

Diagnostyka izolacji uzwojeń wysokonapięciowych maszyn elektrycznych wykonanych w technologii *Resin-Rich* na etapie produkcji

Sławomir Szymaniec, Wojciech Kandora

1. Wstęp

Turbogeneratory są i w najbliższym czasie pozostaną podstawowym źródłem energii elektrycznej. Współcześnie produkowane są stojany o mocy powyżej 2 GW, 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]. 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]. 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 nasyceniu lub też cały stojan po uzwojeniu zostaje impregnowany żywicą [2, 4, 6];
- RR (z ang. *Resin-Rich*), technologia ta została wdrożona w latach 90. w zakładzie remontowym Energoserwis SA Lubliniec (obecnie TurboCare Poland SA). 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 kluczowemu

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

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

• krokowi produkcji. Rezultatem diagnostyki jest decyzja, która wynika z pomiarów, w ramach których mierzy się określoną wielkość, a wynik porównuje 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 napięciu wolnozmiennym [1, 2, 3, 5, 6, 7]. Autorom znane są następujące metody diagnostyki wysokonapięciowych układów elektrycznych maszyn:

- 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 niepełnych;
- 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 ultraniskich częstotliwości (metoda FDS).

Autorzy z powodzeniem praktykują równolegle większość z opisanych powyżej metod pomiarowych, największą uwagę poświęcając jednak diagnostyce 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, 6, 7]. Wyładowaniom niepełnym 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 doświadczenia autora wynika, że na etapie produkcji uzwojeń wysokonapięciowych maszyn wykonanych w technologii *Resin-Rich* obecnie najskuteczniejszą metodą oceny jakości wykonania układu izolacyjnego jest metoda pomiaru wyładowań niepełnych metodą elektryczną wnz i zdecydowana większość defektów wykrywana i lokalizowana jest tą właśnie metodą.

4. Analiza defektu izolacji typu rozwarstwienie

Defekt typu rozwarstwienie rozumiany jest tutaj jako źle przyklejona lokalnie izolacja do miedzi pręta. Analizę 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 rozwarstwienie pomiędzy izolacją główną a miedzią pręta.

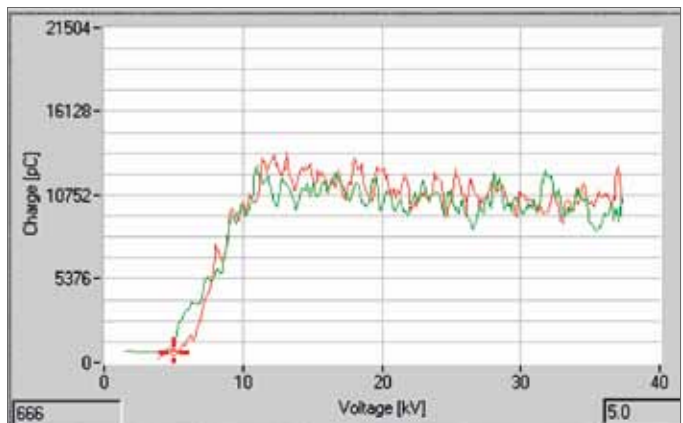
Analiza wnz przy wartości napięcia $U = 1,5 U_n$ wskazuje na symetryczny rozkład ładunków w dodatniej oraz ujemnej części sinusoidy napięcia zasilania z koncentracją ekstremum w kącie fazowym napięcia 0° oraz 180° . Ładunki maksymalne osiągają wartości kilkunastu do kilkudziesięciu nC, a powtarzalność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

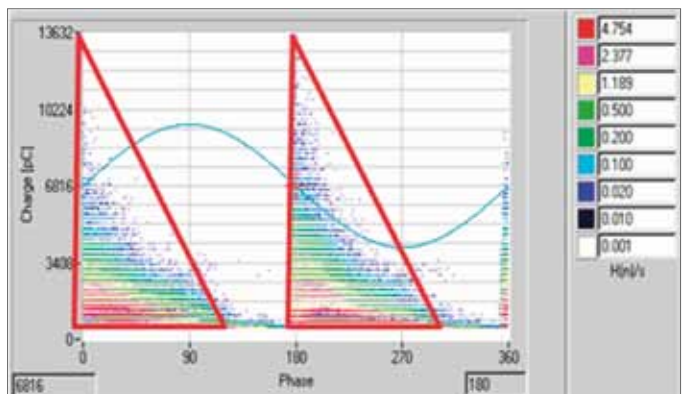
Wyniki pomiarów metodą prof. Tadeusza Glinki w dwóch przypadkach kwalifikują pręt na 4 pkt w pięciostopniowej skali oceny (wahania prądu oraz wartość odbudowy napięcia stałego). Wynik ten również dyskwalifikuje wyrób w postaci pręta, który nie może wykazywać żadnych osłabień układu izolacyjnego.

5. Analiza defektu izolacji typu kawerna

Poniżej przedstawiono wyniki badań przykładowego pręta stojana generatora TWW-230-2 na napięciu $U = 15,75$ kV. Podczas

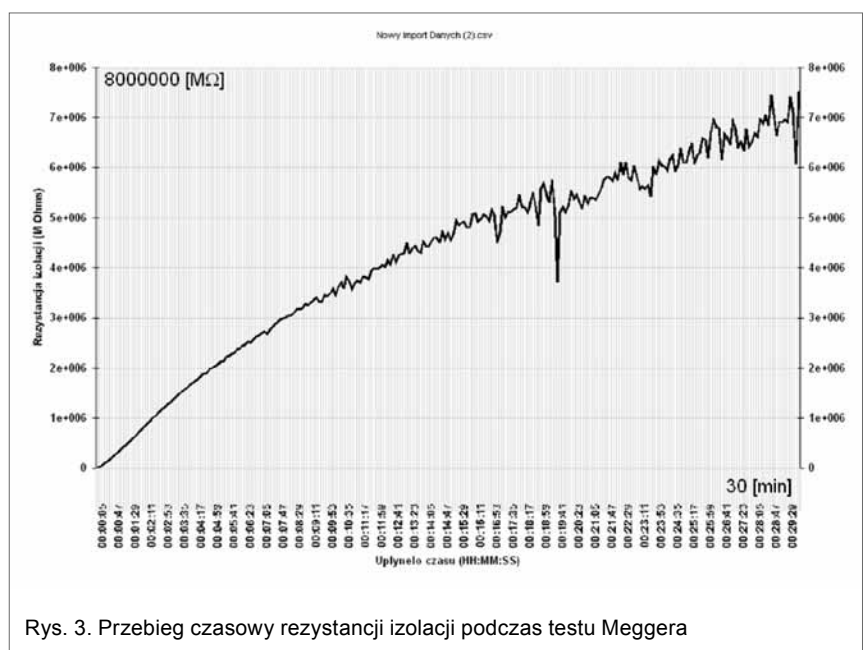


Rys. 1. Krzywa qV pręta z wadą typu rozwarstwienia

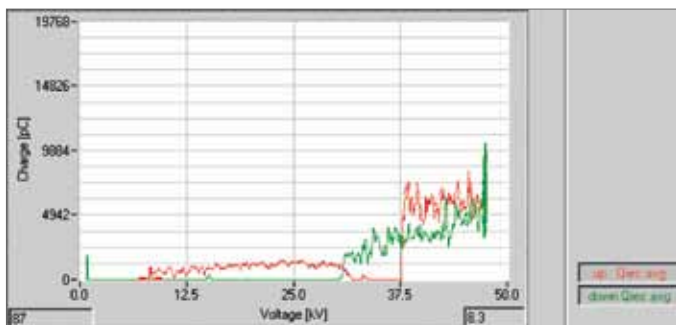


Rys. 2. Rozkład gęstości ładunków wnz pręta z wadą typu rozwarstwienie

pierwszego najazdu wysokiego napięcia zaobserwowano niskie napięcie zapłonu $U_z = 8,3$ kV, którego 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



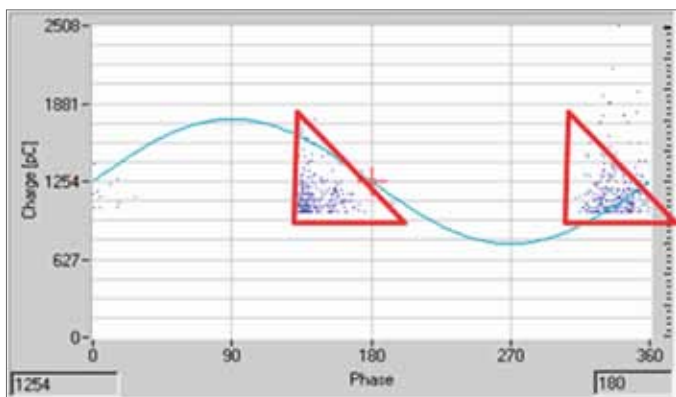
Rys. 3. Przebieg czasowy rezystancji izolacji podczas testu Meggera



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



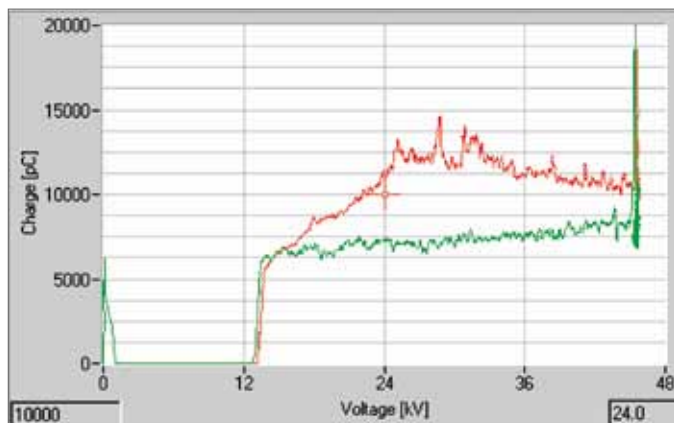
Rys. 5. Krzywa qV pręta z wadą typu kawerna – kolejne najazdy napięcia



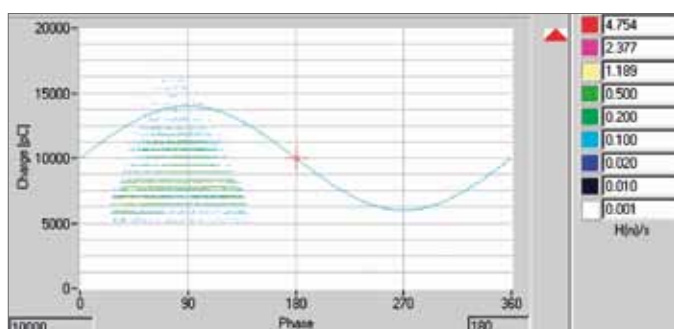
Rys. 6. Rozkład gęstości ładunków wzn pręta z wadą typu kawerna



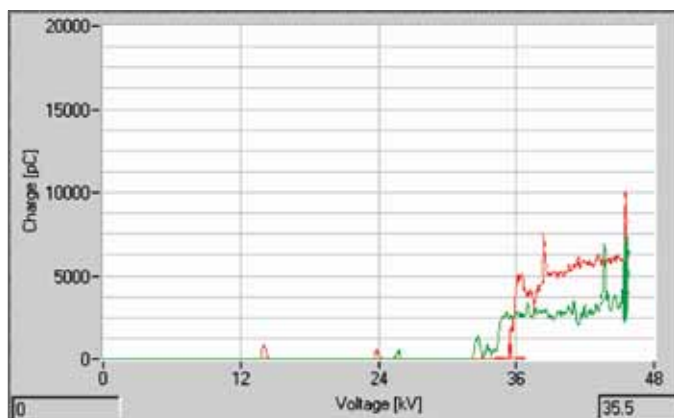
Rys. 7. Pręt stojana generatora z zanieczyszczeniem powierzchniowym izolacji



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



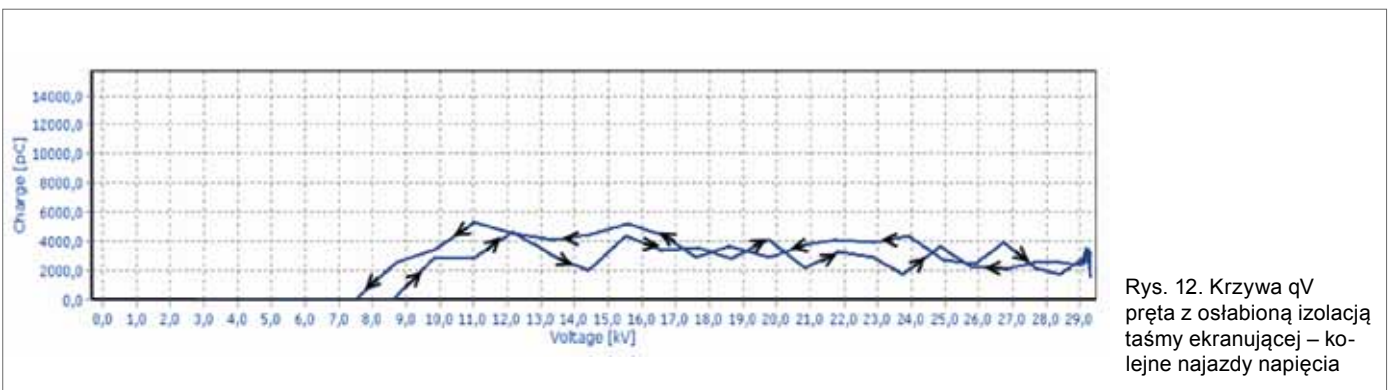
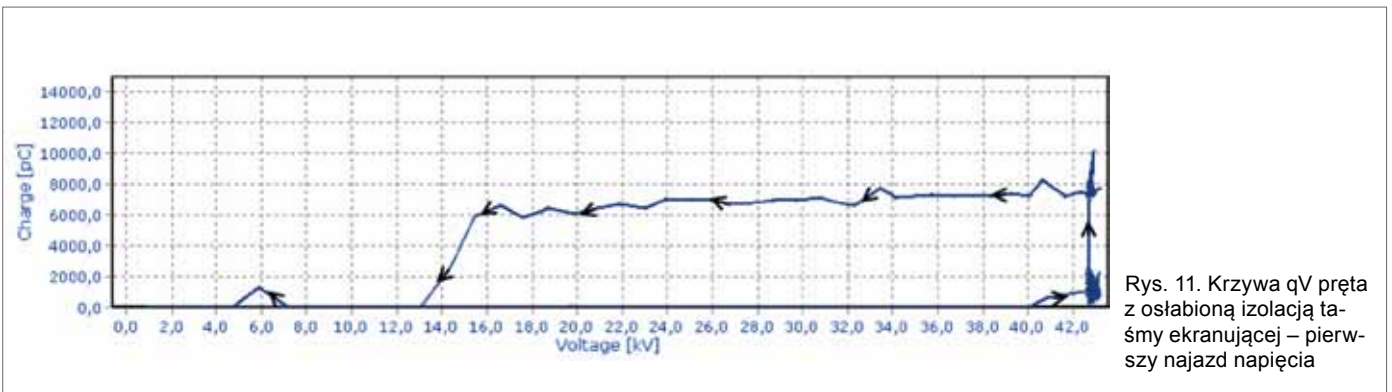
Rys. 9. Rozkład gęstości ładunków wzn pręta z zanieczyszczeniem powierzchniowym izolacji

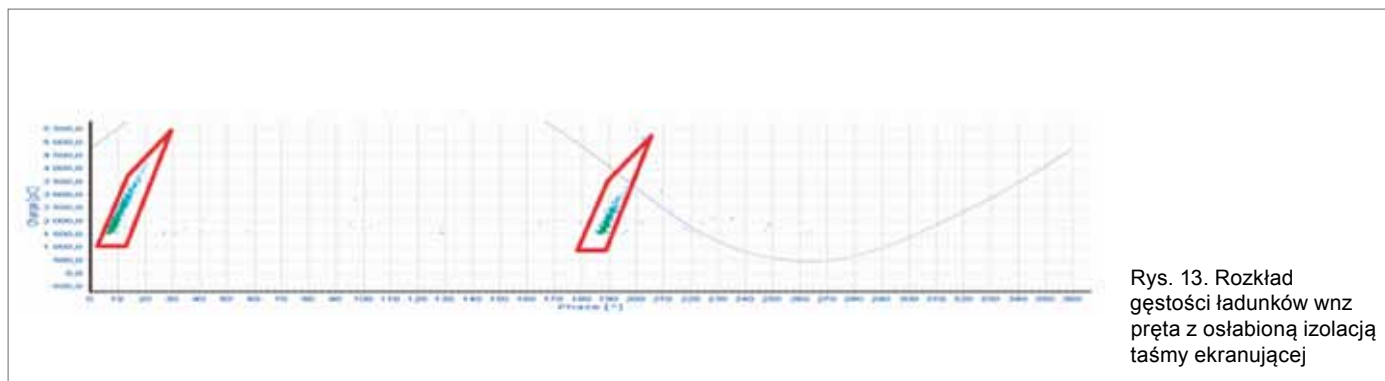


Rys. 10. Krzywa qV pręta po oczyszczeniu izolacji

Badań i Prób nie wskazywały na występowanie defektu izolacji. Pręt uziemiono na czas kilku godzin, a następnie dokonano kolejno najazdu napięcia aż do napięcia inicjacji wzn. Przenośnym lokalizatorem wyładowań niepełnych wyszukano miejsce w części prostej pręta, 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.

Analiza przebiegu w czasie dominacji defektu rozwarstwienia wskazuje na symetryczną koncentrację ładunku w kącie fazo-





Rys. 13. Rozkład gęstości ładunków wzn przęta z osłabioną izolacją taśmy ekranującej

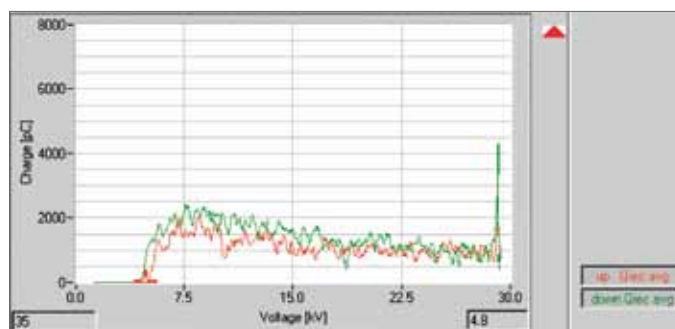
wym napięcia zasilania 1350 ÷ 2100 oraz 3050 ÷ 450. Ładunki te osiągają niewielkie wartości (1,5–5 nC), a ich powtarzalność jest mała ($n < 10$).

5. Analiza defektu wzn powierzchniowe

Występowanie wyładowań niepełnych o dużej wartości lub też niskie napięcie zapłonu wzn (poniżej wymagań technologii) nie zawsze dyskwalifikuje pręt, co skutkuje wymianą jego izolacji głównej. 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 przęta a końcem warstwy półprzewodzącej na czole uzwojenia (rys. 7).

Wadę tego typu charakteryzuje koncentracja ładunku w przedziale fazowym napięcia zasilania 30°–150°, co odpowiada wyładowaniom koronowym – ostrzowym z elektrodą na potencjale uziemienia

Po oczyszczeniu powierzchni izolacji napięcie zapłonu wzn wzrosło do poziomu akceptowalnego. Nie stwierdzono występowania defektu izolacji.

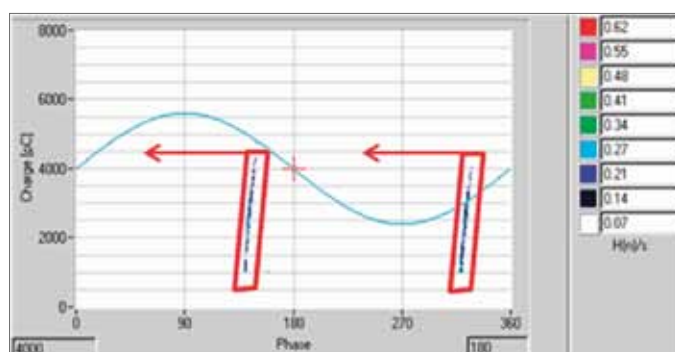


Rys. 14. Krzywa qV przęta z wewnętrznym ekranem o nieodpowiednich parametrach

6. 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 wzn w obszarach przepływów Roebła na skutek silnego pola elektrycznego o nieliniowym rozkładzie [63, 109, 62]. Dotychczas stosowane wypełnienie przestrzeni pomiędzy izolacją a miedzią uzwojenia kitami półprzewodzącymi nie zawsze daje oczekiwane rezultaty. Dla maszyn na napięcia $U \geq 15$ 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 wzn [109, 108]. W przypadku pełnej ochrony warstwa półprzewodząca otacza miedz przęta na całej długości w części prostej. Warstwa ta jest tylko w jednym punkcie połączona z przewodem i odizolowana jest cienką warstwą taśmy mikowej.

Przy pomocy przenośnego lokalizatora wzn zlokalizowano źródło wyładowań w części prostej przęta. Obraz wzn nie wska-



Rys. 15. Rozkład gęstości ładunków wzn przęta z wewnętrznym ekranem o nieodpowiednich parametrach

zywał na wyładowania spowodowane źle przyklejoną izolacją, rozwarstwieniami czy też uszkodzoną zewnętrzną ochroną przeciwjarzeniową. Zdjęto izolację główną z przęta w miejscu połączenia kranu z miedzią przęta. Zmierzona rezystancja izolacji pomiędzy wewnętrznym ekranem a miedzią wynosiła:

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

Miejsce występowania wzn było miejscem lokalnego osłabienia cienkiej izolacji pomiędzy wewnętrznym ekranem a miedzią przęta. Kąt fazowy koncentracji ładunków wzn dla tego typu uszkodzeń zawiera się w granicach 0–60° oraz 180–240°. Istotną cechą tego typu defektu jest fakt, że kąt koncentracji ładunków wzn nie zależy od wartości napięcia zasilania, a jedynie od miejsca występowania defektu. Kąt ten zależy od miejsca

występowania osłabienia izolacji pomiędzy ekranem a miedzią pręta.

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 rozprzewadza 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 wylądowań niepełnych.

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.

7. Wnioski

Wylądowania niepełne są symptomem starzenia się izolacji wysokonapięciowych maszyn wirujących. Z doświadczenia wynika, że wnz pojawiają się znacznie wcześniej niż awaria maszyny [6]. 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 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, Katowice, 2002.
- [2] KANDORA W.: *Diagnostyka off-line izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych wykonanych w technologii Resin-Rich*. Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej. Opole 2012.
- [3] KANDORA W.: *Diagnostyka off-line izolacji uzwojeń turbogeneratorów metodą pomiarów wylądowań niepełnych*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 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 wylądowań niepełnych maszyn elektrycznych*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 85/2010.

dr hab. inż. Sławomir Szymaniec
 prof. PO – Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki,
 Automatyki i Informatyki, Instytut Układów Elektromechanicznych
 i Elektroniki Przemysłowej,
 e-mail: s.szymaniec@po.opole.pl;
 dr inż. Wojciech Kandora – TurboCare Poland SA,
 e-mail: wojciech.kandora@turbocare.pl

artykuł recenzowany

reklama