

doi:10.15199/48.2024.03.16

Procedury diagnostyczne badania izolacji maszyn elektrycznych

Streszczenie. Artykuł opisuje stosowane w praktyce procedury diagnostyki off-line dla silników elektrycznych niskiego i średniego napięcia. Poza pomiarem rezystancji izolacji do eksploatacji wprowadza się metody impulsowe z dodatkową rejestracją impulsów wyładowań niezupełnych. Analiza odpowiedzi izolacji na oscylacyjne przebiegi napięcia zasadniczo poprawia możliwość wykrywania wewnętrznych uszkodzeń - w tym międzyzwojowych – w układzie izolacyjnym, co przedstawiono dla omówionego przypadku silnika elektrycznego średniego napięcia.

Abstract. The article describes practical off-line diagnostic procedures for low and medium voltage electric motors. In addition to insulation resistance measurement during operation, impulse methods with additional registration of partial discharges impulses are introduced. The analysis of the insulation response to oscillatory voltage waveforms fundamentally improves the ability to detect internal faults, including inter-turn faults, in the insulation system. This is presented for the discussed case of a medium-voltage electric motor. (**Diagnostic procedures for testing the insulation of electric machines.**)

Słowa kluczowe: izolacja elektryczna, wyładowania niezupełne, testy napięciem oscylacyjnym, diagnostyka off - line.

Keywords: electrical insulation, partial discharges, oscillation voltage tests, off-line diagnostics.

Wstęp

Na przestrzeni kilkunastu ostatnich lat w Polsce można zauważyć wzrost świadomości i dbałości w zarządzaniu parkiem maszyn elektrycznych w fabrykach i firmach produkcyjnych. Zalecenia pomontażowe i diagnostyczne proponują różne metody, które z uwagi na konieczność zapewnienia wysokiej niezawodności podczas procesu produkcji są rozwijane [1-4, 7]. W związku z tym zakłady produkcyjne często wypracowują własne podejście do diagnostyki, tak aby minimalizować występowanie nieoczekiwanych awarii, co wiąże się z czasem przestoju w produkcji i stratami finansowymi. W praktyce obserwuje się wprowadzanie złożonych metod pomiarowych off-line w celu uzyskania jednoznacznej odpowiedzi co do stanu technicznego maszyny elektrycznej, które czasem są rozszerzane o monitoring niektórych parametrów w diagnostyce prowadzonej podczas pracy urządzeń. Zestawianie proponowanych metod pomiarowych off-line dla silników elektrycznych i związanych z nimi niektórych wielkości kryterialnych pokazano w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie metod pomiarowych stosowanych w diagnostyce silników na podstawie wybranych norm technicznych oraz zaleceń producentów

parametr / metoda	E - 04700 [2]	IEEE43-2000 [3]	metoda wg [8]	Megger - Baker DX
rezystancja izolacji	x	x	x	x
współczynniki DAR i PI	x	x	x	x
metoda SV			x	x
metoda DD lub napięcie powrotne		x	x	x
wyładowania niezupełne				x
napięcie impulsowe				x

Na podstawie podanego zestawienia można zaobserwować zwiększenie liczby testów diagnostycznych i wprowadzanie zaawansowanych metod oceny stanu technicznego izolacji nawet za pomocą pomiaru wyładowań niezupełnych przy złożonych wymuszeniach napięciowych. Aparatura do wymienionych zastosowań ma charakter przenośny, co umożliwia sprawdzanie maszyn elektrycznych w warunkach eksploatacyjnych.

W artykule na podstawie analizy wyników badań wybranego silnika elektrycznego o dość dobrym stanie technicznym pokazano możliwości szczegółowej analizy stanu technicznego prowadzące do określenia miejsc występowania wad, co umożliwi wykonanie skutecznej naprawy i stwierdzenia poprawności jej wykonania.

Metody diagnostyki silników elektrycznych

Ocena stanu technicznego silników elektrycznych odbywa się w większości przypadków na podstawie pomiaru rezystancji izolacji, której wynik informuje użytkownika nie tylko o poprawności ochrony podstawowej przed porażeniem prądem elektrycznym, ale też dodatkowo stanowi istotne kryterium diagnostyczne [1, 2, 3, 4]. W badaniach tych korzysta się z klasycznej, technicznej metody pomiaru rezystancji izolacji w układzie z poprawnie mierzonym prądem. Układ izolacyjny silnika w uproszczeniu przedstawia się jako równoległe połączenie: rezystancji izolacji R , pojemności C maszyny oraz szeregowo połączonych elementów R_a , C_a odpowiadających za przepływ prądu polaryzacyjnego. Szczególnie kłopotliwy w wyznaczaniu wartości rezystancji izolacji jest prąd polaryzacyjny przepływający przez pojemność C_a – wynikający z ustawiania się dipoli (ładunków) w linii pola elektrycznego wewnątrz dielektryka. Dipole powrócą do swoich pozycji spoczynkowych, stanu nieuporządkowanego, gdy napięcie probiercze zostanie odłączone. Zjawisko to może nie być zaobserwowane, jeśli tylko występuje jakakolwiek z podanych przyczyn: zbyt wysoka temperatura izolacji, zawilgocenie, zanieczyszczenie zabrudzeniami. W związku z powyższym w zabrudzonych lub zawilgoconych materiałach izolacyjnych prawidłowy pomiar prądu przewodzenia może wystąpić po krótkim czasie, w innych w dobrym stanie technicznym konieczne jest wydłużenie czasu pomiaru do np. 10 minut. Tylko wówczas, kiedy wystąpi ustalenie się wartości mierzonego prądu uzyskuje się prawidłowy metrologicznie wynik pomiaru. Prąd przewodzenia w stanie ustalonym zazwyczaj charakteryzuje się niewielką wartością i zawiera dwie składowe: skrośną (prąd płynący wewnątrz objętości izolacji) oraz powierzchniową (prąd płynący wzdłuż ścieżek przewodzących po powierzchni materiału izolacji).

W trakcie opisywanego pomiaru istotne znaczenie dla jego poprawności ma wybór napięcia probierczego i czasu jego przyłożenia, zastosowanie właściwego układu pomiarowego (metoda dwu i trójprzewodowa) oraz uwzględnienie temperatury izolacji na końcowy wynik pomiaru, który należy przeliczyć na tzw. temperaturę odniesienia [3, 6] z uwzględnieniem rodzaju zastosowanych materiałów izolacyjnych.

W przypadku maszyn elektrycznych wyższej mocy takie podejście może być nie wystarczające. Dla lepszej jakości oceny i wykrycia błędów montażowych lub postępującego

procesu starzenia proponuje się metodę wielokryterialną Glinki [8] polegającą na wykonaniu następujących pomiarów: rezystancji izolacji, rezystancji izolacji przy różnych wartościach napięcia w celu wyznaczenia tzw. napięcia przebicia przez ekstrapolowanie wyników w kierunku wyższych napięć, analizy przebiegu napięcia powrotnego i prądu upływowego. Stosuje się także inne rozwiązania, jak np. w przypadku zakładów stosujących dużą liczbę silników w procesie produkcyjnym. W jednym z zakładów Pomorza diagnostykę prowadzi się dla ponad 5000 silników o napięciach znamionowych 6,3 kV, 690 V, 400 V, 230 V, i mocach czynnych z zakresu 0,08 ÷ 2700 kW w której analizuje się parametr zgodnie z wytycznymi dla przyrządu Baker DX firmy Megger:

- parametry impedancyjne uzwojenia – rezystancja uzwojenia, indukcyjność, pojemność układu izolacyjnego (test impedancji),
- pomiary izolacji napięciem stałym DC w zakresie - rezystancja izolacji, pomiary napięciem narastającym (SV), DC-HiPot – próba napięciowa napięciem stałym,
- pomiary izolacji napięciem impulsowym oscylacyjnym.

Badanie parametrów impedancyjnych uzwojenia pozwala określić różnice pomiędzy poszczególnymi fazami oraz w zestawieniu z wcześniejszymi wynikami pomiarów. Pomiary indukcyjności i pojemności wykonuje się dla kilku częstotliwości, a w przypadku określenia indukcyjności dla wyznaczonych kątów obrotu wirnika. Dodatkowo wyznacza się kąt fazowy impedancji, który wskazuje na degradację układu izolacyjnego, jeśli zasadniczo odbiega od 90 stopni.

W trakcie pomiarów rezystancji izolacji przy napięciu stałym wykonuje się typowe badania odpowiedzi na skok jednostkowy napięcia (parametry R_{15} , R_{60} i R_{300}) i współczynniki absorpcji (DAR) oraz polaryzacji (PI). Badanie wykonuje się także przy wzroście napięcia (test SV) z rozszerzeniem o próbę napięciową DC połączoną z pomiarem prądu upływu. Pomiary rezystancji wykonane w układzie doziemnym i międzyfazowym, umożliwiają w przypadku odpowiedniej wartości napięcia określenie: miejsc uszkodzeń w izolacji żłobkowej lub emalii izolacyjnej na powierzchni przewodów, występowania nalotów powierzchniowych w postaci kurzu, pyłów, odparowanej cieczy, zanieczyszczeń przemysłowych, nieprawidłowej jakości połączeń prądowych do uzwojeń.

Niestety, w wielu przypadkach, szczególnie dla niewielkich rozmiarów wad, uzyskuje się prawidłowe wyniki badań, nawet przy dość zaawansowanym etapie starzenia układu izolacyjnego. W związku z tym opracowano i wdrożono metody oparte o wykorzystanie napięć impulsowych skutecznych w wykrywaniu uszkodzenia izolacji pomiędzy zwojami silnika w uzwojeniu. Testy udarowe polegają na wytworzeniu na zaciskach uzwojeń oscylacyjnego impulsu napięcia o dużej stromości narastania i analizie różnic napięcia pomiędzy fazami. Na podstawie różnic pola $F_i^{(1)}$, $F_i^{(2)}$ zawartego pomiędzy zarejestrowanymi próbkami ($1+N_{pts}$) wartości chwilowych napięcia poszczególnych faz ocenia się parametr względnej wartości odchylenia EAR (Error Area Ratio) według poniższej zależności (1):

$$(1) \quad EAR_{1-2} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{pts}} Abs(F_i^{(1)} - F_i^{(2)})}{\sum_{j=1}^{N_{pts}} Abs(F_j^{(1)})}$$

Dodatkowo w próbach z programowaną, krokowo zwiększaną amplitudą impulsu można obserwować różnice napięcia między kolejnymi udarami. Nagła zmiana napięcia wskazuje na wystąpienie przeskoku i jest podstawą stwierdzenia pogorszenia izolacji zwojowej. Podczas rejestracji napięć impulsowych niektóre przyrządy umożliwiają dodatkową analizę liczby impulsów wyładowań

niezpełnych (wnz). Zaawansowane metody analizy wnz stosowane wyłącznie przez producentów silników wykorzystują metodę rozdzielczo – fazową oraz rejestrację wnz przy zmianie napięcia, co zasadniczo rozszerza możliwości określenia rodzaju uszkodzeń z wskazaniem ich typu – wtrącina powietrzna, rozwarstwienie izolacji, zanieczyszczenie powierzchniowe lub problemy ochrony przeciwjarzeniowej prowadzące do wnz ślizgowych [5].

Przykład diagnostyki silnika średniego napięcia

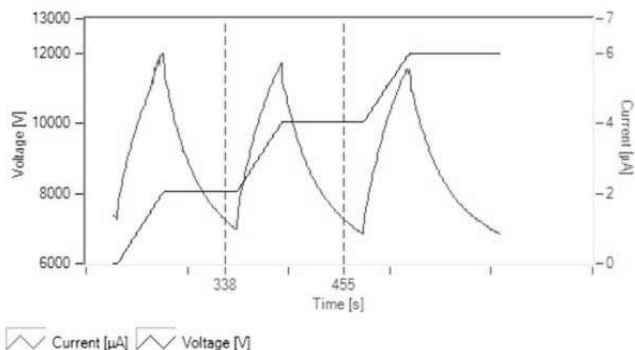
W celu przedstawienia sposobu oceny stanu technicznego silnika pokazano wyniki pomiarów dla silnika indukcyjnego o mocy 748 kW (prąd znamionowy 80 A) pracującego przy napięciu znamionowym 6,3 kV.

We wstępnych pomiarach impedancyjnych uzyskano dane zawarte w Tabeli 2, które wskazują na symetrię uzwojeń i ich prawidłowy stan techniczny.

Tabela 2. Wyniki pomiarów impedancyjnych dla poszczególnych uzwojeń

wskaźnik diagnostyczny	L1 – L2	L2 – L3	L3 - L1	odchylenie od X_{avg} [%]	wartość średnia X_{avg}
rezystancja [mΩ]	454,2	454,9	455,6	0,15	454,9
impedancja f=60 Hz [mΩ]	21218	21227	21207	0,05	21217
kąt fazowy [°]	83,9	83,9	83,9	-	83,9
indukcyjność [mH]	55,962	55,958	55,934	0,06	55,961
tangens delta	0,107	0,107	0,107	-	0,107
współczynnik jakości QF	9,311	9,372	9,361	0,40	9,348

W pomiarach rezystancji izolacji wykonywanego łącznie dla układu izolacyjnego wszystkich 3 uzwojeń uzyskano dla przyłożonego napięcia 6 kV dość znaczną niestabilność, $R_{60}=4262 \text{ M}\Omega$, $DAR(R_{60}/R_{15})=2,8$; $PI(R_{300}/R_{60})=2,41$.

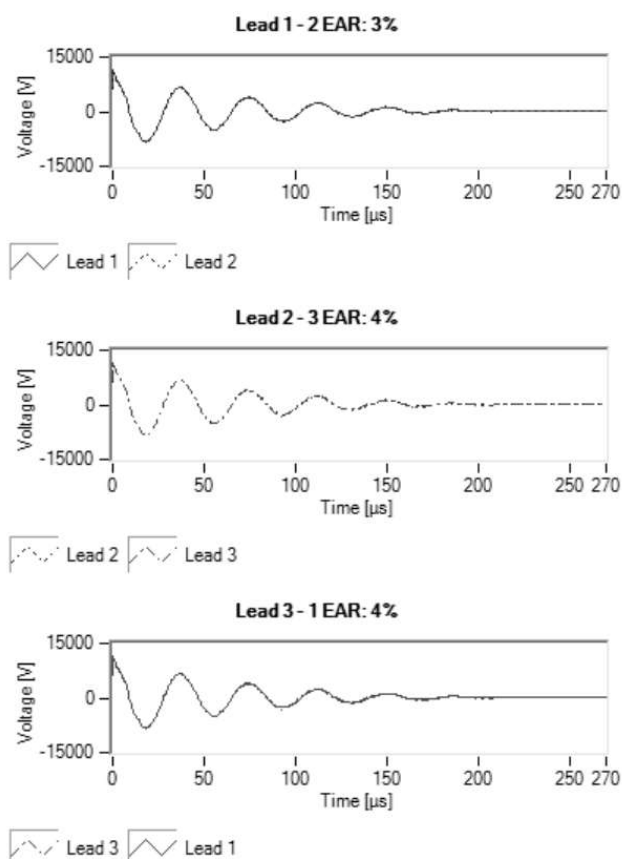


Rys. 1. Przebieg prądu upływowego przy napięciu 8, 10 i 12 kV

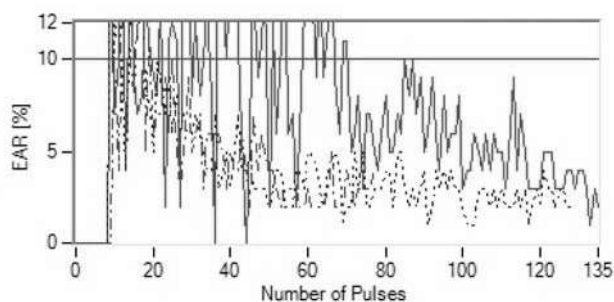
W próbie napięciem narastającym (rys. 1) poziom rezystancji dla: 6 kV wynosił 4262 MΩ, 8 kV – 7970 MΩ, 10 kV – 10276 MΩ i 12 kV – 9539 MΩ. Niestety podane wyniki oprócz stwierdzenia prawidłowego poziomu izolacji przekraczającej powszechnie przyjęty poziom krytyczny (np. według [2] 7 MΩ) nie wnoszą dla obserwowanego przypadku silnika istotnych informacji diagnostycznych, które być może pojawiłyby się przy porównywaniu wyników dla kolejnych faz (oczekuje się wówczas odchylenia nie przekraczającego 25%). Z uwagi na długą stałą czasową ($T > 60 \text{ s}$) towarzyszącą zmianie rezystancji w czasie obserwuje się na rysunku 1 ciągle wzrost rezystancji izolacji oraz utrzymywanie wartości prądu upływowego nawet podczas zwiększania wartości napięcia.

Dopiero badania udarowe przy napięciu 11 kV wskazują na podstawie porównania przebiegu napięcia udarowego przyłożonego do poszczególnych faz na uszkodzenie

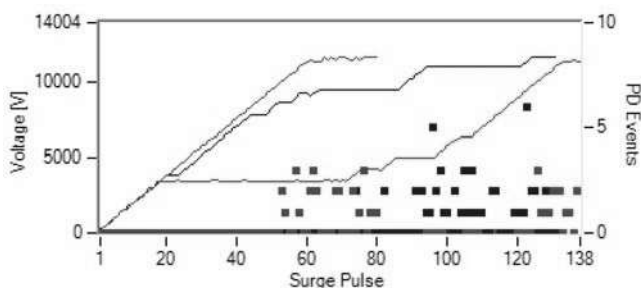
izolacji zwojowej bądź zewnętrznej powłoki. Z rysunku 2 przy badaniu ustalonym poziomem napięcia około 11,5 kV nie widać istotnych różnic pomiędzy stanem izolacji uzwojeń niezależnie od liczby przyłożonych udarów (1, 9 lub 21).



Rys. 2. Różnice w przebiegu napięcia oscylacyjnego dla izolacji uzwojeń L1-L2, L2-L3, L3-L1 przy amplitudzie udaru 11,5 kV



Rys. 3. Różnice EAR Pulse to Pulse w przebiegu napięcia oscylacyjnego dla izolacji poszczególnych uzwojeń przy wzroście amplitudy udarów



Rys. 4. Aktywność wnz w zależności od numeru przyłożonego udaru i występującego przy nim poziomu napięcia

Natomiast w próbie stopniowego zwiększania poziomu napięcia udarowego stwierdzono w jednej z faz zwarcia wewnętrzne międzyzwojowe (rys. 3). Występuje wówczas zauważalna znaczna anomalia EAR względem pozostałych faz. Powoduje to przy wyższych napięciach pojawianie się wyładowań niezupełnych (rys. 4). Dla udaru w którym wystąpiło >5 impulsów wnz zarejestrowano poziom napięcia wzbudzenia o wartości 11100 V.

Podsumowanie i wnioski

Prawidłowa diagnostyka izolacji silnika jest możliwa wyłącznie przy zastosowaniu kilku metod pomiarowych, które oprócz powszechnie stosowanych metod pomiaru rezystancji uzwojeń i izolacji powinny zostać rozszerzone o metody impulsowe najlepiej z opcją pomiaru wyładowań niezupełnych.

Tradycyjne metody pomiaru impedancji uzwojeń i rezystancji izolacji są skuteczne wyłącznie przy znacznych uszkodzeniach układu izolacyjnego przy założeniu uwzględnienia temperatury izolacji i indywidualnego pomiaru dla poszczególnych uzwojeń oddzielnie dla izolacji doziemnej i międzyfazowej.

Wykonane pomiary pozwoliły stwierdzić, że przyczyna wystąpienia wnz wynikała z zastosowania na etapie produkcji wadliwego izolatora. Wymiana wszystkich izolatorów i ponowne pomiary potwierdziły sprawność jednostki.

Zastosowanie diagnostyki izolacji silnika wieloma metodami pozwala na poprawnie ocenić wykonany remont, czy też stan silnika aby mieć pewność, że nie będzie przyczyną nieplanowego postępu produkcyjnego [7, 8].

Dla uzyskania wysokiej skuteczności diagnostyki konieczne jest analizowanie wyników pomiarów przeprowadzanych w kolejnych badaniach kontrolnych.

Autorzy: dr hab. inż. Marek Olesz, marek.olesz@pg.edu.pl; mgr inż. Marcin Gulczyński, marcin.gulczynski@pg.edu.pl; dr hab. inż. Marek Adamowicz, marek.adamowicz@pg.edu.pl; Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

LITERATURA

- [1]. PN-EN IEC 60034-27-4:2018 Maszyny elektryczne wirujące. Część 27-4: Pomiar rezystancji izolacji i wskaźnika polaryzacji izolacji uzwojenia maszyn elektrycznych wirujących.
- [2]. PN-E-04700:1998 Wytyczne przeprowadzania pomontażowych badań odbiorczych
- [3]. IEEE43-2000 (R2006) – IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery
- [4]. Zientek P., Łukaszewicz-Szmytka W, Metody badań izolacji głównej maszyn elektrycznych dużej mocy przy wykorzystaniu napięcia stałego, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* Nr 2/2019 (122)
- [5]. Kang A. i inni, Development and pattern identification of end-winding discharge under effect of relative humidity and temperature for HV motors, *High Volt.* (2020), Vol. 5 Iss. 4, pp. 434-443.
- [6]. Gupta B. K., Stone G. C.; Stein J., Stator winding hipot (high potential) testing, *IEEE Electrical Insulation Conference* (2009), DOI: 10.1109/EIC.2009.5166381.
- [7]. Kim H. i inni, Experience With Stator Insulation Testing and Turn/Phase Insulation Failures in the Power Generation Industry, *IEEE Transactions on Industry Applications* (2018), Volume: 54, Issue: 3
- [8]. Glinka T.: Stan techniczny izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych i ich parametry wyznaczone napięciem stałym. *Prace Naukowe IMNiPE Politechniki Wrocławskiej* Nr 48, 20/2000.