



POLITECHNIKA
LUBELSKA

POLITECHNIKA LUBELSKA
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI
KATEDRA ELEKTROENERGETYKI

20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A

tel. (+48 81) 53 84 360, fax (+48 81) 538 43 19

<http://weii.pollub.pl>

e-mail: we.ke@pollub.pl



dr hab. inż. Piotr Miller, prof. uczelni

p.miller@pollub.pl

Lublin, 19.07.2022 r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
wpłynęło dnia 22.07.2022
nr 19
zaf.

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Agnieszki Dziendziel

**„Wielotorowe, wielonapięciowe elektroenergetyczne linie napowietrzne wysokich i
najwyższych napięć”**

Promotor pracy: dr hab. inż. Henryk Kocot, prof. uczelni

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej z dnia 17 maja 2022 r. oraz pismo Przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej Pani Profesor Moniki Kwoki z dnia 22 maja 2022 r.

1 Wybór tematu rozprawy

Nie ulega wątpliwości, że rozbudowa sieci przesyłowych najwyższych napięć jest koniecznością. Konieczność ta wynika z wciąż rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną, związanego z tym rozwojem podsektora wytwórczego w tym OZE i konieczności przesyłu energii pomiędzy obszarami, w których występują nadwyżki produkcji energii elektrycznej do obszarów, w których skoncentrowany jest odbiór. Problemy tego typu występują nie tylko w naszym Krajowym Systemie Elektroenergetycznym, ale również w systemach elektroenergetycznych pracujących synchronicznie z KSE. Przykładem może być system niemiecki, gdzie planuje się budowę tzw. „autostrad energetycznych”, przy czym budowa ta napotyka na szereg trudności, wynikających głównie z protestów mieszkańców terenów, przez które miałyby przebiegać linie napowietrzne wysokiego napięcia. Podobne problemy spotykamy także w Polsce.

Problemy tego typu dotyczą nie tylko najwyższych poziomów napięć. W przypadku sieci rozdzielczych średniego napięcia znaleziono jednak rozwiązanie, gdyż obecnie są one już w większości

przypadków sieciami kablowymi. O ile jednak można rozważyć skablowanie linii pracującej na poziomie napięcia 110 kV, o tyle w przypadku wyższych poziomów napięć nie jest to takie oczywiste.

Można rozważać podjęcie różnych działań zmierzających do zwiększenia zdolności przesyłowych eksploatowanych już linii elektroenergetycznych. Do działań tego typu zaliczyć można np. podwyższenie napięcia roboczego linii, np. z 220 kV do 400 kV. Inne działania, które nie wymagają budowy nowych ciągów przesyłowych polegają na modernizacji istniejących linii polegającej np. na wymianie przewodów roboczych na przewody wysokotemperaturowe. Są to metody, które w znaczący sposób potrafią zwiększyć zdolności przesyłowe istniejących ciągów liniowych, ale mogą okazać się niewystarczające. Operator KSE planuje budowę nowych napowietrznych linii elektroenergetycznych, należy jednak zdawać sobie sprawę, że będzie to związane z koniecznością rozwiązania wielu problemów organizacyjnych, prawno-administracyjnych, środowiskowych i społecznych. Konieczne jest więc znalezienie sposobów, które mogłyby w pewnym stopniu pomóc w rozwiązaniu powyższych problemów.

Dobrym rozwiązaniem wydaje się być zastosowanie wielotorowych, wielonapięciowych linii napowietrznych, które są głównym tematem recenzowanej rozprawy, która analizuje korzyści związane z zastosowaniem wielotorowych, wielonapięciowych linii napowietrznych, opracowuje model matematyczny tego rodzaju linii oraz wskazuje i analizuje zagrożenia związane z pracą tego rodzaju linii w systemie elektroenergetycznym.

Biorąc powyższe pod uwagę uznaję tematykę rozprawy za ważną, aktualną oraz wybraną prawidłowo, zarówno pod względem naukowym jak i praktycznym.

2 Ogólna ocena rozprawy

Opiniowana rozprawa zawiera 154 strony tekstu wraz z ilustracjami, wzorami, bibliografią obejmującą 117 pozycji oraz wykazem oznaczeń i załącznikami. Dodatkowo na dołączonej do rozprawy płycie CD można znaleźć streszczenia rozprawy w języku polskim i angielskim oraz załącznik CD z pełnymi wynikami przeprowadzonych analiz (119 stron).

Część główna rozprawy podzielona została na pięć rozdziałów, do tego doliczyć trzeba dwa rozdziały: wprowadzenie zawierające genezę, tezę oraz cel i zakres rozprawy, i rozdział z podsumowaniem i wnioskami końcowymi, omawiający również kierunki dalszych badań.

Teza rozprawy brzmi następująco: *„Wielotorowe, wielonapięciowe linie napowietrzne w wielu sytuacjach mogą tworzyć korzystne technicznie i akceptowalne społecznie rozwiązanie koniecznej rozbudowy sieci elektroenergetycznej. Z punktu widzenia pracy systemu elektroenergetycznego, linie te – ze względu na swoją konstrukcję – wprowadzają niesymetrię napięć i prądów, głównie w torze o najniższym napięciu znamionowym, jednak niesymetria ta może zostać skutecznie zminimalizowana*

przez odpowiedni dobór układu faz na konstrukcji wsporczej lub pojedyncze przepłyty przewodów roboczych". Sposób sformułowania tezy uważam za prawidłowy.

Przegląd literatury obejmuje pozycje poruszające zagadnienia związane z badaniami oddziaływania pola elektromagnetycznego w otoczeniu linii napowietrznych, także wpływu na człowieka wykonującego prace eksploatacyjne na konstrukcji wsporczej, zagadnienia związane z modelowaniem i wyznaczaniem parametrów elektrycznych linii napowietrznych a także omawiające różne aspekty pracy linii napowietrznych, w tym linii wielotorowych i wielonapięciowych, w stanach ustalonych i przejściowych. Przegląd literatury został przeprowadzony rzetelnie. Najstarsza pozycja w wykazie literatury datowana jest na rok 1926, najnowsza pochodzi z roku 2022. Osiem pozycji literaturowych powstało przy udziale Autorki rozprawy.

Główną część rozprawy rozpoczyna (rozdział 2) charakterystyka wielotorowych, wielonapięciowych linii napowietrznych. Autorka rozprawy zwraca tutaj przede wszystkim uwagę na korzyści wynikające ze stosowania WWLN. Korzyści te są omawiane na przykładzie rzeczywistych układów WWLN zrealizowanych w Polsce i na świecie, poparte są również konkretnymi obliczeniami porównawczymi. Autorka zwraca także uwagę na zagrożenia i wyzwania związane z konstrukcjami wielotorowymi i wielonapięciowymi takie jak: komplikacje algorytmów działania EAZ, utrudniona eksploatacja i realizacja prac pod napięciem, niesymetria geometryczna czy też wreszcie złożoność modeli matematycznych opisujących WWLN.

Właśnie modele matematyczne są przedmiotem rozważań prowadzonych w rozdziale 3 rozprawy. Autorka wykorzystując teorię obwodów ziemnopowrotnych wyprowadza podstawowe zależności pozwalające wyznaczyć parametry modelu WWLN uwzględniając złożoność i specyfikę tego typu konstrukcji. W rozdziale tym wyznaczono także zależności pozwalające wyznaczyć rozkład natężenia pola elektrycznego oraz magnetycznego w otoczeniu WWLN.

Prawdopodobnie najbardziej pracochłonne i czasochłonne było opracowanie rozdziału 4 (wraz z załącznikami). Rozdział ten prezentuje wyniki obliczeń i analiz koncentrujących się na zbadaniu skutków występowania niesymetrii fazowej WWLN na wybrane parametry jakości energii elektrycznej, poprawność pracy sieci przesyłowej, rozkłady pola elektromagnetycznego czy pojawienie się napięcia kolejności zerowej w przypadku symetrycznego obciążenia poszczególnych torów linii. Wyznaczono także wskaźniki niesymetrii i nie zrównoważenia w stanach pracy normalnej sieci przesyłowej o różnych długościach analizowanej linii WWLN i różnym układzie przewodów fazowych (i odgromowych) w poszczególnych torach linii. Niemal każda z wyżej wymienionych analiz prowadziła do odpowiedzi na pytania, jaka jest graniczna długość określonej linii WWLN spełniająca wymagania analizowanego wskaźnika jakości. Wreszcie przeprowadzono analizę zwarciovą, w ramach której wyznaczono

wartości prądów początkowych zwarcia jednofazowego i trójfazowego przy zwarcu na końcu toru prądowego o najniższym napięciu znamionowym oraz udziały prądów zwarciovych płynących badanym torem. Analiza zwarciovą miała na celu określenie wskaźnika błędu popełnianego przy obliczeniach zwarciovych w wyniku zastosowania uproszczonego modelu symetrycznego oraz określenie granicznych długości linii WWLN, przy których rzeczony błąd nie przekracza wartości 5%.

Obliczenia przeprowadzone w rozdziale czwartym są punktem wyjścia do próby znalezienia takiego układu przewodów fazowych w torach prądowych linii WWLN, który byłby najbardziej korzystny z punktu widzenia badanych wskaźników jakości lub stworzenia alternatywy w postaci symetryzacji układu linii WWLN w celu zapewnienia spełnienia wymagań odnośnie do wartości badanych wskaźników w każdym z badanych obszarów. Rozważania na ten temat zostały przeprowadzone w rozdziale piątym rozprawy. W obydwu przypadkach przeprowadzone przez Autorkę analizy pozwoliły, m.in. na określenie maksymalnych długości linii WWLN, przy których nie następuje przekroczenie granicznych wartości wskaźników jakości.

Obliczenia i analizy przeprowadzane w poprzednich rozdziałach rozprawy zakładały, że otoczenie badanej WWLN było symetryczne. W rozdziale szóstym Autorka zbadała pracę linii WWLN w niesymetrycznym otoczeniu sieciowym, w tym w rzeczywistej sieci przesyłowej. W ramach analizy przeprowadzono trzy scenariusze badań, przy czym w każdym z nich podstawą do oceny były wskaźniki nierównoważenia i niesymetrii w wybranych węzłach otoczenia sieciowego. Analiza dla układu rzeczywistej sieci przesyłowej bazowała na planach rozbudowy sieci przesyłowej w południowym obszarze KSE, które zakładają budowę trójtorowej dwunapięciowej linii napowietrznej relacji Byczyna-Podborze. Celem analizy było zbadanie wpływu różnych metod likwidacji przekroczeń wskaźników niesymetrii na wartości tych wskaźników.

Ostatni rozdział rozprawy to podsumowanie i wnioski. Wnioski są bardzo rozbudowane (16 punktów) i rzeczywiście stanowią podsumowanie tego, co jest najbardziej istotne w treści rozprawy. Nie zabrakło tutaj stwierdzenia, że w pracy osiągnięto założone cele i tym samym teza została udowodniona, oraz dyskusji na temat możliwości prowadzenia dalszych badań. W tym przypadku jest to poszukiwanie wskaźnika geometrycznego pozwalającego na zidentyfikowanie sylwetek linii WWLN charakteryzujących się małym stopniem asymetrii geometrycznej oraz rozszerzenie analizy o linie napowietrze hybrydowe (HVAC oraz HVDC). Zabrakło natomiast wskazania tych elementów rozprawy, które Autorka uważa za wkład własny w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Integralną częścią pracy są załączniki, w których omówiono uproszczenia zaprezentowanego w pracy modelu matematycznego linii WWLN w zakresie uwzględnienia przewodów wiązkowych, uwzględnienia oddziaływania przewodów odgromowych, uwzględnienia zróżnicowania poziomów

napięć znamionowych torów oraz dla szczególnego przypadku linii symetrycznej. Drugi z załączników szczegółowo prezentuje geometrię analizowanych WWLN, w tym przyjęte oznaczenia układów przewodów fazowych oraz przeplotów. Nie można zapomnieć także o załączniku dostępnym na załączonej do rozprawy płycie CD, zawierającym szczegółowe wyniki wszystkich obliczeń wykonanych przez Autorkę rozprawy (w sumie 119 stron).

Moja ogólna ocena rozprawy, jej struktury oraz merytorycznej zawartości jest bardzo pozytywna.

3 Uwagi szczegółowe i krytyczne

Strona redakcyjna rozprawy zasługuje na pochwałę. Typowych błędów redakcyjnych, tzw. „literówek”, jest stosunkowo niewiele. Poniżej kilka przykładów:

Nr strony	Lokalizacja	Uwagi
9	Akapit nad rys.1.4	„...jednak warto podkreśli , że występują również...: - powinno być „podkreślić”.
15	Akapit pierwszy od góry	„...warunków terenowych przez które jest prowadzona linia napowietrzna.” – brakuje przecinka.
21	Akapit pierwszy od góry	„W obszarze w którym tor prądowy 220 kV jest prowadzony nad torem 110 kV...” – brakuje przecinka.
36	Akapit pod rys.3.8	„Pełny schemat zastępczy ...” – powinno być „zastępczy”.
81	Akapit pierwszy od góry	„Dla pozostałych analizowanych WWLN minimalizacja jednego ze wskaźników asymetrii powodowało maksymalizację drugiego z nich.” – powinno być „powodowała”.
86	Akapit pierwszy od góry	„Ponieważ nie ma połączeń w tych węzłach do ziemi, to zgodnie z zasadą tworzenia macierzy admitancyjnej sieci...” – powinno być „zasadą”.
90	Akapit pierwszy od góry	„Podsumowując, biorąc pod uwagę maksymalne długości linii przy, których nie następuje...” – przecinek jest w niewłaściwym miejscu.
93	Akapit pierwszy w 5	„...napięcia przesunięcia punktu neutralnego sieci o najniższym napięciu znamionowym U_0 ...” – to nie jest napięcie znamionowe
96	Akapit pierwszy w 5.2	„... wpływająca na badane wielkości...” – powinno być „wpływającą”
101	Akapit pierwszy w 5.2.2	„Długością początkową od której rozpoczynają się analizy wpływu zastosowania przeplotu na badane wskaźniki są długości linii wynikające z analiz przeprowadzonych w rozdziałach 4.3, 4.4 określono dopuszczalne długości WWLN...” – brakuje przecinka przed „od której”; prawdopodobnie brakuje „gdzie” przed „określono dopuszczalne”.
110	Akapit drugi od góry	„W pozostałych węzłach zamodelowano odbiory stałaimpedancyjne, których parametry dobrano w taki sposób aby wymusić obciążenie wszystkich linii...” – brakuje przecinka przed „aby”.
114	Akapit ostatni	„Zastosowanie przeplotów toru prądowego III pozwala na zwiększenie długości odejścia PRB nieco ponad 25 km ...” – powinno być „... o nieskończenie ponad 25 km...”

Nr strony	Lokalizacja	Uwagi
121	Akapit ostatni	„Działanie to pozwoli na ograniczenie wyboru konstrukcji nowopowstającej WWLN do sylwetek cechujących się ...” - W zdaniu dominuje liczba mnoga, więc „ nowopowstających ”.

To są tylko przykłady błędów redakcyjnych. Tak jak wspomniałem, nie ma ich dużo, więc nie będę ich dalej przytaczał.

Uwagi redakcyjne o charakterze ogólnym:

- znaki interpunkcyjne (przecinki, kropki) po wzorach moim zdaniem są zbędne. Aczkolwiek doceniam konsekwencję ich stosowania,
- brakuje konsekwencji w stawianiu przecinków przed „tj.”, W pracy można znaleźć miejsca, gdzie przecinek jest: (str.13, akapit 2 od góry; str.17 akapit pod rys.2.3; itd.) oraz miejsca, gdzie go nie ma: (str. 8, akapit pod tabelą 1.2; str.56, akapit nad rys.4.4; itd.).

Pomimo powyższych uwag chcę jeszcze raz podkreślić, że błędów redakcyjnych w pracy nie ma dużo. Należy zatem stwierdzić, że Autorka potrafi redagować teksty techniczne i odbiór całości rozprawy jest pod względem redakcyjnym jak najbardziej pozytywny.

Uwagi o charakterze ogólnym i dyskusyjnym:

- Na rysunku 2.3 zaprezentowano przykłady rzeczywistych WWLN w Polsce. O ile jednak na poprzednim rysunku 2.2 opis przykładów WWLN na świecie uzupełniono informacją o kraju, w którym zainstalowano linię, tutaj zabrakło informacji o relacji linii. Uważam, że byłoby to interesujące.
- W rozdziale 3, na str.22 w założeniach pojawiła się informacja o pominięciu upływności WWLN. Zastanawiam się, skoro tyle pracy włożono w opracowanie modelu wielotorowej, wielonapięciowej linii napowietrznej, czy nie warto było pokusić się o opracowanie ogólnego modelu uwzględniającego upływności linii, nawet gdyby nie uwzględniano tej upływności w analizach prowadzonych w następnych rozdziałach.
- Na rysunku 4.9, str. 63 zaprezentowano sylwetkę słupa oraz zilustrowano proces rozsuwania skrajnych faz toru prądowego III. Istotne są tutaj odległości oznaczone jako $dx1$ oraz $dx2$. Wykresy na rysunku 4.10 prezentują zależność napięcia U_0 w funkcji rozsunienia, które na wykresie jest oznaczone jako dx . Czy dobrze rozumiem, że zerowa wartość dx odpowiada sytuacji, gdy przewody fazowe faz L1 oraz L3 zawieszone są w odległości $dx1$ od osi słupa, natomiast maksymalna wartość dx to sytuacja, gdy przewody są zawieszone w odległości $dx2$ od osi słupa? Jakie są te „realne” odległości, o których pisze Autorka pracy pod rysunkiem 4.10. Czy jest to właśnie 30 metrów rozsunienia zaprezentowane na wykresie (rys.4.10)?

- Na rysunku 4.19, na str.73 można było bardziej zróżnicować kolorystykę wykresów. Lepiej to wygląda na następnych rysunkach, czyli 4.20 i 4.21.
- Zależność (4.14) prezentuje macierz admitancyjną Y_{kpu} . Wymiar macierzy to 3×3 , ale większość elementów macierzy jest pusta. Jaką wartość mają te puste miejsca?
- W rozdziale 5.1, na str.94 zdefiniowano wskaźnik O , który jest podstawą wyboru „najlepszego” układu przewodów fazowych WWLN. W tabeli 5.1 zrezygnowano z prezentacji wartości tego wskaźnika. Można tą wartość znaleźć w tabeli 13 w załączniku na płycie CD. Moim zdaniem wartość ta powinna być także zaprezentowana w tabeli 5.1. Tabela jest co prawda mocno rozbudowana, ale zmniejszenie czcionki i szerokości kolumn umożliwiłoby dodanie kolumny z wartością wskaźnika O , co moim zdaniem sprawi, że dopiero wtedy tabela będzie kompletna.
- W rozdziale 6.2, na str.107 można znaleźć informację odnośnie do obciążeń w poszczególnych węzłach badanego układu. Są to obciążenia mocą czynną. Czy w pracy zakładano generalnie, że obciążenie ma tylko charakter czynny? Czy uwzględnienie dodatkowo mocy biernej mogłoby mieć wpływ na wyniki prowadzonych badań?

Powyższe uwagi traktuję jako dyskusyjne i pozostające bez wpływu na moją, pozytywną ocenę rozprawy.

4 Uwagi końcowe, podsumowanie, spełnienie wymogów ustawowych

Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki wymaga, aby rozprawa doktorska stanowiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Opiniowana rozprawa według mnie spełnia to wymaganie. Zgodnie z wymogami Ustawy Doktorantka, Pani mgr inż. Agnieszka Dziendziel, wykazała się wiedzą, umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz umiejętnością prowadzenia badań i przedstawienia ich wyników.

Lista istotnych osiągnięć rozprawy, które powinny być uznane za oryginalny dorobek Doktorantki zawiera następujące, najistotniejsze elementy:

- opracowanie modelu matematycznego wielotorowych, wielonapięciowych linii napowietrznych dla parametrów wzdłużnych i poprzecznych, dla wielkości fazowych i składowych symetrycznych;
- wybór wskaźników jakości, na podstawie których można dokonać analizy zagrożeń dla pracy systemu elektroenergetycznego wprowadzanych przez wielotorowe, wielonapięciowe linie elektroenergetyczne,

- wyznaczenie wyżej wymienionych wskaźników dla różnych układów wielotorowych, wielonapięciowych linii napowietrznych (nie spotkałem się jeszcze z tak bardzo bogatą i szczegółową analizą).
- opracowanie metodyki wyznaczania akceptowalnych zakresów długości wielotorowych, wielonapięciowych linii napowietrznych.

Doktorantka w rozprawie zmierza konsekwentnie do realizacji jej celu i udowodnienia postawionej na wstępie tezy. Wykład jest jasny i czytelny, zawiera także wszystkie istotne elementy: genezę, cel pracy, tezę, krytyczny przegląd aktualnego stanu wiedzy, sformułowanie problemu, jego rozwiązanie, prezentację wyników obliczeń i analiz, podsumowanie oraz wykaz literatury.

Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej ocenę stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska Pani mgr. inż. Agnieszki Dziendziel stanowi cenny wkład w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika oraz spełnia warunki i wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Agnieszki Dziendziel z uwagi na jej bardzo wysoką wartość merytoryczną. Na wyróżnienie zasługuje także ogrom pracy, którą Doktorantka włożyła w przygotowanie rozprawy. Spełniony jest również wymóg formalny stawiany wyróżniającym się pracom doktorskim wynikający z Uchwały Senatu Politechniki Śląskiej, czyli publikacja wyników pracy w czasopiśmie naukowym posiadającym Impact Factor. Pani Agnieszka Dziendziel jest pierwszą autorką publikacji w czasopiśmie Energies: Dziendziel A., Kocot H., Kubek P.: Construction and Modeling of Multi-Circuit Multi-Voltage HVAC Transmission Lines. Energies 2021, 14, 421.

Piotr M.