

Dr hab. inż. Paweł Szcześniak

Zielona Góra, 22.07.2019

Uniwersytet Zielonogórski

Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki

Instytut Inżynierii Elektrycznej

ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra

WPŁYNEŁO  
23 LIP. 2019

dn.....

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA  
RADY WYDZIAŁU ELEKTRYCZNEGO POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Tytuł rozprawy w języku angielskim:

**Research on finite control-states set model predictive control of four-leg three-level flying capacitors converter for shunt active power filter**

Tytuł rozprawy w języku polskim:

**Badania algorytmu sterowania predykcyjnego wykorzystującego model o ograniczonej liczbie stanów dla czterogałęziowego trójpoziomowego równoległego filtra aktywnego**

Autor rozprawy:

**mgr inż. Kamil Nowiński-Antoniewicz**

**1. Tematyka rozprawy doktorskiej**

Rozprawa została przygotowana pod kierownictwem dr hab. inż. Mariusza Malinowskiego, prof. uczelni i jest napisana w języku angielskim.

W pracy zaprezentowano nowe zastosowanie sterowania predykcyjnego, wykorzystujące model o ograniczonej liczbie stanów do sterowania trójpoziomym, czterogałęziowym przekształtnikiem z kondensatorami o zmiennym potencjale pracującym w układzie równoległego energetycznego filtra aktywnego. Układy trójfazowe czteroprzewodowe są stosowane w niskonapięciowych układach zasilania. Do sieci trójfazowej czteroprzewodowej oprócz odbiorników trójfazowych mogą być dołączone odbiorniki jednofazowe, które w przypadku ich dużej liczby oraz nierównomiernego obciążenia poszczególnych faz przyczyniają się do nadmiernej

wartości prądu w przewodzie neutralnym oraz niesymetrii obciążenia. Ponadto mogą one generować wyższe harmoniczne prądu oraz pobierać moc bierną. Eliminacja prądu w przewodzie neutralnym jest w tym przypadku zadaniem priorytetowym, a dodatkowo należy kompensować wyższe harmoniczne prądu oraz moc bierną. Wszystkie te czynności możliwe są do wykonania za pomocą równoległego energetycznego filtra aktywnego, w których jako element kształtujący prądy kompensacyjne mogą być wykorzystane przekształtniki wielopoziomowe. Jedną z powszechnie stosowanych struktur wielopoziomowych jest przekształtnik z kondensatorami o zmiennym potencjale (z ang. flying capacitor converter - FCC). Charakteryzuje się on bardziej równomiernym rozkładem strat mocy związanych z przełączaniem tranzystorów w stosunku do pozostałych wielopoziomowych przekształtników typu NPC oraz kaskadowych. Dodatkową trudnością w strukturze przekształtnika z FCC jest kontrola napięć na kondensatorach w poszczególnych gałęziach przekształtnika. Do wyznaczania sygnałów kompensacyjnych stosowane jest wiele algorytmów. W pracy doktorant porównał klasyczną metodę teorii mocy chwilowej z modulatorem histerezowym oraz zaproponowaną metodę predykcyjną. Metoda predykcyjna umożliwia optymalizację różnych parametrów procesu modulacji jak i parametrów sygnałów kształtowanych. Warto zauważyć, że metody predykcyjne w ostatnich latach są implementowane w coraz to większej liczbie rozwiązań technicznych, uzyskując bardzo dobre rezultaty w porównaniu do klasycznych metod sterowania. Rozważane w niniejszej rozprawie doktorskiej zagadnienia dotyczą wielu ważnych technicznie problemów i są realizowane z wykorzystaniem nowatorskich metod naukowych. Dlatego wybór tematyki rozprawy uważam za oryginalny i aktualny, a podjęcie badań w tym temacie z wykorzystaniem przyjętych metod za zasadne.

## **2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej**

Rozprawa liczy 133 strony i składa się z 7 rozdziałów, czterech dodatków oraz spisu rysunków, spisu tabel i bibliografii. W początkowej części pracy, po streszczeniach w języku angielskim i polskim, spisie treści, skrótach i nomenklaturze, Doktorant zamieścił wstęp. Zawiera on krótkie wprowadzenie dotyczące filtracji harmonicznych prądów i napięć, mocy biernej oraz niesymetrii obciążenia w sieciach elektroenergetycznych z wykorzystaniem filtrów pasywnych, aktywnych oraz

hybrydowych. Ponadto przedstawione zostało krótkie wprowadzenie na temat metod sterowania predykcyjnego w przekształtnikach energoelektronicznych. Na końcu tego rozdziału Doktorant sformułował tezę rozprawy,

*„Finite control states set model predictive control (FSMPC) of 3-level 4-leg flying capacitor converter (FCC) operating as shunt active power filter (SAPF) provides very good control accuracy, high dynamics and robustness, even under system and control parameters mismatch”*

która w tłumaczeniu własnym recenzenta brzmi następująco:

*„Sterowanie predykcyjne o ograniczonej liczbie stanów 3-poziomowego 4-gałęziowego przekształtnika z kondensatorami o zmiennym potencjale, działającego jako równoległy, energetyczny filtr aktywny, zapewnia bardzo dobrą dokładność sterowania, wysoką dynamikę i odporność, nawet przy niedopasowaniu parametrów systemu i sterowania”.*

W rozdziale drugim dokonano przeglądu topologii przekształtników wielopoziomowych możliwych do wykorzystania jako równoległy energetyczny filtr aktywny w układzie czteroprzewodowym, ze szczegółowym omówieniem właściwości struktury przekształtnika z kondensatorami o zmiennym potencjale. W rozdziale trzecim omówiono zagadnienia teorii mocy chwilowej z modulatorami histerezowymi oraz metodę z regulatorami PI we współrzędnych synchronicznych do sterowania czteroprzewodowymi SAPF. Rozdział czwarty to analiza metod predykcyjnych stosowanych w przekształtnikach energoelektronicznych. Następnie omówiono sterowanie predykcyjne o skończonej liczbie stanów oraz przedstawiono model trójpoziomowego, czterogałęziowego przekształtnika z kondensatorami o zmiennym potencjale z indukcyjnym filtrem wyjściowym pracującym w układzie równoległego energetycznego filtra aktywnego. W rozdziale tym dużo miejsca zostało również poświęcone analizie wpływu opóźnień operacyjnych na dokładność predykcji sygnałów oraz omówieniu doboru odpowiedniej funkcji kosztów. Rozdział piąty dotyczy badań symulacyjnych omawianego w rozprawie systemu, które zostały wykonane w programie Matlab Simulink. Zaprezentowane zostały wyniki badań właściwości proponowanego SAPF dla różnych warunków obciążenia w stanie ustalonym oraz przejściowym, z opóźnieniem i bez w algorytmie predykcji. Natomiast w rozdziale szóstym zostały zaprezentowane wyniki badań eksperymentalnych, które zostały przeprowadzone dla podobnych warunków obciążenia. Dodatkowo poddano analizie odporność algorytmu

sterowania na niedopasowanie parametrów układu rzeczywistego oraz modelu stosowanego w algorytmie oraz zmiany współczynników wagowych funkcji kosztów. Otrzymane wyniki potwierdziły, że kompensacja zaburzeń prądu i mocy biernej z zastosowaniem opracowanej metody predykcyjnej może być skutecznie realizowana nawet przy niedopasowaniu parametrów modelu i układu rzeczywistego. Przedstawiona analiza wykazała, że proponowane sterowanie predykcyjne osiągnęło lepszą dokładność i wysoką dynamikę w kompensacji harmonicznych prądów niż metody z modulacją histerezową. Przedstawione wyniki badań zostały podsumowane w rozdziale siódmym i pozwalają one stwierdzić, że teza pracy została udowodniona. Po siedmiu numerowanych rozdziałach w pracy znajdują się jeszcze cztery dodatki, w których kolejno omówione są transformacje układów współrzędnych i filtrów (dodatek A), model symulacyjny (dodatek B), opis modelu laboratoryjnego (dodatek C) oraz listingi kodów algorytmu predykcyjnego (dodatek D). Następnie w pracy znajdują się spis rysunków i tabel oraz bibliografia licząca 121 pozycji. Na sam koniec zaprezentowany został wykaz publikacji autorskich i współautorskich Doktoranta. Na uwagę zasługują publikacja, w której Doktorant jest głównym autorem opublikowana w renomowanym czasopiśmie IEEE Transaction Industrial Electronics. Praca ta jest ściśle związana z tematem rozprawy doktorskiej:

*K. Antoniewicz, M. Jasiński, M. P. Kaźmierkowski, and M. Malinowski. Model predictive control for 3-Level 4-Leg flying capacitor converter operating as shunt active power filter. IEEE Trans. Ind. Electron., 63(8): 5255-5262, Aug 2016.*

Redakcja rozprawy doktorskiej jest prawidłowa. Uwagi szczegółowe zostały zaprezentowane w dalszej części recenzji. Autor zastosował prawidłowy ciąg wnioskowania od definicji problemu przez opis możliwych rozwiązań a następnie symulacyjną lub praktyczną weryfikację.

### **3. Uwagi ogólne**

W trakcie lektury pracy nasunęły się następujące uwagi do dyskusji:

- 1) Z punktu widzenia wyjaśnienia modelu analizowanego przekształtnika (FCC-SAPF) równanie (4.7) jest równaniem kluczowym. Jednakże równanie to jest błędnie zapisane pod względem edycji: zastosowano niepoprawną ilość nawiasów, część wzoru jest zapisana jako indeks dolny. Doktorant powinien

- przedstawić poprawną wersję tej zależności i ją omówić. Czy w zależności (4.7) powinno występować  $\Delta T_S$  czy  $T_S$ ? Autor również miał trudności z właściwym przyporządkowaniem nawiasów w równaniach (4.10), (4.11), oraz (4.12b), jednak w tych przypadkach zależności te są zrozumiałe przy analizie.
- 2) Na Rys. 6.1 przedstawiającym schemat eksperymentalny Doktorant używa nazwy  $L_g$ , do opisanie indukcyjności linii zasilającej, natomiast w tabeli 6.1 i tekście rozprawy nazwę  $L_g$  przypisuje indukcyjności wyjściowej SAPF, która jest nieopisana na Rys. 6.1. Pojawia się zatem pytanie, jakie powinny być właściwe oznaczenia na Rys. 6.1?
  - 3) W podpunkcie 4.4 rozprawy Doktorant analizuje wskaźniki jakości regulatorów predykcyjnych tzw. funkcje kosztów, natomiast w podpunkcie 6.2.4 przeprowadzona jest analiza współczynników wag dla poszczególnych funkcji kosztów. Z przedstawionej analizy wynika, że większy wpływ na jakość kształtowanych sygnałów kompensacyjnych ( $THDi_G$ ) ma składnik obliczany na podstawie napięć międzyfazowych (zależność 4.12b) niż fazowych (zależność 4.12a). Autor wykazał, że powinna być spełniona zależność:  $wf_{iph-ph} \geq wf_{iph-n}$ . Przyjęcie  $wf_{iph-ph} < wf_{iph-n}$  powoduje zwiększenie  $THDi_G$ . Proszę o szersze wyjaśnienie tego faktu i określenie dlaczego dla uzyskania lepszych właściwości kompensacyjnych konieczne jest stosowanie obydwu tych funkcji.
  - 4) W badaniach eksperymentalnych przedstawiono wyniki badań dla niedopasowania parametrów modelu oraz układu rzeczywistego (wartość zmierzona indukcyjności filtra  $L_g=1.7$  mH, natomiast wartość zastosowana w algorytmie  $L_m=2.1$  mH). Dodatkowo przeprowadzono analizę wyboru wartości indukcyjności  $L_m$  dla uzyskania najniższej wartości współczynnika THD prądów sieci. W opinii recenzenta Autor powinien przedstawić przykładowe wyniki badań dla zgodnych parametrów układu rzeczywistego i modelu, a następnie przedstawić analizę optymalizacyjną i wyniki badań dla optymalnie dobranych parametrów modelu w układzie predykcyjnego sterowania. Czy w związku z powyższym Doktorant posiada i mógłby zaprezentować wyniki badań eksperymentalnych dla warunków przy zgodnych parametrach układu rzeczywistego i modelu?

- 5) Rozprawa dotyczy zastosowania przekształtnika trójpoziomowego z kondensatorami o zmiennym potencjale w układzie równoległego energetycznego filtra aktywnego. Doktorant w pracy jedynie na Rys. 2.4, wyjaśniając dozwolone stany łączników w gałęzi przekształtnika, definiuje poziomy napięcia wyjściowego. Dla lepszego zrozumienia i przejrzystości przekazu, zwłaszcza dla czytelników o mniejszej wiedzy w tym temacie, wskazane byłoby zamieszczenie wyjaśnienia tego zagadnienia lub/i przykładowych przebiegów czasowych napięć wielopoziomowych uzyskanych w badaniach symulacyjnych bądź eksperymentalnych.

#### 4. Uwagi szczegółowe

Praca pomimo dobrego wyglądu zawiera niewielką liczbę błędów edycyjnych. Poniżej przedstawiono najbardziej znaczące błędy edytorskie i stylistyczne.

- Brak tłumaczenia tytułu rozprawy na język polski.
- W streszczeniu w języku polskim występuje literówka: *że* – zamiast *ze*.
- Czcionki w rysunkach w rozdziale 1 są nieproporcjonalnie duże w stosunku do tekstu rozprawy i rysunków prezentowanych w innych rozdziałach.
- Błędy edytorskie takie jak: spacja przed przecinkiem (str. 16 i 22), dwie kropki na końcu zdania (str. 23), samotny zbędny nawias (str. 30, 32 i 94), dwukrotny znak równości w równaniu A.6, brak kropki na końcu zdania (str. 32, 53).
- Dwukrotne przedstawienie tego samego schematu (Rys. 1.9 oraz Rys. 4.1), który nie jest kluczowy z punktu widzenia tezy rozprawy. Autor mógłby się ograniczyć do jednokrotnego jego umieszczenia i odwołania się w tekście rozprawy do rysunku ze wcześniejszego rozdziału. Podobna sytuacja dotyczy Rys. 6.1 oraz C.1.
- Przyjęte jest w edycji tekstów naukowych by umieszczać i numerować rysunki zgodnie z kolejnością ich cytowania w tekście pracy. Doktorant nie zawsze stosuje tą regułę i przykładowo najpierw w tekście pracy powołuje się na Rys. 4.4 a dopiero następnie Rys. 4.2 oraz Rys. 4.3.
- W liście skrótów dwukrotnie jest wyjaśniony skrót FC, brakuje wyjaśnień skrótów CS-MPC oraz FS-MPC.

- Niekonsekwencja w nazewnictwie linii układu trójfazowego. Doktorant przeważnie używa małych liter a, b, c jednakże w zależnościach (4.17) oraz (4.18) używa dużych liter A, B, C a już we wzorze (4.20) ponownie używa małych liter. Również w rozdziale 5 oraz 6 Autor używa dużych liter do opisu nazw linii układu trójfazowego.
- W podpisie pod Rys. 6.5 oraz Rys. 6.6 niewłaściwa nazwa linii, dla której są prezentowane wyniki „in phase I”.
- Schemat przedstawiony na Rys. B.2 jest nieczytelny.

## 5. Ocena rozprawy

Opiniowana praca zawiera część teoretyczną, symulacyjną oraz eksperymentalną i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością energoelektroniki, cyfrowych technik sterowania oraz metod modelowania i symulacji układów energoelektronicznych. Pozytywnie należy również ocenić eksperymentalną weryfikację właściwości badanego układu i staranność w opracowaniu wyników. Praca w stosunku do dotychczasowego stanu wiedzy, wnosi szereg nowych wyników i wytycznych dotyczących właściwości i realizacji metod predykcyjnego sterowania w równoległych energetycznych filtrach aktywnych. Teza postawiona w rozprawie została w pełni udowodniona.

Do najważniejszych osiągnięć własnych Doktoranta, uzyskanych w pracy, należy zaliczyć:

- opracowanie modelu matematycznego 3-poziomowego 4-gałęziowego przekształtnika z kondensatorami o zmiennym potencjale z indukcyjnym filtrem wyjściowym pracującym jako równoległy energetyczny filtr aktywny (3-level 4-leg FCC-SAPF);
- opracowanie sterowania predykcyjnego wykorzystującego model o ograniczonej liczbie stanów do sterowania analizowanego systemu z uwzględnieniem kontroli napięcia kondensatorów o zmiennym potencjale;
- zbudowanie w programie Matlab Simulink modelu symulacyjnego analizowanego systemu z opracowanym sterowaniem predykcyjnym;
- opracowanie funkcji kosztów systemu sterowania uwzględniającej różne kryteria oraz analizę i dobór współczynników wagowych;

- wykonanie modelu eksperymentalnego zawierającego platformę kontrolną dSpace oraz wykonanie badań eksperymentalnych z analizą wrażliwości opracowanej metody predykcyjnej na zmiany parametrów badanego systemu i układu sterowania;
- opracowanie badań porównawczych właściwości systemu z zaproponowanym sterowaniem predykcyjnym oraz z klasyczną metodą sterowania z modulatorem histerezy.

W ostatecznej ocenie pragnę także podkreślić, że Doktorant był autorem lub współautorem 10 prac naukowych, ściśle powiązanych z tematem rozprawy doktorskiej, opublikowanych w czasopiśmie naukowych lub prezentowanych na międzynarodowych konferencjach naukowych.

#### **6. Wnioski końcowe**

Biorąc pod uwagę przedstawioną opinię stwierdzam, że rozprawa doktorska stanowi bardzo istotny, samodzielny wkład doktoranta w aktualny stan wiedzy w naukach technicznych w dyscyplinie elektrotechnika i spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w punkcie 13 pkt. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 27 września 2017 r. Poz. 1789). Stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej.

Ponadto z uwagi na wysoki poziom naukowy rozprawy, polegający na całościowym opracowaniu i rozwiązaniu omawianego w rozprawie zagadnienia, potwierdzony licznymi publikacjami w renomowanych publikacjach naukowych, wnoszę o wyróżnienie opiniowanej rozprawy.

*Paweł Szczęsniak*