

Wojciech Kandora
TurboCare Poland S.A., Lubliniec

WYSOKONAPIĘCIOWA METODA IMPULSOWA OCENĄ STANU IZOLACJI ZWOJOWEJ MASZYN WIRUJĄCYCH

HIGH VOLTAGE IMPULSE METHOD FOR DIAGNOSTIC OF ROTATING MACHINS TURN TO TURN INSULATION

Abstract: The paper presents high voltage insulation method for testing turn to turn insulation. Paper contain surge test theory and describes comparative character of this method. In the article has been presented test result from stators with damage turn to turn insulation as well from high voltage motors. The paper describes influence of the tester storage capacitor capacitance on the test results, base on turbo generator rotor tests.

1. Wstęp

Wysokonapięciowa metoda impulsowa w ostatnich latach stała się jedną ze skuteczniejszych metod oceny stanu izolacji zwojowej maszyn. Komputerowa analiza przebiegów czasowych w szybki i łatwy sposób pozwala określić kondycję izolacji zwojowej. Metoda impulsowa znalazła również zastosowanie w diagnostyce wirników turbogeneratorów, gdzie cieszy się dużym uznaniem.

2. Teoria wysokonapięciowej metody impulsowej

Metoda impulsowa polega na podaniu na początek uzwojenia wysokonapięciowego impulsu o dużej stromości narastania podczas, gdy koniec uzwojenia zostaje uziemiony. Źródłem energii testera jest wysokonapięciowy kondensator ładowany poprzez generator impulsów. Zastosowanie szybkich tranzystorów IGBT pozwala uzyskać czasy narastania impulsu napięcia rzędu 0,2μs. Energia udaru definiowana jest zależnością:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (1)$$

Gdzie: C – pojemność kondensatora,
 U – napięcie próby.

Krótki czas narastania oraz duża energia udaru prowadzą do powstania dużego gradientu napięcia pomiędzy sąsiednimi zwojami. Aby można było mówić o diagnostyce izolacji zwojowej napięcie próby musi być odpowiednio wysokie, aby w osłabionych miejscach izolacji zwojowej mogło dojść do przeskoku napięcia. Wysokość próby udarowej normalizują normy IEEE 522-2004 lub IEC 60034-18-3, gdzie odpowiednio napięcia próby dla nowych uzwojeń maszyn wysokonapięciowych

z cewkami wzornikowymi wynoszą: $U_T = 2,86U_n$ i $U_T = 0,65(4U_n + 5kV)$. Dla maszyn będących w użyciu standard IEEE przewiduje napięcie obniżone do wartości 75%.

W odpowiedzi na impuls napięcia powstaje fala odbita tłumiona o częstotliwości:

$$f = 1/2 \cdot \pi \sqrt{LC} \quad (2)$$

Gdzie: L, C – zastępcza indukcyjność oraz pojemność badanego obwodu.

Istotną sprawą jest wpływ pojemności kondensatora rozładowczego na wynik pomiaru, co zostanie przedstawione w dalszej części artykułu. Zwarcie zwojowe powoduje zmianę - zmniejszenie indukcyjności, a tym samym wzrost częstotliwości napięcia fali odbitej.

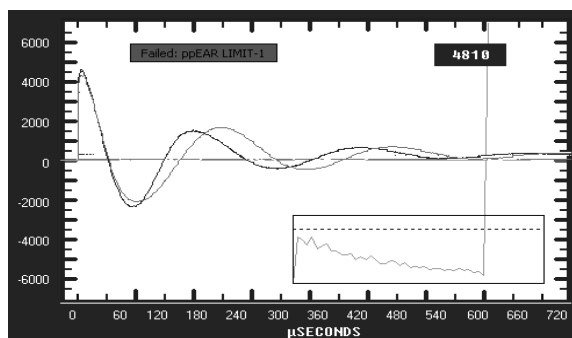
3. Porównawczy charakter metody impulsowej

Jak wiele innych metod badawczych, metoda impulsowa jest również badaniem porównawczym. Porównania otrzymanego przebiegu można dokonać w odniesieniu do:

- przebiegu wzorcowego otrzymanego podczas wcześniejszego badania, bądź z maszyny tego samego typu
- porównania z przebiegiem sąsiedniej fazy w przypadku uzwojeń symetrycznych
- porównaniu z przebiegiem przy niższym napięciu.

Ostatnia metoda jest możliwa, jeżeli tester posiada opcję ciągłej rejestracji oraz analizy wyników w funkcji narastania napięcia. W takim przypadku amplituda impulsu podnoszona jest płynnie od zera do napięcia próby. W odpowiedzi na każdy z impulsów generowany jest prze-

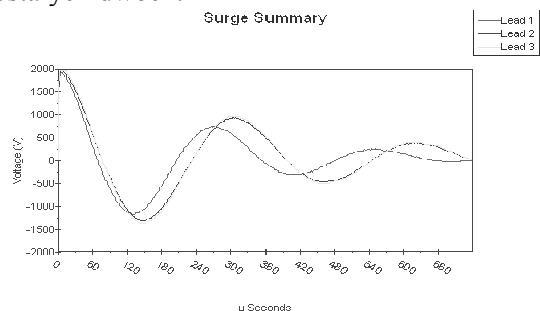
bieg oscylacyjny. Ciągłej analizie poddawane są dwa kolejne impulsy. Nagła zmiana częstotliwości drgań własnych, bądź kształtu fali odbitej świadczy o przeskoku napięcia na skutek osłabienia izolacji zwojowej. Niemetaliczne zwarcie zwojowe objawia się podczas próby „falowaniem” przebiegu. Zjawisko to przedstawiono na rysunku 1. podczas próby przebicia izolacji zwojowej silnika SF80-6a.



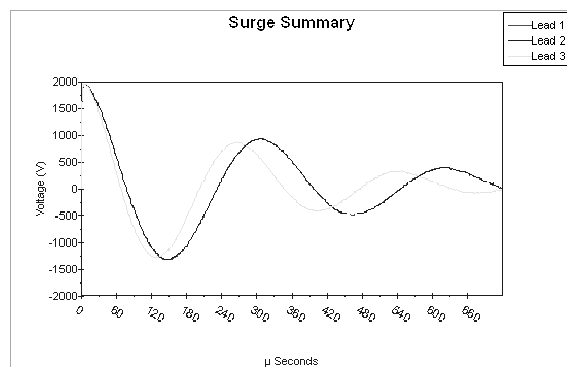
Rys. 1. Przebiegi oscylacyjne podczas próby izolacji zwojowej

4. Badania stojana silnika indukcyjnego

Przeprowadzono badania stojanów silników indukcyjnych pod względem skuteczności wykrywania zwarc zwojowych. Obiektem badań był trójfazowy silnik indukcyjny SF84a na napięciu $U=380V$. Silnik miał możliwość zamodelowania zwarcia zwojowego na pierwszych dwóch, trzech oraz czterech zwojach od strony zasilania. Uzwojenie silnika posiada 492 zwoje. Przeprowadzono pomiary silnika metodą impulsową dla silnika bez zwarć oraz przy symulowanych zwarcjach. Pomiaru dokonano zasilając najpierw początki uzwojeń, a następnie ich końce. Dla stojana bez zwarć przebiegi oscylacyjne dla poszczególnych faz pokrywały się. Przy symulowanym zwarciu zwojowym zarówno od strony zasilania (rys.3.), jak i od strony uziemienia (rys.4.) przebieg pochodzący od uszkodzonej fazy znacznie różni się od pozostałych dwóch.

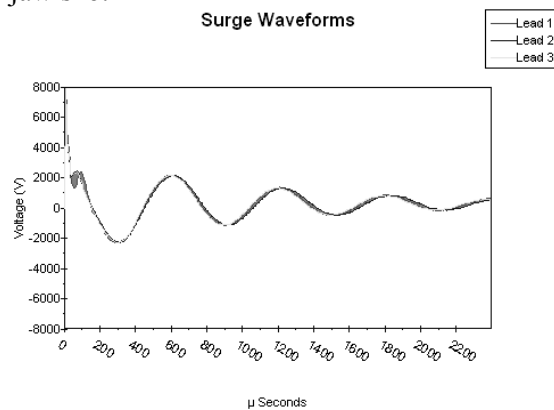


Rys. 3. Przebiegi oscylacyjne dla zwarcia 2 zwojów od strony zasilania

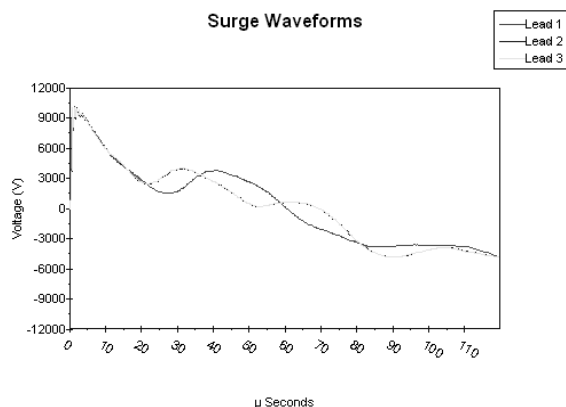


Rys. 4. Przebiegi oscylacyjne dla zwarcia 2 zwojów od strony uziemienia

W silnikach wysokonapięciowych dużej mocy, gdzie połączenia fazowe nie są rozłożone symetrycznie, często zdarza się odkształcenie przebiegów. Podczas wysokich prób udarowych ($U_T > 10kV$) można zaobserwować również zjawisko magnetostrykcji rdzenia objawiające się cyklicznymi charakterystycznymi stukami rdzenia. Przy pogorszonej zewnętrznej powłoce przeciwjarzeniowej można dostrzec przeskoki iskry pomiędzy rdzeniem, a powłoką przewodzącą prętą. Te zjawiska sprawiają, że interpretacja wyników pomiarów może być niejednokrotnie błędna ze względu na odkształcenia czoła przebiegu. Pomiary silnika MAEB 1000P na napięciu $U=6000V$ mogą wskazywać na uszkodzenie izolacji zwojowej fazy 1 (Rys. 5. oraz 6.). Widoczne odkształcenia czoła przebiegu spowodowane są jednak wyższymi zjawiskami. Na rysunku 5. można się dopatrzeć większej częstotliwości przebiegu fazy 2, co spowodowane jest brakiem jednej cewki tej fazy usuniętej podczas naprawy poawaryjnej. Ewentualne zwarcie zwojowe potęguje takie zjawisko.



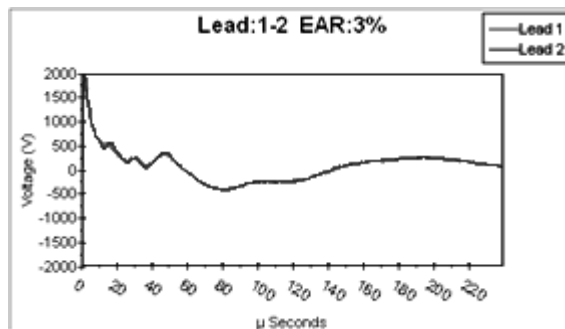
Rys. 5. Przebiegi oscylacyjne silnika MAEB 1000P



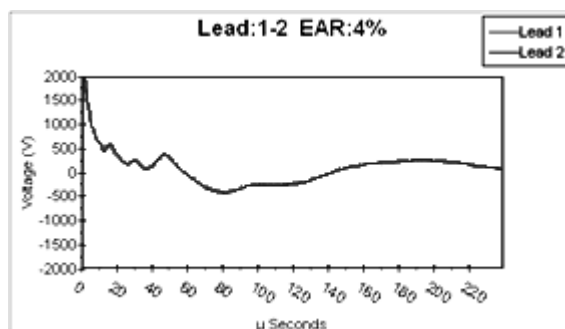
Rys. 6. Czola przebiegów oscylacyjnych silnika MAEB 1000P

5. Pomiary wirników turbogeneratorów

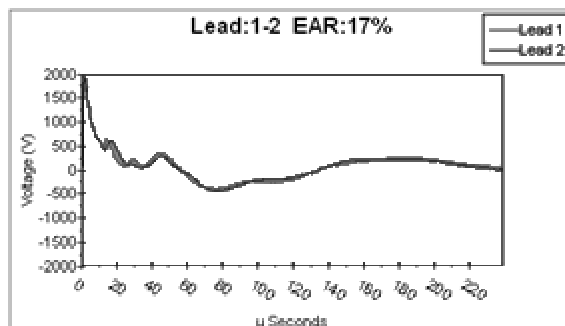
Metoda impulsowa jest coraz częściej wykorzystywana do badania wirników turbogeneratorów pod kątem zwarc zwojowych. Metoda pomiaru wirników polega na podaniu impulsu napięciowego na jeden koniec uzwojenia wirnika, podczas kiedy drugi zostaje uziemiony, następnie pomiar powtarza się dla drugiego końca uzwojenia. Największą skuteczność pomiaru otrzymuje się przy uziemionej bezcece wirnika. Jednak, aby metoda była skuteczna niezbędny jest tester o starannie dobranej impedancji wyjściowej. Duża wartość pojemności testera ma tak znaczący wpływ na przebieg napięcia, że symulowane zwarcie zwojowe nieznacznie, bądź też w ogóle nie wpływa na przebieg oscylacyjny. Przeprowadzono szereg badań na kilku rodzajach wirników. W artykule przedstawiono wyniki badań wirnika TWW-200 który posiada 9 cewek na biegun. W każdej cewce znajduje się 8 zwojów. Przy standardowej pojemności kondensatora rozładowczego testera otrzymujemy dobre wyniki pomiarów przy symulowanym zwarcu zwojowym na największej cewce wirnika, niestety dokładność maleje wraz z przesuwaniem zwarcia, aż do najmniejszej cewki, kiedy to skuteczność pomiaru jest znikoma. Na rysunkach 7,8,9 przedstawiono kolejno wyniki pomiarów dla wirnika bez zwarc, wirnika ze zwarcem zwojowym w cewce najmniejszej oraz ze zwarcem zwojowym w cewce największej.



Rys. 7. Przebiegi oscylacyjne wirnika TWW-200 bez zwarc zwojowych

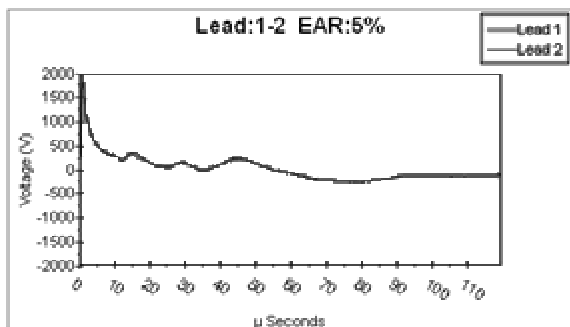


Rys. 8. Przebiegi oscylacyjne wirnika TWW-200 ze zwarcem zwojowym w najmniejszej cewce

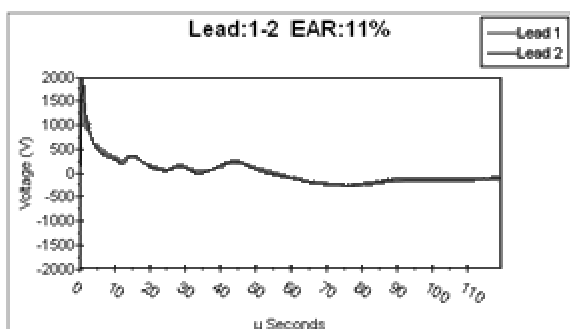


Rys. 9. Przebiegi oscylacyjne wirnika TWW-200 ze zwarcem zwojowym w największej cewce

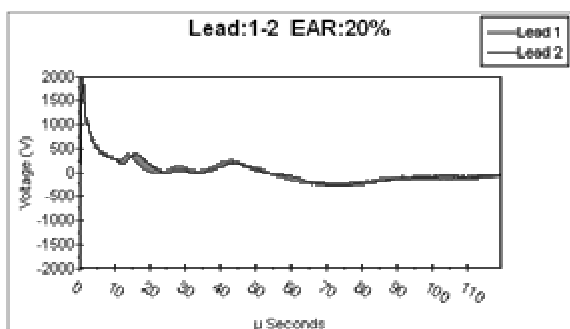
U góry wykresu można zauważyć procentowy wskaźnik różnicy przebiegów pochodzących od jednego oraz drugiego bieguna – EAR (z ang. Error Area Ratio). Jak widać skuteczność pomiaru zwarc zwojowych w najmniejszej cewce jest znikoma. Dwukrotne zmniejszenie pojemności rozładowczego testera daje znacznie lepsze rezultaty. Rysunki 10 - 12 przedstawiają wyniki pomiarów dla wirnika bez zwarc, wirnika ze zwarcem zwojowym w cewce najmniejszej oraz ze zwarcem zwojowym w cewce największej. Kolejne próby zmniejszenia pojemności testera o połowę dają gorsze rezultaty.



Rys. 10. Przebiegi oscylacyjne wirnika TWW-200 bez zwarć zwojowych



Rys. 11. Przebiegi oscylacyjne wirnika TWW-200 ze zwarciem zwojowym w najmniejszej cewce



Rys. 12. Przebiegi oscylacyjne wirnika TWW-200 ze zwarciem zwojowym w największej cewce

6. Wnioski

Izolacja zwojowa silników zwłaszcza zasilanych z falowników, najbardziej narażona na przepięcia jest na pierwszych zwojach. Duża stromość narastania impulsu pozwala osiągnąć niezbędny gradient napięcia aby w miejscu o osłabionej izolacji nastąpił przeskok. Wyniki pomiarów w przypadku zwarcia metalicznego wykazują jednakową skuteczność niezależnie od miejsca występowania zwarcia zwojowego. Metoda impulsowa może być stosowana w szerokim zakresie, jednak dla uzyskania wymaganej czułości, impedancja wyjściowa testera musi być odpowiednio dobrana do obiektu.

Prostota przeprowadzenia badań przy dużej skuteczności pomiaru sprawiają, że metoda impulsowa jest doskonałym uzupełnieniem pozostałych badań izolacji zwojowej jak pomiar impedancji, pomiar zaniku prądu w uzwojeniu itp.

7. Literatura

- [1]. IEEE 522-2004 Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating Current Electric Machines.
- [2]. EN 60034-18-32 Rotating electrical machines - Test procedures for form-wound windings.
- [3]. Kandora W., Smyczek A. – Diagnostyka izolacji zwojowej wirników turbogeneratorów. Nowoczesne metody pomiarowe. XVI Konferencja Energetyki.
- [4]. Wiedenbrug E. Frey, G. Wilson J. – Impulse testing and turn insulation deterioration in electric motors.

Autor

Wojciech Kandora
 TurboCare Poland S.A.
www.turbocare.pl
wojciech.kandora@turbocare.pl