

Poznań, 03.04.2019

Dr hab. inż. Ryszard Porada
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej
Politechniki Poznańskiej
60-965 Poznań ul. Piotrowo 3a

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Konrada Hawrona pt.:

*„Zastosowanie pojęcia czasowo-zależnej mocy czynnej
do zagadnień optymalizacyjnej teorii mocy”*

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgra inż. Konrada Hawrona stanowi pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej z dnia 07.02.2019

1. Tematyka rozprawy

Wzrost liczby odbiorników nieliniowych (szczególnie układów energoelektronicznych) jest przyczyną znacznego pogorszenia parametrów jakościowych energii elektrycznej dostarczanej do odbiorców. Takie odbiorniki przyczyniają się do zwiększenia poboru energii oraz odkształcenia prądu powodując dodatkowe straty mocy czynnej w systemie zasilania oraz w zasadniczy sposób wpływają na odkształcenie napięcia sieci.

Zagadnienia optymalizacji właściwości energetycznych układów elektrycznych są obecnie ukierunkowane na optymalizację pracy źródeł energii związaną z minimalizacją poboru energii z tych źródeł i określeniem właściwego kształtu sygnałów przenoszących tę energię. W celu poprawy jakości parametrów energii elektrycznej dostarczanej do odbiorców stosowane są różne warianty układów nazywanych kompensatorami.

Formułowane obecnie cele kompensacji są związane z uzyskaniem optymalnego stanu pracy układu źródło-odbiornik. Przez optymalny stan pracy rozumie się stan napięciowo-prądowy układu, w którym straty energii elektrycznej (mocy czynnej) na wybranych elementach obwodu oraz zawartość wyższych harmonicznnych w wybranych przebiegach prądów i napięć w obwodzie są minimalne. W tym celu wyróżnia się za pomocą metod optymalizacyjnych, przy odpowiednio sformułowanym wskaźniku jakości, optymalny prąd aktywny, natomiast reszta prądu powinna być wyeliminowana z prądu sieci przez kompensatory realizujące kompensację dynamiczną (w czasie rzeczywistym), odpornych na zakłócenia zarówno ze strony sieci, jak i odbiornika. Oprócz układów kompensujących prowadzone są także prace mające na celu opracowanie sterowania układami zapewniające

optymalny pobór energii ze źródeł energii.

W sieciach zasilających występują stany nieustalone powodowane zmiennym obciążeniem źródeł energii przez odbiorców. Wiąże się to także z coraz szerszym stosowaniem tzw. niespokojnych źródeł energii wykorzystujących alternatywne postaci energii (m.in. energię wiatru, promieniowania słonecznego). Generowane stany nieustalone mogą być przyczyną dodatkowych strat energii, stąd wynika potrzeba uwzględnienia takich stanów również w procesie optymalizacji.

W związku z powyższym uważam, że tematyka rozprawy jest bardzo interesująca, aktualna i ważna – zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia. Praca obejmuje wiele trudnych i dotychczas całościowo nie rozwiązanych zagadnień naukowych. Wpisuje się w ponadto w szerszy nurt jakości energii elektrycznej, ważny również w kontekście efektywności energetycznej źródeł energii.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Konrada Hawrona o objętości 146 stron, składa się ze wstępu, pięciu rozdziałów merytorycznych oraz podsumowania. Wykaz literatury obejmuje 66 pozycji.

Po określeniu problematyki pracy w rozdziale pierwszym Autor w kolejnym rozdziale przedstawia pojęcie operatora impedancji obwodu, na podstawie którego konstruowany jest operator stratności obwodu oraz wyprowadza oryginały czasowe tego operatora ze względu na przyczynowość oraz antyprzyczynowość układu w przypadku występowania sygnałów impulsowych i okresowych. Wprowadzone zostało pojęcie czwórki elementarnej oraz jej związek z przypadkami szczególnymi występującymi w teorii mocy. Na koniec zostały przedstawione rozkłady operatorów immitancyjnych na składowe oraz ich zastosowanie

w wyodrębnieniu składowych prądu lub napięcia odbiornika energii.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawia kilka najważniejszych zadań optymalizacyjnych wykorzystując analizę funkcjonalną oraz ich równania rozwiązujące. Wprowadza pojęcie funkcji energetycznej, na podstawie której układane są równania energetyczne zawierające opisane wcześniej zadania optimum oraz omawia sposoby rozwiązywania równań energetycznych w celu znalezienia rozwiązań optymalnych.

Rozdział czwarty zawiera wyprowadzenie operatora zmodulowanego oraz jego wpływ na energetyczny opis odbiornika energii, a także modyfikację układów elementarnych oraz

czwórek elementarnych będące skutkiem wprowadzenia operatora zmodulowanego, wpływające na składowe prądu odbiornika. Omówione zostały również modyfikacje operatorów za pomocą filtrów cyfrowych dla wyodrębnienia składowych prądu odbiornika oraz koncepcja wykorzystania zaburzeń wyższego rzędu do rozkładu operatorowego. Przedstawiony został także matematycznie aproksymowany model stanu nieustalonego jako homotopia, rozumiany jako ciągłe przejście pomiędzy jednym stanem ustalonym, a drugim – również ustalonym.

W rozdziale piątym przedstawiona została koncepcja ruchomej mocy czynnej. Wyprowadzone zostały wzory na ruchomą moc czynną oraz ruchomą moc bierną we współrzędnych prostokątnych oraz biegunowych dla sygnałów quasi-harmonicznych oraz wpływ szczególnych przypadków modulacji na te zależności. W przedstawionym przykładzie Autor zwrócił uwagę na sytuacje, w których obliczenie tradycyjnie rozumianej mocy czynnej nie jest możliwe, za to możliwym jest wyznaczenie ruchomej mocy czynnej. Do tego celu wykorzystał kilka przypadków matematycznie aproksymowanych stanów nieustalonych układu.

W rozdziale szóstym Autor wyprowadził zmodyfikowane modulacyjnie, tj. zawierające modulowany stan przejściowy, zadanie minimalizacji normy prądu z wykorzystaniem zasady podobieństwa oraz przedstawił rozwiązanie tego zadania będące prądem optymalnym. Opisał również algorytm wyznaczania prądu optymalnego w przypadku gdy sygnał siły elektromotorycznej źródła opisany jest stanem przejściowym za pomocą homotopii wykładniczej. Analizował również sytuacje, w których stan nieustalony jest permanentny i wyznaczył rodzinę sygnałów prądu optymalnego spełniających zadanie minimum.

Część merytoryczną pracy kończy podsumowanie (rozdział siódmy), dotyczące omawianej problematyki.

Należy podkreślić poprawny styl, w jakim zredagowana jest praca, choć było to niełatwe zadanie ze względu na znaczącą liczbę wzorów matematycznych. Moim zdaniem, Autor mógł przywiązać większą wagę do edycji rysunków. Wiele z nich ma nieczytelne osie oraz legendy. Jak na rozmiar rozprawy oraz zakres podjętych zagadnień, zauważyłem w pracy niewielką liczbę nieścisłości i usterek redakcyjnych.

3. Cel i zakres merytoryczny rozprawy

Cel pracy został przez Autora określony jako przedstawienie kompleksowego aparatu matematycznego do opisu zjawisk optymalizacyjnej teorii mocy, tj. teorii dopasowania

źródło-odbiornik, w stanach ustalonych oraz w matematycznie aproksymowanych stanach przejściowych pomiędzy następującymi po sobie stanami ustalonymi.

Realizując ten cel, Autor po przedstawieniu w rozdziałach drugim i trzecim pewnych zagadnień wstępnych (dotyczących m.in rozkładu operatorów immitancyjnych, oryginałów czasowych tego operatora dla sygnałów impulsowych lub okresowych czy pojęcia funkcji energetycznej, wykorzystywanej w równaniach energetycznych oraz sposobów ich rozwiązywania), w rozdziale czwartym Autor wprowadza istotne zagadnienia związane z głównym celem analizy procesów energetycznych w stanach nieustalonych. Narzędziem do tego celu jest zastosowanie modulacji w rachunku operatorowym, co umożliwi matematyczne przybliżenie opisu zjawisk energetycznych w stanach nieustalonych, jako przejście z jednego periodycznego stanu ustalonego w drugi, również ustalony. Służy temu wykorzystanie dwóch czasów: jednego związanego z okresowością sygnałów – czasu nośnego oraz drugiego, związanego z powolnymi, modulowanymi zmianami obwiedni sygnału – czasu unoszenia. Na tej podstawie Autor wyprowadza zmodyfikowane modulacyjnie operatory układów elementarnych, czwórek elementarnych oraz ich czasowe odpowiedniki w przestrzeni sygnałów impulsowych oraz okresowych. Ma to również konsekwencje w procedurze wyznaczania składowych napięcia i prądu dwójnika elektrycznego. Jest to podejście ciekawe i oryginalne.

W podrozdziale 4.6 przedstawiony został matematyczny model stanu nieustalonego z wykorzystaniem homotopii przekształceń ciągłych (z obszaru topologii algebraicznej). Ponieważ tego typu narzędzie nie jest zbyt często wykorzystywane w rozważaniach teoretycznych związanych z zagadnieniami prezentowanymi w pracy, szkoda, że Autor nie przedstawił i uzasadnił szerzej motywów jego wykorzystania, a przecież skutkiem tego jest znacząca modyfikacja sposobu wyznaczania składowych prądu dwójnika.

Dla rozwiązania zadania optymalizacyjnego w kontekście stanów nieustalonych potrzebne było odpowiednie uzmiennienie warunku ograniczającego w postaci mocy czynnej wydawanej przez źródło. Do tego celu Autor wykorzystał tzw. „ruchomą moc czynną”. Jest to odpowiednik tzw. „ruchomej średniej”, stosowanej od dawna m.in. analizie szeregów czasowych czy teorii obserwatorów w nowoczesnej teorii sterowania. W obszarze tzw. „teorii mocy” kwerenda literaturowa Autora nie jest wyczerpująca (zaledwie kilka pozycji, najwcześniejsza z 2003r.), podczas gdy podejście takie było prezentowane już o wiele wcześniej.

Przedstawiona w rozdziale piątym zmodyfikowana modulacyjnie „ruchoma moc czynna” uzupełnia wielkości niezbędne do przeprowadzenia procesu optymalizacji, czyli jed-

nego z najważniejszych zadań optymalnej współpracy źródeł i odbiorników energii, bezpośrednio związanym z minimalizacją strat energii – minimalizację normy prądu pobieranego ze źródła przy zadanej mocy czynnej dostarczanej do odbiornika w stanie nieustalonym. Autor przedstawia różne przypadki homotopii przekształceń ciągłych łącznie ze zniekształceniami modulacyjnymi, aby ostatecznie uzyskać formuły operatorowe zmodulowanego prądu optymalnego.

Podsumowując, przedstawione w pracy narzędzia i podejście do problemów optymalizacji dynamicznej są teoretycznie bardzo ciekawe i oryginalne. W odniesieniu do całości uważam, że cel oraz zakres i metody ich realizacji prezentują poziom odpowiedni dla rozpraw doktorskich.

W mojej opinii, na szczególne podkreślenie zasługują następujące osiągnięcia autora rozprawy:

1. Przedstawienie rozkładu operatora umożliwiające wyodrębnienie sygnału prądu dostarczającego użyteczną moc czynną oraz pozostałej składowej prądu odbiornika.
2. Wprowadzenie funkcji energetycznej, interpretowanej fizycznie jako moc czynna (lub energia) dostarczana na zaciski źródła, do wyznaczenia równań energetycznych dla zadań minimalizacji wartości skutecznej prądu oraz strat czynnych wewnętrznych źródła.
3. Matematyczne przybliżenie opisu zjawisk energetycznych w modulowanych stanach nieustalonych.
4. Określenie związku pomiędzy transformatami obwiedni sygnałów wejściowego i wyjściowego oraz zmodyfikowanych modulacyjnie operatorów układów elementarnych i ich czasowych odpowiedników w przestrzeni sygnałów impulsowych oraz okresowych.
5. Implementacja modulacyjnego zaburzenia operatorów za pomocą filtrów cyfrowych dla określenia algorytmu wyznaczania składowych prądu dwójnika.
6. Zaproponowanie matematycznego modelu stanu nieustalonego jako ciągłego procesu przejścia układu z jednego okresowego stanu ustalonego w inny, okresowy i ustalony z wykorzystaniem homotopii przekształceń ciągłych.
7. Rozszerzenie pojęcia ruchomej mocy czynnej dla okresowo zmodulowanych sygnałów harmonicznym napięcia i prądu.
8. Rozszerzenie zadania minimalizacji normy prądu pobieranego ze źródła przy zadanej mocy czynnej dostarczanej do odbiornika o stany nieustalone z wykorzystaniem homotopii.

4. Uwagi i pytania

1. Pojęcie obwiedni jest wykorzystywane od dawna do przybliżonego badania stanów nieustalonych obwodów o małym tłumieniu. Czym istotnym różni się pojęcie obwiedni wprowadzone w rozprawie od tego już stosowanego.
2. W podrozdziale 4.6 Autor wprowadza homotopie określone funkcyjnie bez uzasadnienia takiego wyboru. Proszę o komentarz do takiego wyboru.
3. W pracy przedstawiono liczne przykłady ilustrujące przedstawiane zagadnienia. Jednak przyjęte parametry układów są dość dalekie od realnych parametrów technicznie dostępnych źródeł energii i odbiorników. Szkoda, że Autor nie przedstawił takich przykładów, które urealniałyby uzyskane wyniki.
4. W realnych warunkach napięcie sieci (źródła energii) podlega wahaniom częstotliwości związanym ze zmiennością obciążenia, co może odpowiadać w modelu sygnałom prawie okresowym. Czy Autor widzi możliwość wykorzystania przedstawionego modelu matematycznego również w tym przypadku; czy wymagałoby to zasadniczych zmian.
5. W rozprawie Autor używa nieostrych zwrotów, np. „...z dobrą dokładnością...”, „...modulacja powolna...” czy „...doznaje zmian na tyle małych...”. W tak zmatematyzowanej rozprawie warto byłoby pokusić się choćby o oszacowanie błędów pewnych uproszczeń czy skonkretyzowanie granicznych wartości parametrów, dla których błąd ten będzie, zdaniem Autora, dopuszczalny.
6. W jakim stopniu poczynione przybliżenia mogą wpływać na efektywność procesu optymalizacji, tzn. na uzyskanie poszukiwanego rzeczywistego minimum.

Uwagi wniesione przy ocenie głównych rezultatów rozprawy oraz zamieszczone komentarze i pytania szczegółowe nie wpływają na moją ocenę recenzowanej rozprawy, która jest jednoznacznie pozytywna.

6. Wniosek końcowy

Przechodząc do ogólnej oceny rozprawy uważam, że postawiony cel oraz zakres pracy zostały przez Doktoranta osiągnięte. Doktorant wykazał się dużą wiedzą teoretyczną, umiejętnością formułowania i rozwiązywania trudnych problemów naukowych. Sposób rozwiązania tych problemów wskazuje na bardzo dobre opanowanie i zrozumienie przez Autora

wielu różnorodnych zagadnień, koniecznych przy realizacji pracy doktorskiej oraz stanowi oryginalne podejście do rozwiązania interesującego, aktualnego i ważnego problemu optymalizacji. Doktorant swoimi badaniami wniósł pozytywny wkład do szeroko rozumianej elektrotechniki.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Korada Hawrona, według mojej opinii, należy do prac, które spełniają wymagania obowiązującej ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym, dotyczące rozpraw doktorskich. Wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'K. Korada', written in a cursive style.