

Diagnostyka *off-line* izolacji uzwojeń turbogeneratorów metodą pomiarów wyładowań niezupełnych

Wojciech Kandora

1. Wstęp

Wyładowania niezupełne (WZN) są wyładowaniami występującymi wewnątrz układu izolacyjnego, które tylko częściowo zwierają izolację między przewodnikami i nie powodują bezpośrednio utraty własności izolacyjnego układu. Długotrwałe działanie wyładowań niezupełnych poprzez mikro- i makroskopowe zmiany w strukturze układów prowadzi do wyładowania zupełnego, czyli przebicia izolacji [1, 6, 9]. W ostatnich latach można zaobserwować dynamiczny rozwój metod diagnostyki izolacji maszyn bazujących na analizie WZN. Wspomagane komputerowo metody pozwalają nie tylko ocenić poprawność wykonania izolacji, ale również określić rodzaj i miejsce występowania defektu [2, 9]. Wyładowaniom niezupełnym towarzyszą [2, 5, 9]:

- 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 WZN.

W zakładach remontowych maszyn elektrycznych obok standardowo wykonywanych testów izolacji głównej diagnostyka

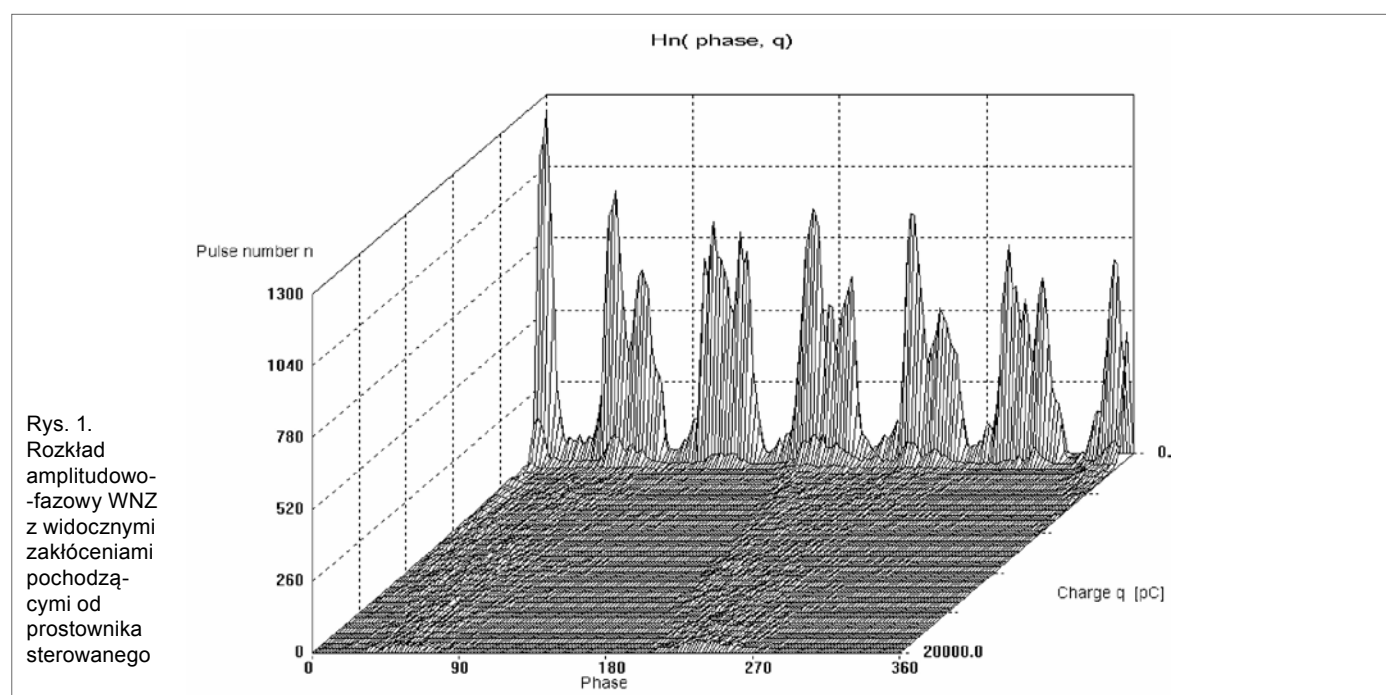
DIAGNOSTIC OF THE TURBOGENERATOR WINDOGS WITH USE OFF-LINE PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT

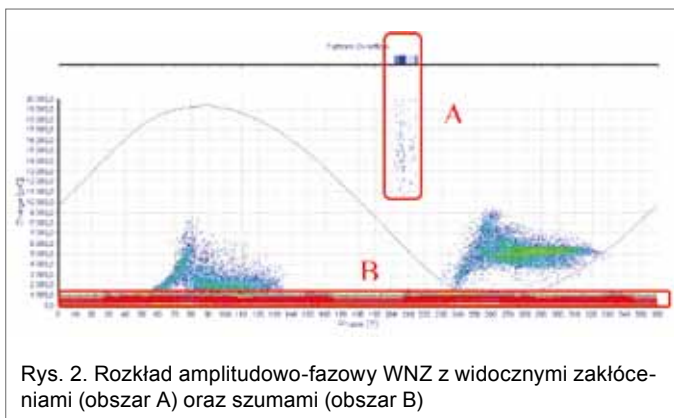
Abstract: Paper contain laboratory study of partial discharge (PD) measurement on turbo-generator bars with a voids. Noise influence during PD measurement and theirs elimination were described. Some partial discharge patterns and PD interpretation were showed.

WZN stała się podstawową metodą oceny jakości izolacji. Diagnostyka prętów uzwojenia stojana generatora, jak i kompletnego stojana metodą WZN na etapie produkcji opiera się na analizie impulsów prądowych powstałych na skutek cyklicznych wyładowań wewnątrz lub też na powierzchni izolacji [1, 8].

2. Układ pomiarowy, kalibracja toru, szumy

Pomiary *off-line* WZN wykonywane są metodą elektryczną z bezpośrednią kalibracją ładunku [7]. Wysokonapięciowy kondensator podłączony jest bezpośrednio do zacisków obiektu badań i uziemiony poprzez impedancję pomiarową. Wysoko-





Rys. 2. Rozkład amplitudowo-fazowy WNZ z widocznymi zakłóceniami (obszar A) oraz szumami (obszar B)

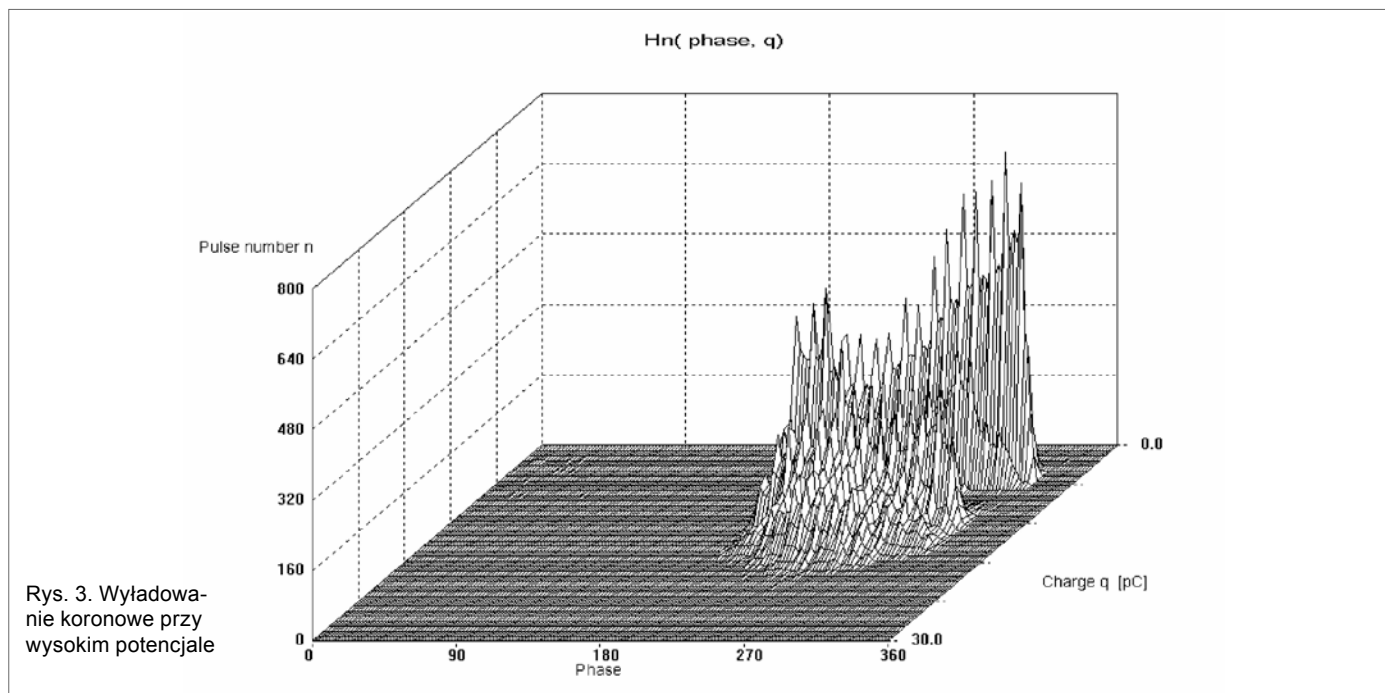
częstotliwościowe sygnały w gałęzi zasilania obiektu, których źródłem są WNZ, przetwarzane są w impedancji pomiarowej na niskonapięciowe impulsy. Kalibracja ładunku odbywa się poprzez podanie impulsu kalibracyjnego bezpośrednio na zaciski maszyny, następnie dokonywana jest kalibracja napięcia na podstawie równoległego pomiaru napięcia wzorcowym kilowoltomierzem. Sygnały WNZ rejestrowane i analizowane są cyfrowym miernikiem WNZ, wykonującym pomiar zgodnie z normą IEC 60270 [4, 5, 7, 8]. Jednym z podstawowych problemów pomiaru WNZ w przemyśle są zakłócenia, które przyczyniają się do dodatkowych błędów pomiaru, a nawet uniemożliwiają jego wykonanie. Źródłem zakłóceń są przetworniki częstotliwości, prostowniki sterowane, spawarki oraz chwilowe przebiegi

w sieci generowane przez maszyny komutatorowe lub też nagłe włączanie maszyn elektrycznych. Zakłócenia mogą się pojawiać jako impulsy cyklicznie pojawiające się na wykresie fazowo-rozdzielczym. Przykład zakłócenia pochodzącego od sześciopłusowego przekształtnika tyrystorowego obrazuje rys. 1.

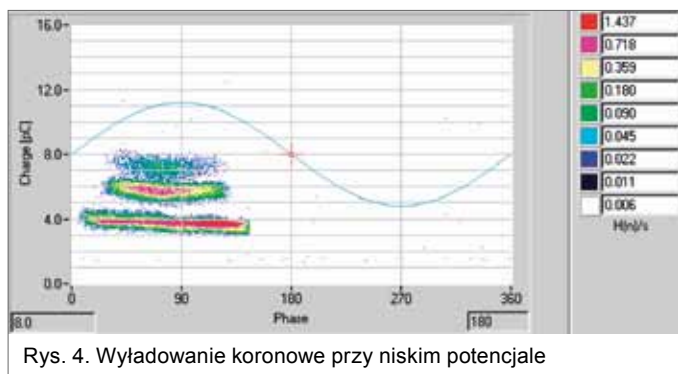
Zakłócenia pochodzące od włączania maszyn elektrycznych mocy charakteryzują się szeregiem pojawiających się w odstępach kilku ms impulsów o dużej wartości, sięgającej nawet kilkudziesięciu nC.

Zakłócenia te przedstawione są na rys. 2 i oznaczone obszarem A. Pozostałe zakłócenia – szumy o dużej powtarzalności, ale o małej wartości, które przed pomiarem odcina się poprzez ustawienie progu czułości – obrazuje obszar B. Wartość amplitudy szumów bezpośrednio zależy od pojemności obiektu badań. Podczas pomiaru stojana generatora o pojemności od kilkuset do kilku tysięcy nF poziom szumów zawiera się w granicach 500–2000 pC. Czasami jednak poziom zakłóceń jest wyższy i należy podjąć odpowiednie działania, aby je zminimalizować. Z praktyki autora wynika, że istotnym powodem występowania szumów o znaczącej wartości podczas pomiarów WNZ jest zła konfiguracja uziemienia układu pomiarowego. Elementy układu pomiarowego, którymi są m.in. regulator napięcia, transformator, dzielnik napięcia, kondensator WN, kabel WN, obiekt badań oraz analizator WNZ, powinny być połączone z uziemieniem tylko w jednym punkcie. Dwa niezależne uziemienia powodują, że wszystkie szumy i zakłócenia, których źródłem są prądy płynące w całym systemie uziemiającym, przenoszą się bezpośrednio na układ pomiarowy. Podstawowym błędem

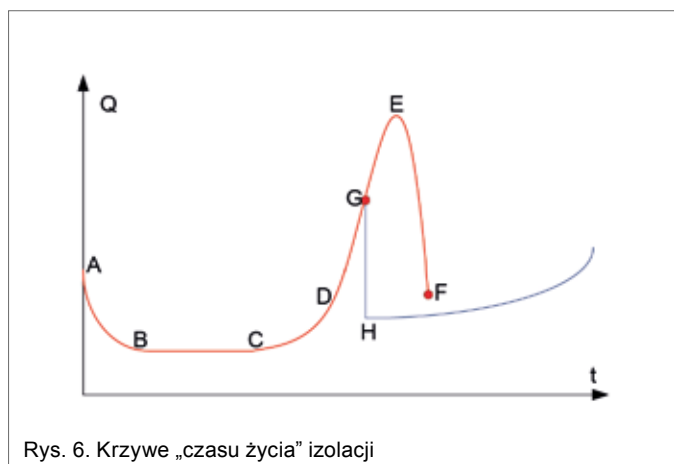
reklama



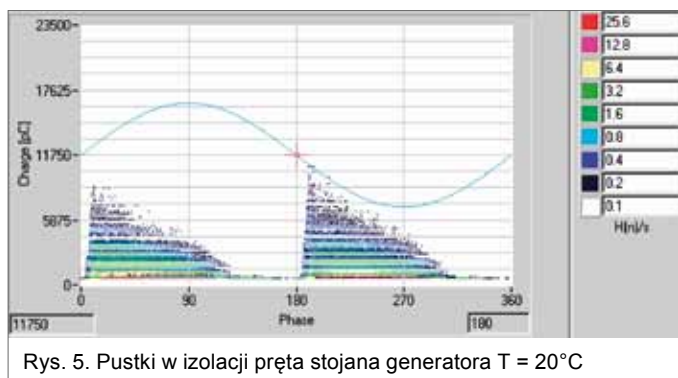
Rys. 3. Wyładowanie koronowe przy wysokim potencjale



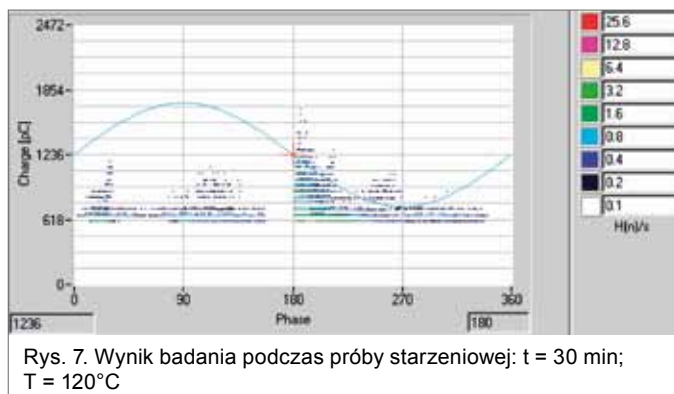
Rys. 4. Wyładowanie koronowe przy niskim potencjale



Rys. 6. Krzywe „czasu życia” izolacji



Rys. 5. Pustki w izolacji pręta stojana generatora T = 20°C



Rys. 7. Wynik badania podczas próby starzeniowej: t = 30 min; T = 120°C

konstrukcyjnym niektórych analizatorów WNZ jest galwaniczne połączenie uziemienia testera z uziemieniem w przewodzie zasilającym. W przypadku braku zastosowania odpowiednich zewnętrznych filtrów w układzie zasilania testera uziemienie we wtyczce zasilającej tester jest drugim punktem połączenia układu probierczego z masą. Badania laboratoryjne wykazały,

że dla niektórych analizatorów WNZ poziom szumów w układzie pomiarowym po odłączeniu uziemienia z przewodu zasilającego maleje kilkukrotnie. Zakłócenia przenoszą się również bezpośrednio przez przewody zasilające i można je zmniejszyć, stosując laboratoryjne filtry WCz. Mimo że oferowane filtry laboratoryjne posiadają tłumienie 100 dB (dane producenta)

w całym zakresie częstotliwości pomiaru WNZ, to często nie dają pełnej separacji od zakłóceń w układzie zasilania. Kolejnym sposobem eliminacji szumów jest tzw. okienkowanie i bramkowanie sprzętowe, polegające na usuwaniu danych będących zakłóceniami. Dzięki okienkowaniu można usunąć wszystkie wyładowania znajdujące się w pewnym obszarze na wykresie fazowo rozdzielczym WNZ. W tym przypadku usuwane są również wyładowania będące obiektem pomiaru. Metoda ta jest skuteczna dla wyładowań cyklicznie powtarzających się, jak np. WNZ pochodzące od przekształtników tyrystorowych (rys. 1). Bramkowanie pozwala odjąć od zmierzonych wyładowań WNZ mierzone zewnętrznym dodatkowym czujnikiem. Czujnik, którym może być przekładnik prądowy WCz lub czujnik antenowy [5, 9], umieszczony jest blisko źródła zakłóceń, np. w pobliżu przetwornicy lub na przewodzie uziemiającym. Odpowiednie dobranie wzmocnienia oraz poziomu sygnału kanału umożliwia dobrą eliminację zakłóceń bez utraty danych związanymi z WNZ badanego obiektu.

3. Badania laboratoryjne

Bazując na pomiarach WNZ, można określić nie tylko stopień zdegradowania układu izolacyjnego, ale również źródło ich występowania. Rozmieszczenie impulsów na wykresie oraz ich parametry są ściśle przyporządkowane do ich źródeł [9]. W oparciu o statystyczne zależności, takie jak:

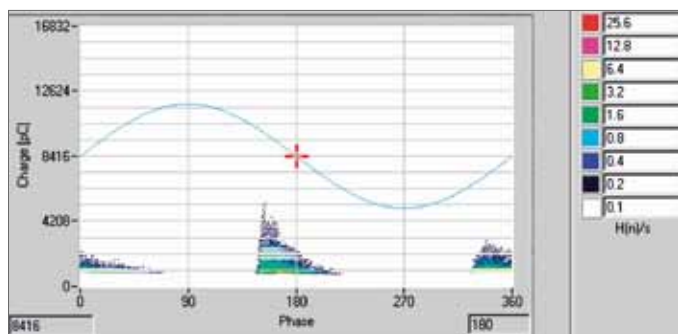
- współczynnik asymetrii ładunku;
- współczynnik skrośności;
- kurtoza;
- współczynnik korelacji wzajemnej,

można budować modele matematyczne defektów. Fingerprint, czyli „odcisk palca” defektu może służyć do jego identyfikacji [2, 9]. Do tego jednak niezbędna jest także obszerna baza danych wad, jak również wzorce typowych defektów. Część wzorców WNZ stworzono, budując proste modele laboratoryjne, jak np. układ pomiarowy WNZ typu ostrze – płyta, część wzorców stworzono zaś w oparciu o przyporządkowanie obrazu WNZ do znanego defektu próbki pomiarowej. Z pomiarów WNZ koronowych można jednoznacznie określić miejsce występowania wyładowań. W przypadku, kiedy ostrze układu pomiarowego podłączone jest do wysokiego napięcia, a płyta do masy, impulsy wyładowań koncentrują się w trzeciej ćwiartce sinusoidy napięcia zasilania (rys. 3).

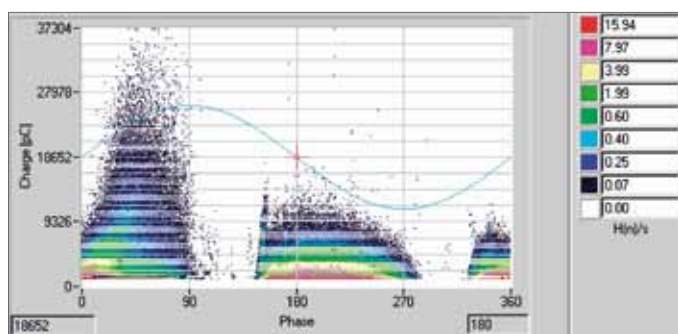
W przypadku, gdy ostrze układu pomiarowego jest połączone z masą, a płyta z wysokim napięciem, WNZ koncentrują się w pierwszej ćwiartce sinusoidy napięcia zasilania (rys. 4). Bazując na tych dwóch prostych modelach, można często określić, czy źródłem wyładowań koronowych jest uszkodzona wewnętrzna ochrona przeciwjarzeniowa pręta, czy też występują one w przestrzeni pomiędzy rdzeniem a uzwojeniem stojana.

Rozwarstwienie izolacji, czyli tzw. lokalne „pustki” pręta stojana generatora, objawia się symetrycznym rozkładem WNZ w dodatniej i ujemnej części sinusoidy przy jednoczesnej koncentracji amplitudy w fazie napięcia 0° i 180° (rys. 5). Defekt ten potwierdzono mechanicznym brakiem ciągłości izolacji w pewnej powierzchni. Przy pomocy przenośnego detektora wyładowań stwierdzono również występowanie w tym miejscu WNZ.

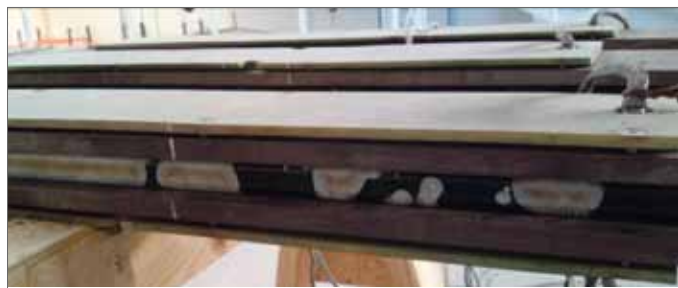
Na chwilę obecną nadal nie ma norm ani wytycznych odnośnie do dopuszczalnych poziomów WNZ dla uzwojeń wysokonapięciowych maszyn. Dla nowo produkowanych prętów w zakła-



Rys. 8. Wynik badania podczas próby starzeniowej po 10 dniach starzenia; $T = 120^{\circ}\text{C}$



Rys. 9. Wynik badania podczas próby starzeniowej po 40 dniach starzenia; $T = 120^{\circ}\text{C}$



Rys. 10. Uszkodzona warstwa półprzewodząca pręta generatora podczas próby starzeniowej izolacji



Rys. 11. Uszkodzona warstwa półprzewodząca pręta turbogeneratora 150 MW

dzie TurboCare Poland SA głównym kryterium oceny jakości metodą pomiaru WNZ jest brak występowania wyładowań poniżej napięcia znamionowego pręta. Dodatkowym kryterium jest maksymalny ładunek pozorny WNZ, mierzony w trybie

analitycznym przy wartości napięcia $U = 1,5 U_N$. Wartość ta zależy od rodzaju uzwojenia i jest każdorazowo ustalana [4]. W pomiarach maszyn będących w eksploatacji firmy diagnostyczne ustalają swoje wartości niebezpiecznych poziomów WNZ w oparciu o doświadczenie z podobnymi jednostkami oraz z uwagi na parametry występujących wyładowań. Znaną jest „krzywa czasu życia” układu izolacyjnego maszyny przedstawiona na rys. 6 [2]. Krzywą tę charakteryzują odcinki AB – kiedy to WNZ spadają w czasie. Związane jest to m.in. z właściwym utwardzeniem się całego układu izolacyjnego. Prosta BC – kiedy procesy starzeniowe są praktycznie niezauważalne. Krzywa CD – naturalne pogorszenia właściwości izolacyjnych. Krzywa DE – przyspieszony proces degradacji, po którym ładunek maksymalny oraz energia WNZ maleją, gdyż w inkluzjach gazowych, w których występowały wyładowania, na skutek zwęglenia powstały ścieżki przewodzące, a tym samym WNZ w tym miejscu przekształciło się w ciągły prąd upływu izolacji. W punkcie F izolacja nie ma już dostatecznej wytrzymałości elektrycznej i następuje jej przebicie. Istotne jest, aby podczas pomiaru maszyny określić możliwe źródła WNZ, ponieważ niektóre defekty izolacji skutkujące WZN można usunąć bądź też zmniejszyć ich skutki. Podstawowymi zabiegami, które mogą przyczynić się do zmniejszenia WNZ, są czyszczenie uzwojeń oraz poprawa ich zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej oraz suszenie izolacji. Jeżeli we właściwym czasie podjęta zostanie decyzja o remoncie maszyny – np. w pkt. G, to istnieje duże prawdopodobieństwo przeskoku z pkt. G do pkt. H – a tym samym wydłużenia czasu życia maszyny [2, 9].

W zakładzie TurboCare Poland SA wykonano stanowisko do przeprowadzania przyspieszonej próby starzenia izolacji prętów turbogeneratorów. Obiektem badań jest pręt generatora o mocy 350 MW na napięcie 18 kV z wadą typu „pustki w izolacji”. Zgodnie z normą [3] napięcie testu wynosi $U \approx 2,17 \cdot U_N$, dodatkowo pręt utrzymywany jest w temperaturze $T = 120^{\circ}\text{C}$. Okresowo wykonywane są pomiary WNZ celem obserwacji trendu zmian ich parametrów. Pierwszy pomiar wykonano w temperaturze $T = 20^{\circ}\text{C}$ (rys. 5), następnie za pomocą grzałek zwiększono temperaturę próbki do poziomu $T = 120^{\circ}\text{C}$. Zauważono ujemną zależność wpływu temperatury na poziom WNZ (rys. 6).

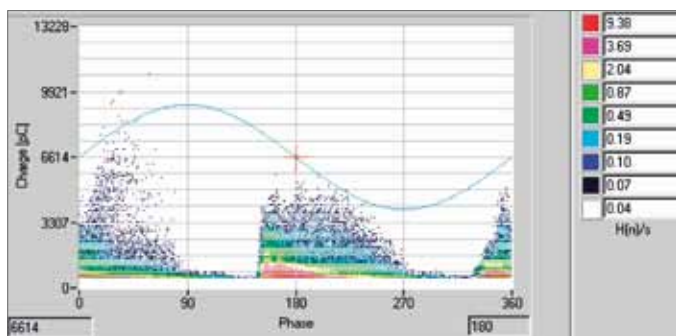
W kolejnych dniach zauważono postępujący wzrost WNZ przy czym ich charakter dalej wskazywał na defekt typu „pustki w izolacji” (rys. 8).

Po 40 dniach próby zauważono pojawienie się wyładowań koronowych w pierwszej ćwiartce sinusoidy napięcia zasilania (rys. 9). Wyładowania koronowe charakteryzują się impulsami o dużych wartościach, jednak o małej powtarzalności. W oparciu o wcześniejsze badania WNZ koronowych można stwierdzić, że wyładowania występują blisko punktu uziemienia.

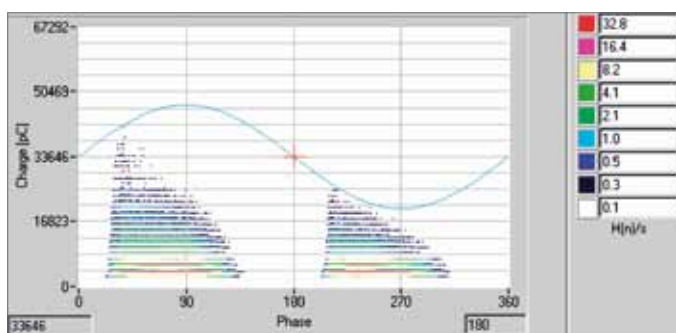
Po oględzinach pręta stwierdzono uszkodzenie zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej (rys. 10). Defekty tego typu można często zaobserwować w generatorach z luźno zamontowanym uzwojeniem w żłobku (rys. 11).

Dokonano naprawy powłoki poprzez nałożenie warstwy lakiery przewodzącego żłobkowego. Ponowne pomiary WNZ wykazały znaczne zmniejszenie intensywności WNZ. Wykonana poprawa parametrów układu elektroizolacyjnego pozwoliła przejść z pkt. G rysunku. 6 do pkt. H, a tym samym wydłużyć „czas życia” pręta. Wyniki pomiarów pokazano na rys. 12.

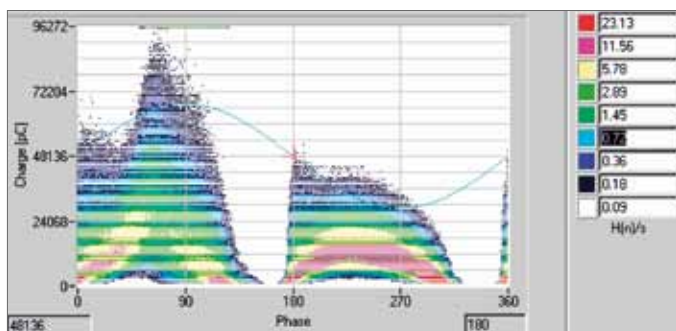
Po 80 dniach starzenia próbki poziom WNZ znacznie wzrósł przy zachowaniu obrazu wyładowań charakterystycznego dla



Rys. 12. Wynik badania podczas próby starzeniowej po 42 dniach starzenia; T = 120°C



Rys. 13. Wynik badania podczas próby starzeniowej po 80 dniach starzenia; T = 120°C



Rys. 14. Wynik badania podczas próby starzeniowej po 130 dniach starzenia; T = 120°C

defektu typu „pustki w izolacji” (rys. 13). Świadczy to o przyspieszonym procesie degradacji izolacji.

Kolejne pomiary po 130 dniach potwierdzają przyspieszony proces degradacji (rys. 14), dodatkowo zauważono kolejne pogorszenie się kondycji zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej.

Aktualnie próba starzeniowa wciąż trwa, obserwowany jest ciągły wzrost poziomu WNZ.

4. Wnioski

WNZ są symptomem starzenia się izolacji wysokonapięciowych maszyn wirujących. Z doświadczenia wynika, że WNZ pojawiają się znacznie wcześniej niż awaria maszyny [6]. W artykule udowodniono, że okresowe badania diagnostyczne maszyn pozwalają wykryć wady we wczesnym stadium ich rozwoju. Niektóre z defektów można usunąć lub zminimalizować ich skutki, co ma bezpośrednie przełożenie na „długość życia” maszyny. Konieczne są badania mające na celu określenie bezpiecznych poziomów WNZ dla układów izolacyjnych wysoko-

napięciowych maszyn wirujących. Do poprawnej identyfikacji defektów niezbędna jest ekspercka baza danych, jak i doświadczenie w interpretacji wyników pomiarów. Zakłócenia nie powinny być obiektem pomiaru i powinny być one wyeliminowane. W eliminacji zakłóceń najważniejsze jest prawidłowe rozpoznanie i ich skuteczna eliminacja poprzez zastosowanie metod opisanych w artykule.

Artykuł napisano w ramach realizacji projektu badawczego własnego Nr N N510 536639 „Czujniki do pomiarów *off-line* i *on-line* wylądowań niezupełnych w silnikach elektrycznych oraz system kalibracji torów pomiarowych”. Projekt finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] FLORKOWSKA B.: *Diagnostyka wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych*. Wyd. AGH, Kraków 2009.
- [2] FLORKOWSKA B., MOSKWA S., NOWAK W., WŁODEK R., ZYDRON P.: *Modelowanie procedur diagnostycznych w eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. UWNT AGH, Kraków 2006.
- [3] IEEE Std. 1043-1996 - *IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils*.
- [4] JASIŃSKI J., KACZMARCZYK J., KANDORA W., SZYMKÓW A.: *Możliwości pomiarowe TurboCare Poland SA*. XVII Konferencja Energetyki Jachranka 2011.
- [5] KANDORA W.: *Przekładniki prądowe częstotliwości radiowych jako czujniki do pomiaru wylądowań niezupełnych*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 91/2011.
- [6] LECHOWSKI Ż.: *Narażenia uzwojeń stojanów generatorów dużej mocy*. PWN, Warszawa 1982.
- [7] LEMKE E.: *Guide for partial discharge measurement in compliance to IEC 60270 Std*. CIGRE technical brochure WG D1.33 Dec. 2008.
- [8] SZYMANIEC S.: *Czujniki i przyrządy do pomiarów wylądowań niezupełnych maszyn elektrycznych*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 85/2010.
- [9] SZYMANIEC S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z. 193, Wyd. Poltech. Opolskiej, Opole 2006.

dr inż. Wojciech Kandora – TurboCare Poland SA,
www.turbocare.pl, e-mail: wojciech.kandora@turbocare.pl

artykuł recenzowany

reklama