

prof. dr hab. inż. Ryszard Strzelecki



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

pt. „Topologie i metody sterowania falownika prądu z obwodem impedancyjnym ”

autorstwa

mgr inż. Piotra Jakuba Majtczaka

wykonana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 23.03.2022 r.

1. UMIEJSCOWIENIE, AKTUALNOŚĆ, TEZA, CEL I ZAKRES ROZPRAWY

Wzrastająca lawinowo liczba różnych aplikacji układów energoelektronicznych w systemach elektroenergetycznych (np. przyłączenie OZE do sieci nn, przyłączenie magazynów energii, ładowarki EV) sprawia, że szeroka tematyka przekształtników dwukierunkowych do sprzęgania sieci nn jest bardzo aktualna i silnie eksponowana w publikacjach specjalistycznych. Wśród różnych aspektów tej tematyki szczególne znaczenie mają zagadnienia związane z wyborem topologii, sterowaniem, różnymi modyfikacjami układowymi i zastosowaniem odpowiedniej bazy elementowej, w tym ostatnio półprzewodnikowych łączników szerokopasmowych. W tym kontekście, poszukiwania nowych i doskonalenie istniejących rozwiązań poprzez zastosowanie oryginalnych topologii i syntezę właściwych im algorytmów sterowania gwarantujących wymagane właściwości, stanowią bardzo istotny obszar rozwoju energoelektroniki w kierunku zwiększenia efektywności zastosowania w systemach elektroenergetycznych o potencjale „Smart Grid”. Tej aktualnej problematyki dotyczy również recenzowana rozprawa doktorska, w której autor udowodnił tezę, że „Możliwe jest sterowanie mocą sieciowego falownika prądu z obwodem quasi-impedancyjnym przy dużej częstotliwości przełączeń tranzystorów oraz zachowaniu wysokiej jakości przekształcanej energii. Dowód tej tezy Autor przeprowadził poprzez realizację celu i zadań szczegółowych rozprawy przedstawionych w podrozdziale 1.2 (s.21).

Sformułowany i następnie zrealizowany przez Autora cel rozprawy uważam za ważny zarówno ze względów poznawczych jak i aplikacyjnych.

Rozprawa licząca aż 230 stron zawiera zawiera 6 rozdziałów łącznie ze wstępem (rozdział 1) i podsumowaniem rozprawy (rozdział 6), a także (numerowane jak rozdziały): dodatek, bibliografię zawierającą 152 pozycje, spis 128 rysunków oraz spis 12 tabel. Ponadto, po bibliografii a przed spisem rysunków zamieszczono wykaz oznaczeń nie wyszczególniony w spisie treści. We wstępie autor umiejscowił rozważany problem w kontekście aktualnego stanu wiedzy, sformułował tezę oraz określił cel ogólny i cele szczegółowe rozprawy. W rozdziale 2 omówiono oryginalną topologię falownika prądu z obwodem qZ oraz jej modyfikację poprawiającą właściwości aplikacyjne. Przeprowadzono analizę tych topologii pod kątem dwukierunkowej pracy z siecią zasilającą, uzasadniającą wybór układu do badań szczegółowych. W rozdziale 3 zaprezentowano modele analityczne przekształtnika opracowane z zastosowaniem metody uśredniania zmiennych stanu (modele statyczne) oraz małych przyrostów (modele dynamiczne). Wyniki modelowania analitycznego porównano z otrzymanymi symulacyjnie. Na podstawie opracowanych modeli w rozdziale 4 przeprowadzono syntezę algorytmu i układu sterowania w dwóch wariantach: a) sterowania prądem, b) sterowania mocą. Rezul-

taty syntezy sterowania zostały przy tym zweryfikowane symulacyjnie. Natomiast w rozdziale 5 zawarto kompleksowe wyniki badań eksperymentalnego modelu laboratoryjnego zmodyfikowanego przekształtnika prądowego typu qZ, stanowiące pewne „clou” rozprawy, weryfikujące otrzymane rezultaty teoretyczne w praktyce. Z kolei dodatek zawiera opis zaprojektowanego mikroprocesorowego układu sterowania oraz zbyteczny (zdaniem recenzenta) materiał teoretyczny znany z ogólnie dostępnej literatury.

Całą rozprawę można podsumować jako ciekawą i wartościową próbę całościowego podejścia do projektowania i doboru nastaw układu regulacji oraz kształtowania procesów przejściowych w prądowym przekształtniku qZ z możliwością dwukierunkowego przesyłu energii.

2. OCENA OGÓLNA ROZPRAWY

Rozprawa zawiera wartościowe wyniki badań teoretycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych układów przekształtników z obwodem quasi-impedancyjnym działających zarówno w trybie falownika jak i prostownika sieciowego. Te wyniki obejmują w szczególności analizę statyczną i dynamiczną, oraz weryfikację symulacyjną i eksperymentalną rozpatrywanych modyfikacji przekształtników z syntezowanymi algorytmu sterowania. Do jej najważniejszych rezultatów oraz istotnych osiągnięć jej autora zaliczam przy tym:

- Przeprowadzenie analizy topologii przekształtnika prądu z obwodem qZ, pracującego w trybie falownikowym oraz trybie prostownikowym, w tym analizy poszczególnych stanów oraz sposobów realizacji łączników.
- Opracowanie i analizę metod PWM dla przekształtnika prądu z obwodem qZ pod kątem sprawności, a także opracowanie szczegółowego modelu symulacyjnego z uwzględnieniem zastosowanej metody PWM, sekwencji łączy oraz modeli łączników SiC.
- Opracowanie i przeprowadzenie badań analitycznych oraz wszechstronną weryfikację symulacyjną małosygnałowego modelu przekształtnika prądu z obwodem qZ.
- Przeprowadzenie dogłębnego porównania właściwości i parametrów oryginalnej topologii przekształtnika prądu z obwodem qZ z topologią zmodyfikowaną
- Syntezę algorytmów sterowania przekształtnika prądu z obwodem qZ w trybach pracy falownikowej i prostownikowej, w stacjonarnym i wirującym układach współrzędnych, oraz ich weryfikację poprzez badania symulacyjne.
- Opracowanie prototypowego procesorowego układu pomiarowo-sterującego wraz z implementacją algorytmów sterowania na platformie mikroprocesorowej oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych modelu laboratoryjnego falownika prądu z obwodem qZ w trybach pracy falownikowej i prostownikowej potwierdzających wyniki teoretyczno-symulacyjne i skuteczność zaproponowanych rozwiązań.

Mimo wysokiej oceny merytorycznej, należy też zaznaczyć, że rozprawa gdzieś jest zbyt drobiazgowa. Niektóre fragmenty, bez szkody dla treści i zrozumienia można byłoby pominąć lub skrócić. W mniejszym stopniu dotyczy to rozdziału 5, który przeciwnie zyskałby na przedstawieniu większej liczby wyników badań eksperymentalnych, w tym odpowiednich charakterystyk wyznaczonych na podstawie pomiarów. Te drobne zastrzeżenia, łącznie z uwagami krytycznymi przedstawionymi w kolejnym punkcie recenzji, w żaden sposób nie deprecjonują jednak wartości naukowej rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Jakuba Majtczaka, wnoszącej cenny wkład w rozwój teorii i praktyki współczesnej energoelektroniki.

Podsumowując stwierdzam, że przyjęte przez doktoranta teza rozprawy została całkowicie potwierdzona, a wynikające z niej cel ogólny i cele szczegółowe w pełni zrealizowane. Uzasadnione są również wnioski z badań. Autor wykazał się przy tym dogłębną znajomością problematyki. Rozprawa zredagowana w sposób dojrzały zawiera istotne i znaczące wyniki badań oraz osiągnięcia aplikacyjne uzyskane właściwymi metodami i narzędziami badawczymi.

3. UWAGI KRYTYCZNE

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Piotra Jakuba Majtczaka pt. „Topologie i metody sterowania falownika prądu z obwodem impedancyjnym”, oprócz ogólnych zastrzeżeń wskazanych wyżej, nasuwają się następujące uwagi krytyczne:

Zasadnicze uwagi merytoryczne

1. Na podstawie zaprezentowanych wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych trudno ocenić właściwości i funkcjonalność badanego przekształtnik w całym możliwym zakresie pracy. Przedstawione rezultaty dotyczą tylko konkretnych sytuacji, które nie powinno się generalizować. Przede wszystkim brakuje charakterystyk opisujących właściwości układu w funkcji zmian parametrów. Do tych charakterystyk zaliczyłbym przede wszystkim zmiany: a) współczynnika odkształcenia prądu sieciowego w funkcji napięcia U_{DC} dla różnych mocy pobieranych/oddawanych z/do sieci; b) sprawności przekształtnika przy pracy w trybie prostownika oraz falownika w funkcji napięcia U_{DC} i mocy pobieranej/oddawanej z/do sieci.
2. Nieprzekonywujące jest wyjaśnienie oscylacji prądu sieci pokazane na rys.97. Dodanie indukcyjności autotransformatora i transformatora separującego zmniejsza częstotliwość rezonansową obwodu $C-L$, co ułatwia jego aktywne tłumienie. Interesujący jest przy tym fakt, że oscylacje występują w przedziałach o szerokości ok. 60° na dodatnich szczytach prądów fazowych
3. W tablicy 5 przedstawione wyniki symulacji strat w elementach półprzewodnikowych przy pracy falownikowej i częstotliwości PWM 100 kHz oraz pracy prostownikowej i częstotliwości PWM 250 kHz. Należałoby przy tym ocenić w jakim stopniu zwiększenie strat przy pracy prostownikowej jest związane z większą częstotliwością PWM.
4. Jak można zauważyć z obserwacji przebiegów pokazanych na rys.17, częstotliwość pulsacji/oscyłacji w.cz. prądu nie przekracza raczej 10 kHz (warto byłoby przedstawić widmo). W tym kontekście recenzent nie jest przekonany co do zasadności zwiększenia częstotliwości PWM z 100 kHz (przy pracy falownikowej) do 250 kHz (przy pracy prostownikowej). Nierozpatrzone zostało przy tym także wpływy częstotliwości przetwarzania/sterowania 50 kHz, tj. 5/2 razy mniejszej niż częstotliwości PWM przy pracy prostownikowej/falownikowej, mającej istotne znaczenie dla procesów dynamicznych.
5. Na wstępie podrozdziału 5.2 autor stwierdza, że przyjęty algorytm sterowania został opisany w paragrafie 4.2.3, tj. na rys.75. Dlaczego w takim razie, jako schemat zastosowanego algorytmu sterowania autor wskazuje rys.87? Schemat na tym rysunku różni się od schematu na rys.75 zastosowaniem regulatora wielorezonansowego oraz regulatora prądu indukcyjności obwodu q-impedancyjnego. Podobny (bez regulatora wielorezonansowego) jest również schemat przedstawiony na rys. 84. Wskazanym byłoby więc eksperymentalne porównanie rezultatów otrzymanych w przypadku zastosowania każdego z tych 3 algorytmów, np. poprzez wyłączenie odpowiednich fragmentów oprogramowania sterownika mikroprocesorowego.
6. Zgodnie z twierdzeniem o wartości końcowej funkcji $f(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} [sF(s)]$ wartość końcową $y(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t)$ odpowiedzi układu o transmitancji $G(s)$ na skok jednostkowy $1(t) \rightarrow 1/s$ można wyznaczyć jako granicę $y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} [sG(s)/s]$. Stąd też odpowiedź układów opisanych transmitancjami (3.3.11-12) na skok $1(t)$ powinna dążyć do wartości ustalonej $1,224 \cdot 10^{11} / 4,245 \cdot 10^{12} = 28,8 \cdot 10^{-3}$. Stąd niejasna jest wartość końcowa odpowiedzi pokazana na rys. 43, ok. 2 razy mniejsza. Takiego samego wyjaśnienia wymaga także wartość końcowa odpowiedzi na skok jednostkowy pokazana na rys.44 (również 2 razy mniejsza niż wynikająca z transmitancji (3.3.14-15)). Wyjaśnienia wymaga również fakt, że błąd charakterystyk amplitudowych (rys.43-44) otrzymanych na podstawie modelu matematycznego i na podstawie symulacji przejawia się przede wszystkim na niskich częstotliwościach.

7. Niejasna jest przyczyna nieznacznych różnic między przebiegami i_{DC} , i_L oraz u_C przedstawionymi na rys.48 i rys.50, uzyskanymi na podstawie modeli ciągłych badanego przekształtnika odpowiednio w układach współrzędnych d-q (rys.47) oraz α - β (rys.49)
8. Brakuje wynikowego porównania badanego prądowego qZ przekształtnika z innymi przekształtnikami DC/AC z możliwością boost-buck i potencjalnie zbieżnym obszarem aplikacyjnym. W szczególności celemowym wydawałoby się przybliżenie wszystkich 6 topologii qZ-falowników przedstawionych w [10] pod kątem możliwości pracy prostownikowej.
9. Dla pełniejszej oceny badanego przekształtnika wskazane byłoby przedstawienie przebiegów dynamicznych przy przejściu od pracy falownikowej do prostownikowej i na odwrót w przypadku zasilania DC z baterii akumulatorowej i dołączenia strony AC do sieci 3-fazowej
10. Wydaje się, że zastosowanie badanego układu prądowego qZ przekształtnika to przede wszystkim rząd mocy parę/parenaście kW. Dla takich mocy przeważają sieci trójfazowe TN (czasami jeszcze IT) . W związku z powyższym powstaje pytanie, czy i ewentualnie w jaki sposób autor zamierza dostosować badany układ do pracy z siecią czteroprzewodową.

Uwagi szczegółowe (wybrane)

1. Ze względu na liczne stosowane wzory matematyczne, skróty, oznaczenia, oraz charakter tekstu wykaz oznaczeń powinien zostać umiejscowiony na początku rozprawy i wyszczególniony w spisie treści. Wykaz oznaczeń nie wskazany w spisie literatury i umieszczony dopiero na końcu rozprawy (pomiędzy bibliografią a spisem rysunków) jest nieprzydatny w procesie studiowania materiału.
2. Rozprawa została napisana bardzo rozwlekle, jeśli złośliwie nie powiedzieć „w stylu grafomańskim” i „beletrystycznie”. Niektóre fragmenty (w szczególności zawierające wiedzę znaną z ogólnie dostępnej literatury) bez uszczerbku dla zrozumienia treści i przekazu nowych rezultatów można było pominąć.
3. Niedopuszczalne jest stwierdzenie autora na str 121, że „teora mocy chwilowej wyraża się wzorem”. Zdaniem recenzenta należało stwierdzić, że „moc chwilową można wyznaczyć ze wzoru”
4. Schematy blokowe zewnętrznych pętli sterowania przedstawione na rys. 64 i rys.67 są identyczne, mimo że dotyczą innych regulatorów - prądu i_{DC} (rys.64) oraz napięcia u_{DC} (rys.67) . Najprawdopodobniej jest to błąd edycyjny – proszę o wyjaśnienie.
5. Niezbyt jasny jest sposób otrzymania transmitancji wyrażonych wzorami (3.3.11) i (3.3.12). Jeśli transmitancje wyznaczono na podstawie przebiegów symulacyjnych, to należałoby wskazać sposób wyznaczania. Natomiast, jeśli transmitancje wyznaczono analitycznie, to należałoby wyjaśnić drobną różnicę współczynników operatorów „s” w licznikach tych transmitancji.
6. W równaniu (3.4.16), po lewej stronie, zamiast wielkości i_d , i_q , i_L , i_{DC} powinny występować ich pochodne. Najprawdopodobniej jest to wynik pośpiesznej edycji.
7. Na str. 163 autor stwierdza, że w trakcie badań prototypu kompensacja drgań filtra sieciowego LC okazała się niepotrzebna. Zdaniem recenzenta ten fakt można było przewidzieć ze względu na straty dławika przy 100 kHz i 250kHz, poprzez uwzględnienie jego dobroci.
8. W rozdziale 5 brakuje pomiarów dokonanych analizatorem mocy w przypadku pracy falownikowej (§.1.1.1), porównywalnych do pomiarów przedstawionych na rys.93 dla pracy prostownikowej. W rozprawie nie znalazłem również żadnych innych eksperymentalnych wyników pomiaru sprawności dla pracy falownikowej, co stanowiłoby praktyczne potwierdzenie rezultatów symulacji (tab. 5) .
9. Całkowicie zbyteczna wydaje się tab. 12 przedstawiona na str 200 zawierająca powszechnie znane wzory wiążące transformaty Laplace’a i Z.

10. Większą część materiału przedstawioną w dodatku (rozdział 7) uważam za zbędną. W szczególności dotyczy to podrozdziałów 7.2 i 7.3. Duże zastrzeżenia mam także do podrozdziału 7.1 którego zawartość odbiega od tradycyjnie rozumianego dodatku. Mam przy tym zastrzeżenia co do zasadności numerowania Dodatku, Bibliografii, Spisu rysunków i Spisu tabel jako kolejnych rozdziałów rozprawy.
11. W rozprawie zauważono również inne drobne potknięcia natury edycyjnej, stylistycznej i językowej, na tyle jednak nieistotne i niewpływające na zrozumienie i ocenę pracy, że ich wyszczególnienie jest zbędne.

WNIOSEK KOŃCOWY

- 1) Doktorant wykazał się dużą wiedzą i bardzo dobrym przygotowaniem merytorycznym do pracy badawczej oraz odpowiednimi umiejętnościami analitycznymi i eksperymentalnymi.
- 2) Rozprawa charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym i należyтым poziomem edytorskim.
- 3) Uzyskane i zweryfikowane eksperymentalnie wyniki rozprawy mają dużą wartość poznawczą i praktyczną, oraz stanowią pewnego rodzaju inspirację do dalszych badań.
- 4) Uwagi krytyczne wyszczególnione w recenzji, częściowo dyskusyjne, nie ujmują i nie podważają w niczym wyniku i pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Uważam, że rozprawa doktorska magistra inżyniera Piotra Jakuba Majtczaka pt. „Topologie i metody sterowania falownika prądu z obwodem impedancyjnym” spełnia kryteria i wymagania stawiane w obowiązującej Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami), w związku z czym wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Uwzględniając wkład doktoranta, skalę oryginalności oraz zakres i poziom merytoryczny przeprowadzonych badań skłaniałbym się do wyróżnienia rozprawy. Od jednoznacznego stwierdzenia wstrzymuje mnie jednak sposób przedstawienia materiału, w tym duża nadmiarowość informacji oraz błędy edycyjne. Z tego względu, jeśli umożliwia to procedura, złożenie wniosku o wyróżnienie rozważę po uwzględnieniu przebiegu obrony rozprawy.