

Dynamiczna regulacja napięcia w sieci rozdzielczej z wykorzystaniem falowników generacji rozproszonej

Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawiono metodę regulacji wybranych parametrów napięcia w sieci rozdzielczej nn (amplituda, asymetria, zawartość wyższych harmonicznych) wykorzystujący falownik przyłączony równolegle do sieci. Skupiono się na roli mocy czynnej i biernej w regulacji amplitudy w stanach dynamicznych oraz możliwości wykorzystania rozproszonych źródeł energii, jako regulatorów w świetle obowiązujących przepisów. Rozważania zostały poparte wynikami badań laboratoryjnych.

Abstract. This paper presents method of voltage control in low voltage distribution network (magnitude, three-phase balance, harmonics) using inverter connected in parallel. Focus is put on the role of active and reactive power in dynamic voltage control as well as use of distributed generation for voltage control in the scope of polish regulations. Proposed method is proven with laboratory experiment results. (**Dynamic voltage regulation in distribution system using inverter-based distributed generation**).

Słowa kluczowe: regulacja napięcia, generacja rozproszona.

Keywords: voltage regulation, distributed generation.

Wstęp

Obecnie można zaobserwować zjawisko decentralizacji produkcji energii elektrycznej. Jest to głównie związane z promocją energii ze źródeł rozproszonych, w tym odnawialnych (OZE), które charakteryzują się stosunkowo niewielkimi mocami jednostkowymi. Szczególnym przypadkiem generacji rozproszonej są tzw. mikro- i mała instalacja, określona w polskim prawie jako jednostki wytwórcze OZE o mocy elektrycznej do 40 kW i 200 kW odpowiednio, przyłączone do sieci dystrybucyjnej. Wśród nich najpopularniejsze technologie to panele fotowoltaiczne oraz małe elektrownie wiatrowe. Ich charakterystyczną cechą jest m.in. przyłączenie do sieci za pośrednictwem falownika [1].

Rozpowszechnienie rozproszonych jednostek wytwórczych w sieci dystrybucyjnej zaburza konwencjonalny tryb pracy sieci i kierunki przepływu energii. Budzi to uzasadnione obawy Operatorów Sieci Dystrybucyjnych (OSD), którzy mogą spotkać się takimi problemami, jak: niebezpieczeństwo pracy wyspowej, warunki napięciowe w systemie elektroenergetycznym, obciążalność torów prądowych, poziomy mocy zwarciovych w węzłach sieciowych, parametry jakościowe energii elektrycznej, wpływ na warunki zwarciovowe, stabilność współpracy z siecią, zagadnienia doboru zabezpieczeń (EAZ), możliwość sterowania i regulacji napięcia i mocy biernej, zdolność do zdalnego sterowania zgodnie ze standardami operatora systemu, dostępność do sygnałów pomiarowych i parametrów rejestrowanych.

W Polsce, aby spełnić warunki poprawnej i bezpiecznej pracy w sieci nn, mikroźródła muszą spełniać wymagania techniczne zamieszczone w kryteriach przygotowanych przez PTPIREE [2], a zaimplementowane przez OSD. Oprócz technicznych kryteriów możliwości przyłączenia mikroźródła dokument zawiera szereg wymagań związanych m.in. z nastawami zabezpieczeń, regulacją mocy biernej, czy emisją zakłóceń do sieci. Wymagania te są w większości zgodne z zapisami normy EN 50438 [3] dotyczącej współpracy mikroźródeł z siecią publiczną. Wymagane układy automatyki i zabezpieczeń są najczęściej integralną częścią falownika, który jest w całości odpowiedzialny za współpracę z siecią. W związku z tym każdy falownik certyfikowany według tej normy powinien spełniać kryteria określone w [2] i gwarantować poprawną pracę mikroźródła zgodną z wymaganiami OSD.

Pośród wielu szczegółowych wymagań norma [3] przewiduje współpracę z siecią opierającą się na dwóch prostych zasadach:

- Źródło może być przyłączone do sieci, jeśli amplituda i częstotliwość napięcia w sieci mieszczą się w wyznaczonych granicach. W przeciwnym wypadku układ zabezpieczeń powinien odłączyć źródło od sieci.
- Regulacja mocy biernej odbywa się według charakterystyki zadanej przez OSD. Może to być praca ze stałą wartością Q , praca z zadanym współczynnikiem $\cos\varphi$ lub praca zgodnie z charakterystyką $\cos\varphi=f(P)$.

Regulacja mocy biernej

Wymienione sposoby regulacji mocy biernej nie wyczerpują możliwości regulacyjnych falownika, umożliwiają jednak realizację prostych strategii, np.:

- Stała moc bierna na poziomie $Q=0$ minimalizuje straty przesyłowe,
- Stały współczynnik mocy przy odpowiednim doborze (w korelacji ze współczynnikiem mocy impedancji zwarciovowej) umożliwia kompensację wpływu generowanej mocy czynnej na poziom napięcia,
- Proponowana w kryteriach [2] charakterystyka $\cos\varphi=f(P)$ zapewnia kompromis pomiędzy obiema opcjami – przy niskiej mocy czynnej źródło ma pracować z $Q=0$, a powyżej $50\%P_n$ wzrasta moc bierna indukcyjna, która ma za zadanie kompensację wzrostu napięcia wywołanego generacją mocy czynnej.

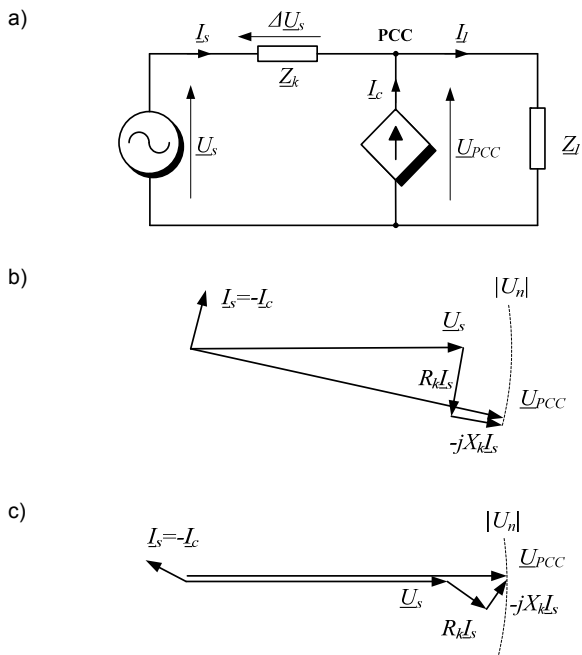
Wartym odnotowania, choć nieujętych w kryteriach [2] sposobem jest dynamiczna regulacja mocy biernej w zależności od napięcia sieci (charakterystyka $Q=f(U)$). Taki sposób regulacji mocy biernej przewidują m.in. niemiecki standard dotyczący przyłączania źródeł rozproszonych do sieci SN [4] oraz kryteria dla farm wiatrowych przyłączanych do polskiej sieci przesyłowej [5]. Jest to doskonały sposób automatycznej dynamicznej regulacji napięcia umożliwiający wsparcie sieci np. podczas zapadów napięcia [6].

Zagadnienie mikrogeneracji dotyczy jednak najczęściej sieci nn, a przede wszystkim sieci budowanych, jako linie napowietrzne, często o znacznych długościach. Sieci takie charakteryzują się stosunkowo dużymi wartościami bezwzględnych i niskimi wartościami $tg\varphi$ impedancji zwarciovowej [7]. W konsekwencji regulacja poziomu napięcia mocą bierną jest mało skuteczna.

Zilustrujemy to na przykładzie prostego modelu sieci o parametrach skupionych przedstawionego na rys.1a. W modelu tym U_s to napięcie źródła, a U_{PCC} to napięcie w punkcie przyłączenia pojedynczego odbioru Z_l i mikroźródła zamodelowanego jako sterowane źródło prądowe I_c . Z_k to

impedancja zwarciowa w punkcie przyłączenia spełniająca założenie $R_k > X_k$.

Rysunek 1b ilustruje przypadek obniżenia wartości napięcia źródła względem wartości znamionowej U_n (pomijamy wpływ prądu odbiornika I_l). Przyłączony równolegle do sieci falownik generuje moc pojemnościową (prąd I_c), przywracając znamionową amplitudę napięcia sieci. W przypadku, gdy jest to zjawisko dynamiczne będzie mu towarzyszyć skok fazy napięcia w punkcie przyłączenia. Natomiast w stanach statycznych przepływ dodatkowego prądu biernego skutkuje m.in. zwiększeniem strat przesyłowych i może prowadzić do przeciążenia linii.



Rys.1. Kompensacja spadku napięcia z wykorzystaniem: a) mocy biernej, b) mocy biernej i czynnej

Regulacja mocy czynnej

Jak wykazano, w przypadku sieci dystrybucyjnej o niskim współczynniku $tg\phi$ mocy zwarciowej regulacja napięcia za pomocą mocy biernej może nieść ze sobą więcej negatywnych skutków niż korzyści. Rozważmy teraz przypadek z rys.1c, gdzie do regulacji napięcia możemy wykorzystać zarówno moc czynną, jak i bierną. W tym wypadku możliwy jest taki dobór prądu I_c , aby przywrócić znamionowe napięcie w punkcie PCC bez zmiany jego fazy. Ponadto taka metoda regulacji zapewnia minimalizację amplitudy prądu falownika wymuszanej w celu regulacji napięcia.

W ogólnym przypadku taki sposób regulacji jest niewykonalny ze względu na konieczność zachowania kierunku przepływu mocy czynnej tj. od źródła do obciążenia. Należy jednak podkreślić, że regulacja z wykorzystaniem mocy czynnej może pełnić istotną rolę w stanach dynamicznych. Najważniejsze zjawiska, które można złagodzić odpowiednio sterując falownik to migotanie światła, dynamiczne zmiany napięcia oraz zapady o nieznacznej redukcji amplitudy.

Z oczywistych względów regulacja mocy czynnej jest ograniczona warunkami pracy mikroźródła. W przypadku paneli fotowoltaicznych maksymalna moc jest ograniczona natężeniem promieniowania, w przypadku małych elektrowni wiatrowych – prędkością wiatru, natomiast w obu przypadkach można ograniczyć moc chwilową przez odpowiednią regulację. Zapewnienie możliwości regulacji mocy czynnej wymaga zatem współpracy mikroźródła z zasobnikiem energii [8].

Obecnie norma [3] w zakresie regulacji mocy czynnej przewiduje jedynie możliwość ograniczenia generowanej mocy czynnej w przypadku wzrostu napięcia do górnej akceptowalnej granicy. Należy zauważyć, że jest to rozwiązanie zdecydowanie korzystniejsze niż przewidziane w kryteriach [2] natychmiastowe wyłączenie nadnapięciowe - zarówno dla inwestora (uniknięcie niepotrzebnych odłączeń) jak i pracy sieci (uniknięcie związanych z tym skoków napięcia).

Asymetria i wyższe harmoniczne

Przedstawiony na rys.1a model można także wykorzystać do analizy systemu w warunkach pracy z niesymetrycznymi i/lub niesinusoidalnymi prądami i napięciami. Do tego celu wykorzystane można zastosować odpowiednio metody składowych symetrycznych oraz rozkład na szereg Fouriera.

Opisana powyżej zasada regulacji napięcia może zatem zostać wykorzystana także do symetryzacji napięć trójfazowych. Dla składowej zgodnej odpowiednio dobrany prąd falownika może przywrócić amplitudę napięcia do wartości znamionowej. Podobnie dla składowej przeciwnej odpowiednia wartość prądu falownika może zmniejszyć asymetrię napięć do zera [9]. Dodatkowo odpowiedni dobór fazy prądu składowej przeciwnej minimalizuje amplitudę prądu potrzebną do kompensacji napięcia [10].

Jest to bardzo istotna a dotychczas niezauważona możliwość wykorzystania coraz powszechniejszych w sieci falowników na korzyść operatora sieci. Żaden ze znanych autorom dokumentów regulujących współpracę źródeł rozproszonych z siecią nie przewiduje możliwości regulacji składowej przeciwnej (symetryzacji) napięcia [11]. Co więcej, standardy sieciowe zazwyczaj nie definiują sposobu pomiaru napięcia w sieci trójfazowej (czy amplituda jest mierzona niezależnie w każdej z faz, czy jest to wartość średnia lub składowa zgodna). Należy przy tym nadmienić, że regulacja składowej przeciwnej prądu jest potencjalnie możliwa w prawie każdym nowo produkowanym falowniku, o ile zostanie on wyposażony w odpowiedni układ regulacji.

Idąc dalej, falowniki można wykorzystać do minimalizacji zawartości wyższych harmonicznych w napięciu sieci [12]. Wymuszenie odpowiedniego prądu wyższych harmonicznych przez falownik może przyczynić się do minimalizacji współczynnika THD w miejscu przyłączenia falownika. Jest to zadanie trudniejsze ze względu na zmienność impedancji sieci wraz z częstotliwością. Drugim ograniczeniem jest dynamika regulacji prądu falownika. W przypadku mikrogeneracji falowniki pracują ze stosunkowo dużą częstotliwością łączeń, co pozwala na efektywną implementację regulatorów do ok 20. harmonicznej. W przypadku falowników o mocach rzędach megawatów taka regulacja może być niemożliwa.

Proponowany układ regulacji

Dzięki możliwości wszechstronnej poprawy parametrów napięcia w punkcie przyłączenia układy mikrogeneracji wykorzystujące falowniki mogą pełnić dodatkowe usługi regulacyjne na rzecz OSD. Kluczowym zagadnieniem umożliwiającym realizację tych funkcji jest implementacja odpowiednich algorytmów sterowania falownika. Zaproponowany został kompleksowy układ regulacji zapewniający jednoczesną realizację następujących funkcji:

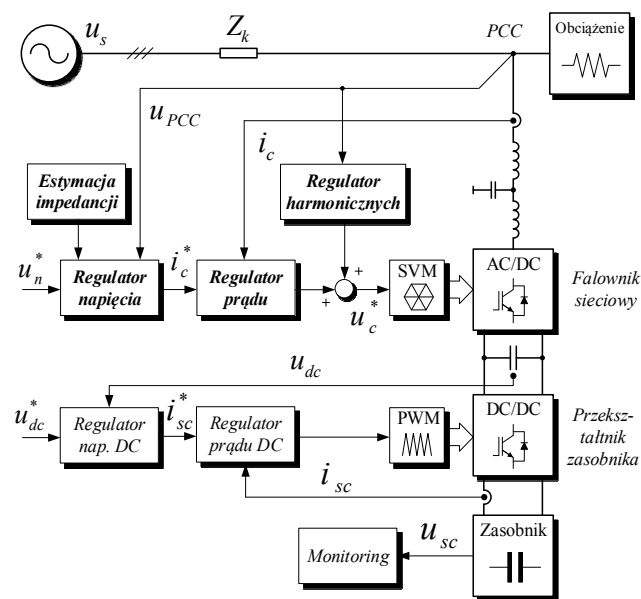
- Dynamiczna regulacja amplitudy napięcia,
- Symetryzacja napięć trójfazowych,
- Minimalizacja zawartości wyższych harmonicznych.

Schemat blokowy układu przedstawiony jest na rys.3 [15]. Część sprzętowa schematu jest realizacją modelu z rysunku 1a. Regulowanym źródłem prądowym jest falownik sieciowy napięcia z wewnętrzną pętlą regulacji prądu. Do jego obwodu pośredniczącego przez kolejny przekształtnik

DC-DC dołączony jest zasobnik energii. Utrzymuje on stałą wartość napięcia u_{DC} , zapewniając falownikowi sieciowemu dodatkowy stopień swobody w postaci elastycznej regulacji mocy czynnej. Stopień naładowania zasobnika jest dodatkowo monitorowany i wymusza ograniczenia na wymianę mocy czynnej w przypadku skrajnego naładowania lub rozładowania zasobnika.

Zasadniczą częścią układu sterowania jest regulator napięcia sieci. Wykorzystuje on dwa zasadnicze bloki funkcyjne realizujące:

- Estymację impedancji sieci wykonywaną według algorytmu opisanego w pracy [13]. Jest ona wykonywana przed uruchomieniem algorytmu regulacji i pozwala na oszacowanie parametrów R_k i X_k ;
- Ekstrakcję składowych symetrycznych napięcia sieci wykorzystującą podwójny wirujący układ odniesienia [14]. Estymacja jest wykonywana w czasie rzeczywistym na podstawie pomiarów u_{PCC} ; jej wynikiem są wartości chwilowe amplitud składowej zgodnej i przeciwnej.



Rys.2. Schemat blokowy układu regulacji napięcia

Informacje z tych bloków są wykorzystywane w procesie regulacji. Amplituda składowych symetrycznych jest porównywana z wartością zadaną (napięcie znamionowe dla składowej zgodnej, zero dla składowej przeciwnej), a błąd jest podawany na regulator napięcia proporcjonalno-całkujący. Wyjściem z regulatora jest zadana amplituda prądu falownika i_c . W przypadku typowej kompensacji mocą bierną byłaby to składowa bierna prądu. Proponowany algorytm wykorzystuje jednak do regulacji napięcia zarówno składową czynną i bierną, jak pokazano na rys.1c. Aby osiągnąć minimalizację amplitudy prądu potrzebnego do

regulacji oraz uniknąć skoków fazy, składowe czynna i bierna prądu są wyznaczone na podstawie estymowanych wartości odpowiednio rezystancji i reaktancji zwarciowej sieci. Proces ten przebiega równolegle dla składowej zgodnej i przeciwnej. Regulator napięcia odpowiada więc jednocześnie za regulację napięcia i jego symetryzację.

Wewnętrzna pętla to pętla regulacji prądu falownika. Wymusza ona prąd zadany przez regulator napięcia wykorzystując regulatory proporcjonalno-całkujące z dodatkowym członem rezonansowym dla zwiększenia wzmocnienia dla składowej przeciwnej. Jego wyjście podane jest na modulator wektorowy SVM, który generuje sygnały sterujące dla tranzystorów, a w konsekwencji zadane napięcie na wyjściu falownika.

Równolegle do regulatorów prądu, które kontrolują wyłącznie harmoniczną podstawową włączony jest regulator wyższych harmonicznych. Regulator ten ze względu na konieczność zachowania wysokiej dynamiki został wykonany jako bezpośredni, bez kaskadowej regulacji prądu i napięcia.

Szczegółowy opis układu regulacji oraz wyniki badań symulacyjnych można znaleźć w pracach [10], [15].

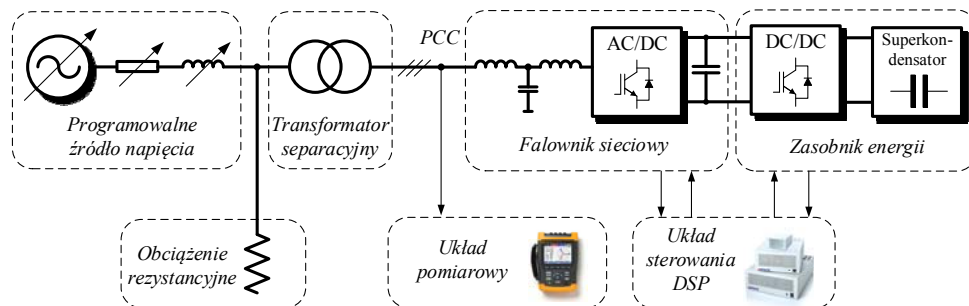
Badania laboratoryjne

Działanie proponowanego algorytmu zostało zweryfikowane eksperymentalnie na stanowisku o mocy 5 kVA. Schemat blokowy układu pomiarowego został przedstawiony na rys.3. Sieć została zasymulowana za pomocą programowalnego źródła napięcia AC *California Instruments 15003ix* z programowalną wartością impedancji wyjściowej. Dodatkowo pomiędzy sieć a badany układ został włączony transformator separacyjny symulujący transformator SN/nn. W punkcie PCC przyłączony został falownik napięciowy symulujący sprzęg mikroźródła z siecią.

Aby umożliwić swobodną wymianę mocy czynnej został on wyposażony w superkondensatorowy zasobnik energii oraz przekształtnik DC-DC [16]. Opisany w poprzednim rozdziale algorytm regulacji został zaimplementowany na sterowniku *dSPACE*. Pomiarów wybranych parametrów napięcia dokonano przy użyciu analizatora jakości energii *Fluke 434* dokonującego pomiarów parametrów napięcia zgodnie z normą EN 50160.

Tabela 1. Parametry układu laboratoryjnego

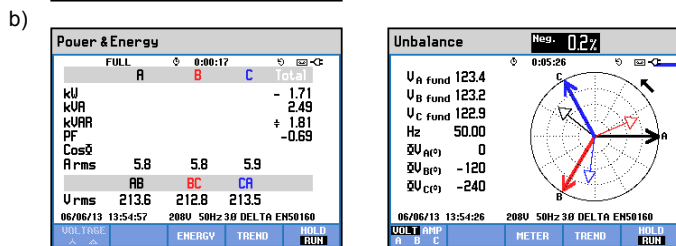
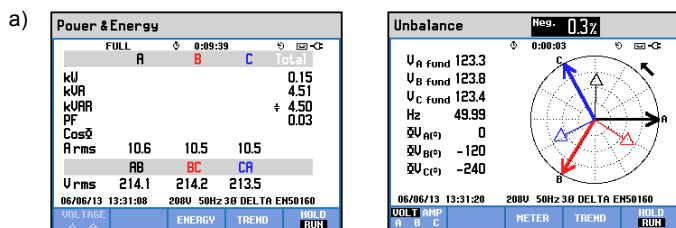
Parametr	Wartość
Napięcie fazowe U_n	3x120V
Impedancja sieci R_k/X_k	0.7Ω/0.4Ω
Moc falownika S_n	5kVA (przy 120V)
Napięcie DC U_{DC}	350V
Częstotliwość łączeń f_s	5kHz
Filtr sieciowy L/C/L	2,2mH/6μF/2,8mH
Superkondensator C_n/U_c	94F/75V



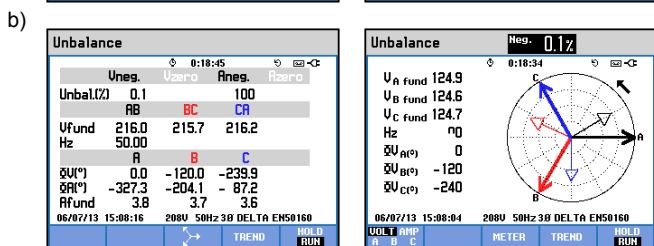
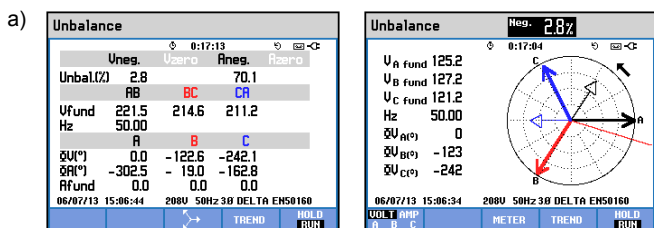
Rys.3. Układ laboratoryjny do badań algorytmu regulacji napięcia

W celu weryfikacji poprawności działania zaprojektowanego algorytmu wykonano w warunkach laboratoryjnych szereg prób. Ich rezultaty są zilustrowane wydrukami z układu pomiarowego. Pokazane przebiegi to napięcie w punkcie przyłączenia falownika u_{PCC} i prąd falownika i_c .

Rys.4 przedstawia wyniki porównania regulacji napięcia z zastosowaniem konwencjonalnej i proponowanej metody sterowania z minimalizacją amplitudy. Napięcie źródła zostało celowo ustawione 4% poniżej wartości znamionowej, a falownik dokonywał regulacji do wartości znamionowej z wykorzystaniem mocy biernej (rys.4a) lub dodatkowo również czynnej (rys.4b). Jak wykazano w badanym przypadku moc pozorną wymagana do kompensacji napięcia została zmniejszona z 4,5 kVA do 2,5 kVA dzięki wykorzystaniu mocy czynnej. Istnieje zatem możliwość zwiększenia zakresu regulacji napięcia przez falownik, o ile ma on możliwość swobodnej regulacji mocy czynnej (posiada zasobnik energii).



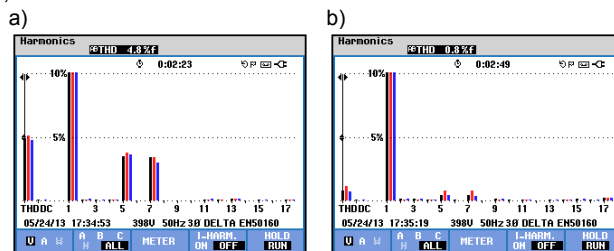
Rys.4. Regulacja napięcia: a) mocą bierną, b) mocą bierną i czynną



Rys.5. Asymetria napięć: a) bez kompensacji, b) z kompensacją

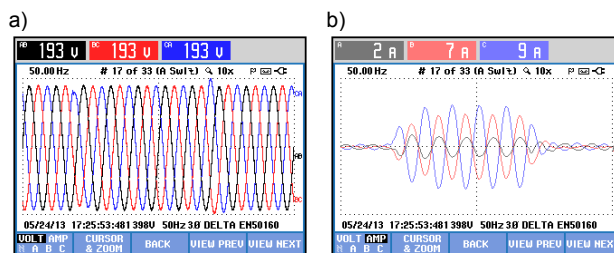
Rysunek 5 przedstawia przypadek symetryzacji napięć trójfazowych. W napięciu źródła pokazanym na rys.5a została celowo wprowadzona asymetria napięć (różne amplitudy i przesunięcia fazowe). Zawartość składowej przeciwnej wynosi 2,8%. Na rys.5b pokazano ten sam przypadek po włączeniu proponowanego algorytmu regulacji. Falownik wymusza składową przeciwną prądu w taki sposób, że minimalizuje zawartość składowej przeciwnej napięcia w punkcie przyłączenia do 0,1%.

Rysunek 6 przedstawia działanie kompensatora w przypadku zniekształcenia napięcia sieci przez 5. i 7. harmoniczną. Działanie zaimplementowanego w falowniku algorytmu regulacji wyższych harmonicznymi napięcia przyczyniło się do redukcji współczynnika THD z 4,8% do 0,8%.



Rys.6. Wyższe harmoniczne: a) bez kompensacji, b) z kompensacją

Działanie układu regulacji w stanach dynamicznych zilustrowano na rys.7. W napięciu źródła zaprogramowano trwający 5 okresów jednofazowy zapad napięcia do 70% wartości znamionowej. Układ regulacji charakteryzuje się bardzo dobrą dynamiką – zapad w miejscu przyłączenia falownika jest niemal niezauważalny. Występują jedynie niewielkie wahania napięcia, a na początku i na końcu zapadu. Z konieczności prąd wymuszony przez falownik charakteryzuje się dużą niesymetrią (zawartością składowej przeciwnej).



Rys.7. Kompensacja jednofazowego 70% zapadu napięcia: a) napięcie w PCC, b) prąd falownika

Podsumowanie

Zaproponowana metoda kompensacji zmian napięcia w stanach dynamicznych za pomocą falownika pomimo złożoności algorytmu sterowania ma szereg zalet: umożliwia dynamiczną regulację amplitudy napięcia, symetryzację napięć trójfazowych oraz minimalizację zawartości wyższych harmonicznymi.

Wykazano, że wykorzystanie dynamicznej regulacji mocy czynnej jest w stanie zwiększyć efektywność regulacji napięcia. Należy więc zauważyć korzyści z zastosowania zasobników energii jako elementów regulacyjnych mogących kształtować nie tylko krzywe dobowe obciążenia, ale i wartości chwilowe przebiegów napięć w sieciach elektroenergetycznych.

Zasobnik energii nie jest jednak elementem warunkującym działanie proponowanego algorytmu. Symetryzacja napięć oraz kompensacja harmonicznymi jest możliwa z wykorzystaniem jedynie kondensatora w obwodzie napięcia stałego falownika.

Zaprezentowane w artykule wyniki badań laboratoryjnych dotyczą prostego układu z jednym falownikiem. W związku z ewolucją elektroenergetyki w kierunku rozwiązań prosumenckich i tzw. sieci inteligentnych oraz wobec opisanych w niniejszej pracy kwestii związanych z zastosowaniami falowników, należy dostrzec potrzebę badań wykorzystania opisanej metody

regulacji w sieciach elektroenergetycznych z dużą liczbą źródeł rozproszonych.

Wskazano, że dzięki możliwości wszechstronnej poprawy parametrów napięcia w punkcie przyłączenia układy mikrogeneracji wykorzystujące falowniki mogą pełnić dodatkowe usługi regulacyjne na rzecz OSD i przyczynić się do rozwoju segmentu prosumentów [16]. Proponowane rozwiązanie powinno zainteresować zarówno OSD, jak i większych odbiorców, borykających się z problemem niedostatecznej jakości napięcia. Wobec zachęcających wyników badań, zaprezentowanych w niniejszej pracy, celowym wydaje się upowszechnianie układów z falownikami.

Problem utrzymania odpowiedniej jakości napięcia (jakości energii elektrycznej) w sieciach dystrybucyjnych będzie bowiem przybierał na znaczeniu, z uwagi na powszechność odbiorników nieliniowych z jednej strony, a z drugiej – generację rozproszoną w jednostkach o nierównomierniej produkcji, zależnej od czynników zewnętrznych. Proponowany w artykule układ sprzyja poprawie jakości energii, co jest jednym z technicznych aspektów problematyki racjonalnego użytkowania energii, gdyż wpływa na wielkość strat energii czynnej [17].

Dalsze prace powinny prowadzić do rozwoju stanu normalizacji nad źródłami rozproszonymi w kontekście możliwości ich współpracy z siecią elektroenergetyczną i realizacji dodatkowych usług regulacyjnych.

Projekt „Opracowanie i wdrożenie technologii Małych Elektrowni Wiatrowych o mocach 5 kW i 10 kW” dofinansowano ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w ramach projektu GEKON – Generator Koncepcji Ekologicznych

Autorzy: dr inż. Krzysztof Rafał, dr inż. Sławomir Bielecki, prof. dr hab.inż. Tadeusz Skoczkowski, Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Ciepłej im. B. Stefanowskiego, ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa, E-mail: krzysztof.rafal@itc.pw.edu.pl, slawomir.bielecki@itc.pw.edu.pl, tadeusz.skoczkowski@itc.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Benysek G., Kazmierkowski M.P., Popczyk J., Strzelecki R., Power electronic systems as a crucial part of Smart Grid infrastructure - a survey, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical sciences*, nr. 59 (2011), 455-473
- [2] Zespół PTPIREE ds. Kryteriów przyłączania OZE, Kryteria przyłączania oraz wymagania techniczne dla mikroinstalacji i małych instalacji przyłączanych do sieci dystrybucyjnej niskiego

- napięcia Operatora Systemu Dystrybucyjnego, Polskie Towarzystwo Przesyłu I Rozdziału Energii Elektrycznej, 2014
- [3] PN-EN 50438:2014-02, Wymagania dla instalacji mikrogeneracyjnych przeznaczonych do równoległego przyłączania do publicznych sieci dystrybucyjnych niskiego napięcia
- [4] BDEW German Association of Energy and Water Industries, BDEW Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network, Berlin, 2008
- [5] PSE Operator SA, Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej, Warszawa, 2011
- [6] Backes J., Schorn C., Basse H. Cost-Efficient integration of dispersed generation using voltage dependent reactive power control, CIREN Workshop, Lyon 7-8.06.2010, paper 107, 1-5
- [7] Engler A., Applicability of droops in low voltage grids, *International Journal of Distributed Energy Resources*, 1 (2005), n.1, 3-15
- [8] Rafał K., Bobrowska-Rafał M., Jasiński M., Sterowanie przekształtnikiem AC-DC-AC elektrowni wiatrowej z magazynem energii w sieciowym i autonomicznym trybie pracy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr.4b, 198-203
- [9] Rodriguez A. et al., Voltage Support Provided by STATCOM in Unbalanced Power Systems, *Energies*, 7 (2014), 1003-1026
- [10] Rafał K., Kazmierkowski M.P., Sterowanie układem STATCOM z zasobnikiem energii z kompensacją wyższych harmonicznych i symetryzacją napięć, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr.12a, 1-5
- [11] Schwartzfeger L., Santos-Martin D., Review of distributed generation interconnection standards, EEA Conference & Exhibition, 18-20.06.2014, Auckland, New Zealand
- [12] Ronner, B., Harmonic voltage control with a STATCOM, 13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE '09. 8-10.09.2009, 1-9
- [13] Timbus A.V., Rodriguez P., Teodorescu R., Ciobotaru M., Line Impedance Estimation Using Active and Reactive Power Variations, IEEE Power Electronics Specialists Conference (2007), 1273 – 1279
- [14] Rodriguez P. et al., Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22 (2007), n.2, 584 - 592
- [14] Rafał K., Control of shunt active power conditioner with Energy storage, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Warszawska, 2013
- [15] Gajownik T., Rafał K., Bobrowska-Rafał M., Dwukierunkowy przekształtnik DC-DC w topologii trójfazowego podwójnego mostka aktywnego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr.5, 14-19
- [16] Skoczkowski T., Bielecki S., Konieczność zapewnienia interesów odbiorców końcowych w procesie budowy sieci inteligentnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr.1, 88-94
- [17] Bielecki S., Skoczkowski T., Racjonalne użytkowanie energii w kontekście zagadnień dostarczania energii elektrycznej. *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr.12a, 121-126