

Metoda projektowania algorytmu sterowania zasobnikiem w instalacji prosumenckiej z wykorzystaniem symulatora czasu rzeczywistego RTDS

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób testowania algorytmów sterowania zasobnikiem energii w instalacji prosumenckiej z wykorzystaniem symulatora czasu rzeczywistego. Przyjęto, że celem działania zasobnika energii jest minimalizacja ilości energii pobieranej z sieci na potrzeby odbiorników zainstalowanych w instalacji. Dla założonej funkcji zasobnika opracowano algorytm sterowania który następnie zweryfikowano w modelu symulacyjnym. Na podstawie zweryfikowanego modelu zbudowano układ badawczy z zastosowaniem RTDS.

Abstract. The article presents a method of testing algorithms for controlling the energy storage in a prosumer installation using a real-time simulator. It has been assumed that the purpose of the energy storage is to minimize the amount of energy drawn from the network for the needs of receivers installed in prosumer installation. For the assumed storage function, a control algorithm was developed which was verified in a simulation model. Based on the verified model, a research system using RTDS was built (The method of designing the energy storage control algorithm in a prosumer installation using Real-Time Simulator RTDS).

Słowa kluczowe: Algorytm sterowania, zasobnik energii, Symulator czasu rzeczywistego, instalacja prosumencka

Keywords: Control algorithm, energy storage, real time simulator, prosumer installation.

Wstęp

Wraz z rosnącym udziałem mocy wytwarzanej w źródłach odnawialnych pojawia się problem bilansowania mocy w systemie elektroenergetycznym. Wynika on z faktu, iż praca odnawialnych źródeł energii jest zależna od warunków pogodowych zmiennych losowo, a nie zależy od mocy zapotrzebowanej przez odbiory. Zbilansowanie mocy generowanej i pobieranej przez odbiory muszą zapewnić elektrownie konwencjonalne z regulacją mocy kompensującą zarówno zmiany mocy odbiorów, jak zmiany mocy źródeł odnawialnych. Podobny efekt można uzyskać stosując zasobniki energii magazynujące energię w przypadku nadmiaru mocy wytwarzanej i dostarczające energię wtedy, gdy łączna moc źródeł nie pokrywa zapotrzebowania odbiorów [1][2][3].

Do bilansowania mocy czynnej w elektroenergetycznych sieciach dystrybucyjnych najczęściej wykorzystywane są zasobniki elektrochemiczne, tj. baterie akumulatorów. Wynika to z faktu, że są one stosunkowo tanie, proste w budowie, jak również uniwersalne [4][5]. Baterie przyłącza się do sieci za pomocą inwerterów, które wraz z baterią tworzą układ zasobnika. Oprócz zarządzania mocą czynną układy zasobników można także wykorzystać do innych zadań, np.: regulacji napięcia, kompensacji mocy biernej, kompensacji wyższych harmonicznych, lub asymetrii [1][5][6][7].

Zastosowanie układu zasobnika do realizacji wybranych funkcji wymaga doboru jego parametrów oraz opracowania odpowiednich algorytmów sterowania. Parametrami układu zasobnikowego są: pojemność baterii oraz moc maksymalna inwertera, natomiast algorytm sterowania zależy od funkcji jakie system zasobnika ma spełniać. Dla zasobników przeznaczonych do pracy w rozległej sieci dystrybucyjnej parametrem jest również lokalizacja zasobnika [8]. W instalacjach prosumenckich lokalizacja zasobnika jest na ogół zdeterminowana.

Optymalny dobór parametrów układu zasobnikowego oraz zaprojektowanie i zweryfikowanie algorytmu sterowania są zadaniem trudnym, ze względu na zmieniającą się losowo generację źródeł odnawialnych oraz zmienne zapotrzebowanie odbiorów.

W artykule przedstawiono metodę projektowania i testowania układów zasobnikowych oraz algorytmów sterowania zasobnikami za pomocą narzędzi symulacyjnych na przykładzie zasobnika energii w instalacji prosumenckiej. Ideę metody oraz podstawowe założenia

opisano w rozdziale 2. W rozdziale 3 przedstawiono proponowany algorytm sterowania zasobnikiem. W kolejnym rozdziale pokazano wybrane wyniki symulacji wykonanych na modelu symulacyjnym rozpatrywanego układu w celu sprawdzenia poprawności działania algorytmu oraz określenia parametrów układu zasobnikowego. Rozdział 5 poświęcony jest weryfikacji algorytmu sterowania w układzie rzeczywistym za pomocą symulatora czasu rzeczywistego (Real Time Digital Simulator) RTDS. Artykuł podsumowano wnioskami.

Metoda projektowania układu zasobnika w instalacjach prosumenckich

Symulacyjna metoda projektowania układu zasobnikowego obejmuje trzy zasadnicze etapy:

1. Zdefiniowanie wymagań jakie ma spełniać układ zasobnikowy, zdefiniowanie ograniczeń i opracowanie algorytmu sterowania na podstawie zdefiniowanych wymagań przy uwzględnieniu ograniczeń.
2. Sprawdzenie poprawności zaproponowanego algorytmu sterowania na modelu symulacyjnym i dobór parametrów układu zasobnikowego.
3. Weryfikacja działania układu sterowania w układzie rzeczywistym z wykorzystaniem symulatora czasu rzeczywistego RTDS.

Przyjęto założenie, że zasobnik energii jest stosowany w instalacji prosumenckiej w celu odpowiedniego zarządzania energią wytwarzaną przez lokalne źródła i ograniczenia kosztów zakupu energii z sieci zasilającej ponoszonych przez prosumenta.

Dobór parametrów zasobnika oraz weryfikacja algorytmu sterowania jego pracą za pomocą metody symulacyjnej wymaga zbudowania symulatora instalacji prosumenckiej, przy użyciu odpowiedniego narzędzia symulacyjnego, np. programu PSCAD [9]. Symulator składa się z następujących elementów:

- modelu instalacji prosumenckiej obejmującego moduły: układu zasilania, odbiorów, źródeł oraz zasobnika energii. Parametry modeli linii zasilającej, odbiorów i źródeł odpowiadają parametrom nominalnym obiektów rzeczywistych. Pojemność zasobnika może być dowolnie duża, natomiast moc inwertera przyjmuje się największą, która w rozważanej instalacji może być wykorzystana.
- algorytmu sterowania pracą inwertera zasobnika. Algorytm musi spełniać wszystkie zadane funkcje

wynikające z celu, któremu ma służyć zasobnik jako inwestycja prosumencka oraz uwzględnić ograniczenia techniczne znane dla tej instalacji.

- modułów sterujących mocami modeli źródeł i odbiorów. Sposób sterowania odtwarza przebiegi tych mocy zanotowane dla rzeczywistych obiektów instalacji w długim, np. rocznym, okresie czasu.
- modułów realizujących obliczenia ekonomiczne, w tym opłaty za energię pobraną i oddaną do sieci według obowiązującej taryfy), umożliwiające prosumentowi ocenę opłacalności dla inwestycji zasobnikowej.

Na tak zbudowanym symulatorze można prowadzić badania jak na obiekcie rzeczywistym. Przyjęcie w symulacji odpowiedniej skali czasu umożliwia obserwację przebiegów prądów, napięć i mocy jak w sieci rzeczywistej. Jednocześnie badanie może obejmować długie okresy pracy zamodelowanej instalacji i koszty jakie wtedy wystąpią.

Za pomocą symulatora można poszukiwać metodą kolejnych prób i błędów najlepszego rozwiązania dla prosumenckiego zasobnika, tj. minimalnej pojemności zasobnika i minimalnej mocy inwertora. W pierwszej fazie obliczeń poszukuje się minimalnej pojemności zasobnika, przy której jest realizowany cel sterowania i spełnione są ograniczenia techniczne w całym okresie będącym przedmiotem badań. W niektórych przypadkach analiza przebiegów z symulacji może wykazać, że osiągnięcie minimalnej pojemności wymaga uzupełnienia algorytmu sterowania o dodatkowe procedury. W drugiej fazie obliczeń na podstawie analizy przebiegów otrzymanych w trakcie symulacji, dla znalezionej minimalnej pojemności zasobnika wyznacza się parametry inwertora układu zasobnikowego.

Należy podkreślić, że proponowana metoda projektowania systemu zasobnika, z uwzględnieniem zmienności obciążeń i generacji w sieci prosumenckiej, daje w efekcie rozwiązanie realizujące cel sterowania w każdej chwili odwzorowywanego czasu pracy. Może to być dla prosumenta gorsze rozwiązanie niż zasobnik o pojemności, dla której np. iloraz zysków wynikających z pracy systemu zasobnika do jego nakładów inwestycyjnych osiąga maksimum. Takie poszukiwania umożliwiają odpowiednio zbudowane moduły obliczeń ekonomicznych. Trzeba zauważyć, że rozwiązanie uzasadnione ekonomicznie może powodować to, że w pewnych przedziałach czasu cel sterowania nie będzie mógł być osiągnięty.

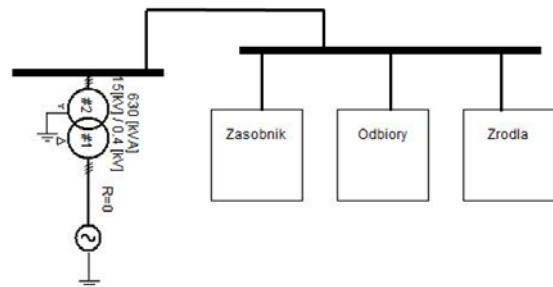
Dokładność wyznaczania parametrów zasobnika i inwertora za pomocą symulatora odwzorowującego w skali czasu pracę instalacji prosumenckiej powinna być dla praktyki projektowej wystarczająca. Testy dla doboru parametrów powinny odwzorowywać długie okresy eksploatacji instalacji bazując na danych zarejestrowanych przebiegów rzeczywistych wielkości. Te dane są zazwyczaj notowane jako wartości średnie 10-, 15-, 30-minutowe albo godzinne. Zaprojektowany algorytm sterowania zasobnikiem działający na symulatorze pracującym w skali czasu będzie więc reagował na wartości uśrednione. W rzeczywistej instalacji prosumenckiej algorytm musi reagować na wartości chwilowe i działać w czasie rzeczywistym. Weryfikację poprawności działania algorytmu w takich warunkach można przeprowadzić przy użyciu symulatora czasu rzeczywistego RTDS (Real Time Digital Simulator) [10]. Umożliwia on przy użyciu oprogramowania RSCAD zaimplementowanie algorytmu sterowania, który przy użyciu kart wyjściowych będzie mierzył odpowiednie wielkości elektryczne w badanej realnej instalacji prosumenckiej, a za pomocą kart wyjściowych będzie sterował inwertorem zasobnika prosumenta. Analiza pracy wirtualnego, zbudowanego na RTDS, a więc pracującego w czasie rzeczywistym, sterownika inwertora

współdziałającego z urządzeniami rzeczywistymi daje bardziej wiarygodne wyniki oceny algorytmu niż analiza wyników symulacji off-line.

W dalszej części artykułu przedstawiono algorytm sterowania zasobnikiem energii współpracującym z odnawialnym źródłem energii w instalacji prosumenckiej oraz sposób testowania skuteczności działania algorytmu z wykorzystaniem symulatora RTDS.

Algorytm sterowania zasobnikiem

Przedmiotem badań jest instalacja prosumencka zasilana z transformatora 630 kVA, linią o zdolności przesyłowej 35 kW. W skład instalacji wchodzi: źródła o znanym przebiegu generowanej mocy średniej godzinowej, zarejestrowanym dla obiektów w eksploatacji, zastępczy odbiór o znanym profilu obciążenia oraz projektowany zasobnik energii. Schemat układu pokazano na Rysunku 1.



Rys. 1. Schemat instalacji prosumenckiej

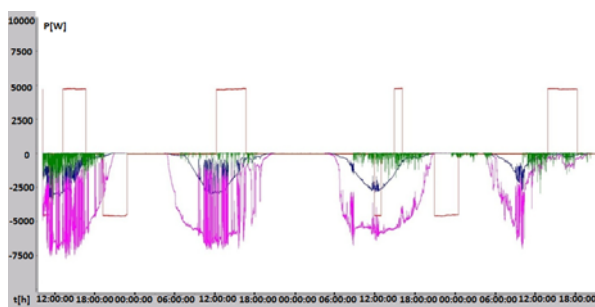
Założono, że celem zastosowania zasobnika jest maksymalne wykorzystanie jego zdolności do magazynowania energii w dolinie obciążenia systemu i oddawania energii w szczycie obciążenia, przy możliwie małej mocy inwertora zasobnika oraz z uwzględnieniem ograniczenia mocy przesyłanej linią. Z powyższego wynika, że zasobnik o zadanej pojemności powinien zostać w pełni naładowany w godzinach trwania doliny systemu, a w pełni rozładowany w godzinach trwania szczytu systemu. Zakłada się przy tym, że w obu przypadkach inwertor zasobnika pracuje ze swoją nominalną mocą $+P_{max}$ i $-P_{max}$, o ile moc obciążająca linię zasilającą nie przekracza mocy granicznej P_{gr} . W takim przypadku moc inwertora P_{ster} jest odpowiednio ograniczana. Poza godzinami szczytu i doliny obciążenia sumaryczna moc odbiorów i źródeł w instalacji prosumenta jest kontrolowana i jeżeli jej wartość przekracza P_{gr} linii, zadaniem inwertora jest wytworzenie mocy zapewniającej spełnienie tego ograniczenia, o ile aktualny stan naładowania zasobnika na to pozwala. Rysunek 2 przedstawia schemat blokowy algorytmu realizującego opisane funkcje.

Zaprezentowany powyżej algorytm został wykorzystany do sterowania pracą inwertora zasobnika w symulatorze instalacji prosumenckiej przedstawionej na rysunku 1. Symulator zbudowano za pomocą programu PSCAD [9]. Źródła energii, odbiory oraz inwertor zasobnika zamodelowano za pomocą źródeł prądowych. Założono wstępnie moc nominalną inwertora równą 5 kW i nieograniczoną pojemność zasobnika. Tygodniowy profil średniej godzinowej mocy czynnej generowanej w instalacji przyjęto na podstawie danych pomiarowych uzyskanych z analogicznej instalacji rzeczywistej pracującej w Instytucie Elektroenergetyki PŁ. Profil mocy zapotrzebowanej przyjęto na podstawie literatury [11]. Moc bierna została pominięta. Na podstawie zadanych wartości mocy wyznaczone zostały prądy referencyjne dla źródeł prądowych stanowiących modele urządzeń. Przykładowe wyniki symulacji pokazujące przebiegi mocy czynnych oraz energii w zasobniku uzyskane dla jednego tygodnia pracy instalacji prosumenckiej przedstawiono na Rysunku 3.

Testowanie algorytmów sterowania zasobnikiem metodą SILr

Zgodnie z przedstawioną powyżej metodą SILr, układ z rysunku 1 zrealizowano za pomocą rzeczywistych urządzeń pracujących w laboratorium Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej. Jako transformator zasilający instalację prosumencką włączono transformator o mocy znamionowej 70 kVA. Źródłami w instalacji były elektrownia wiatrowa o mocy znamionowej 5,5 kW oraz elektrownia fotowoltaiczna o mocy znamionowej 6 kW i elektrownia fotowoltaiczna z systemem nadążnym o mocy znamionowej 9 kW. Odbiory w instalacji prosumenckiej w czasie testów nie pracowały. Jako inwertor zasobnika w instalacji wykorzystano inwertor PWM o mocy znamionowej 5 kW sterowany prądowo. Testowany algorytm sterowania zasobnikiem zaimplementowano na symulatorze RTDS posługującym się oprogramowaniem RSCAD. Sygnały odpowiadające prądom i napięciom instalacji prosumenckiej niezbędne do pracy algorytmu doprowadzono do kart wejściowych RTDS za pośrednictwem transduktorów firmy LEM. Wyniki obliczeń realizowanych przez algorytm sterowania zasobnikiem, tj. wartości prądów referencyjnych dla inwertora zasobnika PWM doprowadzone zostały do zacisków inwertora za pośrednictwem karty wyjść RTDS. Należy podkreślić, że ponieważ sygnały wypracowywane przez RTDS powstają w czasie rzeczywistym, to odwzorowany w RTDS model matematyczny układu sterowania wraz z inwertorem jest widziany przez sieć jako rzeczywisty zasobnik z własnym układem sterowania o mocy ograniczonej mocą znamionową inwertora.

Opisany układ włączono do pracy ciągłej i zarejestrowano przebiegi mocy czynnych źródeł i zasobnika dla czterech kolejnych dób. Przebiegi te przedstawione są na rysunku 6.



Rys. 6. Przebiegi mocy czynnej źródeł oraz zasobnika energii w badaniach laboratoryjnych SILr

Kolorem fioletowym oznaczono na rysunku zmiany mocy czynnej generowanej przez źródła fotowoltaiczne nadążne, a kolorem niebieskim moc generowaną ze źródeł fotowoltaicznych stacjonarnych. Moc czynną elektrowni wiatrowej przedstawiono kolorem zielonym, natomiast przebieg czerwony odzworowuje moc czynną generowaną lub pobieraną przez zasobnik energii.

Z rysunku można odczytać, że zasobnik ładował się w trakcie trwania doliny obciążenia w systemie elektroenergetycznym, a następnie rozładowywał w trakcie trwania szczytu. Oznacza to, że testowany algorytm sterował pracą inwertora w czasie rzeczywistym, realizując jeden z celów sterowania pracą zasobnika. Podczas testu nie wystąpiły warunki, które wymagałyby ograniczenia przez algorytm mocy inwertora zasobnika poniżej wartości znamionowej.

Wnioski

Zastosowanie zasobnika energii umożliwia zarządzanie energią w instalacji prosumenckiej, dzięki czemu możliwe jest ograniczenie wymiany energii z siecią zasilającą, co przy taryfach dwustrefowych wpływa na ograniczenie

kosztów energii ponoszonych przez prosumenta. Przedstawiona w artykule metoda symulacyjna pozwala na dobór parametrów układu zasobnikowego oraz algorytmu sterowania zasobnikiem zgodnie z wymaganiami prosumenta. Wykorzystanie symulatora pracującego w czasie rzeczywistym umożliwia weryfikację algorytmu sterowania w czasie rzeczywistym.

Testy algorytmu sterowania zasobnikiem przeprowadzone na symulatorze instalacji prosumenckiej pracującym w skali czasu oraz w instalacji rzeczywistej wykazały, że testowany algorytm realizuje postawione zadanie. Należy zwrócić uwagę, że testy na obiektach rzeczywistych prowadzone w ograniczonym czasie nie muszą powodować działania wszystkich procedur składowych projektowanego algorytmu. Powinny być więc prowadzone dopóty, dopóki podczas badań takie warunki nie wystąpią lub je stworzyć świadomym działaniem.

Autorzy: mgr inż. Robert Nawrot, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22 90-924 Łódź, E-mail: robert.nawrot@dokt.p.lodz.pl; dr inż. Rozmysław Mieński, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22 90-924 Łódź, Email: rozmyslaw.mienski@p.lodz.pl; dr hab. inż. Irena Wasiak prof. PŁ, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22 90-924 Łódź, Email: irena.wasiak@p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] Milanes-Montero M. I., Gonzalez-Romera E., Barrero-Gonzalez F., Romero-Cadaval E., i Moreno-Munoz A., "Local energy micro-storage systems in smart communities with active, reactive and harmonic control," in *IEEEIC 2016 - International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2016, pp. 1–5.
- [2] Klabunde C., Moskalenko N., Styczynski Z., Lombardi P., i Komarnicki P., "Use of energy storage systems in low voltage networks with high photovoltaic system penetration," in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1–6.
- [3] Xu X., Bishop M., Donna G O., i Chen H., "Application and modeling of battery energy storage in power systems," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 2, no. 3, pp. 82–90, Sep. 2016.
- [4] Lachuriya A. i Kulkarni R. D., "Stationary electrical energy storage technology for global energy sustainability: A review," in *2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, 2017, pp. 1–6.
- [5] Ozdemir E., Ozdemir S., Erhan K., i Aktas A., "Energy storage technologies opportunities and challenges in smart grids," in *2016 International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP)*, 2016, pp. 1–6.
- [6] Wasiak I., Pawełek R., Mienski R., i Gburczyk P., "Using Energy Storage for Energy Management and Load Compensation in LV Microgrids," *15th Int. Conf. Harmon. Qual. Power – ICHQP 2012*, pp. 904–908.
- [7] Wasiak I., Pawełek R., i Mienski R., "Energy Storage Application in Low Voltage Microgrids for Energy Management and Power Quality Improvement," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 3, 463–472, 2014.
- [8] Lei J. i Gong Q., "Operating strategy and optimal allocation of large-scale VRB energy storage system in active distribution networks for solar/wind power applications," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 9, pp. 2403–2411, Jun. 2017.
- [9] PSCAD TM, "PSCAD User's Guide v4.6," 2016.
- [10] RTDS Technologies Inc., "Real Time Digital Simulator for Power Industry," 2002.
- [11] Majka K., "Bilansowanie zapotrzebowania godzinowego energii elektrycznej przez odbiorców z wykorzystaniem profili obciążeń," *E-Energetyka*, pp. 410–415, 2006.
- [12] Khazaei J., Piyasinghe L., Disfani V. R., Miao Z., Fan L., i Gurlaskie G., "Real-time simulation and hardware-in-the-loop tests of a battery system," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2015, vol. 2015–Sept, pp. 1–5.
- [13] Momoh J. A. i Reddy S. S., "Value of Hardware-In-Loop for experimenting microgrid performance system studies," in *2016 IEEE PES PowerAfrica*, 2016, pp. 199–203.
- [14] Mascarella D., Chlela M., Joos G., i Venne P., "Real-time testing of power control implemented with IEC 61850 GOOSE messaging in wind farms featuring energy storage," in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, 6710–6715.
- [15] Wang J., Song Y., Li W., Guo J., i Monti A., "Development of a Universal Platform for Hardware In-the-Loop Testing of Microgrids," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2154–2165, . 2014.