

Wrocław 10 lipca 2024 r.

Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Rosołowski
Katedra Energoelektryki
Wydział Elektryczny
Politechnika Wrocławska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Łukaszewskiego
pt. *"Zastosowanie metody pęku macierzy do klasyfikacji i lokalizacji zwarć w sieciach
dystrybucyjnych na podstawie analizy fal wędrownych"*

1. Dane ogólne

Recenzowana praca powstała w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Łukasza Nogala. Tekst pracy został zawarty na 256 stronach łącznie z załącznikami i wykazem literatury. Praca została wydana w zwartej formie w postaci publikacji książkowej. Niniejsza recenzja pracy została sporządzona na wniosek Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej.

2. Charakterystyka tematu rozprawy

Zgodnie z tytułem rozprawy, przedstawiona praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny i łączy się z zadaniem teoretycznego opracowania i symulacyjnego sprawdzenia nowej metody klasyfikacji zwarć i ich lokalizacji w elektroenergetycznych sieciach dystrybucyjnych na podstawie analizy fal wędrownych. Do analizy przebiegów prądu i napięcia towarzyszących zwarciom autor proponuje zastosować pomiarową metodę pęku macierzy, która jest stosunkowo nowym narzędziem separacji sygnałów użytecznych od szumu. Jest to szczególnie ważne z punktu widzenia zjawisk, jakie występują we współczesnych sieciach dystrybucyjnych, które zostały wybrane jako obiekt badań z zastosowaniem proponowanej metody.

Sieci dystrybucyjne, a więc przede wszystkim sieci średniego napięcia, charakteryzują się zupełnie inną strukturą niż sieci przesyłowe. Są to zazwyczaj sieci promieniowe, najczęściej jednostronnie zasilane, o bardzo niejednorodnej strukturze. Ze względu na potrzeby wynikające z obowiązku zapewnienia wysokiej niezawodności zasilania (co jest unormowane przez definicję odpowiednich współczynników niezawodnościowych), w ostatnim okresie dyspozytorzy takich systemów udzielają wielką uwagę problemom utrzymania tych współczynników na przewidzianym poziomie. Z tego punktu widzenia, sprawą najważniejszą jest szybkie wykrycie zwarcia, jego niezawodna lokalizacja oraz odbudowa uszkodzonej sieci. Zadanie to jest w praktyce realizowane przez zastosowanie różnych metod pomiarowych i środków technicznych. Autor recenzowanej pracy założył, że pierwsza część tego zadania, sprowadzająca się do detekcji, klasyfikacji i lokalizacji zwarcia może być realizowana w centralnym punkcie zasilania sieci. Zadanie to nie jest proste do wykonania właśnie ze względu na złożoną strukturę nadzorowanego obiektu i zachodzące w nim złożone zjawiska elektromagnetyczne, o dużej dynamice, towarzyszące zwarciom.

W klasycznym podejściu do rozwiązania postawionego zadania stosowane są różne sposoby rozłożonego pomiaru i identyfikacji miejsca wystąpienia zakłócenia przez rozmieszczenie odpowiednich czujników zwarciovych wzdłuż poszczególnych gałęzi sieci. Oczywiście niedogodnością takiego rozwiązania jest potrzeba zasilania takich czujników i ich odpowiedniej komunikacji z centralnym systemem nadzoru (SCADA).

Rozwiązania bazujące na centralnym cyfrowym pomiarze sygnałów prądu i napięcia i ich przetwarzaniu w oparciu o klasyczne fourierowskie metody przetwarzania sygnałów nie są dostatecznie dokładne i selektywne ze względu na niską częstotliwość próbkowania i nieadekwatność stosowanych algorytmów z zachodzącymi procesami w nadzorowanej sieci. Obserwowany w ostatnich latach rozwój technologii mikroprocesorowej oraz towarzyszące temu nowe koncepcje przetwarzania sygnałów stwarzają możliwość tworzenia przystępnych finansowo rozwiązań układów pomiarowych realizujących funkcje identyfikacji parametrów związanych z falowymi zjawiskami w sieciach elektrycznych. Takie rozwiązania odnoszące się do zabezpieczeń i lokalizacji zwarć w sieciach przesyłowych są od kilku lat dostępne komercyjnie. Zastosowanie takich rozwiązań w odniesieniu do sieci dystrybucyjnych napotyka na kolejne ograniczenia, które wynikają ze wskazanej powyżej złożoności rozpatrywanych sieci. Głównym problemem pomiarowym jest tutaj konieczność odseparowania dużej liczby sygnałów o podobnym kształcie, które są rezultatem odbicia i załamania elektromagnetycznych fal wędrownych w gęstwinie węzłów sieci dystrybucyjnej.

Na podstawie tytułu recenzowanej pracy można jednak zauważyć, że autor podjął się jednak rozwiązania tego problemu, pomimo występowania oczywistych zagrożeń. Podejście takie należy w pełni aprobować, gdyż stwarza ono możliwość pokonania istotnej bariery teoretycznej i eksperymentalnej na drodze do osiągnięcia ciekawego rozwiązania, które może się także okazać rozwiązaniem pożytecznym praktycznie.

Recenzowana rozprawa dotyczy zatem aktualnych problemów związanych z szerokim zakresem zagadnień dotyczących cyfrowych pomiarów szybkich procesów elektromagnetycznych objawiających się w postaci zjawisk falowych i rozwoju nowoczesnych metod selekcji informacji zawartych w takich przebiegach. Autor zaproponował zastosowanie w tym celu stosunkowo nowej techniki pomiarowej bazującej na metodzie pęku macierzy. Sformułowane we wstępnej części pracy zadania o charakterze teoretycznym i eksperymentalnym wymagały dogłębnego zaznajomienia się z istniejącymi rozwiązaniami, w dużej mierze wykraczające poza standardowe metody cyfrowego przetwarzania sygnałów, ich krytycznej oceny oraz propozycji symulacyjnej weryfikacji nowych rozwiązań. Podjęty temat, zarówno z użytecznego, jak i teoretycznego punktu widzenia jest więc, bez wątpienia, zagadnieniem naukowym odpowiednim na rozprawę doktorską. Teoretyczne udowodnienie postawionej w pracy tezy oraz jej symulacyjna weryfikacja jest ważnym osiągnięciem w zakresie dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, a w szczególności w zakresie automatyki elektroenergetycznej.

3. Charakterystyka rozwiązania postawionego problemu i użytych metod

Recenzowana praca jest podzielona na 6 rozdziałów; zawiera ponadto wykaz bibliografii, spis najważniejszych pozycji literaturowych oraz całą serię załączników, w których zamieszczone są parametry różnych elementów pomiarowych, modele analizowanych sieci oraz wyniki przeprowadzonych testów. We wstępnej części sformułowane są: cel i teza pracy oraz wymienione są szczegółowe zadania, zmierzające do jej udowodnienia. Teza pracy pojawia się jako wynik

przeprowadzonej analizy różnych dotychczasowych rozwiązań algorytmicznych i sprzętowych zmierzających do określenia rodzaju i miejsca wystąpienia zwarcia w sieciach dystrybucyjnych. Autor przywołuje różne proponowane rozwiązania oraz dostępną komercyjnie aparaturę służącą do zabezpieczeń i lokalizacji zwarć w liniach przesyłowych, działających w oparciu o algorytmy analizy fal wędrownych. Podkreśla, że rozwiązania te nie są skuteczne w odniesieniu do sieci dystrybucyjnych ze względu na ich odmienną strukturę oraz dużą złożoność występujących zjawisk falowych.

Następny rozdział (rozd. 2) zawiera omówienie zjawisk falowych występujących w liniach napowietrznych oraz przedstawia sposoby formułowania matematycznego modelu takich linii, co także umożliwia określenie ich zastępczych parametrów. W rozdziale trzecim omówione są właściwości podstawowych przetworników pomiarowych, za pomocą których transformowane są sygnały prądu i napięcia do obwodów wtórnych.

Teoretyczne wprowadzenie do proponowanych w pracy algorytmów przetwarzania sygnałów na bazie metody pęku macierzy jest prezentowana w rozdziale czwartym. Omówione są podstawowe zależności występujące w tych algorytmach oraz pokazane zostały procedury określania wybranych parametrów falowych: wykrywanie impulsów, czy też wykrywanie czoła fali powstającej w wyniku zwarcia.

Kolejne dwa rozdziały prezentują podstawowy materiał związany z udowodnieniem postawionej tezy. W rozdziale piątym omówione są proponowane algorytmy klasyfikacji występujących zwarć na podstawie amplitud fal wędrownych generowanych podczas zwarcia. Omówione są przeprowadzone testy symulacyjne z wykorzystaniem opracowanego modelu sieci średnich napięć. W celu oceny proponowanej metody autor przeprowadził również podobną analizę z udziałem modelu sieci przesyłowej, w której obserwuje się mniej krytyczne warunki pomiaru parametrów falowych. Analiza przeprowadzonych testów symulacyjnych uzasadnia wprowadzone uproszczenia w odniesieniu do algorytmu stosowanego w sieci dystrybucyjnej.

W rozdziale szóstym omówiony został algorytm lokalizacji miejsca zwarcia w sieci dystrybucyjnej. Jest to złożone zadanie ze względu na występowanie dużej liczby podobnych źródeł fal, powstających w wyniku wielokrotnych odbić w złożonej konfiguracji sieci. Zaproponowane zostały dwa warianty metody, w której identyfikacja miejsca zwarcia odbywa się na zasadzie porównania zarejestrowanych i odpowiednio przetworzonych sygnałów z sygnałami generowanymi w ustalonych miejscach wystąpienia zwarcia. Jest to znana z niektórych rozwiązań metoda porównania rzeczywistego zdarzenia z efektem uzyskanym w drodze symulacji.

Tekst rozprawy pokazuje, że autor w sposób metodyczny uzasadnia postawioną tezę, dostarczając jednocześnie wskazówek do rozwoju proponowanej metody. Możliwość i kierunki dalszych badań służących doskonaleniu zaproponowanych algorytmów jest sygnalizowane w zakończeniu rozdziału szóstego pracy. Struktura tekstu dysertacji, prezentacja prowadzonych badań zakończonych proponowanymi rozwiązaniami, a także wykonaniem obszernych badań testowych, wskazuje na osiągnięcie przez autora wysokiego profesjonalizmu w zakresie wiedzy odnoszącej się do nowoczesnych metod przetwarzania szybkich sygnałów związanych ze zjawiskami falowymi w liniach elektroenergetycznych, jak również w odniesieniu do komputerowego modelowania odpowiednich systemów elektrycznych. Zamieszczony wykaz literatury prezentuje pełny zakres wiedzy dotyczącej omawianego zagadnienia.

4. Wartość merytoryczna rozprawy

Wartość merytoryczna pracy nie budzi wątpliwości, a jej zalety polegają na oryginalnym sformułowaniu poznawczego zagadnienia związanego z zastosowaniem nowoczesnej metody przetwarzania przebiegów falowych w sieci elektroenergetycznej bazującej na krótkoczasowym algorytmie pęku macierzy, która jest przeznaczona do identyfikacji rodzaju i miejsca wystąpienia zwarcia. Autor na podstawie pogłębionych analiz wykazał, że realizacja postawionego zadania nie jest możliwa z zastosowaniem klasycznych metod przetwarzania sygnałów na bazie algorytmów DFT, czy też stosowania bliźniaczej metody najmniejszych kwadratów. Metody te nie są dostatecznie selektywne w odniesieniu do analizy przebiegów falowych. Powołując się na opracowania dostępne w literaturze przedmiotu zwrócił uwagę na istotną odmianę dynamiki obserwowanych przebiegów w nowoczesnych sieciach dystrybucyjnych w porównaniu do procesów zachodzących w sieciach przesyłowych i ich wzajemnych relacji. Istotnym obciążeniem klasycznych metod pomiarowych w takim przypadku jest pierwotne założenie, że źródłem przebiegów towarzyszących zwarciom są występujące w sieci klasyczne generatory o dużej mocy zwarciowej, narzucające stałą częstotliwość napięcia sieci i duże prądy zwarciowe. Tymczasem, obecność w sieci dystrybucyjnej źródeł rozproszonych oraz stosunkowo duże oddalenie od klasycznych generatorów synchronicznych istotnie zmienia formę obserwowanych sygnałów. W efekcie, także klasyczne metody pomiarowe tracą na znaczeniu na korzyść metod pozwalających analizować cechy rozchodzących się w sieci fal elektromagnetycznych. W miejsce takich charakterystyk, jak wartość prądu, napięcia, czy impedancji, analizowane są nowe pojęcia, jak czas pojawienia się czoła fali, czasowe późnienie pomiędzy grzbietami fal i tak dalej. Podejście związane z przetwarzaniem częstotliwościowym zostaje wypierane przez algorytmy przetwarzania w dziedzinie czasu. W celu wykonania tego zadania autor musiał szczegółowo zapoznać się z nowymi zasadami przetwarzania sygnałów, zaproponować, utworzyć i przetestować odpowiednie modele symulacyjne sieci dystrybucyjnych, co w rezultacie doprowadziło do udowodnienia postawionej w pracy tezy w zakresie badań i symulacyjnego testowania takich systemów. Wykaz szczegółowych osiągnięć autora pracy jest zawarty w rozdziale 7.

Do głównych osiągnięć doktoranta należy zaliczyć:

- Dostosowanie metody pęku macierzy do warunków przetwarzania szybkich przebiegów falowych prądu i napięcia w sieciach dystrybucyjnych, umożliwiających wyselekcjonowanie odpowiednich parametrów tych przebiegów do celów identyfikacji rodzaju obserwowanego zwarcia i miejsca jego wystąpienia w sieci.
- Opracowanie oryginalnego algorytmu określania rodzaju występującego zwarcia (identyfikacji zwartych faz) z wykorzystaniem pomiaru wskaźników związanych z obserwowanymi przebiegami falowymi na podstawie przetwarzania sygnałów za pomocą krótkoczasowej metody pęku macierzy.
- Opracowanie dwóch wersji algorytmu lokalizacji zwarć w sieciach dystrybucyjnych na podstawie pomiarów realizowanych tylko w jednym punkcie sieci.
- Opracowanie modeli przetworników pomiarowych służących do przesyłania szybkich sygnałów falowych do obwodów wtórnych z zachowaniem ich pożądanых charakterystyk.
- Opracowanie różnych wersji symulacyjnych modeli typowych sieci rozdzielczych, które umożliwiły wykonanie symulacyjnych badań proponowanych algorytmów.

- Przeprowadzenie szerokich badań symulacyjnych umożliwiających weryfikację proponowanych w pracy algorytmów.

5. Ogólne uwagi dyskusyjne

Praca dotyczy bardzo wyspecjalizowanego zagadnienia związanego z analizą szybkich przebiegów prądu i napięcia, które są wynikiem nieuchronnie zachodzących zwarców w sieciach elektroenergetycznych, głównie w sieciach dystrybucyjnych. Uznając oryginalność postawionej tezy i poprawność jej wykazania można jednak pod adresem jej autora sformułować następujące zastrzeżenia i pytania natury bardziej ogólnej.

1. We współczesnych dystrybucyjnych sieciach elektroenergetycznych występują różnorodne źródła generacji rozproszonej, których dominującą cechą jest sposób ich przyłączenia do sieci za pośrednictwem przekształtników energoelektronicznych. Reakcja tego typu urządzeń na szybkie sygnały prądu i napięcia nie jest dostatecznie dobrze zbadana. Czy autor prowadził jakieś symulacyjne bądź literaturowe badania w celu wyjaśnienia wpływu takich źródeł na rozchodzenie się fal wędrownych w sieci i ich ewentualnego wpływu na dokładność proponowanych pomiarów.
2. Zadanie lokalizacji miejsca zwarcia w sieciach elektroenergetycznych łączy się bezpośrednio z diagnostyką pracy sieci, która jest związana z badaniem wskaźników jakości zasilania. Czy opracowane w pracy metody pomiarowe mogą mieć zastosowanie do oceny tych wskaźników? .
3. Zaproponowane w pracy metody pomiarowe z wykorzystaniem algorytmów pęku macierzy wymagają przetwarzania zarejestrowanych sygnałów o dużej częstotliwości próbkowania, co łączy się ze stosowaniem zaawansowanych systemów mikroprocesorowych. Czy autor prowadził jakąś analizę efektywności stosowania takich rozwiązań w porównaniu z klasycznymi rozwiązaniami, które często łączy się z określeniem 'self-healing' w odniesieniu do pracy sieci dystrybucyjnej?
4. Proponowane w pracy metody bazujące na algorytmie pęku macierzy mają ograniczenia w odniesieniu do zastosowania w przypadku zwarców doziemnych ze względu na stosunkowo dużą rezystancję pętli zwarciorowej. Z drugiej strony wiadomo, że tego typu zwarcia występują w analizowanych sieciach najczęściej. Jak wobec tego parametry sieci, a w szczególności impedancja składowej zerowej wpływa na skuteczność proponowanych algorytmów?
5. Przeprowadzone w pracy testy odnoszą się do sieci napowietrznych. Czy proponowane metody mogą być stosowane w odniesieniu do sieci kablowych?
6. Występujące w sieciach dystrybucyjnych zwarcia charakteryzują się dużą różnorodnością w odniesieniu do obserwowanych przebiegów zwarciorowych. Pewną ważną kategorią takich przebiegów są rezultaty zwarców przerywanych. Czy tego typu procesy mogą zakłócić pomiary wykonywane według opisanych w pracy procedur?

6. Uwagi szczegółowe i redakcyjne

Praca jest starannie zredagowana, ma poprawny układ i zawiera wiele ilustracji i tabelarycznych wykazów danych i rezultatów przeprowadzonych symulacji, prezentujących zależności pomiędzy analizowanymi parametrami i przebiegami. Wykaz literatury obejmuje całość tematyki, której dotyczy praca. Usunięcie niektórych błędów językowych i redakcyjnych przy próbie publikacji całości lub części recenzowanej pracy wymagałoby profesjonalnego redakcyjnego

nadzoru. Nieliczne nieścisłości lub drobne błędy są jednak nieuchronne w tego typu pracach i w tym przypadku nie wpływają na jej pozytywną ocenę.

7. Wnioski końcowe

Po zapoznaniu się z recenzowaną pracą, z pełnym przekonaniem mogę stwierdzić, że spełnia ona z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim zawarte w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w odniesieniu do dyscypliny *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika*. (Dz. U. z dnia 30.01.2018 r., poz. 261), które obowiązują w odniesieniu do dyscypliny: *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*. Wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

