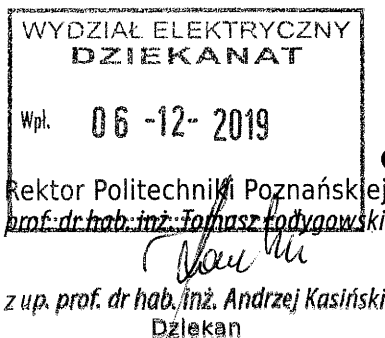


Prof. dr hab. inż. Paweł Sowa  
Politechnika Śląska, Gliwice  
Wydział Elektryczny



Gliwice, 25.11.2019

## **Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr inż. Bartosza OLEJNIKA**

### **Skuteczność sygnalizatorów przepływu prądu zwarciovego podczas wysokooporowych zwarć doziemnych w sieci średniego napięcia**

#### **1. Podstawa wykonania recenzji**

Niniejszą recenzję opracowano zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej z dnia 24 września 2019. Podstawą wykonania jest opracowanie pod ww. tytułem, o objętości 152 stron, w tym spis literatury zawierający 109 pozycji.

#### **2. Teza naukowa i zakres pracy**

Teza naukowa rozprawy została sprecyzowana na stronie 57 pracy, brzmi ona następująco:

- wysoką efektywność pracy sygnalizatorów przepływu prądu zwarciovego można uzyskać przez zastosowanie adaptacyjnych kryteriów ziemnozwarciowych, których nastawy w sposób dynamiczny mogą być dopasowane do warunków napięciowych powstałych w sieci podczas doziemienia,
- w celu ograniczenia kosztu jednostkowego sygnalizatora przepływu prądu zwarciovego wyposażonego w kryteria adaptacyjne poziom składowej zerowej napięcia sieci można określać w oparciu o analizę napięcia rejestrowanego tylko w jednej fazie,
- zastosowanie uproszczonego układu szacowania poziomu składowej zerowej napięcia umożliwia niskokosztowo zaimplementować w sygnalizatorach przepływu prądu zwarciovego kryteria admitancyjne, których skuteczność w detekcji doziemień będzie wyższa niż kryteriów nadprądowych zerowych.

Dla udowodnienia powyższych tez naukowych Autor:

- ocenił skuteczności współcześnie stosowanych sygnalizatorów przepływu prądu zwarciovego podczas zakłóceń ziemnozwarciowych,
- opracował kryteria adaptacyjne do detekcji wysokooporowych zwarć doziemnych, których idea bazować będzie na zmianie wartości nastawczej prądu w zależności od wartości składowej zerowej napięcia w sieci, do zastosowania w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor oraz w sieci skompensowanej,
- opracował uproszczone metody wyznaczania składowej zerowej napięcia, wykorzystujące sygnały pochodzące z jednego sensora napięciowego do pomiaru

napięcia fazy względem ziemi oraz transformatora potrzeb własnych dowolnego urządzenia zainstalowanego w głębi sieci średniego napięcia,

- przeanalizował skuteczność kryterium admitancyjnego do detekcji wysokooporowych zwarcć doziemnych, wykorzystując nowe metody wyznaczania składowej zerowej napięcia.

Praca składa się z jedenastu rozdziałów:

- Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie w problematykę pracy, którą jest skuteczność sygnalizatorów przepływu prądu zwarciovego podczas wysokooporowych zakłóceń doziemnych w sieci średniego napięcia.
- W rozdziale drugim podano ogólne informacje związane z budową i eksploatacją sieci średniego napięcia, wraz z informacjami o awaryjności sieci średniego napięcia w Polsce.
- Rozdział trzeci opisuje zwarcie doziemne jako zjawisko fizyczne oraz metodologię podstawowych obliczeń ziemnozwarciowych. Dodatkowo wprowadza w tematykę sygnalizatorów przepływu prądu zwarciovego.
- W rozdziale czwartym dokonano przeglądu opisywanych w literaturze światowej kryteriów i metod detekcji zwarcć doziemnych w sieci średniego napięcia.
- W rozdziale piątym przedstawiono cele oraz tezy rozprawy doktorskiej. Opisano również zakres pracy dotyczący wykonywanych badań i analiz.
- W rozdziale szóstym przedstawiono dwie uproszczone metody wyznaczania składowej zerowej napięcia w sieci średniego napięcia. Ponadto zaprezentowano rozważania teoretyczne związane z tymi metodami i wyniki badań laboratoryjnych.
- W rozdziale siódmym opisano kryteria zerowoprądowe z funkcją adaptacji do detekcji zwarcć doziemnych w sieci średniego napięcia z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor oraz dławik gaszący.
- W rozdziale ósmym przeanalizowano skuteczność kryterium admitancyjnego, wykorzystując uproszczone metody wyznaczania składowej zerowej napięcia w sieci średniego napięcia.
- W rozdziale dziewiątym zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych kryteriów zerowoprądowych z funkcją adaptacyjną.
- W rozdziale dziesiątym opisano badania sieciowe wybranych metod i kryteriów, w tym wyniki eksperymentów przeprowadzonych w rzeczywistej sieci średniego napięcia,
- W rozdziale jedenastym podsumowano rezultaty prac w odniesieniu do podstawionych wcześniej tez.

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

Zwarcia doziemne w napowietrznych sieciach rozdzielczych, jako najczęściej występujące zakłócenia w pracy sieci średniego napięcia stanowią wyjątkowe wyzwanie dla badań naukowych prowadzonych w elektroenergetyce światowej. Z powodu niskiego poziomu sygnałów pomiarowych zasilających zabezpieczenia ziemnozwarciowe, ich skuteczność jest problematyczna. Jak wiadomo niski poziom prądów zwarciovych w sieci średniego napięcia

wynika przede wszystkim z braku bezpośredniego uziemienia jej punktu neutralnego. Na wartość tego prądu wpływa przede wszystkim admitancja obwodu zwarciovego (pojemności doziemne wszystkich linii pracujących w sieci), która wzrasta po połączeniu punktu neutralnego z ziemią przez rezystancję, zaś po zastosowaniu cewek Petersena maleje nawet kilkadziesiąt razy. Możliwości lokalizowania takich zwarc przez zabezpieczenia ziemnozwarciowe są bardzo małe.

Zwarć wysokooporowych nie można wykrywać za pomocą tradycyjnych przekąźników nadprądowych ani wyłączać bezpiecznikami. Dodatkowym utrudnieniem jest niestabilny przebieg prądu wykazujący chaotyczne, nieprzewidywalne fluktuacje o zmiennej zawartości różnych harmonicznych. Prądy o takim charakterze płyną w szczególności podczas przerywanych zwarc łukowych.

Dla sieci średniego napięcia opracowano wiele zabezpieczeń ziemnozwarciowych, które wykorzystują w działaniu różne kryteria. Powszechnie stosowane są zabezpieczenia wykorzystujące ustalone przebiegi wielkości ziemnozwarciowych, działające na podstawie różnego rodzaju kryteriów prądowych, kierunkowych lub admitancyjnych. Kryteria admitancyjne opracowano i szczegółowo analizowano w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. Od wielu lat prace w tej dziedzinie oraz wyniki otrzymywanych analiz sprawiają, że Instytut jest niekwestionowanym autorytetem i liderem badań dotyczących zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach średnich napięć. Z uwagi na złożoność zagadnień jak i trudna analiza Instytut Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej jest bezkonkurencyjną jednostką naukową wśród wszystkich naukowych ośrodków technicznych w Polsce. Dlatego dobrze się stało, że problematyka związana ściśle analizą pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych została podjęta przez Autora w Politechnice Poznańskiej. Temat należy zatem uznać za ważny, szczególnie że wyniki jego prac wskazują na konieczność dalszych analiz w tej dziedzinie.

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

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

Decydującym dla wyników badań jest prawidłowy wybór narzędzi badawczych w tym modeli i oprogramowań dla analizy zjawisk podlegających ocenie. Istnieje szereg programów użytkowych zawierających różne zweryfikowane modele elementów systemu elektroenergetycznego, których wykorzystanie powinno zależeć tylko od możliwości obliczeniowych oraz zebrania odpowiednich danych dostosowanych do wymaganych przez te programy formatów wejściowych. W literaturze światowej od wielu lat prezentowane są różne podejścia do tego zagadnienia, efektem czego są propozycje odpowiednich modeli, które muszą w zależności od postawionego zadania, spełniać wymagania uzyskiwania wyników o określonej dokładności. Autor stworzył model sieci średniego napięcia w środowisku PSCAD. Moim zdaniem ten wybór jest właściwy. Program PSCAD jest dostępny od ponad 40 lat i jest jednym z narzędzi pochodzących od programu EMTP (powstały w latach sześćdziesiątych XX wieku), używanych w ośrodkach naukowych na całym świecie. W programach tych w zasadzie stosuje się podobne modele elementów badanego układu natomiast różnią się przede wszystkim sposobem wprowadzania danych wejściowych -



ostatnio wyłącznie za pomocą graficznych programów pomocniczych. Dla danego elementu użytkownik ma możliwość wyboru różnych odwzorowań – dotyczy to w szczególności modeli linii przesyłowych (napowietrznych lub kablowych). 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 linii krótkich średniego napięcia dopuszczalne jest modelowanie linii za pomocą parametrów skupionych – autor wybrał czwórnik typu Gamma. Niezrozumiałą jest, podany na stronie 118 (rysunek 9.2) opis elementu LINE. Co to są za parametry  $R_0$ ,  $L_0$ ,  $C_0$  i  $G_0$  ?. W spisie oznaczeń nie ma wyjaśnienia tych oznaczeń, co może prowadzić do błędnych interpretacji.

Należy wyraźnie podkreślić, że modelowanie linii za pomocą czwornika o parametrach skupionych dla badania elektromagnetycznych przebiegów przejściowych jest obarczone błędem, o tyle stosowanie kaskadowego połączenia takich czworników (połączenie łańcuchowe) jest niedopuszczalne. W takim modelu dochodzi do wielokrotnych odbić, co wpływa na przebiegi prądów i napięć, zniekształcając je w sposób sztuczny. W rezultacie pojawiają się dodatkowe oscylacyjne składowe, których odróżnienie od składowych swobodnych wyższej częstotliwości, które w naturalny sposób pojawiają się podczas zakłóceń, będzie bardzo trudne.

W pośredni sposób Autor potwierdza to na stronie 41 przy przeglądzie metod detekcji zwarć doziemnych, gdzie kwestionuje próby zastosowania metod falowych do lokalizacji zwarć w sieci dystrybucyjnej. Z powodu znacznego rozgałęziania tego typu sieci odbicia fal mogą pochodzić z różnych źródeł, nie tylko z miejsca zwarcia.

Wybór właściwych narzędzi matematycznych do symulacji przebiegów przejściowych, że Autor ma doskonałe rozeznanie w aktualnie dostępnych oprogramowaniach oraz właściwie wykorzystuje nowoczesne metody numeryczne i modele matematyczne elementów systemu elektroenergetycznego.

Godnym podkreślenia jest fakt, że Autor bardzo dobrze opisuje zamierzenia badawcze a następnie bogato dokumentuje przeprowadzone symulacje.

#### **4.2. Ocena wyników analizy**

Przytoczone w pracy rezultaty nie tylko w pełni potwierdzają tezę sformułowaną przez Autora, lecz także stanowią istotny krok w kierunku rozwiązania szeregu problemów do tej pory nie analizowanych.

Interesujące i na pewno z entuzjazmem przyjęte przez pracowników energetyki są wyniki prób sieciowych, które pokazały, że dokładność wyznaczania wartości skutecznej składowej zerowej napięcia w sieci średniego napięcia na podstawie pomiaru tylko jednego napięcia fazy względem ziemi jest wystarczająca do zastosowań praktycznych, w szczególności związanych z działaniem kryteriów ziemnozwarciowych automatyki zabezpieczeniowej. Dodanie lokalnego pomiaru  $U_0$  pozwala stosować np. kryterium zerowoprądowe adaptacyjne lub admitancyjne, które cechują się wysoką skutecznością detekcji doziemień.

Dodatkowe korzyści wynikają z zastosowania metody wyznaczania składowej zerowej napięcia na podstawie pomiaru jednego napięcia fazy względem ziemi i napięcia międzyfazowego. Dzięki temu możliwe jest wyznaczanie fazora  $U_0$  i skorzystanie ze wszystkich kryteriów z grupy admitancyjnych, w szczególności z kryterium konduktancyjnego i susceptancyjnego kierunkowego. Autor informuje, że metoda nie została sprawdzona podczas badań sieciowych. Powołuje się jednak na rezultaty przeprowadzonych eksperymentów laboratoryjnych pozwalających pozytywnie ocenić wyniki pracy algorytmu.

Szkoda, że przy tak doskonałym opanowaniu metod modelowania Autor nie przeprowadził obliczeń symulacyjnych z uwzględnieniem łuku elektrycznego - nieliniowej i niestacjonarnej rezystancji zwarcia. Szczególnie interesujące byłby rezultaty dla dynamicznej charakterystyki całkowitej rezystancji zwarcia. Charakterystyka napięciowo-prądowa przebiega kolejno w I oraz III ćwiartce układu współrzędnych w postaci nieregularnych pętli, przy czym jej kształt zależy od wielu czynników. Odwzorowanie charakterystyki możliwe jest w bardzo prosty sposób za pomocą modeli dostępnych w najnowszych wersjach programu MicroTran (EMTP).

#### 4.3. Uwagi dyskusyjne

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

- Czy uproszczone metody wyznaczania parametrów fazora napięcia  $U_0$  lub jego wartości skutecznej  $U_0$  przewidują wstępną filtrację mierzonych napięć fazowych (międzyprzewodowych). Jeżeli nie, to jak może to wpływać na dokładność wyznaczania parametrów fazorów (wartości skutecznych) w stanach dynamicznych (przejściowych) zwarć doziemnych, w szczególności wysokooporowych?
- Uproszczone metody wyznaczania wartości składowej zerowej napięcia były testowane na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w przekładniki napięciowe o przekładni 230V/100V. Czy prowadzono badania na rzeczywistych przekładnikach napięciowych instalowanych w sieciach średniego napięcia mające na celu oszacowanie błędów napięciowego i kąтового (np. posilując się metodami statystycznymi) wyznaczenia składowej  $U_0$ , weryfikujące błędy uzyskane na stanowisku laboratoryjnym? Czy dane z prób obiektowych zamieszczone w rozdziale 10 pracy Autor uważa za wystarczające do weryfikacji poziomów tych błędów?
- Jak rozumieć pojęcie „sieć skompensowana”? Czy w rzeczywistych układach sieci SN pracują one jako kompensowane czy skompensowane?
- W jaki praktyczny sposób można zrealizować funkcjonalność adaptacyjną sygnalizatorów przepływu prądu zwarciego?
- Czym różni się struktura funkcjonalna sygnalizatora (rys. 3.5, str. 31) od przekaźnika zabezpieczeniowego, np.  $I_0 > ?$

- Odnosi się wrażenie, że przedstawione w rozprawie „modyfikacje adaptacyjne” kryteriów zabezpieczeniowych dedykowanych zvarciom doziemnym zostały przeanalizowane dla stanów quasi ustalonych doziemień (wykorzystuje się parametry fazorów sygnałów, wartości skuteczne itp.). Czy były prowadzone badania szacujące poziom błędów pomiarowych i decyzyjnych (kryterialnych) pracy analizowanych algorytmów w stanach dynamicznych zwarć doziemnych? Proszę o komentarz.

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.

## 5. Wniosek końcowy

Autor rozwiązał poprawnie postawiony problem. Użył w tym celu właściwych i nowoczesnych metod naukowych i udowodnił postawioną przez siebie tezę. Sposób przeprowadzenia badań wskazuje, że mgr inż. **Bartosz OLEJNIK** posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.



Przewód doktorski mgr. inż. Bartosza Olejnika (wszczęty 27.06.2017 r. 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).