WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpł. 02-09-2019
PRODZIEKAN
Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej
dr hab. inż. Andrzej Tomczewski

dr hab. inż. Jerzy Janiszewski
Politechnika Poznańska
Instytut Elektroenergetyki
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań

Poznań, dn. 14.08.2019 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Piechockiego

pt. **„Czas trwania zwarcia i narażenia dynamiczne w rozdzielniach najwyższych napięć z przewodami szynowymi giętkimi w świetle badań symulacyjnych"**

1. Podstawa formalna przygotowania recenzji

Recenzja została opracowana na podstawie Uchwały Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej z dnia 25 czerwca 2019 r., przekazanej pismem Pana prof. dra hab. inż. Zbigniewa Nadolnego – Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej, z dnia 02 lipca 2019 r.

2. Tematyka i zakres przygotowanej rozprawy

Linie przesyłowe i rozdzielnie najwyższych napięć są elementami strategicznymi systemu elektroenergetycznego, w znaczącym stopniu decydującymi o bezpieczeństwie energetycznym całego kraju. Podczas ich projektowania lub modernizacji uwzględnia się m.in. spodziewane warunki zakłóceniowe, związane z możliwością występowania stanów zwarciowych. Złożoność infrastruktury wytwórczej i sieciowej, możliwe zmiany konfiguracyjne sieci, kryteria działania automatyki zabezpieczeniowej, niezawodność działania automatyki i wyłączników oraz nieustanny wzrost mocy zainstalowanej w systemie, utrudnia jednoznaczne wyznaczenie spodziewanych skutków elektrodynamicznych, branych pod uwagę przy określaniu wytrzymałości konstrukcji i doborze wyposażenia rozdzielni. Dodatkowo, w rozdzielniach z giętkimi przewodami szynowymi, nawet w przypadku jednoznacznie wyznaczonej wartości prądu zwarciowego, wielkością wpływającą na skutki dynamiczne jest czas trwania zwarcia, uzależniony od wymienionych wcześniej czynników. Właściwe określenie czasu trwania zwarcia jest z jednej strony elementem ograniczenia skutków ryzyka przekroczenia dopuszczalnych parametrów zwarciowych rozdzielni, z drugiej pozwala podejmować próby ograniczania nieuzasadnionych kosztów inwestycyjnych, wynikających z uwzględniania zwarć o prawdopodobieństwie wystąpienia bliskim zeru.

Jak dotąd brakuje udokumentowanych kryteriów i metody wyznaczania czasu trwania zwarcia w rozdzielniach najwyższych napięć z giętkimi przewodami szynowymi, uwzględniającej źródła niepewności czynników wpływających na jego wartość. Autor recenzowanej rozprawy doktorskiej podjął próbę stworzenia narzędzia umożliwiającego probabilistyczne podejście do wyznaczania prądów zwarciowych, czasów trwania zwarcia i sił dynamicznych w wybranych miejscach rozdzielni, dla zwarć lokalnych i występujących w jej otoczeniu. Narzędzie to i przeprowadzone z jego zastosowaniem badania wykorzystano do udowodnienia sformułowanej w pracy tezy:

"Wartości czasu trwania zwarcia, jakie należy przyjmować do wyznaczania obciążeń dynamicznych w rozdzielniach z przewodami giętkimi zależą od cech charakteryzujących zabezpieczenia, wyłączniki oraz parametry sieci elektroenergetycznej. Właściwy dobór wartości tego czasu z uwzględnieniem wpływu ww. czynników umożliwia zastosowanie podejścia statystyczno-probabilistycznego i związanego z nim kryterium doboru opartego na wartościach ryzyka".

Mimo konieczności domyślnego zinterpretowania intencji Autora w zapisie „kryterium doboru" (czego?), przydatność zastosowanych procedur została wykazana, a teza pracy udowodniona. Na tym tle aktualność tematyki rozprawy i jej główny cel należy uznać za ważny zarówno z punktu widzenia poznawczego jak i praktycznego.

Do szczególnie istotnych i oryginalnych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

1. Opracowanie modelu symulacyjnego do probabilistycznej analizy warunków zwarciowych i towarzyszących im skutków dynamicznych w rozdzielniach z giętkimi przewodami szynowymi, z uwzględnieniem istotnych czynników losowych i miejsc wystąpienia zwarcia
2. Opracowanie programu komputerowego do badań symulacyjnych, przeprowadzenie tych badań oraz wykonanie analiz czasu trwania zwarcia i skutków dynamicznych w wybranych punktach rozdzielni z uwzględnieniem losowości czynników wpływających na te parametry.
3. Zgromadzenie i opracowanie rozkładów czasów działania zabezpieczeń elektroenergetycznych, instalowanych w obwodach rozdzielni najwyższych napięć.
4. Opracowanie kryterium ryzyka dla narażeń dynamicznych oraz określenie jego związku z czasem trwania zwarcia, z uwzględnieniem losowości zdarzeń.
5. Wytypowanie istotnych czynników, które należy uwzględniać przy określaniu czasu trwania zwarcia w oparciu o powyższe kryterium.
6. Opracowanie wskazówek dotyczących określania czasu trwania zwarcia przy analizach sił dynamicznych, w rozdzielniach z giętkimi przewodami szynowymi.

3. Charakterystyka i układ pracy

Recenzowana rozprawa liczy łącznie 117 stron i zawiera: stronę tytułową, streszczenia w języku polskim i angielskim, spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń, 7 rozdziałów (w tym wprowadzenie, 5 rozdziałów merytorycznych i podsumowanie) oraz wykaz wykorzystanej literatury w zestawieniu alfabetycznym (51 pozycji). W pracy zamieszczono 55 wzorów, 65 rysunków i 37 tablic. Całość, poza drobnymi potknięciami, została opracowana starannie zarówno pod względem merytorycznym jak i edytorskim. Autor w sposób zrozumiały prezentuje rezultaty swoich badań, wykazując logiczną konsekwencję etapów ich realizacji..

W pierwszym rozdziale rozprawy scharakteryzowano problem badawczy, przedstawiono cel i tezę pracy oraz dokonano syntetycznego (w moim odczuciu mocno ograniczonego) omówienia aktualnego stanu wiedzy na podstawie przeglądu przedmiotowej literatury. Rozdział drugi przedstawia metodę obliczania skutków dynamicznych występujących podczas przepływu prądu zwarciowego w giętkich przewodach szynowych, omówienie opracowanego programu do obliczania sił dynamicznych, przykładowe wyniki badań oraz ideę probabilistycznej metody oceny skutków zwarciowych. Model symulacyjny, umożliwiający analizę rozkładu wartości prądu zwarciowego, uwzględniający wybór miejsca i rodzaju zwarcia przedstawiono w rozdziale trzecim. W rozdziale czwartym przedstawiono algorytm oraz przykładowe wyniki badań symulacyjnych czasów trwania zwarcia, wyznaczane z uwzględnieniem miejsca zwarcia, algorytmów działania zabezpieczeń oraz rozkładów czasów zadziałania wybranych zabezpieczeń i łączników elektroenergetycznych, zainstalowanych w rozdzielni najwyższych napięć. Istotę programu komputerowego do statystyczno-probabilistycznej analizy czasu trwania zwarcia i sił dynamicznych występujących w rozdzielni z giętkimi przewodami szynowymi zilustrowano w rozdziale piątym. Zamieszczono w nim również wyniki badań symulacyjnych parametrów zwarciowych dotyczących tematu rozprawy, uzyskane dla przykładowej rozdzielni 220 kV. Określenie wartości czasu trwania zwarcia dla przyjętego poziomu ryzyka oraz czynników wpływających na wyznaczenie tego parametru przedstawiono w rozdziale szóstym. Całość rozprawy zamyka podsumowanie z praktycznymi wnioskami końcowymi zamieszczone w rozdziale siódmym oraz zestawienie literatury wykorzystanej w pracy.

Opracowane narzędzia badawcze i uzyskane wyniki, przedstawione przez Doktoranta w rozdziałach 3-6 rozprawy stanowią w mojej ocenie Jego oryginalne osiągnięcie naukowe. Jest ono istotne nie tylko z uwagi na aspekt poznawczy, ale także ze względu na przewidywaną uniwersalność i utylitarny aspekt opracowanych i przeanalizowanych

procedur. Wyniki badań symulacyjnych, przeprowadzonych dla przykładowych, wybranych w uzasadniony sposób punktów rzeczywistej rozdzielni o napięciu znamionowym 220 kV, pokazują ścisły związek zagadnień rozprawy z realiami pracy systemu elektroenergetycznego.

4. Uwagi dotyczące rozprawy

Uwagi ogólne i dyskusyjne, wymagające ustosunkowani się Doktoranta:

1. Przedstawione w rozprawie rozpoznanie aktualnego stanu wiedzy związanej z tematem dysertacji jest bardzo skromne. Sprowadza się ono w zasadzie do wskazania obszarów badań prowadzonych w kraju i za granicą oraz ośrodków je realizujących. Na tym tle wnikliwe odwzorowanie zależności zawartych w normie PN-EN 60865-1, stosowanych do wyznaczania parametrów zwarciowych (rozdział 2.1) i wykonanie na ich podstawie obliczeń (nawet z wykorzystaniem autorskiego programu komputerowego) może stwarzać mylne wrażenie, że praca nakierowana jest na czysto inżynierskie podejście do zagadnienia. W rzeczywistości, przedstawione wyniki dają więcej niż tylko pogląd o spodziewanych skutkach zwarciowych w rozdzielniach z giętkimi przewodami szynowymi, jednak tylko w zdefiniowanych warunkach zwarciowych i konstrukcyjnych. Ponieważ rozdział 2.1 jest odwzorowaniem, a nie kopią zapisów normy, zatem w trosce o jego czytelność wskazane było doprecyzowanie stosowanych w normie zapisów i określeń (np.: czy siła jest *elektromagnetyczna* (str.17), elektromechaniczna (str. 31) czy jednak *elektrodynamiczna?* (str. 11), co to jest *kąt kierunkowy siły?* (str.17), czego dotyczy *sztywność normatywna?*). Od Doktoranta oczekiwałbym wyjaśnienia źródła i poprawności zapisu wzoru 2.26, w którym argumenty funkcji trygonometrycznych powstały z dodawania i odejmowania wielkości wyrażonych w różnych jednostkach. Proszę też o wyjaśnienie jak i czy poprawnie zaimplementowano wzór 2.26 w wykorzystanych w pracy programach obliczeniowych? Wyjaśnienie takie powinno dotyczyć także zależności wymienionych w uwagach szczegółowych.
2. Na stronie 36 rozprawy Doktorant przywołując normę PN-EN 60865-1 napisał: „*...maksymalną wartość siły wzdłużnej $F_{d\ max}$ działającej od przewodów na konstrukcje wsporcze, wyznacza się jako* ***największą z trzech wartości*** F_t, F_f *oraz* F_{pi}.". Mimo, że opracowany program komputerowy umożliwia obliczanie wartości F_{pi}, w pracy nie dokonano żadnej analizy w odniesieniu do tej wielkości. Z prostego oszacowania wynika, że prąd w przewodach wiązki analizowanej

rozdzielni jest wprawdzie 2-krotnie mniejszy od obliczeniowego prądu zwarciowego, jednak odległość przewodów w wiązce jest 10-krotnie mniejsza od odstępów fazowych. W warunkach statycznych daje to 25-krotną przewagę siły ściskającej wiązkę nad siłą powodującą międzyfazowe odrzucenie wiązek. Czy zatem nie występują okoliczności, w których siła F_{pi} staje się istotna? Z rysunku 2.2 wynika, że dla pewnej (nieokreślonej) wartości prądu zwarciowego siła ta jest nawet 3-krotnie większa od siły F_t.

3. Jak należy zinterpretować przedstawioną na rys. 2.2 blisko 2,5-krotnie mniejszą wartość minimalnego odstępu między przewodami tego samego przęsła szynowego w temperaturze otoczenia 80°C, w porównaniu z odstępem wyznaczonym dla temperatury -25°C? Maksymalny kąt wychylenia przewodu jest dla tej temperatury mniejszy.
4. Przedmiotowa norma zwarciowa (PN-EN 60865-1) wskazuje, że ujawnienie się oddziaływań dynamicznych, związanych z opadaniem giętkich przewodów szynowych, obserwowane jest wówczas, gdy kąt wychylenia przewodów przekracza 70°. Można ten parametr wykorzystywać jako element kontroli niektórych obliczeń symulacyjnych. Czy ujawnieniu się sił F_f przedstawionych na rysunku 2.9 towarzyszy przekroczenie ww. kąta?
5. Przy założeniu, że udział prądu dopływającego z linii L206 w całkowitym prądzie zwarciowym badanej rozdzielni NN jest pomijalny (szczególnie dla punktu obliczeniowego A – tablica 5.2), nie są zrozumiałe konkluzje dotyczące trudniejszych warunków pracy rozdzielni przy zwarciach wyznaczanych z udziałem linii o większej długości. Wprawdzie spodziewana częstość zdarzeń awaryjnych w takim przypadku wzrasta, ale zmieniają się także parametry impedancyjne linii. Proszę Doktoranta o doprecyzowanie tych konkluzji.

Uwagi szczegółowe, drobne usterki i dostrzeżone nieścisłości:

- Str. 9 – stała czasowa w uznanej terminologii elektrotechnicznej wyrażana jest w jednostkach czasu, a nie odwrotnościach częstotliwości,
- Str. 21 – niezdefiniowane pojęcia „odkształcenie przewodu", „kształt krzywej przewodu",
- Str. 21 – niepoprawny zapis wzoru 2.21,
- Str. 22 – jest: „stała czasowa", powinno być: „stała czasowa obwodu zwarciowego",
- Str. 23 – niepoprawny zapis wzoru 2.30,
- Str. 24 – niepoprawny zapis wzoru 2.38,
- Str. 25 – niepoprawny zapis wzoru 2.42,

- Str. 31 – niezręczny skrót myślowy „siła elektromechaniczna w przewodzie,
- Str. 32 – powinno być: „...siła F_f ma stałą wartość...",
- Str. 36 – błąd językowy: „...powoduje wyższe wartości badanego siły...",
- Str. 37 – błąd językowy: „- przęseł (wartościami parametrów ...",
- Str. 39 – jest: „...zgodnie z Prawem...", powinno być: „...zgodnie z prawem...",
- Tablica 3.1. – symbolu iloczynu nie zastępuje się symbolem splotu; jednostka intensywności zwarć jest niepoprawnie zapisana,
- Tablica 3.2. – j.w.,
- Str. 45 – przywołana pozycja literaturowa [23] nie jest normą,
- Str. 45 i 46 – błędna numeracja wzorów,
- Str. 52 – niezręczny zapis: „...a przepustami transformatora drugiej strony napięcia",
- Rys. 4.8. – żargon: „ZSZ impulsuje na każdy wyłącznik...",
- Str. 59 – nieaktualna terminologia: „...po stronie punktu zerowego transformatora...",
- Str. 64 – jest: „...z napędem powietrznym...",powinno być: „...z napędem pneumatycznym...",
- Rozdział 5 – brak tablicy 5.1.
- Rys. 5.3. – symbolu iloczynu nie zastępuje się symbolem splotu; jednostka intensywności zwarć jest niepoprawnie zapisana,
- Rys.5.8. – literówka w podpisie rysunku,
- Str. 80 – jest: „urzadzeń", powinno być: „urządzeń",
- Rys. 5.18. – niezręczny zapis: „...w zależności od wielkości konfiguracji EAZ...",
- Str. 88 – jest: „wspływ", powinno być: „wpływ",
- Str. 89 – wg tablicy 5.12. F_t zmienia się nie od 11 kN ale od 12,3 kN,
- Str. 96 – nieprecyzyjna informacja: „...dla określonego przęsła..."
- Str. 99 – jest „...pod kątem określenia wartości czasu trwania zwarcia do ich wyznaczania T_{ko}, w oparciu o kryterium ryzyka.", powinno być: „...pod kątem określenia wartości czasu trwania zwarcia T_{ko}, do ich wyznaczania w oparciu o kryterium ryzyka.",
- Str. 110 – błędna gramatyka w zdaniu: „Opracowano szczegółowe algorytmy...",
- Str. 110 – jest: „...wykazały zależność od rozkładu prądu zwarciowego...", powinno być: „...wykazały ich zależność od rozkładu prądu zwarciowego...."

5. Wniosek końcowy

Przedstawione uwagi nie umniejszają mojej jednoznacznie pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Piechockiego. Autor opracował samodzielnie algorytmy i narzędzia badawcze, rozwiązał postawione sobie zadanie naukowe i udowodnił zamieszczoną w rozprawie tezę. Wyniki swoich badań przedstawił w kilku

współautorskich publikacjach, przy czym opracowane procedury badawcze mają znamiona uniwersalności i możliwości wykorzystania praktycznego. Sposób realizacji pracy wskazuje, że mgr inż. Piotr Piechocki posiada umiejętność samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych, oczekiwaną od kandydatów ubiegających się o stopień naukowy doktora. Rozprawa spełnia obowiązujące wymagania ustawowe i w związku z powyższym wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.