

Sławomir Szymaniec, Politechnika Opolska
Wojciech Kandora, TurboCare Poland S.A.

DIAGNOSTYKA IZOLACJI UZWOJEŃ WYSOKONAPIĘCIOWYCH MASZYN ELEKTRYCZNYCH WYKONANYCH W TECHNOLOGII RESIN-RICH NA ETAPIE PRODUKCJI I REMONTU

INSULATION DIAGNOSTICS OF THE HIGH VOLTAGE ELECTRIC MACHINES MADE IN RESIN-RICH TECHNOLOGY DURING MANUFACTURING AND REPAIR

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania laboratoryjne prętów stojana turbogeneratorsa, przedstawiono wyniki pomiarów jak również ich interpretację.

Abstract: Paper contain laboratory study of partial discharge (PD) measurement on turbogenerator bars with a voids. Partial discharge patterns and PD interpretation were showed.

Słowa kluczowe: diagnostyka izolacji uzwojeń wysokonapięciowych maszyn elektrycznych

Keywords: insulation diagnostics of the high voltage electric machines.

1. Wstęp

Turbogeneratory są podstawowym źródłem energii elektrycznej. Współcześnie produkowane są stojany o mocy powyżej 2GW, w projektowaniu zaś są coraz to większe jednostki. Przy tak wielkiej koncentracji mocy szczególnego znaczenia nabiera niezawodność i trwałość maszyn. Badania teoretyczne, laboratoryjne, jak i doświadczalne analizy zjawisk w układach elektroizolacyjnych maszyn elektrycznych wysokiego napięcia (WN) zmierzają do określenia wskaźników diagnostycznych opisujących stopień zużycia izolacji [1, 2, 3, 7, 8]. Działania te stanowią podstawowe cele prac w dziedzinie diagnostyki wysokonapięciowej. Układ izolacyjny – jest to struktura przestrzennie złożona z materiałów nośnych, izolacyjnych i przewodzących zapewniających odpowiednią wytrzymałość elektryczną i funkcjonalność urządzenia. Izolacja uzwojeń w maszynach elektrycznych jest czynnikiem wymagającym bardzo często ze strony jej projektanta, zwiększenia gabarytów maszyny lub zmniejszenia jej mocy przy zachowaniu dotychczasowych wymiarów [2]. Obecnie nowoczesne układy izolacyjne uzwojeń stojanów WN maszyn wykonywane są w dwóch podstawowych technologiach, których wspólną cechą jest baza surowcowa czyli taśma mikowa na podkładzie z włókna szklanego [2, 4, 6, 8]. Technologiami tymi są:

- VPI (z ang. Vacuum Pressure Impregnation), cewki wykonane w tej technologii izolowane są porowatą taśmą mikową o małej zawartości lepiszcza (4,5 ÷ 10%). Proces utwardzenia odbywa się po kontakcie żywicy klejącej z żywicą impregnującą w procesie ciśnieniowej impregnacji, po którym następuje próżniowe suszenie cewki. W technologii VPI poszczególne pręty mogą zostać poddane nasycaniu lub też cały stojan po uzwojeniu zostaje impregnowany żywicą [2, 4, 6].
- RR (z ang. Resin Rich), technologia ta została wdrożona w latach 90-tych w zakładzie remontowym Energoserwis S.A. Lubliniec (obecnie TurboCare Poland S.A.). W tej technologii jako materiał elektroizolacyjny stosowana jest taśma mikowa z dużą zawartością lepiszcza. Taśma mikowa nanoszona jest mechanicznie na wstępnie utwardzony i przygotowany pręt. Utwardzenie izolacji następuje w procesie termoutwardzenia podczas prasowania izolacji. Na pręt nakładane są następnie taśmy wykończeniowe, po czym następuje hartowanie całości w piecu [2, 4, 6].

2. Diagnostyka izolacji na etapie produkcji

Diagnostyka uzwojeń WN maszyn na etapie ich wytwarzania towarzyszy niemalże każdemu etapowi produkcji. Wynikiem diagnostyki jest decyzja, która wynika z pomiarów, w ramach

których mierzy się określoną wielkość a wynik porównuje się z wartościami dopuszczalnymi. Istotne jest aby w przypadku negatywnego wyniku badań wskazać możliwą przyczynę występowania usterki celem poprawy procesu technologicznego. Obecnie stosuje się pomiary diagnostyczne przy prądzie stałym, przemiennym o częstotliwości sieciowej oraz napięciem wolnozmiennym [1÷5, 6, 7÷8]. Autorom znane są następujące metody diagnostyki maszyn WN:

- metoda w oparciu o pomiary PI, C, SV, DD - test Meggera,
- wielokryterialna metoda prof. Tadeusza Glinki na podstawie pomiarów napięciem stałym,
- pomiar wyładowań niepełnych,
- pomiar współczynnika strat dielektrycznych oraz pojemności uzwojeń,
- metoda impulsowa, test Bakera,
- pomiar prądu absorpcji przy liniowej lub skokowej rampie napięciowej,
- metoda spektroskopii niskoczęstotliwościowej,
- pomiar izotermicznych prądów relaksacji (metoda PDC),
- pomiar napięcia powrotnego (metoda RMV),
- pomiar zespolonej stałej dielektrycznej w zakresie ultra niskich częstotliwości (metoda FDS).

Autorzy z powodzeniem stosują równolegle większość z wymienionych wyżej metod pomiarowych. Dużą uwagę przywiązują do diagnostyki izolacji metodą wyładowań niepełnych.

3. Wyładowania niepełne

Wyładowania niepełne (wnz) są wyładowaniami występującymi wewnątrz układu izolacyjnego, które tylko częściowo zwierają izolację między przewodnikami i nie powodują bezpośrednio utraty własności izolacyjnych układu. Długotrwałe działanie wyładowań niepełnych poprzez mikro i makroskopowe zmiany w strukturze układów prowadzi do wyładowania zupełnego czyli przebicia izolacji [2, 3, 5÷8]. WNZ towarzyszą:

- Impulsy prądowe i związana z tym emisja fal elektromagnetycznych,
- Przemiany chemiczne,
- Udarowe odkształcenia sprężyste oraz związana z tym emisja fal akustycznych,

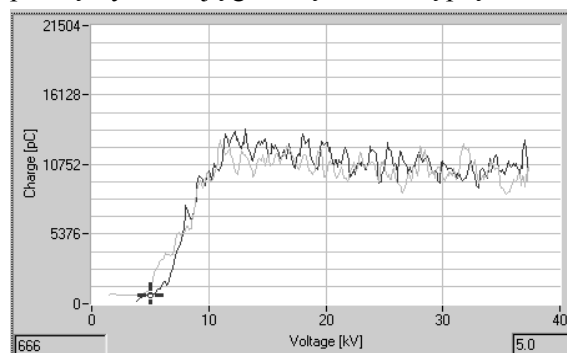
- Emisja promieniowania świetlnego,

- Lokalny wzrost temperatury w obszarze wnz.

W zakładach remontowych maszyn elektrycznych, obok standardowo wykonywanych testów izolacji głównej, diagnostyka wnz stała się podstawową metodą oceny jakości izolacji. Z doświadczeń autorów wynika, że na etapie produkcji uzwojeń wysokonapięciowych maszyn wykonanych w technologii Resin-Rich na chwilę obecną najskuteczniejszą metodą oceny jakości wykonania układu izolacyjnego jest metoda pomiaru wyładowań niepełnych metodą elektryczną. Zdecydowana większość defektów wykrywana i lokalizowana jest za pomocą tej właśnie metody.

4. Analiza defektu izolacji typu rozwarstwienie

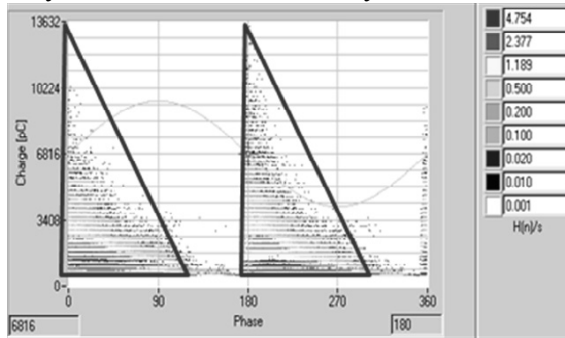
Defekt typu rozwarstwienie rozumiany jest tutaj jako źle przyklejona lokalnie izolacja do miedzi pręta. Analizę przypadku przedstawiono w oparciu o badanie pręta hydrogeneratora typu GDH 7262S o mocy $S=335,555$ MVA na napięciu $U=18$ kV. Pomiar wnz wykazał niepokojąco niskie napięcie zapłonu wyładowań $U_z=5$ kV (rys. 1). Przenośnym lokalizatorem wnz wykryto w części prostej źródło występowania wnz. Poprzez mechaniczne ostukiwanie pręta w okolicy wskazań detektora stwierdzono pustą przestrzeń na szerokim boku cewki na długości około 30cm. Po zdjęciu fragmentu izolacji pręta stwierdzono rozwarstwienie pomiędzy izolacją główną a miedzią pręta.



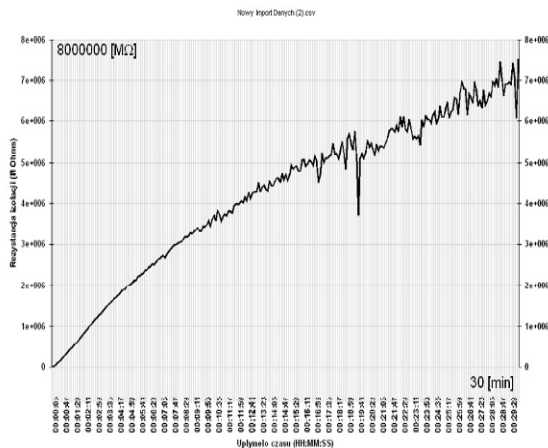
Rys. 1. Krzywa qV pręta z wadą typu rozwarstwienia

Analiza wnz przy wartości napięcia $U=1,5U_n$ wskazuje na symetryczny rozkład ładunków w dodatniej oraz ujemnej części sinusoidy napięcia zasilania z koncentracją ekstremum w kącie fazowym napięcia 0° oraz 180° . Ładunki maksymalne osiągają wartości kilkunastu do kilkudziesięciu nC a powtarzal-

ność występowania wnz sięga kilkadziesiąt tysięcy impulsów na sekundę ($n > 1000$). Rozkład gęstości ładunku dla tego typu defektu obrazuje rys. 2. Przeprowadzony test Meggera wskazuje na duże wahania prądu podczas ładowania układu izolacyjnego napięciem stałym o wartości $U=10$ kV - rys. 3.



Rys. 2. Rozkład gęstości ładunków wnz pręta z wadą typu rozwarstwienie



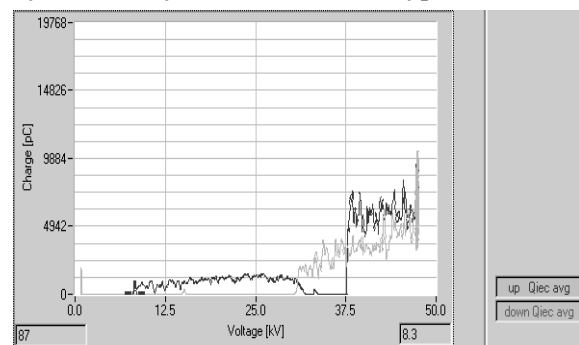
Rys. 3. Przebieg czasowy rezystancji izolacji podczas testu Meggera

Wyniki pomiarów metodą prof. Tadeusza Glinki w dwóch przypadkach kwalifikują pręt na 4 miejsce w pięciostopniowej skali oceny (wahania prądu oraz wartość odbudowy napięcia stałego). Wynik ten również dyskwalifikuje wyrób w postaci pręta, który nie może wykazywać żadnych osłabień układu izolacyjnego.

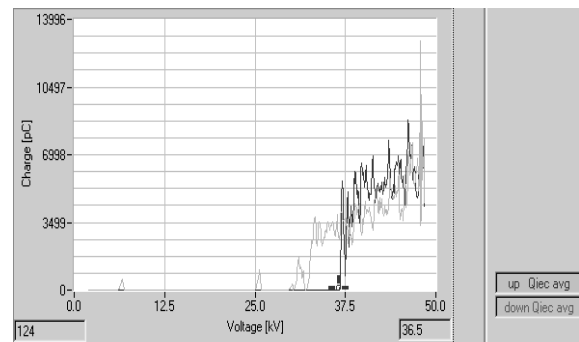
5. Analiza defektu izolacji typu kawerna

Poniżej przedstawiono wyniki badań przykładowego pręta stojana generatora TWW-230-2 na napięciu $U=15,75$ kV. Podczas pierwszego najazdu wysokiego napięcia zaobserwowano niskie napięcie zapłonu $U_z=8,3$ kV, którego to wartość nie spełniała wymagań technologii - rys. 4. Wyładowania te jednak zanikły na skutek stopniowego zwiększania napięcia - rys. 5. Kolejne pomiary w trybie

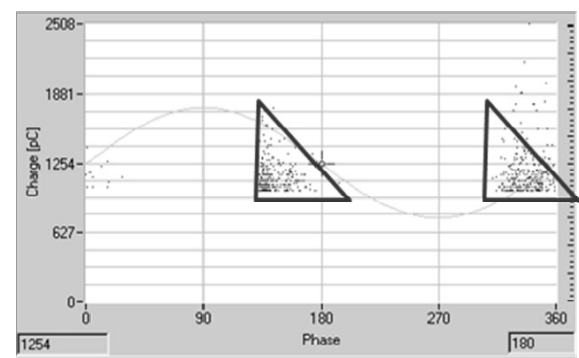
analitycznym nie wykazały żadnych defektów izolacji. Pozostałe pomiary elektryczne zawarte w Planie Badań i Prób nie wskazywały na występowanie defektu izolacji. Pręt uziemiano na czas kilku godzin a następnie dokonano kolejno najazdu napięcia aż do napięcia inicjacji wnz. Przenośnym lokalizatorem wyładowań niezupełnych wyszukano miejsce w części prostej pręta gdzie występowały wnz. Miejsce występowania wnz ostukano metalową kulą o średnicy kilkunastu milimetrów. Uszkodzone miejsce charakteryzowało się odgłosem o wyraźnie niższej częstotliwości. Rezultatem przeprowadzonego badania było wykrycie lokalnej wady o średnicy kilku milimetrów typu kawerna.



Rys. 4. Krzywa qV pręta z wadą typu kawerna – pierwszy najazd napięcia



Rys. 5. Krzywa qV pręta z wadą typu kawerna – kolejne najazdy napięcia



Rys. 6. Rozkład gęstości ładunków wnz pręta z wadą typu kawerna

Analiza przebiegu w czasie dominacji defektu wskazuje na symetryczną koncentrację ładunku w kącie fazowym napięcia zasilania $135^{\circ} \div 210^{\circ}$ oraz $305^{\circ} \div 15^{\circ}$. Ładunki te osiągają niewielkie wartości ($1,5 \div 5\text{nC}$) a ich powtarzalność jest mała ($n < 10$).

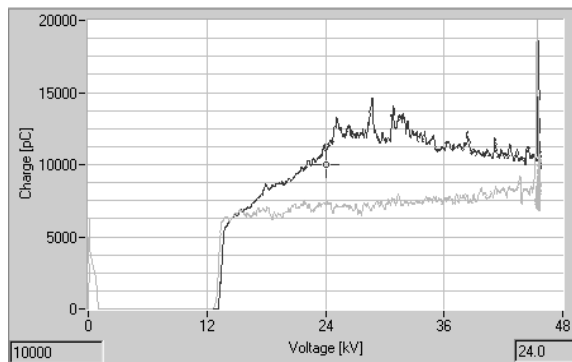
6. Analiza defektu - wnz powierzchniowe

Występowanie wyładowań niepełnych o dużej wartości lub też niskie napięcie zapłonu wnz (poniżej wymagań technologii) nie zawsze dyskwalifikuje pręt. Często wyładowania są skutkiem niedokładnego wykonania powłok półprzewodzących lub też zanieczyszczeń powierzchniowych skutkujących wyładowaniami powierzchniowymi. Przykładem może być zanieczyszczony lub zbyt krótki odcinek izolacji pomiędzy skuwką pręta a końcem warstwy półprzewodzącej na czole uzwojenia - rys. 7.



Rys. 7. Pręt stojana generatora z zanieczyszczeniem powierzchniowym izolacji

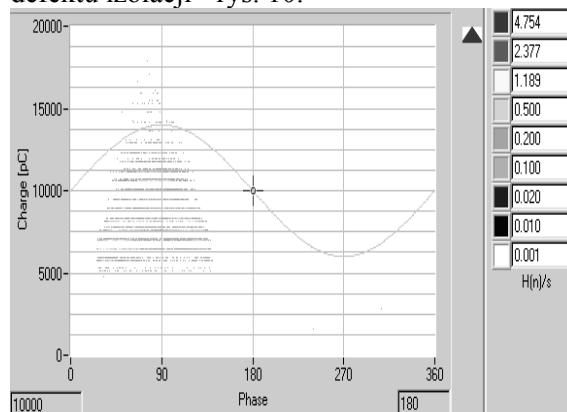
Wadę tego typu charakteryzuje koncentracja ładunku w przedziale fazowym napięcia zasilania $30^{\circ} \div 150^{\circ}$ - rys. 8. i rys. 9, co odpowiada wyładowaniom koronowym ostrzowym z elektrodą na potencjale uziemienia.



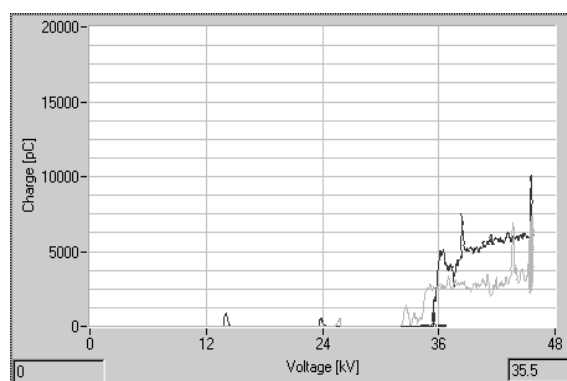
Rys. 8. Krzywa qV pręta z generatora z zanieczyszczeniem powierzchniowym izolacji

Po oczyszczeniu powierzchni izolacji napięcie zapłonu wnz wzrosło do poziomu akcepto-

walnego. Nie stwierdzono występowania defektu izolacji - rys. 10.



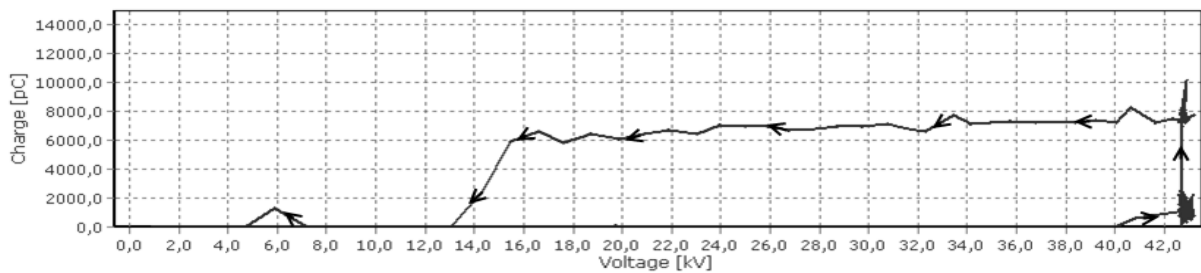
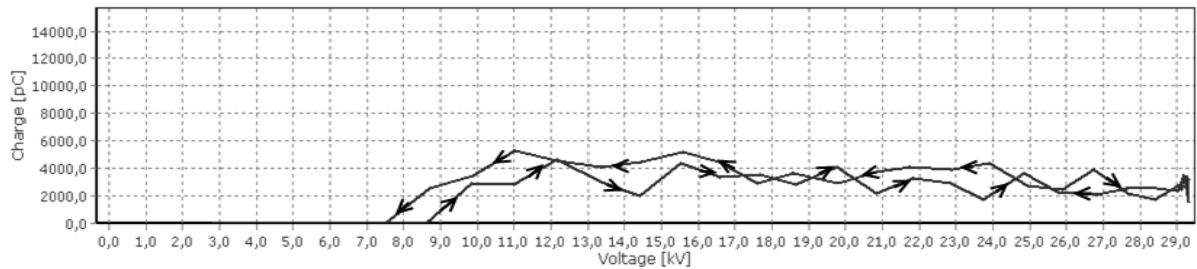
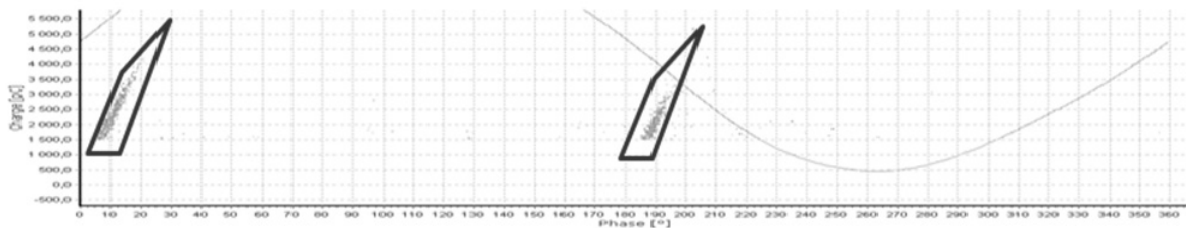
Rys. 9. Rozkład gęstości ładunków wnz pręta z zanieczyszczeniem powierzchniowym izolacji



Rys. 10. Krzywa qV pręta po oczyszczeniu izolacji

7. Analiza defektu – uszkodzenie wewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej

Tendencje produkcji uzwojeń stojanów generatorów w technologii Resin Rich dążą do wykonania bezwyładowaniowych układów izolacyjnych. Zwiększenie poziomu napięć maszyn przy jednoczesnym zwiększeniu natężenia roboczego izolacji powoduje powstawanie wnz w obszarach przeplotów Roebła na skutek silnego pola elektrycznego o nieliniowym rozkładzie [6]. Dotychczas stosowane wypełnienie przestrzeni pomiędzy izolacją a miedzią uzwojenia kitami półprzewodzącymi nie zawsze daje oczekiwane rezultaty. Dla maszyn na napięcia $U \geq 15\text{ kV}$ coraz częściej w technologii wykonania Resin Rich stosuje się tak zwaną pełną wewnętrzną ochronę przeciwjarzeniową. Takie rozwiązanie eliminuje lokalne naprężenia elektryczne w obszarach przepleceń Roebła powodujące występowanie wnz [6]. W przypadku pełnej ochrony, warstwa półprzewodząca ota-

Rys. 10. Krzywa qV pręta z osłabioną izolacją taśmy ekranującej – pierwszy najazd napięciaRys. 11. Krzywa qV pręta z osłabioną izolacją taśmy ekranującej – kolejne najazdy napięcia

Rys. 12. Rozkład gęstości ładunków wzn pręta z osłabioną izolacją taśmy ekranującej

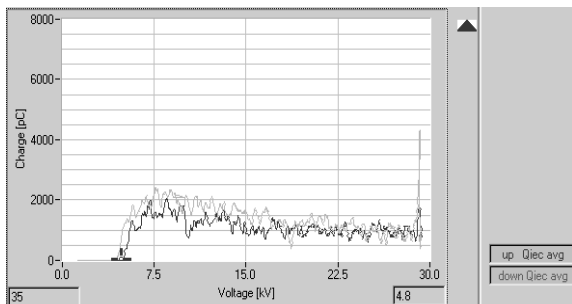
cza miedź pręta na całej długości w części prostej. Warstwa ta jest tylko w jednym punkcie połączona z przewodnikiem i odizolowana jest cienką warstwą taśmy mikowej. Przy pomocy przenośnego lokalizatora wzn zlokalizowano źródło wyładowań w części prostej pręta. Obraz wzn nie wskazywał na wyładowania spowodowane źle przyklejoną izolacją, rozwarstwieniami czy też uszkodzoną zewnętrzną ochroną przeciwjarzeniową. Zdjęto izolację główną z pręta w miejscu połączenia ekranu z miedzią pręta. Zmierzona rezystancja izolacji pomiędzy wewnętrznym ekranem a miedzią wynosiła:

$R = 2,3 \text{ k}\Omega$ – pomiar miernikiem uniwersalnym,
 $R < 10 \text{ }\Omega$ – pomiar miernikiem rezystancji izolacji na zakresie 50V.

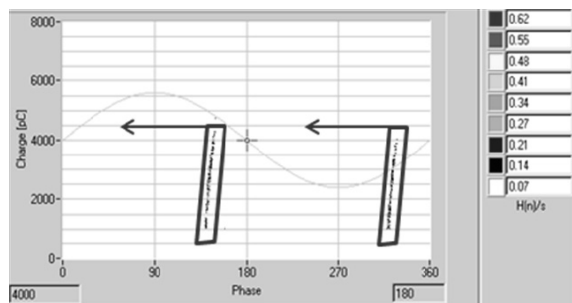
Miejsce występowania wzn było miejscem lokalnego osłabienia cienkiej izolacji pomiędzy wewnętrznym ekranem a miedzią pręta. Kąt fazowy koncentracji ładunków wzn dla tego typu uszkodzeń zawiera się w granicach $0 \div 60^\circ$ oraz $180 \div 240^\circ$. Istotną cechą tego typu defektu

jest fakt, że kąt koncentracji ładunków wzn nie zależy od wartości napięcia zasilania a jedynie od miejsca występowania defektu. W jednym pręcie może występować kilka lokalnych osłabień izolacji ekran – miedź. Wówczas na wykresie fazowo – rozdzielczym można zaobserwować kilka charakterystycznych kształtów obrazujących opisywaną wadę. Warunkiem skuteczności pełnej wewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej jest nie tylko jej ciągłość i dostateczna izolacja pomiędzy ekranem a przewodnikami pręta ale i odpowiednie parametry taśmy przewodzącej stanowiącej ekran. Taśma miedziana rozprowadza potencjał miedzi wzdłuż całej długości części prostej pręta lecz tylko przy jednym boku pręta. Dostateczna wartość oporności taśmy przewodzącej musi zapewnić odpowiednio mały gradient natężenia pola elektrycznego na drugim boku pręta. W przypadku zastosowania taśmy o niedostatecznej oporności natężenie pola w tym miejscu może przekroczyć wartość inicjacji wyładowań niezupełnych. Istotną różnicą w tego typu defekcie jest zależność kąta

koncentracji wnz od wartości napięcia zasilania. Analiza poszczególnych przedziałów napięcia zasilania wskazuje na odwrotnie proporcjonalną zależność kąta koncentracji ładunków w stosunku do wartości napięcia zasilania.



Rys. 13. Krzywa qV pręta z wewnętrznym ekranem o nieodpowiednich parametrach



Rys. 14. Rozkład gęstości ładunków wnz pręta z wewnętrznym ekranem o nieodpowiednich parametrach

8. Wnioski

Wylądowania niepełne są symptomem starzenia się izolacji wysokonapięciowych maszyn wirujących. Z doświadczenia wynika, że wnz pojawiają się znacznie wcześniej niż awaria maszyny. Zaprojektowanie bezwylądowaniowego układu izolacyjnego wydłuża trwałość maszyny. Wdrażanie nowych technologii wykonania układu izolacyjnego stanowi złożone zagadnienie z pogranicza nauki i techniki. Niejednokrotnie naukowe podejście do analizy określonego układu izolacyjnego jest trudne. Podstawowe znaczenie ma wówczas doświadczenie zdobyte podczas produkcji, badań oraz remontów układów izolacyjnych maszyn. Do poprawnej klasyfikacji defektów niezbędne było zrozumienie zjawisk zachodzących w różnych układach wnz oraz budowa modeli fizycznych wnz różnego rodzaju wad. Szybkie rozpoznanie problemu pozwala na natychmiastową zmianę technologii wykonania uzwojenia co generuje znaczne oszczędności czasu oraz pieniędzy. Zbudowano bazę najczęściej występujących w praktyce wnz.

Autorzy klasyfikując defekty opierali się wyłącznie na powtarzalnych wynikach oraz obrazach wnz co pozwala na szybsze oraz dokładniejsze rozpoznawanie wad podczas produkcji i remontów wysokonapięciowych uzwojeń maszyn wykonanych w technologii Resin-Rich.

Literatura:

- [1] Glinka T.: *Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle*. Wyd. BOBRME Komel w Katowicach, 2002r.
- [2] Kandora W.: *Diagnostyka off-line izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych wykonanych w technologii Resin-Rich*. Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Opole 2012.
- [3] Kandora W.: *Diagnostyka off-line izolacji uzwojeń turbogeneratorów metodą pomiarów wylądowań niepełnych* - Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr1/2012.
- [4] Klempner G. Kerszenbaum I.: *Operation and maintenance of large turbo-generators*. ISBN 0-471-61447-5, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Canada 2004
- [5]. Lemke E.: *Guide for partial discharge measurement in compliance to IEC 60270 Std*. CIGRE technical brochure WG D1.33 Dec. 2008
- [6] Stone G.C., Sedding H.G., Costello M. J.: *Application of partial discharge testing to motor and generator stator winding maintenance*. IEEE Tran. on Ind. Applications. Vol. 32, No. 2, March/April 1996.
- [7]. Szymaniec S.: *Czujniki i przyrządy do pomiarów wylądowań niepełnych maszyn elektrycznych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 85/2010.
- [8]. Szymaniec S.: *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi*. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013, Opole, Studia i Monografie, nr 333.

Autorzy

Dr hab. inż. Sławomir Szymaniec prof. PO
Politechnika Opolska. Wydział Elektrotechniki,
Automatyki. i Informatyki. Instytut
Elektrotechniki Przemysłowej i Diagnostyki.
45-758 Opole ul. Prószkowska 76, bud. 1
s.szymaniec@po.opole.pl
Dr inż. Wojciech Kandora
TurboCare Poland S.A.
www.turbocare.pl
wojciech.kandora@turbocare.pl

Recenzent

Dr hab. inż. Dariusz Karkosiński