

**Jan Subocz, Instytut Elektrotechniki, Szczecin**

**Marek Szrot, Janusz Płowucha, Energo-Complex Sp. z o.o., Chorzów**

## **NOWOCZESNE METODY DIAGNOSTYKI IZOLACJI SILNIKÓW I GENERATORÓW WN**

### **CONTEMPORARY DIAGNOSTIC METHODS OF HV ROTATING MACHINE INSULATION**

**Abstract:** This paper presents degradation mechanism of epoxy-mica-glass insulation and influence of service conditions on kinetics of this mechanism. But the most important factor here is production quality. Basics of dielectric spectroscopy in time and frequency domain were described and application of this method for estimation of HV insulation condition. Research conducted on insulation models showed that good indicators of insulation condition are value of charge and time of relaxation in low frequencies range. There was given an example of FDS measurements application for estimation of quality of technology in postproduction tests. Other examples showed classification of HV motors and generators insulation with various periods of service based on FDS method and voltage ramp test. Relaxation processes analysis in low frequencies domain in epoxy-mica-glass insulation has corroborated high conformity of laboratory measurement results of insulation samples with service tests of HV motors. This method is very accurate and allows to identify defective production technology and insulation aged in service.

#### **1. Wstęp**

Wykorzystanie zjawiska relaksacji dielektrycznej do oceny stanu izolacji maszyn elektrycznych oraz procesów starzeniowych w czasie jej eksploatacji ma miejsce praktycznie od początków elektrotechniki. Jednak w ostatnim czasie, w związku z rozwojem teorii relaksacji, technik pomiarowych oraz technologii wykonania izolacji, obserwuje się duży postęp w stosowaniu dynamicznych pomiarów zjawisk relaksacyjnych w nowoczesnej diagnostyce izolacji. Szereg prac wskazuje na to, że tego rodzaju diagnostyka daje doskonałe rezultaty zwłaszcza w polimerach jednorodnych, np. w izolacji kablowej XLPE [1]. Natomiast w przypadku izolacji warstwowej, opartej przeważnie na zespole żywic epoksydowych i poliestrowych wzmocnionych różnego rodzaju matami, tkaninami lub włóknami oraz miką interpretacja procesów relaksacyjnych wiąże się z wieloma trudnościami, które wynikają głównie ze złożonej budowy układu [2,3,4]. Pomimo to współczesne metody analizy oraz ostatecznie osiągnięcia z zakresu fizyko-chemii procesów starzeniowych [4,5] stworzyły nową jakość w diagnostyce warstwowej izolacji silników i generatorów przy wykorzystaniu takich metod jak:

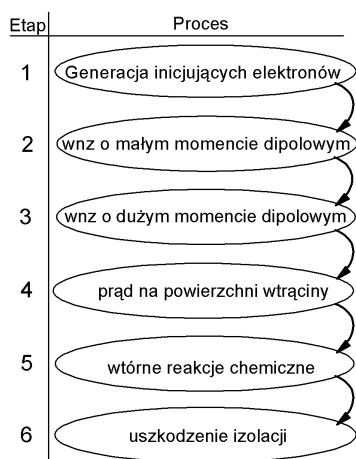
- pomiar izotermicznych prądów relaksacji (metoda PDC),
- pomiar napięcia powrotnego (metoda RMV),

- pomiar zespolonej stałej dielektrycznej w zakresie ultraniskich częstotliwości (metoda FDS),
- pomiar prądu absorpcji przy liniowej lub skokowej rampie napięciowej [6,7].

#### **2. Procesy starzeniowe w czasie eksploatacji izolacji**

Powszechnie stosowanym obecnie układem izolacyjnym w stojanach maszyn WN jest termoutwardzalny kompozyt typu „epoxy-mika-szkło”. Przeważnie jest on wykonywany metodą próżniowo-ciśnieniowej impregnacji (VPI), przy czym producenci stosują różne jej odmiany. Eksploatowane są także izolacje wyprodukowane metodą nakładania i przesycania kolejnych warstw. Decydujący wpływ na procesy starzenia takich układów mają naprężenia mechaniczne, wibracje oraz temperatura [1,2]. Powodują one rozwarstwienie kompozytu na granicy faz między żywicą a miką lub zbrojeniem, co w konsekwencji prowadzi do drzewienia elektrycznego oraz uszkodzenia izolacji. Rozwój drzewienia we wtrącinie na skutek elektro-termo-mechanicznego zespołu narażeń pokazano na rys.1. Utrata właściwości izolacyjnych z większą kinetyką zachodzi w kompozycie nieprawidłowo utwardzonym lub o osłabionej adhezji między żywicą a zbrojeniem. Wibracje i naprężenia mechaniczne zmieniają

strukturę układu przede wszystkim na drodze przekształceń fizycznych bez znaczących reakcji chemicznych. Przykładowo, może to być zmiana gęstości upakowania oraz rozrywanie istniejących w interfejsie wiązań adhezyjnych. Natomiast oddziaływanie temperatury wiąże się na ogół z dodatkowymi przemianami chemicznymi. Jednak w temperaturze niższej od temperatury zeszklenia żywicy ( $T_g$ ) dominującymi procesami są chemiczne reakcje dotwardzania oraz fizyczna relaksacja układu. Procesy rzeczywistego termicznego starzenia izolacji wymagają temperatury przekraczającej o kilkadziesiąt stopni punkt  $T_g$ . Dłuższe jej oddziaływanie stwarza warunki do delaminacji izolacji i rozwoju drzewienia elektrycznego. Stąd, dla żywotności izolacji maszyn WN sprawą niezwykle istotną jest zarówno odpowiednio niska temperatura eksploatacji jak również kontrola jakości technologii utwardzania kompozytu. Wydaje się przy tym, że ten drugi czynnik jest daleko ważniejszy niż warunki pracy maszyny.



Rys. 1. Model rozwoju drzewienia na granicy faz żywica-zbrojenie

Zachodzące podczas utwardzania, fizycznej relaksacji oraz starzenia przemiany morfologii izolacji koncentrują się głównie w obszarze granicy faz „zbrojenie – żywica epoksydowa”. Procesy te dokładniej zostały opisane w [1,2,3]. Zgodnie z ogólną zasadą Maxwella-Wagnera generują one przestrzenny ładunek elektryczny, co skutkować musi zmianami w naturze relaksacji dielektrycznej. Podobne zjawiska towarzyszą również chemicznym reakcjom utwardzania i dotwardzania, które zmieniają dielektryczne właściwości żywicy [3,4]. Jakościowa analiza natury procesów dielektrycznych w połączeniu z badaniami modelowymi i chemicz-

nymi są podstawą wnioskowania we wszystkich wspomnianych wyżej metodach pomiarowych.

### 3. Badania modelowe

#### 3.1. Podstawy teoretyczne

Zasadę oraz podstawy teoretyczne wykorzystania metody FDS w odniesieniu do izolacji kompozytowej podano w [3,8,9]. Polega ona na wyznaczeniu zmian pojemności  $C_{uz}$  oraz współczynnika strat  $\tan \delta$  uzwojeń w zakresie częstotliwości

0,1 mHz – 100 Hz. W analizie jakościowej wykorzystywane jest równanie Havriliaka-Negami, które opisuje relaksację dielektryczną m.in. w polimerach i ich kompozytach:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \frac{\Delta\varepsilon}{(1 + (\omega\tau)^\alpha)^\beta} + \varepsilon_\infty - j\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right)^N \quad (1)$$

gdzie:  $\Delta\varepsilon$  – polaryzowalność,  $\omega$  – pulsacja,  $\tau$  – czas relaksacji,  $\sigma$  – konduktywność,  $\alpha, \beta, N$  – współczynniki,  $\varepsilon^*(\omega)$ ,  $\varepsilon_\infty$ ,  $\varepsilon_0$  – zespolona, optyczna i statyczna przenikalność dielektryczna

Generalnie wiąże ono częstotliwościowe zmiany względnej przenikalności dielektrycznej izolacji  $\varepsilon' = C_{uz} / C_0$  oraz jej stratności  $\varepsilon'' = \tan \delta \cdot \varepsilon'$  z takim wielkościami opisującymi dielektryk jak czas relaksacji dipoli i ładunku przestrzennego  $\tau$ , zdolność do polaryzacji  $\Delta\varepsilon$  oraz przewodnictwo  $\sigma$ . Uzupełniony o współczynniki  $\alpha, N$  zespół tych parametrów jest podstawą klasyfikacji izolacji.

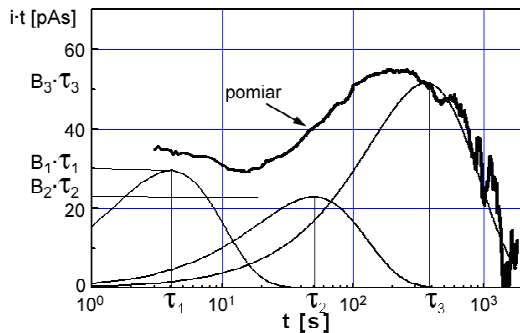
Metoda PDC polega głównie na wyznaczeniu ładunków zawartych w relaksacjach średnio i wolnozmiennych. Podstawą do analizy są charakterystyki czasowe prądu depolaryzacji oraz prąd upływu izolacji zmierzony po długotrwałej polaryzacji. Na ogół izolację polaryzuje się napięciem w wysokości 1000 – 2000 V, a czas pomiaru wynosi ok.  $10^4$  sekund. Zakłada się przy tym, że prąd depolaryzacji można wyrazić zależnością:

$$i_{dep}(t) = A \cdot t^{-n} + \sum_{k=1}^3 B_k \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right) \quad (2)$$

gdzie:  $A, B, n$  – współczynniki,  $\tau$  – czas relaksacji

Dla ułatwienia identyfikacji struktur relaksacyjnych oraz wyznaczenia ich ładunku często cha-

rakterystykę prądu depolaryzacji przedstawia się w postaci  $i(t) \cdot t = f(\log_{10}(t))$  (rys.2).



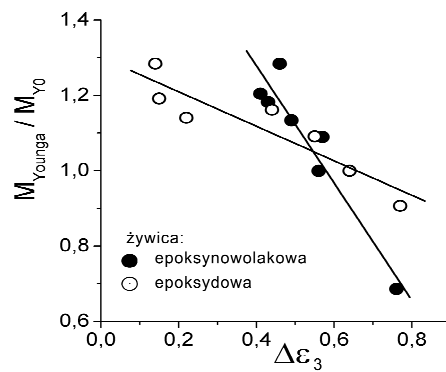
Rys.2. Charakterystyka prądu depolaryzacji w nowej izolacji „epoxy-mika-szkło”

### 3.2. Wpływ termoelektrycznego starzenia na relaksację izolacji szkło-epoksydowej

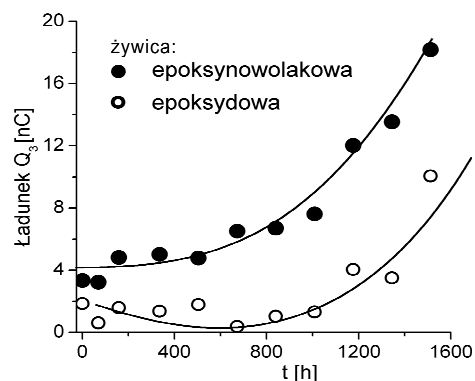
Do badań modelowych użyto warstwowej izolacji szkło-epoksydowej wykonanej w warunkach seryjnej, przemysłowej produkcji. Zastosowanie dwóch matryc w postaci żywicy epoksydowej oraz epoksynowolakowej pozwoliło otrzymać izolację odpowiednio klasy B i H. Próbkę poddano długotrwałemu starzeniu w temperaturze  $T = 155\text{ }^{\circ}\text{C}$  przy jednoczesnej obecności pola elektrycznego  $E = 1\text{ MV/m}$ . Ocenę kinetyki procesów starzeniowych wykonano stosując metody FDS oraz PDC, które uzupełniono badaniami mechanicznymi i chemicznymi (DSC).

Pomiary FDS wykazały, że podczas starzenia następuje m.in. wzrost polaryzowalności  $\Delta\epsilon_3$  relaksacji wolnozmiennych. Natomiast z badań mechanicznych wynika, że w tym czasie maleje wyznaczony przy próbie na zginanie poprzeczne moduł Younga, co jest rezultatem utraty adhezji między żywicą a zbrojeniem. Otrzymane korelacje między zmianami tych wielkości (rys.3) dowodzą, że w badanych próbkach kinetyka starzenia izolacji z matrycą epoksynowolakową była większa niż z matrycą epoksydową.

W pomiarach PDC, podobnie jak w metodzie FDS, do obserwacji procesów starzeniowych najbardziej przydatne są relaksacje o najdłuższej stałej czasowej  $\tau_3$ , a dobrym wskaźnikiem ich stopnia zaawansowania jest wartość ładunku  $Q_3 = B_3 \cdot \tau_3$ . Ładunek ten jest odpowiednikiem polaryzowalności  $\Delta\epsilon_3$  wyznaczonej w dziedzinie częstotliwości.



Rys.3. Zmiany modułu Younga i polaryzowalności granicy faz podczas starzenia izolacji szkło-epoksydowej



Rys.4. Zmiany wartości ładunku na granicy faz podczas starzenia izolacji szkło-epoksydowej

Na rys.4 przedstawiono wpływ czasu starzenia termoelektrycznego na wartości ładunku  $Q_3$  w izolacji warstwowej z matrycą epoksydową i epoksynowolakową. Podobnie, jak to obserwowano w metodzie FDS, początek rzeczywistego starzenia sygnalizowany jest przez dynamiczny wzrost wartości tego ładunku.

Z rys. 3 oraz rys.4 wynika dość nieoczekiwana sugestia, że w tym przypadku, izolacja klasy F (żywica epoksynowolakowa) okazała się mniej odporna na termoelektryczne starzenie w porównaniu do izolacji klasy B (żywica epoksydowa). To niestandardowe zachowanie się izolacji jest dobrą ilustracją roli interfazy w procesach starzeniowych. Bowiern, jak już wspomniano, o utracie dobrych właściwości mechanicznych i elektrycznych układów uwarstwionych w pierwszym rzędzie decydują energia i typ poprzecznych wiązań adhezyjnych nie zaś energia wiązań podłużnych głównego łańcucha polimeru żywicy. Tak więc może się zdarzyć, iż kompozyt o wyższej ciepłoodporności i początkowo lepszych właściwościach elektrycznych i mechanicznych będzie mniej odporny na działanie czynników środowiska pracy.

Otrzymane rezultaty zwracają uwagę na istotne znaczenie technologii i jakości wykonania izolacji. Z jednej strony znany jest bowiem w technologii chemicznej fakt, że po nieprawidłowym utwardzaniu, parametry fizyko-chemiczne kompozytu znacznie odbiegają od spodziewanych wartości. Co więcej, często stosowana w praktyce późniejsza długotrwała obróbka termiczna (tzw. kondycjonowanie) nie doprowadzi do powstania optymalnej morfologii warstwowej izolacji kompozytowej. Z drugiej zaś strony, nawet w prawidłowo utwardzonym kompozycie, mogą wystąpić trudności z uzyskaniem odpowiedniej adhezji między matrycą a zbrojeniem.

#### 4. Pomiary eksploatacyjne

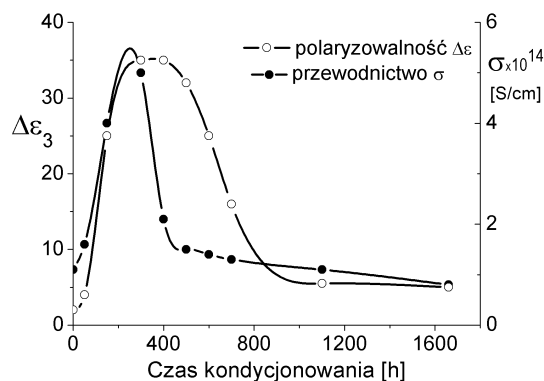
##### 4.1. FDS w ocenie jakości wyrobu

Zastosowanie metody FDS do oceny jakości produkcji będzie rozpatrzone na przykładzie izolacji stojana generatora 15,75 kV typu epoxy-mika-szkło wykonanej w technologii MICADUR.

Pomiary charakterystyk  $\tan \delta = f(f)$  oraz  $C_{uz} = f(f)$  wykazały, że w zakresie  $10^4$ – $10^1$  Hz można wyróżnić m.in. polaryzację ładunku przestrzennego na granicy faz. Obserwowano również, że elektryczne przewodnictwo układu jest rezultatem hoppingu jonów na odległości makroskopowe. Na podstawie jakościowej analizy charakterystyk przy pomocy równania (1) stwierdzono, że w izolacji dominuje debajowska relaksacja o długiej stałej czasowej  $\tau_3 = 226$  sek. Takie zachowania występują zwykle w polimerach w stanie ciekłym lub z rozbudowaną fazą lepkosprężystą. Oznacza to, że izolacja nie jest stechiometrycznie utwardzona i zawiera dużą ilość swobodnych struktur dipolowych. Prawdopodobnie są to luźne, nieprzereagowane ugrupowania końcowe żywicy oraz utwardzacza. Należy przy tym podkreślić, że pomimo takiego stanu morfologii, izolacja pozytywnie przeszła standardowe testy wyrobu ( $R_{izol} > 5000 \text{ M}\Omega$ , wytrzymałość elektryczna izolacji  $U_p > 40 \text{ kV}$ , maksymalny pozorny ładunek wyładowań niezupełnych  $Q_{max} < 5 \text{ nC}$ , współczynnik strat dielektrycznych  $\tan \delta_{50 \text{ Hz}} \approx 0,01$ ).

W celu określenia zmian morfologii izolacji podczas przewidywanej eksploatacji, pręt generatora poddano kondycjonowaniu przez 1650 h w nominalnych warunkach pracy ( $T=70^\circ\text{C}$ ,  $U=10,5 \text{ kV}$ , AC 50 Hz).

Pomiary FDS wykazały, że podczas kondycjonowania można wydzielić dwa zasadnicze przedziały, które różnią się procesami fizyko-chemicznymi i naturą relaksacji.



Rys. 7. Zmiany polaryzowalności niskoczęstotliwościowej oraz przewodnictwa podczas kondycjonowania izolacji "epoxy-mika-szkło"

Pierwszy, trwający około 500 h, w którym:

- dynamicznie rośnie polaryzowalność granicy faz  $\Delta\epsilon_3$  (rys. 7) oraz stała czasowa  $\tau_3$ ,
- rośnie przewodnictwo izolacji  $\sigma$  jako rezultat rozbudowy fazy lepkosprężystej na granicy faz.

W tym okresie zmiany w naturze relaksacji wykazują wyraźną analogię do przejścia żywicy epoksydowych ze stanu lepkosprężystego do szklatego. Zatem jest to czas, w którym kontynuowane są reakcje chemiczne z udziałem grup końcowych utwardzacza i żywicy. Jednak, temperatura  $70^\circ\text{C}$  jest zbyt niska do uzyskania pożądanego, z punktu widzenia optymalnej morfologii, reakcji sieciujących. Należy więc oczekiwać, że w rezultacie powstawać będą struktury tworzące lepkosprężyste obszary „gumy”. Drugi przedział dla czasu kondycjonowania powyżej 500 h charakteryzuje się tym, że zjawiska dielektryczne wykazują pewne analogie do zmian obserwowanych podczas dotwardzania i fizycznej relaksacji termoutwardzalnych układów warstwowych.

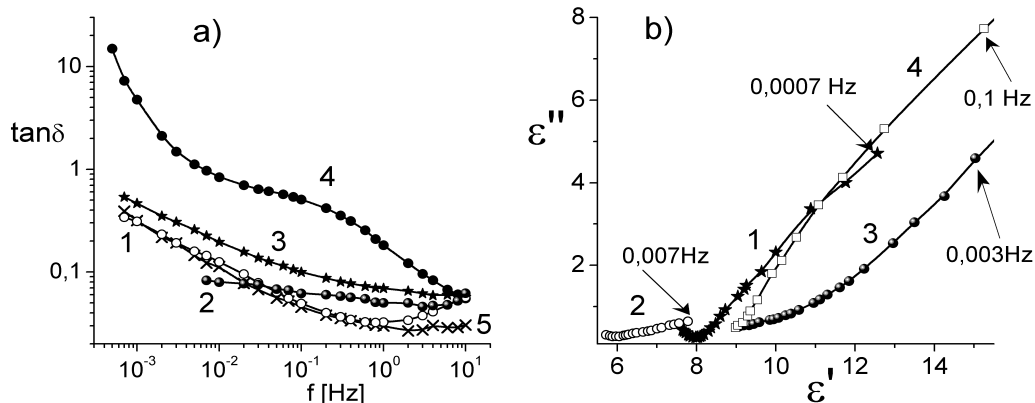
Porównanie z badaniami modelowymi prowadzi do wniosku, że proces kondycjonowania izolacji w nominalnych warunkach pracy będzie jeszcze trwał przez co najmniej kilka tysięcy godzin. Pomimo to, ze względu na niezakończony proces zasadniczego sieciowania, należy się spodziewać, że jej morfologia nie osiągną pożądaną, optymalną strukturę. Z punktu widzenia technologii chemicznej wniosek ten jest dość banalny, ale w praktyce

eksploatacyjnej oznacza znacznie łatwiejszą inicjację procesów starzeniowych.

#### 4.2. Ocena izolacji maszyn WN w eksploatacji

Wykorzystanie metody FDS warunkach eksploatacyjnych przedstawione będzie na przykładzie 4 silników i 2 generatorów WN. Praktyka diagnostyczna wskazuje, że przy definiowaniu wniosków końcowych ważną rolę pełni znajomość historii eksploatacji maszyn. W analizowanych przypadkach, silnik Nr 1

230 MVA. Z porównania historii maszyn wynika, że uzwojenie generatora poddane było najmniejszemu skumulowanemu narażeniu eksploatacyjnemu, w drugiej kolejności uzwojenie silnika Nr 2, zaś największych zmian należy oczekiwać w izolacji silników Nr 3 i Nr 4. Zależność  $\tan \delta = f(f)$  (rys.8.a) pokazuje, że dla częstotliwości niższych od 0,1 Hz izolacja nowego silnika ma wyraźnie większe straty dielektryczne w porównaniu do silnika nr 2 oraz zbliżone do strat w izolacji silnika nr 3



Rys.8. Zależności  $\tan \delta = f(f)$  (a) oraz wykresy Cole-Cole (b) dla izolacji silników 6 kV. Krzywe 1÷4 – odpowiednio silniki Nr 1÷4, krzywa 5 - nowa cewka uzwojenia stojana

Tablica.1. Parametry relaksacji dielektrycznej dla  $f < 10$  Hz w izolacji silników i generatora

Parametr	Silniki 6kV				Generator 15,75 kV, 230 MVA	
	Nr 1 200 kW	Nr 2 200 kW	Nr 3 200 kW	Nr 4 1250 kW	Nowe uzwojenie	4 lata eksploatacji
$\sigma_0$ [S/cm]	1e-20	5e-17	4e-15	1e-13	5e-16	5e-16
N	0,14	0,64	0,82	1,00	0,89	1,00
$\Delta \epsilon$	45,62	8,03	51,63	53,36	2,02	1,62
$\tau$ [s]	1,3e+4	1,7e+3	2,3e+04	2,8e+01	820	820
$\alpha$	0,66	0,22	0,38	0,56	0,47	0,43

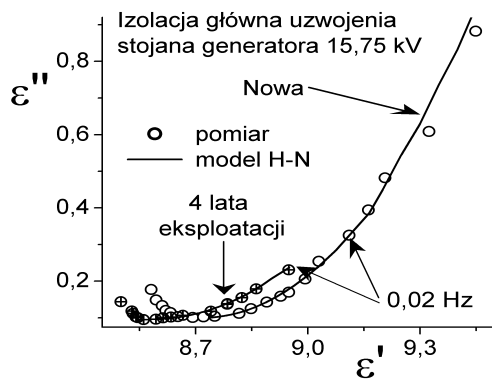
miął wymienione uzwojenie, praktycznie więc można uznać go za nowy. Silnik Nr 2 10 lat pracował w łagodnych warunkach bez remontu. Z obserwacji wynika, że temperatura jego izolacji wahała się zwykle w granicach  $40 \div 70$  °C, a więc znacznie poniżej  $T_g$ . Silniki nr 3 oraz nr 4 eksploatowane były przez 4 lata oraz 10 lat przy dużych przeciążeniach. Częste bezpośrednie rozruchy pod pełnym obciążeniem (Nr 3) oraz duże robocze przeciążenia (Nr 4) były przyczyną okresowego przegrzewania się izolacji nawet do temperatury rzędu  $130 \div 150$  °C. Natomiast w przypadku generatora pomiary wykonano na nowym i eksploatowanym przez 4 lata przecie uzwojenia generatora 15,75 kV,

(odpowiednio krzywe 1,2,3). Ponadto zaobserwowano istotne zmiany w pojemności uzwojeń, tym samym w wartościach przenikalności dielektrycznej  $\epsilon'$  (rys.8.b).

Wykonana analiza wykazała, że długoletnia praca w łagodnych warunkach (silnik Nr 2) powoduje przede wszystkim skrócenie czasu relaksacji  $\tau$ , mniejszą polaryzowalność  $\Delta \epsilon$  oraz wzrost przewodnictwa  $\sigma$  (tablica 1). W konsekwencji prowadzi to do zmniejszenia stratności  $\epsilon''$  układu oraz przesunięcie się charakterystyki  $\epsilon'' = f(\epsilon')$  po osi  $\epsilon'$  w stronę mniejszych wartości (rys.8.b). Zbliżone zachowania obserwowano po 4 latach eksploatacji

izolacji stojana generatora 15,75 kV (rys.9). Jednak krótszy okres oraz niższa temperatura pracy spowodowały relatywnie mniejsze zmiany polaryzowalności  $\Delta\varepsilon$  oraz pojemności, a tym samym mniejsze przesunięcie się charakterystyki po osi  $\varepsilon'$ .

Z badań modelowych wiadomo, że taki typ przekształceń w charakterze procesów polaryzacyjnych występuje we wczesnym okresie starzenia izolacji kompozytowej [3]. Polega on głównie na procesach dotwardzania, fizycznej relaksacji, stabilizacji właściwości fizyko-chemicznych oraz poprawie parametrów mechanicznych. Na tej podstawie uprawniona jest pozytywna ocena stanu izolacji silnika nr 2 oraz izolacji głównej generatora. Natomiast w izolacji silników nr 3 i 4 obserwowano objawy istotnego starzenia, które w szczególności dotyczyły silnika nr 4. Bardzo duża wartość przewodnictwa jonowego ( $\sigma_0 = 0,1 \text{ pS/cm}$ ) oraz polaryzowalności  $\Delta\varepsilon$  przy krótkim czasie relaksacji ( $\tau = 28 \text{ s}$ ) sugeruje obecność w interfacie dużego, ruchliwego ładunku przestrzennego, co może oznaczać delaminację izolacji i obecność kawern między matrycą polimerową a zbrojeniem (mika, szkło) [1].



Rys.9. Zależności Cole-Cole dla izolacji generatorów wykonanej w technologii MICADUR

Istotna różnica między naturą relaksacji w nowych uzwojeniach silnika Nr 1 oraz pręta generatora dotyczyła wartości polaryzowalności  $\Delta\varepsilon$  oraz stałej czasowej polaryzacji  $\tau$ . Wartości te wynosiły odpowiednio  $\Delta\varepsilon = 45,62$  i  $\tau = 1,3e4 \text{ s}$  oraz  $\Delta\varepsilon = 2,02$  i  $\tau = 820 \text{ s}$  (tablica 1). Głównym powodem tych różnic jest niestechiometrycznie utwardzona izolacja silnika. Stąd można się spodziewać, że jej podatność na oddziaływanie niekorzystnych czynników środowiska pracy będzie większa.

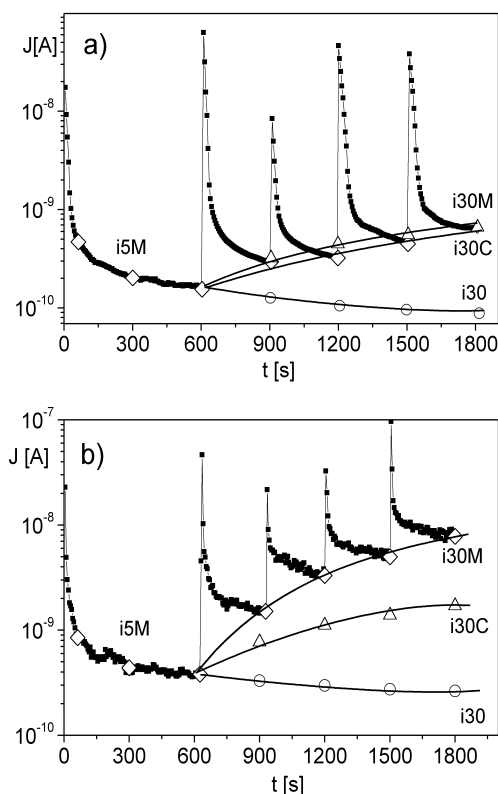
W podsumowaniu rozdziału należy podkreślić zalety metody FDS. Przede wszystkim pozwala ona klasyfikować izolację pod względem stopnia zaawansowania procesów starzeniowych, w tym odróżnić przejściowy stan dotwardzania oraz fizycznej relaksacji od procesów istotnego starzenia. Pozwala także dokonać oceny jakości wykonania izolacji kompozytowej zarówno w fabrycznych testach technologicznych, próbach wyrobu czy też w próbach odbiorczych. Warte uwagi jest to, iż ocena stanu układu izolacyjnego na podstawie pomiarów właściwości dielektrycznych jest zbieżna z badaniami modelowymi oraz analizami chemicznymi. Pożądana jest jednak znajomość krzywych wzorcowych i/lub historii eksploatacji maszyny.

#### 4.3. Ocena stanu izolacji maszyn WN w teście metodą rampy napięciowej

Istotą testu rampy napięciowej jest pomiar odpowiedzi prądowej izolacji na skokowy przyrost napięcia o  $\Delta U = 0,3 U_N$ , w zakresie od  $0,3$  do  $1,5 \cdot U_N$  (rys.10). Test realizowany jest w pięciu następujących po sobie krokach. Czas trwania pierwszego kroku - 10 minut, a pozostałych - 5 minut. Metoda ta zakłada, że rezystancja idealnej izolacji nie zależy od wartości napięcia, a zanik prądu polaryzacji odbywa się eksponensjalnie. Przyjęcie takich warunków pozwala obliczyć wartości  $i_{30}$  oraz  $i_{30C}$ . Natomiast wartość  $i_{30M}$  jest zmierzonym prądem upływu po 5 minutach od przyłożenia napięcia równego  $1,5 \cdot U_N$ . Pełną procedurę testu oraz wyznaczania poszczególnych wartości prądu upływu podano w IEEE Standard No. 4, 1978, "Standard Techniques for High-Voltage Testing". Do oceny kondycji izolacji używana jest wartość  $K_a$  nazywana współczynnikiem absorpcji :

$$K_a = \frac{i_{30M}}{i_{30C}} \quad (3)$$

Współczynnik absorpcji  $K_a$  dla nowej, dobrej jakości izolacji na bazie żywic epoksydowych powinien być mniejszy od 2, podczas gdy w przypadku izolacji zdegradowanej jego wartość może wynosić nawet od 5 do 7.



Rys.10. Test metodą rampy napięciowej w nowej (a) oraz zestarzonej (b) izolacji silnika 6 kV

Przykład zastosowania tej metody pokazano na rys.10. Charakterystykę prądu upływu w nowej izolacji silnika 6 kV pokazano na rys.10.a, podczas gdy rys.10.b dotyczy izolacji przegrzanej. Łatwo można zauważyć, że dla izolacji o dobrej kondycji skalkulowana wartość  $i_{30C}$  jest bliska zmierzonej wartości  $i_{30M}$ , podczas gdy dla izolacji zużytej jest ona znacznie mniejsza. Wyliczone współczynniki absorpcji (odpowiednio  $K_a = 0,88 \div 1,09$  oraz  $K_a = 4,7$ ) potwierdzają wstępne założenia oraz oczekiwania co do diagnozy izolacji.

## Literatura

- [1]. Tanaka T.: "Aging of Polymeric and Composite Insulating Materials. Aspects of Interfacial Performance in Aging", IEEE Trans. DEI, vol.9. No 5, (2002), pp.704-716
- [2]. Kimura K, Kaneda Y: "The Role of Microscopic Defects in Multistress Aging of Micaceous Insulation", IEEE Trans. DEI, vol.2, (1995), pp.426-432
- [3]. Subocz J.: "Wybrane zagadnienia przewodnictwa i relaksacji dielektrycznej w aspekcie diagnostyki izolacji", Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, Nr 580, Szczecin, 2003
- [4]. Seifert J.M., Stietzel U., Kärner H.C.: „The Aging of Composite Insulating Materials–New

possibilities to detect and classify ageing phenomena with dielectric diagnosis tools”, IEEE Symp. on El. Insul. Virginia, USA, (1998), pp.373-377

[5]. Schrijver C., Herden A., Kärner H.: "Fundamental Ageing Mechanisms of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Insulators”, 10<sup>th</sup> ISH, Montreal, (1997)

[6]. Ban.D.,Cettolo.M.,Miletic.B.: "Electrical Motor Insulation Conditions dc Testing”, IEEE Trans.DEI, vol.5. No 6, (1998), pp.917-921

[7]. Rux.L., McDermid.W.: "Assesing the Condition of Hydrogenerator Stator Winding Insulation Using the Ramped High Direct-Voltage Test Method” , IEEE Electrical Insulation Magazine, vol.17, No 6, (2001), pp.27-33

[8]. Subocz J.: „Dielectric spectroscopy of insulation composite materials”, IEEE 7<sup>th</sup> Inter. Conf. on Solid Dielectric, Eindhoven, (2001), pp.333-336

[9]. Subocz J.: "Influence of vibrations on dielectric properties of "epoxy-mica-glass" insulation”, Proc. Inter. Conf. APTADM-04, Wrocław, (2004), p.212-215

## Autorzy

dr hab. inż. Jan Subocz, Instytut Elektrotechniki, Szczecin, e-mail: [jan.subocz@ps.pl](mailto:jan.subocz@ps.pl);  
mgr inż. Marek Szrot, mgr inż. Janusz Płowucha, Energo-Complex Sp. z o.o., Chorzów, e-mail: [marek.szrot@energo-complex.pl](mailto:marek.szrot@energo-complex.pl)