

Ryszard STRZELECKI¹
Grzegorz BENYSEK²
Marcin JARNUT²

SYSTEM BILANSOWANIA ENERGII DLA UŻYTKOWNIKÓW INDYWIDUALNYCH

Artykuł przedstawia koncepcję układu bilansowania energii pochodzącej z sieci dystrybucyjnej oraz ze źródeł własnych odbiorcy. Opisany został układ energoelektroniczny do sprzęgania źródeł oraz magazynów energii z siecią elektryczną po stronie odbiorcy, realizujący dodatkowo funkcje polepszające jakość energii.

1 WSTĘP

Ciągłość dostaw energii elektrycznej jest czynnikiem wpływającym nie tylko na komfort życia ale także na bezpieczeństwo. Rozwój dystrybucyjnych sieci energetycznych nie zawsze nadąża za szybko rosnącym zapotrzebowaniem na energię, ponad to zmiany klimatu powodują zmianę warunków środowiskowych, w których pracują sieci. Pojawienie się nowych czynników jak gwałtowne burze i towarzyszące im silne wiatry czy gradobicia powodują że starsze odcinki sieci które nie były przewidziane do pracy w takich warunkach ulegają awariom pozbawiając zasilania znaczne obszary. Pewnym rozwiązaniem tej sytuacji jest rozproszenie źródeł energii w systemie, tak aby poprzez przekonfigurowane sieci możliwe było zasilenie nieprzerwane największej możliwej w danej sytuacji ilości odbiorców. Źródła te przyłączane są najczęściej do sieci dystrybucyjnej 110 kV. Zwiększa to niezawodność sieci, lecz z punktu widzenia odbiorców mniej znaczących dla dystrybutora tzn. odbiorców przyłączanych po stronie n.n. jest ciągle niewystarczające zwłaszcza na obszarach wiejskich. Mniejsza gęstość zaludnienia sprzyja natomiast na tych obszarach rozwojowi energetyki niekonwencjonalnej małej mocy, która stanowić może rozwiązanie problemu ciągłości zasilania na tych terenach [1]. Moc generowana przez źródła alternatywne jest mocno zależna od czynników środowiskowych takich jak nasłonecznienie, średnia prędkość wiatru, z tego powodu istnieje uzasadniona konieczność magazynowania energii w celu jej późniejszego wykorzystania [2]. Energia ta jest konsumowana przez odbiorcę w awaryjnych stanach sieci (układy typu off-line) lub bilansowana z energią pobieraną z sieci dystrybucyjnej (układy typu grid-connected) [3, 4]. Dużą wagę ma z punktu widzenia niezawodności systemu zasilania

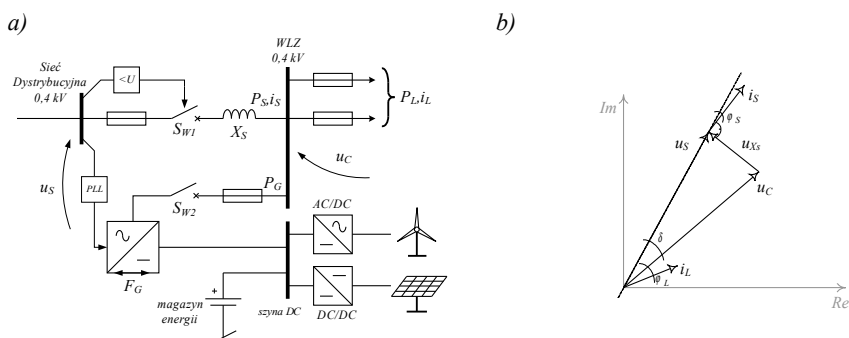
¹ Akademia Morska Gdynia, Katedra Automatyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia
rstrzele@am.gdynia.pl

² Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. Podgórna 50, 65-246, Zielona Góra, g.benyszek@iee.uz.zgora.pl, m.jarnut@iee.uz.zgora.pl

ma jakość dostarczonej energii. Odbiorca końcowy pośrednio wpływa na jej parametry jakościowe poprzez generowanie odkształceń prądu wywołujących w „słabszych” odcinkach sieci nieliniowe spadki napięć. Objawia się to dla pozostałych odbiorców przyłączonych w bliskim sąsiedztwie pogorszeniem parametrów napięciowych. Stosowanie aktywnych układów kompensacyjnych z dodatkowymi funkcjami bilansowania energii wydaje się uzasadnionym rozwiązaniem w opisanych sytuacjach.

2 KONCEPCJA SYSTEMU BILANSOWANIA ENERGII

Układy wprowadzające energię ze źródeł rozproszonych oraz układy podtrzymujące ciągłość zasilania budowane są w oparciu o falowniki napięcia przyłączane do zacisków wewnętrznych linii zasilających *WLZ*. Rolę źródła energii rezerwowej lub źródeł dodatkowych pełnią niewielkie źródła odnawialne, mini-generatory



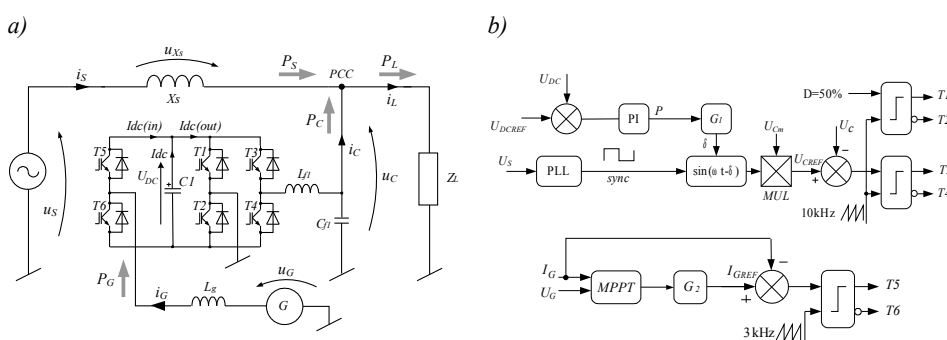
Rys.1. Układ bilansowania energii a) schemat ogólny, b) wykres wektorowy.

diesla lub gazowe przyłączane do wspólnej z magazynem energii i obwodem DC falownika szyny DC. Widoczny na rys.1a układ przedstawia taką koncepcję systemu zasilania.

Proponowany przez autorów układ niezależnie od stanu sieci zasilającej generuje na zaciskach *WLZ* napięcie u_c o parametrach takich samych jak parametry znamionowe napięcia sieci u_s lecz przesunięte w fazie o kąt δ zależny od bilansu mocy czynnych sieci P_s , źródeł własnych odbiorcy P_G oraz obciążeń P_L . Przesunięcie fazowe jest uzyskiwane na dodatkowej reaktancji indukcyjnej X_s przyłączonej pomiędzy *WLZ* oraz zaciski sieci. Reaktancja ta ma małą wartość i nie wpływa znacząco na wartość impedancji pętli zwarcia. Moc bierna związana z przesyłaniem energii przez tą reaktancję ma małą wartość (w przypadku napięcia sieci bliskiego wartościom znamionowym), a współczynnik mocy na zaciskach przyłączeniowych sieci dystrybucyjnej jest bliski jedności [6]. Sposób sterowania opisany w następnym punkcie pozwala na ciągle bilansowanie energii własnej odbiorcy z energią pobieraną z sieci oraz na bezprzerwowe zasilanie *WLZ*. Wyłącznik S_{W2} pełni w tym układzie wyłącznie funkcje serwisowe natomiast wyłącznik S_{W1} podobnie jak w układach „tradycyjnych” odłącza *WLZ* od sieci dystrybucyjnej w jej awaryjnych stanach.

3 KONDYCJONER ENERGII Z FUNKCJĄ BILANSOWANIA

W proponowanym przez autorów rozwiązaniu przekształtnik F_G wraz z reaktancją X_S tworzą układ kondycjonera energii, którego jednofazowy schemat przedstawia rysunek 2a [5]. Jest on podstawowym elementem systemu bilansowania energii przeznaczonego dla odbiorców końcowych. Ze względu na sposób sterowania realizuje szereg dodatkowych funkcji takich jakich stabilizacja napięcia na zaciskach odbiornika oraz kompensacja składowych nieaktywnych prądu sieci. Stanowić może wielofunkcyjny element systemu zasilania z wielu źródeł (dywersyfikacja źródeł energii).



Rys.2. Kondycjoner energii a) schemat jednofazowy b) układ sterowania.

Integralną częścią kondycjonera jest falownik napięcia (T1 – T4) przyłączany równolegle z zaciskami odbiornika pracujący w trybie napięciowym z nadążną modulacją napięcia wyjściowego. Falownik napięcia kształtuje na zaciskach odbiornika napięcie o parametrach znamionowych napięcia sieci przesunięte w fazie względem tego napięcia o kąt zależny od mocy czynnej odbiornika. Punkt synchronizacyjny jest wyznaczany w układzie *PLL*. Cechą charakterystyczną układu sterowania jest brak konieczności pomiaru prądów w celu wyznaczenia mocy czynnej. Aktualna wartość kąta fazowego napięcia odbiornika jest wyznaczana w układzie stabilizacji napięcia obwodu DC, który działa na zasadzie bilansowania mocy czynnej w punkcie *PCC* [7]. Stabilizacja napięcia obwodu DC falownika wymaga spełnienia ciągu zależności:

$$\Delta U_{DC} = 0 \Rightarrow I_{DCIN} = I_{DCOUT} \Rightarrow P_G = P_C \Rightarrow P_L = P_S + P_C \quad (1)$$

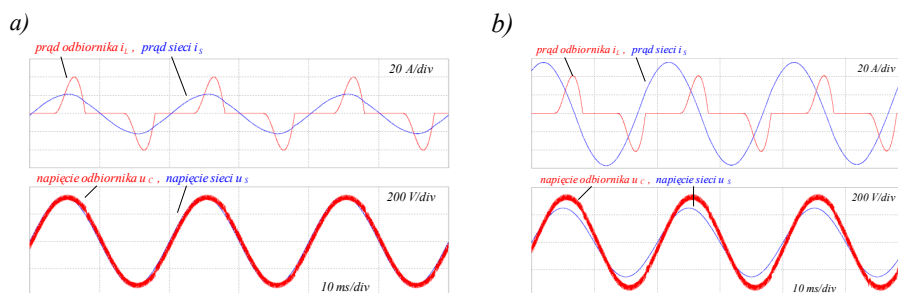
W równaniu (1) regulacji podlega moc czynna sieci P_S , a stabilizacja napięcia na kondensatorze C_{DC} falownika jest wynikiem zmiany tej mocy wywołanej zmianą kąta fazowego napięcia odbiornika. Jeżeli po stronie odbiorcy nie jest generowana energia tzn. $P_G=0$ to układ pozostaje w trybie kompensacji zapewniając stabilizowane sinusoidalne napięcie na zaciskach odbiornika oraz sinusoidalny prąd sieci. Generowanie energii ze źródeł własnych przyłączonych do obwodu DC falownika powoduje samoistne przejście układu do trybu bilansowania energii. W trybie tym zapewnione są także wszystkie funkcje kompensacyjne z trybu kompensacji. Zmiana trybu pracy nie wymaga rekonfiguracji obwodu ani zmian w strategii sterowania i jest zupełnie niewidoczna dla odbiornika.

3.1 Tryb kompensacji

W stanie ustalonym aby nie występowały zmiany napięcia na kondensatorze C_{DC} falownik nie może wymieniać mocy czynnej z resztą systemu. Zatem regulator napięcia U_{DC} generuje na wyjściu sygnał proporcjonalny do kąta δ taki aby spełnione było równanie bilansu w punkcie PCC:

$$P_L = P_S + P_C \rightarrow P_C = 0 \Leftrightarrow P_S = P_L \quad (2)$$

Kształtowanie na zaciskach odbiornika napięcia sinusoidalnego o stabilnej amplitudzie jest naturalną separacją tego odbiornika od zakłóceń pochodzących z sieci zasilającej. Dodatkowo różnica napięć widziana przez indukcyjność sprzęgającą jest napięciem sinusoidalnym (zazwyczaj odkształcenia napięcia sieci nie przekraczają 5%). Zgodnie z prawami elektrotechniki prąd w tej indukcyjności będzie także prądem sinusoidalnym niezależnie od charakteru i kształtu prądu odbiornika (rys.3a).



Rys.3. Kompensacja odkształceń prądu odbiornika a) przy nominalnym napięciu sieci, b) przy obniżeniu amplitudy napięcia sieci o 20%.

Kompensowanie zarówno odkształceń napięcia sieci jak i prądu odbiornika nie wymaga w proponowanym rozwiązaniu wyznaczania składowych kompensowanych i odbywa się „naturalnie”. Ograniczony musi być zakres stabilizacji napięcia odbiornika w przypadku długotrwałych i dużych zmian amplitudy napięcia sieci ze względu na znaczną wartość mocy biernej sieci w tych przypadkach (rys.3b). Układ przechodzi wtedy do pracy off-line (odłączenie od sieci publicznej). Zmiana źródła zasilania nie jest jednak widoczna dla odbiornika. W ten sam sposób kompensowane są przerwy beznapięciowe sieci zasilającej. Praca off-line jest oczywiście możliwa tylko w przypadku przyłączenia zewnętrznego zasobnika energii do zacisków DC falownika, lub we współpracy z mikro siecią DC.

Moc bierna sieci w proponowanym układzie nie zależy od mocy biernej odbiornika ale od jego mocy czynnej (3), (4).

$$Q_S = \frac{U_S^2}{X_S} - \frac{U_S \cdot U_C}{X_S} \cdot \cos(\delta) \quad (3)$$

$$\delta = \arcsin\left(\frac{P_S \cdot X_S}{U_S \cdot U_C}\right) \quad (4)$$

3.2 Tryb bilansowania energii

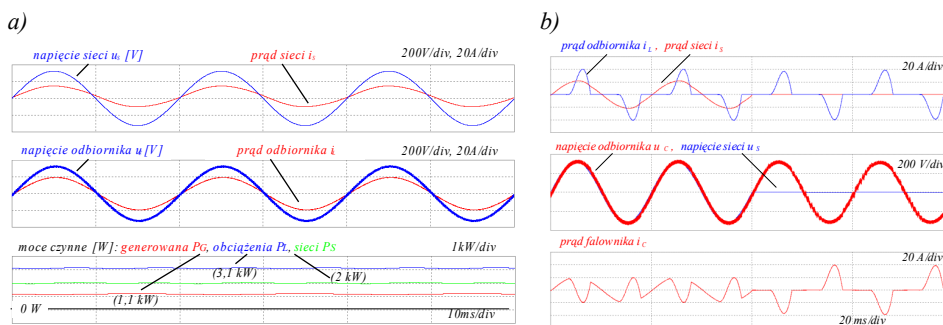
Przyłączenie do zacisków DC falownika zewnętrznego źródła energii poprzez układ dwukierunkowego przekształtnika generatorowego (T5, T6) wymuszającego przekazywanie energii do kondensatora C_{DC} powoduje wzrost napięcia na jego zaciskach, regulator napięcia dążąc do stabilizacji napięcia U_{DC} zmniejsza sygnał kąta fazowego δ co powoduje zmniejszenie mocy czynnej P_S w elemencie sprzęgającym X_S

$$P_S = \frac{U_S \cdot U_C}{X_S} \cdot \sin \delta \quad (5)$$

W punkcie PCC następuje bilansowanie mocy czynnych odbiornika P_L , falownika P_C i sieci P_S zgodnie z równaniem:

$$P_L = P_S + P_C \rightarrow P_C > 0 \Leftrightarrow P_S < P_L \quad (6)$$

We wzorze moc ze znakiem dodatnim oznacza dostarczanie energii do węzła bilansującego PCC. Wraz z bilansem mocy czynnych zmienia się bilans energii widoczny dla układu rozliczeniowego odbiorcy.



Rys.4. Wyniki badań układu z generatorem AC a) bilansowanie mocy przy nominalnym napięciu sieci, b) zasilanie awaryjne przy zaniku napięcia sieci.

Na rysunku 4a przedstawione zostały wyniki badań w układzie jednofazowym z generatorem AC przyłączonym do zacisków DC kondycjonera przez przekształtnik generatorowy rysunek 2a. Specyficznym przypadkiem bilansowania energii w punkcie PCC (WLZ instalacji elektrycznej odbiorcy) jest zanik napięcia sieci lub przejście układu do trybu off-line (SW1 = OFF) wskutek przekroczenia zakresu stabilizacji napięcia odbiornika. W sytuacji takiej $P_S = 0$, co oznacza zasilanie odbiornika z zasobnika energii lub generatora (rys.4b).

4 PODSUMOWANIE

Wyniki badań przedstawione w artykule jak i w innych publikacjach autorów potwierdzają skuteczność działania układu oraz szeroki zakres realizowanych funkcji. Ze względu na te cechy jak i prosty algorytm sterowania układ może znaleźć szerokie zastosowanie, zwłaszcza miejscach gdzie inne środki poprawy jakości energii i środki

zapewniające niezawodność zasilania zawodzą. Działania zmierzające w kierunku redukcji emisji gazów powstających w tradycyjnych procesach wytwarzania energii elektrycznej jak i rosnące zapotrzebowanie na tanie, niezawodne zasilanie powodują, że układy tego typu mogą stać się alternatywą dla obecnie stosowanych rozwiązań.

5 LITERATURA

- [1] G. Benysek, "Improvement in the quality of delivery of electrical energy using power electronics systems", 2007, London: Springer-Verlag.
- [2] C. Dorofte, U. Borup and F. Blaabjerg, "A combined two-method MPPT control scheme for grid-connected photovoltaic systems", EPE 2005, Sept. 2005 Page(s):10 pp.
- [3] Z. Yao, Z. Wang, L. Xiao. Y. Yan, "A novel control strategy for grid-interactive inverter in grid-connected and stand-alone modes", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06. Twenty-First Annual IEEE 19-23 March 2006 Page(s): 5 pp.
- [4] T. Rihit, M. Ned, and H. Chris, "Seamless transfer of gridconnected PWM inverters between utility-interactive and standalone modes", IEEE APEC2002. Vol. 2, pp. 1081-1086, March 2002.
- [5] R. Strzelecki, H.Tunia, M. Jarnut, G. Meckien and G. Benysek, "Transformerless 1-phase active power line conditioners", Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC '03. 2003 IEEE 34th Annual Volume 1, 15-19 June 2003 Page(s):321 - 326 vol.1.
- [6] R. Strzelecki, G. Benysek, M. Jarnut, „Aktywne kondycjonery energii dla indywidualnych użytkowników”, W: Postępy w Elektrotechnice Stosowanej - PES-4. Kościelisko, Polska, 2003
- [7] R. Strzelecki, G. Benysek, M. Jarnut, „Interconnection of the customer-side resources using single phase VAPF”, Przegląd Elektrotechniczny, Październik 2007

ENERGY BALANCING SYSTEM FOR END-USER CUSTOMMERS

The paper introduces idea of energy balancing system for end-user customers possessing their own energy sources. The power electronics arrangement with power conditioning and energy balancing functions has been described. Some investigation results have been shown to prove very good properties of proposed solution.