

Ocena wyników badań izolacji głównej maszyn elektrycznych napięciem stałym

Streszczenie. Wykorzystywanie maszyn elektrycznych w układach napędowych, pociąga za sobą konieczność przeprowadzania okresowych przeglądów oraz pomiarów diagnostycznych. Ma to na celu zapewnienie bezawaryjnej pracy oraz wykrycie wad mających bezpośredni wpływ na czas eksploatacji maszyny. Najczęściej do diagnostyki układów izolacyjnych uzwojeń wykorzystuje się metody oparte na pomiarach napięciem stałym. Badania te prowadzą do określenia wskaźników diagnostycznych opisujących stopień zużycia izolacji. Na ich podstawie można w sposób jednoznaczny ocenić stan techniczny izolacji uzwojenia.

Abstract. Use of electrical machines in drive systems creates the need for periodical inspections and diagnostic measures. These should ensure failure-free operation and detection of any defects which might directly impact machine lifetime. Diagnostics of winding insulation is mostly based upon DC voltage measurements. These measurements are used to determine diagnostic indicators describing insulation's degree of wear. The technical condition of winding insulation may be unequivocally assessed by means of these indicators. (Assessment of the results of tests of main insulation of electric machines with direct voltage)

Słowa kluczowe: diagnostyka i remonty, maszyny elektryczne, pomiar izolacji.

Keywords: diagnostics and repairs, electrical machines, insulation measurement.

Wstęp

Przeprowadzanie okresowych przeglądów oraz wykonywanie pomiarów diagnostycznych maszyn elektrycznych ma na celu wykrycie wad mających bezpośredni wpływ na czas eksploatacji oraz zapewnienie bezawaryjnej pracy [1]. W przypadku wykrycia wad powinniśmy podjąć odpowiednie kroki w celu ich usunięcia. Badaniu powinny podlegać nie tylko newralgiczne elementy mechaniczne, ale także obwody elektryczne. Często jednak zdarza się, że ze względów oszczędnościowych badań tych nie wykonuje się zgodnie z zaleceniami, co prowadzi do niechcianej awarii. Bardzo często koszty naprawy są porównywalne z zakupem nowej maszyny.

Metody pomiarowe wykorzystujące napięcie stałe

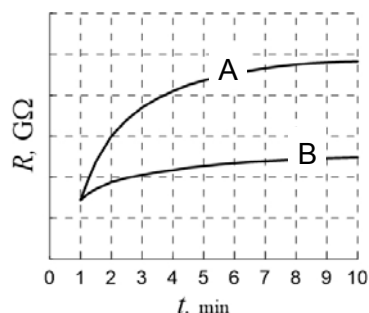
Prostota pomiaru napięciem stałym, małe gabaryty sprzętu pomiarowego oraz szybkość otrzymania wyników sprawia, że metody te są powszechnie stosowane do ogólnej a nawet zaawansowanej oceny stopnia zużycia izolacji. Zaletą tych metod jest również duża odporność na zakłócenia zewnętrzne.

Do badań diagnostycznych wykorzystujących napięcie stałe zaliczamy [2]:

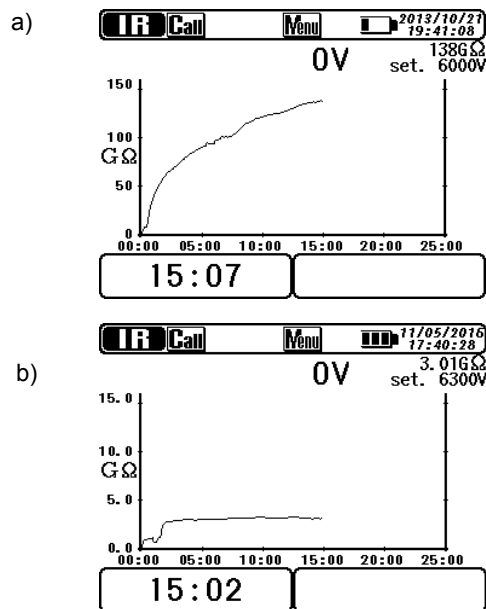
- pomiar rezystancji izolacji IR [3],
- wyznaczenie wskaźnika polaryzacji PI [3],
- wyznaczenie wskaźnika absorpcji dielektrycznej DAR,
- wyznaczenie wskaźnika rozładowania dielektryka DD,
- pomiar napięciem narastającym schodkowo SV,
- wielokryterialna metoda prądu stałego [4],
- metoda rampy wysokonapięciowej DC Ramp Test [5].

Pomiar rezystancji izolacji IR

Najczęściej wykonywanym pomiarem wykorzystującym napięcie stałe jest pomiar rezystancji izolacji. Jest to pomiar bardzo łatwy do wykonania, umożliwiający w szybki i prosty sposób zobrazować ogólny stan układu izolacyjnego uzwojeń. Jest to podstawowy pomiar jaki należy wykonać przed przystąpieniem do wykonywania jakichkolwiek prac remontowych. Pomiar rezystancji izolacji przez dłuższy okres czasu stał się standardem. W maszynie elektrycznej, która ma dobrą izolację, rezystancja izolacji wzrasta przez długi okres czasu, natomiast w maszynie, która ma izolację zawilgoconą lub zabrudzoną wartość rezystancji izolacji ustala się bardzo szybko. Przykład zilustrowano na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Rezystancja izolacji w funkcji czasu próby [6]: krzywa A dla silnika z izolacją dobrą, krzywa B dla silnika z izolacją wadliwą



Ry. 2. Przykłady ekranów pomiaru rezystancji izolacji IR w generatorze o mocy 12500 kVA i napięciu zasilania 6300 V

Pomiar rezystancji izolacji w trybie IR standardowo wykonywany jest po 60 s. W zależności od wartości napięć znamionowych badanych maszyn pomiar rezystancji izolacji wykonujemy przy różnej wartości napięć probierczych. Wartości tych napięć przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości napięć probierczych w pomiarze stanu izolacji wysokonapięciowych maszyn elektrycznych [6, 7]

Napięcie znamionowe uzwojenia V	Napięcie pomiaru V
< 1000	500
1000 – 2500	500 – 1000
2501 – 5000	1000 – 2500
5001 – 12000	2500 – 5000
> 12000	5000 – 10000

Trochę inne kryteria doboru napięć probierczych określa norma PN–E–04700:1998. Dla prądnic synchronicznych o napięciu znamionowym powyżej 1 kV, pomiar rezystancji izolacji uzwojenia każdej fazy lub połączonych uzwojeń wszystkich faz wykonuje się miernikiem rezystancji izolacji o napięciu co najmniej 2,5 kV.

Współczynnik absorpcji DAR

Współczynnik absorpcji DAR definiowany jest jako stosunek rezystancji izolacji zmierzony po 60 s od momentu rozpoczęcia pomiarów (R_{60}) do rezystancji zmierzonej po 15 s (R_{15}). Stosunek ten nie powinien być mniejszy niż:

1,5 – w temperaturze 20 °C

1,4 – w temperaturze 40 °C

1,3 – w temperaturze 60 °C

Pomiar opiera się na założeniu, że w całym okresie próby napięciowej temperatura badanego obiektu jest mniej więcej stała, więc obliczony wskaźnik DAR jest niezależny od temperatury.

Poprzez pomiar współczynnika absorpcji DAR dowiadujemy się, czy układ izolacyjny jest suchy, zawilgocony, czysty czy zanieczyszczony. Umożliwia nam to podjąć odpowiednią decyzję w stosunku do wykonywania dalszych działań związanych z remontem maszyny. W przypadku okazania się, że stojan jest zanieczyszczony i wilgotny należy bezwzględnie poddać go myciu oraz suszeniu. Podczas procesu suszenia należy kontrolować wartość rezystancji izolacji uzwojeń.

Współczynnik polaryzacji PI

Współczynnik polaryzacji PI definiowany jest jako stosunek rezystancji izolacji zmierzony po 10 min (R_{600}) do rezystancji zmierzonej po 1 min (R_{60}). Wskaźnik polaryzacji PI (R_{600}/R_{60}) może być uznany za pozytywny, jeżeli uzyskane wartości wynoszą minimum [7, 8]:

1,5 – dla uzwojeń klasy A

2,0 – dla uzwojeń klasy B

2,0 – dla uzwojeń klasy F

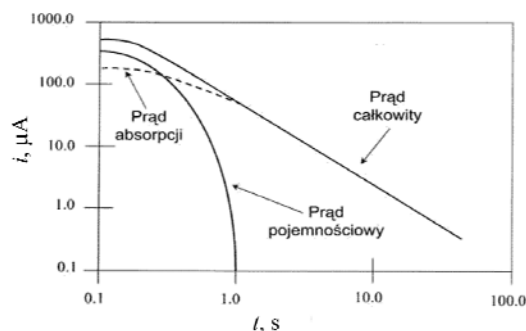
2,0 – dla uzwojeń klasy H

W całym okresie próby napięciowej temperatura badanego obiektu powinna być stała, w celu uniezależnienia wskaźnika PI od temperatury.

Wskaźnik rozładowania dielektryka DD

W czasie pomiaru parametru DD (eng. dielectric discharge) mierzony jest prąd płynący w układzie izolacyjnym podczas rozładowania dielektryka. Badany jest więc stan wewnątrz materiału, niezależnie od zanieczyszczeń powierzchniowych. Pomiar ten jest testem diagnostycznym pozwalającym ocenić stopień degradacji izolacji spowodowanej zestarzeniem materiału oraz obecnością wtrącin gazowych w materiale izolacji. Aby układ izolacyjny mógł zostać odpowiednio zdiagnozowany dielektryk musi być najpierw ładowany przez odpowiedni okres czasu. Domyślnym i zalecanym czasem ładowania jest 30 min. Po tym czasie układ izolacyjny powinien być całkowicie naładowany a dielektryk spolaryzowany tak, by jedynym prądem w obwodzie pomiarowym był prąd upływu przez izolator. W trakcie rozładowania składowa pojemnościowa prądu opada bardzo szybko, co jest wynikiem stosunkowo niedużej stałej czasowej obwodu

rozładowania, rzędu kilku sekund. Druga składowa, którą jest prąd absorpcji, zanika znacznie wolniej ze względu na dużo większą stałą czasową rozładowania, sięgającą kilku minut (rys.3).



Rys. 3. Prądy płynące przez układ izolacyjny podczas rozładowania dielektryka [6]

Domyślnym czasem rozładowania w trybie DD jest 1 min. Po tym czasie należy dokonać pomiaru prądu rozładowania oraz pojemności układu izolacyjnego. Na podstawie znajomości napięcia probierczego użytego w pomiarach wartość parametru DD obliczana jest z zależności:

$$(1) \quad DD = \frac{I_{1min}}{U \cdot C}$$

gdzie: I_{1min} – wartość prądu w mA zmierzona po 1 min od rozpoczęcia rozładowywania izolacji, U – napięcie pomiarowe w V, C – pojemność badanego układu izolacyjnego w F

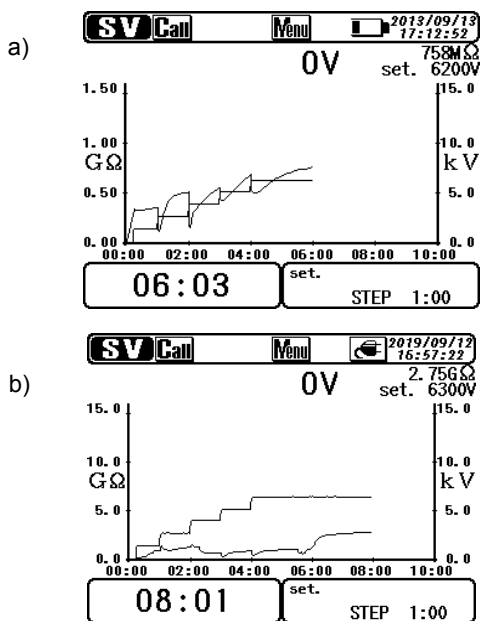
W wielowarstwowych układach izolacyjnych uszkodzenie jednej z warstw może nie wpłynąć znacząco na obniżenie wartości rezystancji izolacji. Taki stan awaryjny najczęściej nie jest wykrywalny w normalnych pomiarach rezystancji izolacji oraz podczas wyznaczania współczynników DAR i PI. Jedyne pomiar współczynnika DD może ujawnić przepływ nadmiernego prądu absorpcyjnego, co może mieć miejsce podczas uszkodzenia lub zanieczyszczenia jednej z warstw wielowarstwowego dielektryka. Stała czasowa tej warstwy będzie inna od stałej czasowej pozostałych warstw. Spowoduje to przepływ większego prądu niż w przypadku, gdy izolacja była jednolita (bez uszkodzeń). Kryterium oceny pomiaru rozładowania dielektryka przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Kryteria oceny pomiaru rozładowania dielektryka [6]

Wynik pomiaru DD	Stan izolacji
> 7	Zły
4 – 7	Ślaby
2 – 4	Niejasny
< 2	Dobry

Pomiar napięciem narastającym schodkowo SV

Pomiar napięciem narastającym schodkowo SV (eng. step voltage) opiera się na założeniu, że idealny izolator wykazuje stałą rezystancję izolacji niezależnie od wartości napięcia probierczego, natomiast izolator zestarzały, zanieczyszczony lub zawilgocony wykazuje niższą rezystancję przy wyższych wartościach napięcia. Dla testu SV przeprowadzany jest standardowy pięciostopniowy pomiar trwający 5 min, w którym napięcie probiercze jest co minutę skokowo zwiększane o jedną piątą końcowej wartości napięcia. Zakłada się, że odchyłki rezystancji izolacji większe niż 25% wskazują na obecność zanieczyszczeń lub wilgoci [6]. Na rysunku 5 przedstawiono przykład pomiaru rezystancji izolacji metodą SV uzwojeń maszyn elektrycznych dużej mocy o dobrym i złym stanie układu izolacyjnego.



Rys. 5. Pomiar rezystancji izolacji (metodą SV) uzwojeń generatora o mocy 12,5 MVA o dobrym a) i złym b) stanie układu izolacyjnego

Wielokryterialna metoda prądu stałego

Wielokryterialna metoda prądu stałego (WMPS) została wpisana do normy PN-E-04700:1998 jako metoda dodatkowa. Badanie układu izolacyjnego według tej metody obejmuje następujące próby [4, 8]:

- wyznaczenie charakterystyki $R_{60} = f(U)$ w przedziale napięcia od 0 do $2U_N$,
- pomiar przebiegu czasowego prądu upływu i_p po skokowym załączeniu, na całkowicie rozładowany układ izolacyjny, napięcia stałego o wartości U_N ,
- naładowanie układu izolacyjnego do napięcia znamionowego, aż do uzyskania stanu ustalonego, a następnie odłączenie napięcia zasilającego i zwarcie układu izolacyjnego na czas t_z , po czym rozwarcie układu izolacyjnego i zdjęcie przebiegu odbudowy napięcia na układzie izolacyjnym U_{od} .

Pomiar odbudowy napięcia jest próbą najważniejszą dla oceny stanu technicznego izolacji, stopnia jej zużycia i prognozowania czasu niezawodnej pracy maszyny. W oparciu o przeprowadzone pomiary wyznacza się następujące charakterystyki i parametry układu izolacyjnego:

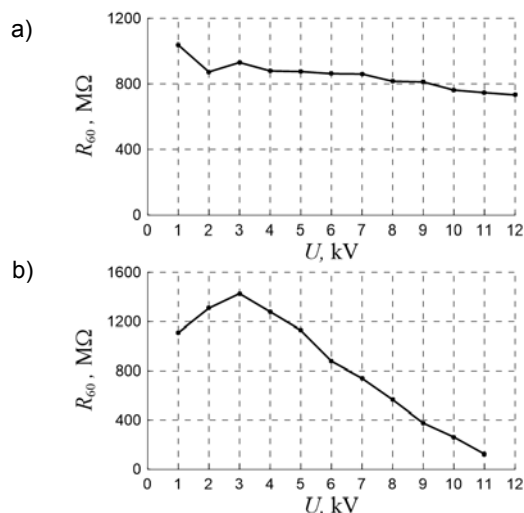
- wykres rezystancji izolacji $R_{60} = f(U)$ w zakresie napięcia od 0 do $2U_N$, z którego określa się rezystancję R_{60} przy U_N ,
- z ekstrapolacji krzywej $R_{60} = f(U)$ szacuje się poziom napięcia przebicia U_p układu izolacyjnego,
- wykres odbudowy napięcia U_o na układzie izolacyjnym, z którego odczytuje się czas odbudowy napięcia t_{od} i wartość maksymalną odbudowanego napięcia $U_{od max}$,
- współczynnik absorpcji układu izolacyjnego i_{p15}/i_{p60} ,
- poziom wahań prądu upływu $i_{p60 max}$ i $i_{p60 min}$ liczony po czasie $t > 60$ s od chwili załączenia napięcia (dla stanu ustabilizowanego).

Otrzymane wyniki badań porównuje się z kryteriami oceny stanu izolacji [4]. Stan techniczny układu izolacyjnego według tych kryteriów sklasyfikowany został w skali ocen od 5 do 0:

- 5 punktów – izolacja nowa, której stan techniczny jest bardzo dobry,
- 4 punkty – izolacja dobra, może być to izolacja nowej maszyny, po remoncie lub kilkuletniej eksploatacji,

- 3 punkty – izolacja o zauważalnym stopniu zużycia, maszyna w okresie 2 do 3 lat powinna mieć przeprowadzony remont,
- 2 punkty – izolacja o dużym stopniu zużycia, maszyna w możliwie krótkim czasie powinna być odstawiona do remontu,
- 1 punkt – izolacja zużyta, maszyna z takim stanem izolacji może w każdej chwili ulec awarii,
- 0 punktów – maszyna nie nadająca się do eksploatacji z całkowicie zużytym układem izolacyjnym lub po awarii.

Autor tej metody w oparciu o swoje doświadczenie eksploatacyjne prognozuje, że maszyny elektryczne z izolacją ocenianą na 5, 4 i 3 punkty będą pracować niezawodnie co najmniej tyle lat, ile wynosi ich ocena punktowa. Niezawodna praca tych maszyn jest zwykle znacznie dłuższa, jednak w oparciu o przeprowadzone pomiary nie można robić prognoz dłuższych. Po tych okresach eksploatacji należy powtórzyć badania diagnostyczne. Na rysunkach 6, 7 i 8 przedstawiono przykładowe przebiegi z badań izolacji głównej klasy B uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy i napięciu zasilania 6000 V. Rysunek 6 przedstawia wykres rezystancji izolacji $R_{60} = f(U)$ uzwojenia o dobrym i złym stanie układu izolacyjnego. Z wykresów obliczono hipotetyczne napięcie przebicia układu izolacyjnego. Dla silnika z rysunku 6a napięcie przebicia układu izolacyjnego wynosi $U_p = 38,1$ kV, zatem $U_p/U_N = 6,35$. Ostatecznie stan układu izolacyjnego oceniono pozytywnie na ocenę punktową „5”.

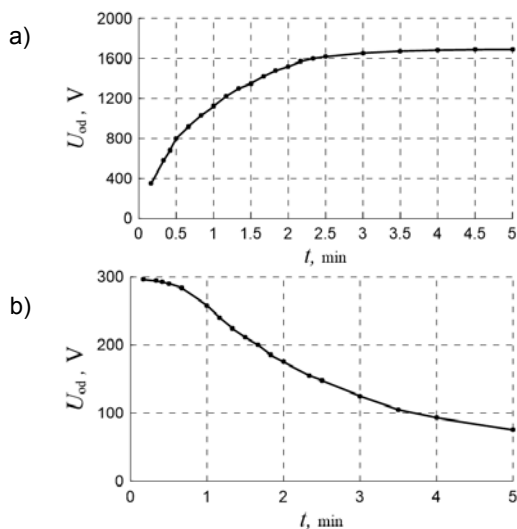


Rys.6. Wykres rezystancji izolacji $R_{60} = f(U)$ uzwojenia o dobrym a) i złym b) stanie układu izolacyjnego

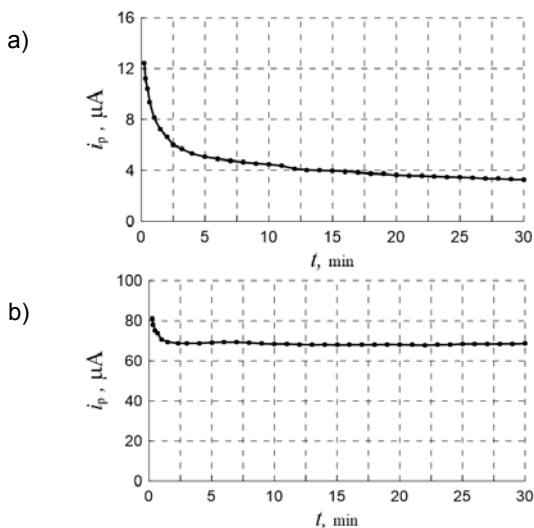
Dla silnika z rysunku 6b napięcie przebicia $U_p = 11,7$ kV, zatem $U_p/U_N = 1,95 < 2$. Układ izolacyjny oceniono negatywnie na ocenę punktową „2”. Następnie dla tych samych silników na rysunku 7 przedstawiono wykres odbudowy napięcia uzwojenia stojana. Na rysunku 7a napięcie uzwojenia stojana odbudowało się do wartości $U_{od max} = 1692$ V, zatem $U_{od max}/U_o = 0,282$. Ostatecznie stan układu izolacyjnego oceniono pozytywnie na ocenę punktową „5”. W silniku przedstawionym na rysunku 7b napięcie stojana odbudowało się do wartości $U_{od max} = 296$ V w czasie 10 s, zatem $U_{od max}/U_o = 0,049$. Układ izolacyjny oceniono negatywnie na ocenę punktową „2”. Bardzo mała wartość napięcia odbudowy stojana równa 296 V, oraz bardzo krótki czas odbudowy tego napięcia równy 10 s świadczą o tym, że jest to izolacja o dużym stopniu zużycia.

Kolejną próbą określającą stan techniczny układu izolacyjnego jest pomiar prądu upływu po skokowym załączeniu napięcia U_N na całkowicie rozładowany układ izolacyjny. W dobrym układzie izolacyjnym (rys.8a) prąd

upływu ustala się znacznie dłużej niż w zużyтым układzie izolacyjnym (rys.8b). Prąd upływu przedstawiony na rysunku 8a ustala się ponad 30 min, a wartość współczynnika $i_{p15}/i_{p60} = 1,53 > 1,5$, zatem pozytywnie oceniono stan układu izolacyjnego.



Rys.7. Wykres odbudowy napięcia uzwojenia stojana o dobrym a) i złym b) stanie układu izolacyjnego



Rys.8. Przebieg prądu upływu po skokowym załączeniu napięcia U_N na całkowicie rozładowany układ izolacyjny o dobrym a) i złym b) stanie układu izolacyjnego

Prąd upływu przedstawiony na rysunku 8b ustalił się po upływie około 2 min od przyłożenia napięcia znamionowego na układ izolacyjny, a wartość współczynnika $i_{p15}/i_{p60} = 1,14 < 1,2$. Świadczy to zauważalnym stopniu zużycia izolacji i kwalifikuje maszynę do remontu w okresie od 2 do 3 lat.

Wnioski

Zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości i niezawodności układu elektroizolacyjnego jest bardzo trudnym i złożonym zagadnieniem konstrukcyjno-projektowym. Spowodowane jest to tym, że maszyny elektryczne dużej mocy bardzo często eksploatowane są w trudnych warunkach mających bardzo duży wpływ na narażenia izolacji, a co za tym idzie na zmniejszenie wytrzymałości elektrycznej.

Diagnostyka układów izolacyjnych w oparciu o pomiary IR, DAR, PI, SV, DD opiera się na porównaniu wyznaczo-

nych wskaźników diagnostycznych opisujących stopień zużycia izolacji z wartościami zawartymi w normach oraz poradnikach branżowych. Na ich podstawie można w sposób jednoznaczny ocenić stan techniczny izolacji uzwojenia. Prostota pomiaru napięciem stałym, małe gabaryty sprzętu pomiarowego oraz szybkość otrzymania wyników sprawia, że metody te są powszechnie stosowane do ogólnej a nawet zaawansowanej oceny stopnia zużycia izolacji [9].

W celu zapewnienia bezawaryjnej pracy układów napędowych, badania stanu technicznego izolacji uzwojeń silników elektrycznych napięciem stałym powinny być wykonywane [10]:

- co 5 lat dla silników o dobrym stanie izolacji,
- co 2 lata dla silników o pogorszonym stanie izolacji,
- co 1 rok dla silników o pogorszonym stanie izolacji i pracujących w odpowiedzialnych układach napędowych.

Przedstawione w niniejszym artykule metody diagnostyczne są skutecznym narzędziem w diagnostyce układów izolacyjnych maszyn dużej mocy, a kompetentna ocena wyników badań pozwala określić stan techniczny izolacji uzwojeń oraz prognozować „czas życia” układu izolacyjnego. Służby odpowiedzialne za eksploatację dużych napędów elektrycznych mogą na podstawie otrzymywanych wyników badań prowadzić odpowiednie kroki w zakresie wykonywania okresowych przeglądów i remontów, które wykonywane systematycznie znacznie wydłużają czas bezawaryjnej eksploatacji maszyn.

Autor: dr inż. Piotr Zientek, Politechnika Śląska, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice, E-mail: Piotr.Zientek@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Kim H., Kong T., Lee S. B.; Kang T. J., Oh N., Kim Y., Park S., Stone G. C., Experience with stator insulation testing and turn/phase insulation failures in the power generation industry, 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), (2017), 21-30
- [2] IEEE Standards, IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Electric Machinery (2300 V and Above) with High Direct Voltage, 30-8-2012
- [3] Torkaman H., Karimi F., Influence of ambient and test conditions on insulation resistance/polarization index in hv electrical machines - a survey, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 22 (2015), no.1, 241-250
- [4] Glinka T., Szymaniec S., Eksploatacja i diagnostyka maszyn elektrycznych i transformatorów. Wydawnictwo Naukowe PWN, (2019)
- [5] David E., Stone G. C., Sasic M., Dielectric response of machine insulation extracted from DC ramp test on individual stator bars, 2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Baltimore, (2017), 46-49
- [6] Podręcznik diagnostyki izolacji powyżej 1 kV. Materiały MEGGER
- [7] IEEE43-2000 (R2006) – IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery
- [8] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Generatorów Synchronicznych. Energopomiar Elektryka Sp. z o.o., Gliwice, (2009)
- [9] Sasic M., Sedding H. and Stone G., Improvements in Direct Current Stator Winding Insulation Testing, 2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Knoxville, TN, USA, (2020), 278-281, doi: 10.1109/EIC47619.2020.9158653
- [10] Szymaniec S.: Diagnostyka stanu izolacji silników indukcyjnych wysokonapięciowych off-line w przemyśle. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, (2005), nr.71