

MAGAZYN ENERGII W SYSTEMIE ZARZĄDZANIA PRACĄ SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

Piotr BONIEWICZ

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Instytut Inżynierii Elektrycznej
tel.: 52 340 8572 e-mail: piotr.boniewicz@utp.edu.pl

Streszczenie: W niniejszym opracowaniu przedstawiono koncepcję oraz przykładowe rozwiązanie sterowanego magazynu energii z możliwością włączenia w nadrzędny system zarządzania. Przedstawiono układ sterowania oraz część energetyczną, przebadano pracę układu oraz przedstawiono wyniki badań symulacyjnych w konfiguracji autonomicznej oraz włączonego do systemu elektroenergetycznego. Przedstawiono wpływ działania magazynu na wybrane parametry w odległym miejscu w sieci.

Słowa kluczowe: magazyn energii, moc bierna, zarządzanie systemem elektroenergetycznym, mostek DAB.

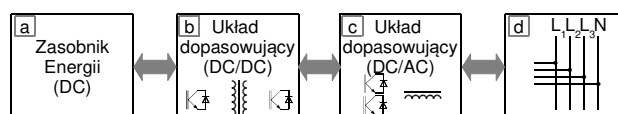
1. WSTĘP

Problematyka jakości energii pozostaje nadal aktualna – w czasach uzależnienia człowieka od energii elektrycznej wykorzystywane urządzenia elektryczne wymagają odpowiedniej jakości energii często jednocześnie wpływając negatywnie na jej cechy. Z punktu widzenia operatora sieci elektroenergetycznej ważnym czynnikiem jest zapewnienie właściwego (mieszczonego się w określonych granicach) rozkładu napięć w określonych punktach odbiorczych oraz minimalizacja strat przesyłowych. Czynnikiem mającymi negatywny wpływ na rozkład napięć (oraz straty przesyłu i przetwarzania) są (w dużym uproszczeniu) m. in. brak kompensacji mocy biernych, niesymetrie obciążenia oraz przeciążenia mocą czynną.

Aby wpłynąć na poprawę jakości energii elektrycznej zaproponowano rozwiązanie magazynu energii pracującego bezpośrednio na sieć niskiego napięcia (4-przewodową) z funkcjami niezależnego sterowania wartościami mocy czynnej oraz biernej. Zadawane moce czynne i bierne (fazowe) mogą być lokalnie lub zdalnie.

2. UKŁAD MAGAZYNU ENERGII

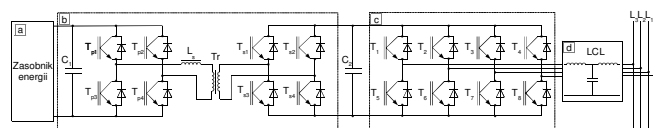
Część energetyczna układu (przedstawionego na rysunku 1.) składa się z 4-przewodowego falownika, z napięciowym obwodem pośredniczącym (opisane w [5]), wykorzystującego tranzystory IGBT, układu filtrującego-wygładzającego LCL pozwalającego na pracę sterowanego źródła napięcia jako źródła prądu, układu kondycjonującego z podwójnym falownikowym mostkiem H (DAB – Dual Active Bridge – szeroko opisany w [1], [2]) oraz transformatora zapewniającego dopasowanie poziomów napięć i izolację galwaniczną. Na końcu łańcucha energetycznego znajduje się akumulator elektrochemiczny umożliwiającą magazynowanie oraz oddawanie energii.



Rys. 1. Schemat blokowy układu magazynu wraz z układami kondycjonującymi

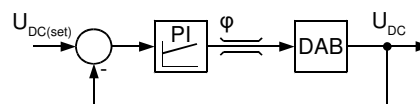
Gdzie: a – elektrochemiczny zasobnik energii, b – układ dopasowania poziomu napięć (mostek DAB), c – układ falownika 4-gałzowego wraz z filtrem LCL, d – 4-przewodowa sieć elektroenergetyczna niskiego napięcia.

Dzięki zastosowaniu układu DAB (rys. 2.), prócz dwukierunkowego przepływu energii, możliwe jest uzyskanie dużej wartości przekładni napięciowej, co pozwala na dopasowanie poziomów np. baterii akumulatorów o napięciu znamionowym rzędu 50 V do pośredniczącego obwodu falownika o napięciu rzędu 800 V.



Rys. 2. Schemat ideowy części silnoprądowej magazynu gdzie: a – elektrochemiczny zasobnik energii, b - układ dwukierunkowego sprzęgu DC-DC (DAB), c – 4-gałzowy falownik napięcia, d – filtr oraz dławiki.

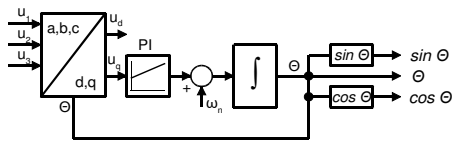
Realizację układu sterowania kondycjonera DAB (rys. 3.) oparto o zmienne przesunięcie fazowe φ (phase-shifting [1]) między sygnałami sterującymi dwa mostki tranzystorowe.



Rys. 3. Układ sterowania przekształtnikiem DC-DC, gdzie: $U_{DC(set)}$ – wartość zadana napięcia w obwodzie pośredniczącym DC, U_{DC} – wartość mierzona napięcia DC w obw. Pośredniczącym.

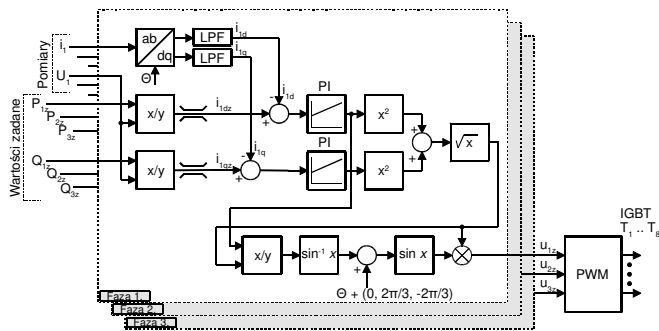
W układzie sterowania najważniejszym elementem łańcucha jest blok synchronizacji z siecią zasilającą – został on opracowany w oparciu o klasyczny układ pętli synchronizacji fazy (SRF-PLL – *Space Reference Frame Phase Locked Loop*) dobrze przebadany i szeroko opisywany w literaturze [3].

Sterowanie układu falownika sieciowego oparto o system wskazów wirujących ze wskazem napięcia zasilającego. Kąt obrotu układu współrzędnych (Θ) jest określany przez układ synchronizacji SRF-PLL (rys. 4.).



Rys. 4. Struktura bloku synchronizacji fazy SRF-PLL

Wartościami zadanymi (nadrzędnymi) są wartości mocy czynnych oraz biernych dla każdej fazy (odpowiednio: P_{1z} , P_{2z} , P_{3z} oraz Q_{1z} , Q_{2z} i Q_{3z}). Na podstawie wartości zadanych mocy oraz zmierzonych wartości skutecznych napięć (U_1 , U_2 , U_3) obliczane są wartości zadanych natężeń prądów fazowych (odpowiednio składowej czynnej I_{1dz} , I_{2dz} , I_{3dz} oraz biernej I_{1qz} , I_{2qz} , I_{3qz}).



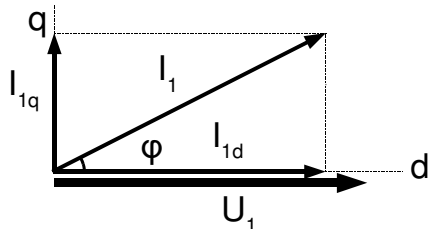
Rys. 5. Widok układu sterowania części sieciowej (dla jednej fazy)

Do wyznaczenia wskazów I_d oraz I_q w wirującym wraz z napięciami fazowymi sieci układzie współrzędnych d-q wykorzystano ideę transformacji opisaną w [4], której kluczowym elementem jest filtr dolnoprzepustowy. Opisano ją poniższym wzorem (1).

$$\begin{aligned} i_d(t) &= LPF(-2 \cdot i(t) \cdot \sin \theta) \\ i_q(t) &= LPF(2 \cdot i(t) \cdot \cos \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

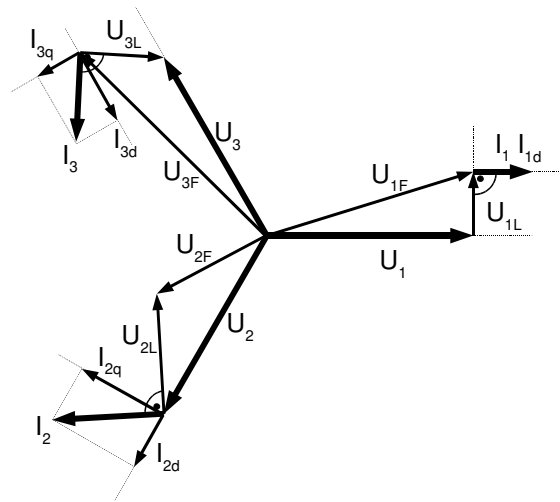
gdzie: LPF - Low Pass Filter opisany transmitancją (2).

Pojedynczy układ dq dla fazy 1. przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Widok wskazów związanych z fazą 1. w układzie współrzędnych dq (oś d związana ze wskazem napięcia fazowego).

Należy podkreślić, że każda faza rozpatrywana jest w układzie oddzielnie, wykorzystywane są więc 3 układy współrzędnych dq, każdy skojarzony z osobnym napięciem fazowym (wykres wskazowy - rysunek 7.).

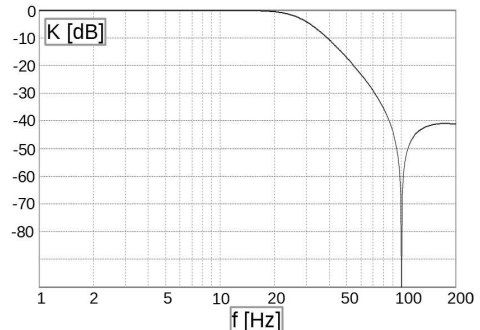


Rys. 7. Wykres wskazowy napięć i prądów przekształtnika gdzie: U_1, U_2, U_3 – wskaźy napięć zasilających, U_{1F}, U_{2F}, U_{3F} – wskaźy napięć wyjściowych falownika, U_{1L}, U_{2L}, U_{3L} – wskaźy spadków napięć na filtrze LCL.

Jako filtr dolnoprzepustowy wykorzystany w bloku transformacji ab/dq wykorzystano filtr Czebyszewa II-go rodzaju, 3-go rzędu o transmitancji określonej wzorem (2):

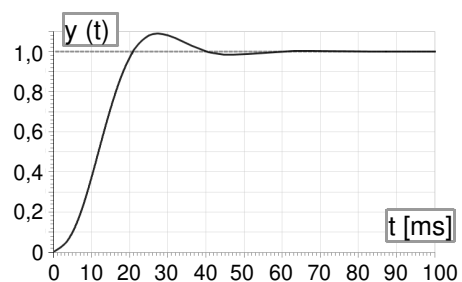
$$H(s) = \frac{5,904 \cdot 10^6 + 14,82 \cdot s}{5,904 \cdot 10^6 + 63,55 \cdot 10^3 \cdot s + 3586 \cdot s^2 + s^3} \quad (2)$$

Wybrano częstotliwość graniczną w paśmie przepustowym (przy tłumieniu -3 dB) równą 28 Hz (rys. 8.).



Rys. 8. Charakterystyka częstotliwościowa (amplitudowa) wykorzystanego filtra (f – częstotliwość, K – tłumienie w dB)

Wybór samego filtra oraz jego parametrów jest kompromisem między wymaganą dużą tłumiennością dla 2-giej harmonicznej, szybką odpowiedzią na skok jednostkowy (rys. 9. - pożądana jest wartość na poziomie max. 10-20 ms).



Rys. 9. Odpowiedź skokowa wykorzystanego układu filtrującego

Do pomiarów mocy biernej (w zewnętrznej części weryfikacyjnej) wykorzystano dyskretną transformatę Fouriera – na jej podstawie określane są m. in. przesunięcia fazowe między podstawowymi składowymi napięć i prądów oraz wartości mocy czynnych i biernych (3):

$$\begin{aligned} P_{1,2,3} &= U_{1,2,3} \cdot I_{1,2,3} \cdot \cos\varphi_{1,2,3} \\ Q_{1,2,3} &= U_{1,2,3} \cdot I_{1,2,3} \cdot \sin\varphi_{1,2,3} \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

$P_{1,2,3}$, $Q_{1,2,3}$ – moc czynna i bierna (w 1, 2 i 3 fazie),
 $U_{1,2,3}$, $I_{1,2,3}$ – wartości skuteczne napięć i prądów,
 $\varphi_{1,2,3}$ – przesunięcia fazowe składowych podstawowych prądów względem napięć (z DFT: n.p. I_1 względem U_1).

Wartości skuteczne prądów i napięć określane są jako:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) dt}; U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u^2(t) dt} \quad (4)$$

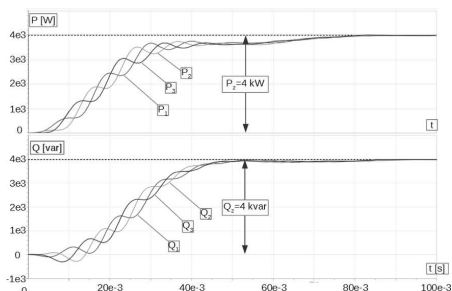
Należy podkreślić, że z powyższych formuł jedynie (4) wykorzystywana jest w algorytmie sterowania (rys.5.) do określenia wartości zadanych natężeń prądów na podstawie wartości zadanych mocy czynnych, biernych oraz wartości napięć skutecznych (5) – pozostałe używane są jedynie do celów weryfikacyjnych przez jednostkę pomiarową.

$$I_{1dz,2dz,3dz} = \frac{P_{1z,2z,3z}}{U_{1,2,3}}; I_{1qz,2qz,3qz} = \frac{Q_{1z,2z,3z}}{U_{1,2,3}} \quad (5)$$

3. BADANIA SYMULACYJNE

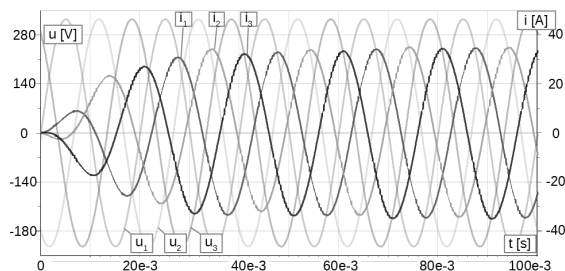
Przedstawiony układ został przebadany symulacyjnie z wykorzystaniem środowiska GeckoCIRCUITS (wersja Open-Source). Środowisko to umożliwia modelowanie oraz badanie układów opisywanych w języku Java. Przeprowadzono badania układu magazynu wraz z częścią przekształtnikową pod kątem zachowania w stanach statycznych oraz dynamicznych. Ponadto przebadano układ magazynu włączonego w przykładowy fragment sieci elektroenergetycznej - sprawdzając odpowiedzi systemu na wymuszenia mocy czynnych i biernych.

Jako przykładowe wyniki badań przedstawiono odpowiedź układu magazynu na skok wartości zadanych mocy czynnych i biernych. Skok został wygenerowany w stanie ustalonym ($P_1=P_2=P_3=-1$ kW / $Q_1=Q_2=Q_3=0$) w chwili $t=0$. Wartości zadane mocy wyniosły: $P_1=P_2=P_3=4$ kW / $Q_1=Q_2=Q_3=4$ kvar. Otrzymane w symulacji odpowiedzi układu pokazano na rysunku 10.



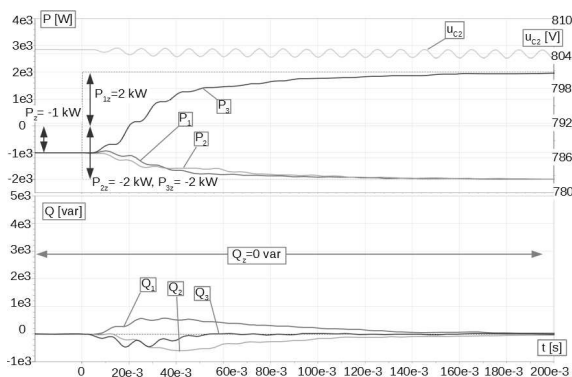
Rys. 10. Odpowiedź układu na zadany skok mocy czynnej oraz biernej. Linia przerywaną zaznaczono wartości zadane.

Na rys. 11. przedstawiono wartości chwilowe napięć i prądów wyjściowych magazynu dla w/w wymuszenia.



Rys. 11. Przebiegi napięć i natężeń prądów oddawanych do sieci w stanie przejściowym – odpowiedź układu na skok wartości zadanej $P_{z(1,2,3)}=1$ kW, $Q_{z(1,2,3)}=1$ kvar.

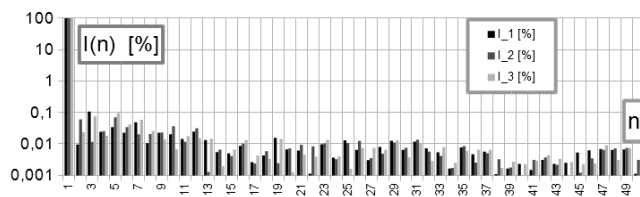
Na rysunku 12. pokazano odpowiedź układu na niesymetryczny skok wartości zadanej – przejście z ustalonego stanu symetrycznego oddawania mocy czynnej ($P_{1,2,3}=-1$ kW / $Q_{1,2,3}=0$ kvar) do stanu niesymetrycznego ($P_{1,2}=-2$ kW $P_3=2$ kW / $Q_{1,2,3}=0$ kvar). Należy zauważyć, że w napięciu obwodu pośredniczącego pojawia się składowa zmienna związana z oscylowaniem energii między źródłem a siecią elektroenergetyczną, powiązana bezpośrednio z mocą bierną.



Rys. 12. Odpowiedź układu na zmianę wymuszenia z: $P_{1z} P_{2z} P_{3z} = -1$ kW, $Q_{1z} Q_{2z} Q_{3z} = 0$ kvar na: $P_{1z}=-2$ kW, $P_{2z}=-2$ kW, $P_{3z}=2$ kW, $Q_{1z} Q_{2z} Q_{3z} = 0$ kvar. Dodatkowo pokazano przebieg napięcia $u_{c2}(t)$ na kondensatorze obwodu DC falownika.

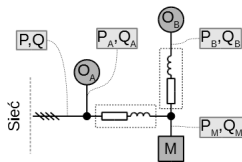
Wytłumione przez filtr LCL zmierzone produkty modulacji (400 harmoniczna – 20 kHz) były na poziomie 100 mA co w odniesieniu do poziomu 35 A stanowi około 0,3 % wartości składowej podstawowej.

Na rys. 13. przedstawiono zawartość harmonicznnych w prądach wyjściowych. W zakresie 2..100 są one na maksymalnym poziomie równym 37 mA, co stanowi 0,1 % składowej podstawowej.



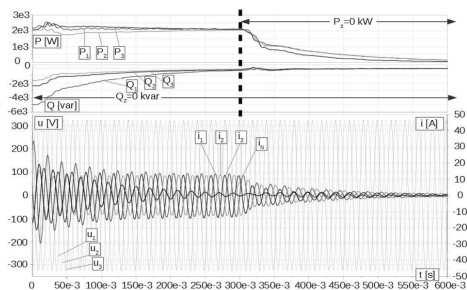
Rys. 13. Widmo natężeń prądów wyjściowych magazynu dla ustalonego stanu pracy (prąd zadany $I=35$ A). Gdzie: n – (oś pozioma) numer składowej, $I(n)$ - wartości RMS natężeń prądów odniesione do składowej podstawowej.

W kolejnym kroku przebadano działanie układu w systemie elektroenergetycznym (rys. 14.).



Rys. 14. Schemat badanego fragmentu systemu z dołączonym magazynem energii (M – magazyn energii, O_A i O_B – odbiory)

W badanej konfiguracji mierzone były (i następnie kompensowane) moce czynne i biernie w punkcie przyłączenia do sieci (P i Q , rys. 14.). Zestaw regulatorów PI określał wartość zadaną mocy dla magazynu (P_M i Q_M , rys. 14.) – najpierw kompensowano moce biernie ($P_{1z}, P_{2z}, P_{3z}=0$ dla $t=0$), następnie moce czynne ($Q_{1z}, Q_{2z}, Q_{3z}=0$ dla $t=300$ ms). Przebiegi przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 15. Przebiegi mocy czynnych, biernych, natężeń prądów i napięć dla kompensacji dwuetapowej w p-kcie przyłączenia dla $t=0$ s – kompensacja mocy biernych ($Q_{1z}, Q_{2z}, Q_{3z} = 0$), dla $t=300$ ms kompensacja mocy czynnych ($P_{1z}, P_{2z}, P_{3z} = 0$)

Na podstawie badań oraz otrzymanych wyników można stwierdzić, że układ skompensował moce czynne i biernie w punkcie pomiarowym (P i Q) z błędem w stanie ustalonym na poziomie $\Delta Q < 10$ var i $\Delta P < 10$ W oraz z czasem osiągnięcia stanu ustalonego < 200 ms (0,9 / 0,1).

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiony układ wraz z badaniami magazynu energii potwierdzają zasadność wykorzystania sterowanych magazynów w systemie elektroenergetycznym nie tylko do lokalnego uzupełniania deficytów mocy czynnej oraz bierniej, ale również w charakterze zdalnie zarządzanego

źródła. Zaproponowany układ ma dostateczne własności statyczne oraz dynamiczne do zastosowania jako sterowany kompensator mocy bierniej oraz jako źródło mocy czynnej. Zaproponowane rozwiązanie nie ma cech rozwiązania optymalnego – autor upatruje polepszenia jego charakterystyk dynamicznych głównie w optymalizowaniu bloków transformacji dq ([6]) oraz bloków filtracyjnych. W modelowym układzie fizycznym należy skupić się m. in. na uodpornieniu układów synchronizacji (PLL) na typowe stany zaburzeniowe (niesymetria napięciowa, deformacje przebiegami harmonicznymi oraz występujące stany przejściowe), modyfikacji układu modulatora pod kątem wykorzystania (napięciowego) pośredniczącego obwodu sterowania zorientowanego np. na zmniejszenie strat w układzie mostka DAB w trybie pracy kompensatora mocy bierniej – tak, aby moc bierna (traktowana jako chwilowa moc czynna) nie powodowała strat dodatkowych w obwodzie dopasowującym oscylując między siecią energetyczną a obwodem DC akumulatora.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Krismer F.: Modeling and optimization of bidirectional dual active bridge DC-DC converter topologies – Doctoral Thesis, ETH Zurich 2010.
2. Krismer F.: Accurate Small-Signal Model for the Digital Control of an Automotive Bidirectional Dual Active Bridge, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, No. 12, 2009, s.2756-2768.
3. Bobrowska-Rafal, Rafal K., Jasinski M., Kazmierkowski M.P.: Grid synchronization and symmetrical components extraction with PLL algorithm for grid connected power electronic converters – a review, Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences, Vol. 59, No. 4, 2011.
4. Hochgraf C., Lasetter R.H.: Statcom for Operation with Unbalanced Voltages, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, April 1998.
5. Mohammad Reza Miveh, Mohd Fadli Rahmat, Ali Asghar Ghadimi, Mohd Wazir Mustafa: Control techniques for three-phase four-leg voltage source inverters in autonomous microgrids: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews – Elsevier, No 54, 2016, s. 1592-1610.
6. Rosołowski E.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów w automatyce elektroenergetycznej, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Wrocław 2002.

ENERGY STORAGE UNIT OPERATING IN POWER NETWORK MANAGEMENT SYSTEM

The study presents the concept and exemplary implementation of a modified controlled energy storage system (RESS) with possibility of an interacting with a controlled grid management system. Controlled RESS can independently inject or draw (in a controlled way) active and reactive power, with local and also distant control from point of a network. Active and reactive power set points are independent, so RESS can draw active/reactive power in one phase can simultaneously inject in other. The internal control system and the power circuit of converter were presented. The autonomous and on-grid operations was examined and the results of simulation tests were presented. The influence of distantly controlled system activity on selected parameters at a remote point of the network was presented. Good static and dynamic results were obtained. The author proposes using a controlled RESS in a managed power system with local or distant control to compensate an active or reactive power locally, and also in a distant point of a power network. Controlled RESS it that way can lower energy transmission and transformation losses, and increase a power quality on a network.

Keywords: energy storage system, RESS, DAB, energy system control and management, electrical energy quality.