

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

KATEDRA ENERGOELEKTRONIKI I AUTOMATYKI SYSTEMÓW PRZETWARZANIA ENERGII



AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

WIELOPOZIOMOWY FALOWNIK NAPIĘCIA
Z POZIOMOWANIEM DIODOWYM (NPC) ZASILANY
Z WYODRĘBNIONYCH ALTERNATYWNYCH ŹRÓDEŁ
ENERGII, PRACUJĄCYCH PRZY RÓŻNYCH
WARTOŚCIACH MOCY MAKSYMALNEJ (MPP)

mgr inż. Miłosz Szarek

PROMOTOR

Prof. dr hab. inż. Stanisław Piróg

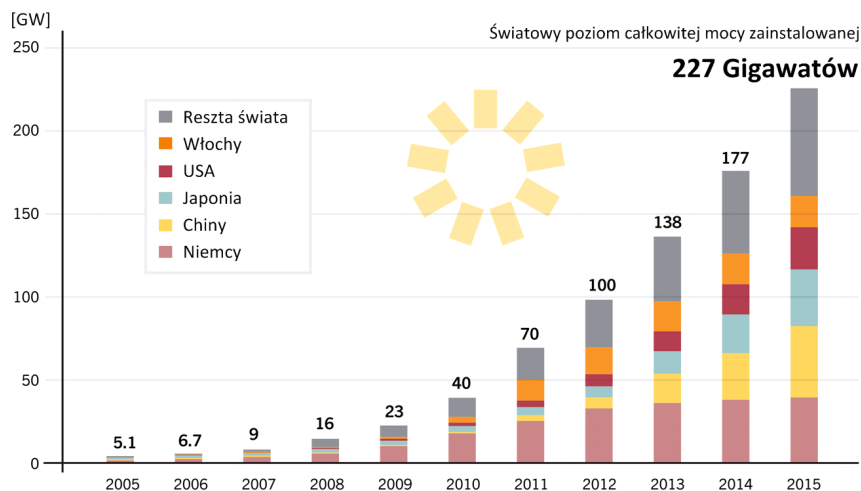
Kraków 2016

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/N/ST7/02424.

1 Tematyka oraz cel pracy doktorskiej

Światowy przyrost liczby ludności, ciągły rozwój cywilizacyjny oraz postępująca rewolucja technologiczna wiążą się ze wzrostem zużycia i zapotrzebowania na energię elektryczną, mechaniczną oraz ciepłą. Z tego względu w ostatnich latach podejmowane są bardzo intensywne działania polegające na wyeliminowaniu marnotrawstwa i nieefektywnego gospodarowania zasobami energetycznymi. Poszukiwane i wdrażane są nowe strategie rozwoju technologii źródeł alternatywnych, poprawy sprawności systemów wytwarzania oraz przesyłu energii elektrycznej, jak również racjonalnego jej wykorzystania. Obecnie obserwowany jest postępujący rozwój wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OZE) takich jak: energia promieniowania słonecznego, wiatru, wody, geotermalna, biomasy, itp. W laboratoriach oraz jednostkach badawczych prowadzone są szeroko zakrojone prace nad nowymi conceptami oraz wdrożeniami nowych rozwiązań technicznych oraz technologicznych, pozwalających na uzyskanie użytkowej energii elektrycznej [6, 7]. Rok 2015 był przełomowy pod tym względem. Odnotowano w nim największy w historii przyrost zainstalowanej mocy szczytowej na poziomie 147[GW] [3]. Wzrost ten jest efektem m.in. nowej polityki energetycznej wielu państw (Chiny, USA, Niemcy, Japonia), pojawiania się nowych instrumentów ekonomiczno-prawnych oraz narodowych programów innowacyjnych w sektorze energetyki odnawialnej. Bardzo istotny w tym procesie jest rozwój zaawansowanych technologii integracji źródeł generacji rozproszonej (*Smart-Grid*), poprawy sprawności oraz jakości energoelektronicznych systemów przekształcania energii elektrycznej oraz jej magazynowania, jak również daleko idące wsparcie w postaci narzędzi programistycznych wykorzystywanych do monitoringu oraz zarządzania przepływem mocy.

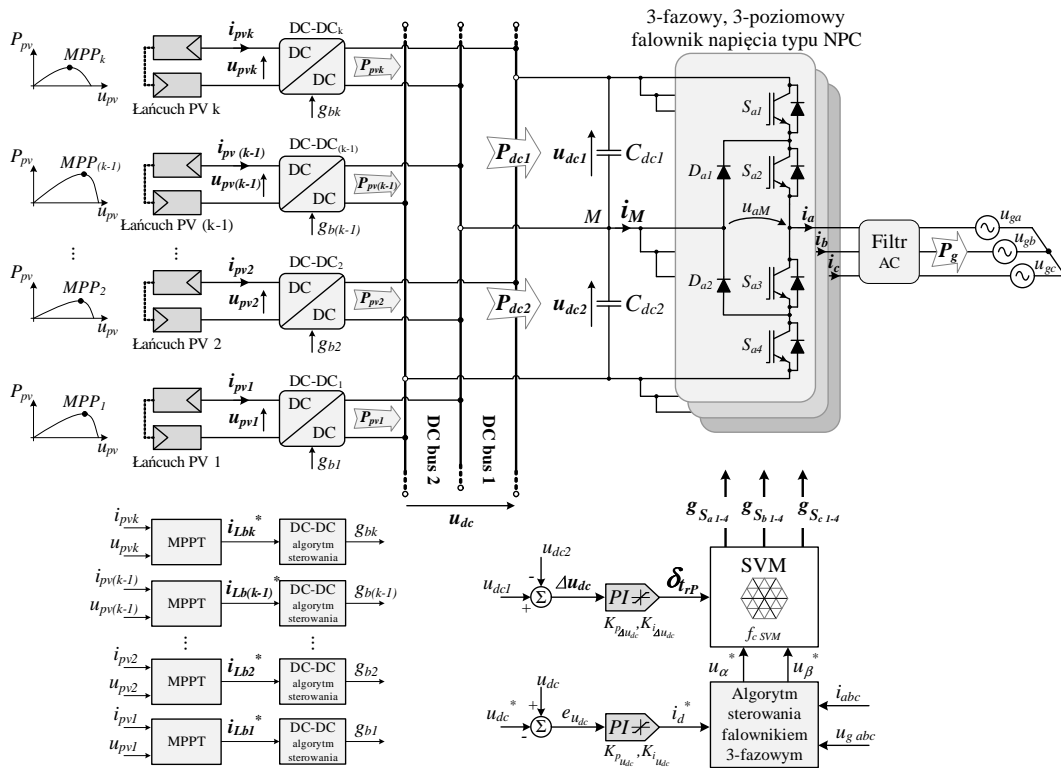
Na szczególną uwagę zasługuje sektor bezpośredniego pozyskiwania energii elektrycznej z promieniowania słonecznego, czyli fotowoltaika (PV). W roku 2015 odnotowano 25[%] wzrost zainstalowanej mocy szczytowej w odniesieniu do roku poprzedniego, co stanowi historyczny rekord. Zatem, w tym okresie przybyło 50[GW] mocy, co jest odpowiednikiem 185 milionów modułów PV. Szacuje się, że światowy poziom zainstalowanej mocy szczytowej elektrowni fotowoltaicznych wynosi obecnie 227[GW]. Jak można zauważyć na rysunku 1, od 2005 roku mamy



Rys. 1: Światowy poziom zainstalowanej mocy szczytowej elektrowni fotowoltaicznych w latach 2005-2015 z uwzględnieniem wybranych regionów [2, 3]

do czynienia z wykładniczym przyrostem jej wartości [2, 3]. Pomimo popularyzacji i gwałtownego wzrostu małych (do 10[kW]), prywatnych elektrowni fotowoltaicznych, to największy udział w globalnym bilansie energetycznym (86[%]) stanowią przemysłowe elektrownie wielkoskalowe o mocy nominalnej często przekraczającej 50[MW]. Przeważnie, w tego typu instalacjach stosowane są główne jednostki falowników napięcia, podłączone równolegle do trójfazowej linii zasilającej.

Spadek cen modułów PV oraz ciągły wzrost ich sprawności powoduje, że uruchamiane elektrownie solarne posiadają coraz większą moc zainstalowaną, np. 1[GW] Yanchi Solar PV Station w prowincji Qinghai, Chiny. Do przekształcania tak dużych mocy stosowane są przeważnie wielopoziomowe falowniki napięcia [5, 9], wśród których dużą popularność w aplikacjach przemysłowych zyskał trójpoziomowy falownik z poziomowaniem diodowym (NPC, ang. *Neutral Point Clamped*). Jego poglądowy schemat został zamieszczony na rysunku 2. Jest on zasilany z dzielnika kondensatorowego, o napięciu każdej z części równym połowie wartości całkowitej szyny DC. Daje to możliwość zastosowania w takiej topologii łączników półprzewodnikowych o połowę niższym napięciu pracy, lub uzyskać dwa razy większe napięcie wyjściowe przy użyciu łączników o takim samym napięciu jak w falowniku dwupoziomowym. Ma to szczególne znaczenie w przypadku podłączenia takiego przekształtnika do trójfazowej linii napięcia średniego [1, 4]. Rozdzielona na dwie części wspólna linia DC umożliwia zasilanie każdej z nich przez inny przekształtnik DC-DC, przy zachowaniu ich symetrycznego rozkładu. Przykład takiej konfiguracji zilustrowano na rysunku 2. Wówczas przekształtniki prądu stałego mogą pracować z mniejszym współczynnikiem wzmocnienia napięciowego oraz używać łączników o



Rys. 2: Schemat blokowy systemu fotowoltaicznego składającego się z rozproszonych źródeł mocy podłączonych do wspólnej, rozdzielonej linii napięć stałych (DC) zasilającej centralny 3-fazowy falownik napięcia typu NPC

dwa razy niższym napięciu pracy, co przyczynia się do wzrostu ich sprawności oraz spadku ceny.

Oprócz wspomnianych zalet takiego rozwiązania, w sytuacji istniejącego rozrzutu ($\pm 5[\%]$) mocy maksymalnej modułów PV, zmiennych warunków natężenia promieniowania słonecznego (G), częściowego zacinienia (częste zjawisko w elektrowniach wielkopowierzchniowych) oraz ewentualnej awarii danych łańcuchów paneli fotowoltaicznych lub przekształtników DC-DC, istnieje duże prawdopodobieństwo powstania ciągłego lub przejściowego niezrównoważenia mocy całkowitych ($P_{dc1} \neq P_{dc2}$), zasilających każdą sekcję rozdzielonej magistrali napięcia stałego (C_{dc1}, C_{dc2}). Taka sytuacja prowadzi do niezbalansowania napięć ($u_{dc1} \neq u_{dc2}$) dzielnika kondensatorowego, zasilającego falownik trójpoziomowy typu NPC, skutkując (w najlepszym przypadku) odkształceniem przebiegów generowanych prądów linii trójfazowej lub doprowadzając do przekroczenia dopuszczalnego napięcia maksymalnego łączników półprzewodnikowych. W efekcie może dojść do zatrzymania pracy systemu fotowoltaicznego lub jego awarii. Zjawisko to niesie więc ze sobą bardzo niekorzystne skutki.

Z tych względów, w przedstawionej pracy doktorskiej podjęty został temat zastosowania wielopoziomowego falownika napięcia typu NPC, zasilanego z wyodrębnionych alternatywnych źródeł energii, pracujących w różnych punktach mocy maksymalnej (MPP). Głównym celem badawczym jest analiza potencjalnych przyczyn oraz skutków niezbalansowania napięć dzielnika kondensatorowego (u_{dc1}, u_{dc2}) oraz opracowanie algorytmu ich równoważenia, bazującego na 7-segmentowej wektorowej metodzie modulacji szerokości impulsów. Zadaniem opracowanej metody jest zapewnienie poprawnego działania trójfazowego falownika napięcia (doprowadzenie do równowagi napięciowej oraz generacja prądu sinusoidalnego), w sytuacji permanentnie występującej nierównowagi mocy źródeł ($\Delta P_{dc} = P_{dc1} - P_{dc2}$), zasilających każdą z sekcji obwodu stałonapięciowego (C_{dc1}, C_{dc2}). Równie ważnym celem, stało się wyznaczenie maksymalnego oraz dopuszczalnego poziomu $\Delta P_{dc max}$, który może zostać skompensowany przez odpowiednie sterowanie pracą falownika typu NPC. Zatem, istotnym zadaniem jest określenie możliwości oraz efektywności zaproponowanej metody równoważenia napięć DC, w zależności od aktualnego punktu pracy przekształtnika energoelektronicznego. Przedstawiona problematyka pracy doktorskiej, została opracowana teoretycznie oraz zweryfikowana na podstawie badań symulacyjnych przeprowadzonych w środowisku (Matlab\Simulink). Dodatkowym celem realizowanym w ramach pracy doktorskiej, jest projekt oraz konstrukcja energoelektronicznego systemu przekształcania energii elektrycznej, umożliwiającego przeprowadzenie badań laboratoryjnych, w celu praktycznej weryfikacji opracowanych zagadnień.

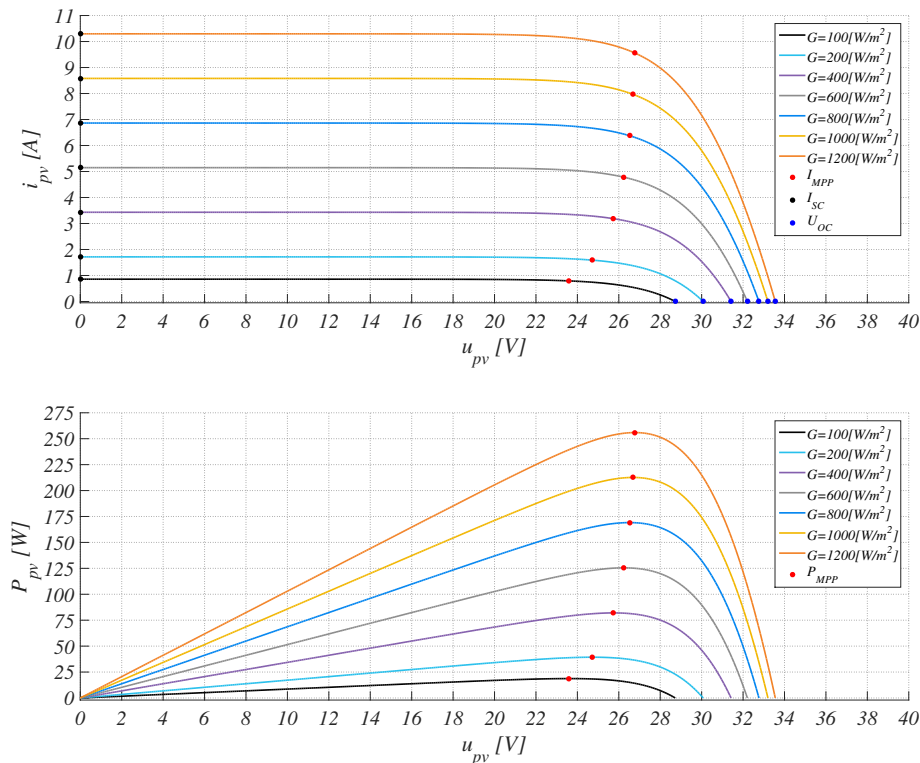
Treść rozprawy doktorskiej została podzielona na osiem głównych rozdziałów oraz dwa dodatki (A – B). Nadrzędne zagadnienia poruszane w każdym z nich to:

- (1) Omówienie tematyki pracy doktorskiej i przedstawienie celów badawczych.
- (2) Charakterystyka stosowanych modułów fotowoltaicznych oraz opracowanie ich modelu matematycznego dla celów przeprowadzonych badań symulacyjnych. Przedstawienie idei algorytmu poszukiwania punktu mocy maksymalnej bazującego na znaku konduktancji inkrementalnej (IC-MPPT) i zastosowanie go w sterowaniu omówionej topologii przekształtników prądu stałego (DC-DC), podwyższających napięcie.

- (3) Przedstawienie teoretyczne topologii trójpoziomowego, trójfazowego falownika napięcia typu NPC oraz wyznaczenie wszystkich możliwych do wygenerowania dyskretnych wektorów napięciowych.
- (4) Charakterystyka metod modulacji szerokości impulsów stosowanych w falownikach wielopoziomowych. Omówienie algorytmu modulacji wektorowej oraz wpływu realizowanych wektorów napięcia trójfazowego na poziom napięć wejściowego dzielnika kondensatorowego. Szczegółowy opis implementacji algorytmu SVM oraz analiza symulacyjna sposobu jego działania.
- (5) Przedstawienie głównych przyczyn oraz skutków niezrównoważenia napięć dzielnika pojemnościowego oraz opracowanie metody ich balansowania za pomocą redundantnych wektorów napięcia. Implementacja algorytmu SVM z dodatkową modulacją wektorów alternatywnych, jak również analiza efektywności jego działania przeprowadzona analitycznie oraz za pomocą badań symulacyjnych.
- (6) Omówienie współpracy wielopoziomowego falownika napięcia typu NPC z trójfazową linią zasilającą oraz przedstawienie zastosowanego algorytmu pętli synchronizacji fazowej (SRF-PLL) [8]. Aplikacja zmiennej struktury układu sterowania przekształtnikami DC-DC podwyższającymi napięcie oraz przeprowadzenie badań symulacyjnych całego systemu fotowoltaicznego.
- (7) Prezentacja projektu oraz poszczególnych komponentów zrealizowanego systemu energoelektronicznego przekształcania energii elektrycznej, pozyskiwanej z modułów fotowoltaicznych. Omówienie oraz analiza przeprowadzonych badań laboratoryjnych.
- (8) Podsumowanie przeprowadzonych badań.
- (A) Prezentacja aparatu matematycznego, dotyczącego stosowanych wielokrotnie w rozprawie doktorskiej transformacji układów trójfazowych.
- (B) Przedstawienie schematów elektronicznych oraz obwodów drukowanych, zaprojektowanych podczas realizacji laboratoryjnego układu przekształtnikowego.

2 Podsumowanie opracowanych celów badawczych i wybrane rezultaty

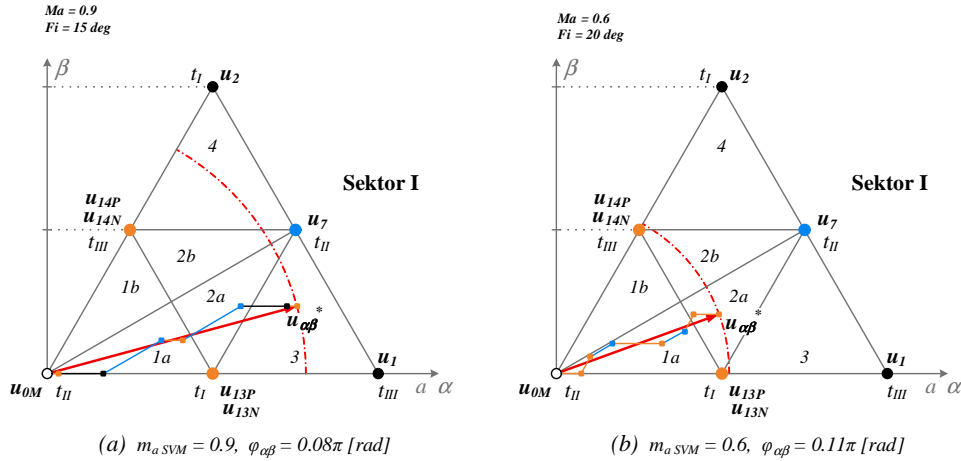
W ramach pracy doktorskiej zrealizowane zostały wszystkie zaplanowane i przedstawione w rozdziale 1 cele badawcze i wdrożeniowe. W rozdziale 2.2 omówiono i wyprowadzono zależności opisujące sposób działania ogniwa fotowoltaicznego, umożliwiające implementację modelu symulacyjnego całego łańcucha modułów PV. Zrealizowany model zastosowany został do zobrazowania wpływu zmiany natężenia promieniowania słonecznego (G) oraz temperatury struktury półprzewodnikowej (T) na rozkład charakterystyk prądowo-napięciowych modułów PV (rysunek 3) oraz wykorzystany podczas badań symulacyjnych kompletnego systemu fotowoltaicznego (rozdział 6.4). W ramach badań symulacyjnych zaimplementowany został również algorytm poszukiwania punktów mocy maksymalnej, bazujący na metodzie konduktancji inkrementalnej (IC-MPPT), którego zasadę działania omówiono w rozdziale 2.3.



Rys. 3: Charakterystyki wyjściowe pojedynczego modułu fotowoltaicznego uzyskane na podstawie opracowanego modelu fizycznego dla zmiennego natężenia promieniowania słonecznego (G) oraz stałej temperatury złącza półprzewodnikowego ($T = 25[^\circ C]$)

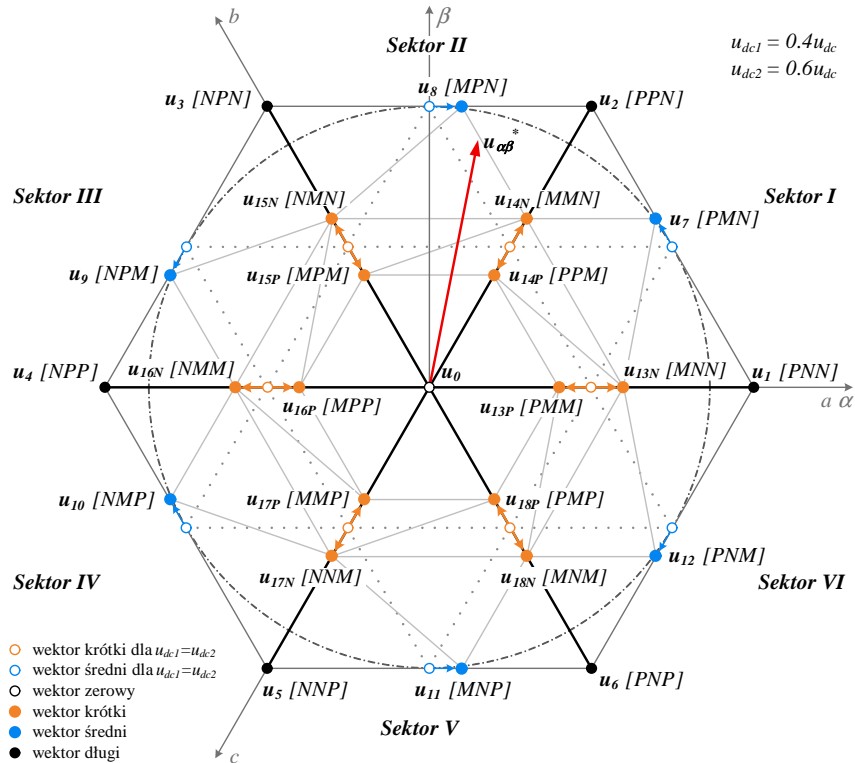
W rozdziale 3 oraz 4 omówiono zasadę działania trójpoziomowego, trójfazowego falownika napięcia typu NPC oraz wyznaczono wszystkie możliwe dyskretne wektory napięciowe, ze zwróceniem szczególnej uwagi na grupę redundantnych wektorów krótkich typu P oraz N. Określono wpływ realizowanych wszystkich typów wektorów napięciowych na poziom napięć wejściowego dzielnika pojemnościowego, zasilającego falownik NPC (rozdział 4.2.3). Przeanalizowane zostały możliwe sekwencje przełączeń (3, 5, 7-segmentowa) wyznaczonych wektorów dyskretnych, w celu odwzorowania referencyjnego wektora napięcia trójfazowego, zgodnie z przyjętymi w rozdziale 4.2.4 zasadami projektowania efektywnej sekwencji przełączeń. Rezultatem była implementacja algorytmu 7-segmentowej modulacji wektorowej (rysunek 4) oraz przeprowadzona analiza symulacyjna jego działania (rozdział 4.3.2). Wyznaczono zmienność amplitud wybranych harmonicznych, występujących w napięciu fazowym i międzyfazowym falownika w zależności od aktualnej wartości amplitudowego indeksu modulacji, jak również zmienność przebiegów napięć fazowych.

W rozdziale 5 określono potencjalne przyczyny nierównoważenia napięć zasilających falownik typu NPC oraz zaprezentowano ich skutki. Wyprowadzone zostały równania opisujące dyskretne wektory napięć falownika w zależności od stopnia niezbalansowania napięć stałych dzielnika kondensatorowego ($u_{dc1} \neq u_{dc2}$). Zmienność ich rozkładu na płaszczyźnie heksagonalnej składowych α/β w zależności od stopnia nierównoważenia (Δu_{dc}), wyznaczono analitycznie i zaprezentowano w postaci graficznej (rysunek 5). Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych, przedstawiono powstałe odkształcenia przebiegów napięć oraz

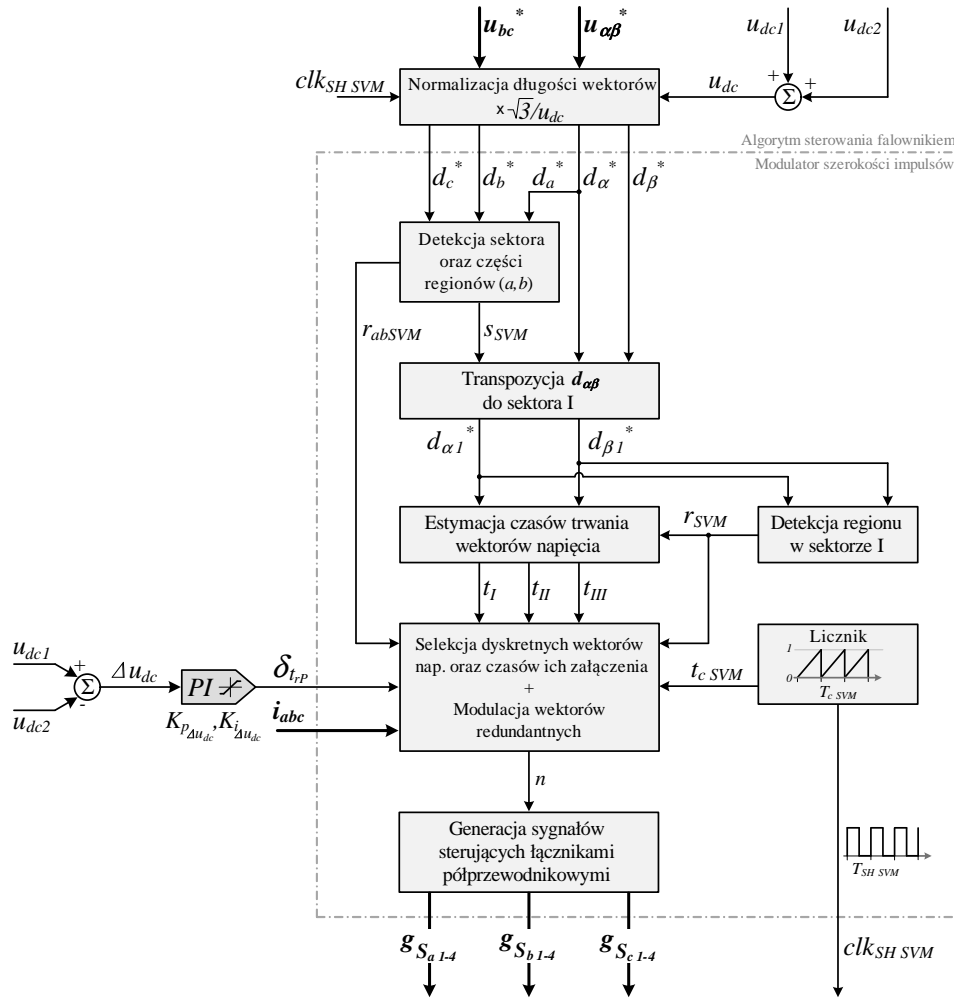


Rys. 4: Przykłady kompozycji referencyjnego wektora napięcia ($\mathbf{u}_{\alpha\beta}^*$) za pomocą wektorów dyskretnych w 7-segmentowej metodzie modulacji

prądów generowanych przez falownik. Zaproponowano metodę równoważenia napięć, wykorzystującą dodatkową modulację ($\delta_{t_{rP}}$) czasów trwania krótkich wektorów redundantnych (t_{rPN}), występujących w danej sekwencji przełączeń. Schemat blokowy zmodyfikowanego algorytmu 7-segmentowego modulatora wektorowego przedstawiono na rysunku 6. Analizie poddano wpływ stopnia modulacji na rozkład wektorów napięciowych oraz wartość chwilową (i_M) i średnią prądu węzła środkowego dzielnika pojemnościowego ($i_{M\text{ avg}T_{1/3}}$).



Rys. 5: Rozkład wektorów napięć na płaszczyźnie zespolonej $\alpha\beta$, możliwych do wygenerowania za pomocą trójfazowego falownika NPC, w przypadku nierównoważenia napięć zasilających ($u_{dc1} = 0.4u_{dc}$, $u_{dc2} = 0.6u_{dc}$, $\Delta u_{dc} = -0.2u_{dc}$)

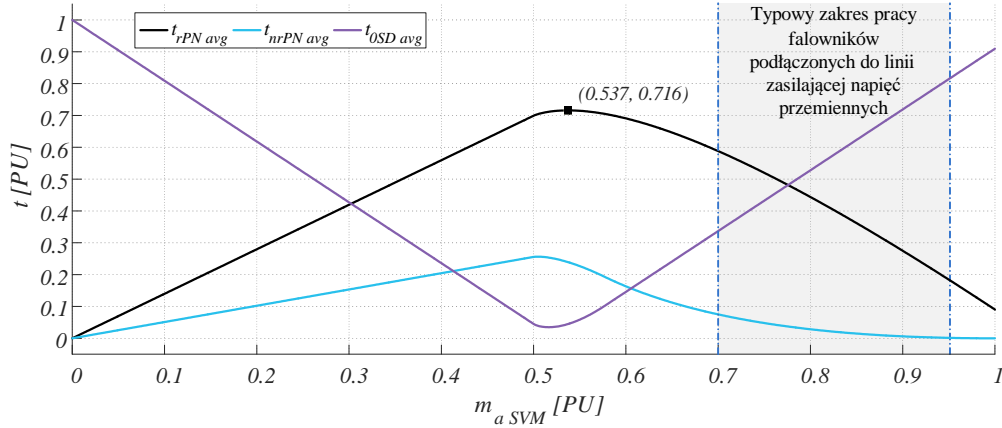


Rys. 6: Schemat blokowy realizacji modulatora wektorowego szerokości impulsów, umożliwiającego równoważenie napięć wejściowego dzielnika kondensatorowego

Na podstawie zaimplementowanego w programie Matlab algorytmu SVM, wykonano analizę numeryczną czasów trwania zdefiniowanych grup wektorów napięcia w funkcji amplitudowego indeksu modulacji ($m_{a SVM}$). Otrzymane charakterystyki zamieszczono na rysunku 7. Wyznaczona postać funkcyjna sumarycznych czasów załączenia krótkich wektorów redundantnych, z uwzględnieniem współczynnika ich modulacji ($\eta_{trPN}(m_{a SVM}, \delta_{trP})$), została wykorzystana do estymacji wartości średniej prądu węzła środkowego dzielnika pojemnościowego ($i_{M avg}$, równanie 1) w zależności od średniego poziomu przebiegu 6-pulsowego wyprostowanego prądów fazowych falownika (I_{6p}), o danej amplitudzie podstawowej harmonicznnej (I_1), w okresie trwania dyskretnych wektorów krótkich redundantnych.

$$\begin{aligned} i_{M avg} &= -\eta_{trPN}(m_{a SVM}, \delta_{trP}) \cdot I_{6p avg} = \\ &= -\frac{3}{\pi} \eta_{trPN}(m_{a SVM}, \delta_{trP}) \cdot I_1 \end{aligned} \quad (1)$$

Na tej podstawie uzyskano zależność analityczną, umożliwiającą wyznaczenie wartości chwilowej (ΔP_{dc} , równanie 2), bądź maksymalnej ($\Delta P_{dc max}$, równanie 3), możliwego do wprowadzenia w danych warunkach pracy, niezrównoważenia mocy pobieranej przez falownik trójfazowy typu NPC, z każdej części dzielnika



Rys. 7: Sumaryczne czasy wykorzystania poszczególnych typów dyskretnych wektorów napięcia w funkcji amplitudowego indeksu modulacji ($m_{a SVM}$): t_{rPN} – krótkie wektory redundantne; t_{nrPN} – pozostałe pojedyncze wektory krótkie; t_{0SD} – wektory zerowe, średnie i długie

kondensatorowego (C_{dc1}, C_{dc2}).

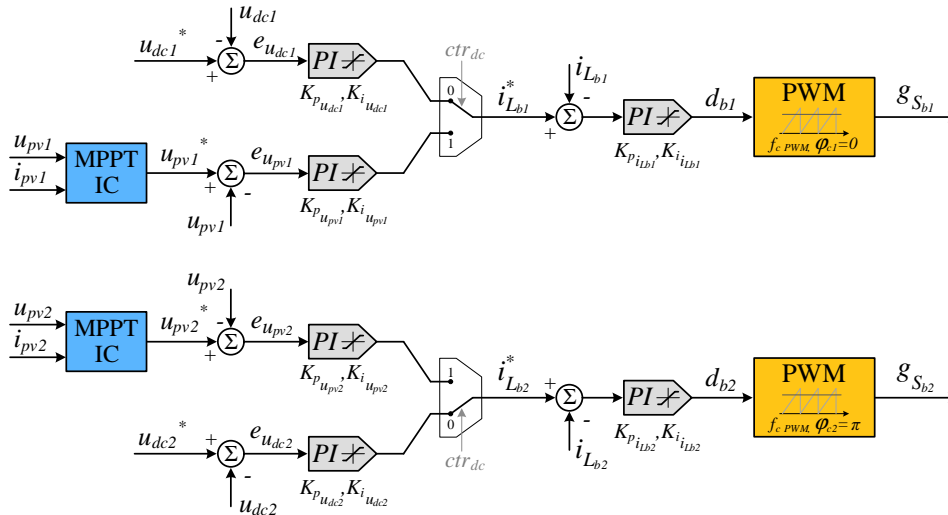
$$\Delta P_{dc} = \frac{u_{dc} P_g}{\pi U_1} \eta_{trPN}(m_{a SVM}, \delta_{t_{rP}}) \quad (2)$$

$$\Delta P_{dc max} = \frac{u_{dc} P_g}{\pi U_1} \eta_{trPN}(m_{a SVM}, \delta_{t_{rP max}}) \quad (3)$$

Równanie 3 jest bardzo istotne, gdyż pozwala określić maksymalny poziom niezbalansowania mocy źródeł np. fotowoltaicznych, zasilających falownik znajdujący się w danym punkcie pracy, który umożliwi jeszcze poprawne i bezpieczne działanie systemu przekształcania energii elektrycznej. Jak wynika z wyprowadzonej zależności, efektywność zaproponowanej metody równoważenia napięć DC, podczas generacji mocy czynnej o wartości P_g , można poprawić poprzez zwiększenie wartości całkowitego napięcia zasilania (u_{dc}), a zatem zmniejszenie amplitudowego indeksu modulacji. Przykładowo, dla zdefiniowanego zakresu pracy falowników podłączonych do linii zasilającej ($m_{a SVM} \in \langle 0.70 : 0.95 \rangle$), wartość $\Delta P_{dc max} \in \langle 0.47 : 0.10 \rangle P_g$. Na podstawie wykonanych badań symulacyjnych, których rezultaty przedstawiono w rozdziale 5.3.3, udowodniono poprawność wyprowadzeń analitycznych i postawionych wniosków.

W rozdziale 6.1 przedstawiono opis analityczny obwodu falownika napięcia typu NPC podłączonego do trójfazowej linii zasilającej. Na tej podstawie zaproponowano układ sterowania, umożliwiający stabilizację przez falownik całkowitego napięcia zasilania (u_{dc}) na referencyjnym poziomie (u_{dc}^*) oraz generację zadanej wartości mocy czynnej. Zastosowany, zmodyfikowany modulator SVM umożliwił niezależną kontrolę napięć dzielnika pojemnościowego. W celu zapewnienia poprawnej pracy falownika, w rozdziale 6.2 zaprezentowano algorytm trójfazowej pętli synchronizacji fazowej, bazujący na zależnościach synchronicznego, wirującego układu odniesienia składowych dq (SRF-PLL). Wstępne ładowanie pojemności obwodu pośredniczącego napięcia stałego (C_{dc1}, C_{dc2}), przez przekształtnik DC-DC podwyższający napięcie, tuż przed podłączeniem falownika do trójfazowej linii zasilającej, było możliwe za pomocą zaproponowanego układu sterowania o zmiennej strukturze (jego schemat blokowy zamieszczono na rysunku 8). Rezultaty badań symulacyjnych całego zamodelowanego systemu fotowoltaicznego przedstawiono w rozdziale 6.4.

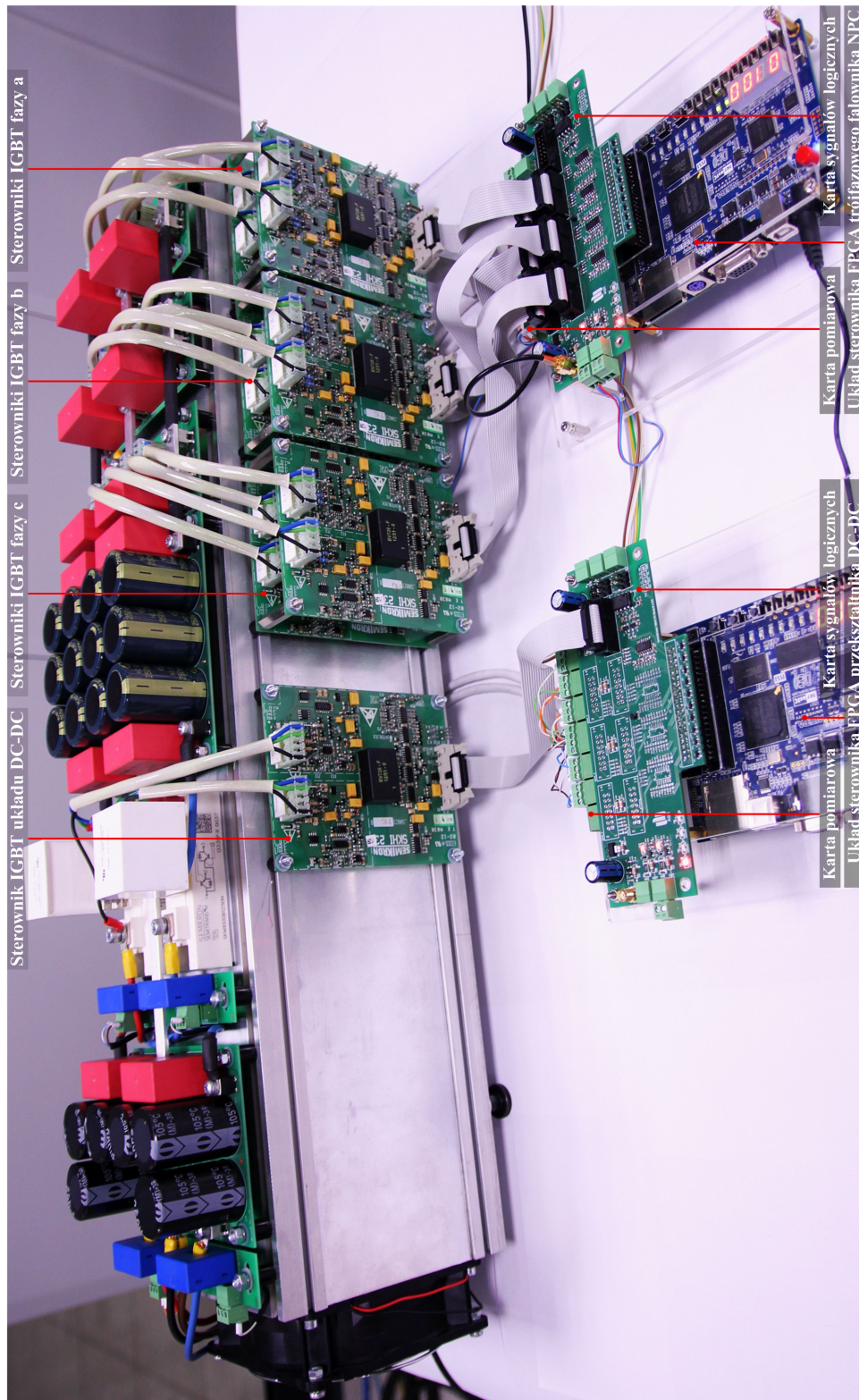
W celu sprawdzenia sposobu działania zaimplementowanych funkcji IC-MPPT oraz układów regulacji prądów i napięć przekształtników DC-DC, jak również falownika napięcia typu NPC, zaproponowano całą sekwencję zdarzeń. Otrzymane wyniki potwierdzają skuteczność algorytmów sterowania oraz metody równoważenia napięć dzielnika kondensatorowego za pomocą modulacji czasów trwania redundantnych wektorów napięcia.



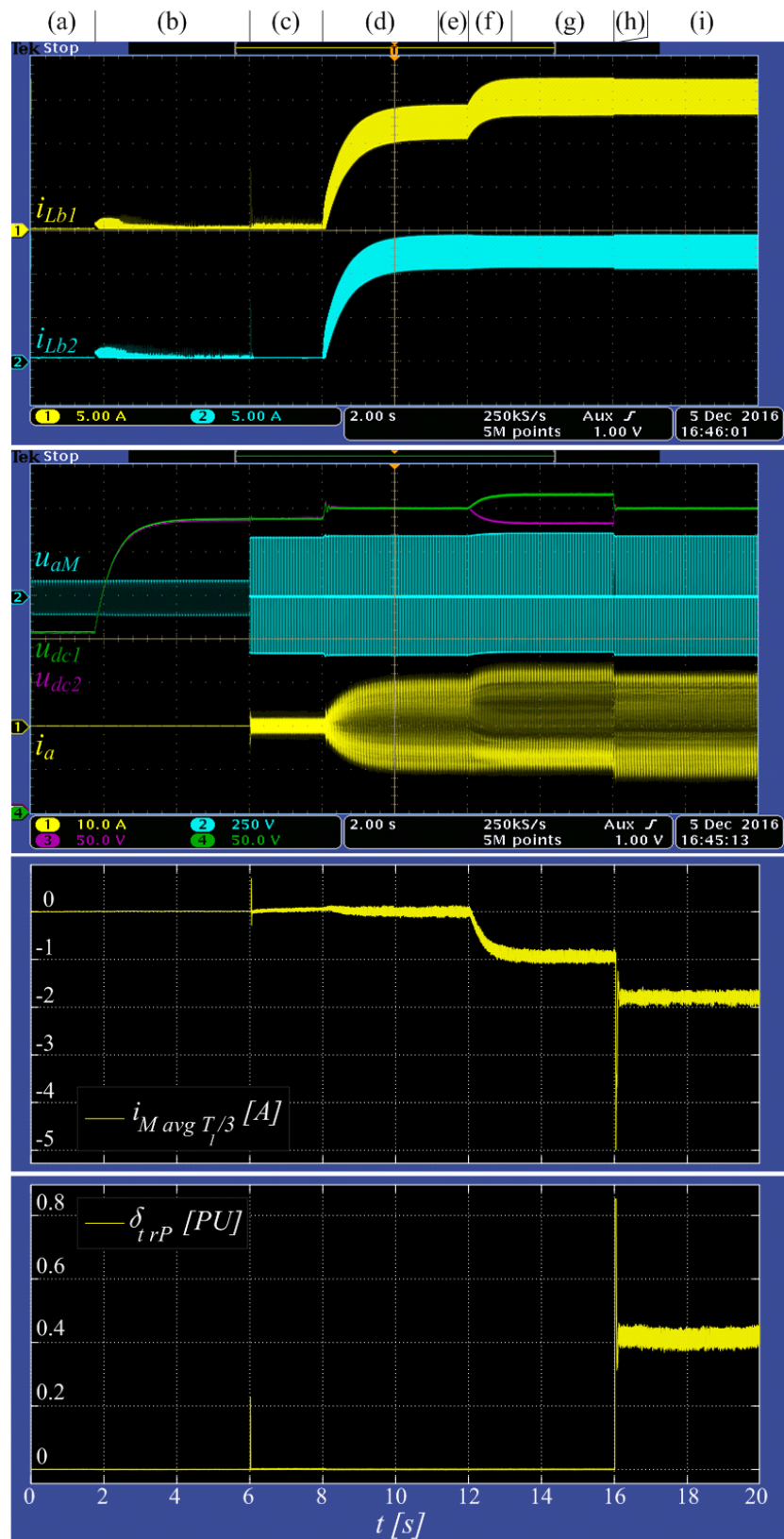
Rys. 8: Schemat blokowy algorytmu sterowania dwoma przekształtnikami DC-DC podwyższającymi napięcie

W ramach pracy doktorskiej zaprojektowane i wykonane zostało stanowisko laboratoryjne w postaci energoelektronicznego systemu przekształcania energii elektrycznej. Składał się on z dwóch przekształtników DC-DC podwyższających napięcie i zasilających osobne części dzielnika kondensatorowego, podłączonego do trójfazowego falownika napięcia typu NPC (rysunek 9). Schemat ogólny układu testowego, jak również jego szczegółowy opis przedstawiono w rozdziałach 7.1 – 7.4. Schematy elektroniczne oraz wykonane projekty obwodów drukowanych (PCB) zamieszczono w dodatku B. Opracowane i przetestowane symulacyjnie algorytmy sterowania przekształtnikami, zaimplementowane zostały w sterownikach wyposażonych w układy logiki programowalnej FPGA. W tym celu użyto języka opisu sprzętu VHDL. Badania laboratoryjne przeprowadzono przy użyciu zasilaczy napięć stałych zamiast rzeczywistych łańcuchów modułów. Takie podejście umożliwiło wykonanie serii testów w jednakowych, powtarzalnych i w pełni kontrolowanych warunkach. Zarówno wszystkie zadawane parametry pracy układów (za wyjątkiem funkcji MPPT) jak i zaprogramowana sekwencja zdarzeń, zostały możliwie najdokładniej dopasowane do tych stosowanych na etapie badań symulacyjnych. Analogicznie jak w przypadku badań symulacyjnych, podczas weryfikacji praktycznej algorytmu sterowania przekształtnikami DC-DC podwyższającym napięcie oraz metody równoważenia napięć dzielnika pojemnościowego za pomocą trójfazowego falownika napięcia typu NPC z dodatkową modulacją krótkich wektorów redundantnych, zrealizowano sekwencję 9 kolejno następujących po sobie etapów (rysunek 10):

- (a) stan ustalony przed rozpoczęciem pracy energoelektronicznego systemu przekształcania energii elektrycznej,



Rys. 9: Energoelektroniczny system przekształcania energii elektrycznej wyposażony w trójfazowy falownik napięcia typu NPC oraz symetryczny przekształtnik DC-DC podwyższający napięcie (widok od strony przedniej głównych jednostek obliczeniowych FPGA oraz układów sterowania tranzystorami IGBT)



Rys. 10: Wyniki pomiarów kompletnej sekwencji pracy energoelektronicznego systemu przekształcania energii elektrycznej podłączonego do trójfazowej linii zasilającej

- (b) ładowanie kondensatorów obwodu pośredniczącego (C_{dc1}, C_{dc2}) oraz stabilizacja napięcia całkowitego (u_{dc}) przez przekształtnik DC-DC, na poziomie referencyjnym (u_{dc}^*), przewyższającym wartość napięcia międzyfazowego linii zasilającej,
- (c) zamknięcie stycznika St_g i podłączenie falownika napięcia typu NPC do trójfazowej linii zasilającej,
- (d) przełączenie stanu pracy przekształtnika DC-DC na tryb realizacji zadawanej referencji prądu ($i_{Lb1}^* = i_{Lb2}^* = 12[A]$, odpowiednik działania algorytmu MPPT), oraz przejęcie funkcji stabilizacji napięcia DC (u_{dc}) na poziomie referencyjnym (u_{dc}^*) przez układ falownika,
- (e) osiągnięcie jednakowych wartości mocy pobieranych z obu źródeł ($P_{dc1} = P_{dc2} = 2.52[kW]$),
- (f) zwiększenie poziomu zadawanej referencji prądu jednego przekształtnika DC-DC ($i_{Lb1}^* = 15[A]$), a zatem mocy pobieranej z podłączonego do niego źródła napięcia stałego ($P_{dc1} = 3.15[kW]$),
- (g) działanie systemu przekształtnikowego w nowym punkcie pracy z niezrównoważeniem mocy maksymalnych ($P_{dc1} > P_{dc2}$), skutkującym niezbalansowaniem napięć dzielnika kondensatorowego ($u_{dc1} > u_{dc2}$),
- (h) załączenie algorytmu równoważenia napięć zasilających i powrót do stanu równowagi napięciowej ($u_{dc1} = u_{dc2}$) pomimo nadal występującego niezrównoważenia mocy pozyskiwanych ze źródeł ($P_{dc1} > P_{dc2}$),
- (i) stan pracy ustalonej z ustabilizowaną wartością modyfikacji czasów trwania krótkich wektorów redundantnych (δ_{trP}).

Jak zostało pokazane w rozdziale 7.5, podobnie jak w przypadku badań symulacyjnych, uzyskane rezultaty potwierdzają skuteczność działania zaproponowanej metody balansowania napięć zasilających falownik. W momencie osiągnięcia równowagi napięciowej, pomimo nadal występującego niezrównoważenia mocy ($\Delta P_{dc} \approx 680[W]$), znaczącej poprawie ulega jakość generowanego prądu fazowego (i_a) – następuje ponad 4-krotna redukcja współczynnika zawartości wyższych harmonicznych z poziomu 24.3[%] na 7.8[%]. Wartości zarejestrowanych sygnałów prądów oraz napięć, w stanie ustalonym dobrze odpowiadają przebiegom uzyskanym na podstawie badań symulacyjnych.

Wykonane badania symulacyjne oraz testy laboratoryjne pokazały duży potencjał opracowanego i wdrożonego algorytmu sterowania trójpoziomym falownikiem napięcia typu NPC, umożliwiającą równoważenie napięć zasilających falownik, za pomocą dodatkowej modulacji czasów załączeń krótkich wektorów redundantnych. Umożliwia on prawidłową i bezpieczną pracę systemu podczas szerokiego zakresu zmienności stanu niezrównoważenia mocy źródeł zasilania.

Opracowania teoretyczne oraz testy wdrożeniowe wskazały możliwy kierunek dalszych prac badawczych. Mógłby on polegać na zastosowaniu aktywnej metody sterowania wartością stabilizowanego przez układ falownika, napięcia całkowitego obwodu DC (u_{dc}), w celu zwiększenia efektywności metody równoważenia napięć dzielnika kondensatorowego, w sytuacji skrajnych poziomów niezbalansowania mocy źródeł. Niewątpliwie, także dużo informacji na temat skuteczności działania

wdrożonych algorytmów sterowania mogą przynieść długotrwałe testy układu przekształtnikowego, podłączonego do dwóch niezależnych łańcuchów modułów fotowoltaicznych.

Literatura

- [1] Kouro S., Wu B., Moya ., Villanueva E., Correa P., Rodríguez J., *Control of a cascaded h-bridge multilevel converter for grid connection of photovoltaic systems*, 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 3976–3982, 2009, ISSN 1553-572X, URL <http://dx.doi.org/10.1109/IECON.2009.5415332>.
- [2] PV Power Systems Technology Collaboration Programme, *Pvps annual report 2015*, 2016.
- [3] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, *Ren21. 2016. renewables 2016 global status report*, 2016.
- [4] Rodriguez J., Bernet S., Wu B., Pontt J.O., Kouro S., *Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 54(6), 2930–2945, 2007, ISSN 0278-0046, URL <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2007.907044>.
- [5] Rodriguez J., Franquelo L.G., Kouro S., Leon J.I., Portillo R.C., Prats M.M., Perez M.A., *Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications*, Proceedings of the IEEE, 97(11), 1786–1817, 2009, ISSN 0018-9219, URL <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2009.2030235>.
- [6] Stala R., Stawiarski L., Szarek M., *Single Phase Grid-connected PV System with Time-sharing Modulation and PI-type Regulators for DC-DC Boost Converter and Full-bridge Inverter*, 14-ta Międzynarodowa Konferencja Naukowa EPE-PEMC 2010. 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010. Ochryda, Republika Macedoni, 2010.
- [7] Stawiarski L., Szarek M., Penczek A., Mondzik A., *Jednofazowy system fotowoltaiczny o zmiennej strukturze sterowania, dołączany do linii elektroenergetycznej*, Przegląd Elektrotechniczny - Electrical Review, Stowarzyszenie Elektryków Polskich, ISSN 0033-2097, 89(2a), 34–39, 2013.
- [8] Szarek M., Baszyński M., Penczek A., Piróg S., Mondzik A., *Metody synchronizacji przekształtników energoelektronicznych z siecią zasilającą. Phase-Locked Loop for Grid-Connected Power Electronics Converters*, Przegląd Elektrotechniczny - Electrical Review, Stowarzyszenie Elektryków Polskich, ISSN 0033-2097, 86(2), 335–341, 2010.
- [9] Wang C., Li Y., *A survey on topologies of multilevel converters and study of two novel topologies*, Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International, 860 – 865, 2009, URL <http://dx.doi.org/10.1109/IPEMC.2009.5157505>.