

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

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

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

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania laboratoryjne prętów stojana turbogeneratora, 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 i w najbliższym czasie pozostaną 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 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 – zwana często „złem koniecznym” jest elementem wymagającym zwiększenia gabarytów maszyny lub zmniejszenia jej mocy przy zachowaniu dotychczasowych wymiarów [2]. Obecnie nowoczesne układy izolacyjne uzwojeń stojanów wysokonapięciowych 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 wysokonapięciowych maszyn na etapie ich wytwarzania towarzyszy niemalże każdemu etapowi produkcji. Wynikiem diagnostyki jest decyzja, która wynika z pomiarów, w ramach których mierzy się okre-

ślona 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 IR, k, PI, C, SV, DD - test Meggera,
- wielokryterialna metoda prof. Tadeusza Glinki na podstawie pomiarów napięciem stałym,
- pomiar wyładowań niezupełnych,
- pomiar współczynnika strat dielektrycznych oraz pojemności uzwojeń,
- metoda impulsowa,
- 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 praktykują równolegle większość z wymienionych wyżej metod pomiarowych. Największą uwagę przywiązują do diagnostyki izolacji metodą wyładowań niezupełnych.

3. Wyładowania niezupełne

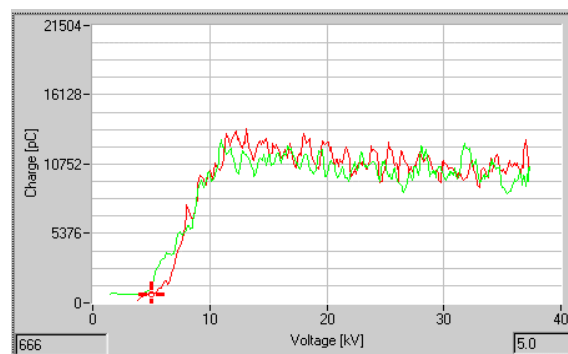
Wyładowania niezupełne (wnz) są wyładowaniami występującymi wewnątrz układu izolacyjnego, które tylko częściowo zwierają izolację między przewodnikami i nie powodują bezpośrednio utraty własności izolacyjnych układu. Długotrwałe działanie wyładowań niezupełnych poprzez mikro- i makroskopowe zmiany w 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 niezupełnych metodą elektryczną. Zdecydowana większość defektów wykrywana i lokalizowana jest za pomocą tej właśnie metody.

4. Analiza defektu izolacji typu rozwarstwienie

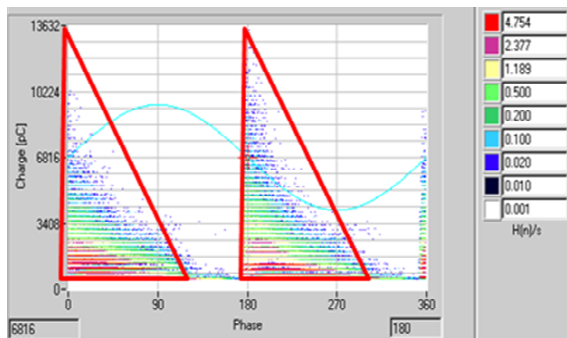
Defekt typu rozwarstwienie rozumiany jest tutaj jako lokalnie źle przyklejona izolacja do miedzi pręta. Analizę przypadku przedstawiono w oparciu o badanie pręta hydrogeneratora typu GDH 7262S o mocy $S=335,555$ MVA na napięciu $U=18$ kV. Pomiar wnz wykazał niepokojąco niskie napięcie zapłonu wyładowań $U_z=5$ 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.



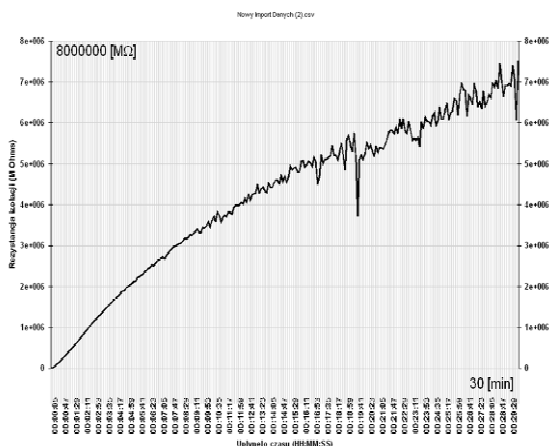
Rys. 1. Krzywa qV pręta z wadą typu rozwarstwienia

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 0^0 oraz 180^0 . Ładunki maksymalne osiągają wartości kilkunastu do kilkudziesięciu nC, a powtarzalność występowania wnz sięga kilkadziesiąt tysięcy impul-

sów na sekundę ($n > 1000$). Rozkład gęstości ładunku dla tego typu defektu obrazuje rysunek 2. Przeprowadzony test Meggera wskazuje na duże wahania prądu podczas ładowania układu izolacyjnego napięciem stałym o wartości $U = 10$ kV - rysunek 3.



Rys. 2. Rozkład gęstości ładunków wzn przęta z wadą typu rozwarstwienie



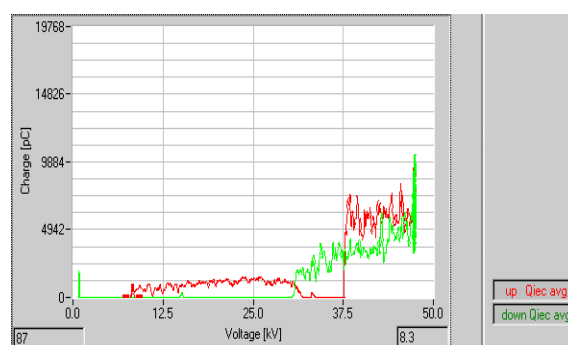
Rys. 3. Przebieg czasowy rezystancji izolacji podczas testu Meggera

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 przęta, który nie może wykazywać żadnych osłabień układu izolacyjnego.

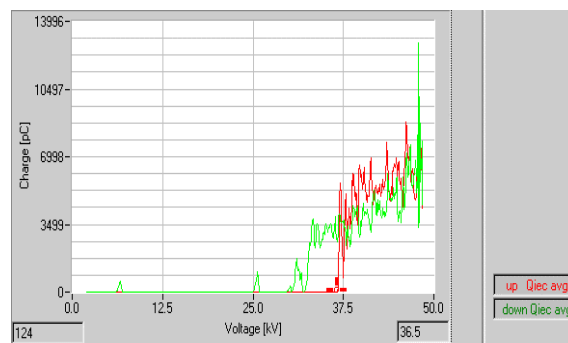
5. Analiza defektu izolacji typu kawerna

Poniżej przedstawiono wyniki badań przykładowego przęta 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 - rysunek 4. Wyładowania te jednak zanikły na skutek stopniowego zwiększania napięcia - rysunek 5. Kolejne pomiary w trybie analitycz-

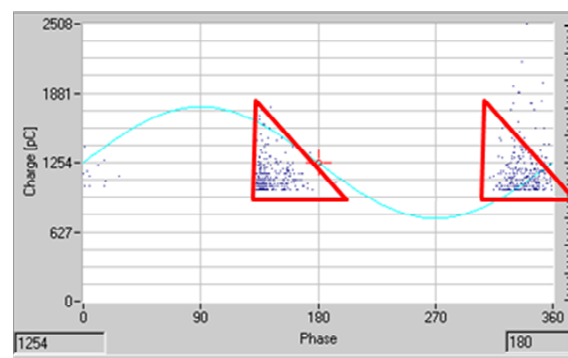
nym nie wykazały żadnych defektów izolacji. Pozostałe pomiary elektryczne zawarte w Planie Badań i Prób nie wskazywały na występowanie defektu izolacji. Pręt uziemiano na czas kilku godzin, a następnie dokonano kolejno najazdu napięcia aż do napięcia inicjacji wzn. Przenośnym lokalizatorem wyładowań niezupełnych wyszukano miejsce w części prostej przęta, gdzie występowały wzn. Miejsce występowania wzn 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 przęta z wadą typu kawerna – pierwszy najazd napięcia



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

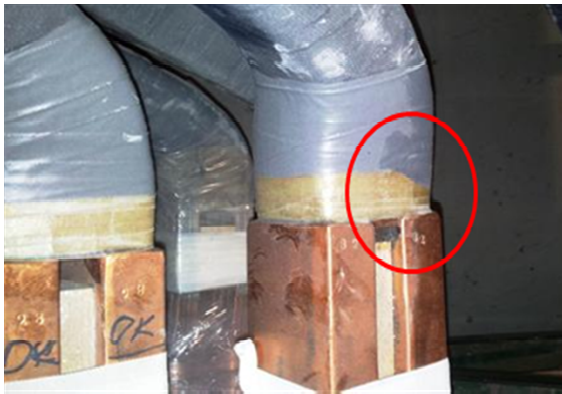


Rys. 6. Rozkład gęstości ładunków wzn przęta z wadą typu kawerna

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 ($n < 10$).

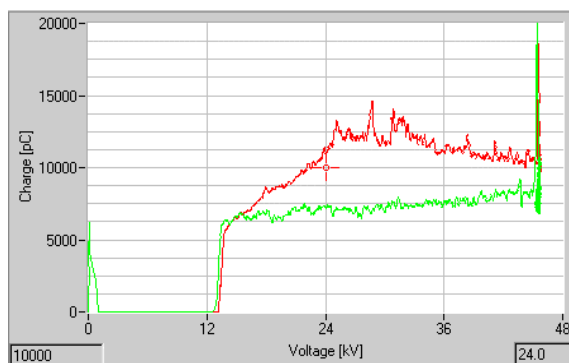
6. Analiza defektu - wnz powierzchniowe

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.



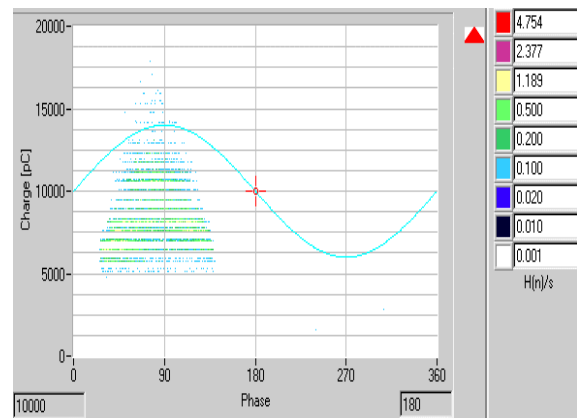
Rys. 7. Pręt stojana generatora z zanieczyszczeniem powierzchniowym izolacji

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

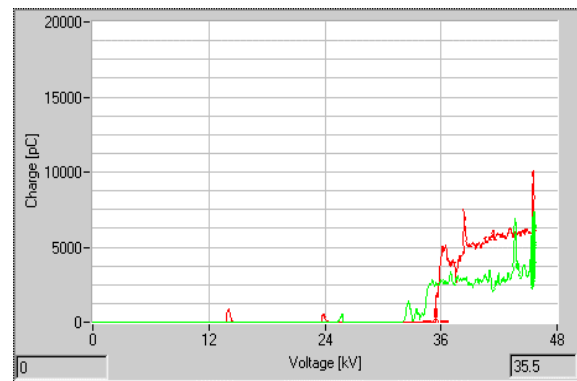


Rys. 8. Krzywa qV pręta z generatora z zanieczyszczeniem powierzchniowym izolacji

Po oczyszczeniu powierzchni izolacji napięcie zapłonu wnz wzrosło do poziomu akceptowalnego. Nie stwierdzono występowania defektu izolacji - rysunek 10.



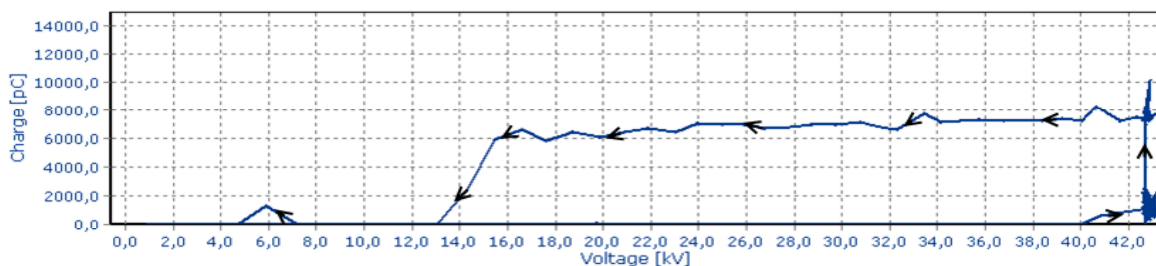
Rys. 9. Rozkład gęstości ładunków wnz pręta z zanieczyszczeniem powierzchniowym izolacji



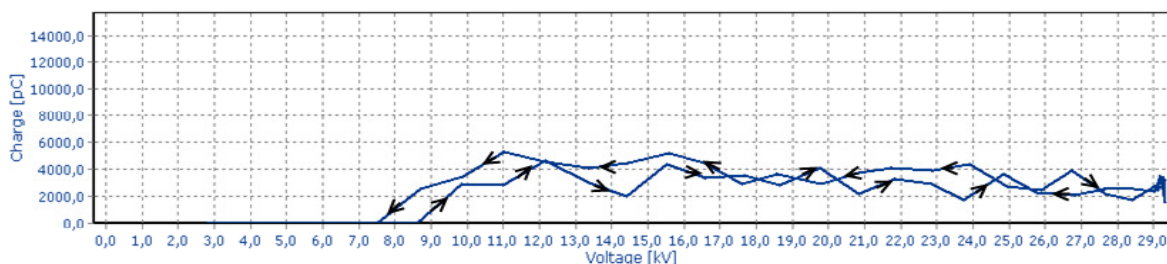
Rys. 10. Krzywa qV pręta po oczyszczeniu izolacji

7. Analiza defektu – uszkodzenie wewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej

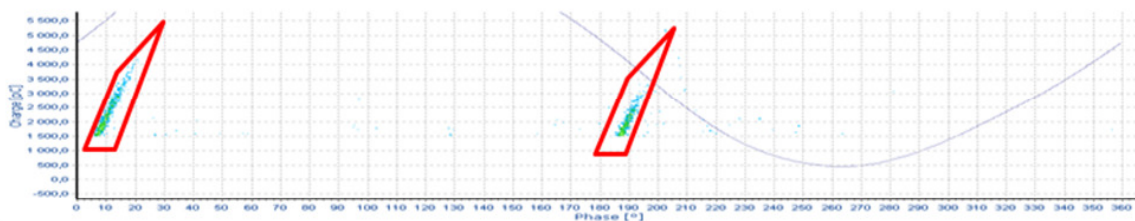
Tendencje produkcji uzwojeń stojanów generatorów w technologii Resin Rich dążą do wykonania bezwyładowaniowych układów izolacyjnych. Zwiększenie poziomu napięć maszyn przy jednoczesnym zwiększeniu natężenia roboczego izolacji powoduje powstawanie wnz w obszarach przepływów Roebbla na skutek silnego pola 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.



Rys. 11. Krzywa qV pręta z osłabioną izolacją taśmy ekranującej – pierwszy najazd napięcia



Rys. 12. Krzywa qV pręta z osłabioną izolacją taśmy ekranującej – kolejne najazdy napięcia



Rys. 13. Rozkład gęstości ładunków wnz pręta z osłabioną izolacją taśmy ekranującej

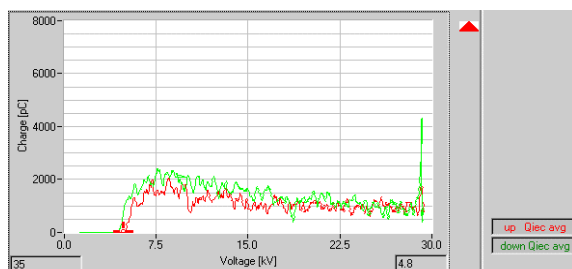
Takie rozwiązanie eliminuje lokalne naprężenia elektryczne w obszarach przepleceń Roebła powodujące występowanie wnz [6]. W przypadku pełnej ochrony, warstwa półprzewodząca otacza miedz pręta na całej długości w części prostej. Warstwa ta jest tylko w jednym punkcie połączona z przewodnikiem i odizolowana jest cienką warstwą taśmy mikowej. Przy pomocy przenośnego lokalizatora wnz zlokalizowano źródło wyładowań w części prostej pręta. Obraz wnz 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.

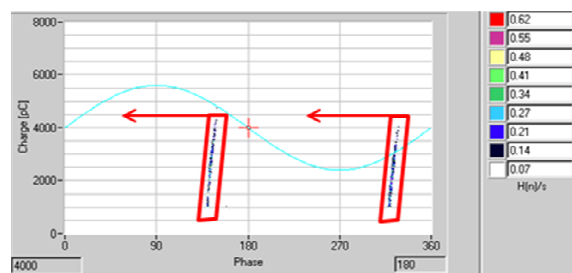
Miejsce występowania wnz było miejscem lokalnego osłabienia cienkiej izolacji pomiędzy wewnętrznym ekranem, a miedzią pręta. Kąt fa-

zowy koncentracji ładunków wnz 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 wnz zależy od wartości napięcia zasilania, a jedynie od miejsca występowania defektu. W jednym pręcie może występować kilka lokalnych osłabień izolacji ekran – miedz. 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. 14. Krzywa qV pręta z wewnętrznym ekranem o nieodpowiednich parametrach



Rys. 15. Rozkład gęstości ładunków wnz pręta z wewnętrznym ekranem o nieodpowiednich parametrach

8. Wnioski

Wyładowania niezupełne są symptomem starzenia się izolacji wysokonapięciowych maszyn wirujących. Z doświadczenia wynika, że wnz pojawiają się znacznie wcześniej niż awaria maszyny. Zaprojektowanie bezwyładowaniowego 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 i wówczas podstawowe znaczenie ma tutaj 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. Zastosowanie taśmy o mniejszej oporności wyeliminowało całkowicie powyższe zjawisko. 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 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 wyładowań niezupełnych* - Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 1/2012.
- [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 Transactions on Industry Applications. Vol. 32, No. 2, March/April 1996.
- [7]. Szymaniec S.: *Czujniki i przyrządy do pomiarów wyładowań niezupełnych 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 Elektro-
techniki 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