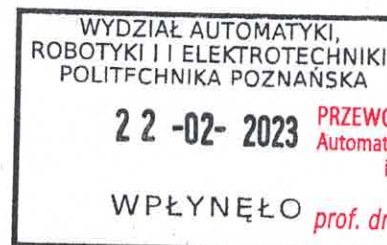


Białystok, 14 luty 2023 r.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Sikorski
Zakład Energoelektroniki i Napędu Elektrycznego
Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej
ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok



Ocena rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Cieplińskiego pt.:

”Aktywna kompensacja równoległa przy użyciu zasilacza sieciowego z przestrajalnym filtrem indukcyjnym”

(zlecenie z dnia 15.12.2022 r., na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej z dnia 7 grudnia 2023 r.)

1. Ogólna charakterystyka rozprawy, przedmiot i cel rozprawy

Tematem opiniowanej pracy doktorskiej jest jednofazowy zasilacz-kompensator z przestrajalnym filtrem indukcyjnym, którego głównym elementem składowym jest tzw. filtr aktywny (APF – *active power filter*). Filtr aktywny jest to urządzenie, które umożliwia kompensację wszystkich składników prądów poza składowymi prądami niosącymi moc czynną i bierną lub tylko moc czynną. Sterowanie przekształtników w ostatecznej formie skierowane jest na regulację prądów. W przypadku filtrów aktywnych są to zwykle prądy silnie odkształcone od sinusoidy z fragmentami o wysokich pochodnych prądów. Można więc powiedzieć że regulacja prądu APF jest permanentnym stanem przejściowym z jednej strony, albo pewnym stanem quasi-ustalonym z drugiej strony. W części silnopiętrowej APF budowane są zwykle z filtrem indukcyjnym, którego indukcyjność dobierana jest jako pewien kompromis pomiędzy jej maksymalizacją, wynikającą z potrzeby minimalizacji tętnień prądu sieci i jej minimalizacją wynikającą z potrzeby zmniejszenia „piku” prądu, który może pojawić się w przypadku stromych wartości filtrowanych prądów odbiorników nieliniowych.

Podstawową wadą struktury przekształtnika filtra aktywnego, takiej samej jak struktura przekształtnika AC/DC, są duże gabaryty i cena filtra L. Prace w odniesieniu do przekształtników AC/DC poszły w kierunku zmiany filtra wejściowego na strukturę typu LCL, która pozwala skutecznie filtrować prąd w stanie ustalonym, przy odpowiednio dobranych parametrach filtra (jego częstotliwościach rezonansowych w stosunku do częstotliwości modulacji przekształtnika) i kilkakrotnie zmniejszyć sumaryczną indukcyjność filtra. Wprowadzenie pojemności w strukturze filtra powoduje zmniejszenie stromości prądu w stanach przejściowych co jest mało znaczące w przekształtnikach AC/DC z sinusoidalnym prądem w sieci. Natomiast dyskwalifikuje to rozwiązanie w stosunku do zastosowania tej konfiguracji w filtrze aktywnym, gdzie występuje permanentny stan nieustalony, a stromość narastania

prądu decyduje o skuteczności działania filtra. Stąd praktycznie brak przykładów w literaturze zastosowania filtra LCL w filtrach aktywnych. Tym niemniej znaczne (kilkakrotne) zmniejszenie indukcyjności pozwala na odtwarzanie prądów o dużej stromości zwłaszcza gdy zastosuje się nieliniowe metody sterowania (np. predykcyjne). Autor w swojej pracy doktorskiej zaproponował zastosowanie filtra typu L o dynamicznie zmiennej indukcyjności. To prowadzi do zbliżonych efektów jak w filtrze LCL tj. skuteczne tłumienie wyższych harmonicznych prądów sieci wynikających z modulacji PWM i pozwalające odtwarzać prądy o większej stromości. Jednakże z punktu widzenia gabarytów filtra typu L i jego ceny, w stosunku do filtra typu LCL, jest to rozwiązanie mniej korzystne. Jednakże rozwiązanie to wydaje się być interesującym i jak wykazały wyniki przedstawione w pracy doktorskiej, skutecznie spełnia oczekiwania. Drugim zagadnieniem, którą zajmuje się Autor to sterowanie filtrem. Chociaż w pracy rozważana jest wersja 1-fazowa to nie znaczy, że jest to prostszy problem niż sterowanie 3-fazowego filtra aktywnego. Tętnienia napięcia stałego w obwodzie DC są zdecydowanie większe niż w strukturze 3-fazowej. Jakość regulacji napięcia, a w zasadzie jego stabilizacji, ma zasadnicze znaczenie dla jakości regulacji prądu, zwłaszcza w przypadku sterowania z regulatorem liniowym i PWM. Osiągnięte wyniki w pętli regulacji zwłaszcza napięcia DC budzą szacunek. Podobne odczucia można odnieść w przypadku regulacji prądu, przy czym jest tam już kilka uwag wyartykułowanych w dalszej części recenzji. Generalnie można stwierdzić, że sterowanie jest mocno rozbudowane, ale na pewno godne uwagi. Pewien niedosyt budzi brak porównania regulacji metodami nieliniowymi typu histerezy lub modulacji typu Δ . Zwłaszcza, że ich implementacja jest bardzo prosta w porównaniu ze zrealizowanym w pracy regulatorem prądu. Pozwoliło by to wykazać zalety (lub wady) zaproponowanej metody regulacji prądu z inną metodą. Na pewno struktura 1-fazowa zawęża możliwości optymalizacji sterowania zwłaszcza praktycznie uniemożliwia sterowanie np. predykcyjne, które może istotnie poprawić parametry regulacji prądu.

Autor postawił sobie za cel rozprawy opracowanie układu energoelektronicznego, spełniającego funkcję 1-fazowego zasilacza prądu stałego z funkcją PFC i realizującego jednocześnie aktywną kompensację równoległą mocy biernej i mocy odkształcenia, generowanych przez odbiornik nieliniowy, dołączony do tego samego, co zasilacz, węzła sieci elektroenergetycznej.

Można więc stwierdzić, że w recenzowanej rozprawie Autor podjął aktualny, niebanalny z poznawczego punktu widzenia problem badawczy, który ma istotne znaczenie praktyczne i który nie został dotychczas rozwiązany w sposób ostateczny i jednoznaczny.

Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Cieplińskiego zawiera 112 stron i została zredagowana w 9 rozdziałach. Zdaniem recenzenta przyjęty przez Autora układ treści rozprawy jest wystarczająco jasny i klarowny, podział rozprawy na rozdziały - prawidłowy, a rozdział wstępny i końcowy zawierają właściwe treści.

Rozdział 1 recenzowanej rozprawy (Wstęp), oprócz opisu motywacji do podjęcia badań zawiera również przegląd tematyki badawczej, w której są umiejscowione problemy podjęte przez Autora i opisane w rozprawie. Autor przedstawił środki i metody ograniczania niekorzystnego wpływu odbiorników nieliniowych na sieć zasilającą, a także wskaźniki oceny stopnia odkształceń prądów i napięć stosowane w pracy.

W rozdziale 2 Autor sformułował cel jakim było „zapropozowanie i weryfikacja działania aktywnej kompensacji równoległej, realizowanej przez zasilacz sieciowy prądu stałego”. Następnie rozpiisał cele cząstkowe określające zakres pracy.

W rozdziale 3 Autor przedstawił zasadę działania realizowanej koncepcji kompensacji równoległej odkształceń prądu sieci. Opisał elementy składowe i strukturę sterowania filtra aktywnego z funkcją zasilacza po stronie napięcia stałego U_{DC} .

Rozdział 4, to jeden z kluczowych rozdziałów pracy, gdzie Autor zaprezentował ideę dynamicznej regulacji indukcyjności filtra wejściowego APF. Rozważał 4 konfiguracje umożliwiające ciągłą i dyskretną zmianę wartości indukcyjności dławika. Dla wybranego wariantu przedstawił model elektryczny, badania symulacyjne i laboratoryjne zrealizowanego modelu dławika.

W kolejnym rozdziale 5, istotnym z punktu widzenia oceny merytorycznej pracy, Autor zaproponował strukturę układu sterowania zasilacza. Opisał równaniami i przedstawił charakterystyki poszczególnych bloków realizujących regulację napięcia w obwodzie DC oraz regulację prądu.

W rozdziale 6 Autor przedstawił model symulacyjny zasilacza. Na podstawie zaproponowanej struktury regulacji Autor utworzył w środowisku ORCAD/Spice oprogramowanie umożliwiające symulację sterowania zasilaczem-kompensatorem zasilanym z sieci jednofazowej i podłączonymi odbiornikami po stronie napięcia DC oraz odbiornikiem nieliniowym po stronie sieci zasilającej.

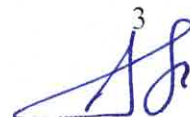
Kluczowym dla potwierdzenia rozważań teoretycznych jest rozdział 7, w którym Autor zaprezentował zbudowany model laboratoryjny zasilacza-kompensatora oraz wyniki badań laboratoryjnych dotyczące większości istotnych aspektów trybów pracy i sterowania zarówno w stanach statycznych jak i dynamicznych.

W rozdziale 8 Autor przedstawił koncepcję zasilacza-kompensatora z analogowymi blokami regulacji prądu. Autor uzasadnił korzyści płynące z realizacji części bloków sterowania w wersji analogowej. Dokonał walidacji swoich propozycji na drodze symulacyjnej wykazując walory takiego rozwiązania. Nie zrealizował jednak modelu laboratoryjnego potwierdzającego wyniki symulacji, wskazując podjęcie prac badawczych w tym temacie w przyszłości.

Wnioski i podsumowanie do tej pracy znajdują się w rozdziale 9. Autor stwierdził że, „celem rozprawy było opracowanie układu energoelektronicznego, spełniającego funkcję 1-fazowego zasilacza prądu stałego z funkcją PFC i realizującego jednocześnie aktywną kompensację równoległą mocy biernej i mocy odkształcenia, generowanych przez odbiornik nieliniowy, dołączony do tego samego, co zasilacz, węzła sieci elektroenergetycznej”. Ponadto przedstawił szereg swoich osiągnięć, udokumentowanych w pracy, potwierdzających realizację założonego celu.

2. Ocena merytoryczna i wykaz najważniejszych osiągnięć Autora

Rozprawa stanowi oryginalne i kompletne rozwiązanie zagadnień badawczych, projektowych i konstrukcyjnych związanych z realizacją jednofazowego zasilacza-kompensatora z regulowaną indukcyjnością dławika sieciowego i sterowaniem

3


zrealizowanym wg własnej koncepcji. Należy podkreślić, że praca została wykonana w pełnym cyklu badawczym, tj. od opracowania teoretycznego, poprzez analizę i testy symulacyjne, do zbudowania stanowiska laboratoryjnego.

Za oryginalne i cenne własne osiągnięcia o charakterze naukowym uważam następujące wyniki rozprawy:

- 1) opracowanie i realizacja części silnoprądowej energoelektronicznego sterowanego źródła prądu i sterowanego filtra indukcyjnego w tym:
 - opracowanie modelu sygnałowego energoelektronicznego sterowanego źródła prądu, na podstawie którego dokonano oceny możliwego zwiększenia dynamiki prądu źródła – na bazie okresowego zmniejszenia wartości indukcyjności filtra na jego wejściu,
 - realizacja praktyczna i badania laboratoryjne sterowanego filtra indukcyjnego o dwustopniowo nastawianej wartości indukcyjności,
- 2) opracowanie i realizacja układu sterowania jednofazowym filtrem aktywnym:
 - opracowanie i realizacja praktyczna struktury cyfrowego algorytmu sterowania częścią silnoprądową zasilacza-kompensatora,
- 3) opracowanie i przetestowanie modelu symulacyjnego zasilacza-kompensatora, zrealizowanego na podstawie wytycznych teoretycznych jego funkcjonowania oraz przeprowadzenie i opracowanie wyników jego badań.
- 4) projekt i budowa model laboratoryjnego systemu elektrycznego z zasilaczem-kompensatorem oraz przeprowadzenie badań i opracowanie wyników przy obciążeniach przez odbiorniki pobierające moc czynną, bierną i moc odkształcenia, a także podczas pracy zasilacza z funkcją PFC lub tylko jako aktywnego kompensatora równoległego,
- 5) opracowanie projektu i przetestowanie symulacyjnie modelu zasilacza-kompensatora, bazujący na sterowaniu częściowo analogowym.

Należy z uznaniem podkreślić, że Autor zaproponował nowe rozwiązanie w opracowanym zasilaczu-kompensatorze w stosunku do innych znanych rozwiązań układów, realizujących aktywną kompensację równoległą. Polegało ono na użycie w energoelektronicznym sterowanym źródle prądu dławika o zmiennej wartości indukcyjności. Pozwoliło to na istotne zwiększenie dynamiki zmian prądu źródła sterowanego w stosunku do układów powszechnie stosowanych. W odniesieniu do modelu liniowego źródła prądu, nastąpiło rozszerzenie jego pasma przenoszenia, co było zakładanym celem zastosowania filtra indukcyjnego tego rodzaju. Na szczególną uwagę zasługują rozwiązania cyfrowego algorytmu sterowania w tym:

- identyfikacja wartości chwilowych parametrów napięcia sieci i układ generacji sygnału sinusoidalnie zmiennego, o amplitudzie jednostkowej, umożliwiającego synchronizację przebiegów sygnałów w układzie sterowania z przebiegiem napięcia w węzle sieci elektroenergetycznej,
- układ regulacji napięcia wyjściowego DC zasilacza, wyposażonego m.in. w autorskie rozwiązanie układu korektora wartości napięcia referencyjnego i filtra antytętnieniowego,

- układ wyznaczania, na podstawie teorii mocy Fryzego, wartości amplitudy sygnału referencyjnego prądu filtra, wynikającej z aktualnych parametrów pracy odbiornika nieliniowego,
- układ regulacji prądu wyjściowego energoelektronicznego sterowanego źródła prądu, bazującego na integracji struktur typu P i PI, w zakresie właściwego regulatora prądu, w którym uwzględniono możliwość wystąpienia i minimalizacji wpływu na jakość procesu sterowania zjawiska chaosu deterministycznego,

Pewną wadą opracowanego rozwiązania, w stosunku do tradycyjnych układów tego typu, jest wzrost złożoności części silnopiędowej i sterującej zasilacza. W związku tym można się spodziewać wzrostu kosztów jego wykonania. Z drugiej jednak strony, złożony układ i algorytm sterowania zasilaczem w modelu praktycznym, mógłby zostać zrealizowany na bazie coraz bardziej dostępnych, wysoko wydajnych obliczeniowo, mikrokontrolerów. Ponadto doświadczenia zdobyte w sterowaniu układów mogą być wykorzystane w szerokiej gamie przekształtników AC/DC (falowników) stosowanych w mikrogeneracji.

Ogólna ocena sposobu i jakości rozwiązania sformułowanych zadań badawczych jest niewątpliwie pozytywna. Na uwagę zasługuje również fakt, że analizy teoretyczne i zaproponowany algorytm zostały poparte wszechstronnymi, dobrze udokumentowanymi w rozprawie, testami laboratoryjnymi. Jednakże, jak w każdej pracy naukowej, niektóre problemy i wątki nie zostały w rozprawie opisane w sposób dostatecznie dogłębny, przejrzysty i wyczerpujący. Szczegółowa lista fragmentów, które budzą pewne wątpliwości i komentarze recenzenta, została przedstawiona w kolejnym rozdziale recenzji.

3. Uwagi dyskusyjne i komentarze do rozprawy

Lektura rozprawy nasunęła szereg wątpliwości nie umniejszającym osiągnięciom Autora, przedstawionych poniżej i wymagających ustosunkowania się do nich Autora.

1. Dlaczego Autor wykorzystał regulator typu P, a nie PI, w regulatorze napięcia DC, który charakteryzuje się ustalonym błędem regulacji? Potwierdzają to również rys. 6.6 i 7.14.
2. Autor omówił zmiany wskaźników TWD i τ_L przedstawionych na rys. 6.5., ale nie przedstawił analizy ich przyczyn pod wpływem wzrostu napięcia DC. Z wykresów wynika, że należało by zwiększać napięcie DC, ale czy to dobry wniosek?
3. Recenzent nie widzi potrzeby przedstawiania prądu NL w wersji trójfazowej tego odbiornika, przedstawionej w rozdz. 3.2.2, skoro generalnie w pracy Autor zajmuje się układem jednofazowym. Na jakiej podstawie (rys. 3.5) stwierdzono, że szybkość zmian prądu w układzie 3-fazowym jest 2-krotnie mniejsza niż w układzie 1-fazowym ?
4. Zdaniem recenzenta część podsumowania (rozdz. 6.4), dotycząca stwierdzenia że, „wyniki badań wskazują na skuteczne działanie układu – dla szerokiej gamy odbiorników nieliniowych”, nie jest uprawniona, gdyż nie wynika to z przedstawionych wyników symulacji.

5. Przebiegi prądu sieci w momencie załączenia tyrystora mają charakter oscylacyjny (rys. 7.12) natomiast w symulacjach (rys. 6.3) tego się nie obserwuje. Jaka jest przyczyna tej niezgodności?
6. Mankamentem pracy jest brak porównania zaproponowanej metody sterowania ze zmienną indukcyjnością dławika np. z najprostszą, histerezową regulacją prądu (lub modulacją typu Δ) i stałą wartością indukcyjności dławika. Pozwoliłoby to sprawdzić nie tylko skuteczność zmiany indukcyjności, ale również zaproponowanego algorytmu regulacji prądu zasilacza.
7. Sygnał amplitudy zadany prądu $S_{ref,1}$ powinien odpowiadać mocy czynnej zapotrzebowanej przez odbiorniki (nieliniowy i po stronie DC). O ile moc czynna odpowiadająca odbiornikowi po DC jest wyznaczana, o tyle po stronie odbiornika nieliniowego jest trudniejsza do identyfikacji. Proszę o przybliżenie i wyjaśnienie tego problemu i jego rozwiązania.
8. Szkoda, że Autor nie pokazał sygnałów prądu zadanego i rzeczywistego kompensatora, co pozwoliło by ocenić jakość regulatora prądu i ewentualnie ocenić i skorygować jego nastawy. Zabrakło również w pracy sposobu i kryteriów określania nastaw regulatorów prądu i napięcia (choćby w Dodatku).
9. Proszę o wyjaśnienie działania bloku TIC, a w szczególności źródła sygnału referencyjnego $S_{ref T1}$.
10. Stwierdzenie (str. 62), „że czas trwania stanu przejściowego spada do pewnego nieprzekraczalnego minimum – niezależnie od sposobu sterowania...” , a także dalsza część dotycząca jego przyczyn jest dyskusyjna. Generalnie jeśli traktować stan przejściowy jako czas od wystąpienia „piku” prądu do zakończenia procesów przejściowych to przyczyny można podzielić na 2 grupy. Po pierwsze to „pik” prądu i czas jego trwania zależą od stromości narastania prądu w odbiorniku nieliniowym (z tyrystorem) oraz od szybkości narastania prądu filtra. Dodatkowo stan przejściowy wynika z nastaw regulatora prądu. Czas trwania „piku” można zmniejszyć wartością indukcyjności dławika filtra (na tym polega główna teza pracy), a ponadto impedancja sieci wpływa pozytywnie na zmniejszenie stromości prądu odbiornika nieliniowego. W skrajnym, rozpatrywanym przypadku przy odpowiednio dużej wartości indukcyjności w obwodzie narastania prądu odbiornika nieliniowego, stan przejściowy w ogóle nie występuje.
11. Przebiegi z testów laboratoryjnych (rys. 7.8-7.10), przedstawiające prądy sieci przy różnych obciążeniach, odbiegają od wyników symulacji, gdyż zawierają oprócz charakterystycznego „piku” prądu (wiadomego pochodzenia) również „pik” w przeciwną stronę o amplitudzie ok. 50—60% pierwszego „piku”. Nie podano z czego wynikają te różnice.
12. W pracy nie poruszono problemu realizacji czasów martwych sterowania łączników przekształtnika i ewentualnej ich kompensacji. Proszę wyjaśnić to zagadnienie.

Ponadto tekst rozprawy zawiera niżej przedstawione drobne uchybienia.

1. Str. 8 w.8d. Podstawową funkcją filtra L jest separacja dwóch napięć o różnych wartościach chwilowych (sinusoidalnego napięcia sieci i napięcia wyjściowego DC przekształtnika AC/DC). Brak dławika groziłoby zwarcieniem.
2. W języku polskim skrót „rys.” piszemy małą literą (Autor pisze dużą, podobnie jak w języku angielskim).

3. Staranność nakazuje w polskojęzycznej wersji pracy stosować opisy na rysunkach w języku polskim.
4. Recenzent nie znajduje uzasadnienia na pisanie z dużej litery słowa „rozdział 8” np. w zdaniu na str. 63.
5. Sformułowanie na str. 23 w5g „...moce te przepływać będą...” jest niepoprawnie gdyż to energia „płynie”, a moc ją charakteryzuje.
6. Jak uczono mnie w Poznaniu zamiast słowa „klucz” należy używać - „łącznik” (wg. prof. L. Frąckowiaka).
7. Rysunek 4.9 (wraz z opisem) jest powtórzeniem rys. 4.2.

4. Podsumowanie oceny rozprawy doktorskiej

Doktorant podjął problem o niewątpliwie istotnym znaczeniu praktycznym i wnosi oryginalny wkład intelektualny w postaci zmodyfikowanej struktury części silnoprądowej filtra aktywnego i nowego algorytmu jego sterowania. Szczególne znaczenie praktyczne posiada dławik indukcyjny filtra APF o sterowanej zmiennej indukcyjności. Na uwagę zasługuje kompaktowe i skuteczne sterowanie przekształtnikiem, które może być wykorzystane do sterowanie przekształtników stosowanych w kojarzeniu OZE z siecią elektroenergetyczną w tym, w wersjach trójfazowych.

Zdaniem recenzenta, Autor z dużą starannością przeprowadził proces analizy i syntezy przekształtnika AFP i jego sterowania. Opiniowana rozprawa mgr. inż. Łukasza Cieplińskiego pt.: *„Aktywna kompensacja równoległa przy użyciu zasilacza sieciowego z przestrajalnym filtrem indukcyjnym”* stanowi oryginalne rozwiązanie technicznie nietrywialnego problemu badawczego. Świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Autora w zakresie energoelektroniki i sterowania.

Stwierdzam, że opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artyku 13 ust. 1 Ustawy w zakresie dyscypliny *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*.

Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Łukasza Cieplińskiego do publicznej obrony przed Komisją Doktorską powołaną przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej.

