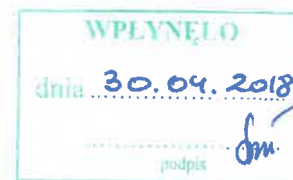


Dr hab. inż. Wojciech Jarzyna, prof. nzw. PL
Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin
tel. 81 5384339; e-mail: w.jarzyna@pollub.pl



Lublin, 27.04.2018 r.

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. KACPRA SOWY

PT. „JEDNOFAZOWY ENERGETYCZNY FILTR AKTYWNY Z ZASOBNIKIEM ENERGII
DO KOMPENSACJI MOCY CZYNNEJ W LINII ZASILAJĄCEJ”

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie z dnia 27.04.2018 r.

1. Ocena problematyki rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Kacpra Sowy dotyczy zagadnień poprawy jakości energii jednofazowej linii zasilania oraz ograniczenia mocy aparatury dystrybucyjnej tej linii. Problematyka ta jest niezwykle ważna i aktualna. Wynika to z faktu powszechnego stosowania nieliniowych odbiorów wprowadzających do sieci wyższe harmoniczne napięcia i prądu. Układy te często pracują w trybie pracy nieciągłej, a czasy załączania i wyłączenia są zmienne w pewnym ograniczonym zakresie. Niestety, taki typ obciążenia, specyficzny dla zautomatyzowanych i energooszczędnych procesów technologicznych nie pozostaje bez wpływu na parametry linii i funkcjonowanie urządzeń zasilanych z tej linii. Negatywnymi skutkami są w pierwszym rzędzie zwiększone straty w transformatorze zasilającym spowodowane wysokim stopniem odkształcenia prądu od przebiegu sinusoidalnego. Ponadto, w szczególności dla odbiorów o niespokojnej charakterystyce pracy, mogą wystąpić również znaczące przeciążenia linii, które powodują, że koniecznym stają się nowe inwestycje w celu zwiększenia mocy linii zasilającej.

Już tylko te dwa skutki dają poważne argumenty za potrzebą przeciwdziałania wymienionym negatywnym efektom pracy nieliniowych i niespokojnych odbiorów. W praktyce inżynierskiej stosuje się pewne rutynowe działania, sprowadzające się do instalacji w sieci kompensatorów mocy biernej oraz energetycznych filtrów aktywnych. Niestety, takie rozwiązania najczęściej nie zapewniają stworzenia warunków do racjonalnego wykorzystania posiadanej linii zasilającej. Widoczny jest brak na rynku konkurencyjnych rozwiązań, które gwarantują spełnienie wymagań w zakresie filtracji w połączeniu z indywidualnie dobranym zasobnikiem energii zapewniającym zasilanie dla

niespokojnych odbiorów. Wynika stąd jednoznaczne pozytywne uzasadnienie rozwijanej w pracy problematyki zastosowania równoległego filtra aktywnego z zasobnikiem energii o dużej chwilowej mocy zasilania. Spodziewane wyniki w zakresie poprawy efektywności pracy, zwiększenia stopnia wykorzystania aktualnego potencjału linii zasilających oraz uniknięcia inwestycji w zakresie zwiększenia mocy przyłączeniowej są zgodne z priorytetami współczesnego rozwoju technologicznego. Stąd wybór problematyki i jej zakres uważam za bardzo trafny.

2. Struktura i ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa obejmuje 167 stron i podzielona jest na cztery numerowane rozdziały, podsumowanie, wykaz literatury, streszczenia w j. polskim i angielskim, wykaz symboli i oznaczeń oraz poświadczenie o autorstwie pracy, informacje o jej współfinansowaniu z grantu dziekańskiego oraz podziękowania dla osób, które przyczyniły się do stworzenia warunków dla wykonania pracy. W części uzupełniającej, na stronach 168 - 184, znajdują się dodatki, w których Autor podaje szczegóły techniczne rozwiązania, schematy, projekty płytek, zdjęcia wykonanych podzespołów oraz inne dane rozszerzające.

Układ treści jest uporządkowany logicznie. W części wstępnej, po przedstawieniu motywacji podjęcia tematu i wyjaśnieniu idei aktywnego filtra, scharakteryzowany jest problem badawczy oraz określone są cele naukowe, które Autor sformułował w jako: *Opracowanie skutecznych topologii, algorytmów oraz metod sterowania przekształtnikiem energoelektronicznym wyposażonym w magazyn energii, który zniweluje lub znacznie ograniczy udary mocy czynnej oraz niekorzystne oddziaływanie tego rodzaju odbiorników na linię zasilającą. Dodatkowym celem jest opracowanie metod kontroli pracy oraz transferu energii z zasobnika.* Sformułowania te są poprawne i nie budzą żadnych zastrzeżeń.

W dalszej części wstępu podane są interesujące rozważania dotyczące opisu działania projektowanego układu, przewidywanych przepływów energii i wynikających z tego wymagań względem zasobnika energii elektrycznej. Na podstawie tych rozważań, dla przykładowych warunków pracy, określono zależności pojemności kondensatora filtra oraz kondensatora zasobnika. Pod względem funkcjonalnym zależności te podają minimalne wartości pojemności, które gwarantują odpowiednio: dla filtra - poprawną kompensację, a dla zasobnika - zachowanie wymaganej wartości napięcia linii zasilającej. W sposób syntetyczny precyzuje to opracowany przez Doktoranta algorytm postępowania formalizujący tok obliczeń podczas wyznaczania parametrów kondensatorów dla dowolnych warunków pracy. Rozważania te wykorzystywane są w dalszej części pracy do określenia parametrów realizowanego układu laboratoryjnego.

Zaprojektowanym i wykonanym w pracy obciążeniem wymagającym kompensacji mocy biernej jest punktowa zgrzewarka elektryczna do metali. Przyjęto, że jest to układ



z tyrystorowym sterownikiem mocy o komutacji sieciowej. Podstawowe badania, których wyniki przedstawione są we wstępie pracy, stanowią potwierdzenie teoretycznych zależności i stanowią również wprowadzenie do badań laboratoryjnych.

W oparciu o przedstawione rozważania sformułowano hipotezę badawczą: *prąd jednofazowej linii zasilającej odbiornik nieliniowy o niskiej i zmiennej wartości współczynnika mocy dla podstawowej harmonicznej, pracujący dorywczo ze zmiennym czasem przerw (odbiornik niespokojny) może być sinusoidalny i współfazowy z napięciem linii zasilającej, a wartość skuteczna tego prądu może być znacznie mniejsza, niż wartość prądu samego odbiornika wynikająca z jego mocy czynnej. Można to osiągnąć, jeśli do odbiornika zostanie dołączony odpowiedni układ energoelektroniczny pełniący funkcję filtra aktywnego, który dodatkowo będzie wyposażony w magazyn energii.*

Wyjaśniając sposób realizacji tej tezy przedstawiono dalszy układ logiczny rozprawy, na który składają się: analiza koncepcyjna, symulacje komputerowe, budowa stanowiska badawczego i testy na rzeczywistym urządzeniu oraz opracowanie wyników eksperymentu. Wymienione etapy wskazują na zaawansowany metodycznie warsztat badawczy Doktoranta odpowiadający standardom współczesnych badań naukowych.

W rozdziale II omówiono koncepcje działania oraz opisano budowę układu filtra aktywnego z dodatkowym zasobnikiem energii. Na szczególną uwagę zasługuje posłużenie się teorią mocy chwilowej wg. prof. Stanisława Fryzego. Teoria ta, opracowana blisko pięćdziesiąt lat temu, wyprzedzała o dziesiątki lat możliwość jej praktycznego zastosowania. Właściwie dopiero rozwój elektroniki i energoelektroniki pozwolił na jej praktyczną implementację. W ocenianej pracy implementacja ta stanowi istotny argument dokumentujący skuteczne zastosowanie teorii prof. S. Fryzego w układach kompensowania składowych nieaktywnych dla niesinusoidalnych układów jednofazowych. Algorytmy pracy projektowanego systemu realizowane są w układzie dwutorowej regulacji, na którą składają się: regulacja falownika pełniącego funkcję kompensatora oraz regulacja przekształtnika DC/DC współpracującego z zasobnikiem energii. Zadaniem regulacji falownika jest kształtowanie aktywnego prądu linii zasilającej, natomiast zadaniem układu przekształtnika DC/DC redukcja obciążenia transformatora zasilającego.

Podrozdziały potwierdzające umiejętność przeprowadzania przez Doktoranta analizy projektowej to części opisane w punktach II.2. Ich podstawę stanowią rozważania przedstawione w rozdziale wstępnym, zaś efektem są wyrażenia matematyczne pozwalające określić parametry pojemności i indukcyjności, wyznaczone dla przyjętych topologii układu, dostosowane do planowanego zakresu pracy, mocy odbiornika i przewidywanych cykli działania. Wyznaczone na podstawie tych wyrażeń wielkości wykorzystywane są w dalszej kolejności do określenia parametrów modelu symulacyjnego oraz do wykonania modeli fizycznych.



W rozdziale trzecim wykonano modele symulacyjne w programie Matlab/Simulink odtwarzające topologię schematów elektronicznych oraz układów i algorytmów regulacji. W modelach tych wyróżniono następujące moduły: linię zasilającą, obciążenie wraz z układem sterowania, filtr aktywny, przekształtnik DC/DC, układy sterowania i regulacji filtra aktywnego oraz sterowania i regulacji przekształtnika DC/DC. Dodatkowo zaprojektowano układ rozruchowy niezbędny do aktywowania pracy filtra oraz układy do pomiaru i kondycjonowania mierzonych prądów i napięć. Parametry wszystkich tych podzespołów, w tym również przetworników A/C, dobrano tak, aby wiernie odtwarzały własności układów rzeczywistych.

Na szczególną uwagę zasługują prace związane z budową modeli fizycznych do przeprowadzenia eksperymentów laboratoryjnych. Składają się na nie prace projektowo-konstrukcyjne przekształtników, dobór podzespołów i elementów pasywnych oraz testowanie i weryfikacja poprawności działania. Podczas tych prac posługiwał się szeregiem programów narzędziowych typu: Micrometals MicroR 2010 do projektowania dławików, LTspice do projektowania i badań symulacyjnych obwodów kondycjonowania sygnałów pomiarowych, Opal RT-Lab do projektowania komunikacji z układem czasu rzeczywistego RTS oraz do badań symulacyjnych sterownika w czasie rzeczywistym, Texas Instrument Code Composer Studio do projektowania interfejsu użytkownika, Eagle CAD-soft do projektowania płytek PCB oraz Altera Quartus II do wstępnego badania wstępne badania prototypu sterownika opartego o technologię FPGA.

W opisie prac uruchomieniowych uwagę zwracają testy funkcjonalne zaprogramowanego układu sterownika wykonane na symulatorze czasu rzeczywistego Opal Phenix RTS wykonane w Laboratorium Nowych Technologii w Elektroenergetyce należące do Korporacyjnego Centrum Badawczego ABB w Krakowie. Badania te pozwoliły na testowanie algorytmów regulacji na specjalnie do tego celu wykonanym emulatorze układów przekształtnikowych. Takie podejście ograniczyło niebezpieczeństwo uszkodzenia elementów elektronicznych na skutek przypadkowych błędów oprogramowania sterującego, a przede wszystkim znacząco przyspieszyło prace uruchomieniowe dzięki możliwości wykonywania korekt w trybie on-line z poziomu oprogramowania Matlab/Simulink.

W trakcie badań laboratoryjnych na układzie rzeczywistym przeprowadzono badania podczas rozruchu układu oraz pracy pod obciążeniem polegające na kompensacji składowej nieaktywnej prądu obciążenia i redukcji prądu czynnego w linii zasilającej. Przedstawiono bogatą dokumentację oscylograficzną prądów i napięć w różnych stanach pracy oraz przedstawiono interesujące autorskie komentarze.

Pracę kończą krótkie rozdziały podsumowujące, w których Autor ustosunkowuje się do postawionej we wstępie tezy i celów badawczych oraz podaje korzyści z zastosowania zrealizowanego układu. Przyznaje On również, że mimo osiągnięcia założonych celów naukowych, nie wszystkie problemy dotyczące optymalizacji pracy omawianych urządzeń zostały rozwiązane w rozprawie. Ich poprawę działania Autor przewiduje m.in. poprzez



zastosowanie regulatora predykcyjnego pozwalającego lepiej reagować na zmiany obciążenia wynikające z jego nieliniowego i niespokojnego charakteru.

3. Uwagi ogólne

Do uwag dyskusyjnych natury ogólnej należą następujące kwestie:

- A. Zastosowanie teorii prof. S. Fryzego do realizacji układu regulacji równoległego kompensatora mocy biernej jest jak najbardziej godne uznania. Mimo wszystko, w pracach naukowych taki wybór powinien być chociaż krótko uzasadniony.
- B. Według jakich kryteriów wyznaczono parametry regulatorów PI napięcia i prądu?
- C. Wśród korzyści Autor wymienia uniknięcie kosztów rozbudowy linii zasilającej. Zaletą ta obowiązuje jednak tylko dla przypadku umiejscowienia układu kompensacji wahań mocy bezpośrednio przy odbiorze.

4. Uwagi szczegółowe

Redakcja pracy jest staranna, ale zawiera pojedyncze pomyłki edytorskie. Polegają one głównie na interpunkcji i błędnym zapisie słów, czy niepoprawnej formie gramatycznej. Nie mają one jednak praktycznego znaczenia, warto jednak aby w udostępnianej po obronie wersji elektronicznej Autor wyeliminował te pomyłki. Poza tego typu błędami, wątpliwości budzą następujące kwestie:

- a. we wzorze (I-25) na str. 38 granice całki mają wymiar czasu, podczas gdy całkowanie odbywa się względem napięcia;
- b. na Rys.IV-1.8 (str.115) indukcyjność w funkcji prądu ma odmienny kształt od typowych układów ferromagnetycznych. Skąd wynikają takie różnice?
- c. wykresy na Rys. IV-3.5 pozostawione są bez interpretacji.
- d. układ regulacji pojawia się na rysunkach Rys.I-2.4 (str27), Rys. II-1.5 (str. 56) i Rys.III-1.1 (str.71), jednak oznaczenia bloków regulacji nie są identyczne. Mylące jest zwłaszcza oznaczenie regulatora napięcia w układzie regulacji filtra jako I_{ref} .

5. Ocena rozprawy

Praca napisana jest bardzo zwięzłym językiem, jej układ jest przejrzysty i nie zawiera zbędnych powtórzeń. Układ treści jest logicznie uporządkowany, co ułatwia jej studiowanie i analizowanie. Bardzo duże i pozytywne znaczenia mają podsumowania znajdujące się na końcu każdego z rozdziałów głównych. Dla czytelnika jest to dodatkowe źródło informacji mające charakter porządkujący i systematyzujący uzyskane efekty. Podsumowania te są przy tym dodatkowym elementem podkreślającym logiczny układ pracy.

W ocenie merytorycznej należy uznać, że najważniejszymi rezultatami osiągniętymi w ocenianej rozprawie jest poprawa charakterystyk pracy linii zasilającej, na którą składają się:

- uzyskanie sinusoidalnego prądu w linii zasilającej, który jest w fazie z pierwszą harmoniczną napięcia, mimo istnienia silnie nieliniowego i niespokojnego obciążenia,

- potwierdzenie, że opracowany układ skutecznie kompensuje chwilowe przeciążenia linii dzięki zastosowaniu zasobnika energii. Dzięki tej kompensacji, wielokrotnie zredukowano wartość skuteczną prądu zasilania.

W rozprawie wyniki te zostały najpierw przewidziane podczas badań symulacyjnych a następnie potwierdzone na rzeczywistym stanowisku laboratoryjnym. Tym samym w pełni udowodniona została teza naukowa rozprawy, a cele badawcze zostały spełnione.

Obok wymienionych końcowych rezultatów, do największych osiągnięć doktoranta zaliczam również:

- udaną implementację teorii Fryzego do kompensacji mocy biernej,
- zaprojektowanie, wykonanie, uruchomienie i przebadanie układu laboratoryjnego,
- opracowanie wymagań energetycznych do pracy pod obciążeniem i podczas rozruchu układu.

6. Podsumowanie i końcowy wniosek

W rozprawie doktorskiej Pan mgr inż. Kacper Sowa wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w **dyscyplinie naukowej elektrotechnika** oraz szczegółową wiedzą w zakresie tematyki rozprawy. Dowiódł umiejętności zdefiniowania problemu badawczego, opracowania innowacyjnych metod sterowania i regulacji, formułowania modeli symulacyjnych oraz praktycznych umiejętności projektowania, konstruowania, uruchamiania stanowiska oraz planowania i przeprowadzania badań. Dowiódł również, że potrafi interpretować uzyskane wyniki i formułować własne wnioski, co świadczy o nabyciu wysokich kwalifikacji do prowadzenia prac naukowych.

Uwzględniając wymienione argumenty wnioskuje, aby rozprawę doktorską mgra inż. Kacpra Sowy uznać za istotny wkład Autora w rozwój metod kompensacji mocy czynnej w jednofazowych liniach zasilania.

Na tej podstawie 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. nr 65 poz. 595 z późn. zm.) a także w stosownych rozporządzeniach i przepisach wykonawczych.

Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Kacpra Sowy do publicznej obrony przed komisją doktorską Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie.

