



Politechnika
Wroclawska

dr hab. inż. Tomasz Sikorski
Politechnika Wroclawska
Wydział Elektryczny

ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
tel. (71) 320 21 60, fax. (71) 322 97 25
e-mail: tomasz.sikorski@pwr.edu.pl

Wrocław, 26 luty 2015

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgr inż. JULIANA WOSIKA

p.t. „Aktywna kompensacja mocy biernej w dołowych sieciach kopalnianych”
wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej
zgodnie z uchwałą Rady Wydziału z dnia 24.11.2014 r.

Zawartość recenzji:	str.
1. Tematyka rozprawy	1
2. Ogólna charakterystyka rozprawy	2
3. Elementy oryginalne rozprawy	6
4. Uwagi dyskusyjne i komentarze	6
4.1. Wątpliwości, uwagi i pytania merytoryczne	7
4.2. Usterki redakcyjne	10
5. Ocena końcowa rozprawy	13
6. Wniosek końcowy	13

1. Tematyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Juliana Wosika, napisana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Bogusława Miedzińskiego, dotyczy ważnych i aktualnych zagadnień dynamicznej eliminacji harmonicznych oraz nadążnej kompensacji mocy biernej. Zagadnienie to nabiera szczególnego znaczenia w rozległych sieciach kopalnianych, charakteryzujących się znacznymi impedancjami sieci, a także rosnącym udziałem odbiorników nieliniowych oraz niespokojnych odbiorników dużej mocy sterowanych za pomocą układów energoelektronicznych. W takim środowisku zaburzenia wynikające z nieprawidłowej kompensacji lub udziału harmonicznych w prądach, przenoszące się poprzez impedancje na napięcia, mogą być znaczące. Ponadto w stosunku do podziemnych sieci elektroenergetycznych występują specyficzne uwarunkowania ograniczające możliwości wykorzystanie konwencjonalnego sposobu kompensacji równoległej kondensatorowej, ze względu na zwiększone wymagania bezpieczeństwa.

Mimo iż literatura fachowa, a także dostępne obecnie na rynku rozwiązania sprzętowe wykorzystujące sterowane tyrystorowo układy pojemnościowe oraz filtry aktywne, podają wiele propozycji algorytmów sterowania i rozwiązań poświęconych nowoczesnej kompensacji mocy biernej, wciąż istnieje niedosyt w opracowaniu skutecznej i praktycznej metody dającej skuteczny poziom kompensacji i eliminacji harmonicznych, zwłaszcza w przypadku znaczącej dynamiki zmian obciążenia. Być może powodem jest niewystarczająca analiza występujących współcześnie teorii mocy i prób ich wykorzystania w algorytmach sterowania aktywnym filtrem mocy.

Praca mgr Wosika łączy zarówno przegląd rozwoju teorii mocy, przykłady zaburzeń napięć i prądów występujących w sieciach kopalnianych, jak również wybór metody kompensacji, a następnie opracowanie algorytmu sterowania filtrem aktywnym, badania symulacyjne efektywności kompensacji, aż do zaprojektowania i wykonania fizycznego laboratoryjnego modelu aktywnego filtra mocy.

Można w związku z tym stwierdzić, iż tematyka rozprawy jest bardzo interesująca, aktualna i ważna – zarówno z naukowego, jak i technicznego punktu widzenia. Recenzowana praca obejmuje wiele zagadnień i zawiera wiele problemów naukowych i technicznych, nad którymi w ostatnich latach prowadzone są intensywne badania, a zagadnienie zastosowania teorii mocy w procesie sterowania filtrem aktywnym jest zagadnieniem trudnym i dotychczas całościowo nie rozwiązany. Tematyka rozprawy wpisuje się w ponadto w szerszy nurt jakości dostaw energii elektrycznej, ważny również w kontekście efektywności energetycznej systemów i urządzeń.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa liczy 190 stron i zawiera spis treści, wykaz ważniejszych symboli, oznaczeń i skrótów, a także 11 rozdziałów numerowanych, obejmujących wstęp, cel i zakres pracy oraz literaturę.

Doktorant zastosował ciekawy układ rozprawy, odważnie odbiegający od najczęściej spotykanego, w którym teza i zakres pracy nie pojawiają się jak zwykle na początku rozprawy, lecz umieszczone są w rozdziale 3 po wstępie (rozdział 1) oraz po rozważaniach dotyczących rozwoju teorii mocy (rozdział 2). Dzięki czemu czytelnik może odnieść wrażenie naturalnego rozwoju Doktoranta i zbudowaniu celu rozprawy dopiero po studiach literaturowych dotyczących teorii mocy. Należy uznać bardzo szczegółową charakterystykę teorii mocy, która objęła łącznie ponad 40 stron. W dalszej kolejności w rozdziale 4 Autor przedstawia rzeczywiste eksploracje i analizy poziomów zaburzeń występujących w układach zasilania typowych urządzeń stosowanych w energetyce górniczej. Wśród wybranych urządzeń znalazły się najważniejsze odbiorniki kopalnianych sieci elektroenergetycznych, jak układ maszyny wyciągowej o mocy 2MW zasilanej z układu prostownikowego 12-to pulsowego, kaskada podsynchroniczna służąca do zasilania wentylatora głównego przewietrzania, a także układ napędu posuwu kombajnu oraz wentylatora lutniowego zasilane z przemienników częstotliwości. Tym samym Autor skupia uwagę czytelnika na charakterystyce i skali zaburzeń występujących w układach kopalnianych. Dopiero w następnym kroku w rozdziale 5 Doktorant intonuje najważniejszy dla całości rozprawy wybór teoretycznych podstaw kompensacji i przedstawia algorytm sterowania aktywnym filtrem mocy oparty na teorii składowych fizycznych prądu prof. Czarneckiego. Dalszą konsekwencją są przedstawione w rozdziale 6 badania symulacyjne efektywności kompensacji mocy bierniej z wykorzystaniem filtra aktywnego z zadanym algorytmem sterowania, a także przedstawione w rozdziale 7 etapy zaprojektowania i wykonania fizycznego laboratoryjnego modelu aktywnego filtra mocy. Rozdział 8 obejmuje badania laboratoryjne efektywności pracy opracowanego filtra aktywnego z zadanym algorytmem sterowania. Rozprawę zamykają rozdziały 9 i 10, w których Autor zawarł odrębnie uwagi i wnioski końcowe oraz podsumowanie.

Za bardzo pozytywne element rozprawy należy uznać umieszczenie przez Doktoranta na końcu każdego z rozdziałów lokalnych podsumowań i wniosków szczegółowych odnoszących się do treści poruszanych w danym rozdziale.

Na szczególne wyróżnienie zasługuje bogaty przegląd literatury zawarty w rozdziale 11, obejmujący łącznie aż 247 pozycji. Należy zwrócić uwagę na zakres lat ujętych pozycji literaturowych. Większość zebranej literatury to pozycje stosunkowo nowe, co

świadczy o aktualnej wiedzy aplikacyjnej cytowanej przez autora. Jednocześnie Doktorant odniósł się do wybitnych pozycji literaturowych mających znaczący wkład w rozwój teorii mocy datowanych na lata 20-30-te oraz 80-te ubiegłego stulecia. Wśród cytowanych autorów znalazły się najważniejsze postacie krajowych i międzynarodowych środowisk naukowych i przemysłowych reprezentujące swoimi osiągnięciami tematykę rozprawy. Dobór pozycji literatury wskazuje, że Doktorant ma bardzo dobre rozeznanie w postępie prac nad zagadnieniami nowoczesnych technik kompensacji mocy biernej i eliminacji źródeł harmoniczných. Niestety nie zawsze prace są odpowiednio cytowane, a wielu pozycji literaturowych z nieznaných przyczyn nie zacytowano.

W rozdziale 1 (Wstęp) Doktorant nakreśla ogólną tematykę rozprawy, podaje zarys historyczny rozwoju kompensacji mocy biernej oraz zagadnień odkształceń napięć i prądów, charakteryzuje architekturę układów zasilania zakładów górniczych oraz związaną z tym problematykę zaburzeń jakości energii elektrycznej, wskazuje na rosnący poziom udziału odbiorników nieliniowych w tym przekształtników mocy zarówno w sieciach powierzchniowych jak i dołowych. Następnie Autor przedstawia wstępnie problematykę teorii mocy w przypadku układów o niesinusoidalnych napięciach i prądach oraz zarysowuje ogólną koncepcję zasady działania filtru aktywnego. Rozdział ten kończy uzasadnienie Doktoranta podjęcia badań dotyczących nowoczesnej kompensacji mocy biernej i eliminacji harmoniczných, w które autor wpisuje konieczność kompleksowego podejścia do zagadnienia kompensacji mocy biernej, w tym zaadoptowania teorii mocy „najbardziej przydatnej tak w sensie aplikacyjnym jak i w sensie logicznej interpretacji zachodzących zjawisk fizycznych”. Ponadto Doktorant wskazuje na istniejące obecnie rozwiązania wymieniając jednak ich ograniczenia dotyczące skuteczności kompensacji w obliczu asymetrii oraz odkształconych napięć zasilających. Należy uznać, iż rozdział ten w pełni oddaje motywację pracy.

Rozdział 2 (Przegląd wybranych teorii mocy) w całości należy uznać za jeden z elementów wkładu własnego Doktoranta. Doktorant podjął się niełatwego zadania systematycznego zestawienia podstaw najważniejszych teorii mocy rozwijanych na przełomie ostatnich 100 lat. Jakkolwiek rozdział dotyczy zagadnień udokumentowanych dorobkiem wielu twórców teorii mocy, to przedstawienie ich w pracy w ujęciu autorskim uważam za oryginalne i dużo wnoszące do zrozumienia strony matematycznej problemu. Należy również zauważyć, iż Doktorant zawarł zwięzłe podsumowanie przeglądu teorii mocy, przedstawiając wady i zalety poszczególnych technik, a jednocześnie wskazując na teorię mocy prof. Czarneckiego, jako wyłonioną w celu realizacji celu pracy. Ze względu na specyfikę oceny skuteczności kompensacji i eliminacji harmoniczných realizowanej za pomocą filtrów aktywnych, szkoda, że pracy nie dopełnia rozdział poświęcony przeglądowi metod redukcji harmoniczných.

W rozdziale 3 (Cel, teza i zakres pracy) Doktorant ukonstytuował cel, tezę i zakres pracy. Cel pracy jest właściwie określony i wpisuje się w aktualne tendencje zastosowania praktycznego teorii mocy w celu efektywnej kompensacji mocy biernej. Teza pracy mówi o tym, że „Poprzez odpowiedni dobór wartości prądu referencyjnego aktywnego filtra mocy możliwa jest realizacja efektywnej kompensacji mocy biernej w układach zasilających o odkształconych przebiegach prądów i napięć”. Teza pracy jest sformułowana poprawnie, choć drobne zastrzeżenie może budzić określenie „wartość prądu referencyjnego”, raczej powinno być „prądu referencyjnego”, gdyż mowa tu raczej o konstrukcji przebiegu prądu niż osiągnięciu konkretnej wartości.

Rozdział 4 (Badania i analiza przebiegów napięć i prądów w kopalnianych sieciach elektroenergetycznych) należy uznać za indywidualne osiągnięcia Doktoranta. Autor przedstawia przykładowe rzeczywiste przebiegi napięć i prądów występujące w układach zasilania typowych urządzeń górniczych oraz ich analizy widmowe. Rozdział zawiera: badania laboratoryjne układu zasilania wentylatora lutniowego zasilanego z przemiennika częstotliwości, badania układu maszyny wyciągowej z silnikiem o mocy 2 MW zasilanym z układu prostownikowego 12-to-pulsowego, badania wentylatora głównego przewietrzania zasilanego z przemiennika częstotliwości, badania silnika posuwu kombajnu zasilanego z przemiennika częstotliwości. Przedstawione przypadki świadczą o dobrej znajomości Doktoranta charakterystyki układów kopalnianych oraz identyfikacji kluczowych urządzeń górniczych wprowadzających zaburzenia do sieci elektroenergetycznej. Ponadto Doktorant udowodnił praktyczne umiejętności wykonywania pomiarów rzeczywistych z użyciem oscyloskopów i analizatorów jakości energii. Wszystkie rezultaty badań są opracowane w jednolity, uporządkowany sposób, choć większość rysunków, a zwłaszcza użyte czcionki stosowane w opisach osi i legendach rysunków są nieczytelne. Rozdział ten daje jednak czytelnikowi możliwość zrozumienia skali zaburzeń występujących w elektroenergetycznych sieciach kopalnianych, również dzięki szczegółowym analizom poszczególnych przypadków opisanych w tekście przez Autora. Z korzyścią dla pracy byłoby uzupełnienie analiz z użyciem zbiorczych zestawień tabelarycznych np. różnych poziomów zawartości harmoniczných w napięciu i prądzie w zależności od prędkości obrotowej silników, poziomu obciążenia, czy punktu pomiarowego w układzie zasilania.

Rozdział 5 (Wybór teoretycznych podstaw kompensacji i opracowanie algorytmu sterowania aktywnym filtrem mocy (APF)) Doktorant postanowił wyodrębnić w formie osobnego rozdziału. I słusznie, bowiem fragment ten należy uznać za jeden z najbardziej znaczących elementów rozprawy, decydujący o realizacji stawianej tezy. Doktorant w sposób obrazowy przedstawia schemat blokowy generacji prądu referencyjnego dla aktywnego filtra mocy bazujący na metodzie składowych fizycznych prądu prof. Czarneckiego.

Rozdział 6 (Opracowanie modeli i przeprowadzenie badań symulacyjnych efektywności kompensacji mocy biernej przy wykorzystaniu aktywnego filtra mocy) jest kolejnym elementem rozprawy stanowiącym o indywidualnym wkładzie Doktoranta w rozwój dziedziny. Na podstawie własnych modeli symulacyjnych Autor obrazuje etapy generacji poszczególnych składowych prądu referencyjnego sterującego aktywnym filtrem mocy w zależności od charakteru obciążenia, przechodząc kolejno od symetrycznego odbiornika RL, przez niesymetryczny odbiornik RL, do symetrycznego obciążenia odbiorami nieliniowymi w postaci mostka tyrystorowego obciążonego impedancją o charakterze RL. Jest to ważny rozdział obrazujący zasady przyjętego algorytmu sterowania aktywnym filtrem mocy w odwołaniu do składowych fizycznych prądu prof. Czarneckiego. Mankamentem rozdziału jest sposób prezentacji rezultatów oparty wyłącznie na rysunkach. Mnogość ilustracji utrudnia interpretację. Z korzyścią dla rozdziału byłoby zredukowanie liczby rysunków poprzez wykonanie rysunków porównawczych. Poza tym brakuje szerszej dyskusji nad definicją efektywności kompensacji przy wykorzystaniu filtra aktywnego. O skuteczności układów regulacji filtrów aktywnych świadczy nie tylko wychwycenie „poziomów” do skompensowania, co Doktorant wykazał, lecz również dynamiki, tj. odpowiedzi układu regulacji na zmiany dynamiczne. W tym rozdziale tego elementu zabrakło. Należy jednak stwierdzić, iż powyższe zastrzeżenia Doktorant z nawiązką uzupełnił w rozdziale 8 poświęconym badaniom skuteczności działania fizycznego modelu filtru.

W rozdziale 7 (Zaprojektowanie i wykonanie fizycznego laboratoryjnego modelu aktywnego filtra mocy) zawarto współczesne tendencje w budowie energetycznych filtrów aktywnych, wskazując na istotne elementy ich architektury, a przede wszystkim przedstawiono założenia projektowe oraz dobór urządzeń składowych do autorskiego modelu fizycznego aktywnego filtra mocy. Podoba mi się oszczędne, ale precyzyjne przedstawienie znaczenia i doboru kluczowych elementów filtra aktywnego, jak np. dobór pojemności i napięcia referencyjnego kondensatora układu zasilania części mocowej, dobór indukcyjności dławików sprzęgających, dobór parametrów filtra częstotliwości łączeniowej oraz układów regulacji napięcia kondensatora, czy regulacji prądu kompensującego. Jednocześnie należy podkreślić szeroką gamę narzędzi sprzętowo-programowych, które Doktorant zastosował w celu realizacji sterowania filtrem. Mowa to o konsolidacji środowisk Matlab/Simulink, a przede wszystkim bibliotek z grupy Real Time, z systemem szybkiego prototypowania dSPACE, dzięki czemu Doktorant uzyskał integrację odpowiednich składników sprzętowych. Dodatkowym elementem jest wykorzystanie pakietu Control Desk w celu realizacji graficznego interfejsu panelu operatorskiego, co wnosi dodatkowe możliwości monitorowania wybranych zmiennych i wprowadzenia zmian parametrów w trybie on-line. Należy z całym przekonaniem stwierdzić, iż przedstawione treści wskazują na szeroką praktyczną wiedzę Doktoranta w zakresie budowy i zasady działania filtrów aktywnych, a zrealizowany model fizyczny filtra jest kluczowym indywidualnym osiągnięciem Autora tym bardziej, że blok sterowania zawiera elementy realizujące algorytm wg wybranej teorii składowych fizycznych prądu.

Rozdział 8 (Badania laboratoryjne efektywności pracy opracowanego aktywnego układu kompensacji mocy biernej) omawia badania laboratoryjne opracowanego modelu równoległego aktywnego filtra mocy z wykorzystaniem specjalnie przygotowanego stanowiska laboratoryjnego, umożliwiającego przeprowadzenie testów pracy filtra aktywnego w realiach wybranych konfiguracji pracy obciążenia. W mojej ocenie wybór przypadków testowych i forma prezentacji wyników jest znacząco lepsza niż w przypadku badań symulacyjnych. Doktorant skupił się na odbiorniku nieliniowym badając poprawność kompensacji w warunkach pracy ustalonej przy zmianie widma harmonicznym w prądzie i współczynnika mocy uzyskane przez zmianę kąta wysterowania tyrystorów prostownika odbiornika, oraz dokonując oceny kompensacji mocy biernej, symetryzacji i redukcji harmonicznym w przypadku odbiornika nieliniowego i niesymetrycznego. Ponadto, Doktorant w zamieszczonych badaniach laboratoryjnych zaprezentował wyniki skuteczności kompensacji w stanach przejściowych, przez co poświadczył o swojej wiedzy dotyczącej specyficznych wymagań stawianych zdolnościom szybkiego reagowania filtrów aktywnych na zmiany wywołwane przez odbiorniki. Zaprezentowana analiza reakcji badanego modelu filtru aktywnego na skokową zmianę kąta wysterowania tyrystorów prostownika poświadcza wystarczającą dynamikę układu regulacji spełniającą spotykany w literaturze wymóg 5-20ms. Można zatem stwierdzić, iż zaprezentowane rezultaty potwierdzają poprawność przyjętej przez Autora tezy rozprawy. Szkoda, że nie zawarto bardziej szczegółowych badań reakcji filtru na dynamikę zmian wartości prądu odbiornika „di/dt” czy elementów oceny zaburzeń tzw. „ripple” wprowadzanych do sieci. Ważnym elementem mogłoby być również porównanie regulacji opartej na zaimplementowanej w prezentowanym rozwiązaniu teorii składowych fizycznych prądu prof. Czarneckiego z wynikami implementacji innej teorii mocy np. Akagi, Kanazawa, Nabae. Ten ważny rozdział z pewnością stanowi więc przyczynek do dalszych badań i rozszerzenie rezultatów przedstawionych w rozprawie.

W rozdziałach 9 (Uwagi i wnioski końcowe) oraz 10 (Podsumowanie) Doktorant zestawiał syntetycznie najważniejsze obserwacje i wyniki badania filtra aktywnego z regulacją wykorzystującą teorię składowych fizycznych prądu.

Rozdział 11 (Literatura) obejmuje bogaty spis 247 pozycji literaturowych. Należy stwierdzić, że są one właściwie dobrane, świadczą o szerokim rozeznaniu Doktoranta w pozycjach literaturowych dotyczących zarówno teorii mocy jak i współczesnych kierunków rozwoju filtracji aktywnej. Nie zawsze prace są odpowiednio cytowane. Wiele pozycji z nieznanymi przyczynami nie zacytowano.

3. Elementy oryginalne rozprawy

Za najważniejszy dorobek własny (oryginalny) Autora rozprawy uważam:

- Syntetyczne opracowanie i przedstawienie teorii mocy wraz z dyskusją szeregu aspektów teoretycznych i praktycznych.
- Wykonanie pomiarów rzeczywistych i przeprowadzenie analiz widmowych oraz oceny dynamiki zmian reprezentatywnych dla sieci kopalnianych odbiorników górniczych.
- Twórcza dyskusja w zakresie wyboru teorii mocy w świetle charakterystyki pracy górniczych sieci elektroenergetycznych i opracowanie algorytmu sterowania aktywnym filtrem mocy z wykorzystaniem teorii składowych fizycznych prądu prof. Czarneckiego.
- Opracowanie modeli i przeprowadzenie badań symulacyjnych efektywności kompensacji mocy biernej przy wykorzystaniu modelu symulacyjnego aktywnego filtra mocy.
- Zaprojektowanie i wykonanie fizycznego laboratoryjnego modelu aktywnego filtra mocy.
- Szerokie badania laboratoryjne skuteczności pracy opracowanego fizycznego laboratoryjnego modelu aktywnego filtra mocy pod względem eliminacji harmonicznych, kompensacji mocy biernej, symetryzacji obciążenia, dynamiki regulacji.

4. Uwagi dyskusyjne i komentarze

Należy podkreślić dobry i dojrzały styl w jakim zredagowana jest praca, choć było to niełatwe zadanie ze względu na znaczącą liczbę wzorów matematycznych, charakterystykę architektury elektroenergetycznych sieci górniczych, a jednocześnie specyfikę językową określeń typowych dla praktycznej realizacji sprzętowo-programowej energetycznych filtrów aktywnych.

Moim zdaniem, Autor mógł przywiązać większą wagę do edycji rysunków. Wiele z nich ma nieczytelne osie oraz legendy. Dobra praktyka edytorska wskazuje na potrzebę eksportu danych do środowisk typu MS Excel, Matlab w celu przygotowania rysunków, a nie wykorzystywania bezpośrednio rysunków ze środowisk pomiarowych.

Jak na rozmiar rozprawy, łącznie 190 stron, oraz zakres podjętych zagadnień, zauważyłem w pracy niewielką liczbę nieścisłości i usterek redakcyjnych. Z całym przekonaniem stwierdzam, iż nie wpływają one moją na ogólną ocenę rozprawy. Dla porządku poniżej zestawiam niektóre z zauważonych usterek redakcyjnych oraz wybrane szczegółowe uwagi i pytania merytoryczne, które nasuwają się przy czytaniu rozprawy, mając nadzieję, iż będą przyczynkiem do rozwoju dalszych prac badawczych Autora.

4.1. Wątpliwości, uwagi i pytania merytoryczne

1. Wątpliwości budzi sposób cytowania pozycji literaturowych. Dobrą praktyką jest skrótowe podanie wkładu cytowanej pozycji literaturowej w obrębie omawianego fragmentu tekstu. Doktorant zaś w wielu przypadkach odnosi się ogólnie do wielu pozycji literaturowych jak np. w rozdziale 2, str. 20 mówiąc o teorii mocy podaje odniesienie do [20], [38], [98], [110], [135], [180], [182], [191], [192], [193], [203], [227], [231]. Nie jest jasne dlaczego Autor cytuje poszczególne pozycje literaturowe. Dla przykładu referencja pozycji [20] dotycząca „Synchronous Frame Harmonic Isolator Using Active Series Filter” jest stosowna przez Autora w kontekście rozwoju teorii mocy.
2. Rozdział 2, str. 23, akapit 3, cytowana praca prof. Czarneckiego [43] raczej powinna być pracą [48]. Czy zdaniem Doktoranta, przy powszechnie dziś dostępnych możliwościach analizy Fourierskiej, podejście częstotliwościowe do analizy obwodów z niesinusoidalnymi przebiegami napięć i prądów jest wciąż „bezużyteczne tak pod względem poznawczym jak i praktycznym”?
3. Rozdział 2. Teoria mocy Depenbrocka została wprowadzona przed teorią Kusters’a i Moore’a, porządkowo podrozdział 2.5 powinien być ulokowany jako 2.4, i odwrotnie.
4. Rozdział 2, str. 28, równanie 2.29 należałoby uzupełnić o stwierdzenie, iż moc bierna Q_c może mieć generalnie znak ujemny bądź dodatni w zależności od znaku iloczynu skalarnego ($du/dt, i$). Czy Doktorant nie uważa, że należało podać również wyrażenie na pojemność optymalną zdefiniowaną przez Kusters’a i Moore’a w dziedzinie czasu, tak jak podają to Shephard i Zakichani w dziedzinie częstotliwości?
5. Rozdział 2, str. 28, ostatni akapit, w cytowanej pracy [50] nie znajduje się wywodu o częściowej kompensowalności prądu i_{rcs} związanego z tzw. uzupełniającą mocą bierną. Wywód ten znajduje się w innej pracy prof. Czarneckiego.
6. Rozdział 2. Wątpliwość budzi cytowanie w akapicie 3, na stronie 30 pracy [203] w kontekście teorii FBD (Fryze-Bucholz-Depenbrock). Czy nie powinna być praca [202]?
7. Rozdział 2, Str. 34, 35 oraz wyrażenia 2.50÷2.53 mam wątpliwości co do użytego przez Autora określenia: chwilowe prądy aktywne i reakcyjne, i dalej chwilowe moce aktywne i reakcyjne. W krajowym tłumaczeniu używa się raczej składowa czynna i składowa bierna.
8. Rozdział 2, podrozdział 2.7, teoria mocy Czarneckiego. Domeną teorii składowych fizycznych prądów prof. Czarneckiego jest występowanie poszczególnych składowych prądów w zależności od fizycznego charakteru obwodu tj: budowy obwodu (1 fazowy, 3 fazowy), stopnia niesymetrii odbiornika (odbiornik symetryczny, niesymetryczny), udziału harmonicznyc w napięciu zasilającym, generacji harmonicznyc w prądzie odbiornika, ewentualnie niesymetrii napięć zasilających. W podrozdziale 2.7 Autor stara się budować poszczególne etapy adaptacji od obwodów jednofazowych, aż do formy najbardziej rozwiniętej pięciu składowych prądów (2.105) $i = i_a + i_s + i_r + i_u + i_B$. I jest to słuszne, tak jak rozwijał swą teorię jej Autor na przełomie lat 80-90tych. Jednak Doktorant nie podał definicji mocy odpowiadających poszczególnym pięciu składowym prądów wg omawianej teorii. Doktorant nie podał również definicji współczynnika mocy źródła zasilania wg. teorii prof. Czarneckiego. Szkoda, że ślad za tym Doktorant nie rozwinął przykładowej możliwości wykorzystania teorii do syntezy pasywnych kompensatorów oraz dla

konstrukcji i sterowania kompensatorami adaptacyjnymi [37], lub dla minimalizacji prądu biernego i prądu niezrównoważenia [39].

9. Rozdział 2, podrozdział 2.8, teoria mocy Parka, Ferrero Superti-Furga. Podano odwołanie do pozycji literaturowych [74], [75]. Czy nie powinno być [73],[74]? Dla spójności można było podać macierz transformacji Parka, tak jak podano macierz transformacji Clarka stosowaną w teorii Akagi, Kanazawa, Nabae.
10. Rozdział 2, podrozdział 2.16, str.70, komentarz do wzoru 2.223, dlaczego Doktorant uważa, iż zdefiniowanie klasycznej chwilowej mocy czynnej „p” przez Akagi, Kanazawę i Nabae za pomocą współrzędnych α - β „nie wnosi nic nowego do teorii mocy, poza zamieszczeniem”? Czy idea reprezentacji obwodu w innym układzie niż fazowy, nie jest godna zainteresowania, tym bardziej, że wnoszone przez twórców definicje mocy p, q, prowadzą do możliwości generacji prądów kompensujących w układzie współrzędnych α - β , które po przetransformowaniu do układu fazowego dają możliwość generacji fazowych prądów kompensujących. Wyrażenie
$$i = i_p + i_q + i_h + i_{2fl}$$
 stała się podstawą sterowania aktywnymi filtrami mocy.
11. Rozdział 4, podrozdział 4.2, str. 81, czy gdy mowa o użytym analizatorze parametrów sieci czy nie chodziło raczej o firmę Dranetz i produkt PowerVisa?
12. Rozdział 4, podrozdział 4.2, str. 82 oraz rysunek 4.11: Powstaje pytanie dlaczego Doktorant uznał wskazane punkty A,B,C,D za szczególne pod względem charakterystyki zmienności harmonicznych. Szkoda, że Doktorant nie powołał się na uznaną pozycję literaturową Szklarski L., Zarudzki J., „Elektryczne maszyny wyciągowe”, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1998, i nie przedstawił wykresu siedmiookresowego lub pięciookresowego wykresu jazdy maszyny wyciągowej (skipu). Wtedy charakterystyczne punkty A,B,C,D, można powiązać z fizycznym trybem pracy obiektu oraz poszczególnymi czasami cyklu pracy. Z korzyścią dla tego ważnego przykładu byłoby dodać legendę użytych oznaczeń literowych i ich rozwinięcie typu: schodzenie z krzywek, rozruch, jazda ustalona, hamowanie, wchodzenie w krzywki.
13. Rozdział 4, podrozdział 4.2, str. 85-87. Ze względu na deklarowaną dostępność pomiarów w różnych punktach układu zasilania maszyny wyciągowej P1÷P5, w podsumowaniu zabrakło zestawienia tabelarycznego np. współczynników THDU lub THDI w poszczególnych cyklach pracy A,B,C,D, dla poszczególnych punktów pomiarowych.
14. Rozdział 4, podrozdział 4.3 rys. 4.22 ÷ 4.25, nie jest jasne jakiej prędkości obrotowej odpowiadają przedstawione przykłady i analizy. W tekście mowa o dwóch prędkościach: $0.4n_n$ oraz n_n .
15. Rozdział 4, podrozdział 4.4 i 4.5. Ponownie zabrakło zestawienie tabelarycznego przedstawiającego udział harmonicznych w napięciu i prądzie w powiązaniu z prędkością obrotową silnika.
16. Rozdział 6. Z podsumowania teorii mocy zawartym w podrozdziale 2.16 oraz z wyodrębnionego w strukturze pracy rozdziału 5, poświęconego wykorzystaniu teorii składowych fizycznych prądu prof. Czarneckiego, jawi się czytelnikowi obraz uniwersalnego narzędzia wykorzystującego rozkład prądu na pięć składowych, zależnie od budowy i charakteru pracy obwodu, które mogą być niezależnie kompensowane. Przy zachowaniu prądu aktywnego, Doktorant wykorzystuje wskazaną teorię do budowy prądu referencyjnego opartego na identyfikacji prądu rozrzutu, prądu biernego, prądu niezrównoważenia, prądu generowanego. Dlaczego w badaniach symulacyjnych nie uwzględniono przypadku

niesinusoidalnego symetrycznego źródła zasilania. Nie uwzględniono również zmian dynamicznych obciążenia co stanowi jeden z elementów badań efektywności (skuteczności) kompensacji i eliminacji harmonicznych.

17. Rozdział 6. Dlaczego prezentowane widma prądu, napięcia są „rozmyte”. W podrozdziałach 6.1 oraz 6.2 w obwodach mamy do czynienia tylko z podstawową harmoniczną w prądzie i w napięciu, a w podrozdziale 6.3 z charakterystycznymi składowymi prądu dla falownika 6-pulsowego. Jak wysterowano algorytm FFT, jaka jest częstotliwość próbkowania, liczba próbek wziętych do analizy (okno pomiarowe) i tym samym rozdzielczość DFT (FFT), czy w stosowaniu analizy Fourierskiej uwzględniono zasadę tzw. „próbkowania synchronicznego do częstotliwości bazowej” przyjętej np. w standardzie IEC 61000-4-7. Z tej wątpliwości rodzi się kolejne pytanie, czy wobec istniejących (co przedstawiają rysunki) innych składowych w widmie napięć i prądów niż harmoniczna podstawowa lub harmoniczne charakterystyczne, punkt 2 algorytmu nie powinien powodować wyznaczania mocy poszczególnych harmonicznych, a co za tym idzie prądu rozrzutu i innych składowych w prądzie biernym niż składowa o częstotliwości podstawowej? Być może algorytm do generacji prądów wykorzystywał jedynie identyfikację wartości maksymalnych, ale nie zawarto tego stwierdzenia odnośnie do tej części pracy.
18. Rozdział 6 pełni ważną rolę ilustrującą wpływ aktywnego filtra mocy. Mnogość rysunków ilustrujących utrudnia jednak interpretację. Doktorant mógł dokonać próby rysunków porównawczych np. na przykładzie jednej fazy prądu obciążenia, prądu aktywnego, prądu biernego, prądu niezrównoważenia i prądu po kompensacji, a wartości mocy, $\cos\varphi$ przed i po kompensacji przedstawić jako wartości, parametry. Jako przykład może posłużyć rys. 6.6 zawierający 15 rysunków (a-n), przy czym trudności w interpretacji pojawiają się nawet w opisach rysunków np. c) przebiegi prądów fazowych aktywnego filtra mocy, f) przebiegi prądów referencyjnych obciążenia źródła (zadanych) w fazach L1, L2, L3 – czy to nie to samo?. W rysunku 6.13 Autor stosuje oznaczenie chyba najbardziej trafne: l) przebiegi prądów kompensujących (aktywnego filtra mocy) w fazach L1, L2, L3.
19. W uwagach i wnioskach w podrozdziale 6.4 Autor pisze: „Przeprowadzone badania symulacyjne, dla układów elektrycznych z odbiorami o różnym charakterze (liniowych, symetrycznych, niesymetrycznych, nieliniowych) zarówno przy sinusoidalnych jak i niesinusoidalnych przebiegach napięć zasilających, potwierdziły poprawność i przydatność wybranej i zastosowanej teorii mocy...”. Dlaczego nie dołączono przykładu z niesinusoidalnymi przebiegami napięć zasilających?
20. W rozdziale 6 zabrakło definicji efektywności (skuteczności) kompensacji. Autor sam w podrozdziale 6.3 wskazuje na znaczenie charakteru pracy odbioru pisząc: „przyjęto odbiór nieliniowy w postaci prostownika tyrystorowego (ze zmiennym kątem opóźnienia przewodzenia α) obciążonego impedancją o charakterze RL, której parametry również podlegały wariantowym zmianom”. Świadczy to o wycuciu Doktoranta i wiedzy o wymaganiach stawianych wrażliwości i dynamice układów regulacji filtrów aktywnych. Zmiana kąta przewodzenia w układach tyrystorowych powoduje inny skład harmonicznych w prądzie, a zmiany obciążenia inne poziomy mocy do skompensowania. Ale o skuteczności układów regulacji filtrów aktywnych świadczy nie tylko wychwycenie „poziomów” do skompensowania, co Doktorant wykazał, lecz również dynamiki, tj. odpowiedzi regulacji na zmiany dynamiczne. W tym rozdziale tego elementu zabrakło, choć wymienione elementy z nawiązką znajduje czytelnik w rozdziale 8, poświęconym badaniom modelu fizycznego filtra.

21. Rozdział 7, podrozdział 7.3.7, str. 145, 146 - nie podkreślono wystarczająco wyraźnie zależności częstotliwości kluczowania filtra aktywnego f_{sw} (tzw. częstotliwość łączeniowa) oraz częstotliwości próbkowania f_p , z rzędem kompensowanych harmonicznych.
22. W rozdziale 8 nie podjęto rozszerzonych badań np. oceny ograniczeń zamodelowanego filtra ze względu na współczynnik szczytu prądu obciążenia, stromość narastania prądów obciążenia. Odniesienie do projektowanych wartości pojemności w układzie mocowym filtra oraz indukcyjności sprzęgających wraz z testami pomiarowymi dałyby czytelnikowi obraz ograniczeń energetycznych filtra. Innym elementem wartym rozszerzenia mogłaby być ocena zaburzeń tzw. „ripple” wprowadzanych do sieci, a pochodzących z kluczowania tranzystorów filtra, w odniesieniu do indukcyjności dławików sprzęgających, mających jednocześnie wpływ na ich tłumienie, ale również na dynamikę filtra. Kolejnym fragmentem rozszerzonej oceny mogłaby być analiza wpływu filtra aktywnego na ograniczenie głębokości zapadów podczas zmian dynamicznych obciążenia. Ważnym elementem mogłoby być również porównanie regulacji opartej na zaimplementowanej w prezentowanym rozwiązaniu teorii składowych fizycznych prądu prof. Czarneckiego z inną teorią mocy np. Akagi, Kanazawa, Nabae. Czy prowadzono prace w tym kierunku?
23. Nie znane są przyczyny braku cytowań wielu pozycji literaturowych. Jako przykład przeglądu 50 pierwszych pozycjach literaturowych podaję przykłady kilkunastu braku cytowań: [1], [3], [14], [21], [23], [28], [30], [31], [33], [34], [40], [46], [49], co niestety stanowi ponad 20% braku cytowań.

4.2. Usterki redakcyjne

1. Rozdział 1, str. 13, akapit nad wzorem 1.6: jest „wielkość prądów rozruchowych jest krotnością prądu rozruchu”, winno być krotnością prądu znamionowego jako podaje 1.6.
2. Rozdział 1, str. 14, akapit 6, jest: „...we wspólnych częściach sieci”, winno być częściach.
3. Rozdział 1, str. 18, akapit 1 równanie bez numerowania, prąd i_L reprezentuje odkształcony prąd odbioru nieliniowego zawierający n harmonicznych jest $i_L = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \sum \sqrt{2} I_n \cdot \sin(\omega t + \phi_n)$ winno być $i_L = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \sum \sqrt{2} I_n \cdot \sin(n\omega t + \phi_n)$.
4. Rozdział 2, str. 21, Rys 2.1, admitancja odbioru dla harmonicznej o numerze h powinna być ogólnie przestawiona jako liczba zespolona. Zatem poprawniej należałoby zapisać $\underline{Y}_{Lh} = G_{Lh} + jB_{Lh}$.
5. Rozdział 2, str. 21 Wyrażenie 2.1 i 2.2 przedstawiające rozwinięcie napięć i prądów sygnałów rzeczywistych wydaje się nieprecyzyjne. Jeśli zgodnie z tabelą symboli i oznaczeń oraz podpisem pod wzorem przyjmując U_h , I_h jako wartość skuteczną h -tej harmonicznej napięcia i prądu to w wyrażeniu na szereg Fouriera brak elementu fazy h -tej harmonicznej ϕ_h . Nie wiadoma jest też zmienna w w wykładniku funkcji wykładniczej zespolonej $j h w \omega_1 t$. Wydaje się, że poprawnie winno być: $u(t) = U_o + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} \underline{U}_h \cdot e^{j(h\omega_1 t + \phi_h)}$, lub $u(t) = U_o + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} \underline{U}_h \cdot e^{j h \omega_1 t}$, $\underline{U}_h = U_h e^{j\phi_h}$.
6. Rozdział 2, przypisy do wyrażenia 2.3, 2.4 - podobnie nieprecyzyjny zapis dotyczy $\phi_h = \sphericalangle (U_h, I_h)$, winno być raczej $\phi_h = \sphericalangle (\underline{U}_h, \underline{I}_h)$. Z przedstawionych uwag nasuwa się

wniosek, iż Autor pod oznaczeniem X_h widzi liczbę zespoloną, fazor, natomiast stosując oznaczenie x reprezentuje przebieg sygnału, \mathbf{x} – przedstawia matematyczny wektor zbudowany z trzech sygnałów fazowych x_a, x_b, x_c . Lecz w tabeli oznaczeń istnieją wyróżniające zapisy „ X_h - wartość skuteczna harmonicznej h-tej rzędu wielkości X ”, „ \underline{X}_h wartość zespolona harmonicznej h-tej rzędu wielkości X ”. Dalsze zakłopotanie rodzą kolejne oznaczenia „ \mathbf{X} - wartość skuteczna wielkości x ”, co można interpretować jako wartość skuteczną przebiegu x , ale taka interpretacja staje w konfrontacji z następnym oznaczeniem „ \mathbf{x}^* - wartość sprzężona wielkości zespolonej x ”.

7. Rozdział 2, str. 24, wyrażenie 2.12, Autor wprowadził oznaczenie „prądu Fryzego” jakot $i_{iF}(t)$, ale następnie w wyrażeniu 2.13 zmienił na $i_{rF}(t)$, by wreszcie na stronie 25 w wyrażeniu 2.15 użyć i_b . Czy nie mowa o tym samym, o składowej biernej prądu zaproponowanej przez Fryzego.
8. Rozdział 2, str. 25, wyrażenie 2.16, czy nie powinno być raczej Q_F^2 ?
9. Rozdział 2, str. 26 wyrażenia 2.18, 2.19, oraz przypisy do 2.20 – brak zmiennej czasu „ t ”, np. jest $i = \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cdot \cos(h\omega_1 - \beta_h)$, , winno być $i = \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cdot \cos(h\omega_1 t - \beta_h)$, .
Ponadto, co oznacza faza oznaczona jako x_h we wzorze na składową bierną prądu i_r , czy nie powinno być β_h ?

10. Rozdział 2, str. 27, równanie 2.25, jest $i_{rc} = \frac{du}{dt} \cdot \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{du}{dt} \cdot idt}{\left\| \frac{du}{dt} \right\|^2}$, winno być

$$i_{rc} = u(t) \cdot \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{du}{dt} \cdot idt}{\left\| \frac{du}{dt} \right\|^2} , .$$

11. Rozdział 2, Str. 29, w wyrażeniu 2.32 jest $i_{IV} = \left(\frac{P_1}{\|u_1\|^2} - \frac{P_1}{\|u\|^2} \right) \cdot u_1$, , winno być

$$i_{IV} = \left(\frac{P_1}{\|u_1\|^2} - \frac{P}{\|u\|^2} \right) \cdot u_1 ,$$

12. Rozdział 2, str. 35, wyrażenie 2.54, niefortunne użycie zapisu macierzowego $\begin{bmatrix} p_\alpha \\ p_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & i_\alpha \\ e_\beta & i_\beta \end{bmatrix}$, nie jest to macierz 2x2 lecz 2x1 składająca się z iloczynów $\begin{bmatrix} p_\alpha \\ p_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha \cdot i_\alpha \\ e_\beta \cdot i_\beta \end{bmatrix}$.

13. Rozdział 2, str. 35, wyrażenie 2.55, brakuje znaku + przy ostatnim składniku sumy $= \frac{e_\alpha^2}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \cdot p + \frac{e_\beta^2}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \cdot p + \frac{-e_\alpha \cdot e_\beta}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \cdot q + \frac{e_\alpha \cdot e_\beta}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \cdot q$.

14. Rozdział 2, str. 34, wyrażenie 2.46, w wyrażeniu na chwilową moc urojoną powinien być użyty iloczyn wektorowy (oznaczenie „ \mathbf{x} ”, nie „ \cdot ”)
15. Rozdział 2, podrozdział 2.12, str. 57, tytuł podrozdziału 2.12, jest :extrensiion p-q”, winno być extension.

16. Rozdział 4 i inne. Prezentowane rysunki przedstawiające przebiegi napięć i prądów oraz ich widma są nieczytelne. Wydaje się, że Doktorant kopiował rysunki wprost z oprogramowania przyrządów pomiarowych. Znacznie lepszą praktyką edytorską mógł Doktorant uzyskać poprzez wyeksportowanie danych do środowiska MS Excel lub Matlab i przygotowanie rysunków w ujednoczonej, czytelnej formie.
17. Rozdział 5, str. 96, 97 wyrażenia 5.1, 5.2, 5.6. Oznaczenie numeru harmonicznej winno być ujednoczone do „h”, w końcu wzoru występuję niepotrzebnie „n”.
18. W rozdziale 7 Autor zamiennie stosuje oznaczenie równoległego energetycznego filtra aktywnego (skrót REFA, czasem EFA) z jego odpowiednikiem anglojęzycznym active power filter (skrót APF). Należałoby ujednoczyć stosowany skrót.
19. W spisie literatur napotkać można na wiele błędów redakcyjnych:

Przykłady:

Pozycja literaturowa [22] jest „Harmonic reduction in multiple converters ...”, winno być multiple converters,

Pozycja literaturowa [130] jest: „Prostownik diodowy o małym współczynniku THD prądów zasilających”, winno być prądów.

Pozycja literaturowa [209] jest: „Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy”, winno być poprawy.

Pozycja literaturowa [215] jest „Cooperative design and control of distributed harmonic and reactive kompensator”, winno być design, compensator.

I inne: instatntenous zamiast instantaneous , reactice zamiast reactive, harmonice zamiast harmonic, induktor zamiast inductor, lineał zamiast linear, dunder zamiast under itp.

5. Ocena końcowa rozprawy

Przechodząc do ogólnej oceny rozprawy stwierdzam, że **postawiony cel oraz zakres pracy zostały przez Doktoranta osiągnięty**. Sposób rozwiązania problemów postawionych w rozprawie wskazuje na bardzo dobre opanowanie i zrozumienie przez Autora wielu różnorodnych zagadnień, co było konieczne przy realizacji pracy doktorskiej. Doktorant wykazał się dużą wiedzą, nie tylko teoretyczną, ale również praktyczną, co pozwoliło przejść pełen proces od wyboru metody regulacji, badań symulacyjnych, aż do fizycznego modelu aktywnego filtra mocy. Przeprowadzone badania przyniosły rezultaty, które można uznać za pozytywne efekty ocenianej rozprawy.

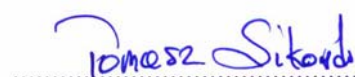
Uwagi wniesione przy ocenie głównych rezultatów rozprawy oraz zamieszczone komentarze oraz pytania szczegółowe nie wpływają na moją ocenę recenzowanej rozprawy, która jest **jednoznacznie pozytywna**. Uważam, że rozprawa ta wnosi **istotny wkład do rozwoju dziedziny filtracji aktywnej, która ze względu na charakterystykę środowiskową elektroenergetycznych sieci kopalnianych ma szczególne znaczenie w układach zasilania urządzeń górniczych**.

6. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Juliana Wosika stanowi **oryginalne podejście do rozwiązania interesującego, aktualnego i bardzo ważnego dla praktyki problemu naukowego, związanego z ponad 100-letnią historią rozwoju teorii mocy**. Przedstawione przez Doktoranta rezultaty są interesujące, wnioski są logiczne, pokazują zalety badanego rozwiązania, tym samym udowadniając postawioną tezę rozprawy. Recenzowana rozprawa wykazuje ponadto **odpowiednią ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej Elektrotechnika** oraz umiejętność samodzielnego konstituowania metodyki badań i prowadzenia pracy naukowej.

Stwierdzam, że rozprawa opracowana przez mgr inż. Juliana Wosika **spełnia wymagania** stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (Dziennik Ustaw nr 65, poz. 595) wraz z jej późniejszymi nowelizacjami. **Stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony**.

Jednocześnie biorąc pod uwagę bardzo wysoki poziom merytoryczny opracowania i osiągnięte wyniki stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy.



Tomasz Sikorski