

STRATEGIA STEROWANIA MIKROSYSTEMEM ELEKTROENERGETYCZNYM NISKIEGO NAPIĘCIA ZAPEWNIAJĄCA JEGO ELASTYCZNĄ PRACĘ W TRYBIE POŁĄCZENIA Z SIECIĄ ZASILAJĄCĄ I W TRYBIE WYSPOWYM Z WYKORZYSTANIEM ZASOBNIKA ENERGII

Michał MAŁACZEK¹, Irena WASIAK²

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki

1. tel.: 42 631 2594, e-mail: michal.malaczek@p.lodz.pl
2. tel.: 42 631 2590, e-mail: irena.wasiak@p.lodz.pl

Streszczenie: W artykule zaprezentowano strategię sterowania, która umożliwia pracę mikrosystemu elektroenergetycznego (MSE) niskiego napięcia w dwóch trybach: w połączeniu z siecią zasilającą oraz w trybie wyspowym. Rozpatrywany MSE zawiera sterowalne i niesterowalne źródła energii, zasobnik energii (ZE) oraz odbiory. Strategia sterowania jest hierarchiczna i bazuje na rozszerzeniu funkcjonalności zasobnika energii oraz implementacji centralnego regulatora (CR) zarządzającego pracą urządzeń sterowanych. Przedstawiono koncepcję sterowania ze szczególnym uwzględnieniem działania regulatora centralnego. Zaprezentowano model symulacyjny zbudowany w środowisku PSCAD/EMTDC do analizy proponowanego systemu sterowania i oceny pracy MSE. Przedstawiono i omówiono wyniki symulacji, które obrazują poprawność i efektywność zaproponowanej strategii sterowania.

Słowa kluczowe: mikrosystemy elektroenergetyczne, sterowanie hierarchiczne, praca wyspowa, jakość zasilania.

1. WPROWADZENIE

Wraz z rozwojem generacji rozproszonej (GR) i integracją źródeł energii z systemem elektroenergetycznym wzrosło znaczenie zagadnień związanych z jakością energii elektrycznej i niezawodnością jej dostaw [1]. Źródła rozproszone, a w szczególności odnawialne źródła energii (OZE), ze względu na charakter pracy mogą wpływać na pogorszenie parametrów jakości napięcia zasilającego. Sytuacja taka występuje często w sieciach dystrybucyjnych niskiego napięcia (nN), gdyż sieci te charakteryzują się niewielką mocą zwarciovą i małą zdolnością przyłączeniową.

W elektroenergetyce znane są różne sposoby kompensacji zaburzeń elektromagnetycznych [2]. Zwykle stosuje się w tym celu urządzenia dedykowane, na ogół kosztowne, takie jak dynamiczne stabilizatory napięcia DVR, czy kompensatory energoelektroniczne typu DSTATCOM. Do poprawy parametrów jakościowych można też wykorzystać źródła energii przyłączone przez przekształtniki energoelektroniczne, wymaga to jednak nie zawsze możliwej zmiany sterowania tych przekształtników.

Źródła energii przyłączane do sieci dystrybucyjnych sterowane są jako źródła prądowe. Jest to powszechnie stosowany i wygodny sposób sterowania, który nie koliduje z działaniem układów regulacji napięcia w sieci [3]. W sytuacji zaniku napięcia zasilającego źródła powinny

zostać wyłączone [4] w celu uniknięcia niekontrolowanej pracy wyspowej i związanego z nią ryzyka uszkodzenia urządzeń i narażenia personelu.

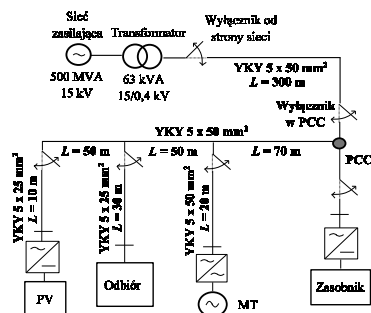
Można stwierdzić, że sieci z generacją rozproszoną, tj. sieci aktywne, oferują potencjalne możliwości poprawy jakości energii i zwiększenia niezawodności zasilania, jednakże obecnie nie są one wykorzystywane ze względu na brak odpowiednich systemów pomiarowo-kontrolnych i sterujących. Możliwość elastycznej pracy w połączeniu z siecią zasilającą i w trybie wyspowym jest jedną z wielu cech mikrosystemów elektroenergetycznych niskiego napięcia (MSE), które stanowią pożądany kierunek rozwoju sieci dystrybucyjnych. W literaturze można znaleźć wiele publikacji poświęconych algorytmom i strategiom sterowania, które umożliwiają pracę autonomiczną mikrosystemów, m.in. [5, 6], jednak w większości dotyczą one układów projektowanych lub pracujących jako wydzielone lub pilotażowe.

W niniejszym artykule przedstawiono strategię sterowania, która umożliwia przejście na pracę wyspową MSE w sytuacji nadmiernego obniżenia napięcia lub też innego niepożądanego zakłócenia w sieci zasilającej. Założono, że w skład MSE wchodzi: źródła fotowoltaiczne (PV), mikroturbina gazowa (MT), zasobnik energii (ZE) oraz odbiory. Proponowane rozwiązanie polega na rozszerzeniu funkcjonalności ZE oraz implementacji centralnego regulatora (CR), zarządzającego pracą analizowanego MSE i jego poszczególnych elementów, bez konieczności ingerowania w sposób sterowania źródeł. W dalszej części artykułu podano założenia i opis proponowanego sterowania, ze szczególnym uwzględnieniem funkcji CR.

2. ROZPATRYWANY UKŁAD

Na rys. 1 zaprezentowano strukturę analizowanego MSE. Jest on zasilany z transformatora 15/0,4 kV o mocy znamionowej 63 kVA i napięciu zwarcia 4,5%. Moc zwarciovą po górnej stronie transformatora wynosi 500 MVA. W układzie została zainstalowana mikroturbina gazowa o mocy znamionowej 30 kVA oraz panele fotowoltaiczne o mocy znamionowej 15 kWp. Odbiory energii elektrycznej zostały zagregowane i przedstawione

jako jeden zastępczy odbiór RL, którego maksymalna moc pozorna wynosi 36 kVA. Założono, że w układzie znajduje się także elektrochemiczny zasobnik energii o mocy 20 kW. Źródła oraz zasobnik energii przyłączone są do sieci poprzez przekształtniki energoelektroniczne. Założono, że MSE został wyposażony w system do pomiaru wielkości charakteryzujących pracę zainstalowanych urządzeń.



Rys. 1. Struktura badanego mikrosystemu elektroenergetycznego

3. STRATEGIA STEROWANIA

3.1. Założenia

Założono, że podstawowym trybem pracy układu jest praca w połączeniu z siecią zasilającą. W takim trybie sieć zasilająca stanowi referencyjne źródło napięcia i częstotliwości oraz zapewnia bilans mocy czynnej i biernej w przypadku nierównoważenia generacji i zapotrzebowania w MSE. Źródła oraz zasobnik energii sterowane są według strategii $P-Q$ jako źródła prądowe, realizujące zadane wartości mocy czynnej i biernej [3]. Przyjęto, że zadaniem zasobnika jest utrzymanie wartości mocy wymienianej z siecią w wymaganym przedziale, tj. $P_{wym} \in < P_{import maks}, P_{eksport maks} >$ oraz $Q_{wym} = 0$ kvar.

MSE przechodzi do pracy wyspowej po wystąpieniu zakłócenia w sieci zasilającej, którego efektem jest całkowite odłączenie od sieci lub zapad napięcia poniżej dopuszczalnego poziomu. Dla zapewnienia pracy wyspowej jedno z urządzeń w rozpatrywanym MSE musi przejąć funkcję źródła napięcia referencyjnego, tzn. musi pracować w trybie sterowania napięciowego według strategii $U-f$, utrzymując zadane wartości napięcia i częstotliwości w układzie [7]. Przy założeniu, iż sterowanie źródeł PV i MT nie podlega zmianie przyjęto, że źródłem napięcia referencyjnego przy pracy wyspowej jest zasobnik energii. Sterowanie zasobnika zmienia się więc z $P-Q$ na $U-f$ wraz z przejściem na pracę wyspową. Szczegółowy opis algorytmów sterowania źródeł i zasobników energii elektrycznej został przedstawiony w artykule [8].

Detekcja warunków przejścia na pracę wyspową realizowana jest na podstawie krzywej odporności rozpatrywanego MSE, wyznaczonej z uwzględnieniem czułości poszczególnych urządzeń i nastaw zabezpieczeń zainstalowanych w MSE. Krzywa ta wyznacza obszar dopuszczalnych zmian napięcia i czasów ich trwania, przy których możliwa jest jeszcze praca w połączeniu z siecią. Zmiany znajdujące się poza obszarem dopuszczalnym powodują odłączenie MSE od sieci i przejście na pracę wyspową. Należy podkreślić, że zmiana trybu pracy MSE musi być zrealizowana przed zadziałaniem zabezpieczeń urządzeń. Praca wyspowa odbywa się do momentu powrotu napięcia w sieci zasilającej do wymaganej wartości, po czym następuje resynchronizacja.

Strategia sterowania jest realizowana na dwóch poziomach. Poziom nadrzędny stanowi regulator centralny

(RC), który decyduje o sposobie pracy MSE oraz wyznacza nastawy dla lokalnych regulatorów urządzeń sterowanych.

3.2. Centralny Regulator

Podczas pracy MSE w połączeniu z siecią zasilającą CR odpowiada za wyznaczanie referencyjnych wartości mocy dla zasobnika energii ($P_{Zad zasobnik}$ i $Q_{Zad zasobnik}$) i mikroturbiny ($P_{Zad MT}$ i $Q_{Zad MT}$), a ponadto wykrywa warunki, w których konieczne jest przejście do pracy wyspowej. Referencyjne wartości mocy dla MT są zmieniane w 1-godzinnych przedziałach czasowych, w zależności od aktualnie realizowanego harmonogramu pracy. Moc czynna i bierna zasobnika uzależnione są od zmienności PV oraz odbiorów energii i wyznaczone są co 1 min. Detekcja warunków przejścia skutkuje zmianą algorytmu sterowania zasobnikiem z $P-Q$ na $U-f$.

W czasie pracy wyspowej zadaniem CR jest wyznaczanie mocy referencyjnych dla MT, a także detekcja warunków, w których możliwe jest przeprowadzenie resynchronizacji i ponowne przyłączenie MSE do sieci zasilającej. Wartości referencyjne mocy dla MT wyznaczone są w przedziałach 5 min, na podstawie pomiarów mocy generowanej przez PV i pobieranej przez odbiory, zgodnie z równaniami (1) i (2):

$$P_{Zad MT} = P_{PV 5min} + P_{O 5min} \quad (1)$$

$$Q_{Zad MT} = Q_{O 5min} \quad (2)$$

gdzie: $P_{PV 5min}$, $P_{O 5min}$, $Q_{O 5min}$ – odpowiednio moc czynna PV oraz moc czynna i bierna odbioru, uśredniane w okresach 5-minutowych.

Z powyższego wynika, że zasobnik energii pokrywa tylko krótkotrwałe zmiany mocy w układzie, a w stanach ustalonych jego moc dąży do zera. Zapewnia to stabilną pracę MSE przy zmiennej generacji i zapotrzebowaniu.

W celu umożliwienia przejścia MSE do pracy wyspowej zasobnik energii musi posiadać odpowiednią rezerwę mocy oraz energii. Rezerwa mocy jest zdefiniowana przez największą wartość wymiany z siecią jaką musi przejąć zasobnik w momencie przejścia MSE do pracy wyspowej. Z kolei rezerwa energii zasobnika wynika z wartości tej mocy oraz czasu potrzebnego do aktywacji i zadziałania mechanizmów regulacyjnych MT. Pojemność zasobnika wynika z funkcji jakie pełni w MSE podczas pracy w połączeniu z siecią zasilającą, ale musi być również oceniona pod kątem pracy wyspowej. Problem doboru pojemności zasobnika wymaga szczegółowej analizy i nie jest tutaj rozważany. Podobnie pominięto zagadnienie kontroli stanu naładowania zasobnika i dodatkowych mechanizmów, wprowadzonych dla jego utrzymania.

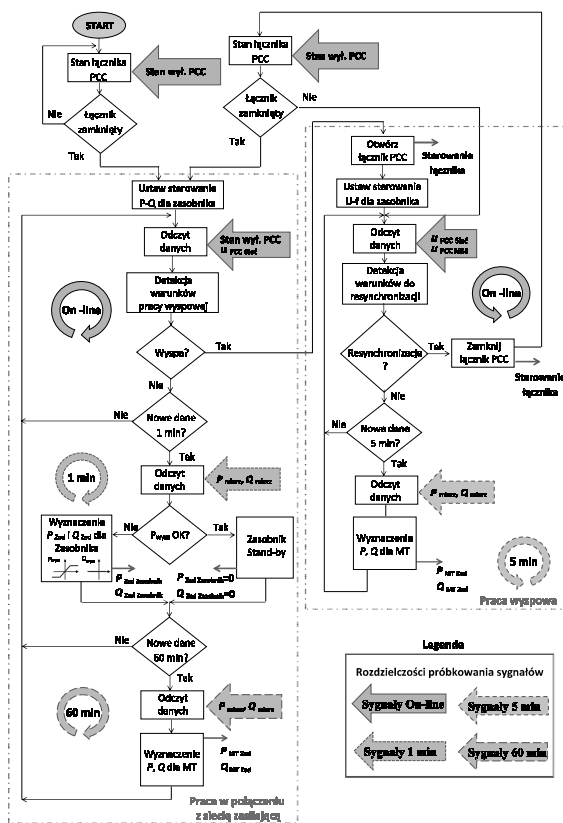
Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy CR. Zawiera on dwa główne tory sterowania, tj. tor odpowiadający pracy w połączeniu z siecią zasilającą oraz tor dla pracy wyspowej. Sygnałami wejściowymi dla CR są wartości chwilowe napięć po obu stronach łącznika w punkcie przyłączenia PCC (ang. *Point of Common Coupling*) oraz aktualny stan łącznika, a także moce P i Q poszczególnych urządzeń zainstalowanych w MSE. Napięcia i stan łącznika są monitorowane on-line, natomiast sygnały mocy czynnych i biernych przesyłane są z układu pomiarowego do CR, odpowiednio w okresach 1-minutowych, 5-minutowych i 60-minutowych.

Założono, że algorytm jest inicjowany w sytuacji, gdy łącznik jest zamknięty i MSE jest połączony z siecią zasilającą. W takiej sytuacji aktywowany jest tor

odpowiadający pracy w połączeniu z siecią zasilającą. CR w sposób ciągły sprawdza, czy wystąpiły warunki przejścia na pracę wyspową i w zależności od sytuacji pozostawia MSE w obecnym trybie pracy bądź inicjuje zmianę trybu.

W pierwszej sytuacji algorytm przechodzi do wewnętrznej pętli sterowania realizowanej w przedziałach 1-minutowych. Na podstawie bilansu mocy w MSE sprawdzana jest w niej aktualna wartość mocy wymiany w oparciu o którą CR wyznacza referencyjne wartości mocy dla zasobnika. W kolejnej pętli w przedziałach 1-godzinowych wyznaczane są moce referencyjne dla MT, zgodnie z ustalonym harmonogramem.

W sytuacji, gdy zidentyfikowane zostaną warunki do pracy wyspowej, CR wysyła sygnał na otwarcie łącznika w PCC i zmianę strategii sterowania zasobnika na $U-f$. W pierwszej pętli sterowania przy pracy wyspowej sprawdzane są warunki do rozpoczęcia procesu resynchronizacji, natomiast w wewnętrznej pętli sterowania, realizowanej w przedziałach 5-minutowych, wyznaczane są moce referencyjne dla MT. W sytuacji, gdy CR wykryje warunki pozwalające na ponowne połączenie MSE z siecią zasilającą, rozpoczynany jest proces resynchronizacji i po jego zakończeniu wysyłany jest sygnał na zamknięcie łącznika w PCC i zmianę sterowania zasobnika na tryb $P-Q$. Algorytm powraca do stanu początkowego.



Rys. 2. Struktura Centralnego Regulatora

4. BADANIA SYMULACYJNE

W celu oceny zaproponowanej strategii sterowania i ilustracji działania centralnego regulatora, poniżej zaprezentowano wyniki symulacji wykonanej za pomocą symulatora rozpatrywanego układu opracowanego w programie PSCAD/EMTDCS. Sposób modelowania poszczególnych elementów MSE opisano w [8].

Założono, że w trakcie pracy w połączeniu z siecią zasilającą moc P_{wym} może zmieniać się w przedziale

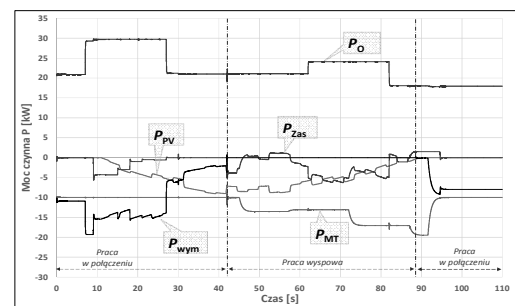
$\langle -15,15 \rangle$ kW, z kolei moc Q_{wym} musi być utrzymana na poziomie 0 kvar. Przyjęto, że moc wymiany importowana z sieci zasilającej przyjmuje znak ujemny, a w sytuacji odwrotnej znak dodatni. Ponadto dodatnia wartość mocy czynnej zasobnika P_{zas} oznacza, że gromadzi on energię.

Scenariusz prezentowanej symulacji jest następujący. Na początku MSE pracuje w połączeniu z siecią zasilającą. Moc generowana przez MT S_{MT} równa jest 11 kVA przy $\cos \varphi = 0,9$, moc PV P_{PV} zmienia się w zakresie (0 – 10) kW przy $\cos \varphi = 1$, a moc odbioru S_{load} wynosi 23 kVA przy $\cos \varphi = 0,4$. Moc czynna importowana z sieci zasilającej mieści się w dopuszczalnym przedziale, dlatego też P_{zas} równa jest 0 kW. W 7 s moc odbioru wzrosła do 30 kW, co spowodowało wzrost wartości P_{wym} do 19 kW. W rezultacie zasobnik zaczął się rozładowywać z mocą 4 kW. W 27 s na skutek zmniejszenia mocy odbioru, P_{wym} znalazła się w dopuszczalnym przedziale zmian, co spowodowało powrót zasobnika do poprzedniego stanu. Zmiany mocy czynnej i biernej zaprezentowano na rysunkach 3 i 4. W celu zobrazowania działania CR w poszczególnych pętlach czasowych, dla wyznaczania nastaw MT i ZE przyjęto, że 3 sekundy symulacji odpowiadają 1 min czasu rzeczywistego.

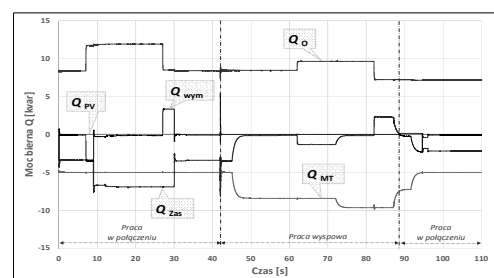
W 42 s symulacji, na skutek zwarcia w sieci zasilającej, w punkcie PCC wystąpił niedopuszczalny zapad napięcia do $0,56 U_n$, którego efektem było rozpoczęcie procesu przejścia MSE do pracy wyspowej. CR wysłał sygnał na otwarcie wyłącznika, z czasem wynikającym z przyjętej krzywej odporności MSE. Równocześnie nastąpiła zmiana sterowania ZE z trybu $P-Q$ na $U-f$. Napięcia po obu stronach wyłącznika w punkcie PCC widoczne są na rys. 5 i 6.

W trakcie pracy wyspowej generacja MT była dostosowywana do zmieniających się warunków pracy odbioru co 15 s symulacji. Zasobnik energii reagował natychmiast na krótkotrwałe zmiany mocy w MSE. Ze względu na złagodzenie stanu przejściowego zaraz po zmianie trybu pracy MSE, MT przez 3 s dalej pracowała z wartością mocy z poprzedniego trybu.

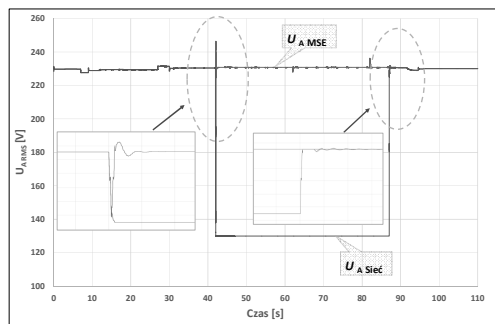
W 87 s symulacji napięcie w sieci zasilającej powróciło do stanu sprzed zakłócenia, co spowodowało rozpoczęcie procesu resynchronizacji (rys. 7). Po jego zakończeniu MSE powrócił do pracy w połączeniu z siecią zasilającą.



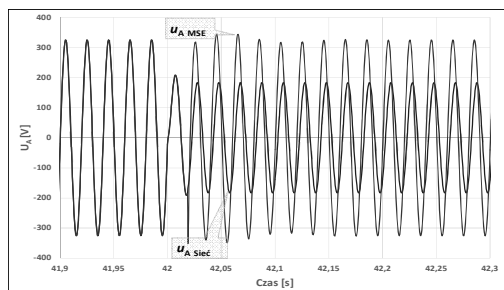
Rys. 3. Zmiany mocy czynnej w MSE



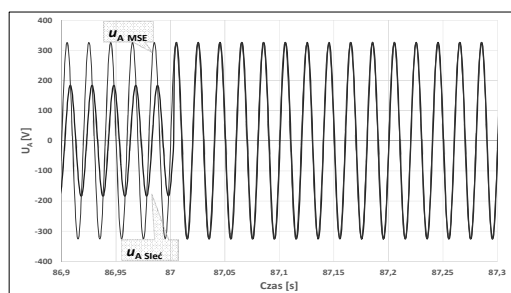
Rys. 4. Zmiany mocy biernej w MSE



Rys. 5. Przebieg wartości skutecznej napięcia w fazie A



Rys. 6. Przebieg wartości chwilowej napięcia w fazie A w trakcie przejścia MSE do pracy wyspowej



Rys. 7. Przebieg wartości chwilowej napięcia w fazie A w trakcie resynchronizacji

5. WNIOSKI

W artykule zaprezentowano koncepcję hierarchicznej strategii sterowania mikrosystemem elektroenergetycznym niskiego napięcia, zapewniającą jego elastyczność i bezprzerwową pracę zarówno w połączeniu z siecią zasilającą, jak i w trybie wyspowym. Proponowane rozwiązanie oparte jest na rozszerzeniu funkcjonalności

zasobnika energii oraz implementacji centralnego regulatora zarządzającego pracą analizowanego MSE i jego poszczególnych elementów. Strategia sterowania opracowana została dla małych MSE, przy czym uwzględniono ograniczenia techniczne rzeczywistych urządzeń. W prezentowanych badaniach przyczyną przejścia na pracę wyspową był nadmierny zapad napięcia w sieci, ale prezentowane rozwiązanie ma charakter ogólny i może odnosić się do dowolnego rodzaju zaburzenia napięcia zasilającego, które powinno być złagodzone bądź całkowicie usunięte. Przeprowadzone badania symulacyjne świadczą o skuteczności proponowanej strategii i poprawności działania centralnego regulatora nadzorującego pracę MSE. Model symulacyjny opracowany w środowisku PSCAD/EMTDC stanowi dobre narzędzie do analizy i oceny funkcjonowania MSE w różnych trybach pracy.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Wasiak I., Pawełek R., Jakość zasilania w sieciach z generacją rozproszoną, Warszawa 2015.
2. Hanzelka Z., Jakość dostawy energii elektrycznej, Kraków 2013.
3. Bai W., Abedi M.R., Lee K.Y., Distributed generation system control strategies with PV and fuel cell in microgrid operation, Control Eng. Pract. 2015, Vol. 53, pp. 184–193.
4. Meegahapola L., Lavery D., Jacobsen M.-R., Synchronous islanded operation of an inverter interfaced renewable rich microgrid using synchrophasors, IET Renew. Power Gener. 2018, Vol.12, No. 4, pp. 407-414.
5. Gomez J.C., Marcos M.M., Distributed generation: Exploitation of islanding operation advantages, 2008 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am. T D-LA, pp. 1–5, 2008.
6. Piagi P., Lasseter R.H., Autonomous control of microgrids, IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet. 2006.
7. Wang C. i in., Improved V/f control strategy for microgrids based on master-slave control mode, IET Renew. Power Gener. 2016, Vol. 10, No. 9, pp. 1356–1365.
8. Małaczek M., Wasiak I., Modelling of Energy Sources and Energy Storage devices for the Purpose of Analysis the Low voltage Microgrid Operation, Acta Energetica 2017, No.3/32, pp. 162–169.

A CONTROL STRATEGY FOR FLEXIBLE OPERATION OF LV MICROGRID IN BOTH GRID-CONNECTED AND ISLANDED MODE BASED ON ENERGY STORAGE UTILIZATION

In the paper, a hierarchical control strategy is presented allowing a low voltage microgrid (MG) to operate in both grid-connected and islanded mode. The considered MG consist of photovoltaic panels (PV), gas microturbine (MT), loads and energy storage (ES). The concept is based on enhancing the functionality of an ESS which is used for energy management in normal operating conditions of the network and a central controller for supervising the network operation in grid-connected and islanded modes. It has been assumed that the ESS serves as grid-forming unit, i.e. maintains the reference voltage and is responsible for short-term power balancing during islanded operation. Performance of the proposed strategy is presented as a reaction of the network on voltage dips, however the idea is applicable to any power quality (PQ) disturbance of unacceptable level occurring in the utility grid. For the considered network a simulation model has been developed using PSCAD/EMTDC platform. Simulation results are presented in the paper which illustrate the operation of the control system and show the microgrid behavior after transition from grid-connected to islanded operation and back.

Keywords: Microgrid autonomous operation, microgrid hierarchical control, energy storage, power quality.