

Dr hab. inż. Marek Florkowski
ABB Centrum Badawcze
ul. Starowiślna 13A
31-038 Kraków

Kraków, 7 lutego 2017 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Zbigniewa Szymańskiego

pt. Diagnostyka podobciążeniowego przełącznika zaczepów oparta o analizę dynamicznego procesu przełączania

wykonana na zlecenie Prof. dr. hab. inż. Michała Strzeleckiego, Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej, z dnia 10 listopada 2016 r.

1. Tematyka i teza rozprawy

Praca doktorska z dziedziny diagnostyki transformatorów energetycznych dotyczy w szczególności podobciążeniowego przełącznika zaczepów (PPZ) w transformatorach dużej mocy. Diagnostyka urządzeń elektroenergetycznych jest jednym z podstawowych kierunków w strategii zarządzania eksploatacją obiektów w elektroenergetyce. Podstawy rozwoju tej strategii wynikają z możliwości technicznych prowadzenia kompleksowej diagnostyki urządzeń dla oceny ich stanu. Do tej grupy zagadnień należy recenzowana praca doktorska, której zakres odnosi się do ważnych i aktualnych problemów niezawodnej pracy transformatorów w systemie elektroenergetycznym. Transformatory dużych mocy są urządzeniami kosztownymi i jednocześnie decydującymi o pewności zasilania odbiorów elektrycznych, a ponadto ich awarie często wiążą się z dużym zagrożeniem dla środowiska naturalnego. Prace w dziedzinie diagnostyki i monitoringu transformatorów są intensywnie rozwijane w licznych ośrodkach badawczych i przemysłowych, a także na forum CIGRE, prezentowane w publikacjach IEEE i innych.

Statystyki zarówno krajowe jak i zagraniczne pokazują, że przełącznik zaczepów jest jednym z najbardziej awaryjnych elementów w transformatorze. Klasyczny przełącznik zaczepów jest złożoną konstrukcją elektromechaniczną, podlegającą w eksploatacji wielu narażeniom, takim jak: przepięcia, przeciążenia, częste przełączenia, skutkujące - w zależności od prądu obciążenia - erozją styków i degradacją oleju w procesie gaszenia łuku

elektrycznego, procesami termodynamicznymi oraz uszkodzeniami sterowania i konstrukcji mechanicznej.

Długoletnie doświadczenia z badań podobciążeniowych przełączników zaczepów, w których stosowane są zestawy różnych metod diagnostycznych, pokazują niedostateczne możliwości bieżącej i jednoznacznej oceny ich stanu. Z uwagi na strategiczne znaczenie podobciążeniowego przełącznika zaczepów, w pracach badawczych w dziedzinie diagnostyki transformatorów zmierza się do wprowadzania nowych metod pomiarowych przełącznika, z wykorzystaniem opracowywanych algorytmów interpretacyjnych wybranych wielkości.

Aktualnie zakres badań eksploatacyjnych PPZ obejmuje pomiary: rezystancji rezystorów ograniczających, przekładni, czasów własnych przełącznika mocy i klatki wybierakowej oraz sprawdzenie blokad elektrycznych i mechanicznych, sprawdzenie działania przełącznika w stanie jałowym, rejestracje prądu w czasie przełączania przy zasilaniu niskonapięciowym, a także próbę przy ułamkowym prądzie znamionowym z kilkukrotnym przełączeniem w ramach dopuszczalnego zakresu regulacji. Dodatkowo wielu producentów transformatorów na świecie, operatorów sieci, firmy remontowe, serwisowe i diagnostyczne oraz zakłady energetyczne, opracowują własne kryteria diagnostyczne i ramowe instrukcje eksploatacji. Wprowadzane metody nie opierają się jedynie na pomiarach wartości bezwzględnych, a raczej na analizie trendu w czasie i pomiarze charakterystycznych sygnatur.

Wśród nowych metod diagnostycznych, publikowanych i wprowadzanych przez różne ośrodki badawcze, można w odniesieniu do PPZ wyróżnić: pomiar przebiegu mocy pobieranej przez układ napędowy przełącznika zaczepów, analizę DGA oleju w komorze przełącznika mocy, pomiary wibracji a także emisji akustycznej i porównywanie sygnatur widmowych, jak też pomiar dynamicznej rezystancji styków (*DRM – Dynamic Resistance Measurement*).

W pracy doktorskiej Autor skupił się na analizie dynamicznego procesu przełączania podobciążeniowego przełącznika zaczepów, formułując tezę pracy następująco:

Diagnostyka przełącznika zaczepów jest trudna, a żadna z dotychczasowych metod nie jest do końca wiarygodna. Istnieje konieczność rozszerzenia dotychczas stosowanych metod diagnostycznych o nową metodę opartą o analizę dynamicznego procesu przełączania.

Prezentowana w pracy metoda jest rozszerzeniem pomiarów dynamicznej rezystancji styków (DRM), publikowanych w literaturze np. R.Zuijderduin, J.Erbrink, E.Gulski, J.J.Smit, R.Leich, „*Condition Assessment of Power Transformers OLTC by DGA and Dynamic Resistance Measurements*”, Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2009, Johannesburg, 2009.

2. Dane bibliograficzne rozprawy

Rozprawa, opracowana jest w języku polskim, zawiera 90 stron. Składa się z 8 rozdziałów oraz spisu literatury. Wykaz literatury obejmuje 32 publikacje. Praca posiada logiczny układ rozdziałów, liczny materiał ilustracyjny w postaci zdjęć, rysunków i tabel. Stosowane w rozprawie jednostki należą do systemu SI. Studiowanie rozprawy ułatwiłby wykaz symboli, oznaczeń i skrótów.

3. Charakterystyka rozprawy i oceny częściowe

Rozprawa dotyczy rozwoju komplementarnych metod diagnostycznych podobciążeniowego przełącznika zaczepów transformatorów elektroenergetycznych dużych mocy. W pierwszej części rozprawy Autor przedstawił rutynowe pomiary wykonywane na licznych jednostkach, a mianowicie: pomiary czasów własnych przełącznika mocy, sprawdzenie klatki wybierakowej, sprawdzenie rezystorów stopniowych przełącznika mocy, przebiegów mocy pobieranej przez układ napędowy PPZ, badanie oleju w komorze przełącznika mocy wraz z interpretacją w oparciu o trójkąt Duvala.

Celem prezentowanej rozprawy jest rozszerzenie diagnostyki przełączników transformatorowych o analizę dynamicznego procesu przełączania. Autor skupił się na określeniu dynamiki zmian procesu przełączania oraz lokalizacji występowania defektu. Wprowadzenie analizy dynamicznego procesu przełączania pozwala na wykrycie zmian przebiegu prądu spowodowanego pogorszeniem się jakości styków klatki wybierakowej i przełącznika mocy, wraz z określeniem wielkości zmian rezystancji styków. Do opracowania lokalizacji miejsca wzrostu rezystancji zaproponowano metodę wstawienia dodatkowej rezystancji probierczej w szereg ze stykiem. Dodatkowo zaproponowano modelowanie defektu wraz z analizą obliczeniową.

Wartość naukową rozprawy stanowi propozycja Autora, wynikająca z przeprowadzonych badań własnych, rozszerzenia diagnostyki przełączników zaczepów o analizy dynamiczne parametrów czasowych prądów oraz analizy porównawcze ich amplitud. Dodatkowo na etapie interpretacji wyników mają zostać wykorzystane dane uzyskane z połączenia metody dynamicznej i DGA.

Zaletą pracy są pomiary wykonane przez Doktoranta na dużych jednostkach transformatorów energetycznych. Dostęp do tego typu transformatorów (MVA) i możliwości pomiarów mają w badaniach naukowych znaczenie wyjątkowe.

Szczególne wartości pracy doktorskiej ujawnia się w bardzo dużym doświadczeniu zawodowym Autora. Doktorant posiada kilkudziesięcioletnie doświadczenia praktyczne z odbiorów transformatorów energetycznych. Elementem godnym podkreślenia jest połączenie praktyki inżynierskiej i badań naukowych.

Jak wspominałem na wstępie diagnostyka podobciążeniowych przełączników zaczepów jest przedmiotem wielu prac badawczych oraz publikacji w renomowanych czasopismach np. *IEEE Transactions on Power Delivery* czy *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* oraz w materiałach konferencyjnych i broszurach CIGRE. Niestety w pracy w małym stopniu odniesiono się do tych publikacji, w szczególności z ostatnich kilku lat, co niewątpliwie należy uznać za jej wadę. W literaturze nie wymieniono także własnych publikacji na konferencjach i w czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Kompensowane jest to bogatym doświadczeniem zawodowym i badawczym Autora.

Poniżej zebrano uwagi i pytania recenzenta do rozprawy doktorskiej, natomiast w Załączniku Nr 1 zestawiono wybrane uwagi szczegółowe.

Uwagi i pytania:

1. W rozdziale 6.1 przedstawiony jest przebieg rejestracji prądu w czasie pełnego cyklu przełączania z zaczeptu 1 do 18. Nie podano na jakiej jednostce i typie PPZ wykonano pomiary, a także przy jakim zasilaniu.
2. Autor przeprowadzał pomiary na różnych typach przełączników zaczeptów PO400 VEL 110, VM III itd. Jak ogólnie można traktować zaprezentowaną propozycję analizy dynamicznej i co powinno być uwzględnione przy badaniu różnych konstrukcji przełączników zaczeptów?
3. Dużym udogodnieniem przy analizie zagadnień w rozdziale 6 byłoby zamieszczenie schematu ideowego obrazującego rozmieszczenie rezystancji pomiarowej oraz dodatkowej w obwodzie.
4. Doktorant stosował rezystory dodatkowe styków w zakresie 0.2Ω do 5Ω . Z jakiego kryterium wynikał ten dobór i jak jest skorelowany z typowymi uszkodzeniami występującymi w eksploatacji ?
5. Doktorant sugeruje wprowadzenie jako dodatkowego kryterium oceny PPZ oprócz parametrów czasowych, także pomiary amplitudy prądu. W niektórych przypadkach opisujących dynamikę przebiegu prądu Autor odbiega od inżynierskiej dokładności jak np. na str 56 stwierdzając „Amplitudy prądu uległy wyraźnym zmianom”, gdy tymczasem na rysunku 6.1.6 nie wprowadzono skali prądowej osi Y ?
Jakie kryterium prądowe Doktorant rozumie jako różnicujące przebiegi ?
6. Przy opisie badań dynamicznych (str. 57) Autor zaleca zwarcie strony DN. Z czego dokładnie wynika ta rekomendacja?
7. W analizie porównawczej przebiegów dynamicznych Autor z uwagi na brak pomiarów referencyjnych dla danej fazy, wprowadził system porównań międzyfazowych. Czy taka metodologia będzie zawsze słuszna?
8. W rozdziale 6.5 Doktorant przedstawił wartości stałych czasowych otrzymane z pomiarów oraz obliczone ze schematu zastępczego. Z czego wynikała tak wielka różnica wyników i które elementy w schemacie zastępczym nie były uwzględnione lub miały zasadniczo inne wartości wpływające na wynik ?
9. Z jakich kryteriów wynikają przedstawione w tabeli 6.8 zakresy graniczne czasów poszczególnych faz cyklu przełączeniowego?
10. W rozdziale 6.6.1. Doktorant przedstawia wyniki modelowania i analizy matematycznej defektów w przełączniku zaczeptów. Dla jakich wartości rezystancji zaprezentowano wykresy 6.38 i 6.39 oraz jakim konkretnym defektem w układzie rzeczywistym mogą one odpowiadać? Czy można skorelować te dane ze starzeniem i fazami wypalania styków?
11. W spisie literatury praktycznie zupełny brak jest pozycji z ostatniej dekady, np. IEEE, CIGRE ?

4. Ocena ogólna rozprawy i wniosek końcowy

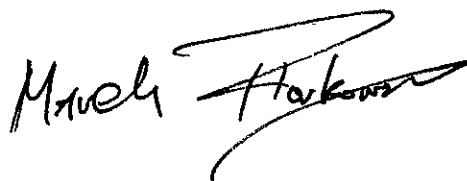
Doświadczenie Autora w stosowaniu różnych metod z zakresu diagnostyki transformatorów dało podstawy do sformułowania propozycji rozszerzenia oceny podobciążeniowego przełącznika zaczeów, wyrażonej w tezie pracy doktorskiej.

Rozprawa wnosi wkład naukowy w problematykę diagnostyki transformatorów energetycznych. Realizując pracę doktorską Autor wykazał się dużą wiedzą z zakresu konstrukcji transformatorów oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Praca zawiera liczne usterki redakcyjne, w niektórych fragmentach brak spójności oraz uproszczoną analizę wyników, która zdaniem recenzenta mogłaby być znacznie pogłębiona.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Zbigniewa Szymańskiego stanowi opracowanie aktualnego zagadnienia naukowo-technicznego i dowodzi dobrego opanowania przez Doktoranta problemów diagnostycznych w dziedzinie transformatorów energetycznych.

Przedłożona rozprawa spełnia wymagania stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami).

Wnioskuje, zatem o dopuszczenie Autora rozprawy mgr. inż. Zbigniewa Szymańskiego do publicznej obrony pracy doktorskiej.



Załącznik Nr 1.

ZAŁĄCZNIK Nr 1: Wybrane uwagi szczegółowe

1. Większość wykresów jest przedstawiona w postaci zrzutów oprogramowania z ekranu komputera i nie posiada opisu osi a w niektórych przypadkach jest wręcz nieczytelna. Brak oznaczeń na osiach wielu wykresów jest uciążliwy dla czytelnika, np.: 4.4, 4.6-4.14, 6.1-6.3, 6.26.
2. Brak powołań literaturowych w tekście np. rys 3.2, 3.3, 3.13, 3.14, przy zdjęciach katalogowych.
3. Rysunek 4.22, str.39, brak jednostek na osi Y, jednostka czasu na osi X winna być [ms], a nie [msek].
4. str 48, „*Jak można zauważyć czas działania przełącznika konieczny do wykonania przełączenia z pozycji 1 do pozycji 18 wynosi kilkadziesiąt sekund. Czas działania przełącznika mocy oznaczony na rysunku numerem 1 jest bardzo krótki*” – Jest to określenie nieprecyzyjne, gdyż oś czasu na rysunku 6.1 jest niewyskalowana, a ponadto nie wiadomo czy określenie „bardzo krótki” odnosi się do czasu wyrażonego w mili czy mikrosekundach?
5. Zakres czasowy faz ruchu przełącznika powinien być oznaczony dla $t < t_0$ (zamiast $t < 0$) str. 49 oraz $t_0 \leq t \leq t_1$ (zamiast $0 \leq t \leq t_1$ na str. 50).
6. Podpis pod rysunkiem 6.4 powinien być na str. 51 a nie na str. 52
7. Na rysunkach 6.6-6.26 brak oznaczenia faz, brak skali czasu i amplitudy.
8. str. 65, str. 70: brak oznaczenia stałej czasowej w zdaniu „Stała czasowa...”.
9. Literatura:
- pozycja [32] brak danych bibliograficznych
10. Literówki w tekście:
- str. 88 jest „Oznacz” winno być „Oznacza”

