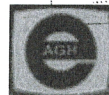




prof. dr hab. inż. Zbigniew HANZELKA
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica

Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30
tel.: (12) 617 28 78, fax: (12) 633 22 84, e-mail: hanzel@agh.edu.pl



WPLYNEŁO
dnia 6.03.2017
podpis Jmm

Kraków, luty 2017 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

wykonana na zlecenie dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH, Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH.

Autor: mgr inż. Miłosz Szarek

Tytuł: **Wielopoziomowy falownik napięcia z poziomowaniem diodowym (NPC) zasilany z wyodrębnionych alternatywnych źródeł energii pracujących przy różnych wartościach mocy maksymalnej (MPP)**

1. Dane bibliograficzne rozprawy

Rozprawa zawiera 221 stron. Składa się z ośmiu rozdziałów, dwóch załączników, spisu rysunków i tabel oraz spisu literatury obejmującego 159 pozycji.

2. Charakterystyka rozprawy

Spadek cen modułów PV oraz ciągły wzrost ich sprawności powoduje, że uruchamiane obecnie elektrownie słoneczne posiadają coraz większą zainstalowaną moc i z pewnością ten trend ma charakter trwały. Do przekształcania tak dużej mocy i energii stosowane są często wielopoziomowe falowniki umożliwiające wykorzystanie elementów półprzewodnikowych o zredukowanych napięciach (w relacji do układów dwupoziomowych), podłączone bezpośrednio do sieci SN, o zwiększonej sprawności, a w konsekwencji mniejszych stratach oraz kosztach inwestycyjnych i eksploatacyjnych. W tej grupie układów energoelektronicznych w aplikacjach przemysłowych dużą popularność zyskały trójpoziomowe falowniki z poziomowaniem diodowym (NPC, ang. *Neutral Point Clamped*). Konstrukcja takiego przekształtnika w zastosowaniu do fotowoltaicznego źródła energii jest przedmiotem rozważanej pracy. Uwzględniając ważność rozwoju energetyki odnawialnej i oczekiwania rynkowe w tym obszarze wybór tematu pracy należy uznać za wyjątkowo trafny.

Autor sformułował kilka ważnych celów badawczych:

CEL 1: Opracowanie modelu matematycznego modułów fotowoltaicznych dla badań symulacyjnych

Autor wyprowadził zależności opisujące sposób działania ogniwa fotowoltaicznego, umożliwiające implementację modelu symulacyjnego całego łańcucha modułów PV. Model został zastosowany do prezentacji wpływu zmiany natężenia promieniowania słonecznego oraz temperatury struktury półprzewodnikowej na rozkład charakterystyk prądowo-napięciowych modułów PV i wykorzystany podczas badań symulacyjnych kompletnego systemu fotowoltaicznego.

CEL 2: Wybór i aplikacja w sterowaniu przekształtników prądu stałego (DC-DC), podwyższających napięcie algorytmu poszukiwania punktu mocy maksymalnej.

Autor dokonał wyboru algorytmu bazującego na znaku konduktancji inkrementalnej (IC-MPPT).

CEL 3: Szczegółowa analiza topologii trójpoziomowego, trójfazowego falownika napięcia typu NPC

W efekcie przeprowadzonych analiz wyznaczono wszystkie możliwe do wygenerowania dyskretne wektory napięciowe, ze szczególnym zwróceniem uwagi na grupę redundantnych wektorów krótkich typu P i N. Autor przeprowadził analizę wpływu realizowanych wektorów napięcia trójfazowego na poziom napięć wejściowego dzielnika kondensatorowego zasilającego falownik. Rezultatem przeprowadzonych analiz jest implementacja algorytmu 7-segmentowej modulacji wektorowej. Przedstawiono wyniki badań symulujących prace tego algorytmu obejmujące także analizę widmową napięć wyjściowych falownika.

CEL 4: Analiza przyczyn oraz skutków nierównoważenia napięć dzielnika pojemnościowego oraz opracowanie metody jego eliminacji

Autor wyprowadził równania opisujące dyskretne wektory napięć falownika w zależności od stopnia nierównoważenia napięć dzielnika kondensatorowego. Przeanalizował skutki w postaci odkształcenia przebiegów napięć oraz prądów generowanych przez falownik. Zaproponował metodę równoważenia napięć wykorzystującą dodatkową modulację czasów trwania krótkich wektorów redundantnych występujących w danej sekwencji przełączeń.

W pracy podano zależność analityczną pozwalającą wyznaczyć maksymalne nierównoważenie mocy pobieranej przez falownik trójfazowy typu NPC, z każdej części wejściowego dzielnika kondensatorowego, które umożliwia jeszcze poprawne i bezpieczne działanie systemu. Zaprezentowane badania symulacyjne potwierdziły poprawność wyprowadzeń analitycznych i sformułowanych wniosków.

CEL 5: Analiza współpracy wielopoziomowego falownika napięcia typu NPC z trójfazową linią zasilającą

Z analizy współpracy z siecią zasilającą wyniknęła propozycja zastosowania zmiennej struktury układu sterowania przekształtnikami DC-DC podwyższającymi napięcie umożliwiającą stabilizację przez falownik całkowitego napięcia zasilania na poziomie referencyjnym oraz generację zadanej wartości mocy czynnej. Zmodyfikowany modulator umożliwia niezależną kontrolę napięć dzielnika pojemnościowego. W pracy przedstawiono zastosowanie algorytmu pętli synchronizacji fazy (SRF-PLL).

CEL 6: Badania symulacyjne całego systemu fotowoltaicznego w wybranych stanach pracy układu uznanych za istotne w jego eksploatacji

W celu sprawdzenia sposobu działania zaimplementowanych funkcji oraz układów regulacji prądów i napięć przekształtników DC-DC oraz falownika, zaproponowano sekwencję zdarzeń eksploatacyjnych układu. Otrzymane wyniki potwierdziły poprawność przeprowadzonych wcześniej analiz i zaproponowanych algorytmów sterowania.

CEL 7: Wykonanie laboratoryjnego modelu falownika i weryfikacja praktyczna rozważań teoretycznych i badań symulacyjnych

Autor bardzo szczegółowo opisał poszczególne komponenty zrealizowanego systemu energoelektronicznego przekształcania energii elektrycznej pozyskiwanej z modułów fotowoltaicznych, łącznie ze schematami elektronicznymi oraz projektami obwodów drukowanych. Przeprowadził testy laboratoryjne, które w pełni potwierdziły poprawność analiz i prawdziwość pracy układu.

Zalety pracy

1. Przedstawiona do oceny praca jest przykładem wzorcowym dysertacji doktorskiej. Jednoznacznie zdefiniowano obszar tematyczny badań, postawiono ambitne cele i w finale każdy z nich został osiągnięty w stopniu bardzo dobrym.

- Praca jest dowodem dobrego warsztatu badawczego, co jest szczególnie ważne w kontekście młodego wieku Autora. Jest to przykład zastosowania poprawnej metody badawczej, rozumianej jako ogół czynności i sposobów niezbędnych do rozwiązywania problemu naukowego. W tym łańcuchu działań zawarto: (1) przedstawienie problematyki i szczególnego tematu rozprawy w szerszej perspektywie, (2) prezentację stanu wiedzy, (3) rozważania teoretyczne, (4) badania symulacyjne, (5) badania laboratoryjne, (6) podsumowanie i wnioski końcowe.
- Na podkreślenie zasługuje bardzo dobre rozpoznanie literatury. W bibliografii wyszczególniono liczne i aktualne prace, w przypadku kilku z nich w gronie autorów pojawia się nazwisko Autora dysertacji.
- Praca ma charakter monograficzny. Jest cenną prezentacją istniejącego stanu wiedzy w obszarze zdefiniowanym tytułem. Wiedza ta jest przekazywana przez Autora, który zna praktyczne aspekty rozważanych zagadnień, co widać wyraźnie czytając tekst dysertacji. Równocześnie jest prezentowana w przystępny sposób, co nadaje pracy walor dydaktyczny.
- Na wyróżnienie zasługuje staranna postać graficzna pracy oraz fakt, że była realizowana w ramach grantu NCN.

Uwagi dyskusyjne i pytnia

- W pracy brak jednego bardzo ważnego aspektu rozważanego układu – odporności na zaburzenia pochodzące z sieci zasilającej. Autor przyjął idealny napięciowy model sieci z zerową impedancją wewnętrzną, co jest uproszczeniem rzeczywistości technicznej. Brak tych rozważań jest zrozumiały uwzględniając obszerność pracy, ale już w części dotyczącej dalszych badań sugeruję włączenie tej problematyki. W związku z tym prośba o przedstawienie podczas obrony wpływu na zaproponowany układ takich zaburzeń jak asymetria i wahania napięcia, zapady, wzrosty napięcia, krótkie przerwy w zasilaniu, zmiany fazy, częstotliwości. Czy te zaburzenia będą wymagały modyfikacji sterowania?
- Kilkakrotnie w pracy podkreślono redukcję pochodnej napięcia wyjściowego przekształtnika du/dt uzyskiwaną jako efekt stosowania przekształtników wielopoziomowych: „Charakteryzują się one również zmniejszoną wartością pochodnej napięcia wyjściowego (du_{abc}/dt), redukując tym samym jego współczynnik THD, a zatem udział harmonicznych niskiego rzędu.” (str. 55, pierwszy akapit). W sensie jakościowym to stwierdzenie nie budzi wątpliwości. Jaki jest wymiar liczbowy (redukcja THD)?
- Dodatek A zawiera treści oczywiste, książkowe. Praca jest adresowana do czytelnika o pewnym poziomie wiedzy z dziedziny będącej przedmiotem pracy.
- W rozważaniach dotyczących analizy widmowej prądu wyjściowego falownika Autor stosuje współczynnik odkształcenia THD wyliczany na podstawie wartości harmonicznych (w jakim paśmie częstotliwości?). Równocześnie na zaprezentowanych charakterystykach widać rozmycie widma. Właściwszym byłoby więc zastosowanie definicji współczynnika THD opartej na wartości skutecznej i wartości podstawowej harmonicznej.
- Brak spisu oznaczeń i symboli.

Ocena ogólna i wnioski końcowe

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Miłosa Szarka stanowi bardzo dobre opracowanie dotyczące ciekawego i aktualnego zagadnienia naukowo-technicznego i dowodzi zadawalającego opanowania przez Doktoranta dyscyplin naukowych, z którymi jest związana.

Przedłożona rozprawa spełnia wymagania stawiane przez Ustawę z 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (dz. U. nr 65) oraz rozporządzenie Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 r. w sprawie

szczegółowego trybu przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim i habilitacyjnym.
Wnioskuje o przystąpienie do kolejnych przewidzianych w/w Ustawie etapów procedury.

ZAŁĄCZNIK: Uwagi szczegółowe

Rozdział 1: Wprowadzenie

Przywoływane w tekście pracy dane dotyczące udziału paliw kopalnych w światowym bilansie energetycznym na podstawie publikacji z 2007 roku (pozycja [55] w spisie literatury), czy 1997 (pozycja [23]) są mocno „nieświeże”.

Str. 13, trzeci akapit – „... charakteryzuje się wysoką modułością ...” – niezręczne sformułowanie

Rozdział 2: Energia słoneczna

Str. 20, Symbolem E oznaczono zarówno „poziom rzeczywistego nasłonecznienia” jak i „energię na jednostkę powierzchni”

Str. 22, Ceny w dolarach/W - nie podano źródła tych informacji cenowych.

Str. 30, Algorytm poszukiwania punktu mocy maksymalnej bazujący na metodzie konduktancji inkrementalnej – autor nie przytacza bardzo bogatej literatury dotyczącej tego algorytmu.

Rozdział 3: Wielopoziomowy, trójfazowy falownik napięcia z poziomowaniem diodowym

Str.38 i 39, rys. 3.4 i 3.5 kierunki prądu i_k na obydwu rysunkach powinny być różne

Str. 43, wzór (3.9), brak objaśnienia symbolu Tsw

Str. 44, rozdział 3.4, pierwszy akapit „... które scharakteryzowano w dodatku A4.”

Str. 45, „... podłączenie wyjścia każdej nogi fazowej ...” – niezręczne sformułowanie

Rozdział 4: Metody modulacji stosowane w wielopoziomowych, trójfazowych falownikach napięcia typu NPC

Str. 54, SHE -..., „... pogorszenia wskaźników jakości generowanej energii elektrycznej”. Raczej wskaźniki zasilania, dostawy energii, napięcia.

Str. 59, rozdział 4.2.2., akapit poniżej zależności 4.1; „Innymi słowy, koniec wektora referencyjnego powinien znajdować się wewnątrz lub na okręgu o promieniu równym $3/3udc$, zaznaczonym linią przerywaną na rysunku 3.10 oraz 4.3.” Okręgu nie ma na rys. 3.10.

Str. 69, Tabela 4.1 i Tabele 4.2 i 4.3, dlaczego przedziały czasowe $t_1 - t_{11}$ raz są pisane małą, a raz dużą literą?

Str. 70, brak przywołania w tekście rysunku 4.7, podobnie rys. 4.8?

Str. 87, pierwszy akapit, „Harmoniczna ta nie występuje w napięciu międzyfazowym, a jedynie jej wartości pochodne ($U_{ab} 160\pm 1, U_{ab} 160\pm 2, \dots$). ????”

Brak informacji o parametrach zastosowanych filtrów LPF, o parametrach analizy FFT.

rys. 4.17, Lepszą prezentacją widma, uwzględniając jego rozmycie (czy spowodowane) byłoby wyznaczenie wartości grup harmonicznyc

Nad rys. 4.17 – powszechnie przyjmowanym terminem jest rząd harmonicznyc, nie indeks harmonicznyc.

Rys. 4.20, przebiegi prądu w poszczególnych półokresach są różne, co jest tego przyczyną?

Str. 88, ostatni akapit, „W wyznaczonym widmie częstotliwościowym napięć wyjściowych falownika (rysunek 4.17) można zauważyć wiele wyróżniających się harmonicznymi parzystych jak i nieparzystych.” Trudno coś takiego zauważyć.

Rozdział 5: Niezrównoważenie napięć dzielnika pojemnościowego oraz jego wpływ na działanie trójfazowego falownika napięcia typu NPC

Str. 91, pierwszy akapit – „... dynamicznych źródeł napięciowych (schemat 4.5).” - ????

Ostatni akapit – „... decyduje o stabilności kondensatora jako źródła napięcia ...” - ???

Str. 93, pierwszy akapit, ostatnie zdanie – „Z problem niezbalansowania napięć dzielnika pojemnościowego można występować zarówno w aplikacjach małych oraz dużych mocy.” - styl „Na podstawie informacji zawartych w rozdziale 3.4 wynika, że ...” – styl

Str. 94, wzór (5.5) – czy postać tej zależności jest poprawna?

Rys. 5.4 –Może warto było powiększyć początek widma tak, aby widoczne było to, o czym Autor pisze w pierwszym akapicie na stronie 100 – „Pojawiają się też kolejne prążki o indeksach parzystych – czwarty oraz szósty.”

Podobnie warto było zrobić w odniesieniu do początków widm na rysunku 5.5 i wówczas nie budziłoby wątpliwości stwierdzenie na końcu strony 100 – „Można zauważyć, że w przypadku niezrównoważenia napięć zasilających falownik NPC, w napięciu fazowym pojawiają się dodatkowe harmoniczne parzyste niskich rzędów ($U_{om\ 2,4,6}$) o znaczących wartościach, łącznie ze składową stałą ($U_{om\ 0}$).

Str. 102, nad tytułem rozdziału 5.3. także winnych miejscach w tekście – czy można „generować prąd”?

Rozdział 6: Współpraca wielopoziomowego falownika napięcia typu NPC z trójfazową linią zasilającą

Str. 126, równanie 6.1 jest słuszne przy założeniu idealnego źródła napięcia AC. W rzeczywistości, przy mocy falowników rozważanych w pracy (średnie i duże moce) zmiana tego napięcia może mieć wpływ na pracę przekształtnika. Jaki wpływ?

Str. 127, akapit po zależnością (6.8). „Uwzględniając zależność 6.8 w równaniu 6.5 ...”.

Str. 128, ostatni akapit, „W idealnych warunkach i przy odpowiednio dobrej wartości współczynnika wzmocnienia członu proporcjonalnego (KP), część całkująca mogłaby zostać pominięta. Jednak, ze względu na istnienie czynników wymienionych w poprzednim akapicie ...”. Zbyteczny komentarz, to podstawy teorii sterowania i rozróżnienie dwóch uchybów statycznego i dynamicznego oraz wpływu parametrów regulatora PI.

Str.131, ostatni akapit, „Dodatkowe, dynamiczne zmiany częstotliwości oraz kąta fazowego napięć przemiennych mogą zachodzić w sytuacji nagłego załączenia znaczących obciążeń sieciowych ...” Zmiany fazy tak, nie zmiany częstotliwości w sieci publicznej jako skutek stanu ładowania.

Str. 134, akapit pod zależnością (6.24). „Poprzez analizę znaku oraz wartości składowej d wektora napięcia mierzonego (u_{gd}) wprowadza ona dodatkowy uchyb regulacji (u_{gq}) wymuszając tym samym prawidłowe działanie algorytmu PLL”. O jaki „dodatkowy uchyb regulacji” tu chodzi?

Str. 134. Pierwszy akapit rozdziału 6.3 – „... połączone w topologię symetryczną”. Niezręczne sformułowanie.

Rozdział 6: Projekt i realizacja laboratoryjnego przekształtnika energoelektronicznego oraz weryfikacja przeprowadzonych badań

Str. 168, ostatni akapit, „Powstałe odkształcenie skutkuje pojawieniem się wyraźnych harmoniczných ...”. Szkoda, że nie powiększono wybranych zakresów widma, wówczas łatwiej można byłoby zauważyć, to o czym Autor pisze.

Dodatek A:

Str. 177, rys. A.3, podpis pod rysunkiem, „Realizacja chwilowych wartości napięcia ...” – niezręczne sformułowania

Str. 179, akapit pod zależnością (A.11), „...Dodatkowo, przekształcenie to zachowuje zgodność chwilowych wartości przebiegów przed i po transformacji, ...)????

A handwritten signature in cursive script, reading 'Flamec', is positioned in the right-center of the page. The signature is written in dark ink and is the only handwritten element on the page.