

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Nadolny
Instytut Elektroenergetyki
Politechnika Poznańska

Poznań, 2 kwietnia 2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Krotowskiego pt.:

**„Diagnostyka własności dielektrycznych izolacji celulozowo-aramidowej
stosowanej w olejowych transformatorach mocy
z wykorzystaniem metod polaryzacyjnych”**

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA TEMATU PODJĘTEGO W PRACY DOKTORSKIEJ

Temat rozprawy doktorskiej nawiązuje do diagnostyki transformatorów mocy metodą PDC, wyposażonych w izolację celulozowo-aramidową pracującą z estrami. Izolacja celulozowo-aramidowa, za sprawą zastosowania aramidów, jest nowym hybrydowym materiałem izolacyjnym, wykazującym znacznie większą odporność na wysoką temperaturę w porównaniu z tradycyjnie stosowaną izolacją celulozową. Wynikiem tego jest jej większa wytrzymałość mechaniczna po wielu latach eksploatacji transformatora. Z kolei wykorzystane estry (syntetyczny, naturalny) wykazują większą biodegradowalność oraz temperaturę zapłonu w porównaniu do tradycyjnie stosowanego oleju mineralnego, co zwiększa bezpieczeństwo pracy transformatora i daje możliwość jego większego obciążenia.

Wymienione nowe materiały izolacyjne wymagają opracowania wielu wzorcowych charakterystyk, by można było skutecznie diagnozować transformatory wyposażone w te materiały, znanymi już metodami, do których zaliczamy między innymi metodę PDC (metoda prądu polaryzacji i depolaryzacji). Temu właśnie zagadnieniu poświęcona jest recenzowana rozprawa doktorska.

Z powyższych względów uważam, że tematyka badawcza, podjęta przez Doktoranta, jest istotna i bardzo aktualna w świetle diagnostyki transformatorów mocy.

Nadolny

2. CHARAKTERYSTYKA PRACY DOKTORSKIEJ

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy 160 stron. Składa się z 12 rozdziałów oraz bibliografii, spisu tabel i spisu rysunków.

Pierwszy rozdział stanowi wstęp, w którym Doktorant charakteryzuje system elektroenergetyczny i rolę jaką odgrywa w nim transformator. Wskazuje na stosowane w nim materiały izolacyjne oraz metody diagnostyczne. Krótko charakteryzuje wszystkie pozostałe rozdziały pracy doktorskiej.

W rozdziale drugim Autor opisuje cele pracy oraz tezy badawcze. Stawia trzy tezy, według których:

- „... możliwe jest opracowanie metody laboratoryjnej, która ... będzie w stanie ... odtworzyć proces zawilgocenia oraz starzenia termicznego izolacji celulozowo-aramidowej wykorzystywanej w transformatorach ...,
- ... możliwe jest opracowanie skutecznej metody analizy czasowych charakterystyk prądów polaryzacji i depolaryzacji próbek izolacji celulozowo-aramidowej impregnowanej estrem syntetycznym lub naturalnym, do szacowania stopnia degradacji termicznej włókien celulozy ...,
- możliwe jest opracowanie skutecznej metody analizy czasowych charakterystyk prądów polaryzacji i depolaryzacji próbek izolacji celulozowo-aramidowej impregnowanej estrem syntetycznym lub naturalnym, do szacowania stopnia zawilgocenia celulozy.”

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawia charakterystykę tradycyjnie stosowanych materiałów izolacyjnych, jakim jest papier celulozowy oraz olej mineralny. Opisuje ich najważniejsze właściwości elektroizolacyjne i funkcje, jakie pełnią w transformatorze.

Rozdział czwarty poświęcony jest hybrydowej izolacji papierowo-aramidowej impregnowanej alternatywnymi cieczami elektroizolacyjnymi. Autor opisuje izolację papierowo-aramidową ze szczególnym uwzględnieniem aramidu. Wskazuje jego zastosowanie oraz podkreśla jego zalety w porównaniu do papieru celulozowego, jakim jest odporność na wysoką temperaturę, co przyczynia się do zachowania jego właściwości mechanicznych. Doktorant charakteryzuje estry syntetyczne i naturalne opisując ich zastosowanie oraz właściwości elektroizolacyjne porównując je z olejem mineralnym.

W rozdziale piątym Autor dokonuje przeglądu czynników powodujących degradację izolacji transformatora. Opisuje czynniki starzeniowe w odniesieniu do izolacji papierowej jak i cieczy elektroizolacyjnych. Szczególną uwagę poświęca poziomowi zawilgocenia izolacji ze wskazaniem środków zaradczych.

Chadohuy

W rozdziale szóstym Doktorant przedstawia metody diagnostyczne stosowane dla izolacji transformatorów mocy. Dokonuje ich klasyfikacji z uwzględnieniem metod opartych na zjawisku polaryzacji. Dogłębnie opisuje to zjawisko w dalszej części rozdziału, dokonując podziału na polaryzację stratną i bezstratną. Charakteryzuje najczęściej stosowane metody oparte na zjawisku polaryzacji jak FDS, RVM czy stosowana w rozprawie doktorskiej PDC.

Rozdział siódmy Autor poświęca badaniom laboratoryjnym izolacji metodą PDC. Opisuje proces przygotowania próbek, a więc ich kontrolowanego starzenia i zawilgocenia oraz wykorzystania mieszaniny olej / estry. Doktorant przedstawia układ pomiarowy do pomiarów PDC, jaki wykorzystywał w trakcie swoich badań. Opisuje proces jego projektowania, realizacji i testowania.

W rozdziale ósmym Autor przedstawia wyniki swoich badań. Opisuje wpływ temperatury na uzyskane wyniki prądu polaryzacji i depolaryzacji. Taka sama analiza została przeprowadzona w kontekście wpływu stopnia zesterzenia termicznego oraz stopnia zawilgocenia. Doktorant zbadał również wpływ resztkowego oleju mineralnego na wyniki pomiarów prądów polaryzacyjnych.

Rozdział dziewiąty Autor poświęca wyznaczaniu energii aktywacji i stałych czasowych τ_1 oraz τ_2 . Analizuje wpływ zesterzenia oraz zawilgocenia na wartość energii i stałe. Bada wpływ oleju mineralnego na powyższe wielkości.

W rozdziale dziesiątym Doktorant analizuje powtarzalność i odtwarzalność uzyskanych wyników badań. Przedstawia parametryczne i nieparametryczne testy istotności. Pod uwagę bierze rozkład normalny oraz wariancję.

Rozdział jedenasty stanowi podsumowanie badań Autora. Wskazuje w nim, iż postawione tezy zostały w pełni udowodnione. Stwierdza, że możliwe jest wykorzystanie metody PDC do diagnostyki stanu izolacji transformatora opartej na hybrydzie celuloza-aramid. Udowadnia, że metoda ta daje możliwość oszacowania stopnia zesterzenia oraz zawilgocenia izolacji.

W rozdziale dwunastym Doktorant wskazuje dalsze kierunki badań, które są niezbędne do wyjaśnienia wszystkich szczegółów, z którymi spotkał się w trakcie realizacji swojej pracy doktorskiej. Wymienia pewne niewyjaśnione kwestie i komplikacje, które wymagają dalszych analiz.

3. OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE PRACY

Doktorant, w oparciu o literaturę, poświęca około 60 stron na charakterystykę izolacji celulozowo-aramidowej (rozdział 4), degradacji jej stanu (rozdział 5) oraz jej metod diagnostycznych (rozdział 6). Dowodzi to, że Autor ma

Nadobny

doskonałe rozeznanie teoretyczne w uprawianym przez siebie obszarze badawczym.

Autor dowiódł, iż możliwe jest zastosowanie metody PDC w celu określenia stanu izolacji celulozowo-aramidowej, rozumianej jako poziom jej zesterzenia i zawilgocenia. Analizował wpływ temperatury, rodzaju estru oraz przypadek wystąpienia resztkowego oleju mineralnego na wyniki uzyskane tą metodą. Tym samym wzbogacił światową bazę danych prądu polaryzacji i depolaryzacji w odniesieniu do nowego materiału, jakim jest hybrydowa izolacja celulozowo-aramidowa, zaimpregnowana nowymi cieczami, jakimi są estry syntetyczny i naturalny. Uważam to za **bardzo duże osiągnięcie**.

Doktorant wyznaczył energię aktywacji oraz dominujące stałe czasowe τ_1 i τ_2 w odniesieniu do izolacji celulozowo-aramidowej w zależności od temperatury, stopnia zesterzenia izolacji, jej zawilgocenia, rodzaju estru oraz możliwości wystąpienia resztkowego oleju mineralnego. Uważam to za **bardzo duże osiągnięcie**.

Autor analizował wpływ występowania oleju mineralnego w izolacji impregnowanej estrami na prądy polaryzacji oraz energię aktywacji. Dowiódł, że wpływ ten nie jest liniowy, czyli nie jest proporcjonalny do procentowego udziału oleju w mieszaninie. Wyjaśnił jakie cechy poszczególnej cieczy i zjawiska fizyczne dominowały i decydowały o wartości mierzonych prądów i energii. To moim zdaniem najciekawsza i najbardziej wartościowa część rozprawy, nie ujmując pozostałej zawartości, ponieważ zjawiska nieliniowe w nauce prowadzą do największego jej rozwoju i wykorzystania w wielu dziedzinach życia. Uważam to za **najważniejsze osiągnięcie pracy**.

4. UWAGI DYSKUSYJNE, FORMALNE I EDYTORSKIE

4.1. Uwagi dyskusyjne

1. Autor wyjaśnia sposób i metodologię przygotowywania próbek o kontrolowanym poziomie zawilgocenia (podrozdział 7.1.2.). Jak napisano „Proces laboratoryjnego zawilgacania próbek pomiarowych polegał na kontrolowaniu przyrostu wagi próbki od początkowej wartości wynikającej z procesu suszenia próbki, który w analizie uznano za punkt początkowy 0% zawilgocenia.” W ten sposób, zdaniem Doktoranta, uzyskano próbki o zawilgoceniu równym 0, 1, 2, 3 i 4%. Z doświadczenia recenzenta wynika, że celuloza i aramid charakteryzują się różną dynamiką zawilgacania. Celuloza zawilgaca się około dwa razy szybciej niż aramid. Oznacza to, że uzyskane przez Autora wartości zawilgocenia tak naprawdę stanowią wartość średnią / wypadkową zawilgocenia danej próbki, składającej się z dwóch różnych

Nadobny

materiałów o różnym poziomie zawilgocenia. Przykładowo, zakładając równy udział obu materiałów, próbka o zawilgoceniu 2% składa się z celulozy zawilgoconej do 3% i aramidu do 1,5%. Zdaję sobie sprawę, że innego prostego sposobu zawilgacania próbek hybrydowych nie ma, ale warto powyższy fakt mieć na uwadze. Proszę o komentarz.

2. Doktorant analizował przypadek wystąpienia oleju mineralnego w cieczy jako efekt zabiegu zwanego retrofilling, o którym pisze w rozprawie. Jak wiadomo, śladowe ilości takiego oleju w cieczy (w estrach) nie przekraczają 8-12%. Dlaczego zatem przygotowane mieszaniny olej / ester nie uwzględniały tego faktu, lecz miały udziały 0/100, 25/75, 50/50, 75/25, 100/0 zamiast przykładowo 0/100, 5/95, 10/90, 15/85? Proszę o komentarz.

3. Autor uzyskał cenne informacje na temat prądów polaryzacyjnych, energii aktywacji i stałych czasowych dla izolacji celulozowo-aramidowej. Czy Doktorant mógłby powiedzieć jak uzyskane wyniki / charakterystyki plasują się w porównaniu z izolacją wykonaną tylko z celulozy i tylko z aramidem. Czy są pomiędzy nimi, a jeśli tak to czy bliżej im do celulozy czy aramidem. Myślę, że dane na temat celulozy i aramidem można znaleźć w literaturze. Proszę o komentarz.

4.1. Uwagi formalne

1. Pewne obiekcje budzi tytuł samej rozprawy „Diagnostyka własności dielektrycznych izolacji ...”. Czy własności dielektryczne można diagnozować? W mojej opinii diagnozować można stan układu izolacyjnego, a nie własności.

2. W tabeli 4.3. oraz 4.4. przedstawiono, w oparciu o literaturę, właściwości izolacji impregnowanej olejem i estrem. Między innymi przedstawiono wartości wytrzymałości elektrycznej, wyrażonej w kV/mm, w zależności od jej grubości. Wraz ze wzrostem grubości wytrzymałość ta maleje, co jest rzeczą ogólnie znaną. Tymczasem w tabeli 4.1. wytrzymałość elektryczna wraz ze wzrostem grubości rośnie. Trudno dyskutować z informacjami literaturowymi, lecz czy Autor zastanawiał się nad taką tendencją?

3. Kilka razy Doktorant stosuje określenie „izolacja sucha”. Nie do końca wiadomo czy chodzi o izolację nieimpregnowaną, czy pozbawioną wody. Dlatego w pierwszym przypadku sugeruję stosowanie określenia „izolacja nieimpregnowana”, a w drugim „izolacja niezawilgocona” by rozwiązać wszystkie wątpliwości.

Nadolny

4.2. Uwagi edytorskie

1. Autor często stosuje liczbę mnogą w odniesieniu do rzeczowników niepoliczalnych, jak oleje, papiery, temperatury). Według zasad języka polskiego, w przypadku rzeczowników niepoliczalnych nie stosujemy liczby mnogiej. Z pewnością bardziej poprawną konstrukcją było by dodanie słowa „rodzaje” – rodzaje oleju, rodzaje papieru i „wartości” – wartości temperatury.

Nie zauważyłem żadnych innych znaczących uwag edytorskich. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż rozprawa doktorska napisana jest doskonałą polszczyzną. Jakość edytorską i estetyczną oceniam bardzo wysoko.

5. PODSUMOWANIE

Uważam, że cel przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej został osiągnięty, a w trakcie realizacji pracy Doktorant wykazał się dużą wiedzą w zakresie poruszanej w rozprawie tematyki. Wykazał się także umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań, rozwiązywania problemów naukowych oraz wyciągania praktycznych wniosków.

Uważam, że przedłożona rozprawa doktorska mgr. inż. Adama Krotowskiego pt.: „Diagnostyka własności dielektrycznych izolacji celulozowo-aramidowej stosowanej w olejowych transformatorach mocy z wykorzystaniem metod polaryzacyjnych” spełnia wszystkie wymagania stawiane doktorom w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, poz.1668, z późn. zm.). Wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Wnoszę również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Adama Krotowskiego.

Łukasz Ciabłusz