

Regulacja napięcia w sieci nN z rozproszonymi źródłami energii

Streszczenie. Podłączenie rozproszonych źródeł energii do sieci energetycznych niskiego napięcia powoduje powstawanie problemów zmienności i niesymetrii napięcia, zwłaszcza w przypadku dużych odległości od transformatora zasilającego. W skrajnych przypadkach zachodzi konieczność redukcji mocy generowanej przez źródło podczas 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 podawczego, 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 referencji pokazano zastosowanie regulatora do stabilizacji napięcia sieci nN z generacją rozproszoną.

Abstract. Connecting distributed energy sources to low-voltage power grids causes problems of voltage variability and asymmetry, 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 when giving energy to the grid. The solution to this problem is the use of an electronic power regulator consisting of two inverters, one of which is used to add, with the help of an add transformer, voltage of regulated small amplitude. The second inverter is used to supply active energy to the control system and to correct reactive power consumption in the assumed range. The paper presents the use of a regulator to stabilize LV network voltage with distributed generation. **Voltage regulation in LV network with distributed energy sources**

Słowa kluczowe: regulacja napięcia, symetryzacja prądów, sieć elektroenergetyczna, rozproszone źródła energii

Keywords: voltage regulation, current symmetrization, power grid, distributed energy sources.

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 występują nowe problemy. Pojawiają się zmiany kierunku przepływu energii związane z produkcją przekraczającą zapotrzebowanie prosumenta oraz często niesymetryczne obciążenie. 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. Długie odcinki linii zasilających mogą być dostosowywane do pracy przy odwrotnym kierunku przepływu energii, ale jest to związane z dużymi kosztami przebudowy i zwiększenia mocy transformatorów. Przy przepływie energii w jednym kierunku można zastosować regulator napięcia na końcu linii. Rozwiązanie to nie może być zastosowane w przypadku generowania energii przez prosumentów ponieważ nie ma możliwości zmniejszenia napięcia przy odwrotnym kierunku przepływu energii. Problematyka zwiększenia możliwości przyłączenia źródeł OZE w sieciach terenowych o małej gęstości rozmieszczenia odbiorców i występujących długich odcinkach linii zasilających jest przedstawiona w literaturze [1, 2].

Przyłączanie 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 i uaktualnianej przez operatora działającego na określonym obszarze. Operatorzy określają możliwości przyłączenia mikroinstalacji i małych instalacji [4] 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:

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

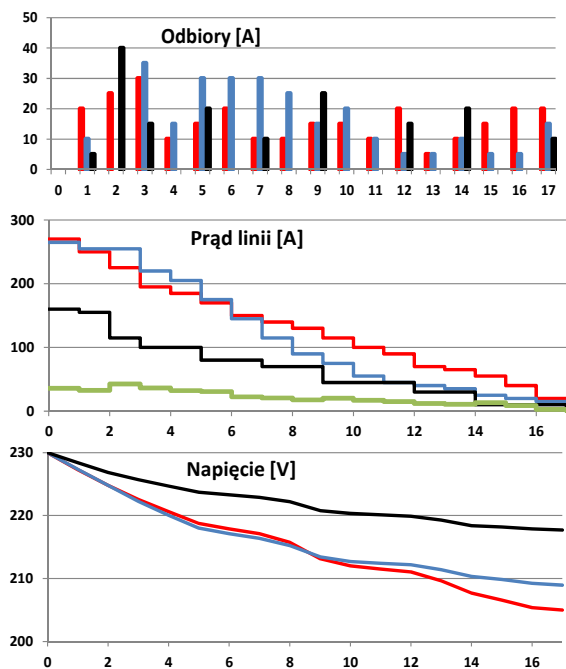
gdzie $\Delta u_{a\%}$ jest spadkiem napięcia w punkcie przyłączenia w %, $S_{E_{max}}$ jest mocą maksymalną jednostki wytwórczej, R_{kPCC} , X_{kPCC} są rezystancją i reaktancją sieci w miejscu przyłączenia, U_n jest napięciem znamionowym sieci, φ_{ind} jest kątem przesunięcia fazowego pierwszej harmonicznej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

Wyrażenie (1) określa w sposób uproszczony spadek napięcia wynikający z przyłączenia pojedynczej instalacji OZE. Określając dopuszczalny spadek napięcia w [4] pomimo składniki napięcia występujące w pełnym modelu linii zasilającej. Warunek (1) dotyczy podwyższenia napięcia spowodowanego przyłączeniem pojedynczej instalacji generującej energię.

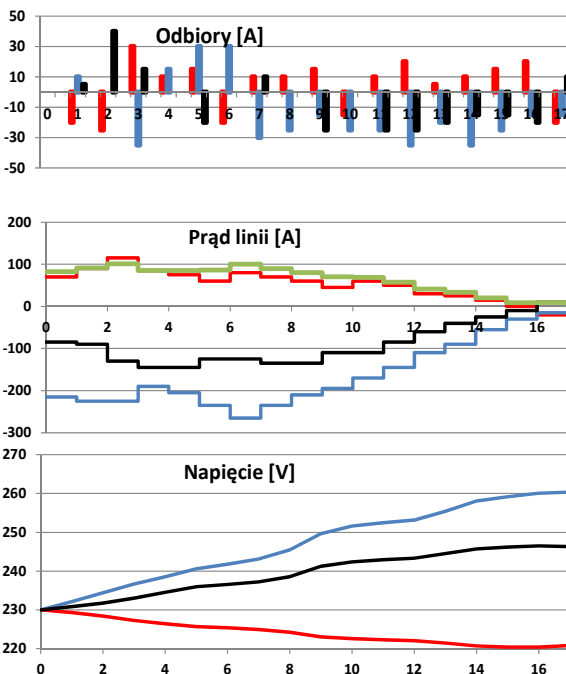
Warunek (1) jest dla pojedynczej instalacji OZE zazwyczaj spełniony. Włączenie większej liczby instalacji OZE może spowodować problemy wynikające z sumowania spadków napięcia. Znak spadków napięcia wywołanych przyłączeniem OZE jest przeciwny do spadków napięcia spowodowanych odbiorami energii i powoduje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

Na rysunku 1 pokazano prądy odbiorów, prądy linii i napięcia fazowe wzdłuż linii bez włączonych instalacji OZE. Przyjęto upraszczające założenia, że moc bierna jest równa zero, a spadki napięcia pokazane są wzdłuż przewodów fazowych. Spadek napięcia na przewodzie zerowym, jeżeli występuje, może zwiększać lub zmniejszać napięcia na poszczególnych fazach względem zera w punkcie przyłączenia odbioru. Prądy i napięcia fazowe na rysunku 1 i pozostałych oznaczono odpowiednio kolorami czerwonym, niebieskim i czarnym. Dodatkowo kolorem zielonym oznaczono prąd w przewodzie neutralnym. Parametry linii dobrano tak, żeby wyjaśnić zagadnienia związane z przyłączaniem OZE. Ustawione na stałe odczepy transformatora na poziomie 230 V napięć fazowych nie zapewniają utrzymanie spadku napięcia na

końcu linii w dopuszczalnych granicach na wszystkich fazach. Rozwiązaniem jest podwyższenie napięcia na początku linii. Przy takim podejściu na początku linii napięcie jest wyższe od znamionowego, natomiast na końcu linii napięcie może być niższe od znamionowego, ale utrzymane jest w dopuszczalnych granicach.



Rys. 1. Prądy fazowe odbiorów, prądy linii zasilającej i napięcia wzdłuż linii bez włączonej generacji z OZE



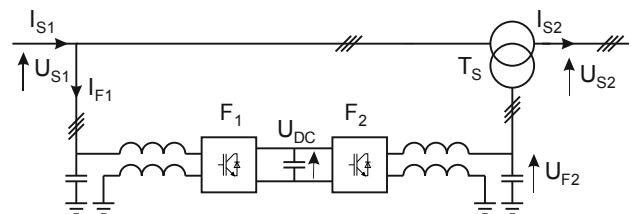
Rys. 2. Prądy fazowe odbiorów, prądy linii zasilającej i napięcia wzdłuż linii z włączoną generacją z OZE

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 230 V. Każda z kilku mikroinstalacji OZE podłączonych do linii

spełnia warunek (1), ale ich ilość i rozmieszczenie powoduje, że spadki napięcia na poszczególnych odcinkach faz zmieniają znak i powodują przekroczenie dopuszczalnego napięcia na końcu linii. Taka sytuacja może występować zwłaszcza w przypadku małych jednofazowych 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 w określonych fazach muszą być wyłączone lub pracować z ograniczoną mocą.

Występują również przypadki jak dla fazy oznaczonej kolorem czerwonym na rysunku 2, gdzie włączenie kilku małych instalacji OZE kompensuje prądy odbiorów i na końcu linii spada napięcie. Taka sytuacja występuje przy niesymetrii obciążenia i generacji energii.

Przekroczenie dopuszczalnego napięcia na końcu linii zasilającej, pokazane na rysunku 2, może być zlikwidowane przez zmianę położenia zaczepek transformatora. Jeżeli na zaciskach transformatora napięcie fazy oznaczone kolorem niebieskim zostanie obniżone do 215 V, to na końcu linii napięcie spadnie do prawie 245 V. Po zaprzestaniu generowania energii przez źródła odnawialne ustawienie odczepek transformatora musi być przywrócone do wyższej wartości.



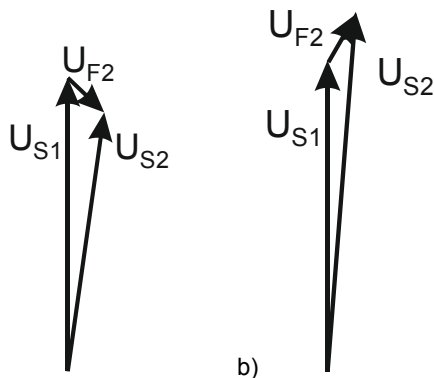
Rys. 3. Energoelektroniczny regulator napięcia

Przełączanie odczepek transformatora może odbywać się bezprzerwowo z zastosowaniem tyrystorowego przełącznika. Przełączanie odczepek za pomocą układu tyrystorowego umożliwia skokową zmianę napięcia na zaciskach transformatora. Odpowiednio skonstruowany tyrystorowy przełącznik zaczepek składa się z wielu elementów regulacyjnych.

Energoelektroniczny regulator napięcia

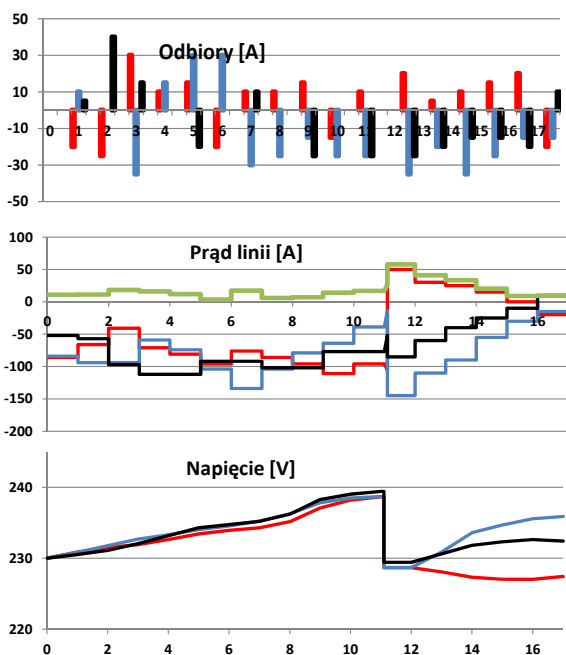
Jednym ze sposobów regulacji napięcia w linii zasilającej jest użycie transformatora dodatkowego, którego uzwojenia wtórne włączone są w szereg z przewodami fazowymi linii zasilającej. Pierwotna strona transformatora dodatkowego włączana jest do linii zasilającej za pomocą łączników lub za pomocą falownika. Na rysunku 3 pokazano schemat energoelektronicznego układu regulacji napięcia z transformatorem dodatkowym, który 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 U_{DC} w obwodzie pośredniczącym DC regulowane jest za pomocą falownika napięcia F_1 włączonego do sieci. Transformator dodatkowy zasilany z falownika F_2 może zmniejszać lub zwiększać napięcie w punkcie włączenia do sieci jak pokazano na rysunku 4. Wartość dodawanego napięcia jest ograniczana do $\pm 10\%$ napięcia znamionowego linii, co powoduje, że moc transformatora dodatkowego i zasilającego go falownika F_2 wynosi 10% mocy przesyłanej przez linię. Czterogąździowy falownik zapewnia niezależne dodawanie napięcia w poszczególnych fazach, co dodatkowo symetryzuje napięcie za transformatorem dodatkowym. W niewielkim zakresie możliwa jest regulacja

mocy biernej przez zmianę kąta wektora napięcia względem wektora prądu. Falownik napięcia F_1 włączony do sieci służy do regulowania napięcia w obwodzie DC układu i jest zaprojektowany o mocy równej co najmniej 10% mocy transformatora zasilającego linię. Kierunek przepływu mocy w falownikach F_1 i F_2 zależy od znaku napięcia dodawanego do napięcia sieci.



Rys. 4. Regulacja napięcia U_2 : zmniejszanie napięcia a), zwiększanie napięcia b)

Przekroczenia napięcia w fazach może być zredukowane przez symetryzację spadków napięć wzdłuż linii. Za pomocą regulatora napięcia można zmienić obciążenie poszczególnych faz w sposób pokazany na rysunku 5. W punkcie nr 11 włączony jest regulator napięcia, który dla tych samych odpływów jak na rysunku 4 zmienia przepływ mocy w poszczególnych fazach. Faza czerwona za regulatorem napięcia pobiera energię z sieci, natomiast przed regulatorem napięcia oddaje energię do sieci. Energia oddawana do sieci w pozostałych fazach jest zmniejszona. W rezultacie napięcie faz przed regulatorem ma zbliżoną wartość. Warto podkreślić, że symetryzacja prądów fazowych przed regulatorem nie zapewnia wyrównania napięć fazowych, jest natomiast łatwiejsza w realizacji.



Rys. 5. Prądy odbiorów, prąd linii zasilającej i napięcie wzdłuż linii z włączoną generacją z OZE i z regulatorem napięcia w punkcie przyłączenia odbioru 11

Warunki energetyczne podczas pracy regulatora napięcia

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

- kompensację mocy biernej,
- symetryzację prądów płynących w fazach linii zasilającej,
- kompensację harmonicznych prądów generowanych przez odbiorniki,
- symetryzowanie napięcia w fazach przed regulatorem w punkcie jego włączenia.

Zastosowanie regulatora napięcia pozwala na:

- utrzymanie napięcia linii w dopuszczalnym zakresie powyżej wartości znamionowej,
- zwiększenie mocy przesyłanej przez linię.

Regulacja mocy biernej pobieranej z sieci przed punktem włączenia transformatora odbywa się przez odpowiednie wysterowanie falownika F_1 włączonego do sieci przy zwiększeniu jego mocy znamionowej. Zmniejszenie strat w linii w wyniku kompensacji mocy biernej jest oczywiste.

Symetryzację obciążenia w fazach umożliwia zastosowanie falownika F_1 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:

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

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 określone wyrażeniem:

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

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

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

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

n_1	n_2	n_3	n_0	$n_0^2 + n_1^2 + n_2^2 + n_3^2$	Zwiększenie 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 tabeli 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.

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 falownika sieciowego, falownika regulacyjnego filtrów i transformatora dodawczego 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 tranzystory SiC zmniejszają straty energii w przekształtniku, więc zwiększone koszty zwracają się po krótkim okresie czasu.

Efekt zastosowania energoelektronicznego regulatora napięcia pokazano na rysunku 5. Regulator włączony jest w miejscu podłączenia odbioru 11. Odejmovane jest napięcie ok. 10 V, co powoduje zmniejszenie prądu przed regulatorem napięcia. Następuje zmniejszenie strat w linii

niezależnie od pokazanego wcześniej efektu redukcji strat w wyniku symetryzacji spadków napięć w fazach. Po włączeniu regulatora napięcia utrzymywane jest napięcie linii w zakresie nie przekraczającym 240 V.

Działanie regulatora napięcia zostało sprawdzone w elektrowni Kopin. Opracowano regulator z falownikami trójfazowymi przeznaczonymi do regulacji napięcia generatorów z magnesami trwałymi podłączonymi do sieci dystrybucyjnej. Warunki pracy regulatorów przedstawiono w [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 lub napięć w sieci oraz do kompensacji wyższych harmonicznych prądów fazowych. Szczególną właściwością regulatora włączonego w pewnej odległości od transformatora jest symetryzowanie spadków napięcia w fazach linii zasilającej. Pokazano, że straty energii w regulatorze są kompensowane oszczędnościami na stratach w linii zasilającej i transformatorze SN/nN.

Autor: 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, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11.12, 80-233 Gdańsk, E-mail: zbikrzem@pg.edu.pl

LITERATURA

- [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/Distribution Automation Summary Report 09-29-16.pdf](https://energy.gov/sites/prod/files/2016/11/f34/Distribution%20Automation%20Summary%20Report%2009-29-16.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