

Wrocław, 08.11.2016 r.

Prof. dr hab. inż. Jan IŻYKOWSKI

Politechnika Wrocławska

Wydział Elektryczny

Katedra Energoelektryki

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR. INŻ. RAFAŁA KUMALI

p.t. „IDENTYFIKACJA ZAKŁÓCEŃ W WIELOTOROWYCH RÓŻNOPOZIOMOWYCH
NAPIĘCIOWO LINIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH”

I. Podstawa wykonania recenzji

Opiniowana rozprawa doktorska powstała w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Pawła Sowy. Recenzja została sporządzona w związku z uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej z dnia 25.10.2016 r.

II. Tematyka rozprawy

Przedmiotem badań w rozprawie doktorskiej mgr inż. Rafała Kumali jest modelowanie złożonych układów sieciowych z wielotorowymi różnopoziomowymi napięciowo liniami elektroenergetycznymi oraz analiza elektromagnetycznych stanów przejściowych podczas różnorodnych zakłóceń zwarciovych. Analizowane linie wielotorowe są ważnymi elementami współczesnych systemów elektroenergetycznych, zarówno w Polsce jak i na świecie. Liczba takich linii będzie rosła ze względu na powszechnie występujące trudności w uzyskaniu terenów na budowanie nowych linii elektroenergetycznych. Problematyka stanów przejściowych, która jest głównym nurtem ocenianej rozprawy, należy do bardzo ważnych nurtów współczesnej elektroenergetyki. Świadczy o tym jej obecność na konferencjach i w czasopiśmie naukowych. Można tu wskazać prestiżowe międzynarodowe konferencje, takie jak np. IPST – International Power System Transients, EEUG – European EMTP-ATP Users Group Meetings and Courses. Innym przykładem ważności tematyki stanów przejściowych jest specjalne wydanie czasopisma IEEE Transactions on Power Delivery (czasopismo z Master Journal list) na temat: Advances in the Simulation of Power System Transients – IEEE Trans. on Power Deliv., Year: 2016, Volume: 31, Issue: 5. Stwierdza się w nim, że: “w ostatnich kilku dekadach symulacja elektromagnetycznych stanów przejściowych jest filarem dla projektowania

J. Iżykowski

i analizy funkcjonowania systemów elektroenergetycznych oraz, że symulacyjna analiza elektromagnetycznych stanów przejściowych wciąż pozostaje bardzo ważnym zagadnieniem badawczym, a nawet nabiera na znaczeniu w kontekście rozwoju współczesnych systemów i ich coraz większej złożoności”. Zacytowany tekst bardzo dobrze uzasadnia to, że recenzowana rozprawa dobrze wpisuje się w nurt aktualnej i ważnej tematyki badawczej, mającej duże znaczenie ekonomiczne oraz techniczne – szczególnie ze względu na dążenie do zmniejszenia ryzyka powstania blackout’u.

Reasumując, recenzowana rozprawa wpisuje się w **dziedzinę nauk technicznych**, w **discyplinę elektrotechnika** i dotyczy elektroenergetyki, a w szczególności analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych w złożonych układach sieciowych z wielotorowymi różnopoziomowymi napięciowo liniami elektroenergetycznymi.

III. Charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa liczy 167 ponumerowanych stron. Układ rozprawy jest logiczny i nie budzi większych zastrzeżeń. W szczególności, rozprawa składa się z następujących elementów:

- Spis treści,
- Terminologia oraz wykaz wybranych oznaczeń i skrótów,
- Wstęp (rozdział 1),
- Charakterystyka wybranych elementów SEE (rozdział 2),
- Ekwiwalentowanie SEE na potrzeby analiz elektromagnetycznych stanów przejściowych (rozdział 3),
- Zakłócenia zwarciove w wielotorowych liniach wielonapięciowych (rozdział 4),
- Podsumowanie i uwagi końcowe (rozdział 5),
- Literatura (rozdział 6),
- Załączniki (rozdział 7) – zawiera 6 głównych załączników ([ZA1] – [ZA6]), w których wyszczególniono jeszcze 24 szczegółowe elementy składowe.

Rozdział 1 przedstawiając ogólną prezentację tematyki przedłożonej rozprawy ma charakter informacyjny. Po ogólnym przedstawieniu tematyki rozprawy przedstawione są cel, zakres i teza rozprawy. Zawarto również ogólną charakterystykę poszczególnych rozdziałów rozprawy oraz wyszczególniono użyte oprogramowanie.

W rozdziale 2-gim przedstawiono ogólną analizę modeli linii elektroenergetycznych, które są stosowane w profesjonalnych programach do symulacji elektromagnetycznych stanów

J. Hylarski

przejściowych. Następnie przeprowadzono analizę wielotorowych linii wielonapięciowych występujących w Polsce i na świecie. Scharakteryzowano również konstrukcje stosowanych konstrukcji wsporczych (słupów).

Rozdział 3 jest poświęcony ogólnej prezentacji problematyki ekwiwalentowania złożonych układów sieciowych z wielotorowymi liniami wielonapięciowymi. Następnie przedstawiono autorską metodę redukcji systemu pierwotnego z takimi liniami.

Kolejny rozdział (rozdział 4) jest najdłuższy (umieszczony na stronach od 43 do 85) i łącznie z rozdziałem 7 (Załączniki – na stronach od 95 do 167) przedstawiają główne rezultaty przeprowadzonych badań. Zaczęto od opisu przyjętej metodyki badań oraz przedstawienia sposobu postępowania podczas modelowania z użyciem wybranych programów. Skoncentrowano się na specyfikacji zakłóceń wziętych do analizy oraz układów sieciowych z wielotorowymi liniami wielonapięciowymi. Rozważono linie ze słupami kratowymi oraz pełnościennymi.

W rozdziale 5 przedstawiono wnioski z przeprowadzonych badań ilościowych. Wskazano na charakter zjawisk w badanych układach sieciowych jako odmienny od tego dla linii o jednym poziomie napięć. W szczególności odniesiono się do maksymalnych wartości chwilowych napięć i prądów podczas zakłóceń złożonych i na tej podstawie sformułowano stosowne zalecenia praktyczne.

Spis literatury (rozdział 6) zawiera 56 głównych pozycji, w tym 14 prac autorstwa/współautorstwa mgr inż. Rafała Kumali. Nie jest to więc obszerny spis, lecz dodatkowo wyszczególniono jeszcze:

- 1 projekt naukowy (bez podania instytucji i jego autorów),
- 12 materiałów udostępnionych,
- 8 instrukcji użytkowania programów symulacyjnych,
- 3 materiały własne,
- 17 materiałów ze stron internetowych,
- 8 norm i standardów.

Zamieszczona literatura jest dość dobrze cytowana w rozprawie, chociaż w kilku miejscach występuje brak odwołania do literatury przedmiotu.

Obszerny rozdział 7 (załączniki) przedstawia rezultaty badań w postaci przebiegów czasowych, wykresów słupkowych dla rozważanych 11 rodzajów zakłóceń, wraz z ich dokładnym omówieniem. Parametry modelowanego układu zamieszczono w tabelach, a opracowane modele dla programu ATPDraw na rysunkach, przy czym zamieszczone modele

J. Kucharski

(Rys. ZA3.6 oraz Rys. ZA5.4) są zbyt małego rozmiaru by można było rozpoznać szczegóły tych modeli.

IV. Główne rezultaty rozprawy

W rozprawie przedstawiono obszerną analizę elektromagnetycznych stanów przejściowych podczas różnorodnych zakłóceń w złożonych układach sieciowych z wielotorowymi liniami wielonapięciowymi. Na podkreślenie zasługuje to, że analizę odniesiono do krajowych układów sieciowych, a więc do układów rzeczywistych. Wymagało to włożenia ogromnej pracy w szczegółowe rozpoznanie tych obiektów. Badania symulacyjne przeprowadzono z użyciem właściwych narzędzi programowych i są one wystarczająco szerokie dla wyciągnięcia wniosków odnośnie możliwych przebiegów i przetężeń, które zostały przedstawione w rozprawie. Przedstawiono właściwą interpretację uzyskanych rezultatów badań.

Autor rozprawy wykazał się dużą biegłością w modelowaniu złożonych układów sieciowych z użyciem profesjonalnych programów komputerowych. Zaproponował metodykę redukcji systemu pierwotnego z wykorzystaniem dedykowanych programów symulacyjnych. Zgodnie z opracowanym przez Autora rozprawy algorytmem można określić parametry ekwiwalentów systemu zewnętrznego dla poszczególnych torów prądowych. Wskazano przy tym, że algorytm ten jest wynikiem zdobytych doświadczeń. W pracy brakuje jednak wyraźnego wykazania, że uzyskane w ten sposób wyniki dają wystarczająco dokładne rezultaty. Można to uzyskać modelując złożony układ w całości, a następnie ten z zastosowaniem ekwiwalentowania. Jeśli analizowane złożone krajowe układy sieciowe nie dawały takiej możliwości (ze względu na zbyt dużą złożoność) to przecież można było przyjąć pewien układ testowy o „akceptowalnej” złożoności i dla niego pokazać, że zastosowane ekwiwalentowanie jest adekwatne i zapewnia uzyskanie wymaganej dokładności. Takiego sprawdzenia nie ma w recenzowanej rozprawie.

Cechą charakterystyczną rozprawy jest to, że przeprowadzone w rozprawie analizy są całkowicie oparte o symulacje komputerowe. W rozprawie praktycznie brak jest warstwy analitycznej. Można bowiem w zasadzie wskazać tylko równania definicyjne współczynników określających przebiegi i przetężenia oraz nierówność wiążącą liczbę węzłów granicznych w analizowanym modelu wyjściowym i liczbę torów linii elektroenergetycznej.

Przyjęta teza (str. 9) mówi o tym, że: *„Przebiegi przejściowe napięć i prądów pojawiające się w wyniku złożonych stanów zakłóceń w wielotorowych liniach wielonapięciowych powodują powstanie ekstremalnych wartości przebiegów oraz uderzeń prądowych przekraczających wielokrotnie parametry przyjęte dla danego poziomu napięcia*

J. Kijowski

przez obowiązujące przepisy. Warunki pracy urządzeń pracujących w układach przesyłowych wielonapięciowych podczas zakłóceń złożonych mogą powodować poważne konsekwencje dla systemu elektroenergetycznego w postaci blackoutu lokalnego i lub globalnego.” Oceniam, że teza ta została sformułowana poprawnie i jest „dopasowana” do zawartości rozprawy. Teza ta została w rozprawie udowodniona.

Sposób rozwiązania problemów postawionych w rozprawie wskazuje na dobre opanowanie i zrozumienie przez jej Autora wielu różnorodnych zagadnień, co było konieczne do realizacji tej pracy. Nabyta wiedza w trakcie realizacji rozprawy i uzyskane rezultaty można uznać za jej pozytywne efekty.

V. Uwagi dotyczące redakcji pracy

Rozprawa jest napisana poprawnym językiem, z dość małą liczbą błędów edytorskich i jest przeto zrozumiała. Z obowiązku recenzenckiego zestawiam poniżej wybrane uwagi redakcyjne:

1. Str. 4 – przy definiowaniu pojęcia „modelowanie systemu elektroenergetycznego” powołano się na pozycję literaturową [P4], której nie ma w załączonym spisie literatury.
2. Str. 8 – przy omówieniu dwóch awarii sieciowych w USA o znacznym zasięgu, w których przyczyną były zwarcia (z drzewem) w wielotorowej linii wielonapięciowej, nie podano tej pozycji literaturowej, chociaż określono ją mianem „ciekawej publikacji”.
3. Str. 30 – wskazując adekwatność własnego podejścia do redukcji systemu pierwotnego zawierającego w swojej strukturze wielotorowe linie wielonapięciowe skrytykowano najczęściej występujące błędy, które można spotkać w literaturze, jednak bez wskazania przykładów.
4. Str. 63 – na rys. 4.7 użyto kolorów bardzo zbliżonych (ciemno-pomarańczowy i brązowy), co utrudnia analizę prezentowanych rezultatów.
5. Str. 70 – analizując układ z czterotorową linią trójnapięciową podano, że spełniony jest warunek (3.4): $n_{wg} \geq 2n_t$, (gdzie: n_{wg} jest liczbą węzłów granicznych, n_t – liczbą torów) $\rightarrow 21 \geq 2 \times 4 \rightarrow 24 \geq 8$. Tak więc błędnie zapisano ostatnią nierówność (po lewej stronie ma być 21, a nie 24) oraz powinno być odwołanie do warunku (3.5) ze str. 35.
6. Pozycję literaturową [L1] opisano jako „IEEE Systems, Vol. PAS”, co mylnie może wskazywać na artykuł z czasopisma IEEE Transactions on PAS, a jest to referat na konferencję.
7. W kilku miejscach w rozprawie występują powtórzenia określonych informacji, np. zalet i konieczności budowania wielotorowych, różno-poziomowych napięciowo linii

J. Hylbowski

elektroenergetycznych, czy też cech właściwego ekwiwalentowania złożonych układów sieciowych.

VI. Uwagi szczegółowe i pytania

Poniżej zestawiam kilkanaście szczegółowych uwag i pytań, które nasuwają się przy czytaniu ocenianej rozprawy.

1. Recenzentowi znana jest statystyka zwarć w liniach elektroenergetycznych zawarta w materiałach grupy roboczej CIGRE [*Reliable fault clearance and back-up protection, Final Report, Cigre Study Committee 34, Working Group 01, 1997*], przedstawiająca, że liczba zwarć między torami linii o różnych napięciach (powyżej 200 kV) jest nie większa niż 0,05 [zwarcie/(100 km)/rok], czyli statystycznie 1 zwarcie w linii o długości 100 km raz na 20 lat. Czy autorowi rozprawy znane są inne statystyki, np. takie pokazujące, że jednak nie są to zwarcia aż tak rzadko występujące?
2. W recenzowanej rozprawie doktorskiej skoncentrowano się nad prawidłowym dobraniem modeli do symulacji złożonych zakłóceń zwarciovych w wielotorowych, wielonapięciowych liniach elektroenergetycznych pracujących w złożonych układach sieciowych. Należy zwrócić uwagę, że należy przy tym jeszcze prawidłowo dobrać krok czasowy kolejnych iteracji w procesie obliczeniowym. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii, bowiem w rozprawie nie znalazłem informacji na ten temat.
3. Autor rozprawy wskazuje, że koniecznością jest ekwiwalentowanie otoczenia linii adekwatne dla potrzeb analizy stanów nieustalonych o charakterze elektromagnetycznym. W rozprawie skomentowano, że odstępstwo od tego i zastosowanie prostych ekwiwalentów (siła elektro-motoryczna plus impedancja) jest źródłem nieakceptowalnych błędów, lecz nie podano jaki jest zakres tych błędów.
4. Analizowane krajowe układy sieciowe są dość złożone i nie mogły być zamodelowane bez zastosowania ekwiwalentowania. W ilu procentach ich struktury można by było je zamodelować np. przy zastosowaniu programu ATPDraw?
5. Zaprezentowane badania dotyczyły zwarć w formie zerwania określonego przewodu fazowego i jego opadnięcie na konstrukcję słupa lub na inny przewód fazowy z innego toru, o tym samym lub innym napięciu. Poszczególne fazy (etapy) zwarcia występują w określonych odstępach czasowych. Jak te odstępy określano?
6. Należy mieć na uwadze, że w liniach elektroenergetycznych, w tym w liniach wielotorowych rozważanych w rozprawie, mogą wystąpić zwarcia oporowe, w szczególności z palącym się

J. Jędrzejewski

- łukiem elektrycznym. Powstaje pytanie, czy uzyskane rezultaty można również odnieść do takich zwarć i czy były prowadzone jakieś badania w tym zakresie?
7. W rozprawie brakuje szczegółowego odniesienia do warunków działania elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej podczas analizowanych zakłóceń złożonych. Wskazano jedynie, że mogą wystąpić błędne działania zabezpieczeń, nie podając jakich zabezpieczeń – odległościowych, różnicowych, innych? Nasuwa się pytanie, co jest podstawową trudnością w zapewnieniu prawidłowej pracy zabezpieczeń, np. zabezpieczeń odległościowych, chroniących rozważane linie?
 8. Wielotorowe linie elektroenergetyczne mogą pracować w różnych układach połączeń szyn zbiorczych. Badania przeprowadzono dla podstawowego układu, w którym sprzęgła poprzeczne są zamknięte. Czy badano, czy po zmianie układu połączeń na awaryjny mogą wystąpić większe czy też mniejsze przebiegi?
 9. Przy analizie przebiegów przejściowych podczas zwarć ważnym elementem jest między innymi to w jakim momencie ono wystąpiło. Przykładowo, na rys. 4.21 uzyskano, że przebieg w fazie zdrowej jest scharakteryzowane współczynnikiem k_{T4h} wynoszącym około 1,6 p.u. Należy przy tym zauważyć, że analizowane zakłócenie zwarciove nie wystąpiło ani w szczycie, ani przy przechodzeniu tego napięcia przez zero. Można również stwierdzić, że nie ma gwarancji, że jest to maksymalne możliwe przebiegi. Wobec tego, jak należy podejść do zagadnienia wyboru momentu, w którym ma rozpocząć się analizowane zakłócenie? Może przeprowadzić symulacje dla określonej liczby przypadków z losowo wybranymi momentami rozpoczęcia zakłócenia i wybrać z nich ten, z największym przebiegiem? Takie podejście jest np. wymagane przez normę w odniesieniu do próby ferorezonansu dla pojemnościowego przekładnika napięciowego, polegającej na przerywaniu zwarcia zacisków wtórnych przekładnika.
 10. Na str. 42 w odniesieniu do modelowania analizowanych linii elektroenergetycznych w programie ATP-EMT napisano, że został użyty „własny model linii oparty o model Martiego”. Proszę o bliższe wyjaśnienie tego określenia.

VII. Podsumowanie

Wyszczególnione powyżej uwagi i pytania zmierzają do wyjaśnienia pewnych kwestii, bez podważania głównych osiągnięć rozprawy. Nie wpływają one więc na moją ocenę recenzowanej rozprawy, która jest pozytywna. Uważam, że rozprawa ta wnosi odpowiedni wkład do rozwoju problematyki elektromagnetycznych stanów przejściowych dla linii elektroenergetycznych WN i NN. Opiniowana rozprawa doktorska stanowi prawidłowe

J. Tyborski

podejście do rozwiązania interesującego, aktualnego i ważnego dla praktyki problemu naukowego. Przedstawione przez Autora rozprawy rezultaty badań oceniam jako poprawne i interesujące. Doktorant wykazał się przy tym wiedzą z zakresu tematu rozprawy doktorskiej i umiejętnością prowadzenia badań naukowych. Badania zostały przeprowadzone w stosunkowo szerokim zakresie i z zastosowaniem najnowszych narzędzi programowych, chociaż przy braku analiz analitycznych.

Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa opracowana przez mgr inż. Rafała Kumali **spełnia** wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym. **Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Rafała Kumali do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

J. Kijowski