

# Monitorowanie online stanu technicznego izolacji silników indukcyjnych

Ryszard Nowicki

## Skróty

- HFCT – High Frequency Current Transformer;
- HSCT – High Sensitivity Current Transformer;
- HP – Horse Power = Koń Mechaniczny;
- KS – Kondensator Sprzęgający;
- ST – Stan Techniczny;
- UR – Utrzymanie Ruchu;
- WD – Współczynnik Dyssypacji;
- WNZ – Wyładowania Niezupełne.

## Wprowadzenie

W [1] omówiono główne przyczyny uszkodzeń silników. Z prezentowanych statystyk wynika, że o dominujących uszkodzeniach decyduje konstrukcja silnika. W przypadku silników mniejszych mocy, zasilanych tak niskim, jak i średnim napięciem, posiadają one na ogół wirniki łożyskowane tocznie i to właśnie łożyska stanowią dominującą przyczynę uszkodzeń (~51%), a przyczyną drugą w kolejności są uszkodzenia stojana (~25%). W przypadku silników większych mocy, pracujących na ogół na średnich napięciach, wirniki są w przeważającej większości przypadków łożyskowane ślizgowo. Dla takich silników to właśnie uszkodzenia stojana stają się dominujące, bowiem stanowią ~66% wszystkich uszkodzeń.

Niespodziewane uszkodzenia izolacji silników powodują przerwy produkcyjne (lub konieczność obniżenia produkcji), prowadzące w konsekwencji do dużych strat produkcyjnych. W [2] pokazano oszacowanie strat produkcyjnych będących konsekwencją uszkodzenia silników dla różnych branż. W niektórych branżach mogą one dochodzić nawet do kilkuset tysięcy złotych na godzinę. W przypadku energetyki uszkodzenie silnika o mocy powyżej 1 MW może spowodować straty dochodzące do 100 tysięcy złotych na awarię.

Ze względu na wysokie konsekwencje finansowe uszkodzeń napędów elektrycznych ważne jest posiadanie lepszych narzędzi umożliwiających wiarygodne diagnozowanie ich stanu technicznego (= ST). Narzędzia takie winny umożliwiać odpowiednio wcześniejszą predykcję zmiany ST i w konsekwencji winny dawać służbom utrzymania ruchu (= UR) możliwość przygotowania się do optymalnej wymiany/naprawy silnika.

Celem artykułu jest omówienie współczesnych możliwości monitorowania ST izolacji stojana silników w warunkach online.

## 2. Zmiana stanu technicznego izolacji

Silnik nowy lub silnik po remoncie, w chwili jego instalacji (punkt A krzywej P-F na rys. 1) powinien posiadać izolację uzwojeń bliską idealnej. Stąd w prezentowanym układzie

**Streszczenie:** Celem publikacji jest przedstawienie nowego podejścia na rzecz monitorowania online izolacji silników. Tak więc podejście to jest dedykowane wyłącznie stojanowi silnika. W przypadku silników większych mocy, które posiadają wirniki zamocowane w łożyskach ślizgowych, ponad 60% uszkodzeń silników jest spowodowanych uszkodzeniem izolacji. Z tego względu potrzebne jest wiarygodne narzędzie umożliwiające ocenę stopnia zaawansowania osłabienia izolacji stojana. Opisane podejście stanowi dla szeregu silników podejście alternatywne w stosunku do możliwości oceny stanu technicznego z pomocą wyładowań niezupełnych i wykorzystuje specyficzne czujniki charakteryzujące się wysoką czułością i doskonałym współczynnikiem sygnału do szumu. Czujniki podłączone do specjalizowanego monitora umożliwiają ocenę postępującej degradacji izolacji stojana w reżimie online.

Słowa kluczowe: silniki elektryczne, izolacja stojana, współczynnik rozproszenia monitorowanie stanu technicznego, monitorowanie online

## 🇬🇧 TECHNICAL CONDITION ONLINE MONITORING OF INDUCTION MOTOR INSULATION

**Abstract:** A goal of the paper is a presentation of new approach for condition management of aggregates driven by medium voltage electrical motors. The approach exclusively allows evaluation of stator technical condition. In the case of critical aggregates driven by motors with slide bearings over 60% of motor malfunctions is due to stator failures. Therefore, it is important to have a reliable tool that recognizes stator aging. The approach is an alternative for the partial discharge one, and uses high sensitivity current transformers. Post-processing of signals connected to this malfunction-dedicated monitor allows online information about stator aging progress.

Keywords: electric motors, stator isolation, dissipation factor, technical condition monitoring, monitoring online

współrzędnych, dla którego oś pionowa opisuje odporność na uszkodzenie R, krzywa startuje z punktu bliskiego 100% R. Postępująca degradacja izolacji następuje od czasu pierwszego uruchomienia silnika, natomiast fakt pogorszenia jej ST jest stwierdzany w chwili  $T_p$ .

Na rys. 1 pokazano możliwe scenariusze pogarszania się ST izolacji uzwojeń. W przypadku A mamy do czynienia ze starzeniem postępującym monotonicznie, natomiast w przypadku B, ze względu na wpływy środowiskowe (takie jak np. wyładowa-

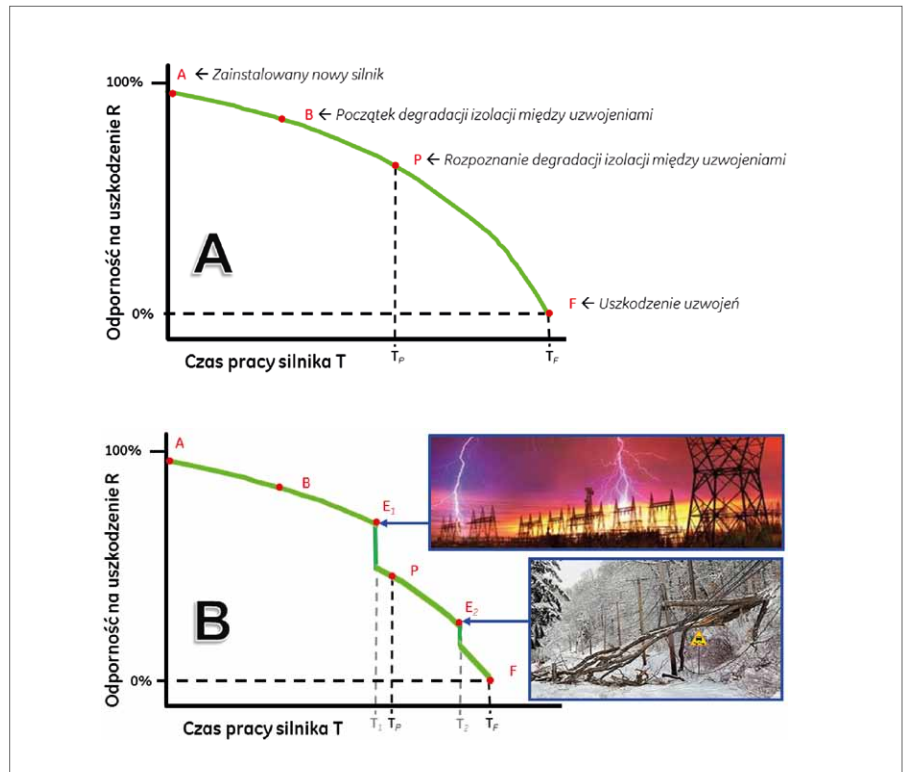
nie atmosferyczne w chwili  $T_1$  oddziałujące chwilowo na linię zasilającą silnika, zwarcie w napowietrznej linii zasilającej w chwili  $T_2$ ) mogące powodować chwilowe znaczne przepięcia, następuje skokowe osłabienie izolacji wpływające bezpośrednio na skrócenie żywotności silnika (tzn. przyspieszenie chwili wystąpienia jego uszkodzenia funkcjonalnego  $T_F$ ).

Na rys. 2 pokazano skutki chwilowych zaburzeń zasilania, jakie wystąpiły na linii produkcyjnej. W górnej części rysunku zamieszczono uproszczony schemat zasilania silnika pracującego na średnim napięciu oraz zaznaczono symbolicznie miejsce wyładowania atmosferycznego. W dolnej części tego rysunku pokazano zmianę prądów dla wszystkich trzech faz, które zarejestrowano w momencie tegoż wyładowania (oś pozioma wykresów jest osią czasu wyskalowaną w cyklach odpowiadających częstotliwości napięcia w linii zasilającej). W prawym górnym narożniku zamieszczono natomiast fotografię prezentującą uszkodzenie stojana będące konsekwencją opisanego zdarzenia.

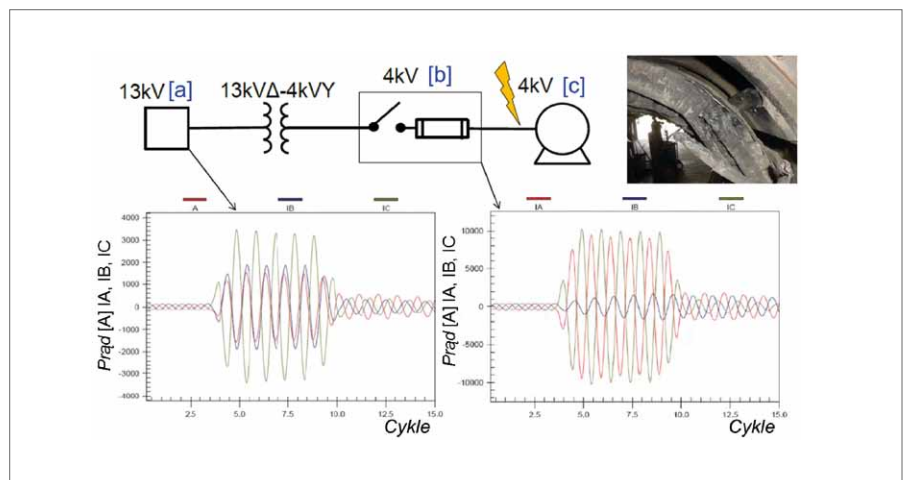
Z przedstawionych wykresów wynika, że:

- dla obu napięć (przed transformatorem i za nim) w chwili wyładowania pojawiły się prądy wielokrotnie przekraczające pobór prądu w warunkach ustabilizowanej pracy agregatu (proces ten trwał kilka cykli);
- prądy pobierane przez agregat po zaniku wyładowania są kilkukrotnie wyższe niż to miało miejsce w okresie poprzedzającym oraz dodatkowo są zróżnicowane w fazach;
- w czasie wyładowania, po stronie przed transformatorem, obserwuje się dla jednej z faz (IC) prąd prawie dwukrotnie wyższy niż dla pozostałych faz (IA i IB); zjawisko to mogło wpłynąć na zmianę ST innych urządzeń zasilanych z tej samej linii 13 kV.

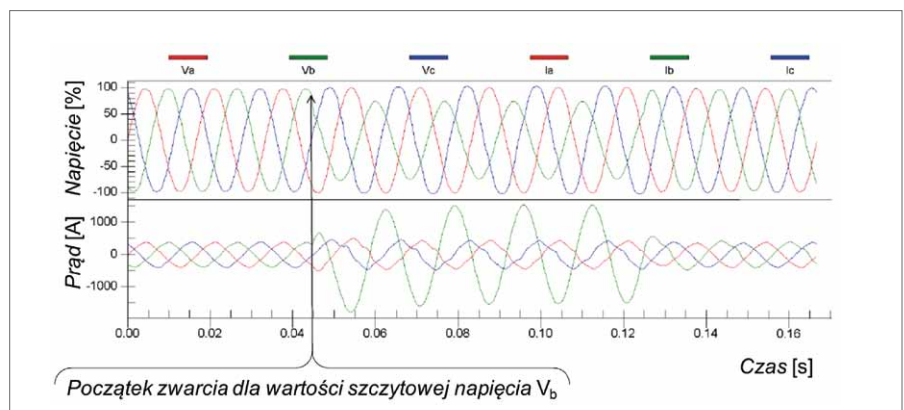
Na rys. 3 pokazano inny przykład zakłócenia zasilania, w tym przypadku spowodowanego chwilowym zwarcie między jedną z faz a przewodem zerowym. Widoczne jest chwilowe obniżenie napięcia szczytowego tej fazy, wynoszące ~20% napięcia nominalnego. Proces ten (podobnie jak opisany powyżej dla wyładowania atmosferycznego) także trwał kilka cykli. Natomiast w tym przypadku obserwowany jest kilkukrotny wzrost



Rys. 1. Zmiana odporności na uszkodzenie izolacji  $R(T)$ : (A) monotoniczna; (B) skokowa



Rys. 2. Zwarcie międzyfazowe w silniku w wyniku wyładowania atmosferycznego: [a] linia 13 kV; [b] szafa sterownicza silnika; [c] silnik 4 kV [ 3]



Rys. 3. Zmiana napięć i prądów w napowietrznej linii zasilającej 13 kV w wyniku zwarcia między fazą B i przewodem zerowym spowodowanym przez drzewo [ 3]

prądu pobieranego z tej fazy oraz niezmienione zapotrzebowanie prądowe z pozostałych dwóch faz.

Pokazane na rys. 1 b zdarzenia są „optymistyczne”, bowiem nie prowadzą do całkowitego uszkodzenia urządzeń elektrycznych zasilanych takimi liniami. W praktyce, w przypadku słabych systemów zabezpieczeń, może dojść do poważnego uszkodzenia zasilanych urządzeń.

Ocenia się, że 80% uszkodzeń izolacji urządzeń średnionapięciowych ma charakter przypadkowy, a jedynie 20% jest wynikiem naturalnego starzenia się izolacji w wyniku długotrwałego użytkowania [4]. W przypadku urządzeń wysokonapięciowych statystyki IEEE oceniają, że problemy z izolacją stanowią 90% wszystkich problemów ruchowych.

Pokazane na rys. 1 b przykłady wpływów środowiskowych na skokowe obniżenie odporności izolacji, na uszkodzenie R prowadzące do skrócenia jej żywotności, nie wyczerpują wszystkich przyczyn takiej zmiany. Przyczyny obniżenia R mogą leżeć także bezpośrednio po stronie agregatu lub/i instalacji przepływowej, z którą on współpracuje.

Zmiana ST napędzanej maszyny lub zmiany w środowisku jej pracy (np. zmiana pola temperatur, zmiany poziomów drgań) mogą również wpływać na zmianę gradientu krzywej  $R(T)$  zarówno przyspieszając (np. z powodu wzrostu temperatury i/lub poziomu drgań), jak i spowalniając (np. w konsekwencji obniżenia pola temperatur i/lub wymuszeń dynamicznych).

### 3. Ocena stanu technicznego izolacji silników

Defekty izolacji (takie jak np. rozwarstwienie, zanieczyszczenie czy zawilgośnienie) można łatwo stwierdzić z pomocą testowania metodami prądu stałego lub dokonując pomiaru współczynnika strat dielektrycznych. Metody takie są stosowane i podlegały rozwojowi na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat. Kryteria oraz wartości dopuszczalne znalazły swoje odzwierciedlenie w szeregu standardów.

Jednymi z najstarszych są dokumenty opracowane przez Komitet Maszyn Elektrycznych Stowarzyszenia Inżynierów Energetyki IEEE. Część z nich do czekała się reedycji<sup>1</sup> w kierunku unowo-

czenia wersji pierwotnej, a niektóre z dokumentów najstarszych przestały obowiązywać.

Najważniejszymi i obowiązującymi aktualnie dokumentami są [5]:

- IEEE 43-2000: formułuje zalecenia do badań elektrycznych maszyn wirnikowych; standard ten opisuje procedury oceny nowych i starych uzwojeń z pomocą pomiaru rezystancji izolacji (lub prądu upływowego) napięciem regulowanym;
- IEEE 56-1977: jest to przewodnik dla obsługi izolacji dużych maszyn wirnikowych zmiennie-prądowych (10 MVA i większe), wykorzystujący m.in. testowanie wysokim napięciem AC;
- IEEE 95-2002: rekomenduje postępowanie dla testowania izolacji maszyn elektrycznych AC (2,3 kV i powyżej) z pomocą wysokiego napięcia stałego DC;
- IEEE 286-2000: rekomenduje postępowanie dla pomiaru współczynnika mocy poprzez test *tip-up*;
- IEEE 522-2004: jest to przewodnik do testowania maszyn elektrycznych AC o mocy w przedziale 0,2–100 MW;
- IEEE 1434-2000: jest to przewodnik do testowania elektrycznych maszyn wirnikowych z pomocą WNZ.

Ww. standardy są wykorzystywane współcześnie w większości krajów świata celem oceny ST izolacji uzwojeń stojana zarówno na etapie produkcji, jak i dla maszyn już użytkowanych<sup>2</sup>. Niektóre z nich znajdują odpowiedniki w standardach krajowych (np. w Polsce: [6] i [7]).

Wszystkie ww. standardy IEEE dotyczą badań w warunkach offline, a jedynym wyjątkiem jest ostatni z wymienionych, który również odnosi się do monitorowania ST izolacji w warunkach online.

### 4. Ocena stanu technicznego silników online

W [8] omówiono tradycyjne techniki monitorowania silników elektrycznych online. W celu oceny ST wykorzystywane są przede wszystkim pomiary temperatury i drgań. W przypadku łożysk tocznych winny być stosowane czujniki umożliwiające pomiar drgań obudów łożysk (standard [9] zaleca stosowanie piezoelektrycznych czujników drgań). Natomiast w przypadku węzłów łożyskowych ślizgowo winny być stosowane czujniki bezkontaktowe (przede wszyst-

kim czujniki wiropędowe), które umożliwiają nie tylko nadzór drgań wirnika, ale także kontrolę jego położenia w łożysku (w „luzie łożyska”) i dzięki temu umożliwiają ocenę poprawności osiowania poszczególnych elementów agregatu<sup>3</sup>.

O ile czujniki temperatury nadzorujące uzwojenia stojana monitorują lokalnie stopień ich nagrzania i w związku z tym w przypadku wzrostu temperatury informują o wzroście podatności na uszkodzenia, o tyle żadne z omawianych w [8] technik nie są w stanie pomóc w ilościowej ocenie zaawansowania osłabienia izolacji obwodów stojana.

Bogaty przegląd metod offline i online oceny ST izolacji został zaprezentowany w [5] i [10]. Można zauważyć, że niektóre z metod wykorzystywanych w przeszłości jako metody offline'owe doczekały się rozwiązań technicznych umożliwiających ich wykorzystywanie w reżimie online. Szereg omówionych w [10] metod sprawia wrażenie twórczych poszukiwań możliwości oceny ST izolacji. Metody zaakceptowane w praktyce w celu zastosowania monitorowania online to przede wszystkim (a) pomiary temperatury, (b) pomiary WNZ oraz (c) pomiar współczynnika stratności  $tg\delta$ .

W związku z tym, że nadzór temperatury został omówiony w [8], poniżej skoncentrujemy się na metodach wykorzystujących WNZ oraz  $tg\delta$ .

Ocena ST izolacji z pomocą WNZ została wprowadzona przez firmę WESTINGHOUSE w roku 1949 i po raz pierwszy została zastosowana w roku 1951 w przedsiębiorstwie ONTARIO HYDRO w celu oceny ST stojanów generatorów pracujących w elektrowni wodnej. W tym celu wykorzystywano zestaw sprzętu przenośnego zawierający m.in. oscyloskop do wizualizacji wyników pomiarów. Pierwotnie, jak każde nowego typu badanie diagnostyczne, ocena WNZ była realizowana w oparciu o testy offline. Dopiero w latach 90. XX w. zaczęły się pojawiać systemy dedykowane monitorowaniu ST w oparciu o pomiary WNZ online.

Istnieje kilka rozwiązań technicznych na rzecz pozyskiwania sygnałów WNZ. Są to m.in. kondensatory sprzęgające (= KS) oraz transformatory prądowe wysokiej częstotliwości (= HFCT). Do analizy WNZ wykorzystywane są specjalizowane systemy monitorowania,

charakteryzujące się sporą różnorodnością tak w zakresie paśmie częstotliwościowego wykorzystywanego do analizy WNZ, jak i sposobu wnioskowania o ST. Przykładowe wyniki zastosowania pomiarów WNZ realizowanych z pomocą cewki Rogowskiego dla oceny ST wirnikowych maszyn elektrycznych (badania realizowane w warunkach normalnej pracy tych maszyn) można znaleźć np. w [11].

Przez długi okres czasu WNZ były praktycznie jedyną techniką umożliwiającą efektywne monitorowanie online ST stojanów i prognozowania jego zmiany, co umożliwia pełniejszą realizację predykcyjnej strategii UR dla agregatów krytycznych napędzanych silnikami elektrycznymi, niż to jest możliwe, kiedy się bazuje na pomiarach wyspecyfikowanych w [1] i [8].

W szeregu przypadków słabością systemów monitorowania WNZ jest brak z jednej strony wystarczająco dobrego wzorca umożliwiającego kategoryzację oceny, z drugiej natomiast (co jest ważne dla znacznej grupy aplikacji) niezbędna jest wystarczająco dobra filtracja zakłóceń pochodzących ze środowiska, w którym pracuje silnik.

Powyższe przyczyny stały u podstaw poszukiwania lepszej metody online oceny ST izolacji stojanów niż możliwe z pomocą WNZ.

Tradycyjnym podejściem w ocenie offline ST izolacji są metody wykorzystujące [12], [13]:

- napięcie zmienne (pomiar kąta stratności izolacji  $\text{tg}\delta$ , pomiar wyłączeń niezupełnych WNZ-AC oraz próby napięciowe stosowane tym bardziej niechętnie, im większa jest świadomość właściciela maszyny co do osłabiania izolacji w konsekwencji prowadzenia tych prób<sup>4</sup>, nawet wtedy, gdy są to próby fabryczne);
- napięcie stałe (induktorowe pomiary rezystancji izolacji [cechujące się tym większym możliwym błędem na rzecz oceny jakości izolacji, czym większe jest zawilgocenie silnika], wielokryterialna metoda prądu stałego czy także pomiary wyłączeń niezupełnych WNZ-DC prowadzonych przy zadawaniu napięć stałych).

Wiele lat po wdrożeniu WNZ do badania izolacji generatorów technikę tę zaczęto wykorzystywać również dla oceny izolacji silników elektrycznych. Omówienie takich zastosowań dokonano m.in. [13] i [14].

Metodą wykorzystywaną w poprzednich dekadach do badań izolacji w warunkach offline [13] był pomiar współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$ , który to pomiar można było przeprowadzić, podając na badany silnik napięcie zmienne z pomocą mostka Scheringa. Współcześnie monitorowanie współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  doczekało się rozwiązania technicznego umożliwiającego realizację pomiaru w warunkach online [15]. Technika online monitorowania ST izolacji silnika posiada zarówno pewne zalety, jak i wady w stosunku do technik offline [16]. Do zalet zalicza się:

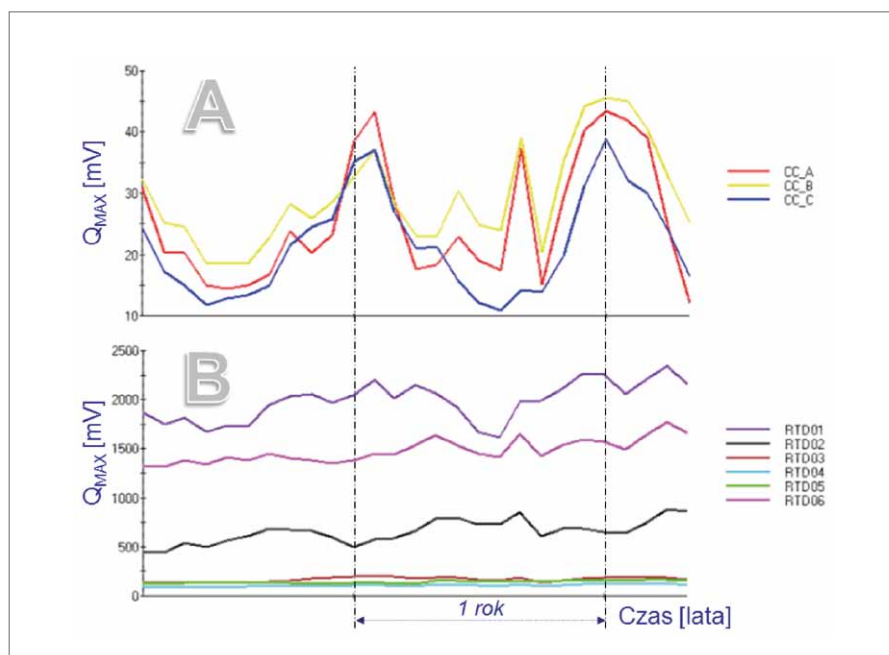
- nie jest potrzebne zatrzymanie agregatu celem przeprowadzenia testu;
- zazwyczaj bezpośredni koszt gromadzenia danych jest niższy niż przy zastosowaniu techniki offline'owej; dane w systemie online gromadzone są automatycznie<sup>5</sup>;
- jeśli maszyna jest objęta predykcyjnym UR, a dla pełnej oceny jej ST mimo wszystko wymagane jest przeprowadzenie dodatkowych testów offline, wtedy użytkowany system klasy

reklama

online może być pomocny w podjęciu poprawnej czasowo decyzji odnośnie do celowości przeprowadzenia tych specyficznych testów offline;

- prowadzenie monitorowania online nie przyczynia się do poddania maszyny dodatkowym obciążeniom, a więc nie jest związane z dodatkową koncentracją naprężeń w maszynie (tu: w izolacji) i w konsekwencji ich przyspieszonej kumulacji; w konsekwencji monitorowanie online nie prowadzi do skrócenia żywotności resztkowej izolacji; prowadzenie testów offline wymaga zasymulowania naprężeń roboczych, co (a) nie zawsze jest możliwe w stopniu wystarczającym do odzwierciedlenia rzeczywistości i (b) w niektórych przypadkach może powodować wystąpienie naprężeń wyższych niż te, które mają miejsce w warunkach normalnej pracy silnika;
- niektóre symptomy ST są silnie skorelowane z pewnymi zmiennymi procesowymi (np. obciążenie agregatu) i/lub środowiskowymi (np. temperatura powietrza chłodzącego, jego wilgotność względna); w przypadku dobrego skonfigurowania systemu diagnostyki te zmienne procesowe i/lub środowiskowe winny być dodatkowo, równoległe do symptomów ST, gromadzone przez system akwizycji danych diagnostycznych; posiadanie takich kompletnych baz danych może być bardziej informatywne niż pomiarowe bazy danych gromadzone w czasie testów offline;
- systemy monitorowania online dają łatwiejszą możliwość rozpoznania cyklicznej zmienności wyników pomiarów, co jest szczególnie ważne w sytuacjach, w których dynamika zmian wartości mierzonych symptomów na rzecz oceny ST jest porównywalna z dynamiką zmienności pomiarów, np. w ramach cyklu rocznego (spowodowanego np. roczną cyklicznością zmian wilgotności względnej<sup>6</sup>).

Na rys. 4 [17] pokazano przykładowo cykliczną zmianę Intensywność WNZ w ciągu roku, gdzie na rys. A pokazane są wyniki pomiarów intensywności WNZ mierzone z pomocą KS podłączonych do każdej z faz, natomiast na rysunku B pomiary WNZ realizowane z pomocą 6 czujników temperatury typu RTD



Rys. 4. Zróżnicowanie wyników pomiarów WNZ realizowanych z pomocą (A) kondensatorów sprężających oraz dodatkowo (B) czujników RTD pomiarów temperatury uzwojeń stojana

zainstalowanych w stojanie maszyny<sup>7</sup>. Można zauważyć wyraźną zmianę cyklu rocznego w przypadku pomiarów z pomocą KS. Dla obu grup pomiarów (A i B) widoczne jest silne skorelowanie z punktu widzenia trendu zmian, natomiast pomiary WNZ z pomocą czujników RTD (rysunek B) cechują się (w przypadku tego obiektu) bardzo dużym rozrzutem ilościowym;

- system online stwarza łatwiejsze możliwości porównywania danych gromadzonych na przestrzeni czasu, bowiem wszystkie wyniki są zgromadzone w jednej standardowej bazie danych; natomiast w przypadku danych gromadzonych z pomocą sprzętu przenośnego (szczególnie w przypadku wykorzystania zróżnicowanego outsourcingu na okoliczność prowadzenia takich badań) dostęp do pewnych wyników, a także (jak pokazuje praktyka) dostęp do wystarczająco kompletnego opisu warunków, w jakich badania zostały przeprowadzone, bywa po jakimś czasie trudny, a najczęściej jest wręcz niemożliwy.

Natomiast do wad technik online zalicza się:

- koszt inwestycyjny związany z wdrożeniem systemu online: jest on zdecydowanie wyższy w porównaniu z nakładami inwestycyjnymi dotyczącymi

zakupu zestawu pomiarowego do badań offline, bowiem czujniki wraz z systemem monitorowania oraz procesorem komunikacyjnym systemu diagnostyki muszą być zainstalowane dla każdej z maszyn włączonych do systemu online z osobna, gdy tymczasem w przypadku technik offline jeden zestaw może być wykorzystywany dla wielu maszyn i urządzeń;

- nie wszystkie potencjalne uszkodzenia mogą być rozpoznane przez zainstalowany system online (np. wtedy, gdy jest to cząstkowy monitoring ST, a więc system online umożliwia jedynie rozpoznanie części, na ogół tych najważniejszych, uszkodzeń i w konsekwencji dla rozpoznania tych pozostałych niezbędne jest realizowanie okresowych testów offline).

Należy także pamiętać o tym, że wyniki z badań WNZ zgromadzonych w reżimie online i offline nie można porównywać. Wyniki badań offline oraz online wykonywane z pomocą tych samych zestawów pomiarowych będą się różnić, bowiem podczas testów online napięcie i WNZ są obserwowane między fazą i przewodem neutralnym (dla każdej fazy z osobna, ale równoległe w czasie dla wszystkich trzech faz), gdy tymczasem badania offline wykonywane

są na ogół dla każdej fazy z osobna w takich warunkach, że kompletne uzwojenia przynależne do testowanej fazy znajdują się pod tym samym potencjałem, natomiast uzwojenia przynależne do dwóch pozostałych faz są uziemione.

Zróznicowanie wyników pomiarów WNZ offline i online wynika również z faktu ograniczonych możliwości wywołania w teście offline tych wszystkich efektów WNZ, które mogą występować w warunkach pracującej maszyny. I tak np. w czasie testów offline napięcie jest na ogół niewystarczające, aby spowodować pojawienie się WNZ w końcówkach uzwojeń.

W kolejnych punktach zostaną omówione wybrane zagadnienia dotyczące ww. form monitorowania online oraz zostaną opisane przykłady zastosowań.

## 5. Monitorowanie z wykorzystaniem WNZ

Ocena ST z pomocą WNZ była pierwotnie wykorzystywana dla silników pracujących na napięciach 6 kV i wyższych, natomiast na początku wieku zaczęto ją także wykorzystywać dla silników pracujących na napięciach niższych (w [18] mówi się o 4 kV). Rozpowszechnienie sterowania obrotami silników poprzez inwertery wykorzystujące tranzystory IGBT, a czasami konieczność stosowania kabli zasilających o stosunkowo znacznej długości od szafy sterowniczej (w niektórych przypadkach długość ta przekracza 100 m) powodują możliwość pojawienia się napięć przewyższających dwukrotnie (a nawet więcej) napięcie znamionowe i z tego względu stosowanie WNZ ma sens także dla wybranych napędów niskonapięciowych.

W [19] opisano występowanie WNZ nawet w przypadku zmiennoprędkościowych (sterowanych inwertorami) silników zasilanych napięciem 400–1000 V, które prowadzi do zwarć międzyzwojowych i koniec końców do katastroficznych uszkodzeń silników.

Zjawisko WNZ może być obserwowane między poszczególnymi uzwojeniami, między fazami, a także czasami między fazą a ziemią. Jest ono silnie uzależnione od obciążenia maszyny, szczególnie jeśli WNZ są generowane przez poluzowane uzwojenia. W takim przypadku poziom WNZ wzrasta dramatycznie wraz ze wzrostem obciążenia urządzenia. Pojawieniu się WNZ towarzyszy także (w przypadku maszyn chłodzonych powietrzem, a takimi są silniki) generowanie ozonu. Dostępne są systemy monitorowania online stężenia ozonu [16], natomiast o ile ta metodyka jest czasami wykorzystywana do oceny ST generatorów, o tyle autorowi nie są znane praktyczne jej zastosowania dla monitorowania silników.

Kolejną przyczyną możliwości uzyskania zróżnicowanych ocen ST silnika w przypadku prowadzenia badań WNZ może być zróżnicowanie pojemności KS wykorzystywanych na rzecz prowadzenia badań [20]. W przypadku wykorzystania bardzo współcześnie popularnej techniki, sprowadzającej się do instalowania na terminalach doprowadzających zasilanie KS o pojemności 80 pF, możliwe jest obserwowanie WNZ w około 10–15% (w najlepszej sytuacji) całkowitej długości uzwojeń. W przybliżeniu można przyjąć, że w przypadku monitorowania ST silników pomiar taki umożliwi obserwację WNZ w kilku uzwojeniach<sup>8</sup>. Zastosowanie KS o pojemności 250 nF umożliwia pomiary WNZ w paśmie częstotliwości od dziesiętu kHz. W [16] podaje się, że KS o pojemności 80 pF umożliwiają detekcję WNZ o częstotliwości powyżej 40 MHz, natomiast KS

reklama

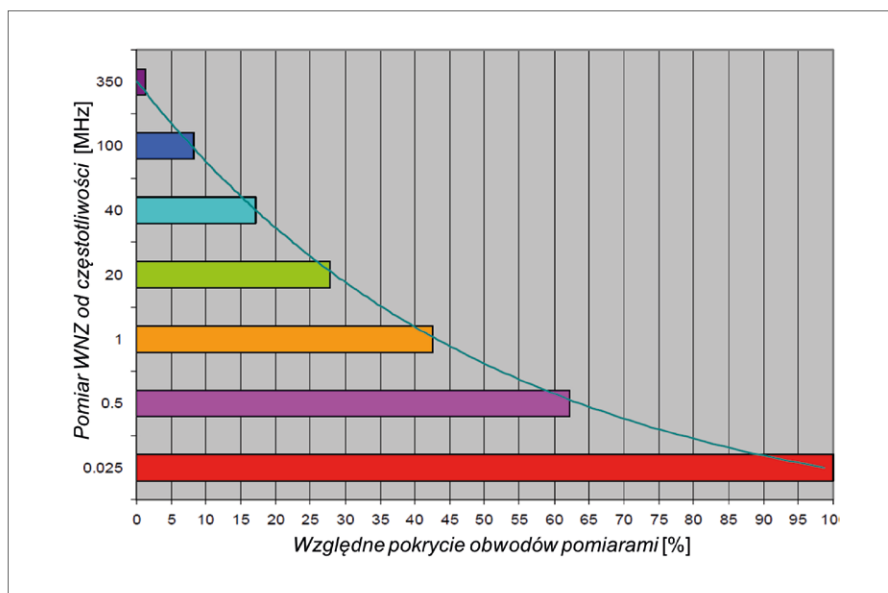
o pojemności 1 nF<sup>9</sup> umożliwiają detekcję WNZ już powyżej częstotliwości 3 MHz. KS o wysokiej pojemności pozwalają na penetrację WNZ w uzwojeniach bardziej odległych od punktu ich zainstalowania, bowiem tłumienie WNZ w niższych częstotliwościach jest mniejsze niż w częstotliwościach wysokich dostępnych dla KS o niskiej pojemności. Informację w podobnym duchu można znaleźć w [21]: mimo że najbardziej rozpowszechnione KS posiadają pojemność 80 pF (umożliwiające badania w paśmie 0,5–500 MHz), to dla silników pracujących na napięcia do 6 kV z powodzeniem są stosowane KS o większej pojemności, a mianowicie aż do 500 pF.

Na rys. 5 [20] pokazano pogładową zależność opisującą procentowy stopień pokrycia uzwojeń maszyny możliwością obserwacji WNZ (oś pozioma wykresu) w zależności od możliwości obserwacji WNZ w różnych pasmach częstotliwości, co jest konsekwencją stosowania KS o zróżnicowanej pojemności (oś pionowa wykresu). Z wykresu tego wynika, że możliwość bardziej kompletnego objęcia monitorowania WNZ uzwojeń jest warunkowana stosowaniem KS o wystarczająco dużej pojemności<sup>10</sup>.

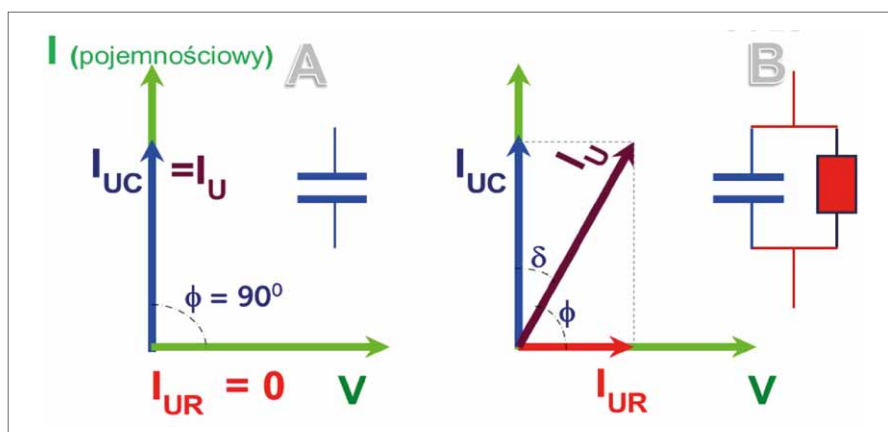
W [22] przedstawiono wyniki badań nadzoru ST silników 6 kV o mocy ~5 MW, z pomocą KS 80 pF oraz 500 pF. Badania te jednoznacznie potwierdzają ww. wniosek, że zastosowanie KS o pojemności 500 pF umożliwia wcześniejsze rozpoznanie problemów z izolacją silników, a tym samym daje służbom UR wcześniejsze ostrzeżenie co do konieczności liczenia się z możliwością awaryjnego odstawienia agregatu.

Powyższe ograniczenia dotyczące słabej zdolności KS małej pojemności w zakresie możliwości oceny uzwojeń w większej odległości od punktu ich mocowania były także zauważone w [23]. W związku z tym niektóre firmy, w celu uzyskania lepszej informacji o ST izolacji uzwojeń stojana, oprócz pomiarów WNZ z pomocą KS wykorzystują także dodatkowo w tym samym celu czujniki temperatury typu RTD, które oryginalnie są przez producenta maszyny zainstalowane w uzwojeniach stojana celem monitorowania temperatury uzwojeń.

Zakłócenia w pracy linii zasilających o charakterze transientowym (takie jak pokazano na rys. 2 i rys. 3) nie tylko mo-



Rys. 5. Efekt osłabienia sygnału w obwodach maszyny wirnikowej w zależności od wykorzystwanego pasma częstotliwościowego pomiaru WNZ



Rys. 6. Wykresy wskazowe izolacji: prąd upływowy pojemnościowy  $I_{UC}$  i czynny  $I_{UR}$  dla izolacji (A) doskonałej i (B) rzeczywistej

gą doprowadzić do skokowego obniżenia odporności izolacji na uszkodzenie, ale także mogą powodować zniszczenie KS [16]. Stosowanie na okoliczność oceny ST KS o większej pojemności zwiększa ryzyko wystąpienia takich uszkodzeń.

Opisane możliwości i niedostatki w zakresie systemów monitorowania ST silników elektrycznych online z pomocą WNZ każą poszukiwać innych technik, które w określonych warunkach dawałyby możliwość bardziej wiarygodnej oceny.

## 6. Metodyka monitorowanie online współczynnika dyssypacji

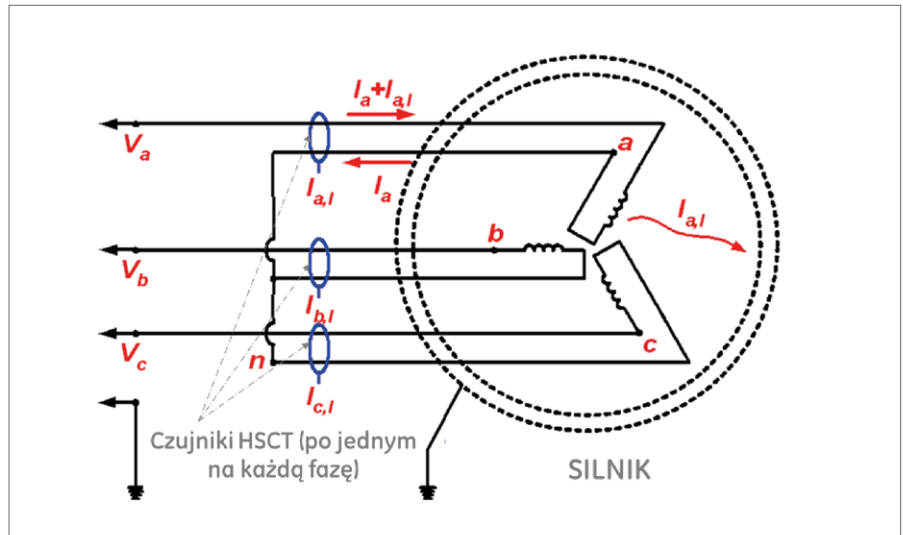
Rozwiązanie bazujące na przekładnikach prądowych wysokiej czułości (= HSCT<sup>11</sup>) zostało zaproponowane

do oceny ST izolacji silnika przez GE [15]. Dla oceny ST wykorzystywany jest współczynnik dyssypacji, a ocenie mogą podlegać silniki 3-fazowe pracujące przy podłączeniu zasilania w gwiazdę, stałobrotowe, o mocy do 10 MW. HSCT umożliwia pomiar prądów upływowych (pojemnościowego i czynnego) o bardzo małej amplitudzie, co wtórnie umożliwia ocenę ST izolacji.

Dla silników średnionapięciowych dużej mocy prąd skuteczny może znacząco przekraczać 1000 A, natomiast prądy upływowe wykorzystywane w celu oceny izolacji są znacząco mniejsze i mogą być dla składowej pojemnościowej na poziomie o ~100 dB niższym, natomiast dla składowej rzeczywistej nawet na poziomie niższym o ~140 dB.



Rys. 7. HSCT wykorzystywany w celu oceny degradacji izolacji



Rys. 8. Schemat ideowy podłączenia przekładników prądowych do obwodów zasilania

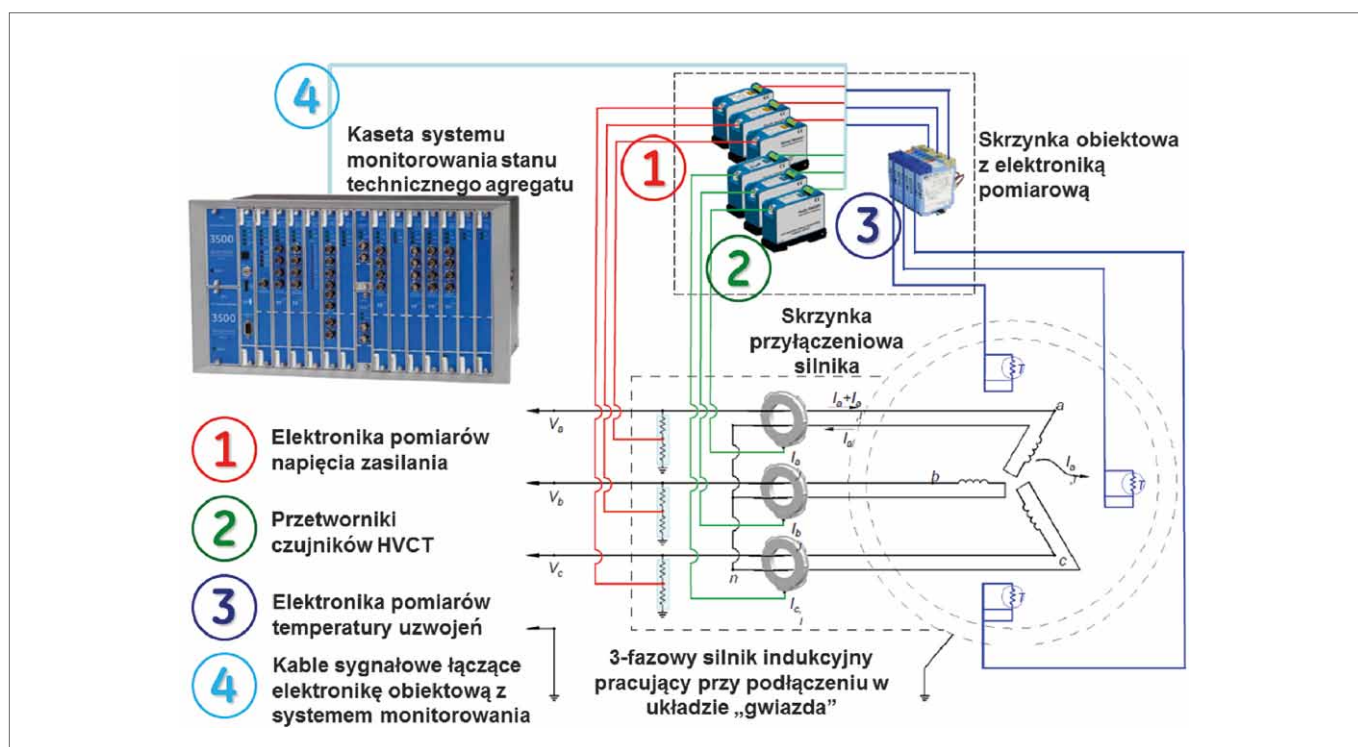
Całkowity prąd upływowy  $I_U$  wyprzedza napięcie o kąt fazowy  $\phi$  i jest opóźniony w stosunku do składowej  $I_{UC}$  o kąt  $\delta$ , tak jak jest to pokazane na rys. 6.  $\tan \delta$  jest stosunkiem prądu upływowego czynnego do pojemnościowego i odpo-

wiada współczynnikowi dyssypacji, natomiast współczynnik mocy jest stosunkiem prądu upływowego czynnego do całkowitego. Obydwa ww. współczynniki są zbliżone do siebie dla wartości mniejszych niż  $\sim 20\%$  i zaczynają się różnić

tym bardziej, im bardziej przewyższają  $20\%$ .

Na rys. 7 pokazano czujnik HSCT umożliwiający monitorowanie izolacji uzwojeń dla pojedynczej fazy silnika, natomiast na rys. 8 schemat podłączenia





Rys. 9. Przykładowy schemat ideowy podłączenia pomiarów umożliwiających ocenę stanu technicznego izolacji do systemu monitorowania i zabezpieczeń maszyny

trzech takich czujników do obwodów zasilających silnika.

W przypadku maszyn krytycznych, systemy monitorowania ST najczęściej nie są zlokalizowane bezpośrednio przy maszynie, a w pobliżu sterowni instalacji produkcyjnej (np. sterowania bloku energetycznego). W związku z tym niezbędne jest zapewnienie wiarygodnej transmisji sygnałów na odległość nawet do kilkuset metrów z pomocą kabli sygnałowych. W tym celu dla czujników HSCT niezbędne jest stosowanie modułów interfejsowych zapewniających transmisję sygnałów w sposób mało podatny na zaszumienie. W konsekwencji czujniki HSCT zainstalowane na kablach zasilających silnika są podłączone do kabli sygnałowych (i dalej do kasety systemu monitorowania) poprzez indywidualnie przypisane im moduły interfejsowe zlokalizowane w skrzynce obiektowej systemu monitorowania, tak jak to pokazano na rys. 9. Na rysunku tym pokazano przykładowe podłączenie do systemu monitorowania<sup>12</sup> jedynie w zakresie nadzoru ST izolacji. W zastosowaniach praktycznych ten sam system monitorowania może być (i najczęściej jest) wykorzystywany także do monitorowania drgań, temperatur, położeń, ciśnień etc. – jak opisane w [9].

Tabela 1

Temperatura materiału	Współczynnik stratności EPOXYLITE 478	Współczynnik stratności DOLPHON CC-1118LV (VPI Epoxy)
25°C	0,0032	0,0031
55°C		0,0053
90°C		0,0079
105°C	0,0052	0,063
130°C	0,0182	0,091
150°C	0,0908	0,117
155°C	0,0908	
180°C	0,0992	

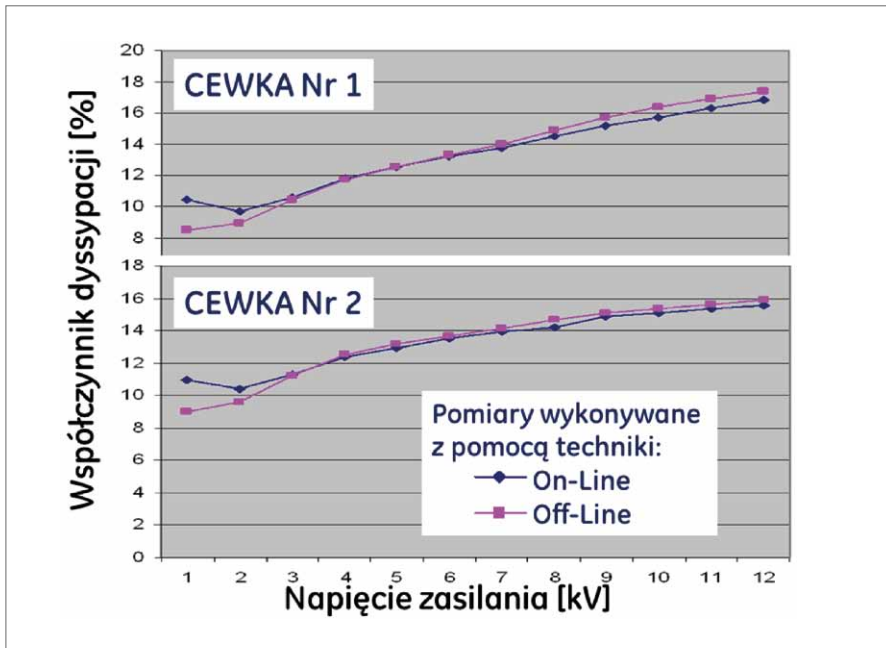
Oprócz sygnałów z czujników HSCT dla oceny ST izolacji wymagane jest realizowanie kilku pomiarów uzupełniających. Na schemacie pokazano jedynie źródła sygnałów, które są bezwzględnie wymagane do oceny ST izolacji przy zastosowaniu opisywanej techniki. Są to sygnały z:

- 3 modułów interfejsowych czujników HSCT (w każdym przypadku winny być stosowane 3 HSCT – po jednym dla każdej fazy);
- 2 modułów interfejsowych dla dzielników napięcia (w praktyce mogą być wykorzystywane 1, 2 lub 3 takie podzielniki);

- 3 czujników temperatury (w praktyce do systemu mogą być podłączone 1, 2 lub 3 czujniki temperatury uzwojeń).

Ważność pomiarów temperatury wynika z możliwości znaczącej zmiany współczynnika stratności wraz ze zmianą temperatury materiału izolacji. W tabeli podano informacyjnie przykładowy wpływ temperatury na współczynnik stratności dla dwóch różnych materiałów wykorzystywanych do izolacji uzwojeń silników średnionapięciowych [18].

Przedstawione w tabeli współczynniki zawierają się w przedziale ~0,003–0,117 i nie odzwierciedlają pełnego zakresu



Rys. 10. Porównywanie ocen stanu technicznego uzyskanych technikami online i offline

zmienności tego parametru dla innych materiałów wykorzystywanych dla realizacji izolacji. I tak dla niektórych materiałów może on się różnić zdecydowanie i wynosi przykładowo (dla temperatury 150°C) dla czterech innych materiałów: (I) P.D. GEORGE E833: 0,2; (II) RANBAR B-7-619: 0,437; (III) vanRollIsola 7xx: 2,1; (IV) RANBAR B-7-373T: 5.

### 7. Weryfikacja metody online

Metoda tan delta jest od wielu lat sprawdzona i stosowana do oceny izolacji silników w warunkach offline. Tak więc w przypadku stosowania nowatorskiego rozwiązania na okoliczność testowania tan delta w warunkach online można dokonać porównania wyników uzyskanych w ramach testów offline z wynikami gromadzonymi techniką online.

Na rys. 10 [24] pokazano wyniki porównawcze metody on- i offline dla dwóch obiektów. Widoczna jest bardzo dobra korelacja wyników w przypadku napięć zasilających wyższych od 2 [kV].

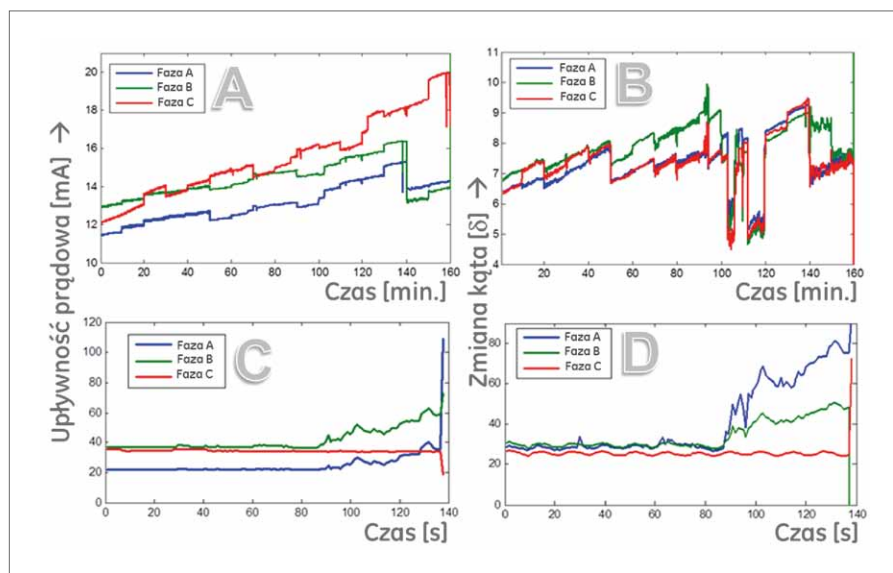
Przed zainstalowaniem czujników HSCT na maszynach pracujących w realnych warunkach przemysłowych postanowiono przeprowadzić dodatkowe testy laboratoryjne, na rzecz których, celem przyspieszenia destrukcji izolacji, dokonano takiej modyfikacji silników, któ-

ra umożliwia bezpośredni wtrysk mgły wodnej do wnętrza silnika.

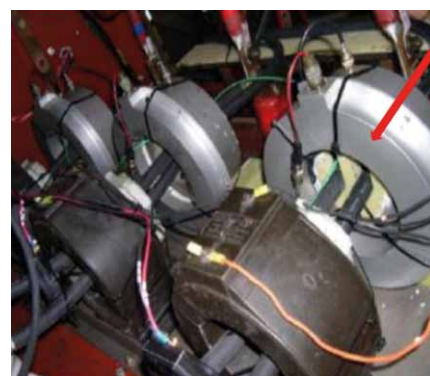
W przypadku opisywanych badań laboratoryjnych w celu oceny ST izolacji wykorzystywano nie tylko technikę oceny upływności prądowej oraz zmianę kąta  $\delta$ , a także równolegle prowadzono pomiary WNZ z pomocą KS o pojemności 1 nF. Część wyników z ww. testu dla jednego z silników zasilanego napięciem 4160 V AC pokazano na rys. 11 i rys. 12. Na rys. 11 widoczny jest wyraźny trend wzrostowy zarówno poziomu upływności prądowej, jak i będącej jej konsekwencją wartości kąta  $\delta$  (osie pionowe wykresów). Zwraca się uwagę na zróżnicowanie osi czasu dla par rysunków A i B oraz C i D: dynamika osi czasu dla rysunków A i B wynosi ponad 2 godziny, natomiast dla rysunków C i D jedynie nieco ponad 2 minuty. Największa dynamika zmiany obserwowanych pomiarów ma miejsce w ciągu ostatniej minuty testu dla faz A i B (rys. 11 C i D).

Na rys. 12 pokazano przykładowe wyniki pomiarów amplitudowo-fazowych WNZ dla dobrego (rys. A) oraz złego stanu izolacji stojana silnika (rys. B – na rysunku zaznaczono elipsą pomiary odpowiadające dwóm fazom zasilania silnika, dla których zarejestrowano dominujący przyrost pomiarów pokazany na rys. 11).

W konsekwencji przeprowadzonych badań można stwierdzić, że



Rys. 11. Trendy upływności prądowej (rys. A i C) oraz kąta  $\delta$  (rys. B i D) zarejestrowane w czasie przyspieszonych testów zużycia izolacji w warunkach laboratoryjnych: w fazie pośredniej testu (rys. A i B) oraz bezpośrednio przed wystąpieniem uszkodzenia (rys. C i D)



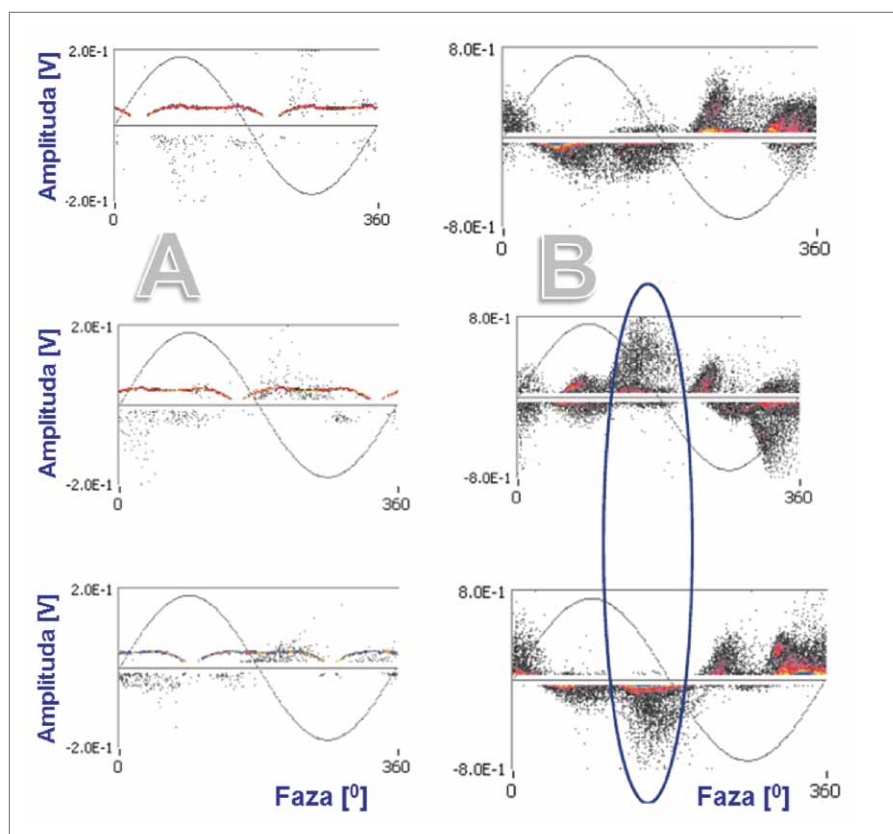
Rys. 13. Przykład instalacji HSCT dla silnika napędzającego sprężarkę

zabezpieczeniu ich funkcjonowania wzrasta na ogół wraz z mocą napędów. W tym celu wykorzystywane są również od wielu lat transformatory prądowe. Natomiast te standardowe rozwiązania nie posiadają konstrukcji spełniającej wymagania techniczne wystarczające z punktu widzenia potrzeb monitorowania ST izolacji, a więc takie wymagania, które są zapewnione przez HSCT.

Na rys. 13 pokazano instalację czujników HSCT wykonaną dla sprężarki powietrza o mocy  $\sim 2,2$  MW napędzanej silnikiem asynchronicznym, zasilanym z linii 4 kV.

Fotografia pokazuje typową konfigurację transformatorów w skrzynce przyłączeniowej zasilania silnika. Dla każdej fazy można rozpoznać parę transformatorów, z których te pierwsze widoczne na fotografii pracują na rzecz systemu zabezpieczeń, natomiast znajdujące się na drugim planie (pierwszy z prawej wskazano czerwoną strzałką) są czujnikami HSCT mającymi wspomagać predyktoryczne utrzymanie ruchu. Współczynnik dyssypacji zmierzony z pomocą systemu online wynosił 1,31%, natomiast określony z pomocą mostka w reżimie offline wynosił 1,12%.

Na rys. 14 A pokazano silnik niewielkiego agregatu pompy wody zasilającej kotła, pracujący na napięciu 4 kV i posiadający moc 670 kW. Agregat posiada wirniki łożyskowane tocznie. Na fotografii zaznaczono żółtą ramką system monitorowania wyposażony w specjalizowany monitor, umożliwiający monitorowanie ST izolacji stojana silnika. Na pierwszym planie widoczna jest (zamknięta) skrzynka przyłączeniowa kabli zasilających silnika. Na rysunkach B i C



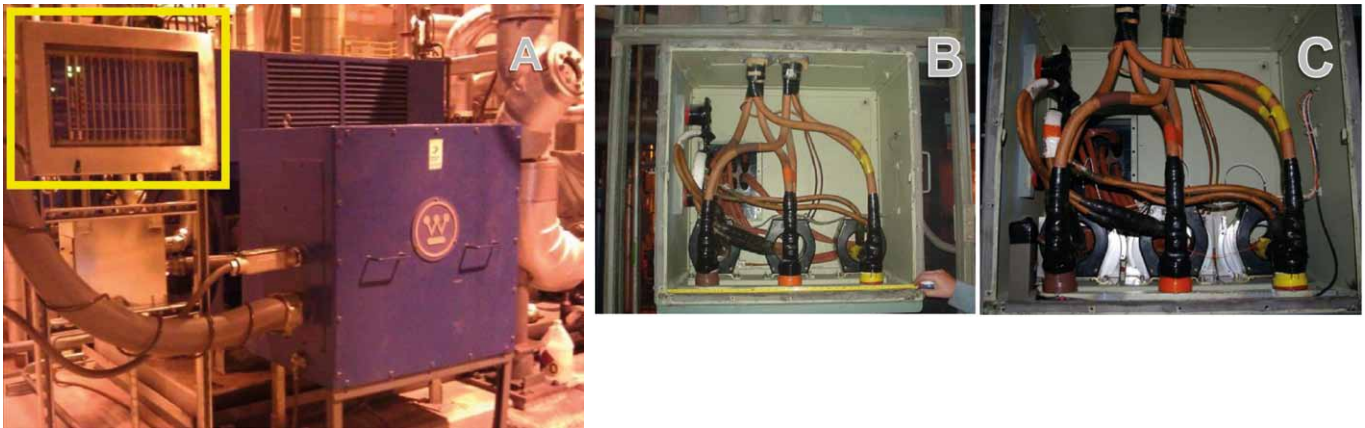
Rys. 12. Wyniki testów WZN dla silnika: (A) izolacja w dobrym stanie technicznym, (B) izolacja w złym stanie technicznym

monitorowanie zmienności  $\tan \delta$  w warunkach online cechuje się dużą wrażliwością, poprawnością oceny stanu i pozostaje w dobrej korelacji z wynikami uzyskiwanymi z pomocą pomiarów WZN. Pozytywne wyniki testów laboratoryjnych dały podstawę do testowego wdrożenia tej techniki na obiektach pra-

cujących na instalacjach przemysłowych. Poniżej pokazano kilka przykładowych wdrożeń.

### 8. Przykłady monitorowania online współczynnika dyssypacji

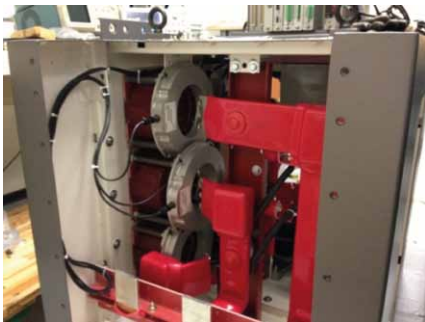
Dla silników napędzających maszyny krytyczne liczba pomiarów służących



Rys. 14. Przykład instalacji HSCT dla silnika napędzającego pompę wody zasilającej (agregat łożyskowy toczny): (A) widok silnika wraz ze skrzynką przyłączeniową kabli zasilających (B) przed instalacją czujników HSCT (C) po przeprowadzeniu ich instalacji



Rys. 15. Przykład instalacji HSCT dla silnika napędzającego pompę wody zasilającej (agregat łożyskowy ślizgowy): (A) widok silnika wraz ze skrzynką przyłączeniową kabli zasilających (B) przed instalacją czujników HSCT (C) po przeprowadzeniu ich instalacji



Rys. 16. Przykład instalacji czujników HSCT dla silnika zasilanego z pomocą listew

pokazany jest widok wnętrza tej samej skrzynki, odpowiednio przed i po zainstalowaniu czujników HSCT. Na rysunku C został pokazany zieloną strzałką jeden z czujników HSCT.

Na rys. 15 A pokazano silnik wody zasilającej kotła pracujący na napięciu 4 kV, o mocy ~4 MW. Silnik jest łożyskowy ślizgowo, a strzałkami pokazano czujniki drgań względnych wirnika XY zainstalowane w zewnętrznym łożysku silnika. Z prawej strony silnika pokazana jest na fotografii skrzynka z kablami przyłącze-

niowymi, natomiast front tej skrzynki jest także pokazany na rysunkach B oraz C. Na rys. B widoczne są jedynie transformatory prądowe wykorzystywane w celu zabezpieczenia silnika. Na fotografii C oprócz wymienionych transformatorów zabezpieczających widoczne są dodatkowo (usytuowane za nimi) czujniki HSCT.

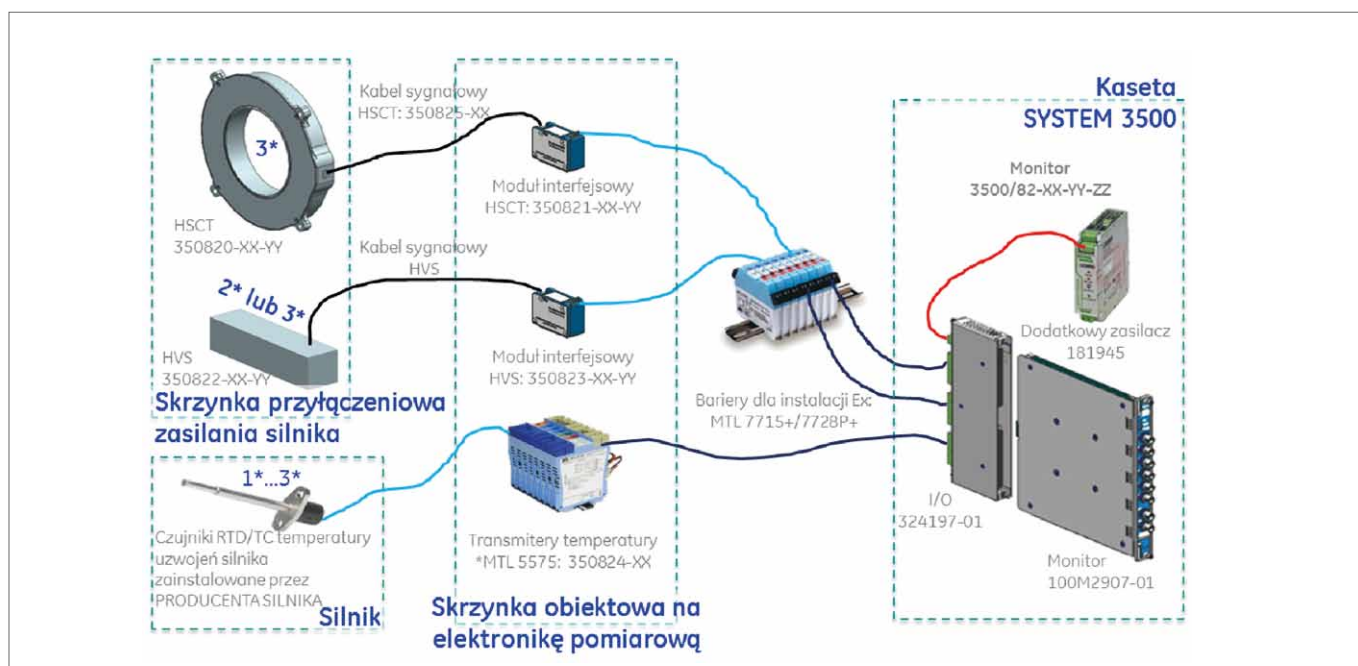
Na rys. 13–15 pokazano czujniki HSCT zainstalowane na kablach zasilających, natomiast w przypadku silników wyższych mocy doprowadzenie zasilania do uzwojeń silnika może być realizowane z pomocą listew. Przykład instalacji czujników HSCT dla takiego silnika pokazano na rys. 16. Widoczne na fotografii czarne przewody (kable czujnikowe) służą do przekazania sygnałów z czujników HSCT do elektrоники obiektowej (przetworniki oznaczone przez „2” na rys. 9).

### 9. Możliwość oceny silników pracujących w strefach Ex

W odróżnieniu od agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi i sto-

sowanych w energetyce, w przypadku agregatów pracujących w zakładach chemicznych są one często zlokalizowane w strefach zagrożenia. Wystąpienie WNZ w strefach Ex może spowodować poważne zagrożenie wybuchowe. W literaturze można znaleźć opisy przypadków raportujących eksplozje silników dużych mocy zlokalizowanych w strefach Ex. Badania poawaryjne prowadziły do konkluzji, że pierwotną przyczyną eksplozji było pojawienie się różnych form WNZ [25].

Opisane rozwiązanie oceny ST izolacji z pomocą czujników HSCT może być z powodzeniem wykorzystywane w pewnych strefach Ex. Elementy toru pomiarowego instalowane w strefie winny posiadać odpowiedni atest ATEX, a podłączenie części obiektowej (zlokalizowanej wraz z maszynami w strefie specjalnej) do systemu monitorowania (zlokalizowanego z reguły poza strefą specjalną) winno być zrealizowane zgodnie z wymaganiami zawartymi w opisie certyfikacji.

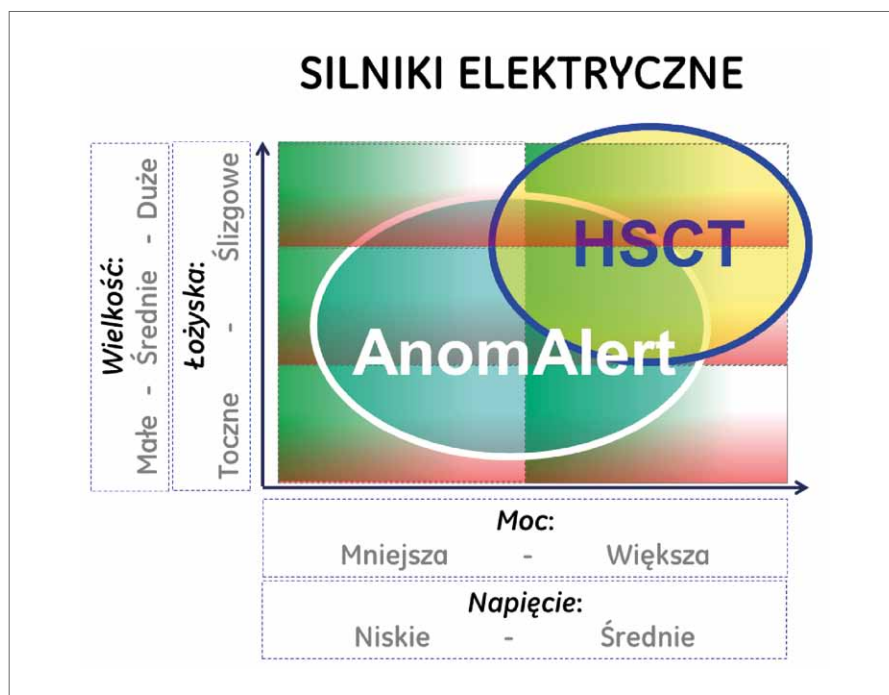


Rys. 17. Szczegóły instalacji systemu monitorowania izolacji w strefie Ex przy zastosowaniu SYSTEMU 3500

Omówione w artykule rozwiązanie dla monitorowania współczynnika dyssypacji posiada certyfikację ATEX na okoliczność stosowania w ZONE 0<sup>13</sup> i wymaga dla źródeł sygnałów zainstalowanych w strefie Ex podłączenia do systemu monitorowania za pośrednictwem właściwych barier. Szczegóły rozwiązania technicznego takiego systemu monitorowania ST izolacji w strefie Ex pokazano na rys. 17. Z lewej strony rysunku pokazano jedynie pojedyncze sensory, natomiast ich realnie wykorzystywana liczność, niezbędna do prawidłowego działania systemu monitorowania, została wskazana przy każdym z sensorów. Wszystkie sensory są docelowo podłączone do specjalizowanego monitora SYSTEMU 3500 (jak pokazano w żółtej ramce na rys. 14 A).

### 10. Relacja między monitorowaniem stanu izolacji a monitorowaniem anomalii silnika

W [26] opisano system sprzętowego monitorowania anomalii AnomAlert®. Nic nie stoi na przeszkodzie równoległemu wykorzystywaniu monitorowania ST izolacji oraz monitorowaniu anomalii. Natomiast o ile monitorowanie ST izolacji jest dedykowane przede wszystkim silnikom napędzającym maszyny krytyczne, o tyle system AnomAlert jest



Rys. 18. Obszary zastosowań nowoczesnych form monitorowania ST silników elektrycznych

przede wszystkim dedykowany napędem średniej ważności i umożliwia nie tylko monitorowanie silnika, ale także rozpoznawanie anomalii w pracy napędzanej maszyny, a także dodatkowo występujących po stronie zasilania silnika. W zależności od ważności agregatu sprzętowe rozpoznawanie anomalii bądź stanowi to rozszerzenie (w przypadku maszyn ważniejszych) tradycyjnych metod mo-

onitorowania i zabezpieczenia maszyn opisanych w [9], bądź też jest rozwiązaniem samodzielnym, które ze względu na specyfikę działania może być również stosowane jako rozwiązanie alternatywne w stosunku do metod tradycyjnych. Taka alternatywa może być rozważana np. w przypadkach (I), kiedy występują problemy techniczne w zainstalowaniu na maszynie czujników (co może mieć

miejsce np. w przypadku pomp pionowych) lub (II) poprawna instalacja tradycyjnych czujników w strefie Ex jest trudna do akceptacji finansowej<sup>14</sup> (natomiast instalowanie systemu AnomAlert jest stosunkowo łatwe, bowiem ma miejsce poza strefą – np. w rozdzielni).

Silniki elektryczne mogą być charakteryzowane z pomocą różnych cech konstrukcyjnych. Takimi cechami ważnymi dla wyboru optymalnego systemu monitorowania ST są (I) krytyczność agregatu oraz (II) rodzaj przypisanej do niego strategii utrzymania ruchu. Na rys. 18 pokazano informacyjnie pola zastosowań monitorowania ST izolacji stojana oraz systemów monitorowania anomalii agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi. Przy charakterystyce pól obszarów zastosowań posłużono się takimi charakterystykami jakościowymi, jak wielkość silnika (gabaryty są na ogół skorelowane z jego mocą), rodzaj łożyskowania wirnika (gdzie w przypadku silników mniejszych na ogół są wykorzystywane łożyska toczne, natomiast w przypadku większych łożyska ślizgowe) oraz napięcie zasilające (również dodatnio skorelowane z mocą silnika).

## 11. Zakończenie

W artykule opisano nową technikę umożliwiającą dobrą ocenę ST online stojanów silników elektrycznych średniego napięcia, która wydaje się być bardziej interesującym rozwiązaniem dla szeregu aplikacyjnych scenariuszy online niż stosowane dotychczas podejście wykorzystujące WNZ.

Opisana technika pozwala również uniknąć pewnych tradycyjnych błędów metodologicznych oceny:

– (...) wartość składowej czynnej  $I_R$  prądu upływowego jest związana z wartością rezystancji izolacji doziemnej  $R_{iz}$ , ale jest związana w sposób tak złożony, że wynik zwykłych pomiarów rezystancji izolacji – ogólnie biorąc – nie pozwala przewidzieć wartości składowej  $I_R$ . Kto potrzebuje wartości prądu upływowego, odruchowo sięga po megaomierz albo po gotowe wyniki pomiarów rezystancji izolacji. Nic bardziej zwodniczego. Przeprowadzany przy napięciu pomiarowym stałym pomiar rezystancji izolacji nie daje żadnej informacji o wartości składowej pojemnościowej  $I_C$  prądu upływowego – napisano w [27].

W przypadku aplikacji Ex system HSCT, informując o pogorszeniu właściwości izolacji równocześnie formułuje ostrzeżenie co do możliwości wystąpienia WNZ, a w konsekwencji ryzyka wystąpienia eksplozji silnika. Fakt wystąpienia WNZ może być zatem zweryfikowany (tak daleko, jak jest to możliwe) z pomocą dodatkowego testu offline.

Technika oceny izolacji stojana silnika opisana w artykule istotnie rozszerza możliwości stosowanych od lat systemów monitorowania ST agregatów krytycznych. Klasyczne systemy monitorowania wykorzystują pomiary drgań, położeń oraz temperatury. Dodanie do tradycyjnie wykorzystywanych symptomów kolejnego, symptomatycznego dla ST izolacji, prowadzi do bardziej wiarygodnej oceny i predykcji zmiany ST agregatów krytycznych.

## Przypisy

1. Np. IEEE 432-1992 „IEEE Guide for Insulation Maintenance for Rotating Electric Machinery (5 HP to less than 10 000 HP)”, który to standard został opublikowany w grudniu roku 1976, uaktualniony we wrześniu 1992 i obowiązywał do stycznia 2004. Standard był dedykowany maszynom elektrycznym chłodzonym powietrzem o mocy w przedziale 5...10000 HP.
2. Wyjątek stanowi jedynie standard IEEE 56-1977, który na ogół nie jest wykorzystywany na etapie produkcji nowych maszyn.
3. Rozwiązania wykorzystujące czujniki sejsmiczne dla maszyn łożyskowych ślizgowo mogą być w pewnym zakresie aplikacji użyteczne, a mianowicie wtedy, kiedy wspomagają prewencyjne UR, natomiast są dalece nieprzydatne, jeśli inwestor jest zainteresowany predykcyjnym UR, tzn. UR bazującym na bardziej dokładnej ocenie stanu technicznego urządzenia. O ile w przypadku nowych krajowych inwestycji, prowadzonych w szeroko rozumianej branży chemicznej, od wielu lat nie są obserwowane większe nieprawidłowości w skonfigurowaniu dostarczanych wraz z maszynami systemów monitorowania, o tyle w energetyce firmy z grupy EPC starają się w dalszym ciągu często wcisnąć inwestorowi systemy monitorowania agregatów łożyskowych ślizgowo z pomocą czujników sejsmicznych. Podejście takie jest


- z gruntu błędne i stwarza inwestorowi jedynie złudne poczucie faktu nadzoru stanu technicznego, bowiem zdecydowana większość uszkodzeń występujących na takich agregatach nie może być rozpoznana z pomocą czujników sejsmicznych.
4. Powodowane testem elektrycznym osłabienie żywotności resztkowej (w tym przypadku obwodów elektrycznych) jest nieco podobne do ryzyka występującego w czasie prowadzenia próby nadobrotów turbiny celem sprawdzenia poprawności działania zabezpieczeń na nadobroty. Każdy test wytrasku prowadzi do wystąpienia w elementach wirnika turbiny i generatora naprężeń przewyższających znacząco naprężenia występujące w warunkach roboczych maszyny i w konsekwencji ich kumulacji skraca znacząco żywotność resztkową wirnika.
  5. Bardziej zaawansowane systemy akwizycji danych diagnostycznych umożliwiają także specjalne (tzn. bardziej zaawansowane) gromadzenie danych w warunkach alarmowych. Jeśli jakiś agregat monitorowany jest z pomocą większej liczby sygnałów, to w przypadku pojawienia się alarmu (sprzętowego lub programowego) dla dowolnego z pomiarów system akwizycji danych diagnostycznych gromadzi z większą rozdzielczością czasową wartości obserwowanych symptomów (tzn. liczby) oraz ich przebiegi dynamiczne (tzn. funkcje) w przedziale czasu od kilku minut przed wystąpieniem alarmu do kilku minut po jego wystąpieniu. Taką funkcjonalnością cechuje się system diagnostyki SYSTEM 1 Bently Nevada.
  6. WNZ są ujemnie skorelowane z wilgotnością, tzn. wzrost wilgotności powoduje obniżenie intensywności WNZ.
  7. Firma EATON twierdzi, że uzyskała pozytywne wyniki w badaniach offline ST maszyn średnionapięciowych z pomocą WNZ, gdzie dla pomiaru wykorzystano czujniki RTD dla ~400 maszyn w ciągu ostatnich 4 lat [4].
  8. W przypadku dużych generatorów obserwacja WNZ ogranicza się praktycznie do pierwszego pręta.
  9. Takie rozwiązanie techniczne jest np. preferowane przez firmę TechImp właśnie na okoliczność monitorowania stanu technicznego silników elektrycznych i generatorów.
  10. Na sformułowany wniosek należy patrzeć z niezbędną dozą krytycyzmu, pamiętając dodatkowo, że na możliwość oceny

ST wpływają także szумы pomiarowe. Szersze pasmo częstotliwościowe obserwacji WNZ powoduje także zwiększenie różnorodności zaszumienia, a możliwość jego filtracji jest tym trudniejsza, im dotyczy niższych składowych częstotliwościowych.

11. W literaturze angielskiej HSCT jest skrótem od *High Sensitivity Current Transformer*. Czujnika tego nie należy mylić z HFCT.
12. Na rys. 9 pokazano SYSTEM 3500, który jest jednym z najpowszechniej wykorzystywanych systemów monitorowania i zabezpieczeń maszyn krytycznych na świecie (pracuje dla ponad 100 000 maszyn). W systemie tym dla monitorowania izolacji wykorzystywany jest monitor TYP 3500/82 umożliwiający podłączenie wszystkich sygnałów wymaganych dla wiarygodnej oceny ST izolacji uzwojenia stojana.
13. Opisany system monitorowania online stanu izolacji posiada także certyfikację CSA dla „ZONE 2 /CLASS I, DIVISION 2” oraz „ZONE 0 /CLASS I, DIVISION 1”, jeśli część obiektowa jest instalowana za pośrednictwem barier.
14. Instalowanie systemu monitorowania w strefie Ex jest zawsze droższe niż instalowanie podobnego zestawu pomiarów poza strefą. Zwiększone koszty są spowodowane przede wszystkim koniecznością stosowania certyfikowanych czujników (droższe niż niecertyfikowane) oraz koniecznością stosowania dodatkowych elementów toru pomiarowego w postaci barier, separatorów etc.

## Literatura

- [1] NOWICKI R.: *Nadzór stanu technicznego agregatów z napędami elektrycznymi – wprowadzenie do tematyki*. „Napędy i Sterowanie” 10/2013, s. 114–125.
- [2] NOWICKI R.: *Monitorowanie stanu agregatów krytycznych napędzanych silnikami elektrycznymi dużych mocy*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 3/2012 (96), s. 183–188.
- [3] MURPHY T.: *Diagnosing Industrial Distribution System Fault Locations and Causes*, EPRI TVA Power System Operations, EPRI Power Quality and Smart Distribution. Conference and Exhibition, AUG 2011.
- [4] KOZUSKO J.: *Continuous online Partial Discharge Monitoring of Medium Voltage Equipment – Basics*. Water Seminar, Warrendale, PA, JUN 11th 2013.
- [5] STONE G.C.: *Recent Important Changes in IEEE Motor and Generator Winding Insulation Diagnostic Testing Standards*. IEEE Paper No. PCIC-2004-XX.
- [6] PN-EN 50209:2002 Próba izolacji prętów i cewek uzwojeń maszyn wysokiego napięcia.
- [7] PN-EN 60034-18-32:2011 Maszyny elektryczne wirujące. Część 18–32: Ocena funkcjonalna układów izolacyjnych. Procedury badawcze uzwojeń z zezwojów ukształtowanych. Ocena elektrycznej trwałości układów izolacyjnych stosowanych w maszynach elektrycznych wirujących (oryg.).
- [8] NOWICKI R.: *Klasyczne metody nadzoru stanu technicznego agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi*. „Napędy i Sterowanie” 11/2013, s. 32–43.
- [9] API STD 670, Machinery Protection Systems, 4th edition, DEC 2000.
- [10] GRUBIC S., ALLER J.M., LU B., HABETLER T.G.: *A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 12, DEC 2008.
- [11] PETRYTNA J., SUŁOWICZ M., GUZIEC K.: *Nowe doświadczenia w diagnostyce izolacji silników i generatorów metodą wyładowań niezupełnych*. „Napędy i Sterowanie” 10/2013, s. 88–95.
- [12] PEARLIE M. J.: *A Qualitative assessment of the Insulation systems of medium voltage Induction Motors*. Dissertation, North-West University, JAN. 2007
- [13] ŁAWROWSKI Z.: *Pomiary wyładowań niezupełnych – skuteczne narzędzie diagnostyki maszyn elektrycznych*. „Energetyka Ciepła i Zawodowa” 11/ 2009, s. 60–63.
- [14] SZYMANIEC S.: *Pomiary online stanu izolacji uzwojeń silników wysokonapięciowych indukcyjnych klatkowych*. „Napędy i Sterowanie” 12/2008.
- [15] NETI P., ZHANG P., QI X., ZHOU Y., YOUNSI K., SHAH M.R., WEBER K.: *Online Detection of Endwinding Contamination in Industrial Motors*. 2011 Electrical Institute Conference, Annapolis, Maryland, 5–8 JUN 2011, p. 265–270.
- [16] STONE G.C., BOULTER E.A., CULBERT I., DHIRANI H.: *Electrical Insulation for Rotating Machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. IEEE Press, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2004.
- [17] COWLING J.: *Experience with online PD Measurements on MV Motor Windings in South Africa*, MARTEC, JAN 2010, [http://www.rmwg.co.za/presentations/martec\\_pd\\_results/martec\\_pd\\_results.pdf](http://www.rmwg.co.za/presentations/martec_pd_results/martec_pd_results.pdf).
- [18] JOHNSON W.: *Guide for Electric Motor Stator Winding Insulation Design, Testing and VPI Resin Treatment*. Raport EPRI, Palo Alto, CA, 2004, 1009700.
- [19] BRUTSCH R., WEYL P.: *A new Winding wire for inverter driven motors*. 9th INSUCON International Electrical Insulation Conference, Berlin 2002, p. 5.
- [20] PRETORIUS R., KANE C., GOLUBEV A.: *A New Approach Towards Surge Suppression and Insulation Monitoring for Medium Voltage Motors and Generators*. Electrical Insulation Conference, 2009. EIC 2009. IEEE, May 31 2009–June 3 2009, p. 448–453.
- [21] Epoxy-Mica Coupling Capacitors TYPE DR-EMC, [www.dynamicratings.com](http://www.dynamicratings.com).
- [22] SASIC M., GREEN V., ZHU H.: *How to Minimize the Risk of Stator Insulation Failure on Critical Motors*, ADWEL International, 2001.
- [23] Motors and Small Turbine Generators – Application Guide, [www.elec-di.com](http://www.elec-di.com).
- [24] THOMSON A.: *Advancements in Motor Condition Monitoring*. Raport wewnętrzny GE, Minden, APR 2010.
- [25] EDWARDS, D.G.: *Planned maintenance of high voltage rotating machine insulation based upon information derived from online discharge measurements*. International Conference on Life Management of Power Plants, 12–14 Dec 1994, p. 101–107.
- [26] SONG J., NOWICKI R., DUYAR A.: *Sprzętowe rozpoznawanie anomalii pracy agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi*. „Napędy i Sterowanie” 1/2014, s. 72–82.
- [27] SUBOCZ J.: *Ocena jakości wykonania izolacji maszyn WN na podstawie pomiarów niskoczęstotliwościowych*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 76/2007, s. 101–107.

 Ryszard Nowicki – GE POWER CONTROLS Sp. z o.o., Poznań/Polska, e-mail: Ryszard.Nowicki@ge.com

artykuł recenzowany