednak łączne straty mogą sięgać do 6% przetwarzanej energii, przy czym układ regulatora przetwarza do 10% energii przesyłanej linią. Straty w regulatorze wynoszą zatem do 0,6% energii przesyłanej linią.

Zmniejszenie strat w linii zasilającej jest efektem zastosowania energoelektronicznego regulatora napięcia z dodatkowymi funkcjonalnościami. Zmniejszenie strat w linii może być większe od strat w regulatorze w zależności od warunków występujących w odbiorach.

Falowniki napięcia w regulatorze energoelektronicznym mogą być zbudowane z wykorzystaniem tranzystorów z węgla krzemu (SiC). Cena tranzystorów SiC jest wprawdzie kilkakrotnie wyższa od ceny tranzystorów krzemowych, jednak ich zastosowanie pozwala na zmniejszenie nakładów na elementy bierne w układzie, co powoduje, że wzrost kosztów wytworzenia przekształtnika z tranzystorami z węgla krzemu jest niewielki w porównaniu z kosztem falownika zbudowanego z krzemowych tranzystorów IGBT. Ponadto zastosowanie tranzystorów SiC zmniejsza straty energii w przekształtniku, więc zwiększone koszty zwracają się po krótkim okresie czasu.

Efekt zastosowania energoelektronicznego regulatora napięcia pokazano na rysunku 4. Regulator włączony jest w miejscu podłączenia odbioru 5. Odejmuje napięcie ok. 20 V, co powoduje wzrost prądu za regulatorem napięcia. Efektem włączenia regulatora napięcia jest utrzymanie napięcia linii w zakresie nie przekraczającym 420 V.

Regulatory napięcia zostały zastosowane w elektrowni Kopin do regulacji napięcia generatorów z magnesami trwałymi podłączonymi do sieci dystrybucyjnej. Warunki pracy regulatorów przedstawiono w [5].

5. WNIOSKI

Energoelektroniczny regulator napięcia umożliwia utrzymanie napięcia wzdłuż linii zasilającej z odnawialnymi źródłami energii w granicach dopuszczalnych limitów określonych w instrukcjach ruchu i eksploatacji opracowanych przez operatorów sieci elektroenergetycznej. Nakłady inwestycyjne na regulator napięcia są niższe niż na inne rozwiązania stosowane w celu dostosowania linii elektroenergetycznych do przyłączania instalacji OZE. Oprócz regulacji napięcia regulator może służyć do kompensacji mocy biernej, symetryzacji prądów w sieci, symetryzacji napięć w linii oraz do kompensacji wyższych harmonicznych prądów fazowych. Pokazano, że straty energii w regulatorze są kompensowane oszczędnościami na stratach w linii zasilającej i transformatorze SN/nN.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Distribution Automation. Results from the Smart Grid Investment Grant Program. U. S. Department of Energy. https://energy.gov/sites/prod/files/2016/11/f34/DistributionAutomationSummaryReport_09-29-16.pdf, 2016.
2. Rozbudowa i modernizacja sieci dystrybucyjnej Energa Operator S.A., 2017. <https://www.mr.gov.pl/strony/zadania/plan-inwestycyjny-dla-europy/efis-w-polsce-lista-projektow-rzadowych/>
3. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej. Energa Operator, Gdańsk, Tekst jednolity obowiązujący od dnia 09 września 2019 r.
4. Kryteria oceny możliwości przyłączania mikroinstalacji i małych instalacji przyłączanych do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia Operatora Systemu Dystrybucyjnego. Energa Operator, Gdańsk, luty 2017 r.
5. Krzemiński Z., Adamowicz M.: Stabilizatory napięcia w sieciach dystrybucyjnych. W: Innowacje, pomiary i bezpieczeństwo w elektroenergetyce. Infotech, Gdańsk, 2017, s.7-13

POWER ELECTRONIC VOLTAGE REGULATOR IN THE GRID WITH RENEWABLE SOURCES

Connecting renewable energy sources to low voltage grids causes voltage variation problems, especially in the case of long distances from the power transformer. In extreme cases, it is necessary to reduce the power generated by the source due to the increase in voltage caused by voltage drops. The solution to this problem is the use of an electronic voltage regulator.

The power electronic voltage regulator consists of two inverters, one of which is used to add voltage with regulated low amplitude to the grid voltage. The voltage is added in series with using of the addition transformer. The second inverter is used to supply active energy to the control system and to correct reactive power consumption in the assumed range. The reactive power is regulated by generating a current with an appropriate phase shift in relation to the voltage. Additionally the voltage regulator can symmetrize line currents and mitigate current harmonics. Balance of losses and energy savings in the network with a voltage regulator is analysed in the paper. The paper presents the use of a regulator to stabilize the LV network voltage with distributed generation based on renewable energy sources.

Keywords: voltage control, electrical grid, renewable energy source.