

## Diagnostyka układu izolacyjnego stojana generatora

Autor:

mgr inż. Ireneusz Hasiiec, ZPBE ENERGOPOMIAR-ELEKTRYKA Sp. z o.o. Gliwice

Artykuł został opublikowany w magazynie "Energetyka Ciepła i Zawodowa" nr 11/2010



**Generatory ze względu na swoje znaczenie są w energetyce obiektami strategicznymi.**

**Ewentualne straty związane z awarią są zawsze ogromne. Obok bieżącej kontroli stanu technicznego konieczne staje się wykonywanie regularnych przeglądów wirnika, jak i stojana, co wiąże się z czasowym, planowym wyłączeniem generatora z ruchu (red. ECiZ).**

W diagnostyce maszyn wirujących zasadniczą rolę odgrywają badania stanu izolacji.

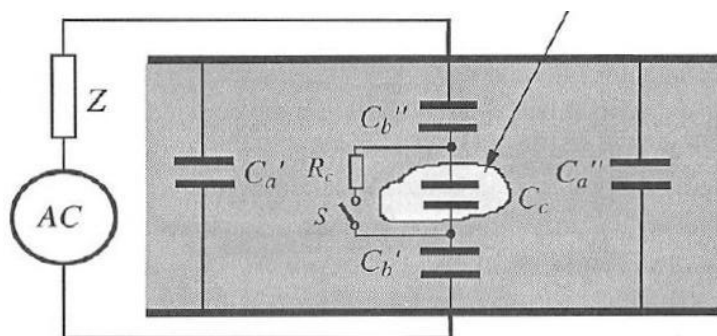
### WNZ w układzie izolacyjnym

Układ izolacyjny uzwojeń twornika generatora synchronicznego obejmuje wysokonapięciową izolację przewodów elementarnych oraz izolację główną. Parametrem pierwszorzędym jest tu szeroko rozumiana jednorodność izolacji, której zaburzenia są źródłem szkodliwych wyładowań niezupełnych tzw. wnz (ang. partial discharge). Różne, zaawansowane technologicznie elementy izolacji podlegają wielkim napięciom elektrycznym dochodzącym lokalnie do 10 kV/mm (w zależności od napięcia znamionowego generatora i konkretnych rozwiązań technicznych). Tak wielkie wartości natężenia pola elektrycznego inicjują różnorakie zjawiska fizyczne i fizykochemiczne wewnątrz struktury dielektryka, którym jest każda izolacja.

Za autorami pozycji [1] można przytoczyć definicję: „Wyładowanie niezupełne jest lokalnym wyładowaniem elektrycznym, które odbywa się tylko w części układu elektroizolacyjnego i nie powoduje bezpośrednio utraty przez układ własności izolacyjnych. Natomiast długotrwałe działanie wyładowań niezupełnych prowadzi poprzez mikro- i makroskopowe zmiany w strukturze układów do wyładowania zupełnego (czyli przebicia izolacji)”. Zaawansowanie procesów wzn w dielektryku jest więc ważnym kryterium oceny stanu izolacji badanego obiektu.

### Pomiar wnz

Niestety, pomiar wyładowań niezupełnych jest zadaniem trudnym. Nie da się bezpośrednio pomierzyć reprezentatywnych wielkości fizycznych wnz (w tym wypadku ładunku rzeczywistego  $q_r$  lub energii wyładowań  $w_r$ ). Stosując metodę obwodów zastępczych, przybliża się główny parametr fizyczny - ładunek rzeczywisty  $q_r$  ładunkiem pozornym  $q_p$ . Dla zobrazowania mechanizmu wyładowań niezupełnych przedstawiono to zjawisko w układzie izolacyjnym z inkluzją gazową jako źródłem wnz [1].



Rys.1. Schemat zastępczy układu izolacyjnego z wnz (inkluzja gazowa)

- $C_a, C_a''$  – pojemności składowe równoległe do pojemności źródła
- $C_b, C_b''$  – pojemności składowe szeregowo do pojemności źródła
- $R_c$  – zastępcza rezystancja kanału wyładowań w jego źródle
- $S$  – łącznik sterowany wartością pola elektrycznego w źródle wyładowań
- $Z$  – impedancja zastępcza
- AC – źródło napięcia probierczego

Zakłada się, że  $C_a \gg C_c \gg C_b$  ( $C_a$  i  $C_b$  są wypadkowymi pojemnościami odpowiednio:  $C_a'$  i  $C_a''$  oraz  $C_b'$  i  $C_b''$ ). Wyładowanie niezupełne symbolizuje zwarcie łącznika  $S$ ; wystąpi ono po osiągnięciu odpowiedniej wartości natężenia pola elektrycznego w inkluzji, jako krótkotrwały impuls  $i_c$  prądu rozładowania pojemności  $C_c$  poprzez rezystancję  $R_c$ .

Po nieskomplikowanej analizie układu z rys.1 otrzymuje się praktyczną zależność opisującą mierzony w zewnętrznym układzie pomiarowym ładunek pozorny  $q_p$ :

$$q_p \cong (C_a + C_b) \cdot \Delta U$$

### Kalibracja ładunkiem

Wartości tej nie da się jednak wyznaczyć, bowiem nie znamy pojemności  $C_a$  i  $C_b$ . Istotą sprawy jest tu natomiast liniowa zależność  $q_p$  od spadku napięcia  $\Delta U$  w zewnętrznym układzie pomiarowym, co pozwala na wprowadzenie współczynnika proporcjonalności, wyznaczanego każdorazowo dla badanego obiektu (np. fazy uzwojenia stojana, która posiada swoje własne pojemności  $C_a$  i  $C_b$ ). Czynność ta nazywa się kalibracją ładunkiem. Wykonuje się ją za pomocą kalibratora, który podaje na układ pojemnościowy badanego obiektu impuls rozładowania dokładnie określonego ładunku pozornego. Odpowiedź mierzonego układu jest zapamiętywana przez detektor wnz i służy do prawidłowego skalowania wartości ładunków pozornych wyładowań niezupełnych, rejestrowanych podczas zasadniczej próby napięciowej.

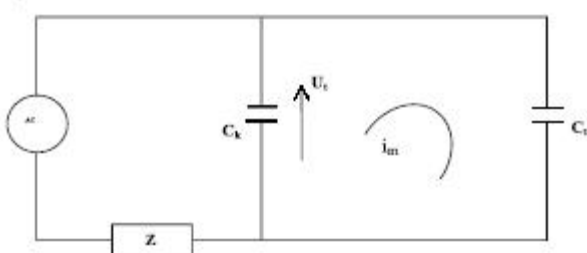
Kolejnym problemem jest detekcja słabych sygnałów prądowych pojedynczych wyładowań niezupełnych – spadek napięcia  $\Delta U$  na badanym obiekcie jest trzy do pięciu rzędów wielkości niższy od napięcia próby

$$\frac{\Delta U}{U} \approx 10^{-3} \div 10^{-5}$$

Ponadto czas trwania impulsu wnz wynosi tylko  $10^{-9}$  do  $10^{-6}$  sekundy. Podstawowa metoda detekcji ładunku pozornego polega na wykorzystaniu szerokiego pasma widma generowanego przez pojedyncze impulsy wyładowań (górną granicę do 1500 kHz) i scałkowaniu ich sygnałów prądowych po czasie. W ogólności:

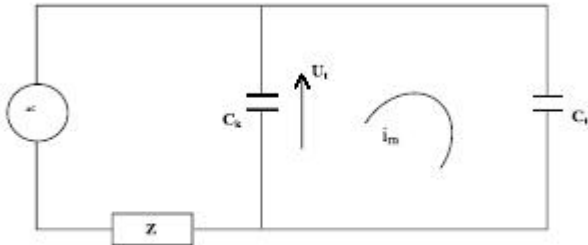
$$q_p = \int i(t) dt$$

Obowiązuje tu zasada: im krótszy czas narastania i trwania impulsu, tym szersze widmo.



Rys. 2. Schemat zastępczy badanego układu

- $C_t$  – pojemność obiektu badanego
- $C_k$  – pojemność kondensatora sprzęgającego
- $Z$  – impedancja zastępcza
- AC – źródło napięcia probierczego
- $i_m$  – mierzony prąd wyładowania
- $C_k \gg C_t$



Rys. 3. Schemat zastępczy układu pomiarowego

- $C_t$  – pojemność obiektu badanego
- $C_k$  – pojemność kondensatora sprzęgającego
- $Z_m$  – impedancja pomiarowa
- AC – źródło napięcia probierczego

Czułość pomiaru wnz zależy od pojemności kondensatora sprzęgającego  $C_k$ . Autor tego opracowania używa kondensatora o pojemności 1000 pF. Jeśli chodzi o impedancję pomiarową  $Z_m$ , to stanowi ona obwód rezonansowy RLC równoległy. Na wejściu wzmacniacza detektora impuls prądowy  $i(t)$  o charakterze impulsu Diraca zamienia się na napięciowy  $u(t)$ , który można przedstawić wzorem ogólnym:

$$u(t) = \frac{q_p}{C} \cdot e^{-\alpha t} \left[ \cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right]$$

gdzie:

- $q_p$  – ładunek pozorny impulsu wnz
- $\alpha$  – współczynnik tłumienia obwodu  
równy  $\frac{1}{2RC}$
- $\omega$  – pulsacja drgań własnych obwodu RLC

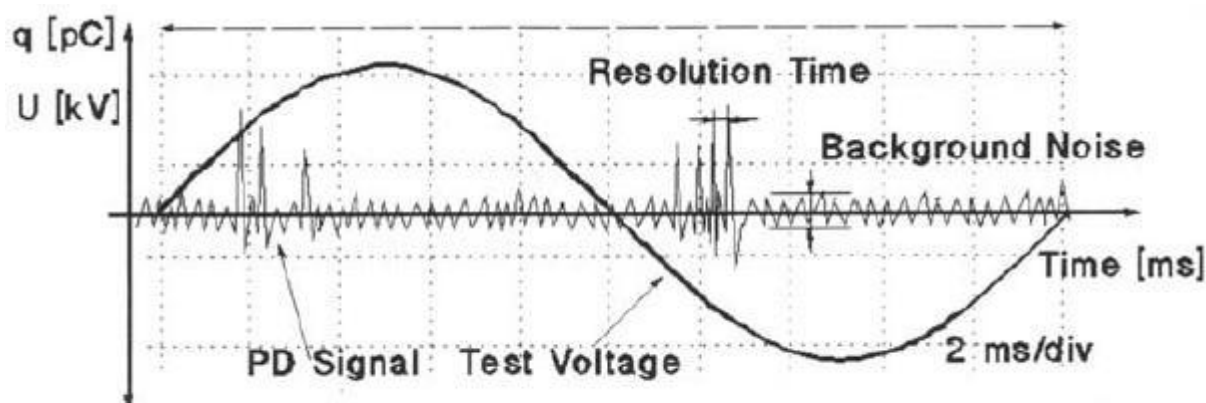
$$u(t) = \frac{q_p}{C} \cdot e^{-\alpha t} \left[ \cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right]$$

gdzie:

- $q_p$  – ładunek pozorny impulsu wnz
- $\alpha$  – współczynnik tłumienia obwodu  
równy  $\frac{1}{2RC}$
- $\omega$  – pulsacja drgań własnych obwodu RLC

Istotną cechą tej zależności (która może przybierać prostsze formy w zależności od konfiguracji parametrów RLC) jest proporcjonalność do wartości rejestrowanego ładunku pozornego  $q_p$ .

Nowoczesne, cyfrowe mierniki wnz posiadają możliwość dopasowania swojej detekcji do parametrów badanych obwodów. Realizuje się to poprzez wybór najlepszej rozdzielczości dla przychodzących sygnałów (tzw. resolution time) oraz określenie progu odcięcia szumów tła (tzw. background noise) [4].



Rys. 4. Impulsy wyładowań niepełnych na tle przebiegu napięcia probierczego

### Aspekty praktyczne

W dalszej części artykułu odniosę się do praktycznych aspektów zagadnienia, bazując na doświadczeniu pomiarów przeprowadzanych na stojanach turbo- i hydrogeneratorów w wielu elektrowniach i elektrociepłowniach na terenie kraju.

Zasadniczo istnieją dwie metody rejestracji wyładowań niepełnych dla obiektów ruchu elektrycznego, takich jak np. generatory. Metoda on-line, czyli stałego monitoringu rozwoju wnz wymaga odpowiedniego przygotowania obiektu przed uruchomieniem (wybór i instalacja czujników) oraz wiąże się z koniecznością pokonania trudności z transmisją i zapisem danych. W energetyce polskiej stosuje się prawie wyłącznie metodę off-line, czyli pomiarów i rejestracji wnz podczas postoju maszyny, najczęściej w powiązaniu z innymi próbami przed i/lub po remoncie stojana.

Metoda off-line (opisana w PN-EN 60270) daje możliwość pomiaru ładunku pozornego wyładowań niepełnych będących następstwem typowych defektów izolacji [3]:

#### 1. w układzie wewnętrznym:

- szczeliny i jamki powstałe podczas produkcji izolacji uzwojenia, np. zły materiał (technologia RESIN RICH) lub złe przesycenie żywicą (VPI),
- rozwarstwienia i pęknięcia izolacji powstałe w wyniku eksploatacyjnych naprężeń termoelektrycznych, elektrodynamicznych i mechanicznych,
- rozwarstwienia na styku miedź – izolacja główna: szczeliny na przepłotach Roebła, nieefektywna wewnętrzna ochrona przeciwjarzeniowa.

#### 2. w układzie zewnętrznym:

- wyładowania żłobkowe: nieskuteczna ochrona przeciwjarzeniowa na prętach lub szczeliny pomiędzy żelazem rdzenia a prętami (brak wypełnienia spoiwem przewodzącym),
- wyładowania powierzchniowe na połączeniach czołowych pomiędzy warstwami uzwojenia i na rozdzielaczach faz (wyprowadzenia ze żłobków),
- wyładowania powodowane występowaniem dużych natężeń pola elektrycznego w pobliżu części metalowych uziemionych lub pozostających na wolnym potencjale.

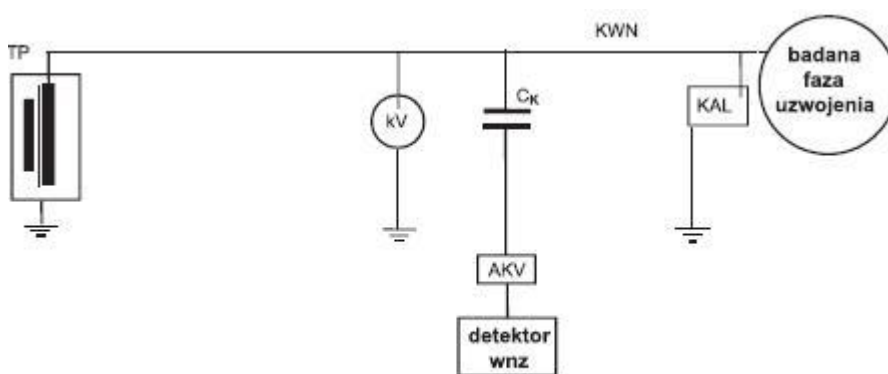
Uzwojenia stojanów dużych generatorów energetycznych są łączone w gwiazdę, a izolacja zacisku neutralnego jest taka sama jak zacisków fazowych.

Badania wyładowań niepełnych przeprowadza się przy rozłączonych uzwojeniach zarówno od strony wyprowadzeń mocy HV, jak i od strony punktu neutralnego LV. Próba polega na podaniu napięcia probierczego

na uzwojenia stojana – osobno dla każdej fazy. Pomiary wykonuje się podłączając aparaturę od strony HV, a jeśli to wskazane, także od strony LV uzwojeń (ze względu na możliwe zjawisko tłumienia sygnału wnz wzdłuż uzwojenia).

Wartość napięcia probierczego ustala się w zależności od tego, czy mamy do czynienia z generatorem nowym (1,2 wartości międzyfazowego napięcia znamionowego  $U_n$ ) czy będącym już w eksploatacji (najczęściej 1,0  $U_n$ ). Zasadnym jest wykonywanie rejestracji wnz także przy innych napięciach probierczych, np. 0,6  $U_n$ . Należy pamiętać, że podczas próby napięciem doprowadzonym (tylko takie można podać stosując metodę off-line) wszystkie segmenty uzwojeń i izolacji traktowane są równym potencjałem, w przeciwieństwie do normalnego stanu pracy generatora, gdzie wielkość indukowanego w uzwojeniach stojana napięcia zależy od odległości danej sekcji od punktu gwiazdowego. Tak więc nie wszystkie defekty izolacji są równie groźne, te zlokalizowane bliżej punktu neutralnego mogą nie powodować występowania zjawiska wyładowań niezupełnych – chociaż w próbach wnz zostaną zdemaskowane.

Poniżej przedstawiono typowy układ pomiarowy dla jednej fazy (uzwojenia pozostałych faz są uziemione).



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego wnz

- $C_k$  – kondensator sprzęgający wolny od wyładowań niezupełnych własnych
- AKV – czwornik (impedancja pomiarowa)
- KAL – kalibrator
- kV – kilowoltomierz
- KWN – kabel wysokonapięciowy
- TP – transformator probierczy

Podczas próby napięciowej aparatura rejestruje różnorodne parametry wyładowań niezupełnych, z których najistotniejsze to:

- $q_{max}(t)$  – ładunek pozorny maksymalny w funkcji czasu rejestracji,
- $w_{max}(t)$  – energia wyładowań niezupełnych w funkcji czasu rejestracji,
- $D(t)$  – parametr kwadratowy w funkcji czasu rejestracji,
- $H_n(\varphi, q)$  – rozkład liczbowy wyładowań wg kąta fazowego i  $q_{max}$ ,
- $H(q)$  – rozkład liczbowy wyładowań wg  $q_{max}$ .

W praktyce pomiarowej stosuje się dwa sposoby rejestracji danych:

- pomiary standardowe (routine mode),
- pomiary analityczne (analyse mode).



Fot. 1. Stojan generatora po wyjęciu wirnika



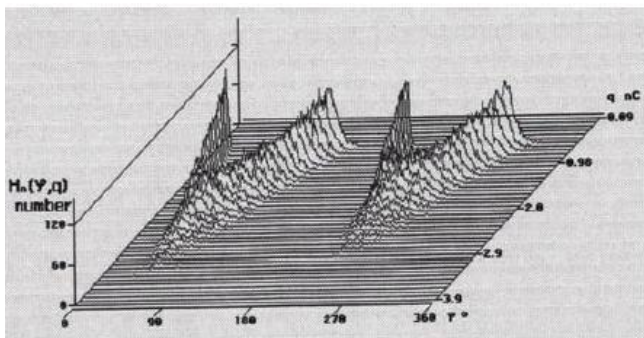
Fot. 2. Skutki wyładowań powierzchniowych

W przypadku pomiarów standardowych notuje się mniej danych niż przy pomiarach analitycznych; wykonuje się je głównie dla wyznaczenia tzw. krzywej  $q-v$  zależności ładunku pozornego od napięcia próby  $q = f(U)$ . Aby otrzymać taką krzywą, należy jednostajnie podnosić napięcie do wartości maksymalnej próby, a następnie obniżać je do zera. Na podstawie przebiegu  $q-v$  określa się napięcie początkowe  $w_{nz} U_i$  (tj. napięcie, przy którym zaczynają pojawiać się istotne poziomy ładunku pozornego  $q$ ), napięcie gaśnięcia  $w_{nz} U_e$  (tj. napięcie, przy którym zanikają wyładowania niezupełne) oraz ładunek maksymalny  $Q_{max}$ , który zazwyczaj pojawia się w okolicach najwyższego napięcia probierczego.

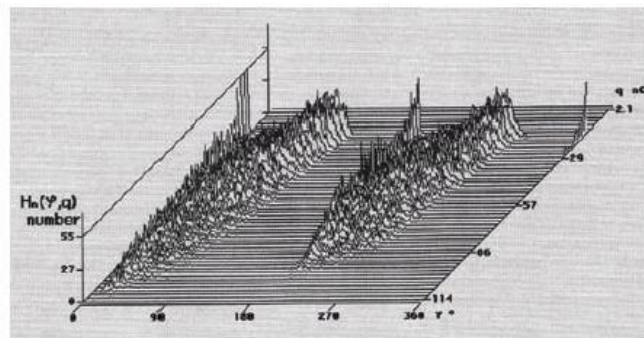
Powyżej przedstawiono przykłady wydruków otrzymanych z detektora  $w_{nz}$  typu Haefely TE-571 podczas pomiarów izolacji stojana na bloku w jednej z elektrowni na południu Polski.

Powyższe przebiegi zanotowano w trakcie pomiarów jednej fazy uzwojeń tego samego stojana. Aplikowano dwa napięcia probiercze, które różniły się od siebie blisko o połowę. Efekty widać przy porównaniu rys.6 i rys.7 – poziomy mierzonych ładunków pozornych  $q_{max}$  różnią się aż trzydziestokrotnie.

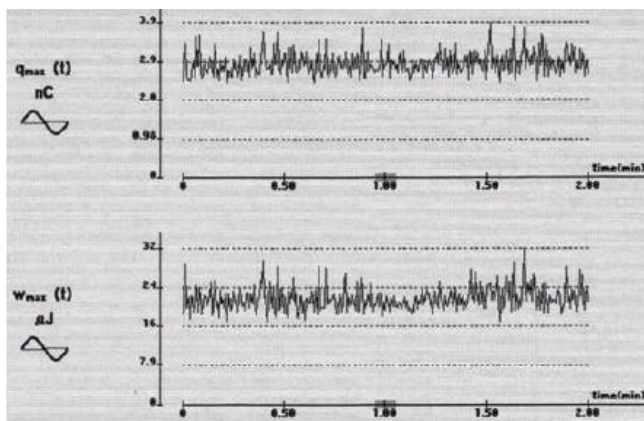
Podstawowym wynikiem pomiarów  $w_{nz}$  jest górny pułap przebiegu ładunku pozornego  $q_{max}(t)$  w trakcie pomiaru analitycznego (min. 120 s), przy czym pojedyncze, najwyższe piki nie powinny być brane pod uwagę.



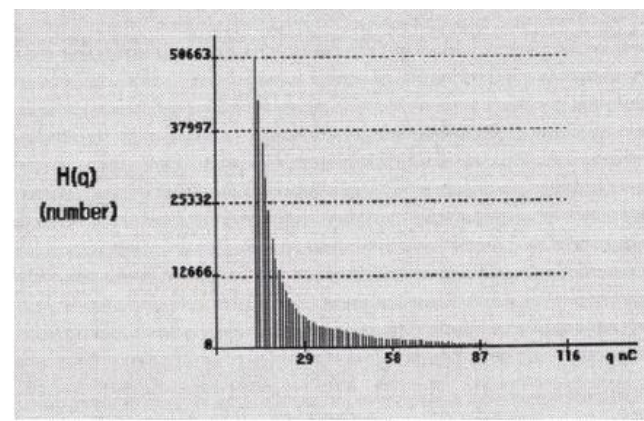
Rys. 6. Rozkład liczbowy wg kąta fazowego i  $q_{max}$ . Wartości ładunku pozornego do 3,9 nC



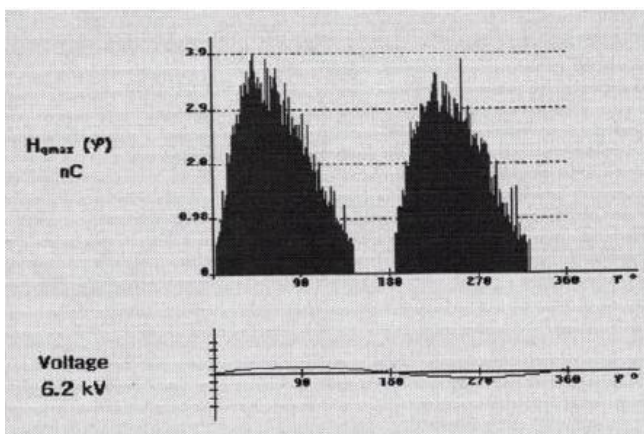
Rys. 7. Rozkład liczbowy wg kąta fazowego i  $q_{max}$ . Wartości ładunku pozornego powyżej 100 nC



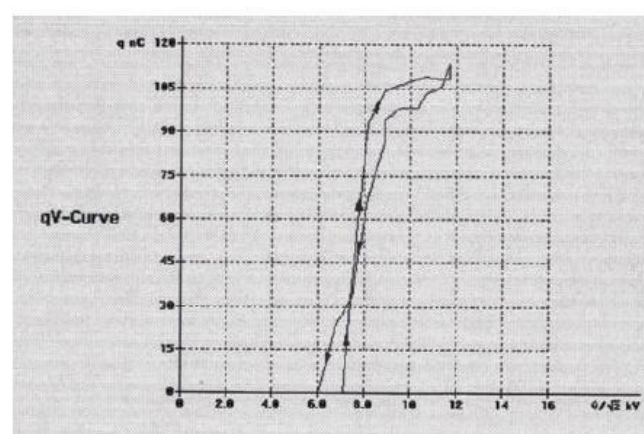
Rys. 8. Przebiegi czasowe  $q_{max}(t)$  i  $w_{max}(t)$



Rys. 9. Rozkład liczbowy wyładowań wg  $q_{max}$



Rys. 10. Rozkład  $q_{max}$  wg kąta fazowego



Rys.11. Krzywa q-v.  $U_1 \cong 7$  kV,  $U_0 \cong 6$  kV

W szerszej ocenie uwzględnia się także inne parametry wnz, co wielokrotnie pozwala określić rodzaj i miejsce występujących wyładowań niezupełnych – szczególnie w przypadku posiadania bogatej bazy wyników i przebiegów uzyskanych z poprzednich pomiarów. Specjalne oprogramowanie wyznacza statystyczne podobieństwo uzyskanych parametrów wnz do zdefiniowanych wcześniej przypadków.

Jak na razie żadna norma nie podaje wartości granicznych ładunku pozornego wyładowań niezupełnych, których przekroczenie dyskwalifikowałoby izolację badanej fazy stojana. Przyjmuje się, że przekroczenie pułapu 50 - 60 nC świadczy o zaawansowanym stadium degradacji izolacji stojana, a w przypadku nowego generatora o poważnych wadach w procesie produkcji i montażu uzwojeń i/lub izolacji.

Nie mniej istotnym a nawet ważniejszym czynnikiem jest śledzenie trendu zmian parametrów wnz uzyskiwanych w trakcie badań powtarzanych na tym samym generatorze po upływie jakiegoś czasu (np. co 2 lata).

Rzetelna ocena stanu technicznego izolacji stojana potrzebna jest zarówno producentowi maszyny – w celu upewnienia się co do niezawodności działania w okresie gwarancyjnym, jak i właścicielowi – w celu prognozowania bezpiecznej pracy i planowania remontów bądź wymiany generatora. Rozwijające się techniki pomiarów i analizy zjawiska wyładowań niezupełnych należą w tym względzie do najcenniejszych narzędzi diagnostycznych.

## Normy nic nie mówią

Jak na razie żadna norma nie podaje wartości granicznych ładunku pozomego wyładowań niezupełnych, których przekroczenie dyskwalifikowałoby izolację badanej fazy stojana. Przyjmuje się, że przekroczenie pułapu 50 - 60 nC świadczy o zaawansowanym stadium degradacji izolacji stojana, a w przypadku nowego generatora o poważnych wadach w procesie produkcji i montażu uzwojeń i/lub izolacji.

### LITERATURA

- [1] B. Florkowska, M. Florkowski, R. Włodek, P. Zydrón: „Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia”.
- [2] T. Glinka, A. Polak: „Monitorowanie stanu technicznego układu izolacyjnego generatorów synchronicznych”.
- [3] Praca zbiorowa wydana przez Energopomiar – Elektryka: Ramowa Instrukcja Eksploatacji Generatorów Synchronicznych.
- [4] Haefely Trench Tettex Instruments: Operating Instructions TE-571.
- [5] Polska Norma PN-EN 60270: Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiary wyładowań niezupełnych.