

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgra inż. Kamila NOWIŃSKIEGO-ANTONIEWICZA
pt. „Research on Finite Control-States Set Model Predictive Control of Four-leg Three-level Flying Capacitors Converter for Shunt Active Power Filter”

1. Aktualność tematyki

Rozprawa doktorska dotyczy predykcyjnego sterowania prądem równoległego, energetycznego filtra aktywnego (APF, ang.: *Active Power Filter*), opartego na czterogąłęziowym, trójpoziomowym falowniku napięcia z kondensatorami o zmiennym potencjale (FCC, ang.: *Flying Capacitors Converter*). Sterowanie równoległymi filtrami aktywnymi jest przedmiotem prac badawczych w wielu ośrodkach na świecie, prowadzonych od wielu lat. Również od wielu lat filtry aktywne są stosowane w przemyśle. Istotnym impulsem dla prac nad sterowaniem, zmierzających w stronę komercjalizacji filtrów aktywnych, było opublikowanie w 1983 roku (a więc aż 36 lat temu) przez H. Akagiego teorii mocy chwilowych. Teoria ta pozwoliła na opracowanie algorytmu sterowania na tyle krótkiego, że możliwa stała się jego implementacja w ówczesnych sterownikach cyfrowych. Poczynając od tamtego czasu, rozwój algorytmów sterowania APF powiązany jest z ciągłym wzrostem dysponowanej mocy obliczeniowej sterowników, który umożliwia implementację praktyczną coraz bardziej zaawansowanych, a więc i coraz dłuższych algorytmów sterowania prądem kompensacyjnym. W szczególności, możliwe stało się stosowanie algorytmów predykcyjnych, które są bardzo istotne w aplikacjach APF ze względu na wymagane szerokie pasmo regulowanego prądu, a więc potencjalnie duże błędy fazowe prądów harmonicznych, wynikające z opóźnień pomiędzy sprzężeniami (pomiarami) a sterowaniem. Algorytm regulacji prądu zaproponowany przez Doktoranta należy do grupy algorytmów predykcyjnych typu MPC, a więc wpisuje się w ten ważny nurt badawczy.

Rozwój metod sterowania APF determinowany jest również strukturą obwodową układu, właściwą dla danego zastosowania. W szczególności dotyczy to liczby faz, układu sieciowego połączeń, stosowanego przekształtnika lub grupy przekształtników, a także struktury obwodu łączącego przekształtnik z siecią. Doktorant wybrał jako przedmiot badań sterowanie APF opartym na czterogąłęziowym, trójpoziomowym przekształtniku FCC. Doktorant nie wskazuje w pracy specyficznego obszaru zastosowań takiego systemu kompensacji, natomiast wykorzystanie struktury układu przeznaczonej dla sieci z przewodem neutralnym (głównie TN-S lub IT) sugeruje zastosowanie badanego kompensatora w sieciach komunalnych z odbiorami jednofazowymi. Zastosowanie

przekształtnika wielopoziomowego w takich sieciach ma uzasadnienie ze względu na niższy (w odniesieniu do przekształtnika dwupoziomowego) poziom zaburzeń elektromagnetycznych, a także możliwość zmniejszenia gabarytów, masy i ceny elementów obwodu sprzęgającego przekształtnik z siecią zasilającą, niezależnie od jego struktury. Wykorzystany przez Doktoranta przekształtnik stanowi wyzwanie dla algorytmu bezpośredniej (bez modulatora) regulacji prądu kompensacyjnego filtra. W literaturze przedmiotu sterowanie takie jest prezentowane bardzo nielicznie. Jest to więc wybór słuszny ze względów naukowych.

Podsumowując należy uznać tematykę rozprawy doktorskiej za ważną ze względów poznawczych, mającą pewien potencjał aplikacyjny i wciąż aktualną.

2. Zakres i ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa została zredagowana w języku angielskim i ma formę wewnętrznej publikacji Politechniki Warszawskiej. Liczy 133 strony, obejmujące 7 rozdziałów, 4 załączniki i bibliografię.

Autor rozprawy sformułował następującą tezę (w tłumaczeniu na język polski): „Sterowanie predykcyjne oparte na modelu o skończonej liczbie stanów (FS-MPC) trójpoziomym, czterogałęziowym przekształtnikiem FCC pracującym jako równoległy filtr aktywny zapewnia bardzo dobrą precyzję i dynamikę regulacji, a także odporność na niedopasowanie parametrów obwodowych i algorytmu regulacji”. Tezę tę Autor rozprawy udowadnia poprzez, co jest warte podkreślenia, badania przeprowadzone w pełnym cyklu obejmującym analizę teoretyczną, badania symulacyjne oraz badania doświadczalne na modelu laboratoryjnym o mocy 15 kVA.

Rozdział 1 stanowi wstęp i zawiera, oprócz zacytowanej powyżej tezy oraz celu i zakresu rozprawy, podstawowe informacje o pasywnych i aktywnych układach kompensacji prądu zasilającego. W rozdziale przedstawiona została ponadto propozycja ogólnego podziału wybranych metod sterowania predykcyjnego, stosowanych w układach APF.

W rozdziale 2 Doktorant zawarł krótką charakterystykę podstawowych struktur falowników wielopoziomowych, ze szczególnym uwzględnieniem stosowanego w pracy przekształtnika czterogałęziowego, trójpoziomowego o strukturze FCC. Autor wskazuje słusznie na zaletę przekształtnika FCC w zastosowaniu do układu APF, w postaci niezależnej regulacji napięć na kondensatorach obwodu DC w każdej z czterech gałęzi.

W rozdziale 3 rozprawy Autor przedstawił dwie wybrane, podstawowe i znane metody sterowania APF opartego na przekształtniku 4-gałęziowym – z regulatorami histerezowymi oraz regulatorami PI pracującymi w układzie odniesienia zorientowanym względem napięcia w punkcie przyłączenia. Rozdział zawiera również analizę porównawczą obydwu metod. Opisane sposoby sterowania, w szczególności metoda nieliniowa z regulatorami histerezowymi, pełnią w dalszej części rozprawy rolę odniesienia dla algorytmu opracowanego przez Doktoranta.

Najważniejszymi rozdziałami rozprawy są rozdziały od 4 do 6. Rozdział 4 zawiera uproszczony model matematyczny przekształtnika wraz obwodem sprzęgającym z siecią zasilającą, służący sformułowaniu regulatora FS-MPC, a w dalszej kolejności przedstawia i opisuje idę oraz algorytm opracowanej w ramach pracy metody sterowania predykcyjnego. Doktorant opisał uwarunkowania związane z pożądanymi sekwencjami przełączeń stanów gałęzi przekształtnika oraz sposób ich

uwzględnienia w predykcyjnym algorytmie sterowania. Przedstawił sposób realizacji predykcji prądu kompensacyjnego, a także zaproponował, opisał i uzasadnił postać funkcji kosztu dla algorytmu regulatora FS-MPC, uwzględniającą regulację napięcia na kondensatorach wewnętrznych poszczególnych gałęzi przekształtnika poprzez stany redundantne. Rozdział 4 dokumentuje więc na gruncie teoretycznym oryginalne osiągnięcia Doktoranta będące przedmiotem rozprawy.

Rozdział 5 zawiera wyniki badań symulacyjnych zaproponowanego algorytmu sterowania. Wyniki Doktorant przedstawił w formie zestawienia przebiegów uzyskanych dla opracowanej metody FS-MPC z przebiegami dla regulacji histerezy. Jako kryterium jakości pracy algorytmu sterowania wykorzystana została wartość współczynnika THD kompensowanego prądu zasilającego oraz ogólny poziom zaburzeń prądu (tętnień) pochodzących od przełączania tranzystorów przekształtnika. Pokazane wyniki uwzględniają pracę układu bez i z opóźnieniami pomiędzy sygnałami sprzężeń i sterowaniem. Pokazane zostały przebiegi dla dwóch obciążeń nieliniowych i niesymetrycznych, zarówno dla stanów ustalonych jak i przejściowych związanych ze skokową, jednoczesną zmianą mocy i charakteru kompensowanego odbioru.

W rozdziale 6 zawarto wyniki badań laboratoryjnych. W celu oceny zgodności pomiarów z wynikami badań symulacyjnych, badania laboratoryjne przeprowadzono dla odbiorów o takich samych parametrach obwodowych jak w modelu cyfrowym. Wyniki uzupełniono o widma prądu zasilającego wraz z odniesieniem do wymagań normy PN-EN 61000-3-2. W rozdziale zawarto również charakterystyki doświadczalne, obrazujące skuteczność kompensacji prądu w funkcji dopasowania parametrów obwodowych układu zadanych w algorytmie sterowania i rzeczywistych. Udokumentowane zostały ponadto wyniki pokazujące wpływ na skuteczność kompensacji prądu wartości wybranych współczynników (wag) zastosowanych w funkcji kosztu. Wyniki uzupełniają przebiegi napięć na kondensatorach wewnętrznych gałęzi przekształtnika FCC, obrazujące skuteczność ich regulacji.

Zasadniczą część rozprawy kończy rozdział 7, podsumowujący zakres przeprowadzonych prac i zawierający wnioski z przeprowadzonych badań.

Na końcu rozprawy Autor zawarł bibliografię zawierającą 121 pozycji, obejmujących publikacje zarówno zagraniczne jak i krajowe. Wykaz zawiera w dużej części publikacje wydane w ostatnich latach.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

1. Pokazane w pracy wyniki badań zarówno symulacyjnych jak i laboratoryjnych wskazują na nieakceptowalny w praktyce, zbyt wysoki poziom zaburzeń wysokoczęstotliwościowych obecnych w prądzie kompensacyjnym badanego filtru, a także, w konsekwencji, w prądzie zasilającym. Stwierdzenie to jest niezależne od braku norm europejskich limitujących zaburzenia prądu zasilającego w zakresie pasma od 2 kHz do 9 kHz. Najlepszą praktyką wydaje się korzystanie z, nadmienionej w rozprawie, normy amerykańskiej IEEE 519. Sugeruję, aby w ewentualnych dalszych pracach badawczych zastosować obwód sprzęgający przekształtnik z siecią wyższego rzędu, w celu skutecznej redukcji poziomu nadmienionych zaburzeń prądu.

2. Pokazane w rozprawie wyniki badań laboratoryjnych obejmują widma kompensowanego prądu zasilającego w zakresie do 2kHz wraz z odniesieniem do poziomów dopuszczonych normą PN-EN 6100-3-2. Pewną wątpliwość budzi wybór normy przewidzianej dla odbiorników o prądzie poniżej 16 A. Zastosowany w badaniach filtr aktywny jest mocy 15 kVA (prąd znamionowy 21,7 A), natomiast kompensowany odbiór jest mocy 12 kVA (prąd znamionowy 17,4 A). Ponadto, wyniki dowodzą niespełnienia przez prąd zasilający wymagań tej normy. co Doktorant komentuje w pracy. Jako jedno z możliwych rozwiązań autor podaje zastosowanie obwodu sprzęgającego LCL. Rozwiązanie to nie zapewni obniżenia poziomu harmonicznych w zakresie poniżej 2kHz, ponieważ częstotliwość rezonansowa prawidłowo dobranego obwodu LCL wykracza poza pożądany zakres widma prądu kompensacyjnego.
3. Na stronie 3 nad rysunkiem Autor wymienia jako wadę szeregowego filtra aktywnego konieczność doboru prądu znamionowego uzwojenia wtórnego transformatora na podstawie (w tłumaczeniu) „prądu znamionowego odbiornika a nie rzeczywistego poziomu odkształcenia napięcia”. Zdanie to jest truizmem. Prąd transformatora nie może zależeć od napięcia sieci. Istotna dla oceny porównawczej z innymi układami kompensacji jest moc pozorna transformatora, a ta jest determinowana mocą pozorną przekształtnika. Osobnym, istotnym problemem w szeregowym filtrze aktywnym jest zabezpieczenie układu przed stanami przeciążenia i zwarcia za punktem przyłączenia filtra. Niewymienioną w rozprawie wadą takiego kompensatora jest ponadto jego wpływ na zwiększenie impedancji pętli zwarciowej.
4. Na stronie 7, w akapicie pod rysunkiem Autor określa właściwości równoległego filtra aktywnego na które mają wpływ dławiki sieciowe, pomijając przy tym kluczową kwestię granicznej dynamiki prądu kompensacyjnego.
5. Drugie i trzecie równanie, z trzech równań oznaczonych wspólnie jako (2.3), są wzajemnie zależne. Nieuzasadnione jest więc podawanie obydwu nadmienionych równań.
6. Wybór jako jednej z metod sterowania, stanowiących odniesienie dla metody opracowanej przez Doktoranta, algorytmu z regulatorami PI, opartego na pojedynczej transformacji Parka wydaje się nietrafiony. Taki układ charakteryzuje się niską jakością regulacji prądów kompensacyjnych, co zresztą Doktorant nadmienia w rozprawie. Lepszym wyborem wydaje się chociażby układ sterowania MRF-PI (ang.: *multi reference frame*), czyli z regulatorami PI pracującymi w wielu układach odniesienia d-q, określonych dla poszczególnych harmonicznych prądu.
7. Zastosowanie dolnoprzepustowej filtracji sygnału błędu napięcia DC przekształtnika (strona 23) stwarza groźbę wystąpienia znacznych, przejściowych błędów regulacji tego napięcia przy dużych, skokowych zmianach mocy kompensowanego odbioru. Skuteczne, pozbawione powyższej wady ograniczenie wpływu tętnień napięcia DC na sterowanie prądem kompensacyjnym można uzyskać stosując algorytm odsprzęgający wprzód (feedforward) lub też regulator nieliniowy.
8. Na stronie 33 rozprawy wymienione zostały zalety metody sterowania FS-MPC. W jednym z punktów zaznaczono, że w modelu układu będącym podstawą dla algorytmu regulatora są uwzględnione nieliniowości systemu. W regulatorze Doktorant nie uwzględnia czasów martwych ani spadków napięć na półprzewodnikach falownika. Są to nieliniowości mające

znaczny wpływ na błędy generowania napięcia wyjściowego falownika, a tym samym na skuteczność kompensacji realizowanej przez filtr aktywny. W kolejnym punkcie Autor podał jako zaletę algorytmu FS-MPC natychmiastową reakcję w stanach przejściowych. W cyfrowym układzie sterowania natychmiastowa reakcja sterowania na zmianę stanu lub wejść jest niemożliwa ze względu na opóźnienie pomiędzy sprzężeniami i sterowaniem. W badanym układzie opóźnienie to wynosi $33,3 \mu\text{s}$ (co wynika z częstotliwości próbkowania równej 30 kHz).

9. Zależność (4.9) jest dobrym przybliżeniem jedynie dla napięcia sinusoidalnego, co w praktyce nie jest spełnione. Uproszczenie (4.9) może prowadzić do znacznych błędów regulacji prądu w przypadku obecności zaburzeń napięcia zasilającego w postaci np. załamań komutacyjnych.
10. Założenia upraszczające dla modelu przekształtnika (str. 35) sformułowane są w sposób nieuporządkowany.
11. Na stronach 36 do 38 oraz 40 i 41 Autor opisał problematykę związaną z predykcją prądu. Zgodnie z oznaczeniami zawartymi we wzorach i na rysunku 4.8, próbki odpowiadające ostatnim pomiarom oznaczono jako k . Predykcja realizowana jest tylko dla jednego kroku (dla $k+1$) i dotyczy tylko prądu mierzonego. Nasuwają się następujące pytania. Dlaczego nie jest realizowana predykcja o horyzoncie 2 kroków (dla $k+2$) tak, aby algorytm dążył do osiągnięcia zerowego uchybu prądu po realizacji zadanego stanu przekształtnika $S_m(k+1)$? Dlaczego predykcja nie jest realizowana również dla prądu referencyjnego (zadanego)? Umożliwiłoby to wyznaczenie uchybu prądu na podstawie zgodnych próbek prądu mierzonego i referencyjnego.
12. Doktorant w rozważaniach teoretycznych i badaniach symulacyjnych założył nieskończoną moc zwarciovą sieci w punkcie przyłączenia filtra, jak również sinusoidalne i symetryczne napięcie w tym punkcie. W jakim stopniu impedancja zastępcza sieci i/lub odkształcenia napięcia w PWP będą wpływały na pracę filtra aktywnego sterowanego z zastosowaniem proponowanej metody FC-MPC?
13. Na rysunku 6.1 na stronie 62 uwzględniono autotransformator. W jaki sposób wykorzystywany był autotransformator w baniach doświadczalnych? Pytanie wynika w szczególności z faktu, że autotransformator przy ustawieniu przekładni różnej od 1 wprowadza do obwodu wysoką indukcyjność zastępczą. Uwaga ta wiąże się w dużym stopniu z uwagą 10.
14. W wybranych wynikach badań symulacyjnych Doktorant uwzględnił opóźnienia pomiędzy sygnałami sprzężeń a sterowaniem równe $15 \mu\text{s}$ (str. 49). Z czego wynika tak mała wartość opóźnienia? Okres próbkowania zastosowany w algorytmie sterowania wynosi $33,3 \mu\text{s}$.
15. Jak można wyjaśnić fakt, że najwyższa skuteczność kompensacji prądu uzyskana została dla zadanej w algorytmie sterowania wartości indukcyjności dławików sieciowych równej $2,1 \text{ mH}$, podczas gdy rzeczywista wartość indukcyjności tych dławików wynosiła $1,7 \text{ mH}$?

4. Najważniejsze uwagi redakcyjne

1. Lista skrótów zamieszczona na stronie ix zawiera powtórzenie symbolu FC.
2. Ostatnie zdania na stronie 20, tuż nad rysunkiem, są powtórzeniem zdań ze strony 19.
3. Rysunek 4.1 jest powtórzeniem rysunku 1.9.



4. We wzorze (4.7) brakuje zamknięcia jednego z nawiasów.
5. Rysunki 6.2 i 6.3 są powtórzeniami rysunków, odpowiednio, 5.1 i 5.2.
6. W podpisach rysunków 6.5 i 6.6 niepoprawnie oznaczono fazę jako „I” zamiast „A”.
7. Wzór (6.3) jest powtórzeniem wzoru (4.20).
8. Rysunek C.1 jest powtórzeniem rysunku 6.1.

5. Ocena rozprawy

W pracy przedstawiono oryginalny, autorski wariant sterowania typu FC-MPC przeznaczony dla 4-gałęziowego, 3-poziomowego przekształtnika typu FCC pracującego w aplikacji równoległego filtra aktywnego, przyłączonego do sieci poprzez dławiki. Ważnym atutem ocenianej rozprawy jest jej kompletność, a także krytyczna, autorska ocena otrzymanych wyników. Istotne jest ponadto, że prace zostały przeprowadzone w pełnym cyklu badawczym obejmującym analizę teoretyczną, oraz obszerne badania symulacyjne i laboratoryjne układu.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Autora, udokumentowanych w rozprawie, zaliczam:

- sformułowanie modelu matematycznego 4-gałęziowego, trójpoziomowego przekształtnika FCC na potrzeby opracowania algorytmu sterowania FC-MPC,
- opracowanie algorytmu sterowania FC-MPC, uwzględniającego regulację napięć kondensatorów wewnętrznych gałęzi przekształtnika FCC,
- opracowanie modelu symulacyjnego badanego układu wraz ze sterowaniem i wykonanie badań symulacyjnych, obejmujących analizę porównawczą z regulacją histerezową,
- przygotowanie stanowiska doświadczalnego, obejmujące praktyczną implementację algorytmu sterowania,
- wykonanie obszernych badań laboratoryjnych układu.

Na uwagę zasługuje fakt, że w ramach prac związanych z tematyką rozprawy Autor opublikował 10 artykułów naukowych, w tym w znacznej większości w recenzowanych czasopismach naukowych.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa mgr inż. Kamila Nowińskiego-Antoniewicza pt. „**Research on Finite Control-States Set Model Predictive Control of Four-leg Three-level Flying Capacitors Converter for Shunt Active Power Filter**”, stanowi istotny wkład Autora w rozwój metod sterowania równoległym filtrem aktywnym opartym na czterogałęziowym, trójpoziomowym faloniku typu FCC. Uzyskane rezultaty mają istotne znaczenie poznawcze i mogą stanowić podstawę dla dalszych prac dotyczących tej tematyki. Oceny tej nie umniejszają uwagi zawarte w punktach 3 i 4 niniejszej recenzji.

Stwierdzam, że **opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 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 27.09.2017r., poz. 1789) w odniesieniu do dyscypliny elektrotechnika. Stawiam więc wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Nowińskiego-Antoniewicza do publicznej obrony przed Radą Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej.**