

Układ laboratoryjny energoelektronicznego interfejsu sieciowego AC/DC/DC dla magazynu energii

Streszczenie. W artykule przedstawiono układy kondycjonera mocy z nadprzewodnikowym magazynem energii oraz zasobnikiem ultrakondensatorowym. Zawarto opis stanowiska laboratoryjnego z energoelektronicznym interfejsem sieciowym dla magazynu energii. W skład interfejsu sieciowego wchodzi trójgałęziowy trójpoziomowy przekształtnik napięcia AC/DC i dwugałęziowy trójpoziomowy przekształtnik napięcia DC/DC. Omówiono metodę wyrównywania napięć w obwodzie pośredniczącym DC. Przedstawiono uniwersalność układu, który może pracować zarówno z ultrakondensatorowym jak i z nadprzewodnikowym magazynem energii, natomiast przekształtniki mogą działać jako trójpoziomowe lub dwupoziomowe. Omówiono zastosowane elektroniczne układy sterowania z mikrokontrolerami TMS320F28335 i matrycą programowalną FPGA.

Abstract. The article presents the power conditioner system with superconductor and ultracapacitor energy storage. A description of a laboratory setup of a power electronics interface for the energy storage is included. The grid interface contains a three-level AC/DC converter and a two-branch three-level DC/DC converter. Balancing method of controlling the AC/DC converter and the universality of the DC/DC system are presented. The versatility of the system, which can work both with ultracapacitor and superconductor energy storage, is shown. Power electronics converters can work in a three-level or in a two-level mode. The electronic systems with DSC TMS320F28335 microcontrollers and FPGA have been discussed. (Laboratory setup of an AC/DC/DC power electronics converter for an energy storage system)

Słowa kluczowe: przekształtnik napięcia AC/DC, przekształtnik napięcia DC/DC, magazyn energii, trójpoziomowy przekształtnik napięcia
Keywords: AC/DC VSC, DC/DC VSC, energy storage system, three-level converter

Wstęp

Jakość energii przesyłanej w systemie elektroenergetycznym musi spełniać określone kryteria, które zostały przedstawione m.in. w aktach normatywnych [1, 2, 3]. W normach tych zdefiniowane są parametry jakości elektrycznej takie jak częstotliwość, wartość napięcia, dopuszczalne zapady napięcia oraz zawartość harmonicznych czy interharmonicznych [4]. Na jakość energii elektrycznej dostarczanej do użytkownika końcowego wpływają rodzaj oraz moc odbiorników dołączonych do linii zasilającej, a także charakter pobieranego przez nie prądu (wartość współczynnika odkształcenia prądu, THD ang. *Total Harmonic Distortion*).

Jakość dostarczanej energii można poprawić poprzez zastosowanie filtra aktywnego (ang. *Active Power Filter System*) podpiętego do punktu wspólnego przyłączenia (PWP). Celem nadrzędnym układu sterowania filtra aktywnego jest kształtowanie sinusoidalnego prądu pobieranego z sieci. Przykłady takich układów przedstawiono w [5, 7], gdzie zastosowano regulator ze sprzężeniem od zmiennych stanu oraz w [6] z zastosowanym regulatorem predykcyjnym.

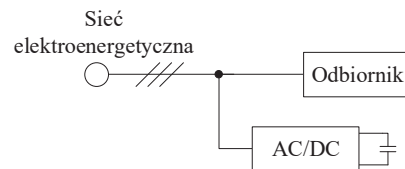
Zagadnieniem ważnym z punktu widzenia użytkowników są zaburzenia jakości dostarczanej energii. Są one wywołane m.in. przerywaną pracą urządzeń w zakładach przemysłowych (np. tartak czy spawalnia). Wysoka wartość mocy chwilowej pobieranej przez te urządzenia w czasie np. rozruchu lub cyklu roboczego może wywołać duże spadki napięcia i przepięcia na linii zasilającej pozostałych odbiorców. W celu przeciwdziałania negatywnym skutkom pracy tego typu urządzeń zaleca się stosowanie układów kondycjonujących moc/energię elektryczną (ang. *Conditioning Power Systems*). Kondycjoner mocy jest to system złożony z przekształtników napięcia oraz zasobnika energii. Dla omawianego przypadku energia zgromadzona w zasobniku może zostać wykorzystana w celu zmniejszenia impulsów mocy pobieranych z sieci energetycznej [13]. System taki podłączony jest do PWP zlokalizowanego blisko odbiorców zakłócających.

Funkcjonalność systemu kondycjonującego energię może zostać rozszerzona o funkcję filtra aktywnego [5]. Odbywa się to kosztem pogorszenia stabilizacji napięcia w obwodzie pośredniczącym, do którego dołączony jest przekształtnik stanowiący interfejs pomiędzy magazynem energii

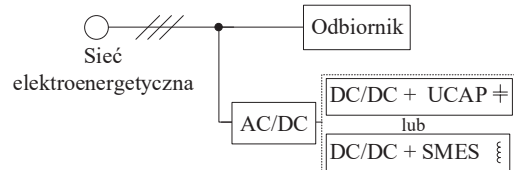
a przekształtnikiem sieciowym.

We współczesnych systemach kondycjonujących energię jako zasobniki mogą zostać wykorzystane baterie litowo-jonowe, koła zamachowe, magazyny sprężonego powietrza oraz nadprzewodnikowe magazyny energii [8].

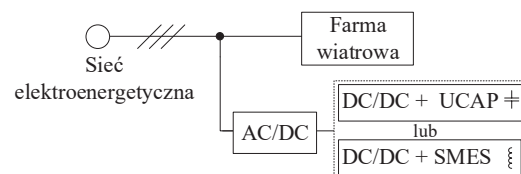
Schematy blokowe przedstawiające konfiguracje systemu z filtrem aktywnym, kondycjonerem mocy z funkcją filtra aktywnego oraz kondycjonera mocy dla źródła odnawialnego w postaci farmy wiatrowej przedstawione są odpowiednio na rysunkach 1, 2 oraz 3.



Rys. 1. System z filtrem aktywnym.



Rys. 2. System z kondycjonerem mocy z funkcją filtra aktywnego.

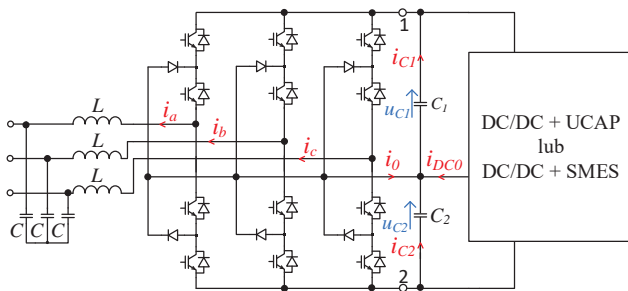


Rys. 3. System z kondycjonerem mocy dla farmy wiatrowej.

W artykule przedstawiono opis układu laboratoryjnego energoelektronicznego interfejsu sieciowego dla magazynu energii. Układ składa się z dwóch przekształtników napięcia: trójgałęziowego trójpoziomowego przekształtnika sieciowego i dwugałęziowego trójpoziomowego przekształtnika napięcia dla magazynu energii. Przedstawiono uniwersalność układu pod względem wykorzystanej topologii oraz konfigurowalności w zależności od określonych wymagań. Treść opracowania skupia się przede wszystkim na aspektach technicznych układu, natomiast algorytmy sterowania będą tematem odrębnych artykułów.

Układ kondycjonowania mocy

Schemat ideowo-blokowy laboratoryjnego systemu kondycjonowania mocy przedstawiony jest na rysunku 4. Układ składa się z trójgałęziowego trójpoziomowego przekształtnika napięcia AC/DC o topologii NPC, obwodu pośredniczącego złożonego z dwóch kondensatorów oraz dwugałęziowego trójpoziomowego przekształtnika napięcia DC/DC o topologii NPC. Magazyn energii jest dołączony bezpośrednio do zacisków przekształtnika DC/DC (Rys. 5). Natomiast z uwagi na charakter napięciowy ultrakondensatorowego magazynu energii, układ ten musi zostać dołączony poprzez filtr indukcyjny zmieniający charakter źródła na sterowane źródło prądowe (Rys. 6). Przekształtnik sieciowy przyłączony jest do punktu PWP poprzez filtr indukcyjny typu L.



Rys. 4. Schemat ideowy układu kondycjonowania mocy z funkcją filtra aktywnego.

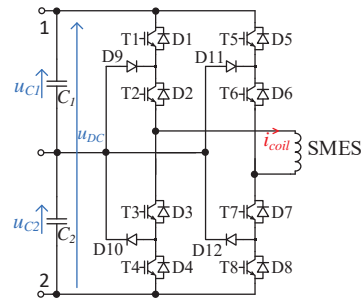
Wartość energii zgromadzonej w magazynie wynosi odpowiednio

$$(1) \quad E_{SMES} = \frac{1}{2} L_{SMES} I_{SMES}^2$$

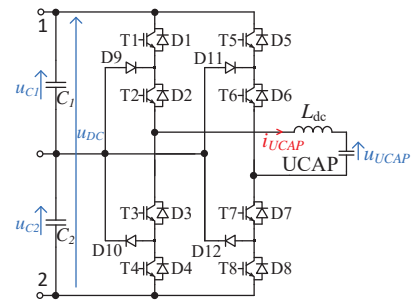
dla cewki nadprzewodzącej, gdzie L_{SMES} , I_{SMES} oznaczają indukcyjność i prąd cewki, oraz

$$(2) \quad E_{UCAP} = \frac{1}{2} C_{UCAP} U_{UCAP}^2$$

dla baterii ultrakondensatorów, gdzie C_{UCAP} , U_{UCAP} oznaczają wypadkową pojemność i napięcie na baterii ultrakondensatorowej. Z uwagi na prądowy charakter magazynu z cewką nadprzewodzącą maksymalna dynamika zmian mocy jest teoretycznie nieskończona i zależna tylko od zastosowanych elementów. Taka sama dynamika możliwa jest do uzyskania także dla magazynu napięciowego (ultrakondensatorowego) pod warunkiem, że bateria ultrakondensatorów zostanie dołączona bezpośrednio do obwodu DC. Jest to jednak nieuzasadnione ze względów technicznych i ekonomicznych m.in. dlatego, że napięcie na ultrakondensatorze musi być wyższe niż wartość szczytowa napięcia przewodowego sieci, budowa magazynu na napięcia powyżej 600 V jest problematyczna oraz dostępność energii magazynu jest



Rys. 5. Przekształtnik DC/DC z nadprzewodzącym magazynem energii.



Rys. 6. Przekształtnik DC/DC z ultrakondensatorowym magazynem energii.

ograniczona i wynosi

$$(3) \quad E_{UCAP} = \frac{1}{2} C_{UCAP} (U_{UCAPmax}^2 - U_{UCAPmin}^2).$$

Wartości $U_{UCAPmax}$ i $U_{UCAPmin}$ oznaczają dopuszczalny zakres zmian napięcia na baterii ultrakondensatorów. Z tego też powodu magazyn napięciowy dołączany jest poprzez dwukierunkowy przekształtnik napięcia. Zakładając, że minimalna wartość, do jakiej podczas pracy magazynu rozładowywane są ultrakondensatory jest równa około $\frac{1}{2} U_{UCAPmax}$, wykorzystanie energetyczne magazynu wynosi około 75%.

Z punktu widzenia aplikacji kondycjonowania mocy istotna jest informacja na temat szybkości uzyskania požądanej mocy z magazynu, która ma być dostarczona do sieci. Jak już wcześniej zostało wspomniane, w przypadku magazynu prądowego transfer mocy do obwodu pośredniczącego odbywa się bez opóźnień (zakładając, że opóźnienie generowane przez układy elektroniczne jest pomijalnie małe) a jej wartość równa jest

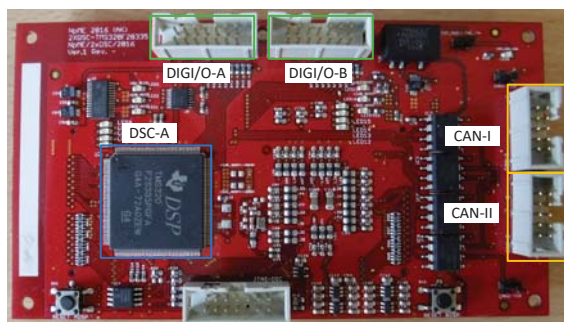
$$(4) \quad p_{SMES} = D u_{DC} i_{coil},$$

gdzie p_{SMES} , D , u_{DC} , i_{coil} oznaczają odpowiednio chwilową moc magazynu energii, względny współczynnik wypełnienia sygnału sterującego, napięcie obwodu pośredniczącego oraz prąd cewki. Dla magazynu napięciowego chwilowa moc wyjściowa jest iloczynem napięcia i prądu ultrakondensatora (i_{UCAP})

$$(5) \quad p_{UCAP} = u_{UCAP} i_{UCAP}.$$

W przypadku braku zapotrzebowania na moc/energię z magazynu napięciowego $i_{UCAP} = 0$. Minimalny czas w jakim źródło jest w stanie dostarczyć żądaną moc p_{UCAP}^{ref} zależy od parametrów dławika (L_{dc} , R_{dc}) oraz napięcia u_{UCAP} i wynosi

$$(6) \quad t_{min} = -\frac{L_{dc}}{R_{dc}} \ln \left(1 - \frac{R_{dc} i_{UCAP}^{ref}}{u_{UCAP}} \right),$$



Rys. 7. Płyta NpME/DSCx2 z dwuprocessorowym sterownikiem. Panel przedni.

gdzie

$$(7) \quad i_{UCAP}^{ref} = \frac{P_{UCAP}^{ref}}{u_{UCAP}}$$

Zakładając, że rezystancja dławika w obwodzie przekształtnika DC/DC jest pomijalnie mała, czas po jakim dostępna będzie żądana moc wynosi

$$(8) \quad t_{min} = \frac{L_{dc} i_{UCAP}^{ref}}{u_{UCAP}}$$

Weźmy pod uwagę układ o parametrach dławika $L_{dc} = 1000 \mu H$, $R_{dc} = 50 m\Omega$ oraz $U_{UCAP} = 150 V$. Minimalny czas w jakim będzie dostępna moc $P_{UCAP}^{ref} = 6 kW$ wynosi:

a) $t_{min} = 268 \mu s$ - wzór (6),

b) $t_{min} = 266 \mu s$ - wzór (8),

gdzie

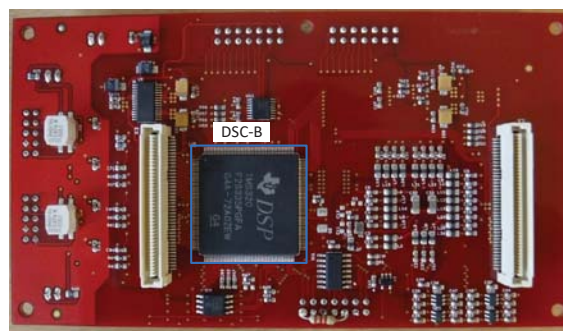
$$I_{UCAP}^{ref} = \frac{P_{UCAP}^{ref}}{V_{UCAP}} = \frac{6000 W}{150 V} = 40 A.$$

Założywszy, że częstotliwość pracy łączników przekształtnika napięcia wynosi 10 kHz, można stwierdzić, że dla napięciowego magazynu energii możliwa do uzyskania dynamika zmian mocy jest wysoka. Już po około trzech cyklach sterownia łącznikami (300 μs) dostępna jest żądana moc z magazynu. Zestawiając to z szybkością odpowiedzi regulatorów prądu i napięcia w układzie sterowania dla przekształtnika sieciowego, gdzie stałe czasowe są na poziomie kilku ms można założyć, że dostępność mocy z magazynu napięciowego (bateria ultrakondensatorów) jest na tym samym poziomie co z magazynu prądowego (cewka nadprzewodząca). Możliwe zatem będzie emulowanie warunków pracy układu z magazynem nadprzewodnikowym za pomocą systemu z ultrakondensatorami.

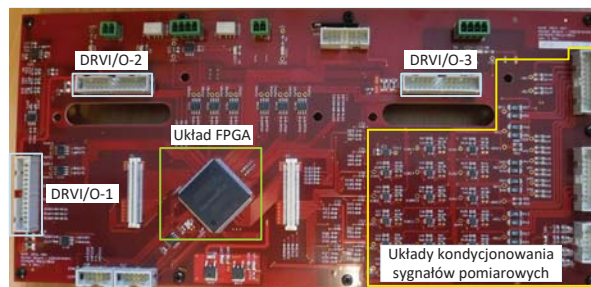
Układ sterowania

Układ sterowania zrealizowany jest z wykorzystaniem dwuprocessorowej platformy (NpME/DSCx2) (Rys. 7 i 8) zamocowanej do płyty rozszerzeń (NpME/ANLG-PWM) (Rys. 9), na której umieszczony jest układ z matrycą programowalną FPGA (ang. *Field-Programmable Gate Array*).

W platformie sterującej można wydzielić obszary pod względem funkcjonalnym: 1) dwa 32-bitowe zmiennoprzecinkowe mikrokontrolery DSC (ang. *Digital Signal Controller*) TMS320F28335 o maksymalnej częstotliwości pracy 150 MHz [10] - DSC-A, DSC-B; 2) dwie niezależne izolowane magistrale CAN-bus - CAN-I, CAN-II; 3) indywidualne wyjścia/wejścia cyfrowe DIGI/O-A, DIGI/O-B; 4) dwie zewnętrzne pamięci EEPROM z interfejsem I²C; 5) układ



Rys. 8. Płyta NpME/DSCx2 z dwuprocessorowym sterownikiem. Panel tylny.



Rys. 9. Płyta NpME/ANLG-PWM.

FPGA, który stanowi interfejs pomiędzy układami DSC-A, DSC-B a urządzeniami peryferyjnymi 6) układy kondycjonowania sygnałów analogowych pochodzących z przetworników pomiarowych - ANLG-PROT; 7) pomiaru temperatury z termistorów NTC - TEMP; 8) obwody zasilania - PSUP; oraz 9) złącz wejściowych i wyjściowych dla sygnałów sterujących łącznikami - DRVI/O.

Strukturę sterowania dla energoelektronicznego interfejsu sieciowego AC/DC/DC z magazynem energii można przedstawić w sposób warstwowy [12]. Wzorowane to jest na modelu sieciowym OSI (dokładniej ISO OSI RM ang. *ISO Open Systems Interconnection Reference Model*) stosowanym w rozwiązaniach informatycznych [11]. Podział ten dokonywany jest pod względem funkcjonalnym, w którym każda z warstw wykonywana jest z określonym czasem próbkowania: 1) System Control Layer ($\geq 10 ms$); 2) Application Control Layer ($\approx 1 ms \dots 10 ms$); 3) Converter Control Layer ($\approx 10 \mu s \dots 1 ms$); 4) Switching Control Layer ($\approx 1 \mu s \dots 10 \mu s$); 5) Hardware Control Layer ($\approx 100 ns \dots 1 \mu s$).

Z uwagi na złożoność podsystemu istotną uwagę poświęcono na implementację zabezpieczeń, które działają niezależnie od algorytmów sterowania zaimplementowanych w mikrokontrolerach DSC. Sytuacje wymagające zadziałania zabezpieczenia zostały podzielone na dwa typy. Pierwszym jest utrata komunikacji z mikrokontrolerem, a drugi to przekroczenie poziomów sygnałów analogowych z przetworników pomiarowych. Zabezpieczenia dla obu przypadków zrealizowane są w układzie FPGA, gdzie po wystąpieniu zdarzenia wykonywana jest sekwencja blokowania sygnałów PWM.

Mikrokontroler DSC jest układem zawierającym oprócz jednostki zmiennoprzecinkowej m.in. przetworniki ADC, układ PWM oraz interfejsy komunikacyjne. W celu przeciwdziałania utknięcia algorytmu w danym punkcie stosuje się tzw. watchdog. Jest to układ czasowy (najczęściej licznik) oczekujący na potwierdzenie poprawnej pracy przez monitorowany układ. W układzie oprócz zastosowania watchdoga zaimplementowanego w DSC zastosowany został watchdog w układzie FPGA. W przypadku braku wysłania potwierdzenia przynajmniej raz na 300 μs wyjścia PWM dla danego DSC

są ustawiane w stan bezpieczny dla urządzenia. W przypadku falownika napięcia będzie to stan niski, natomiast falownika prądu wyjścia PWM ustawione zostaną w stan wysoki. Zastosowane zabezpieczenie znajduje się w warstwie Converter Layer.

Zdecydowana większość sterowników bramkowych posiada zabezpieczenie nadprądowe, które realizowane jest przez układ monitorowania spadku napięcia na łączniku tranzystorowym V_{CE} . Układ monitorowania V_{CE} jest aktywny tylko wtedy kiedy łącznik jest w stanie przewodzenia. Przekroczenia zadanego progu V_{CE} powoduje aktywację błędu sterownika i ustawienia wyjść sterownika w stan blokowania, natomiast układ sterowania po obsłudze tego błędu zatrzymuje pracę całego układu. Z tego też powodu w układzie zaimplementowane zostało dodatkowe zabezpieczenie nadprądowe, w którym ustawiony próg detekcji prądu jest na niższym poziomie niż w sterowniku bramkowym. Po przekroczeniu zadanego progu sygnału prądowego, algorytm zaimplementowany w układzie FPGA, czasowo blokuje impulsy PWM dla danej gałęzi. Impulsy PWM są blokowane do czasu ustąpienia błędu.

Przekształtnik sieciowy AC/DC

NPC (Neutral-Point-Clamped) należy do najczęściej stosowanych w przemyśle topologii wielopoziomowych. Zaletami tego przekształtnika są, w porównaniu do dwupoziomowego, lepsze widmo prądu wyjściowego dla danej częstotliwości łączeń oraz wyraźnie niższe straty wydzielane podczas zmiany stanów łączników. Aby zapewnić poprawną pracę przekształtnika NPC napięcia obu kondensatorów w obwodzie pośredniczącym muszą mieć podobne wartości. W przypadku omawianego układu AC/DC/DC realizacja balansowania napięć możliwa jest poprzez odpowiednie sterowanie przekształtnikiem AC/DC, DC/DC lub jednocześnie AC/DC oraz DC/DC. W tym rozdziale zostanie opisana metoda sterowania przekształtnika AC/DC oparta na modyfikacji algorytmu modulatora.

W najprostszej modulacji szerokości impulsów sygnały bramkowe są wytwarzane poprzez porównywanie zadanego sygnału sinusoidalnego z trójkątną falą nośną. Dodanie do zadanych przebiegów sinusoidalnych v_a, v_b, v_c składowej v_0 opisanej wzorem (9) umożliwia jednak lepsze wykorzystanie napięcia w obwodzie pośredniczącym.

$$(9) \quad v_0 = \frac{1 - \min(v_a - v_c, v_b - v_c, 0)}{2} - \frac{\max(v_a - v_c, v_b - v_c, 0)}{2}$$

W takim układzie przebiegi modulujące opisane są wzorami: $v_{am} = v_a + v_0$; $v_{bm} = v_b + v_0$; $v_{cm} = v_c + v_0$, natomiast trójkątne fale nośne zmieniają się w zakresie od 0 do 0,5 oraz od 0,5 do 1. W wyniku nierównomiernego obciążenia C_1 i C_2 prądy obu kondensatorów różnią się, co powoduje różnicę między u_{C1} i u_{C2} . Aby zapewnić równomierne poziomy napięć kondensatorów suma prądów $i_0 + i_{DC0}$ powinna być równa 0. Poprzez sterowanie przekształtnikiem AC/DC możliwe jest wpływanie na wartość prądu i_0 . W proponowanej metodzie v_0 jest obliczane w dwóch dodatkowych trybach zgodnie z równaniami:

$$(10) \quad v_0 = -\min(v_a - v_c, v_b - v_c, 0)$$

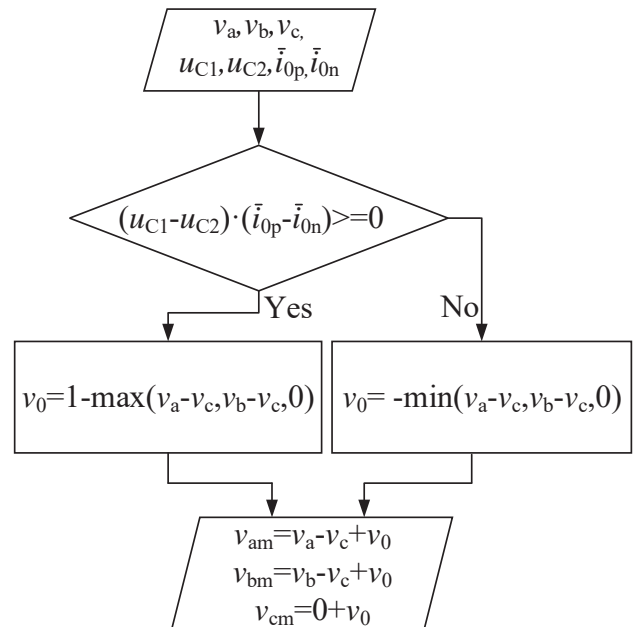
$$(11) \quad v_0 = 1 - \max(v_a - v_c, v_b - v_c, 0)$$

Wszystkie tryby umożliwiają pełne wykorzystanie obwodu pośredniczącego. Istotna różnica występuje w wartości i_0 .

Średnia wartość i_0 za okres łączeń może zostać obliczona na podstawie chwilowych wartości sygnałów modulujących oraz prądów wyjściowych. Można przyjąć, że prądy wyjściowe przekształtnika nie zależą od sposobu obliczania v_0 . Z tego powodu możliwe jest obliczenie \bar{i}_0 dla każdego z trzech trybów zgodnie ze wzorem

$$(12) \quad \bar{i}_0 = |2v_{am} - 1|i_a + |2v_{bm} - 1|i_b + |2v_{cm} - 1|i_c$$

Na podstawie różnicy napięć kondensatorów i obliczonych prądów możliwe jest wybranie w każdym okresie obliczeń odpowiedniego zestawu sygnałów modulujących co umożliwi zachowanie obu napięć na równym poziomie. Algorytm modulatora został przedstawiony na rysunku 10, gdzie i_{0n} to obliczony prąd i_0 dla v_0 wyrażonego wzorem (10), a i_{0p} w przypadku obliczenia zgodnie z (11). To rozwiązanie zostało opisane dla czterogałęziowego przekształtnika DC/AC w [9] jednak może być również stosowane dla urządzenia AC/DC złożonego z trzech gałęzi.



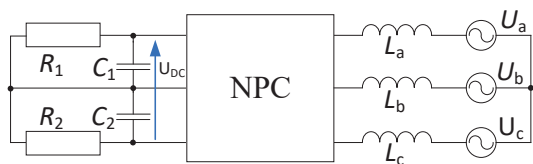
Rys. 10. Algorytm modulatora.

Działanie algorytmu dla przekształtnika AC/DC zostało sprawdzone za pomocą symulacji komputerowych. Układ dla jakiego przeprowadzono symulacje przedstawiono na rysunku 11. Przekształtnik AC/DC był sterowany metodą VOC (ang. *Voltage Oriented Control*) z zadanym napięciem w obwodzie pośredniczącym $u_{DC} = 700$ V. Parametry systemu przedstawiono w tabeli 1.

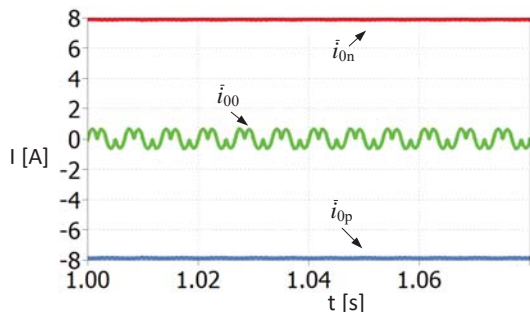
Tab. 1. Najważniejsze parametry modelu symulacyjnego.

| Oznaczenie | Wartość | Opis |
|-----------------|----------------------------|--------------------------------------|
| R_1 / R_2 | 50 Ω / 400 Ω | rezystancja obciążenia |
| C_1, C_2 | 3 mF | pojemność kondensatorów |
| L_a, L_b, L_c | 1.5 mH | indukcyjność filtru wejściowego |
| f | 50 Hz | częstotliwość napięć U_a, U_b, U_c |
| f_{sw} | 10 kHz | częstotliwość łączeń |
| U_a, U_b, U_c | 230 V | wartość skuteczna napięcia |

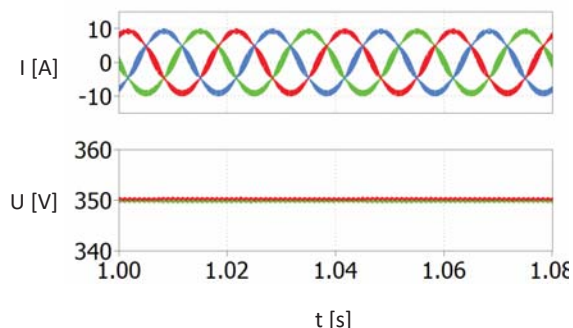
Przebiegi obliczonych prądów przedstawiono na rysunku 12. Prąd obliczony dla v_0 wyrażonego wzorem (9) oznaczono jako i_{00} . Na rysunku 13 przedstawiono prądy diodów oraz napięcia kondensatorów w obwodzie DC.



Rys. 11. Układ symulacyjny.



Rys. 12. Przebiegi obliczanych prądów i_0 .



Rys. 13. Przebiegi prądów diod oraz napięć kondensatorów.

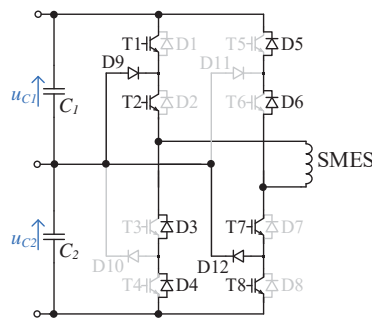
Wyniki symulacji potwierdzają, że algorytm umożliwia utrzymanie napięć u_{C1} oraz u_{C2} na tym samym poziomie mimo niesymetrycznego obciążenia.

Przekształtnik napięciowy DC/DC dla magazynu energii

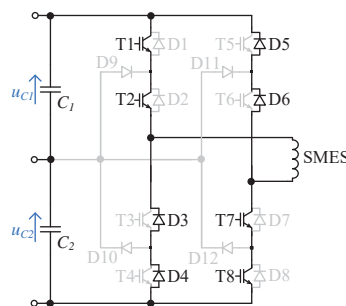
Zastosowana topologia przekształtnika DC/DC złożona z dwóch gałęzi półmostkowego falownika napięcia o topologii NPC umożliwia przeprowadzenie badań układu kondycjonera mocy w kilku różnych konfiguracjach. Jedynie w pracy układu jako przekształtnik trójpoziomowy z ultrakondensatorowym magazynem energii wykorzystywane są wszystkie łączniki półprzewodnikowe widniejące na rysunkach 5 i 6. Schematy przekształtnika wraz z zaznaczonymi łącznikami, które nie biorą udziału w pracy (kolor szary) lub stanowią zwarcie (czerwony) przy zastosowaniu danego sterowania przedstawiono na rysunkach 14-16. Schemat z zaznaczonymi łącznikami dla pracy jako trójpoziomowy przekształtnik dla magazynu nadprzewodnikowego przedstawiono na rysunku 14. Układ ten może również pracować tak jak dwupoziomowy przekształtnik napięcia. W takim wypadku pary łączników są sterowane tymi samymi sygnałami bramkowymi. Należy jednak pamiętać, że prąd będzie płynął przez dwa razy większą liczbę łączników niż w przypadku zastosowania klasycznej topologii dwupoziomowej przez co straty mocy będą większe. W takim układzie sterowanie przekształtnikiem DC/DC umożliwia jedynie wpływanie na całe napięcie zgromadzone w obwodzie DC i balansowanie musi odbywać się za pomocą AC/DC.

Możliwa jest taka konfiguracja sterowania aby przekształtnik zachowywał się jak m.in. dwugałęziowy dwupoziomowy falownik prądu (2L-CSI, ang. 2-Leg - Current So-

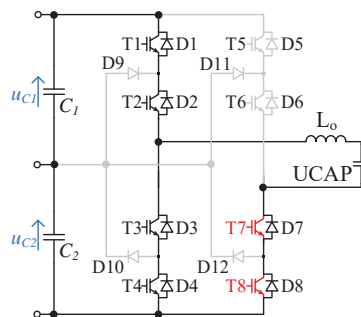
urce Inverter) (Rys. 15), natomiast w przypadku zastosowania magazynu napięciowego jako układ podwyższająco-obniżający napięcie oraz dwugałęziowy dwupoziomowy przekształtnik napięcia (2L-VSC) (Rys. 16).



Rys. 14. Przekształtnik DC/DC z nadprzewodzącym magazynem energii.



Rys. 15. Przekształtnik DC/DC z nadprzewodzącym magazynem energii przy sterowaniu dla przekształtnika dwupoziomowego.



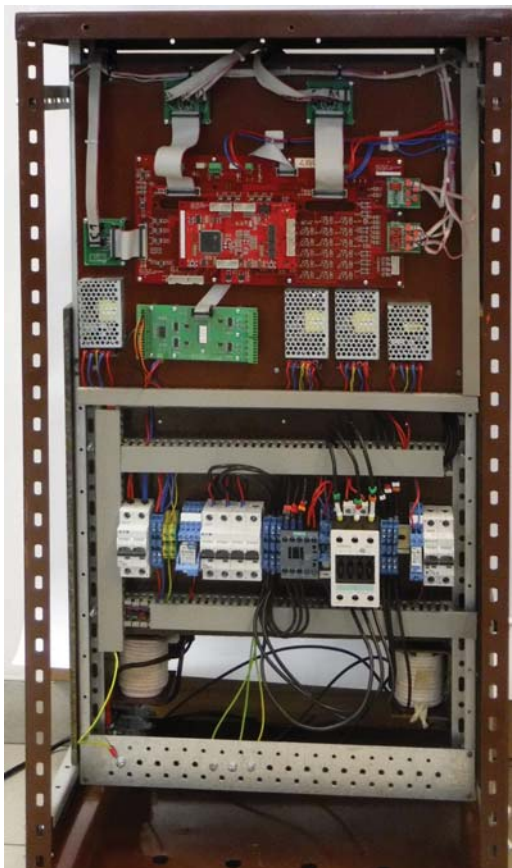
Rys. 16. Przekształtnik DC/DC z ultrakondensatorowym magazynem energii przy sterowaniu dla przekształtnika dwupoziomowego.

Układ laboratoryjny

Do stworzenia układu wykorzystano pięć modułów tranzystorowych, każdy stanowi jedną gałąź przekształtnika NPC. Trzy z nich pełnią rolę przekształtnika AC/DC natomiast pozostałe DC/DC. Rolę kondensatorów C_1 i C_2 stanowią dwie pary połączonych równolegle trzech kondensatorów. Za pomocą przetworników prądowych mierzone są prądy dławików sieciowych L na każdej z trzech faz oraz prąd wyjściowy przekształtnika DC/DC. Przetworniki napięciowe służą do pomiaru napięcia przewodowego w miejscu przyłączenia kondensatorów C, napięć u_{C1} i u_{C2} , napięcia w całym obwodzie pośredniczącym DC oraz napięcia na wyjściu przekształtnika DC/DC. Zdjęcia gotowego układu przedstawione zostały na rysunkach 17 oraz 18. Najważniejsze podzespoły układu oraz parametry elementów pasywnych wymieniono w tabeli 2.

Tab. 2. Najważniejsze komponenty układu laboratoryjnego oraz parametry elementów pasywnych.

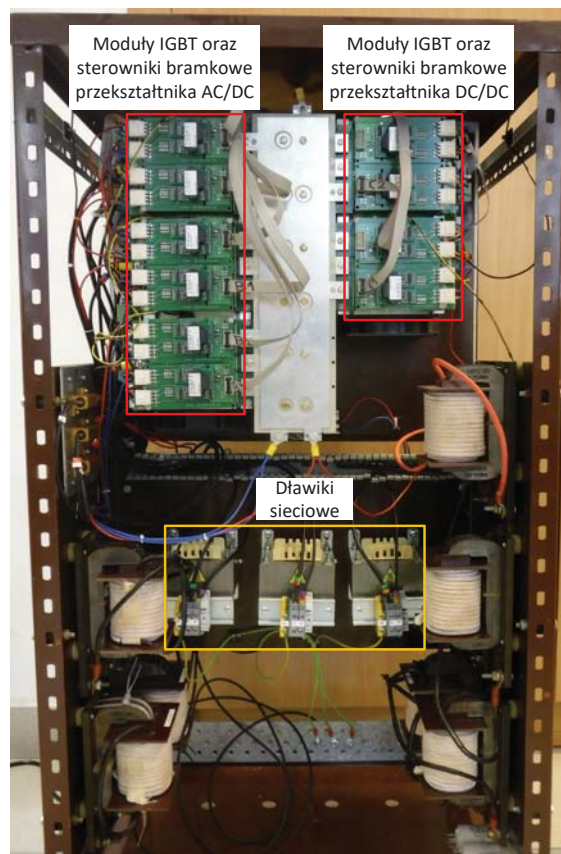
| Element | Opis |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Moduły IGBT oraz diody | Semikron SK150MLI066T |
| Sterowniki bramkowe | Concept 2SC0108T2H0-17 |
| Przetworniki prądowe | LEM LA 55-P |
| Przetworniki napięciowe | LEM LV 25-P |
| Pojemności w obwodzie DC - C_1, C_2 | 3 mF |
| Indukcyjność filtru wejściowego | 1,6 mH |



Rys. 17. Widok panelu czołowego układu laboratoryjnego.

Podsumowanie

W artykule opisano układ kondycjonera mocy. Przedstawiono topologie systemów z ultrakondensatorowym oraz nadprzewodnikowym magazynem energii, a także zamieszczono podstawowe wzory opisujące energię zgromadzoną w układzie dla obu typów zasobników. W publikacji zawarto również opis elektronicznego układu sterowania zawierającego dwa mikrokontrolery oraz matrycę programowalną FPGA, a także systemu zabezpieczeń. Zaletą pokazanego układu jest jego uniwersalność. Wykorzystanie dwóch gałęzi (półmostków) pozwala na pracę układu DC/DC zarówno dla magazynu ultrakondensatorowego jak i nadprzewodnikowego, natomiast użycie topologii NPC umożliwia działanie przekształtników zarówno jako trójpoziomowych jak i dwupoziomowych. Opisany został sposób sterowania przekształtnikiem AC/DC umożliwiając wyrównanie napięć na kondensatorach w obwodzie pośredniczącym napięcia stałego. W artykule przedstawiono też stworzony układ laboratoryjny układu. Zbudowany układ posłużył m.in. do weryfikacji algorytmów sterowania powtarzalnego dla przekształtnika sieciowego.



Rys. 18. Widok panelu tylnego układu laboratoryjnego.

Badania były wspierane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu nr PBS3/A4/13/2015 zatytułowanego „Nadprzewodzący magazyn energii z interfejsem energoelektronicznym do zastosowań w sieciach dystrybucyjnych” 01.07.2015-31.12.2018.

Autorzy: dr inż. Arkadiusz Kaszewski, mgr inż. Andrzej Straś, mgr inż. Andrzej Galecki, dr inż. Marek Michalczuk, dr hab. inż. Bartłomiej Ufnalski, prof. nadzw., prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662, Warszawa, Polska, email: {arkadiusz.kaszewski, andrzej.stras}@ee.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Polska Norma; Napięcia znormalizowane IEC. PN-IEC 60038:2011
- [2] Polska Norma; Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych. PN-EN 50160:2010
- [3] International Standard; IEC standard voltages. IEC 60038:2009
- [4] E. Siwy; „Dostosowanie przepisów polskich w zakresie jakości energii elektrycznej do wymogów Unii Europejskiej”. *Biuletyn techniczny*, Nr (18), 2002
- [5] A. Kaszewski, A. Galecki, B. Ufnalski, L. M. Grzesiak; „State-space current control for four-leg grid-connected PWM rectifiers with active power filtering function”. *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, pp. 1265-1271, 2014
- [6] V. Yaramasu, M. Rivera, B. Wu, and J. Rodriguez; „Model predictive current control of two-level four-leg inverters—part I: Concept, algorithm, and simulation analysis”. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 7, pp. 3459–3468, 2013
- [7] B. Kedjar and K. Al-Haddad; „LQ control of a three-phase fourwire shunt active power filter based on three-level NPC inverter”. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp. 001 297–001 302, 2008,

- [8] A. Galecki , L. Grzesiak, B. Ufnalski, A. Kaszewski, M. Michalczuk; „Anti-Windup Strategy for an LQ Current Controller with Oscillatory Terms for Three-Phase Grid-tie VSCs in SMES Systems”. *Power electronics and drives*, vol. 1(36), No. 2, 2016
- [9] A. Straś, A. Kaszewski and L. Grzesiak; „An Efficient Modulation Algorithm for 3-phase NPC Voltage Source Converters”. *European Power Electronics (EPE'17 ECCE Europe) Conference*, pages 1-10, 2017
- [10] Texas Instruments; Digital Signal Controller TMS320F28335. <http://www.ti.com/product/TMS320F28335>, accessed on 07.08.2017.
- [11] Wikipedia: Model OSI. https://pl.wikipedia.org/wiki/Model_OSI, accessed on 07.08.2017.
- [12] H. L. Ginn, N. Hingorani, J. R. Sullivan, R. Wachal; „Control Architecture for High Power Electronics Converters”., *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, No. 12, pp 2312-2319, 2015
- [13] Arifujjaman, S.Hossain, T. Iqbal; „Efficiency Comparison of 2- and 3-level Inverter Based Power Conditioning System for GridConnected SOFC Application”, *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE 2014)*, 2014