

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgra inż. Wiesława Gila
pt. „Rozszerzony nadzór w czasie rzeczywistym izolatorów
przepustowych transformatorów energetycznych”.

Podstawa formalna wykonania recenzji:

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki prof. dr hab. inż. Zbigniewa Nadolnego, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Poznańskiej z dnia 23.11.2021 r.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Krzysztof Walczak.

1. Ocena aktualności tematu, celu i zakresu rozprawy

Jednym z najważniejszych zagadnień dotyczących pracy systemu elektroenergetycznego jest zapewnienie niezawodnych dostaw energii elektrycznej, na który realny wpływ ma stan techniczny poszczególnych elementów systemu. Szczególne znaczenie w tym kontekście ma stan techniczny urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia, w których podczas eksploatacji występują procesy starzeniowe degradujące ich właściwości izolacyjne. Zjawiska te są przyczyną awarii, które powodują problemy związane z przesyłami i dystrybucją energii elektrycznej, a także generują koszty związane z naprawą bądź wymianą urządzenia.

Jednym z elementów układu przesyłowego są izolatory przepustowe, będące elementem transformatorów elektroenergetycznych, których zadaniem jest wyprowadzenie napięcia z wewnętrznej części urządzenia. W trakcie normalnej pracy są one poddawane w sposób ciągły oddziaływaniu pola elektromagnetycznego oraz zmiennych warunków atmosferycznych takich jak: temperatura powietrza, promieniowanie słoneczne, jak również opady. Poza tym na stan techniczny izolatorów przepustowych mają również wpływ warunki pracy oraz występowanie przepięć czy uderów prądowych.

W trakcie katastrofalnych awarii izolatorów przepustowych wysokiego napięcia często dochodzi do rozerwania osłony porcelanowej, która powoduje uszkodzenie innych elementów systemu elektroenergetycznego znajdujących się wokół transformatora, a także zapłon oleju izolacyjnego wydostającego się przez uszkodzony izolator z wnętrza kadzi transformatora.

A. Cichoń

W ostatnich kilku latach wystąpiło kilka awarii katastrofalnych izolatorów przepustowych w polskich sieciach przesyłowych i elektrowniach. Awarii tych można uniknąć prowadząc rzetelną diagnostykę wewnętrznego układu izolacyjnego przepustów. Obecnie ich diagnostykę prowadzi się z wykorzystaniem metod off-line lub systemów monitoringu i nadzoru pracujących on – line. Diagnostyka prowadzona w sposób off – line opiera się na wykorzystaniu m. in. pomiarów: pojemności i współczynnika stratności dielektrycznej $\tan\delta$, wyładowań niezupełnych, a także na analizie chromatograficznej gazów rozpuszczonych w oleju. Nowe możliwości w zakresie diagnostyki izolatorów przepustowych off – line dają zastosowanie metody FDS (Frequency Domain Spectroscopy).

Niestety doświadczenia eksploatacyjne izolatorów przepustowych wskazują, że pomimo prowadzonych pomiarów off – line występują awarie. Dzieje się tak dlatego, że mechanizmy prowadzące do uszkodzenia układu izolacyjnego izolatorów przepustowych wysokiego napięcia charakteryzują się dużą dynamiką i czasem rozwoju. Szczególne znaczenie odgrywa w tym procesie mechanizm cieplny i elektryczny, który rozwija się w krótkim przedziale czasowym liczonego w godzinach od momentu wystąpienia defektu.

Z tego powodu od kilkunastu lat rozwijane są metody diagnostyki izolatorów przepustowych on – line. Stosowane obecnie systemy nie wskazują odpowiednio szybko i dokładnie zmian pojemności i stratności dielektrycznej, co powoduje że stosowanie obecnych rozwiązań nie zapewnia wystarczającej ochrony przepustu. Konieczne jest zatem prowadzenie prac nad poprawą funkcjonalności systemów diagnostyki izolatorów przepustowych pracujących w sposób on – line. Prace te powinny zmierzać w kierunku poprawy dokładności pomiaru, skrócenia czasu wykrycia zmian oraz czasu reakcji na zachodzące zmiany monitorowanych parametrów.

W pracy przedstawiono system monitoringu on-line izolatorów przepustowych wysokiego napięcia, który oparty jest na metodzie napięciowej. W metodzie tej wprowadzono autorskie współczynniki korekcyjne do obliczeń pojemności izolatora przepustowego oraz współczynnika $\tan\delta$. Dla zwiększenia stabilności wyników zaproponowano uwzględnienie wpływu temperatury.

Uwzględniając powyższe, uważam, że tematyka poruszana w pracy jest aktualna i ma duże znaczenie praktyczne.

Celem pracy jest opracowanie systemu monitoringu on-line izolatorów przepustowych z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody napięciowej, umożliwiającego w szybki i niezawodny sposób detekcję uszkodzenia ich wewnętrznego układu izolacyjnego.

Realizacja pracy obejmowała szereg zadań o charakterze analitycznym, jak również projektowo – konstrukcyjnym tj.:

- opracowanie modelu matematycznego do wyznaczania monitorowanych parametrów izolacji z uwzględnieniem korekt asymetrii napięć liniowych,

- opracowanie algorytmu obliczeń parametrów izolacji oraz wskazania przepustów, w których rozwija się defekt,
- zaprojektowanie konstrukcji i wykonanie sondy pomiarowej, dostosowanej do różnych typów izolatorów przepustowych,
- zaprojektowanie i wykonanie wielokanałowego przetwornika pomiarowego do pomiaru napięć i rejestracji przebiegów przesyłanych przez sondy pomiarowe, a także przeznaczonego do pomiaru referencyjnych napięć liniowych,
- oprogramowanie wykonanych urządzeń, w taki sposób aby uzyskać w pełni funkcjonalny moduł monitorowania izolatorów przepustowych,
- analiza zarejestrowanych pomiarów.

Uważam, że cel zakres pracy jest ambitny i spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim.

Autor postawił trzy tezy sformułowane sposób jawny w rozdziale drugim:

1. „Zrealizowanie przyjętych założeń umożliwi uzyskanie pomiarów o mniejszej niepewności, a także zwiększenie dokładności oszacowania zmian monitorowanych parametrów.
2. Zastosowanie nowoczesnych układów elektronicznych próbkujących napięciowe sygnały pomiarowe z częstotliwością kilku megaherców umożliwi pomiar i rejestrację przebiegów napięć łączeniowych i zaburzeń burzowych. Korelacja tych zaburzeń z ewentualnymi gwałtownymi zmianami pojemności i współczynników stratności przepustu umożliwi identyfikację przebicia warstw izolacyjnych rdzenia przepustu. Powyższa funkcjonalność może być także wykorzystana do analizy wielofazowych zaburzeń występujących na stacjach energetycznych zobrazowanych w przebiegach napięć zarejestrowanych na zaciskach pomiarowych. Dzięki temu możliwe jest stwierdzenie niektórych rodzajów wewnętrznych uszkodzeń transformatora oraz stwierdzenie symptomów niesprawności instalacji i urządzeń odgromowych. Dodatkowo wpłynie to na zwiększenie przydatności monitoringu on-line izolatorów przepustowych.
3. Integracja modułu monitoringu przepustów z systemem monitoringu on-line transformatora TLM (ang. Transformer Life Monitoring) i stacyjnym Systemem Sterowania i Nadzoru (SSiN), nazywanym również systemem dyspozytorskim, rozszerzy możliwości nadzoru stanu przepustów, dzięki analizie korelacyjnej monitorowanych parametrów z obciążeniem transformatora i zewnętrznymi warunkami atmosferycznymi. Pozwoli to na podjęcie decyzji o zaplanowaniu dodatkowych badań off-line lub nawet o natychmiastowym zawieszeniu eksploatacji.”

Tezy pracy są poprawne i odpowiednio sformułowane.

2. Charakterystyka pracy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 234 strony. Zawiera 10 rozdziałów, 4 załączniki oraz spis literatury zawierający 107 pozycji.

Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie do podjętego tematu.

Rozdziały drugi, trzeci i czwarty mają charakter teoretyczny stanowiący przegląd doniesień literaturowych i doświadczeń eksploatacyjnych.

Rozdział drugi składający się z ośmiu podrozdziałów zawiera charakterystykę wysokonapięciowych izolatorów przepustowych, ich przeznaczenie, opis budowy i charakterystykę parametrów technicznych. Zawiera również opis aktualnie produkowanych izolatorów i aspekty związane z ich eksploatacją, diagnostyką i monitoringiem stanu technicznego.

W **rozdziale trzecim** scharakteryzowano mechanizmy degradacji układu izolacyjnego przepustów, przedstawiono defekty i uszkodzenia, czynniki starzeniowe oraz wpływ czynników środowiskowych i eksploatacyjnych na stan techniczny izolatorów przepustowych. Omówiono również dynamikę mechanizmu rozwoju uszkodzenia.

Rozdział czwarty zawiera przegląd metod diagnostycznych, które mogą być wykorzystywane zarówno w diagnostyce on-line jak i off-line. W sposób szczególny omówiono zagadnienia niedoskonałości istniejących metod diagnostycznych.

W rozdziale **piątym** przedstawiono cele, zakres oraz tezy pracy.

Za najważniejsze w rozprawie uważam rozdziały szósty, siódmy i ósmy, które zawierają wyniki badań Doktoranta.

Moduł monitoringu izolatorów przepustowych scharakteryzowano w **rozdziale szóstym**. Opisano wykorzystany w pracy model matematyczny dla wyznaczania zmian pojemności i współczynnika $\text{tg}\delta$, układ monitorowania w trybie on-line, konstrukcję sond pomiarowych oraz konstrukcję modułu pomiarowo – rejestrującego. Przedstawiono również metodę wyznaczania kątów i modułów napięć fazowych oraz sposób skalowania pomiaru. W dalszej części rozdziału omówiono funkcjonalność zaprojektowanego systemu, dane techniczne oraz omówiono wyniki testów i prób.

W **rozdziale siódmym** przedstawiono wyniki integracji opracowanego systemu z modułem Sterowania i Nadzoru pracującym na stacji elektroenergetycznej.

Rozdział ósmy zawiera analizę wprowadzonych rozwiązań w zakresie nadzoru przepustów przez systemy dyspozytorskie, monitorowania przebiegów, wpływu zmian czynników zewnętrznych i temperatury. Omówiono również niepewność pomiarów pojemności C_1 i współczynnika stratności $\text{tg}\delta$.

W **rozdziale dziewiątym** przedstawiono perspektywy rozwoju monitoringu przepustów, natomiast w rozdziale dziesiątym omówiono wnioski wynikające z przeprowadzonych prac.

W załącznikach przedstawiono szczegółowe wyniki prac pomiarowych przeprowadzonych zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i rzeczywistych, dane techniczne układu oraz określono zależność parametrów C1 oraz tgδ od temperatury.

3. Główne osiągnięcia rozprawy

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam:

- Opracowanie i zaimplementowanie algorytmów pomiarowych i metody skalowania układu pomiarowego, wykorzystywanej do korekcji zmian amplitudy i fazy wprowadzanych przez przekładniki prądowe.
- Opracowanie i budowa układu pomiarowego pozwalającego na szybką identyfikację bieżących zmian współczynników izolacji monitorowanych przepustów, przez co skrócony został czas reakcji układu monitorującego na niepożądane zmiany w układzie izolacyjnym przepustu.
- Zaprojektowanie konstrukcji i wykonanie sondy pomiarowej, dostosowanej do montażu na różnych typach izolatorów przepustowych,
- Zaprojektowanie i wykonanie wielokanałowego przetwornika pomiarowego do pomiaru napięć i rejestracji przebiegów przesyłanych przez sondy pomiarowe, a także przeznaczonego do pomiaru referencyjnych napięć liniowych.
- Przeprowadzenie badań pod kątem określenia wpływu wytrzymałości mechanicznej sond pomiarowych, temperatury i innych czynników zewnętrznych na dokładność pomiarów przeprowadzanych za pomocą opracowanego urządzenia.
- Integracja opracowanego rozwiązania z Systemem Sterowania i Nadzoru pracującego na stacji elektroenergetycznej i weryfikacja poprawności działania opracowanego układu w warunkach rzeczywistych.

Doktorant w stopniu biegłym opanował tematykę rozprawy w warstwie nie tylko teoretycznej, ale także praktycznej, w oparciu o dobre rozeznanie problemów technologicznych i inżynierskich związanych z badaniami zjawisk związanych z procesem degradacji układu izolacyjnego przepustów elektroenergetycznych. Wykazał się również bardzo dużą wiedzą w zakresie: metrologii elektrycznej, konstrukcji układów pomiarowych, analizy i przetwarzania sygnałów, a także programowania urządzeń pomiarowych. Stwierdzam, że Doktorant dysponuje wymaganym do prowadzenia badań naukowych zasobem wiedzy z zakresu szeroko rozumianej elektrotechniki i elektroenergetyki.

4. Ocena poziomu edytorskiego rozprawy

Podział treści jest logiczny i uporządkowany. Styl oraz poziom językowy jest dobry, jednakże zdarza się doktorantowi używanie sformułowań nietechnicznych. Szata graficzna jest opracowana poprawnie, jednakże niektóre rysunki, widok okien systemu pomiarowego czy wykresy są zbyt małe, co utrudnia odczytanie wartości, które znajdują się na nich. Należy podkreślić, że zdarzają się wykresy, które są wykonane w postaci zrzutów ekranowych z systemu pomiarowego, na których osie nie są opisane w sposób czytelny (np. rys. 6.26, 8.13). W pracy pojawiają się rysunki i wykresy, które mają typowo teoretyczny charakter i zostały prawdopodobnie zaczerpnięte z literatury a nie zawierają przypisu do źródeł literaturowych (np. 2.15, 2.16, 2.17, 2.19, 2.19, 3.6 itp.). Praca jest bardzo obszerna i zawiera dużą liczbę skrótów i oznaczeń, niestety w pracy nie umieszczono ich wykazu. Sposób przekazywania treści jest jednak zadowalający i kompleksowy.

Spis literatury zawiera 107 pozycji wśród których można wyróżnić: artykuły w czasopismach międzynarodowych, krajowych, normy, dokumentację techniczną, literaturę branżową i strony internetowe. Niestety ok. 70% pozycji zostało opublikowanych ponad 10 lat temu (przed 2012 r.). Pomimo bardzo bogatego i kompleksowego przeglądu stosowanych rozwiązań pozostawia to pewien niedosyt, szczególnie w obszarze przeglądu literaturowego opartego o renomowane i wysokopunktowane czasopisma zagraniczne.

Zastrzeżenia natury edytorsko – redakcyjnej nie obniżają w żaden sposób wartości merytorycznej rozprawy. Pomimo ww. uwag uważam, że recenzowana rozprawa jest opracowana bardzo dobrze. W sposób obszerny i kompleksowy przedstawia tematykę diagnostyki izolatorów przepustowych i umożliwia zgłębienie zawartych w niej zagadnień nawet osobom, które nie są specjalistami w tej dziedzinie. Czytając lekturę pracy odnosi się wrażenie o wysokiej kompetencji merytorycznej Autora.

5. Uwagi merytoryczne

1. W rozprawie przedstawiono wyniki prac wykonanych w warunkach laboratoryjnych, na stacji prób w zakładzie produkcyjnym i w warunkach rzeczywistych w miejscu zainstalowania transformatora. Zrealizowany zakres prac wymagał współpracy z firmą produkującą oprogramowanie do monitoringu transformatorów, właścicielem transformatora itp. W pracy nie znalazłem informacji dotyczącej współpracy z tymi podmiotami, natomiast w ofercie firmy Mikronika, dostępnej na stronie internetowej, znajdują się przedstawione w doktoracie rozwiązania np. moduł SMT – 102, SMT-103 czy sondy pomiarowe CPT-00x. Stąd nasuwa się pytanie jaka część pracy została wykonana samodzielnie przez Doktoranta, a które zagadnienia są wykonane przy współpracy z firmami? Jaki jest udział Doktoranta w opracowanym rozwiązaniu mając na uwadze przepisy w zakresie ochrony własności intelektualnej?

2. Całość pracy dotyczy nowego układu monitorującego stan izolatorów przepustowych wysokiego napięcia, który umożliwi również pomiar i rejestrację przebiegów przepięć łączeniowych i skutków wyładowań atmosferycznych. Jednak w tezie pracy można znaleźć następującą informację „... Powyższa funkcjonalność może być także wykorzystana do analizy wielofazowych zaburzeń występujących na stacjach energetycznych zobrazowanych w przebiegach napięć zarejestrowanych na zaciskach pomiarowych. Dzięki temu możliwe jest stwierdzenie niektórych rodzajów wewnętrznych uszkodzeń transformatora oraz stwierdzenie symptomów niesprawności instalacji i urządzeń odgromowych...”. W pracy nie znalazłem informacji na temat możliwości detekcji uszkodzeń w wewnętrznym układzie izolacyjnym transformatora przy wykorzystaniu opracowanego układu. Czy zatem możliwe jest wykrycie jakichkolwiek uszkodzeń wewnętrznego układu izolacyjnego transformatora za pomocą opracowanego układu? Jeżeli tak to jakich i jakie badania Doktorant przeprowadził w tym zakresie? Jakie symptomy niesprawności instalacji i urządzeń odgromowych Autor miał na myśli?
3. Badania wpływu temperatury na wyniki pomiarów uzyskanych za pomocą opracowanych sond pomiarowych przeprowadzono w zakresie temperatur 22 – 95 °C. W rzeczywistych warunkach pracy często zdarza się, że temperatura zewnętrzna wokół transformatora jest znacząco niższa od 0 °C. Czy wobec tego zdaniem Autora przyjęty do badań zakres temperaturowy jest wystarczający?
4. Czy w trakcie wykonywania prac dotyczących wpływu poszczególnych czynników na wyniki pomiarów wykonywanych opracowanymi sondami była badana powtarzalność pomiarów?
5. W pracy nie znalazłem konkretnych informacji dotyczącej parametrów metrologicznych przetwornika pomiarowego tj. częstotliwości próbkowania, liczby próbek itp. Proszę o ich przedstawienie.
6. Czy Doktorant badał wpływ czynników zewnętrznych na przewód doprowadzający sygnał pomiarowy z sondy zainstalowanej na izolatorze przepustowym do układu rejestracji i akwizycji danych pod kątem możliwych zakłóceń generowanych przez pracę transformatora i innych urządzeń oraz linii znajdujących się na stacji elektroenergetycznej?

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawioną do recenzji rozprawę należy zaliczyć do grupy prac eksperymentalnych, które są pracami wysoce czasochłonnymi. Ponadto wymagają od badacza dużych umiejętności z różnych dziedzin elektrotechniki i elektroenergetyki. Doktorant posiadał umiejętność projektowania, wykonania układu pomiarowego, oprogramowania go, przeprowadzenia kompleksowych testów pod kontem funkcjonalnym oraz metrologicznym, a także

zaimplementowania go w warunkach technicznych. Wykazał się umiejętnością szczegółowej analizy wyników badań.

Doktorant wykazał, że ma niezbędne kwalifikacje do prowadzenia badań naukowych oraz rozwiązał w sposób oryginalny zagadnienie naukowe będące tematem rozprawy.

Rozwiązanie problemu postawionego w pracy jest ciekawe z punktu widzenia przydatności dla praktyki w zakresie diagnostyki izolatorów przepustowych stanowiących nieodłączny element transformatorów elektroenergetycznych. Praca zawiera elementy nowości w sensie naukowym, stanowiące udokumentowany dorobek własny Doktoranta.

Stwierdzam, że opiniowana praca jest kompletna i nie wymaga żadnych zmian ani uzupełnień. Spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w stosownej ustawie. Wnioskuje o przyjęcie niniejszej pracy jako rozprawy doktorskiej. Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Wiesława Gila do publicznej obrony przedłożonej pracy.

dr hab. inż. Andrzej Cichoń