

**Recenzja rozprawy doktorskiej pani mgr. inż. Justyny HERLENDER:  
“ Impedancyjne zabezpieczenie różnicowe linii napowietrznych”**

**1. Podstawa wykonania recenzji**

Niniejszą recenzję opracowano na podstawie Uchwały Komisji ds. Stopni Naukowych Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej z dnia 22 czerwca 2020 roku. Podstawą wykonania jest opracowanie pod ww. tytułem o objętości 226 stron, w tym spis literatury zawierający 138 pozycji publikacji oraz załączniki.

**2. Teza naukowa i zakres pracy**

Sprecyzowanie tez naukowych ma miejsce na stronie 17 pracy. Zdaniem Autorki:

**Włączenie sygnałów napięciowych do zabezpieczenia różnicowego linii pozwala na poprawę jego działania, w szczególności w warunkach wystąpienia nasycenia przekładników prądowych, podczas zwarć w linii, jak również poza nią. Dodatkowym efektem wykorzystania sygnałów napięciowych jest możliwość dokładnego określenia odległości do miejsca zwarcia.**

Dla udowodnienia powyższych tezy przyjęto następujący zakres swojej pracy:

- w rozdziale trzecim omówiono przyczyny oraz konsekwencje występowania zakłóceń (w szczególności zwarć) w liniach napowietrznych,
- w rozdziale 4 opisano zasadę działania klasycznego zabezpieczenia różnicowoprądowego stosowanego do ochrony linii przesyłowych. Zwrócono uwagę na wpływ nasycania się przekładników prądowych na pracę zabezpieczenia różnicowego. Na podstawie dostępnej literatury zaprezentowano metody detekcji stanu nasycenia przekładników prądowych na końcach linii,
- w rozdziale 5 przedstawiono podstawowe modele linii stosowane do lokalizacji zwarć oraz przedstawiono problem synchronizacji pomiarów z obu końców linii. Omówiono istniejące impedancyjne algorytmy lokalizacji zwarć w liniach napowietrznych korzystające w większości z pomiarów z dwóch końców linii,
- w rozdziale 6 szczegółowo omówiono autorski udoskonalony algorytm impedancyjnego zabezpieczenia różnicowego linii napowietrznych, bazujący na pomiarach prądów i napięć z obu końców chronionej linii, łączący funkcję za-



równowagi zabezpieczenia jak i lokalizatora zwarcia. Ponadto opisano algorytm zapewniający poprawę dokładności lokalizacji zwarcia w przypadku wystąpienia nasycenia przekładników prądowych, jak również opracowane impedancyjne zabezpieczenie różnicowe dedykowane dla linii dwutorowych.

- w rozdziale 7 omówiono badane układy przesyłowe oraz sposób ich modelowania, ze szczególnym uwzględnieniem dokładnego odwzorowania linii przesyłowej 400 kV,
- w rozdziale 8 oceniono poprawność działania proponowanego zabezpieczenia wraz z oceną dokładności lokalizacji zwarcia. Dla wybranych przypadków dokonano porównania działania klasycznego algorytmu zabezpieczenia różnicowego linii z proponowanym w pracy algorytmem,
- w końcowych rozdziałach pracy przedstawiono wnioski końcowe dotyczące badań nad rozwojem analizowanego zabezpieczenia.

Oprócz wykazu literatury, dodano załączniki zawierające szczegółowe wyniki testów proponowanego algorytmu dotyczącego lokalizacji zwarć oraz szczegółowe wzory niezbędne do proponowanej w pracy procedury odtwarzania prądu w przypadku nasycenia przekładników prądowych.

### **3. Ocena znaczenia i aktualności podjętej tematyki**

Niezawodne oraz bezpieczne dostarczanie energii elektrycznej użytkownikom, jest celem podstawowym ale jednocześnie niewykonalnym w 100% z uwagi na występowanie zakłóceń. W tej sytuacji zasadnicze znaczenie odgrywa problem detekcji oraz lokalizacji zakłóceń w liniach przesyłowych przez elektroenergetyczną automatykę zabezpieczeniową, która podejmuje odpowiednią decyzję co do sposobu reagowania.

Jest rzeczą oczywistą, że zidentyfikowane zwarcie musi zostać jak najszybciej odłączone od zasilania żeby zapobiec rozprzestrzenianiu się skutków awarii oraz umożliwić (po usunięciu zwarcia) szybsze ponowne załączenie linii elektroenergetycznej do układu przesyłowego.

Jednym z najczęściej stosowanych rozwiązań do ochrony - również linii elektroenergetycznych, jest zabezpieczenie różnicowe bazujące na kryterium różnicowoprądowym, działające na zasadzie porównywania ze sobą chwilowych wartości prądów z końców zabezpieczanej linii. Wersja cyfrowa stabilizowanego zabezpieczenia różnicowego linii przesyłowej zapewnia zadowalającą niezawodność oraz pewność działania w większości przypadków występowania zwarcia w linii.

Z doświadczeń eksploatacyjnych wynika, że z powodu błędów układów pomiarowych lub systemów transmisji danych, nie zawsze zabezpieczenie różnicowe linii może działać prawidłowo, przy czym dostępne obecnie metody przetwarzania sygnałów pomiarowych dają możliwość zwiększenia niezawodności działania zabezpieczenia.

Zwrócić należy uwagę na przypadki nieprawidłowego działania zabezpieczenia dla zwarć, podczas których dochodzi do nasycenia przekładników prądowych. Są to sytuacje podczas zwarć zewnętrznych, gdy wskutek błędów transformacji przekładników są one identyfikowane jako zwarcia wewnątrz linii. Prowadzi to do nieuzasadnionego wyłączenia linii, w której nie wystąpiło zwarcie co może doprowadzić nawet do utraty stabilności systemu.

Uważam, że temat podjęty przez Doktorantkę dotyczący opracowania nowego impedancyjnego algorytmu zabezpieczenia różnicowego, w celu poprawy funkcjonowania zabezpieczenia linii przesyłowych dla przypadków zwarć zewnętrznych z nasyceniem przekładników prądowych oraz możliwości określania dokładnej odległości do miejsca zwarcia, jest ważny i bardzo aktualny a wyniki analiz niezwykle istotne dla poszukiwań rozwiązań mających na celu poprawę funkcjonowania automatyki elektroenergetycznej.

Ma to również fundamentalne znaczenie dla aspektów technicznych związanych z przesyłem energii elektrycznej dla ogólnie pojętego bezpieczeństwa pracy systemu elektroenergetycznego.

#### **4. Ocena merytoryczna pracy**

##### **4.1. Zastosowana metodyka badań**

Podczas badań symulacyjnych przebiegów przejściowych w układzie elektroenergetycznym prawie zawsze występuje problem właściwego odwzorowania linii przesyłowych (napowietrznych lub kablowych). Zastosowane do tych celów odpowiednie modele muszą, w zależności od postawionego zadania, spełniać wymagania uzyskiwania wyników o określonej dokładności. Linia w rzeczywistości stanowi (jako jedyny) element układu elektroenergetycznego o parametrach równomiernie rozłożonych. Badania komputerowe stanów przejściowych w liniach o parametrach rozłożonych wymagają zatem zastosowania odpowiednich metod numerycznych.

Dla modelu linii o parametrach rozłożonych, zależność parametrów od częstotliwości uwzględnia się przez zastosowanie tzw. modelu Martiego, stanowiącego optymalne rozwiązanie z punktu widzenia dokładności oraz szybkości obliczeń. Model Martiego jest dostępny we wszystkich wersjach programu EMTP, również ATP wykorzystywanym w opiniowanej pracy doktorskiej. Różne wersje EMTP oferowane są dla celów komercyjnych, ale również edukacyjnych, szczególnie dla naukowców oraz studentów. Program EMTP jest stale uaktualniany i ma swoich użytkowników (zwolenników) grupowanych na wszystkich kontynentach świata, wykazujących większą lub mniejszą aktywność.

Oprócz modelu linii Martiego w programie ATP-EMTP dostępne są również modele o parametrach skupionych oraz rozłożonych niezależnych od częstotliwości – model Bergerona, oparty na teorii fal wędrownych.

Mające szerokie zastosowanie modelowanie linii za pomocą układu połączonych szeregowo elementów zastępczych - trójfazowych czwórników uwzględniających sprzężenia indukcyjne i pojemnościowe - może, prowadzić do błędnych rezultatów objawiających się występowaniem składowych sztucznych nie istniejących w układach rzeczywistych. Niezależnie od wątpliwych rezultatów osiągnięcia "optymalnego" odwzorowania linii za pomocą takiego układu następuje znaczne wydłużenie czasu obliczeń.

Szczegółowa analiza testowania nowego algorytmu dla wszystkich wygenerowanych przypadków zwarciovych w programie ATP bazowała na algorytmach odwzorowanych w programie MATLAB.

Jest widoczne, że Autorka ma doskonale rozeznanie w aktualnie dostępnych oprogramowaniach oraz właściwie wykorzystuje nowoczesne metody numeryczne i modele matematyczne elementów systemu elektroenergetycznego.

## 4.2. Ocena wyników analizy

Autorka wybrała model linii o parametrach rozłożonych niezależnych od częstotliwości. Wybór jest prawidłowy dla badań w zakresie przyjętym w opiniowanej pracy. Gdyby analiza miała być przeprowadzana dla elektromagnetycznych zjawisk przejściowych np. podczas przebiegu byłoby to podejście błędne.

Do badań symulacyjnych wybrano układ z linią przesyłową pracującą w systemie dwustronnie zasilanym. Podczas analiz symulacyjnych system elektroenergetyczny jest reprezentowany przez wewnętrzne i zewnętrzne sieci. Sieci wewnętrzne, w tym przypadku linie przesyłowe są modelowane z dokładnym odwzorowaniem wszystkich właściwości, które są istotne przy analizie danego zjawiska. System zewnętrzny może być odwzorowany na podstawie zredukowanego układu zastępczego albo na zastępczej strukturze określonej na podstawie jednej z dostępnych metod w dziedzinie czasu lub częstotliwości.

Korzystanie z zastępczych systemów zewnętrznych może być reprezentatywne tylko dla ograniczonego zakresu badań; nie jest możliwe uwzględnianie zmieniających się warunków w tym systemie. Nie jest możliwe również uwzględnienie wpływu zmian i zjawisk zachodzących w systemie wewnętrznym na strukturę oraz parametry zastępczego systemu zewnętrznego. Wymagałoby to stosowania stałej aktualizacji parametrów zastępczego systemu zewnętrznego.

W opiniowanej pracy przyjęto model zastępczy, którego parametry są określane na podstawie mocy zwarciowej systemu. Uważam, że dla badanego zakresu analizy takie podejście jest właściwe. Wynika to z faktu, że systemy charakteryzujące się dużą mocą zwarciową nie wpływają w zasadniczy sposób na przebiegi elektromagnetyczne – przede wszystkim składowe swobodne wyższych częstotliwości. Wskutek dużej mocy zwarciowej składowe swobodne szybko zanikają i elementy sąsiednie nie odgrywają tutaj większej roli.

W przypadku układów, zawierających dużą liczbę linii przesyłowych, dołączonych do węzłów analizowanej linii, należy zastosować (jeśli jest taka konieczność wynikająca z braku odpowiedniego narzędzia obliczeniowego albo braku szczegółowych danych, dotyczących tych linii) układ z dołączonymi do węzłów linii impedancji falowych podzielonych przez liczbę linii.

## 4.3. Uwagi dyskusyjne

W trakcie studiowania pracy nasunęły mi się następujące uwagi i pytania:

- Kompensację prądu pojemnościowego linii dokonuje się przez zmodyfikowane fazory napięcia, „co sprowadza się do tego, że oba wyrażenia w nawiasach kwadratowych po lewej stronie równania (6.11) zostają zastąpione przez ich średnią wartość”. Jak wyznacza się wartości średnie tych wyrażeń, szczególnie w przypadku linii niejednorodnych impedancyjnie na całej długości?
- W równaniach wyznaczających wartości wielkości kryterialnych  $\underline{z}_{diff}^{mod}$ ,  $\underline{z}_{KRYT}$ ,  $d$ ,  $\varphi_{kryt}$  pojawiają się fazory napięć i prądów, np.  $V_S$ ,  $V_R$ ,  $I_S$ ,  $I_R$  czy są to fazowy 1 harmonicznej tych wielkości czy 1- harmonicznej składowej zgodnej lub przeciwnej lub zerowej? Zakładam, że są to fazory zsynchronizowane czasowo obliczane w jednostkach

PMU. Czym przykładowo różni się fazor  $I_S$  od fazora  $I_{SL1}$  odpowiednio w równaniach (6.15) i (6.29)?

- Jakie obliczone wartości  $d$  (identyfikujące miejsce wystąpienia zakłócenia) uzyskuje się dla zwarć zewnętrznych?
- Równania (6.15) i (6.29) różnią się zapisem impedancji linii  $z_L$  lub  $z_{1L}$  odpowiednio dla zwarć symetrycznych i niesymetrycznych. Czy w przypadku zwarć symetrycznych nie powinna ona wynosić  $z_{1L}$ ?
- Na stronie 51 napisano: „Ponadto, w przypadku zwarć zewnętrznych wartość zmodyfikowanej impedancji różnicowej jest równa  $Z_L/2$ , natomiast impedancja kryterialna przyjmuje w tym wypadku wartość równą 0.” Z równania (6.15) wynika, że wynik zero uzyska się dla  $d=1/2$  a więc zwarcia w połowie chronionej linii. Jakie wartości przyjmuje parametr  $d$  w przypadku zwarć zewnętrznych, aby spełnić warunek zerowej impedancji kryterialnej?
- Ze schematów przedstawionych na rys. 6.15 i 6.16 wynika, że w „części zabezpieczeniowej” algorytmu nie dokonuje się korekcji prądów pomiarowych zniekształconych wskutek nasycenia się przekładników prądowych. W jaki sposób uzyskuje się zatem reprezentatywne wartości wielkości kryterialnych  $Z_{diff}^{mod}$ ,  $Z_{KRYT}$ ,  $d$ ,  $\varphi_{kryt}$  pozwalające na poprawną identyfikację miejsca zakłócenia? Wielkości te zależą od fazorów prądów i napięć pomiarowych.
- Obecne normy definiują cechy algorytmów zaimplementowanych w jednostkach PMU również dla celów zabezpieczeniowych. Jednak czy pozwalają one na poprawne wyznaczenie cech fazora w stanach nieustalonych zakłóceń zwarciovych, szczególnie przy obecności składowych nieokresowych o relatywnie długim czasie zanikania? Raportowanie wyznaczonych cech fazorów sygnałów pomiarowych odbywa się z częstością 50 ramek na sekundę, tj. co 20ms. Czy nie jest to przeszkodą dla realizacji opracowanych algorytmów, w których rozdzielczość czasową przyjęto na poziomie 1ms?
- W jaki sposób wymóg synchronizacji czasowej wpłynie na czas podjęcia decyzji zabezpieczeniowej w kontekście czasu przesyłu danych z jednostek pomiarowych z przeciwległego końca linii?
- We wnioskach pojawia się stwierdzenie, że „średni czas detekcji wynosi ok. 8 ms”. W stosunku, do jakiej chwili czasowej jest on odnoszony? Jeżeli wykorzystano pełnokresową filtrację ortogonalną to uzyskanie stabilnej odpowiedzi po zaburzeniu sygnału wejściowego uzyskuje się po czasie równym długości okna pomiarowego, tj. 20ms? Pozostaje jeszcze realizacja kryteriów decyzyjnych i weryfikacja podjętej decyzji. Proszę o komentarz.
- Jak rozumieć sformułowanie „jednofazowa linia przesyłowa”? (por. str.48)

Uwagi podniesione przy ocenie głównych rezultatów rozprawy oraz pytania szczegółowe, mają wyraźnie charakter dyskusyjny i nie wpływają na moją ocenę recenzowanej rozprawy, która jest jednoznacznie pozytywna i wysoka



#### 4. Wniosek końcowy

Przewód doktorski pani mgr inż. Justyny HERLENDER (wszczęty w dziedzinie: nauki techniczne, w dyscyplinie naukowej: elektrotechnika) procedowany jest wg Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora oraz Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2016 r. poz.882 i 1311) z określeniem relacji osiągnięć do dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych.

W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska jest bardzo interesującą, wartościową oraz oryginalną pracą i wg mnie spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U.2003 nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami).

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny HERLENDER do publicznej obrony.

Jednocześnie stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny HERLENDER.

A handwritten signature in black ink, appearing to be the initials 'JH' or similar, written in a cursive style.