



Lublin, 22 czerwca 2015 r.

dr hab. inż. Piotr Miller

p.miller@pollub.pl

tel. 502 180 550

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Pawła Kubka

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest uchwała Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej z dnia 28 kwietnia 2015 r. oraz pismo Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej Pana Profesora Pawła Sowy z dnia 29 kwietnia 2015 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

„Analiza zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia”

1 Wybór tematu rozprawy

Autor we wstępie rozprawy zwrócił uwagę na dwie główne przyczyny zmienności rozplądów mocy w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym. Przyczyny te to rozwój rynku energii oraz rozwój lokalnych źródeł wiatrowych. Biorąc pod uwagę, że wiele krajowych linii napowietrznych zbudowano przed kilkudziesięciu laty, oraz że były one projektowane z przyjęciem niskiej temperatury granicznej roboczej, należy się spodziewać, że obie powyżej wskazane przyczyny będą prowadziły do występowania przeciążeń linii elektroenergetycznych. Poszukiwanie możliwości zwiększenia zdolności przesyłowej krajowych sieci przesyłowych i dystrybucyjnych jest więc jak najbardziej uzasadnione. Ale można także wskazać inne aspekty potwierdzające trafność wyboru tematu.

Operatorzy sieci dystrybucyjnych zobligowani są mocą ustawy do prezentowania tzw. dostępnych mocy przyłączeniowych. W wielu przypadkach wykazują oni zerowe możliwości przyłączania nowych wytwórców energii. Nie podejrzewając ich o niechęć do źródeł rozproszonych zakładam, że taka ocena

ich możliwości przyłączeniowych wynika z obawy o infrastrukturę sieciową. Fakt, że można bardziej efektywnie wykorzystać infrastrukturę już istniejącą, bądź przy stosunkowo niewielkich nakładach podwyższyć jej parametry powinna sprawić, że ich polityka „ochrony sieci” przed źródłami rozproszonymi ulegnie złagodzeniu.

Obciążalność linii elektroenergetycznych to jeden z głównych parametrów wpływających na wnioski z tzw. ekspertyz przyłączeniowych. W ramach takich ekspertyz opracowuje się m.in. wykaz niezbędnych inwestycji związanych z przyłączeniem analizowanego źródła energii, np. farmy wiatrowej, do Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (także innych źródeł przewidzianych do włączenia w analizowanym okresie). Przyjęcie do obliczeń statycznego, sezonowego modelu obciążalności linii elektroenergetycznych może prowadzić do wyraźnego przeszacowania wymaganych kosztów inwestycyjnych, a koszty te na pewno pojawią się w dokumentach precyzujących warunki przyłączenia oraz w umowach przyłączeniowych. Sposób szacowania tych kosztów oraz ich cedowanie na podmioty przyłączane są często kością niezgody pomiędzy operatorami sieci dystrybucyjnych i inwestorami. Także w tym przypadku zastosowanie dynamicznych modeli obciążalności linii i proponowanie mniej kosztownych sposobów poprawy ich parametrów może zmienić tą sytuację.

Od lat zajmuję się obliczeniami technicznymi prowadzonymi na różnych modelach sieci SEE. W obliczeniach rozplływowych przyjmuje się zazwyczaj statyczny, tzw. sezonowy model obciążalności prądowej linii. W różnych programach rozplływowych stosowany jest różny sposób zadawania tych parametrów i nie zawsze jest to podział na dwa sezony: letni i zimowy. W programie PSLF można w parametrach linii podać 8 różnych wartości obciążalności (rate A, rate B, itd.) i w czasie obliczeń wybrać, z której wartości program ma korzystać (wybór dotyczy całego modelu). W programie PLANS można podać 4 wartości obciążalności, przy czym w najnowszych wersjach programu można te parametry interpretować zarówno jako wartości sezonowe, jak i opis liniowej zależności obciążalności od temperatury. W trakcie obliczeń wybiera się, dla jakich temperatur prowadzone są obliczenia. Opracowanie dynamicznego modelu obciążalności linii i jego implementacja w programach obliczeniowych byłoby znaczącym wzmocnieniem narzędzi tego typu.

O wadze i aktualności tematu świadczyć może również projekt, którego opis dostępny jest na stronie internetowej <http://sdzp.pl>. Projekt p.t. *”Dynamiczne zarządzanie zdolnościami przesyłowymi sieci elektroenergetycznych przy wykorzystaniu innowacyjnych technik pomiarowych”* finansowany jest przez NCBiR oraz Fundusz Ochrony Środowiska i jest zbieżny z tematem opiniowanej rozprawy doktorskiej.

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 113 stron tekstu wraz z ilustracjami, wzorami oraz spisem literatury obejmującym 99 pozycji. Uzupełniona jest pięcioma załącznikami, które w moim odczuciu stanowią integralną i ważną część pracy. Całość dokumentu liczy więc 170 stron.

Część główna rozprawy podzielona została na pięć rozdziałów plus rozdział podsumowujący. W pierwszym rozdziale, wprowadzającym, postawiono tezę rozprawy, która brzmi następująco: *„Możliwe jest zastosowanie nowych, niskonakładowych metod zwiększenia zdolności przesyłowych istniejących krajowych linii napowietrznych 110 i 220 kV”*.

Sposób sformułowania tezy jest niezwykle prosty, uważam jednak, że jest on prawidłowy, tym bardziej, że w pracy Autorowi udało się udowodnić prawdziwość tej tezy.

Przegląd literatury, obejmujący zagadnienia związane z meteorologią i klimatologią, materiałoznawstwem, a także z technicznymi aspektami projektowania, konstrukcji i badania elektroenergetycznych linii napowietrznych został przeprowadzony rzetelnie. Daje się zauważyć faktycznie zaznajomienie się Doktoranta z treścią omawianych publikacji. W wykazie literatury znalazły się także pozycje dotyczące statystyki, procesów wymiany ciepła, analizy systemów elektroenergetycznych oraz modelowania. Osobną grupę stanowią normy, broszury techniczne i raporty. Najstarsza pozycja w wykazie literatury datowana jest na 1929 rok, najnowsza pochodzi z roku 2012. Dziesięć pozycji literaturowych powstało przy współudziale Autora rozprawy.

W rozdziale drugim Autor rozprawy poddał analizie warunki pogodowe (temperaturę, siłę i kierunek wiatru oraz nasłonecznienie) decydujące o prądowej obciążalności linii napowietrznych. Analizie podlegały zarówno dane pogodowe dostępne na stronie internetowej Ministerstwa Infrastruktury i Rozwoju jak również dane zarejestrowane przez system CAT-1 i zgromadzone w ramach programu badawczego realizowanego, m.in. przez Politechnikę Śląską (nie jest do końca jasne, czy także z udziałem Autora rozprawy). Porównanie dwóch, a nawet trzech zestawów danych (pod uwagę wzięto także dane pochodzące bezpośrednio z IMGW) pozwoliło stwierdzić, że dane pogodowe pochodzące z bezpośrednich pomiarów są reprezentatywne i mogą zostać wykorzystane do badań związanych z realizacją rozprawy. Taki sposób przygotowania pola do badań należy uznać za słuszny. Na uwagę zasługują, poruszone przez Autora w końcu rozdziału (kontynuowane następnie w rozdziale czwartym) zagadnienia związane z poprzecznym rozkładem temperatury wewnątrz przewodu bimateriałowego (np. przewodu AFL). Często pomijany w analizach obciążalności prądowej poprzeczny rozkład temperatury, występujący między rdzeniem a zewnętrzną powierzchnią przewodu może mieć, jak wykazał Autor, istotny wpływ na rzeczywiste zwisy przewodów w linii, szczególnie

w przypadku przewodów niskozwisowych. Może to prowadzić do błędnych wniosków przy stosowaniu dynamicznych obciążalności linii. Uważam tą część rozprawy za jedno z jej osiągnięć.

Wnioski z analizy warunków pogodowych i ich wpływu na obciążalność prądową linii napowietrznych stały się podstawą do opracowania modelu obciążalności linii opisanego w rozdziale trzecim. Autor skonfrontował w nim proponowany przez siebie model obciążalności prądowej wykorzystujący pomiary temperatury otoczenia i prędkości wiatru z modelami statycznymi (sezonowymi) oraz dynamicznymi, ale wykorzystującymi tylko pomiar temperatury. Autor zaobserwował bardzo silny wpływ prędkości wiatru na obciążalność prądową przewodów linii napowietrznej. Zauważył również dużą korelację prędkości wiatru i temperatury otoczenia, która z kolei charakteryzuje się dodatkowo dużą stabilnością w czasie i przestrzeni. Uzasadnia także brak konieczności ciągłego monitorowania pozostałych parametrów pogodowych (nasłonecznienia i kąta natarcia wiatru). Tutaj przyznam, że przystępując do lektury rozprawy spodziewałem się, że w tym rozdziale otrzymam końcową zależność, na podstawie której będzie można obliczyć obciążalność prądową linii napowietrznej w określonych warunkach pogodowych, czyli uzależnioną od wszystkich czterech parametrów pogodowych. Zależność analityczną Autor podał, ale jest zupełnie inna niż się spodziewałem. Doktorant, dzięki temu że jego model ma charakter probabilistyczny, umożliwiając zadanie określonego poziomu ryzyka, wyeliminował z modelu niestabilne i trudne do zmierzenia parametry pogodowe, jakimi są nasłonecznienie i kąt natarcia wiatru. Uważam to za kolejne, ważne osiągnięcie rozprawy. Natomiast analityczny zapis rozkładu obciążalności prądowej opracowany na podstawie modelu znacznie podniesie jego użyteczność.

W rozdziale czwartym Autor poddał bardzo dokładnej analizie mechanikę przewodów linii napowietrznej. W analizie tej uwzględnił nieliniowość charakterystyki rozciągania przewodów, poprzeczny rozkład temperatury w przewodach bimateriałowych a także wpływ długoterminowego pełzania metalurgicznego przewodów na ich mechanikę. W rozdziale tym zbadany został także wpływ łańcuchów izolatorów odciągowych na zwis przewodów linii napowietrznej. Uwzględnienie tych wszystkich elementów znacznie wykracza poza stosowaną dotychczas praktykę prezentowania tego typu analiz.

Rozdział piąty to przegląd metod zwiększania zdolności przesyłowej istniejących linii napowietrznych. Wśród wymienionych metod Autor zwrócił uwagę na możliwość zastosowania monitoringu (pośredniego lub bezpośredniego) i wykorzystania dynamicznego modelu obciążalności linii w celu efektywnego wykorzystania tej obciążalności. W przypadku niewystarczalności tej metody można, zdaniem Doktoranta, zastosować inne, niskonakładowe metody, których zadaniem jest podniesienie granicznej temperatury roboczej linii. Najprostsze polegają na regulacji zwisów i naprężeń, przeprowadzeniu drobnych ingerencji w konstrukcje wsporcze czy też osprzęt, nieco

bardziej skomplikowane prowadzą do wymiany przewodów linii na tzw. przewody niskozwisowe (HTLS). Wszystkie wiążą się ze znacznie mniejszymi nakładami finansowymi niż wybudowanie nowych linii.

Ostatnie rozdziały rozprawy to podsumowanie i wnioski, w których znalazła się także informacja o planach realizacji dalszych zadań badawczych, wykaz literatury oraz zestaw pięciu załączników, w których znalazł się opis modeli matematycznych służących do wyznaczania obciążalności prądowej linii, tablice obciążalności prądowej wyznaczone dla linii z przewodami AFL-6 240 mm² w oparciu o model obciążalności opisany w rozdziale 3 rozprawy, analiza czynników pogodowych występujących w na obszarze południowej Polski oraz przykłady zastosowań przewodów niskozwisowych w KSE.

Podsumowując, ogólna ocena rozprawy jest w moim odczuciu bardzo pozytywna.

3 Uwagi szczegółowe i krytyczne

Autor rozprawy nie ustrzegł się niestety błędów redakcyjnych.

Na stronie 4 w wykazie oznaczeń mamy:

σ_A – naprężenie w oplocie przewodu,

σ_R – naprężenie w rdzeniu przewodu,

Prawdopodobnie w tym drugim przypadku chodzi o naprężenie w rdzeniu przewodu.

Na stronie 67 występuje niewłaściwe odwołanie do rys.4.4. Moim zdaniem powinno to być odwołanie do rysunku 4.1.

Na stronie 100 (dwa wiersze nad rysunkiem 5.6 oraz w podpisie pod rysunkiem 5.6) oraz na stronie 101 (pierwszy wiersz) bardzo „niesforne” okazało się słowo „niskozwisowych”.

Na stronie 102 (tuż pod rys. 5.8) Autor niewłaściwie odwołał się do rys. 5.6 i 5.7. Moim zdaniem powinno to być odwołanie do rysunków 5.7 i 5.8.

Istnienie podrozdziału 5.3.1. na stronie 96 sugeruje, że gdzieś dalej znajdzie się podrozdział 5.3.2. Tymczasem dalej jest już tylko punkt 5.4. Jakże jest więc uzasadnienie podziału treści zawartych w punkcie 5.3?

W tytułach załączników A.1 i A.2 pojawiło się nadmiarowe „do”: „Model matematyczny **do** służący **do** ...”. Błąd w tytułach obydwu załączników występuje w spisie treści. W tekście zasadniczym tytuł

załącznika A.1 został poprawiony. Myślę, że w tym przypadku Autor stał się „ofiara” łatwości korzystania z opcji kopiuj-wklej edytora tekstów.

Są to tylko przykłady zauważonych przeze mnie błędów redakcyjnych. Było ich więcej, należy jednak stwierdzić, że nie są to bardzo rażące błędy i nie wpływają na odbiór całości rozprawy. Pracę czyta się dobrze, nie ma w niej błędów stylistycznych czy rzeczowych a wykład prowadzony przez Autora jest jasny i zrozumiały.

Poniżej kilka uwag o charakterze dyskusyjnym:

- Wydaje się, że w tytule rozprawy brakuje słowa „możliwości”. Czyli tytuł brzmiałby wówczas: „Analiza możliwości zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia”. Tym bardziej, że słowo „możliwe” występuje w tezie rozprawy. Teza rozprawy zakłada, że *możliwe jest zastosowanie nowych, niskonakładowych metod zwiększenia zdolności przesyłowych istniejących krajowych linii napowietrznych 110 i 220 kV* i taką możliwość Autor analizuje i udowadnia.
- Uważam, że podpis pod rys.1.1. nie jest do końca skorelowany z tym, co ten rysunek prezentuje. Przede wszystkim brakuje mi tutaj oznaczenia osi wykresów, co mogłoby nieco pomóc w jego zrozumieniu. Tymczasem o ile oś rzędnych jest w miarę oczywista, o tyle trzeba się chwilę zastanowić nad tym, co przedstawia oś odciętych, ale na pewno nie można się posiłkować podpisem pod rysunkiem, bo na pewno nie jest to stopień obciążenia krajowych linii 110 kV.
- Także w przypadku tablicy 2.2 jej tytuł nie odpowiada zawartości. W tablicy nie ma „kolejnych miesięcy” jak sugeruje tytuł, natomiast jest jak rozumiem przyporządkowanie wybranych parametrów pogodowych do przedziałów temperatury otoczenia. Nie potrafię niestety zinterpretować tych danych i tutaj prosiłbym o wyjaśnienie.
- We wzorze (3.4) T_{max} występuje po prawej stronie zależności, tymczasem zwykle wielkość obliczaną (wyznaczaną) na podstawie innych wielkości umieszczamy po lewej stronie zależności. Czy to przestawienie ma jakieś wytłumaczenie?
- W kilku miejscach, np. str. 15 i str. 19, Doktorant przeprowadza testy zgodności uzyskanego rozkładu prawdopodobieństwa z układem normalnym (w przypadku temperatury otoczenia) lub z układem logarytmiczno-normalnym (w przypadku prędkości wiatru). Negatywny wynik testów tłumaczy zbyt dużą liczebnością próby. Czy faktycznie istnieje jakaś „masa krytyczna” wielkości próby, po przekroczeniu której testy zgodności zawodzą? Wydaje się, że im większa próba, tym łatwiej rozpoznać jej właściwości. A może nie tyle wielkość próby jest problemem

ile fakt, że wraz ze wzrostem wielkości próby rośnie relatywnie liczba pomiarów błędnych czy brakujących, co może wpływać na wynik testów zgodności?

- Załączniki A.1 oraz A.2 zostały opracowane na podstawie raportu zawartego w Broszurze Technicznej nr 207 CIGRE. Autor wspomniał tylko, że podobne wyniki można uzyskać przy zastosowaniu amerykańskiego standardu IEEE Std. 738-1993. Standard amerykański ma już nową wersję: *IEEE STANDARD 738-2012 - IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors*”, którą warto byłoby umieścić w wykazie literatury, a być może także dokładniej zbadać i porównać różnice w podejściu do modelowania procesów cieplnych zachodzących w linii prezentowane w obydwu normach.
- Opracowany i opisany w rozdziale 3 dynamiczny model obciążalności prądowej linii nie uwzględnia wszystkich parametrów pogodowych uwzględnianych w normach CIGRE oraz IEEE. Czy pominięcie nasłonecznienia, kąta natarcia wiatru, ale także wysokości i kąta azymutu dla słońca, gęstości powietrza oraz lepkości bezwzględnej powietrza nie podnosi ryzyka błędnego oszacowania obciążalności linii?
- Czy Autor rozprawy zetknął się z projektami zakładającymi zastosowanie przetworników optoelektronicznych wykorzystujących siatki Bragg’a do pomiarów temperatury i naprężenia przewodów linii napowietrznych? Jeżeli tak, to jak Doktorant ocenia przydatność tego typu rozwiązań.

Powyższe uwagi traktuję jako dyskusyjne i pozostające bez wpływu na moją, pozytywną ocenę rozprawy. Wszystkie ewentualne błędy i nieścisłości należy uznać za zrozumiałe, biorąc pod uwagę złożoność problemu badawczego.

4 Uwagi końcowe, podsumowanie, spełnienie wymogów ustawowych

Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (art.13) wymaga, aby rozprawa doktorska stanowiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Jestem przekonany o tym, że opiniowana rozprawa spełnia to wymaganie. Sposób rozwiązania problemu naukowego przedstawiony w rozprawie daje ponadto możliwość jego praktycznego wykorzystania. Zgodnie z oczekiwaniami Ustawy Doktorant, mgr inż. Paweł Kubek, wykazał się wiedzą, umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz umiejętnością przedstawienia jej wyników.

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

- opracowanie modelu obciążalności prądowej wykorzystującego informacje o bieżącej temperaturze otoczenia i prędkości wiatru; modelu o charakterze probabilistycznym, który umożliwia założenie poziomu ryzyka przekroczenia dopuszczalnej temperatury przewodu i eliminujący dzięki temu konieczność ciągłego monitorowania niestabilnych i trudnych do zmierzenia parametrów pogodowych (nasłonecznienia i kąta natarcia wiatru),
- wyprowadzenie analitycznej postaci zależności opisującej rozkład obciążalności prądowej linii opracowanej na podstawie powyższego modelu,
- zastosowanie w analizach mechanicznych przewodów modeli uwzględniających nieliniową charakterystykę rozciągania przewodu, wydłużenia przewodu oraz wpływu metalurgicznego pływania przewodu na końcowy zwis,
- analiza wpływu łańcuchów izolatorów odciągowych na zwis przewodów,
- uwzględnienie poprzecznego rozkładu temperatury w przewodach bimateriałowych w analizach mechanicznych przewodów.

Doktorant w rozprawie konsekwentnie realizuje jej cel udowadniając postawioną we wstępie tezę. Pomimo drobnych potknięć wykład jest jasny i czytelny oraz zawiera wszystkie istotne elementy: genezę, tezę, przegląd aktualnej wiedzy, sformułowanie problemu, jego rozwiązanie, prezentację wyników, podsumowanie oraz wykaz literatury.

Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej ocenę stwierdzam, że opiniowana rozprawa mgr inż. Pawła Kubka odpowiada wymaganiom ustawowym stawianym przed rozprawami doktorskimi (Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. – Dz. U. z 2003 r. nr 65, poz. 595 ze zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Piotr Miller