

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Pawła Albrechtowicza

I. Informacje wstępne

1. Recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Pawła Albrechtowicza pt.:

*Zastosowanie przesuwników fazowych do regulacji rozpyłów mocy
w systemach elektroenergetycznych*

Promotorem doktoratu jest Pan dr hab. inż. Jerzy Szczepanik, prof. PK, a Promotorem pomocniczym Pan dr. inż. Bartosz Rozegnał. Rozprawa została przygotowana na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki.

2. Podstawę dla przygotowania niniejszej recenzji stanowi pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki Pana dr hab. inż. Macieja Sułowicza prof. PK. L.Dz. E-00.0021.4.11.2022 z dnia 29.04.2022 r., w związku z uchwałą nr 5/2022 Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki z dnia 20.04.2022 r. w sprawie powołania Recenzentów w/w rozprawy.

II. Opis ogólny rozprawy

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Pawła Albrechtowicza liczy ogółem, wraz z załącznikami, 143 strony. W części głównej rozprawa zawiera:

- spis treści;
- wykaz oznaczeń i symboli;
- 8 numerowanych rozdziałów, obejmujących kolejno:
 - *Wprowadzenie*, z opisem tematu oraz określeniem celu i zakresu rozprawy;
 - dwa rozdziały ogólne, dotyczące kontroli rozpyłu mocy w liniach przesyłowych (Rozdział 2) oraz zastosowania regulacji napięć dla potrzeb kontroli rozpyłu mocy (Rozdział 3);
 - opis koncepcji, projektu, elementów składowych i stanów pracy laboratoryjnego układu 2-transformatorowego przesuwnika fazowego (wg projektu Autora),

Biurowisko Dziekana Wydziału
Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej
Wpłynęło dnia 29.07.2022
Nr dz. E-001218/2022 podpis 

- z układami sterowania umożliwiającymi dokonywanie niezależnej regulacji napięcia wzdłużnego i napięcia poprzecznego (Rozdział 4);
- opis laboratoryjnego stanowiska badawczego z modelem systemu elektroenergetycznego (SEE), w którym testowano przesuwnik fazowy oraz opis modelu przygotowanego dla potrzeb symulacji numerycznych i zastosowanej podczas badań metody obliczania rozptyłów mocy w modelowym SEE (Rozdział 5);
- opis badań laboratoryjnych przesuwnika fazowego o zaproponowanej konstrukcji w układach laboratoryjnej sieci modelowej o różnych topologiach i konfiguracjach wraz z prezentacją ich wyników (Rozdział 6);
- opis programu i wyników badań symulacyjnych dla różnych topologii i konfiguracji, odpowiadających testowanym dla modelu laboratoryjnego oraz wyników obliczeń rozptyłów mocy dla 5-węzłowego modelowego SEE (Rozdział 7);
- 3-stronnicowe *Podsumowanie*, w którym Autor pracy pokrótce streszcza i dokonuje własnej oceny wykonanych prac badawczych, wymieniając na zakończenie ich najważniejsze. Jego zdaniem, rezultaty (Rozdział 8);
- spis źródeł literaturowych, z których Autor korzystał podczas przygotowania rozprawy.

Podstawowy materiał pracy jest uzupełniony dwoma załącznikami:

- *Załącznik A* zawiera zestawienie parametrów dla 5-węzłowego modelu SEE, zastosowanego dla dokonania obliczeń i porównań rozptyłów mocy przy braku przesuwnika fazowego oraz z zastosowaniem proponowanego przesuwnika fazowego lub klasycznego przesuwnika asymetrycznego;
- *Załącznik B* zawiera opis parametrów technicznych elementów składowych stosowanego w badaniach laboratoryjnych układu pomiarowego, tj. karty pomiarowej, różnicowych sond napięciowych oraz cęgów prądowych.

Wymieniony już spis źródeł literaturowych rozprawy (*Bibliografia*, str. 131-138) obejmuje ogółem 80 pozycji. Doktorant cytuje, m.in.:

- 5 publikacji typu książka, monografia, podręcznik lub skrypt;
- 22 publikacje typu artykuł w czasopiśmie naukowym lub branżowym;
- 20 referatów konferencyjnych;
- 8 raportów, sprawozdań, instrukcji;
- 2 normy (PN-EN i IEEE);
- 4 patenty;
- 19 innych, w tym np. materiały wykładowe, rozprawy doktorskie i autoreferat habilitacyjny.

Prezentowane w rozprawie treści teoretyczne, obiekty i stanowisko badań laboratoryjnych oraz uzyskane podczas badań wyniki są ilustrowane 112 rysunkami, a związane z nimi dane zebrane w ogółem 20 tabelach.

Ogólny układ i struktura pracy oraz kolejność rozdziałów są poprawnie zaplanowane, adekwatnie do charakteru i tematyki pracy. Jest to układ typowy dla tego typu opracowań. Oczywiście, inną kwestią jest to, czy struktura ta została wypełniona właściwą i w pełni poprawną zawartością merytoryczną (patrz: punkt IV recenzji).

Zgodnie z wymogami ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z 20 lipca 2018 roku (Dz. U. 2018 poz. 1668, z późn. zm.) Kandydat do stopnia doktora przedstawiając rozprawę w języku polskim winien dołączyć do niej streszczenie w języku angielskim. Streszczenie takie nie zostało scalone przez Autora w jeden dokument z rozprawą, ale złożone osobno. Jest to krótki, zajmujący zaledwie 3/4 strony dokument, bardzo lakonicznie opisujący zakres i efekty pracy, a przy tym nie w pełni adekwatny do zawartości rozprawy.

III. Ocena aktualności i znaczenia tematu

Współczesne systemy elektroenergetyczne są złożonymi, silnie rozbudowanymi, wielowęzłowymi układami sieciowymi, których elementy składowe (źródła wytwarzania energii, linie przesyłowe, transformatory, odbiorniki mocy, łączniki, itd.) charakteryzowane są parametrami determinującymi właściwości statyczne i dynamiczne tych elementów oraz tworzonego przez nie systemu. Celem funkcjonowania systemów jest zapewnienie ciągłości dostaw energii elektrycznej do odbiorców, przy zachowaniu wysokiej niezawodności, stabilności działania i dużej odporności na pojawiające się stany zakłóceniowe. Współpraca systemów krajowych w połączonym systemie elektroenergetycznym oraz specyfika lokalizacji dużych, niepodlegających planowej generacji źródeł wytwarzania w naszej części Europy (liczne, duże farmy wiatrowe na północy Niemiec) sprawiają, że od lat problemem na tym obszarze były i są nieplanowane przepływy mocy czynnej. Mogą one powiększać przepływy transgraniczne, zaburzając rozpyły prądów w sieciach krajowych i blokując w efekcie część ich zdolności przesyłowych, co w efekcie może prowadzić do naruszenia bezpieczeństwa pracy systemu. Pomimo podejmowania różnych działań zaradczych koniecznym stało się zastosowanie metod ograniczania przesyłów nieplanowanych poprzez regulację przepływów mocy z zastosowaniem granicznych przesuwników fazowych. Rozwiązania takie stały się obiektem licznych analiz, których rezultaty były publikowane w czasopismach naukowych i technicznych, krajowych i zagranicznych.

Należy zauważyć, że problemy kontroli rozpyłów mocy czynnej nie dotyczą jedynie poziomu systemowego i transgranicznej wymiany mocy, ale coraz częściej ujawniać się mogą wewnątrz systemu, zarówno na poziomach przesyłu jak i dystrybucji. Jest to związane z postępującą, istotną zmianą struktury oraz lokalizacji źródeł wytwarzania energii elektrycznej, w związku z coraz większym udziałem generacji rozproszonej, opartej na źródłach odnawialnych. W takiej sytuacji poszukiwane są/będą metody skutecznego zarządzania rozpyłem mocy wewnątrz systemu, z zastosowaniem nowych środków i metod kontroli, wspartych technologiami charakterystycznymi dla sieci inteligentnych (Smart Grids).

Potencjalnie, zakres zastosowań przesuwników fazowych oraz innych urządzeń o podobnym przeznaczeniu w systemie elektroenergetycznym, ale należących do grupy urządzeń FACTS (np. regulatorów mocy UPFC) może być szerszy i odbiegać od ich podstawowej funkcji, jaką niewątpliwie jest regulacja przepływów mocy.

W kontekście wymienionych wyżej grup problemów naukowych i technicznych, należy stwierdzić, że tematyka rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Pawła Albrechtowicza lokuje się w obszarze badawczym o dużym znaczeniu i aktualności dla współczesnej elektrotechniki i elektroenergetyki, z niewątpliwie znaczącym potencjałem aplikacyjnym. Przesuwniki fazowe, w szczególności bardzo dużych mocy, dla linii przesyłowych najwyższych napięć, pomimo pozornie nieskomplikowanej budowy są w rzeczywistości urządzeniami bardzo zaawansowanymi technicznie i technologicznie, o złożonych konstrukcjach, często dwurdzeniowych. Każde nowe rozwiązanie, pozwalające na poprawę parametrów przesuwника oraz zwiększenie elastyczności jego pracy, a także obniżenie kosztów produkcji będzie z tego względu interesujące, zarówno dla producentów jak i użytkowników tych urządzeń.

IV. Dyskusja zawartości merytorycznej rozprawy

Tematyka przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Pawła Albrechtowicza dotyczy analizy i weryfikacji, zarówno pomiarowej (na sprzętowym modelu laboratoryjnym) jak i symulacyjnej (na modelu numerycznym), działania układu przesuwника fazowego, o konstrukcji zaproponowanej przez Kandydata do stopnia doktora. Autor skupia się w swoich badaniach i rozważaniach na analizie stanów ustalonych pracy tego przesuwника, co oceniam jako znaczne ograniczenie zakresu oceny właściwości i parametrów proponowanego rozwiązania konstrukcyjnego. Co prawda w *Podsumowaniu* wskazano, że planowane są również w dalszej kolejności analizy stanów nieustalonych, jako kontynuacja prac prezentowanych w rozprawie (co wskazuje na to, że Autor jest świadom tego niedostatku), jednak nie zmienia to faktu pewnego braku kompletności opracowania tematu. Każda nowa konstrukcja urządzenia, takiego jak przesuwник fazy, musi być przeanalizowana i przetestowana ze względu na warunki pracy w stanie ustalonym oraz w stanach nieustalonych (w tym związanych z występowaniem zakłóceń). Jest to warunkowane różnymi względami, m.in. potrzebą określenia wymagań i warunków dla poprawnego i niezawodnego działania układów automatyki zabezpieczeniowej oraz koniecznością oceny spodziewanych wartości maksymalnych wewnętrznych narażeń przepięciowych izolacji wysokonapięciowej uzwojeń przesuwника. Testy na niskonapięciowych modelach laboratoryjnych, takich jak opisany w pracy, należy więc traktować jako bardzo wstępny, choć zwykle konieczny i wartościowy etap badań. Dla tego typu konstrukcji, w przypadku ich wdrożenia, konieczne jest również dokonanie odpowiednich analiz niezawodnościowych, uwzględniających wpływ poszczególnych elementów konstrukcyjnych przesuwника.

Ważnym elementem każdej rozprawy doktorskiej jest kompetentne i wystarczająco szerokie przedstawienie stanu wiedzy i badań („state of the art”) w obszarze i tematyce stanowiącej otoczenie i centrum problemu w niej rozwiązywanego / przedstawianego. Taki przegląd literaturowy musi być przy tym oparty o dobrze, jednoznacznie i czytelnie opisane źródła bibliograficzne. Ułatwia to pracę zarówno samemu Autorowi rozprawy, jak i osobom z niej korzystającym, jako ze źródła wiedzy, również przeglądowego. W tym aspekcie mam pewne zastrzeżenia dotyczące organizacji i przygotowania opisów

wymienionych w rozprawie źródeł. Niektóre opisy źródeł są niewłaściwe, bez podania pełnych danych bibliograficznych, przykładowo:

- źródła [2] i [3] to nie regularne artykuły zgłoszone do Zeszytów Naukowych Wydziału EiA Politechniki Gdańskiej, ale drukowane w nich referaty konferencji krajowych, więc informacja taka powinna znaleźć się w opisie bibliograficznym;
- dla kontrastu, źródło [72] to referat z XLI Konferencji Naukowo-Technicznej GDAŃSKIE DNI ELEKTRYKI' 2016, ale wydrukowany w Zeszytach Naukowych Wydziału EiA Politechniki Gdańskiej, więc z kolei i ta informacja powinna być umieszczona w opisie bibliograficznym;
- dokumenty ENTSO-E (źródła [4], [5], [6], [68]) są dostępne wyłącznie elektronicznie, więc należało podać ścieżki dostępu oraz daty ich pobrania;
- źródło [13] to prawdopodobnie monografia habilitacyjna wydana w j. angielskim, więc należało podać jej oryginalny tytuł, numer wydawniczy oraz numer ISSN;
- dla źródła [16] należało podać tytuł autoreferatu oraz ścieżkę i datę dostępu;
- źródło [55] to prawdopodobnie prezentacja w formie slajdów, która zapewne została przez Autora pobrana z Internetu, brak jest jednak ścieżki dostępu i daty pobrania;
- źródła [53] i [71] to rozprawy doktorskie, co należałoby podać w opisie, a ponieważ są one dostępne w Internecie, więc również powinny zostać podane ścieżki dostępu i daty pobrania.

Odnosząc się do organizacji *Bibliografii*, to w pierwszej chwili wydaje się, że poszczególne źródła są w niej uporządkowane zgodnie z kolejnością ich pierwszego zacytowania w tekście rozprawy. Stwierdzenie to jest prawdziwe do pozycji [23], po której cytowane są w tekście po raz pierwszy kolejno źródła: [25], [24], [26], ... , [31], [33], [32], [34], [35], [38], [39], ... , [45], [36], [37], [46], [47], [51], [52], [48], [49], [50], [54], [53], [55], [56], [57], [59], [60], [62], [63], ... , [80]. Oznacza to, że w pewnym momencie powstawania rozprawy wkraśl się pewien chaos w zarządzanie cytowaną w niej literaturą. Należy również dodać, że dwie pozycje literaturowe umieszczone w *Bibliografii* nie zostały zacytowane w żadnym miejscu rozprawy. Są to artykuły: [58] (publikacja współautorska Autora rozprawy w czasopiśmie *Energies*) oraz [61] (jedna z publikacji autorów Sen & Sen). Po przeczytaniu całości rozprawy wydaje się, że Autor wykorzystał informacje zawarte we wskazanych artykułach, ale zawiodła końcowa edycja i korekta treści rozprawy. Ponieważ ogólnie przyjętą zasadą we wszelkiego rodzaju publikacjach, w tym także rozprawach doktorskich, jest wyraźne zaznaczanie w tekście wszystkich źródeł wykorzystanych informacji, więc traktuję to jako błąd, którego wskazanie pozwoli Autorowi uniknąć podobnych sytuacji w przyszłości.

Należy zauważyć, że przegląd literaturowy dokonany przez Pana Pawła Albrechtowicza w rozprawie obejmuje źródła z okresu ok. 30 lat, od roku 1992 do 2022, przy czym większość przywołanych publikacji pochodzi z ostatnich kilku lat. Są one różnorodne i różnego rodzaju oraz dobrane i wykorzystane adekwatnie do tematu rozprawy i zakresu jego opisu dokonanego przez Autora. Z tego m.in. powodu uznaję, że Kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w zakresie elektrotechniki oraz dobrze orientuje się w obec-

nym stanie badań dotyczących konstrukcji, właściwości i zastosowań przesuwników fazowych, instalowanych w systemach elektroenergetycznych dla sterowania przepływami mocy w celu ich optymalizacji.

Wskazana wcześniej, poprawna kolejność rozdziałów oraz struktura rozprawy nie w pełni poprawnie zostały wypełnione treścią. Niektóre z części pracy oceniam jako niedopracowane. W szczególności, *Wprowadzenie* do tematyki pracy jest dość pobieżne i nieusystematyzowane. Przykładowo, niemal od początku tekstu pracy, od strony 5, Autor wielokrotnie pisze o przesuwnikach fazowych asymetrycznych i symetrycznych, jednak dopiero na stronie 34 pojawia się wyraźny podział na przesuwniki asymetryczne i symetryczne, jedno- i dwurdzeniowe, z którego można wywieść (ale w sposób pośredni) definicje symetryczności bądź asymetryczności przesuwnika. Tego rodzaju definicje, wraz z warunkami określenia parametrów referencyjnych, powinny się według mnie znaleźć w sposób jawny na początku wprowadzenia do tematu rozprawy, bowiem mają one podstawowe znaczenie dla całości prowadzonych w niej później rozważań.

We *Wprowadzeniu* Autor przedstawia, w punktach, cztery podstawowe cele pracy, tj.:

- zaprojektowanie i skonstruowanie laboratoryjnego przesuwnika fazowego o regulowanym napięciu wzdłużnym i poprzecznym;
- modyfikację układu laboratoryjnego modelującego system elektroenergetyczny dla przeprowadzenia badań skonstruowanego przesuwnika fazowego;
- przeprowadzenie badań laboratoryjnych oraz wykonanie symulacji numerycznych proponowanego przesuwnika fazowego w ustalonych stanach pracy;
- wykonanie analitycznych obliczeń rozpliwów mocy dla wybranych przypadków testowych.

Cele te są w zasadzie zaplanowanymi przez Autora kolejnymi etapami badań, których realizacja i wyniki miały doprowadzić do wykazania słuszności postawionej na wstępie rozprawy tezy:

„Asymetryczny przesuwnik fazowy o regulowanym napięciu wzdłużnym i poprzecznym może być skutecznym urządzeniem kontrolującym rozpliw mocy w liniach elektroenergetycznych, a jego konstrukcja może pozwolić na szeroki wariant zastosowań w stanach ustalonych.” (str. 6)

Teza ta nie jest szczególnie nowatorska, a ponadto nie w pełni podkreśla podstawowe osiągnięcie związane z zaprojektowaniem i skonstruowaniem laboratoryjnego układu 2-transformatorowego przesuwnika fazowego o niezależnie regulowanych napięciach, wzdłużnym i poprzecznym, badanego eksperymentalnie, analizowanego numerycznie i w efekcie opisanego w rozprawie. Poza tym, konstrukcja przesuwnika powinna raczej pozwalać na szeroki zakres, a nie *wariant* zastosowań. Dodatkowo, na wcześniejszej stronie *Wprowadzenia* Autor napisał, nie podając jednak referencji literaturowej:

„Wśród znanych układów przesuwników fazowych wyróżnić można układ pracujący jako asymetryczny, ale pozwalający na regulowanie, oprócz napięcia dodatkowego (poprzecznego) wprowadzanego do linii poprzez szeregowo uzwojenie transformatora szeregowego (dodatkowego), również napięcia wzdłużnego linii. Możliwość

regulacji obu napięć stwarza szerokie pole sterowania przesuwnikiem fazowym, wykonanym w takiej technologii, a tym samym na uzyskanie wymaganych przez operatora sieci przesyłowej lub dystrybucyjnej parametrów przesyłanej energii elektrycznej, łącznie z kontrolą rozpliwów mocy”.

Jest to stwierdzenie, bazujące najpewniej na źródłach literaturowych, które zostaje niejako powielone w następującej już po nim tezie pracy. Jeśli Autor, formułując tezę, miał na myśli inne aspekty problemu związanego z niezależną lub zależną regulacją napięcia wzdłużnego i poprzecznego, to nie są one w żaden sposób w niej uwidocznione.

W rozdziale 2 (podrozdział 2.2) Autor obszernie i w sposób usystematyzowany opisuje problematykę nieplanowanych przepływów mocy, w szczególności międzysystemowych, czym dobrze nakreśla tematyczne tło rozprawy i uzasadnienie dla stosowania urządzeń umożliwiających odpowiednie regulacje przepływów mocy. Niezbyt poprawny jest tytuł tego rozdziału, bowiem rozpliw mocy może następować w sieciach elektroenergetycznych, natomiast zgodnie z tytułem podrozdziału 2.1 w pojedynczej linii można kontrolować jedynie jej przepływ.

Na rysunku 2.2, przedstawiającym wykres wskazowy dla linii przesyłowej oraz na rysunku 3.10, przedstawiającym przykładowy wykres wskazowy poszczególnych wielkości elektrycznych opisujących stan pracy przesuwnika fazowego, zaznaczono fazor prądu I oraz kąt φ . Jedynie prąd I został nazwany i opisany w tekście pracy, we wzorze (2.4). Żadna z tych dwóch wielkości nie została umieszczona w *Wykazie oznaczeń i symboli*. Oznaczenie kąta φ oraz parametry $\sin\varphi$ i $\cos\varphi$, występujące we wzorze (3.6) wydają się być znane każdemu elektrykowi, jednak w rozprawie należałoby w sposób jawny nazwać i zdefiniować te wielkości. Ponadto, na rysunku 2.2 znalazło się oznaczenie U_s pomimo, że na schemacie z rysunku 2.1, któremu ten wykres wskazowy odpowiada napięcie wejściowe linii jest oznaczone jako U'_s .

Obszerny rozdział 3 dość szczegółowo przedstawia problematykę kontroli rozpliwu mocy w sieciach elektroenergetycznych, bazując przy tym na licznych źródłach literaturowych. Autor opisał w nim problemy i metody regulacji rozpliwu mocy, przedstawił zasady regulacji wzdłużnej, poprzecznej i wzdłużno-poprzecznej napięć oraz poszczególne rodzaje urządzeń regulacyjnych: przesuwniki fazowe symetryczne i asymetryczne oraz układy regulatorów UPFC i ich zastosowania praktyczne na świecie. Ponadto, w ostatnim podrozdziale przedstawiony został i pokrótce opisany transformator Sena i jego właściwości.

Zaprojektowany i wykonany dla potrzeb realizacji programu badań Autora rozprawy 2-transformatorowy przesuwnik fazowy został opisany w rozdziale 4. Prezentowany na wstępie tego rozdziału rysunek 4.1 nie jest właściwy dla wsparcia opisu tego projektu i w zasadzie nie powinien znaleźć się w rozprawie. Zaprezentowany na nim schemat połączonych szeregowo dwóch nieregulowanych transformatorów 1-fazowych jest mylący (napięcie wyjściowe w tym układzie będzie sumą będących w fazie lub przeciwfazie napięć U_{sx} i U_a) i powinien być zastąpiony schematem blokowym lub schematem układu z transformatorami 3-fazowymi o regulowanych napięciach uzwojeń wtórnych, dla którego możliwe jest uzyskanie składowej poprzecznej napięcia oraz regulacji wartości

obu składowych napięcia, wzdłużnej i poprzecznej. Jak wiadomo „*Koniec wieńczy dzieło*”, więc końcowa wersja rozprawy warta była wysiłku włożonego w przygotowanie takiego niezbyt przecież skomplikowanego rysunku, który ostatecznie, w wersji uproszczonego schematu, został przedstawiony na rysunku 4.10.

Ze względu na ograniczoną liczbę zaczepów w uzwojeniach służących regulacji napięć wzdłużnego (transformator TW) i poprzecznego (transformator TD), wyznaczono skwantowaną siatkę możliwych do uzyskania wektorów napięcia wyjściowego (rys. 4.4) oraz określono dla niej ograniczenia brzegowe (Tabela 4.2). W przypadku napięcia dodawczego, rozdzielczość regulacji napięcia w zaprojektowanym układzie jest 6-bitowa, a wynika to z projektu uzwojenia wtórnego oraz zastosowanej metody sterowania łącznikami. Zmiany stanu łączników wpływają równocześnie na wartość rezystancji i reakcji przesuwника (rys. 4.8 i 4.9).

Opis matematyczny zaprojektowanego przesuwника, zawarty we wzorach od (4.1) do (4.10) posłużył do określenia i analizy wybranych charakterystyk:

- wpływu napięcia wzdłużnego na przesyłaną moc czynną i bierną w linii oraz wprowadzany kąt przesunięcia α , dla wybranego kąta mocy ϑ ;
- wpływu napięcia wzdłużnego na napięcie wyjściowe z przesuwника, dla wybranych wartości przekładni η ;

Charakterystyki te zostały przedstawione na wykresach numerowanych jako rysunki od 4.14 do 4.17, skalowanych w jednostkach względnych [pu], jednak bez podania wartości referencyjnych. Wyznaczając te charakterystyki Autor założył ciągłość zmian wartości napięcia wzdłużnego, pomijając dyskretny charakter ich zmian, związany z ograniczoną liczbą zaczepów regulacyjnych. Przy uwzględnieniu tego faktu, analiza wpływu napięcia wzdłużnego na wymienione charakterystyki byłaby bliższa rzeczywistości.

Podczas analiz pracy przesuwника fazowego w różnych stanach sterowania napięciami transformatorów wejściowego TW i dodawczego TD (podrozdział 4.3), wskazano na możliwość uzyskania stanu, w którym wartość skuteczna napięcia wyjściowego jest równa wartości skutecznej napięcia wejściowego przesuwника. Stan taki Autor określił jako „stan pracy quasi-symetrycznej”. Analizując stany pracy przesuwника zwrócono również uwagę na pewne cechy podobieństwa jego charakterystyki regulacji napięć wyjściowych do regulatora UPFC (rys. 4.19 i komentarz w tekście rozprawy).

W opisie układu sterowania regulacją napięcia Autor nie ustrzegł się pewnych błędów językowych, które mają znaczenie merytoryczne. Na str. 45 napisał, że:

„Sterowanie załączanymi poziomami napięć z transformatora wejściowego przesuwника fazowego wykonano na bazie sterownika Arduino Mega z zestawem przekaźników optoizolacyjnych załączających wybrany stycznik danego poziomu napięcia.” (podkreślenia P.Z.).

Układ sterowania nie załącza „*poziomów napięć*”, ale realizuje funkcję przełącznika zaczepów, więc przekaźniki optoizolowane załączają stycznik wybranego zaczeptu. W ten sposób wybrana zostaje określona *wartość*, a nie *poziom* napięcia! Błędne określenie *poziom* napięcia powtarza się jeszcze w dalszej części opisu.

Na stronach 63-64, a w szczególności w tabeli 4.5 Autor podaje dopuszczalne przedziały odchyień wartości skutecznych napięć w sieciach sieci NN i 110 kV, określone przez operatora systemowego (PSE S.A.) [70]. Niestety, dane podane w źródle nie zostały przeniesione do pracy w sposób poprawnie odzwierciedlający faktyczne wymagania, które są zależne od warunków przyłączeniowych dla odbiorców zasilonych z danej rozdzielni. Ponadto, zarówno w tekście, jak i tytule Tabeli 4.5 Autor ponownie używa niepoprawnego określenia „poziomy napięcie”, zamiast „przedziały odchyień średnich wartości skutecznych napięcia zasilającego” albo po prostu „napięcia w rozdzielniach”.

Zaprojektowany i zestawiony układ przesuwника fazowego był badany w laboratoryjnym modelu 5-węzłowego systemu elektroenergetycznego o podstawowej topologii przedstawionej na rysunku 5.3. W angielskojęzycznym streszczeniu rozprawy Autor określa ten system jako „the IEEE 5-bus system”, co nie jest zgodne z prawdą. Struktura zastosowanego modelowego systemu jest jedynie podobna do modelowej 5-węzłowej sieci IEEE, co znajduje potwierdzenie w opisie zawartym w [74] oraz literaturze. Podczas badań modyfikowano konfigurację systemu do topologii przedstawionych na rysunkach od 5.4 do 5.6. Podano parametry zastępcze modelowanych linii, systemów S_1 i S_2 oraz zastosowanych generatorów G_3 i G_5 . W pomiarach zastosowano odpowiedni sprzęt pomiarowy, rejestrując przebiegi napięć i prądów, które następnie przetwarzano i analizowano w środowisku Matláb. Równolegle stworzono model systemu laboratoryjnego i przesuwnika fazowego w programie SIMULINK (rys. 5.7), wykonując symulacje numeryczne dla analizy stanów ustalonych pracy przesuwnika. Dla analizy wpływu przesuwnika na rozpyły mocy w modelu systemu 5-węzłowego wykonano obliczenia z zastosowaniem metody Newtona-Raphsona. Wyniki badań laboratoryjnych, dla różnych stanów pracy (jałowego, z pojedynczą i z dwiema równoległymi liniami wymiany mocy, z równoległymi liniami pomiędzy systemem S_1 , a wewnętrznym systemem generatorowym, z liniami równoległymi o jednakowej i różnej długości) zamieszczono i analizowano w rozdziale 6. Poza analizą rozpyłów mocy czynnej analizowano również przepływy mocy biernej, dla wybranych przypadków (rys. 6.27).

Odpowiednio do zakresu wykonanych badań laboratoryjnych Autor przeprowadził również symulacje numeryczne, których rezultaty przedstawiono w rozdziale 7. Analizowano zmienność wybranych parametrów dla różnych konfiguracji systemu modelowego, w zależności od wartości napięcia dodawczego, prezentując wyniki w formie wykresów (rys. 7.1 do 7.20). Obliczenia rozpyłów mocy w modelowym systemie 5-węzłowym wykonano z zastosowaniem pakietu m-plików MATPOWER, a wyniki zaprezentowano w postaci graficznej i tabelarycznie.

Autor podsumowuje całość wykonanych prac (*Rozdział 8 Podsumowanie*), dokonując krótkiego porównania wyników badań laboratoryjnych oraz symulacji numerycznych. Biorąc pod uwagę obszerność programu badawczego doktoratu końcowe konkluzje są dość krótkie, ale poprawne.

V. Uwagi i pytania problemowe

1. Zależności (charakterystyki) zmian wielkości analizowanych przez Autora na wykresach zamieszczonych na rysunkach 4.12, 4.14, 4.15, 4.16 i 4.17 zostały przedstawione w jednostkach względnych [pu], aby jednak właściwie je interpretować należy znać faktyczną wartość danej wielkości odpowiadającą jednostce podstawowej 1 [pu]. Stąd pytanie: względem jakiej wartości były normowane wartości [pu] dla poszczególnych wielkości przedstawionych na tych wykresach ?
2. W jaki sposób dyskretny charakter regulacji napięć, wzdłużnego i poprzecznego, wpłynie na charakterystyki analizowane przez Autora na rysunkach od 4.14 do 4.17 ?
3. W proponowanym rozwiązaniu przesuwnika fazowego zmiana wartości napięcia dodatkowego jest dokonywana poprzez odpowiedni dobór i połączenie uzwojeń cząstkowych strony wtórnej (izolowanych), tworzących szereg napięciowy 4×2^n [V], gdzie $n = 0, 1, \dots, 5$. Jak przyznaje sam Autor, jest to podejście odmienne od rozwiązania klasycznego, w którym zmiana napięcia dodatkowego na uzwojeniu szeregowym z linią przesyłową jest dokonywana poprzez zmianę napięcia po stronie pierwotnej, na uzwojeniach o niższym napięciu niż napięcie linii. W testowanym układzie laboratoryjnym, niskonapięciowym, nieobecne są jakiekolwiek problemy napięciowe i polowe charakterystyczne dla układów wysokonapięciowych. Zastosowana separacja optoelektroniczna oddziela w zasadzie jeden obwód niskonapięciowy od drugiego, pozostawiając operatora i układ sterowania na napięciu bezpiecznym. W rzeczywistych warunkach taka sytuacja nie będzie miała miejsca. Wszystkie uzwojenia cząstkowe strony wtórnej oraz łączniki będą znajdować się na wysokim potencjale linii lub w jego obecności. W układach tego typu (transformatorach, przesuwnikach fazy) dąży się zwykle do tego, aby minimalizować złożoność konstrukcyjną oraz liczbę łączników po stronie wysokonapięciowej (HV, UHV, EHV) ze względu na wysokie koszty ich izolowania oraz duże problemy z odpowiednim kształtowaniem rozkładów natężenia pola elektrycznego. W przedstawionym rozwiązaniu zaproponowano całkowicie odwrotne podejście. W związku z tym, jak Autor ocenia ewentualne problemy dotyczące zapewnienia odpowiedniej, długoczasowej wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego dla tak złożonego układu uzwojeń i łączników?

VI. Uwagi edycyjne i językowe

W przedstawionej rozprawie zauważalne jest pewne niedopracowanie jej niektórych elementów i fragmentów. Uwaga ta dotyczy zarówno strony merytorycznej, edytorskiej, jak również stylu i słownictwa pracy. Znaczną część tych uwag omówiono już w p. IV.

- 1) W redagowaniu końcowej wersji pracy zawiodła, w niektórych miejscach, kontrola edytorska, zarówno w zakresie ortografii jak i interpunkcji, co w przypadku korzystania z edytorów tekstu kontrolujących ortografię zdarza się obecnie już bardzo rzadko. Przykładowo, na stronie 41 zamiast „Ponadto, Transformator Sena ...” jest „Ponadto Transfromator Sena ...”.

- 2) We *Wprowadzeniu*, na str. 4 Autor pisze o „możliwości wydajnej regulacji rozplądów mocy”, a tymczasem z kontekstu zdania wynika, że najpewniej chodzi o „możliwość zapewnienia efektywnej (lub wydajnej) regulacji rozplądów mocy”.
- 3) Dość dziwnie brzmi sformułowanie użyte przez Autora na str. 14 „Moc bierną indukcyjną oznacza się na równi z mocą czynną...”, choć dalsza część zdania wyjaśnia, co Autor ma na myśli.
- 4) W zdaniu opisującym zależności (4.5) i (4.6) na stronie 53, we fragmencie “Co po uwzględnieniu...” „co” należało napisać małą literą.
- 5) W zdaniu na str. 66: „Przesuwnik fazowy został włączony do laboratoryjnego systemu elektroenergetycznego, w którego skład wchodzi...” należało użyć słowa „wchodzi”, lub przeredagować wyliczenie.
- 6) Rozdział 7 zatytułowano „Obliczenia symulacyjne oraz numeryczne”, co brzmi dość dziwnie, bowiem obliczenia symulacyjne były wykonywane numerycznie.
- 7) We fragmencie zdania na str. 129: „należy wprowadzić możliwość użycia analizowanej jednostki, zwłaszcza z uwzględnieniem jego szerokiej możliwości sterowania” zamiast „jego” powinno być „jej”.
- 8) W tytułach publikacji [61] i [62] zamiast „Śen"transformers” powinno być „Sen transformers”.

VII. Podsumowanie i konkluzja

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Pawła Albrechtowicza dotyczy problemu kontroli przepływu mocy w systemie elektroenergetycznym prądu przemiennego AC z zastosowaniem przesuwników fazowych. Problem ten jest istotny nie tylko na poziomie połączeń międzysystemowych / międzypaństwowych, gdzie niekontrolowane przepływy zaburzają wymianę transgraniczną energii elektrycznej i mogą wpływać negatywnie na funkcjonowanie systemu krajowego. Od długiego już czasu nabiera on również coraz większego znaczenia dla poprawnego funkcjonowania krajowych systemów przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Ma to związek z coraz większym nasyceciem systemów elektroenergetycznych przez bardzo liczne i silnie rozproszone źródła generacji (oparte przede wszystkim o źródła odnawialne), lokalizowane zarówno na poziomie przesyłu jak i rozdziału energii elektrycznej (a także na niskim napięciu, w licznej grupie prosumentów, o bardzo niskich mocach generacji). Efektywne ich wykorzystanie wiąże się z koniecznością zagwarantowania bardzo dużej elastyczności w sterowaniu wewnątrzsystemowymi przepływami mocy. Sposoby rozwiązania tego problemu mogą być różne, a stosowanie przesuwników fazowych jest jedną z możliwych opcji, w szczególności w kontekście rozwoju technologii Smart Grids, służącej efektywnemu zarządzaniu eksploatacją sieci elektroenergetycznych.

Zgodnie z zapisami art. 187 ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z 20 lipca 2018 roku (Dz. U. 2018 poz. 1668, z późn. zm.) rozprawa doktorska powinna zaprezentować ogólną wiedzę teoretyczną kandydata do stopnia doktora w dyscyplinie, w której jest przedstawiana oraz Jego umiejętności w zakresie samodzielnego prowadzenia pracy

naukowej. Kluczowym jest przy tym, aby przedstawiała ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub zastosowanie takiego rozwiązania w praktyce gospodarczej.

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Pawła Albrechtowicza łączy w sobie rozważania teoretyczne z częścią praktyczną, projektowo-eksperymentalną, weryfikującą w skali laboratoryjnej koncepcje Kandydata do stopnia doktora, dotyczące proponowanego przez Niego rozwiązania konstrukcyjnego przesuwnika fazowego. Ponadto, realizując program badań przeprowadził On analizy i symulacje numeryczne modelu skonstruowanego układu przesuwnika w środowisku Matlab/SIMULINK, w zakresie obejmującym stan pracy ustalonej. W związku z tym, można stwierdzić, że recenzowana rozprawa pokazuje, iż Kandydat do stopnia doktora posiada:

1. umiejętność zdefiniowania analizowanego problemu naukowego oraz określenia celu i zakresu planowanych i realizowanych badań;
2. kompetencje w zakresie przeprowadzenia przeglądu źródeł literaturowych tematu badań wraz z umiejętnościami analizy i syntezy zawartych w nich treści;
3. biegłość w prowadzeniu prac badawczych, w tym również umiejętności praktyczne zorganizowania odpowiedniego warsztatu badawczego oraz posługiwania się narzędziami projektowymi, aparaturą pomiarową i oprogramowaniem dla wykonywania badań i pomiarów oraz złożonych analiz uzyskanych danych pomiarowych, a także towarzyszących eksperymentom symulacji numerycznych;
4. zdolność wyciągania wniosków i formułowania konkluzji.

Biorąc pod uwagę powyższe punkty, wskazujące na przygotowanie Kandydata do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, oryginalność rozwiązań i analiz przedstawionych w rozprawie (w tym również zawartych w autorskich i współautorskich artykułach naukowych, opublikowanych w wysokopunktowanym czasopiśmie z IF, indeksowanym w ISI Master Journal List oraz w bazie Scopus), a także wszystkie przedstawione w niniejszej recenzji uwagi krytyczne, wyszczególnione błędy i braki oraz wając ich znaczenie dla całościowej oceny rozprawy i zawartych w niej rezultatów prac Pana mgr. inż. Pawła Albrechtowicza, **oceniam Jego rozprawę pozytywnie, jako spełniającą wymagania stawiane rozprawom doktorskim, wynikające z zapisów obecnie obowiązującej ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z 20 lipca 2018 roku (Dz. U. 2018 poz. 1668, z późn. zm.).**

W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie Kandydata do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.

