

BS ISO 20958:2013



Publikacja norm BSI

Monitorowanie stanu i diagnostyka
układów maszynowych
— Analiza sygnatury elektrycznej silników
indukcyjnych trójfazowych

bsi.

...making excellence a habit.™

Słowo wstępne narodowe

Niniejsza brytyjska norma stanowi brytyjską implementację normy ISO 20958:2013.

Udział Wielkiej Brytanii w jego przygotowaniu powierzono Departamentowi Technicznemu Komitet GME/21/7, Drgania mechaniczne, wstrząsy i monitorowanie stanu - Monitorowanie stanu.

Listę organizacji reprezentowanych w tym Komitecie można uzyskać na żądanie u jego sekretarza.

Niniejsza publikacja nie ma na celu uwzględnienia wszystkich niezbędnych postanowień umowy. Użytkownicy są odpowiedzialni za jej prawidłowe zastosowanie.

© British Standards Institution 2013.
Opublikowano przez BSI Standards Limited 2013

Numer katalogowy 978 0 580 74790 8
ICS 17.160; 29.160.30

Zgodność z normą brytyjską nie zapewnia zwolnienia z zobowiązań prawnych.

Niniejsza Norma Brytyjska została opublikowana na mocy upoważnienia Komitetu ds. Polityki i Strategii Norm 31 sierpnia 2013 r.

Poprawki/sprostowania wprowadzone od czasu publikacji

Data	Tekst zmieniony
------	-----------------

MIĘDZYNARODOWY STANDARD

ISO
20958

Pierwsze wydanie
2013-08-15

Monitorowanie stanu i diagnostyka układów maszynowych — Analiza sygnatury elektrycznej silników indukcyjnych trójfazowych

Surveillance et Diagnostic des systèmes de Machines — Analyse de
la signature électrique des moteurs triphasés à induction



Numer referencyjny
ISO 20958:2013(E)

© ISO 2013



DOKUMENT CHRONIONY PRAWEM AUTORSKIM

© ISO 2013

Wszelkie prawa zastrzeżone. O ile nie określono inaczej, żadna część tej publikacji nie może być powielana ani wykorzystywana w inny sposób w jakiegokolwiek formie lub za pomocą jakichkolwiek środków, elektronicznych lub mechanicznych, w tym fotokopii lub zamieszczania w Internecie lub intranecie, bez uprzedniej pisemnej zgody. Zgodę można uzyskać w ISO pod adresem podanym poniżej lub w organie członkowskim ISO w kraju wnioskodawcy.

Biuro praw autorskich ISO

Sprawa pocztowa 56 • CH-1211 Genewa 20

Telefon + 41 22 749 01 11

Faks + 41 22 749 09 47

Wyślij e-mail na adres copyright@iso.org

Strona internetowa www.iso.org

Opublikowano w Szwajcarii

Zawartość

Strona

Przedmowa.....iv

Wprowadzenie.....v

1 Zakres.....1

2 Odniesienia normatywne1

3 Terminy i definicje.....1

4 Analiza sygnatury elektrycznej silników indukcyjnych trójfazowych2

4.1 Ogólne..... 2

4.2 Analiza prądu stojana 2

4.3 Analiza prądu elektrycznego, napięcia i mocy10

4.4 Analiza strumienia magnetycznego12

4.5 Analiza wyładowań niezupełnych13

4.6 Badanie zakłóceń elektromagnetycznych18

4.7 Analiza prądu wirnika20

4.8 Analiza napięcia walu20

Załącznik A (informacyjny) Podejście wektorowe Parku21

Bibliografia.....23

Przedmowa

ISO (Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna) jest światową federacją krajowych organów normalizacyjnych (organów członkowskich ISO). Praca nad przygotowaniem Norm Międzynarodowych jest zazwyczaj wykonywana za pośrednictwem komitetów technicznych ISO. Każdy organ członkowski zainteresowany tematem, dla którego został utworzony komitet techniczny, ma prawo być reprezentowany w tym Komitecie. Organizacje międzynarodowe, rządowe i pozarządowe, współpracujące z ISO, również biorą udział w pracach.

ISO ściśle współpracuje z Międzynarodową Komisją Elektrotechniczną (IEC) w zakresie normalizacji elektrotechnicznej.

Procedury użyte do opracowania tego dokumentu i te przeznaczone do jego dalszego utrzymania są opisane w Dyrektywach ISO/IEC, Część 1. W szczególności należy zwrócić uwagę na różne kryteria zatwierdzania wymagane dla różnych typów dokumentów ISO. Niniejszy dokument został opracowany zgodnie z zasadami redakcyjnymi Dyrektyw ISO/IEC, Część 2, www.iso.org/directives.

Zwraca się uwagę na możliwość, że niektóre elementy tego dokumentu mogą być przedmiotem praw patentowych. ISO nie ponosi odpowiedzialności za identyfikację jakichkolwiek lub wszystkich takich praw patentowych. Szczegóły wszelkich praw patentowych zidentyfikowanych podczas opracowywania dokumentu będą podane we Wprowadzeniu i/lub na liście otrzymanych oświadczeń patentowych ISO, www.iso.org/patents.

Wszelkie nazwy handlowe użyte w tym dokumencie są informacjami podanymi dla wygody użytkowników i nie stanowią rekomendacji.

Komitetem odpowiedzialnym za niniejszy dokument jest ISO/TC 108, Drgania mechaniczne, wstrząsy i monitorowanie stanu, Podkomitet SC 5, Monitorowanie stanu i diagnostyka systemów maszynowych.

Wstęp

Niniejsza Norma Międzynarodowa zawiera wytyczne dotyczące monitorowania stanu i diagnostyki maszyn w trybie online w zakresie analizy sygnatury elektrycznej trójfazowych silników indukcyjnych.

Aby wyjaśnić sytuację i zwrócić uwagę na najnowsze osiągnięcia w tej dziedzinie, w niniejszej Normie Międzynarodowej przedstawiono przegląd powszechnie uznanych technik monitorowania stanu wraz ze wskazaniem tych, które prawdopodobnie będą mniej znane.

Monitorowanie stanu i diagnostyka układów maszynowych — Analiza sygnatury elektrycznej silników indukcyjnych trójfazowych

1 Zakres

Niniejsza Norma Międzynarodowa określa wytyczne dotyczące technik online zalecanych do celów monitorowania stanu i diagnostyki maszyn, w oparciu o analizę sygnatury elektrycznej. Niniejsza Norma Międzynarodowa ma zastosowanie do trójfazowych silników indukcyjnych.

2 Odniesienia normatywne

Poniższe dokumenty, w całości lub w części, są normatywnie przywoływane w niniejszym dokumencie i są niezbędne do jego stosowania. W przypadku odniesień datowanych stosuje się wyłącznie cytowane wydanie. W przypadku odniesień niedatowanych stosuje się najnowsze wydanie przywołanego dokumentu (w tym wszelkie zmiany).

ISO 13372, Monitorowanie stanu i diagnostyka maszyn — Słownik

3 Terminy i definicje

Na potrzeby niniejszego dokumentu stosuje się terminy i definicje podane w normie ISO 13372 oraz poniżej.

3.1

bieżąca analiza

analiza trzech prądów zasilających silnik pod kątem wielkości, równowagi i zawartości harmonicznych

3.2

bieżąca analiza sygnatur

analiza widmowa przeprowadzona w prądzie liniowym silnika w celu ustalenia, czy występują prądy o określonych częstotliwościach, które mogą wskazywać na wady podzespołów

Uwaga 1 do wpisu: Tradycyjnie skupiano się na jednej fazie, jednak nowsze techniki, takie jak systemy wektorowe i napięciowo-prądowe Parka, które analizują wszystkie trzy fazy jednocześnie, mogą dostarczyć dodatkowych informacji.

3.3

silnik indukcyjny

asynchroniczna maszyna prądu przemiennego składająca się z obwodu magnetycznego połączonych z dwoma obwodami elektrycznymi lub zestawami obwodów obracającymi się względem siebie, w której moc jest przenoszona z jednego obwodu do drugiego za pomocą indukcji elektromagnetycznej

Uwaga 1 do wpisu: Istnieją dwa podstawowe typy: silniki indukcyjne klatkowe (SCI) i silniki indukcyjne pierścieniowe.

3.4

silnik indukcyjny klatkowy

silnik indukcyjny, w którym obwód wtórny składa się zazwyczaj z nieizolowanych prętów wirnika w rowkach rdzenia zwartych ze sobą za pomocą pierścieni końcowych połączonych z obydwojema końcami każdego pręta

Uwaga 1 do wpisu: Najczęściej stosowanymi materiałami na pręty i pierścienie końcowe są miedź, aluminium lub stopy tych materiałów.

3.5

silnik z wirnikiem uzwojonym

silnik indukcyjny, w którym obwód wtórny składa się z uzwojeń wielofazowych wykonanych z izolowanych cewek wielozwojowych, przy czym każda faza uzwojenia jest podłączona do pierścienia ślizgowego

Uwaga 1 do wpisu: Sterowanie prądem stojana i wirnika podczas rozruchu oraz momentem obrotowym i prędkością silnika podczas pracy odbywa się poprzez podłączenie zewnętrznych rezystorów lub przetwornika półprzewodnikowego do każdej fazy uzwojenia wirnika za pomocą pierścieni ślizgowych i szczotek.

Uwaga 2 do wpisu: Ten typ silnika jest znany także jako silnik indukcyjny pierścieniowy.

4 Analiza sygnatury elektrycznej silników indukcyjnych trójfazowych

4.1 Ogólne

Zdecydowaną większość silników stosowanych w przemyśle stanowią maszyny indukcyjne.

Badania niezawodności wykazują, że najbardziej narażonymi na uszkodzenia częściami silnika indukcyjnego są łożyska, uzwojenie stojana i rdzeń oraz uzwojenie klatki wirnika.

Istnieje wiele opublikowanych materiałów na temat grupy technik monitorowania i diagnostyki, zbiorczo określanych jako analiza sygnatury elektrycznej, które można wykorzystać do monitorowania stanu silników indukcyjnych.

Ogólnie rzecz biorąc, techniki te opierają się na analizie sygnałów dostępnych na zaciskach silnika lub uzyskanych za pomocą odpowiednich przetworników zamontowanych w konstrukcji. Kilka z tych technik przedstawiono w 4.2 do 4.8.

Celem monitorowania stanu stosowanego w przypadku trójfazowych silników indukcyjnych jest ocena integralności silnika i zapewnienie wczesnego ostrzegania o możliwych awariach. Jako pomoc w tym celu możliwe jest uzyskanie informacji o stanie i integralności silnika indukcyjnego poprzez analizę jego sygnatury elektrycznej. Zmiany prądu elektrycznego, napięcia i mocy mogą być również spowodowane przez napędzany sprzęt, a nie tylko silnik; stąd wymagania niniejszej Międzynarodowej Normy i analiza sygnatury elektrycznej mają również zastosowanie do oceny stanu mechanicznego napędzanego sprzętu.

Jeśli silnik jest zasilany z przetwornicy napięcia i częstotliwości o zmiennym napięciu, należy wziąć pod uwagę składowe prądu i napięcia na wyjściu takich urządzeń, które mogą zostać błędnie zdiagnozowane jako wynikające z wad silnika. W przypadku technik takich jak analiza prądu stojana (4.2) i analiza wyładowań niezupełnych (PD) (4.5) zaleca się zablokowanie częstotliwości i napięcia przetwornicy podczas wykonywania tych testów.

4.2 Analiza prądu stojana

4.2.1 Ogólne

Analiza prądu stojana odnosi się do pomiarów prądu stojana. Jednakże, ponieważ na prąd stojana wpływają również strumienie szczeliny powietrznej i prąd wirnika, analiza prądu stojana jest w stanie wykryć problemy w wirniku i napędzanym sprzęcie.

4.2.2 Analiza widmowa

Analiza sygnatury prądu (CSA) umożliwia wykrywanie następujących problemów w silnikach indukcyjnych klatkowych i pierścieniowych, w stosownych przypadkach:

- pęknięte pręty wirnika;
- odlewane uzwojenia wirnika z dużymi pustkami wewnętrznymi;
- uszkodzone połączenia pręta z pierścieniem zwarciovym;
- pęknięte pierścienie zwarciove;

- nadmierna ekscentryczność szczeliny powietrznej;
- wady ł oż ysk tocznych;
- rozbież ność sprzęgieł ;
- zwarte zwoje uzwojenia stojana;
- problemy w napędzanym sprzęcie.

Z tej listy najbardziej znaczące i szkodliwe są problemy z uzwojeniem klatki wirnika, mimośrodowe szczeliny powietrzne i wady ł oż ysk tocznych. Wady ł oż ysk tocznych są uwzględnione, ponieważ CSA moż e zidentyfikować te wady, które moż na również zidentyfikować za pomocą monitorowania drgań.

Konwencjonalne CSA jest wykonywane online przy normalnym peł nym obciąż eniu lub w jego pobliż u. Prąd w jednej fazie silnika jest analizowany pod kątem jego częstotliwości, mierząc go za pomocą zaciskanego transformatora prądowego wokół kabla zasilającego silnik (patrz rysunek 1) lub wokół strony wtórnej transformatora prądowego (CT) (patrz rysunek 2). Nowsze podejścia pozwalają na analizę wszystkich trzech faz, a takż e na obserwację zależ ności między natęż eniem prądu i napięciem.

Należ y zachować ostroż ność podczas interpretacji wyników analizy widmowej stojana, gdy silnik napędza zmienne w czasie obciąż enie mechaniczne, ponieważ róż ne zjawiska mogą prowadzić do pojawienia się podobnych częstotliwości charakterystycznych w prądzie stojana. Mogą być wymagane dodatkowe sposoby rozróż niania między moż liwymi róż nymi przyczynami.

4.2.3 Wady klatki wirnika

Monitorowanie CSA zrewolucjonizował o wykrywanie uszkodzonych prętów wirnika i pękniętych pierścieni zwarciovych w wirnikach silników indukcyjnych klatkowych (SCI). Określone częstotliwości prądu wskazują na obecność wadliwych uzwojeń wirnika podczas normalnej pracy silnika. Wykrycie uszkodzonych prętów wirnika przez CSA moż na czasami potwierdzić również analizą drgań ł oż ysk. Odniesienia [19] i [27] niezależ nie zapoczątkował y analizę sygnatur prądu pod koniec lat 70.

Mówiąc prościej, prąd pł ynący w uzwojeniu stojana nie tylko zależ y od zasilania i impedancji uzwojenia stojana, ale obejmuje również prąd indukowany w uzwojeniu stojana przez pole magnetyczne z wirnika. Innymi sł owo, uzwojenie stojana jest sondą lub „przetwornikiem” problemów w wirniku. Kluczową kwestią jest oddzielenie prądów, które pł yną przez stojan, aby napędzać wirnik, od prądów, które wirnik indukuje z powrotem do stojana, jeśli występuje problem. To oddzielenie jest osiąganе poprzez pomiar skł adowych prądu na częstotliwościach innych niż częstotliwość sieciowa, przy uż yciu analizatora widma częstotliwości o wysokiej rozdzielczości.

Dodatkowe skł adowe częstotliwości, wynikające z defektów wirnika, są widoczne jako pasma boczne skł adowej częstotliwości podstawowej przy częstotliwościach podanych wzorem (1):

$$= () 1 \pm 2^k f_1 \quad (1)$$

Gdzie

S jest poślizgiem wirnika na jednostkę;

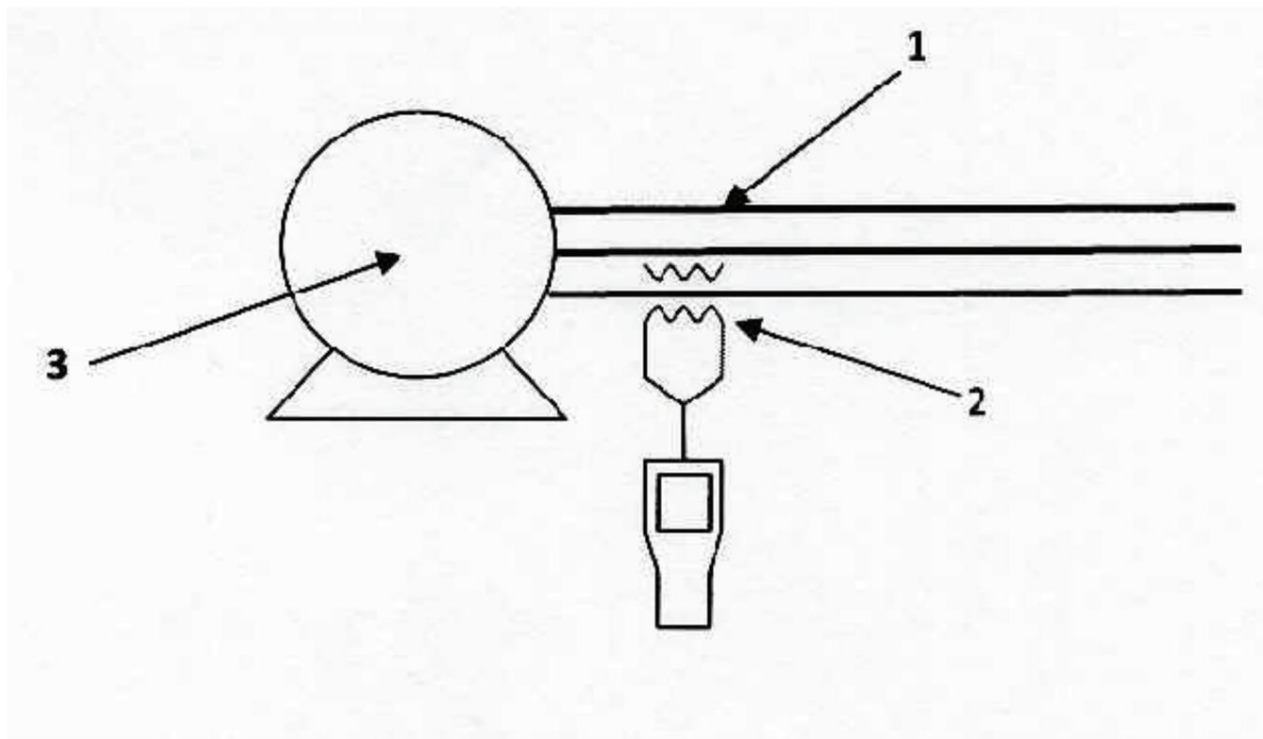
f_1 jest podstawową częstotliwością zasilania;

k wynosi 1, 2, 3, itd.

Prądy wirnika w uzwojeniu klatkowym wytwarzają efektywne trójfazowe pole magnetyczne, które ma taką samą liczbę biegunów jak pole stojana, ale obraca się z częstotliwością poślizgu względem obracającego się wirnika. Jeśli występuje asymetria prądu wirnika, powstaje wypadkowe pole wirujące wstecz (tj. wolniej) z częstotliwością poślizgu względem obracającego się do przodu wirnika. Asymetria występuje, jeśli jeden lub więcej prętów wirnika jest zerwanych lub występują przerwy w pierścieniu zwarciovym, uniemoż liwiając przepływ prądu przez nie. Moż na wykazać, ż e to pole wirujące wstecz faktycznie obraca się do przodu z prędkością $(1 - 2s)$ razy większą od prędkości synchronicznej względem nieruchomego uzwojenia stojana. Powoduje to indukcję prądów w stojanie

uzwojenie przy częstotliwości $f_1(1 \pm 2s)$, która jest określana jako dolna dwukrotna częstotliwość poślizgu wstęga boczna z powodu zł amanych prętów. Prąd ten powoduje cykliczną zmianę prądu, która powoduje oscylację momentu obrotowego wirnika przy dwukrotnej częstotliwości poślizgu ($2sf_1$) i odpowiadającą jej oscylację prędkości, która jest funkcją bezwzględności napędu. Ta oscylacja prędkości wirnika tworzy górną składową pasma bocznego (Odniesienie [21]) prądu przy częstotliwości $f_1(1 + 2s)$, która jest wzmacniana przez trzeci strumień harmoniczny. Zł amane pręty wirnika powodują zatem indukcję składowych prądu w uzwojeniu stojana przy częstotliwościach podanych przez Wzór (2):

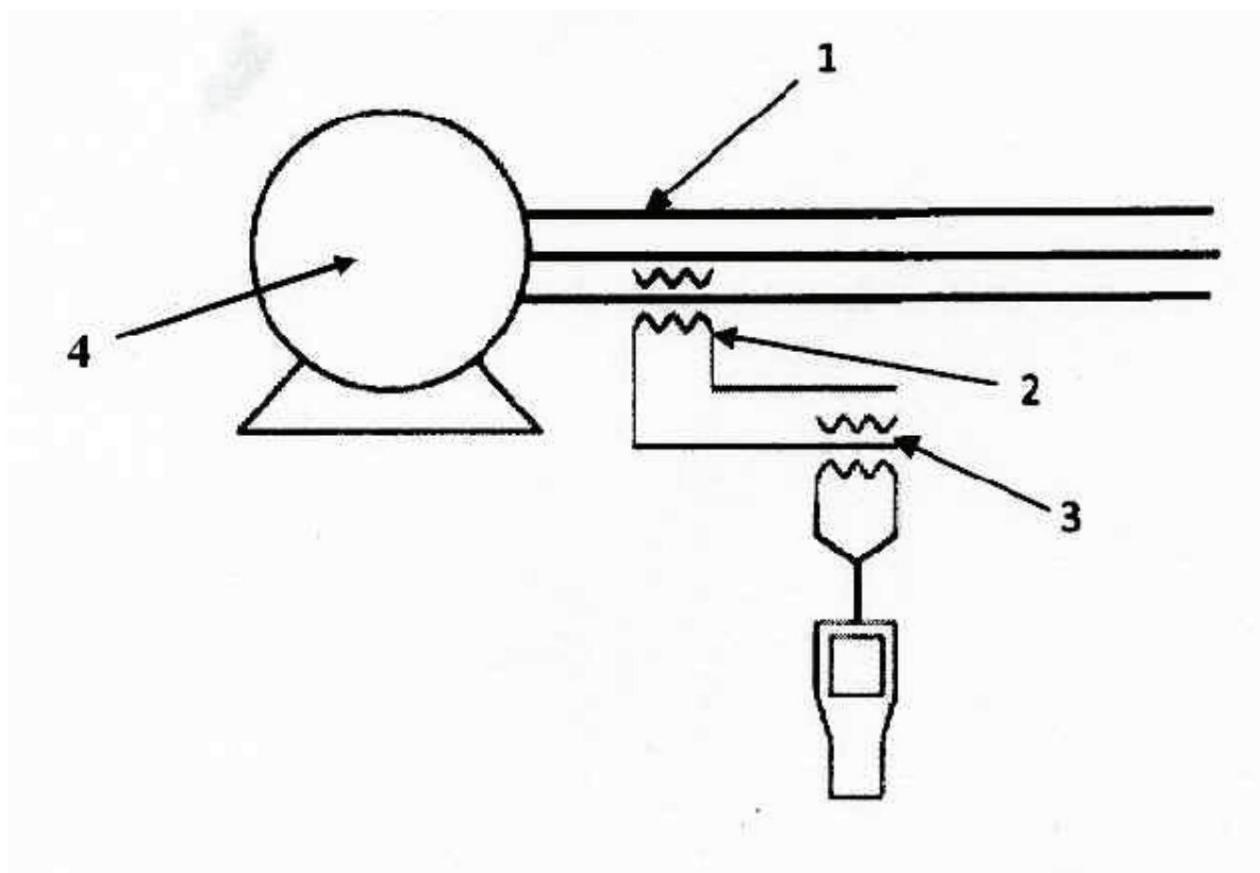
$$(\omega_p = 1 \pm 2s) \quad (2)$$



Klawisz

1 przewód fazowy 2 sonda prądowa, n2 3 silnik indukcyjny klatkowy

Rysunek 1 — Pomiar CSA silnika indukcyjnego klatkowego na przewodzie fazowym



Klawisz

1	sonda prądowa	3	sonda prądowa, n2
2	przewodu fazowego, n1	4	silnik indukcyjny klatkowy

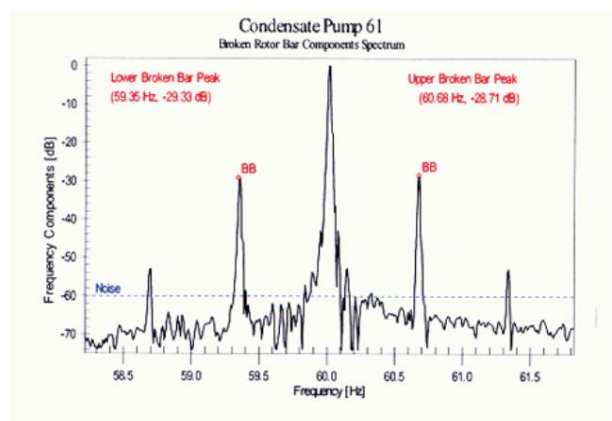
Rysunek 2 — Pomiar przekroju poprzecznego silnika indukcyjnego klatkowego z uzwojenia wtórnego przezł adnika prądowego

Skł adowe prądu z powodu pękniętych prętów wirnika, które pojawiają się na wykresie amplitudy względem częstotliwości logarytmicznej (takim jak pokazano na [rysunku 3](#)) jako skł adowe prądu, które są oddalone o $\pm 2sf_1$ od podstawowej skł adowej prądu 50 Hz lub 60 Hz. Waż ne jest, aby zauważyć, że e jeśli rdzeń wirnika ma taką samą liczbę ramion pająka podporowego jak liczba biegunów uzwojenia stojana, powstaną pasma boczne o takich samych częstotliwościach jak pasma z pękniętych prętów (Odniesienie [16]).

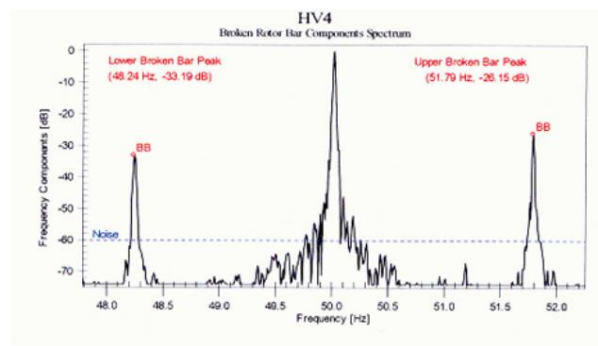
Ponadto urządzenia takie jak przekł adnie w ukł adzie napędowym silnika/napędzanego sprzętu mogą tworzyć symetryczne pasma boczne wokół podstawowego prądu częstotliwości, które mogą wyglądać jak te z pękniętych prętów. Należ y zachować ostroż ność przy ocenie pasm bocznych wokół podstawowego prądu liniowego, które znajdują się w domenie tych generowanych przez przerwy w uzwojeniach klatki wirnika, ponieważ istnieją wady napędzanego sprzętu, które mogą generować podobne wzorce. W szczególności róż ne wał y w przekł adni zainstalowanej między silnikiem a jego napędzanym sprzętem mogą wytwarzać szereg symetrycznych prądów wokół podstawowego prądu liniowego.

Najlepszym sposobem rozróż nienia takich prądów od prądów powstających w wyniku przerywania uzwojenia klatkowego jest przeprowadzenie testów przy dwóch znacząco róż nych obciąż eniach, aby sprawdzić, czy występuje ruch wstęgi bocznej proporcjonalny do zmiany poślizgu wirnika.

Ponieważ prąd stojana wynikający z przerw w uzwojeniu klatki wirnika jest modulowany z częstotliwością dwukrotnie większą od częstotliwości poślizgu, sf1 często wynosi około 1 Hz. Powoduje to „brzmienie” przy tej niskiej częstotliwości, które jest łatwo rozpoznawalne przez doświadczony personel zakładu.



a) Silnik 60 Hz



b) Silnik 50 Hz

Rysunek 3 — Aktualne sygnatyry silników ze złamanymi prętami

Prąd jest analizowany za pomocą analizatora widma lub dostosowanej jednostki przetwarzania sygnału cyfrowego, jak pokazano na rysunku 3, który przedstawia przykłady silników 60 Hz i 50 Hz z uszkodzonymi prętami wirnika. Zazwyczaj pasma boczne są oddalone tylko o 0,3 do 3 Hz lub więcej od bardzo dużej składowej częstotliwości mocy, a prądy pasm bocznych są zazwyczaj 100 do 1 000 razy mniejsze niż główne prądy częstotliwości mocy. Poślizg „s” zależy zarówno od liczby biegunów i szczelin w kształcie wirnika, jak i od rodzaju materiału, z którego wykonane jest uzwojenie klatki. Częstotliwość modulacji zależy nie tylko od współczynnika poślizgu przy obciążeniu znamionowym, ale także od względnego I/In , gdzie I jest rzeczywistym prądem, a In pełnym prądem obciążenia silnika. W związku z tym, do dokładnego pomiaru szczytów pasm bocznych spowodowanych uszkodzonymi prętami wirnika wymagany jest wyjątkowy zakres dynamiki i rozdzielczość częstotliwości. Z tego powodu wielkości prądu są mierzone w decybelach. Jeśli nie ma przerw w uzwojeniu klatki wirnika, to nie ma pasm bocznych lub są one bardzo niskie.

Aby wykryć przerwy w uzwojeniu klatki, konieczne jest dokładne poznanie częstotliwości poślizgu. We wczesnych detektorach „uszkodzonego pręta wirnika” stosowano stroboskop, który bezpośrednio wykrywał prędkość wirnika (i w ten sposób umożliwiał obliczenie poślizgu). Alternatywnie poślizg można wykryć za pomocą sondy strumienia osiowego w pobliżu uzwojenia wirnika (Odniesienie[19]). Obecne monitory CSA mogą mieć zastrzeżone środki szacowania poślizgu na podstawie samego prądu (Odniesienie[16]). Znacznie ułatwia to wykonywanie CSA. Niektóre z tych metod są skuteczne, ale wykazano, że wiele z nich powoduje błędy w przypadku małych silników, silników o dużej liczbie biegunów lub silników napędzających obciążenia pulsujące.

Podstawowa interpretacja wymaga porównania dolnej wstęgi bocznej z prądem stojanym o częstotliwości sieciowej. Doświadczenie pokazuje, że jeśli pasmo boczne staje się większe niż około (-50 dB) prądu o częstotliwości sieciowej, wówczas prawdopodobne są pęknięcia uzwojenia klatki. Im większy prąd pasma bocznego (czyli im większa część prądu o częstotliwości sieciowej), tym poważniejsze jest pogorszenie stanu uzwojenia klatki wirnika. Podobnie jak w przypadku większości innych monitorów, najlepiej jest śledzić trend wielkości wstęgi bocznej na przestrzeni lat. Jeśli wstęga boczna zwiększa się z czasem przy mniej więcej takim samym obciążeniu, wówczas można rozsądnie oczekiwać, że większa liczba prętów pęknie w większej liczbie miejsc. Rysunki 3 a) i 3 b) przedstawiają wykresy decybeli w funkcji częstotliwości silników z kilkoma pękniętymi prętami. W pewnym momencie może być wystarczająco dużo pęknięć w prętach wirnika, że silnik może nie uruchomić się lub część metalu może odlecieć od wirnika, niszcząc uzwojenie stojana. CSA może nie wykryć pęknięć prętów w dużych silnikach dwu- lub czterobiegunowych, jeśli pęknięcia wystąpią pod pierścieniami ustalającymi uzwojenia końcowego, ponieważ sam pierścień ustalający może pozwolić na dalszy przepływ prądu.

Wczesne monitorowanie CSA było podatne na fałszywe wskazania (tj. wskazujące, że wirnik ma problemy, gdy ich nie miał) i, rzadziej, na pomijanie wadliwych uzwojeń wirnika. Dlatego też wczesni użytkownicy tego testu mieli niskie zaufanie do wyników. Jednak ulepszenia w teorii, oprogramowaniu i analizatorze widma oraz

rozdzielczość cyfrowego procesora sygnału owego sprawił a, że wykrywanie problemów z uzwojeniem klatki wirnika stało się znacznie bardziej niezawodne (patrz [16]).

4.2.4 Monitorowanie mimośrodowości szczeliny powietrznej

Mimośrodowość szczeliny powietrznej można wykryć, identyfikując charakterystyczny wzór sygnatury prądu wynikający z nieprawidłowych poziomów mimośrodowości szczeliny powietrznej. Konkretnie częstotliwości składowych prądu wskazujące na mimośrodowość szczeliny powietrznej można obliczyć ze wzoru (3) (Odniesienie [25]):

$$R_{1s} = \frac{1}{P} \left(\frac{s}{f} \pm \eta_{ws} \right) \pm \frac{1}{P} \quad (3)$$

Gdzie

R_{1s} jest składową częstotliwością, która jest funkcją mimośrodowości szczeliny powietrznej (Hz);

f_1 jest częstotliwością zasilania (Hz);

z liczba gniazd wirnika jest taka sama jak liczba prętów wirnika;

η_{ws} wynosi 1, 3, 5 itd. [liczba całkowita 1 odpowiada składowej podstawowej siły y magnetomotorycznej (mmf) kształtu fali, liczba całkowita 3, 3. harmoniczna itd.];

S jest to wirnik na jednostkę poślizgu;

P to są pary biegunów.

Wzór (3) składa się z dwóch części (Odniesienie [26]): częstotliwości przejścia przez szczelinę wirnika, f_{rs} , podane we wzorze (4)

$$R_{1s} = \frac{1}{P} \left(\frac{s}{f} \pm \eta_{ws} \right) \quad (4)$$

i częstotliwość prędkości obrotowej wirnika, f_r , podana we wzorze (5):

$$R_{1s} = \frac{1}{P} \quad (5)$$

W ten sposób mimośrodowość szczeliny powietrznej daje szereg składowych częstotliwości przechodzących przez szczelinę wirnika o częstotliwościach uzyskanych ze wzoru (4) z częstotliwościami wstęgowymi $\pm f_r$ uzyskanymi ze wzoru (5).

Doświadczenie pokazało, że częstotliwości przechodzące przez szczeliny wirnika można łatwiej wykryć w trójfazowych silnikach indukcyjnych, które nie mają skośnych szczelin wirnika. Wynika to z faktu, że skośne szczeliny wirnika zmniejszają wielkość składowych strumienia częstotliwości przechodzących przez szczeliny wirnika, a zatem siły elektromagnetyczne, co skutkuje zmniejszeniem drgań rdzenia stojana i hałasu akustycznego. Za pomocą przyrządu o szybkiej analizie Fouriera i wystarczającej rozdzielczości można wykryć te składowe częstotliwości przechodzących przez szczeliny wirnika i ich pasma boczne, a także zmierzyć ich wielkości.

Aby ocenić mimośrodowość szczeliny powietrznej silnika z tego widma, wybiera się składową częstotliwości przechodzącą przez szczelinę wirnika (RSPFC) o najwyższej amplitudzie. Średnia różnica amplitudy między $\pm f_r$. Następnie określa się składowe częstotliwości prędkości obrotowej (RSFC) (w decybelach) w odniesieniu do RSPFC (patrz rysunek 4). Im mniejsza jest średnia różnica wielkości między RSPFC i RSFC, tym bardziej mimośrodowa jest szczelina powietrzna między stojanem a wirnikiem.



3 RSFC = (+fr)

Rysunek 4 — Silnik ze znaczną mimośrodowością szczeliny powietrznej

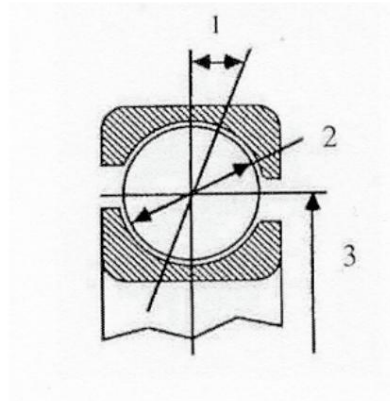
Wykazano, że zwarte zwoje w uzwojeniach stojana niskiego napięcia generują szereg harmonicznych prądu, które wynikają ze wzoru (6) (ISO 13379[2]):

$$P_{sw.}^{ff} = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N 1(s_k)_{\pm} \quad (6)$$

Gdzie

S jest to wirnik na jednostkę poślizgu.

Łożyska toczne wytwarzają składowe prądy stojane o unikalnym zestawie częstotliwości dla konkretnego defektu. Częstotliwości te są funkcją rozmiaru łożyska oraz rodzaju i lokalizacji defektu. Częstotliwości te można monitorować pod kątem defektów w bieżni zewnętrznej łożyska, bieżni wewnętrznej łożyska i elementach tocznych. W przypadku łożysk kulkowych wzory podane w tabeli 1 można wykorzystać do określenia obecności takich defektów, jeśli znane są wymiary łożyska (patrz rysunek 5) i liczba kulek (odniesienie [19]).



Klawisz

1 kąt styku, β Średnica 2 kulek, D_{ball} 3 średnica podziałki, D_{pit}

Rysunek 5 — Wymiary łożysk kulkowych

Tabela 1 — Częstotliwość występowania wad łożysk

Lokalizacja wady łożyska	Częstotliwość występowania wad
Półka	$f_{rb} = (D_{pit}/D_{ball}) f_{rm} [1 - (D_{ball}/D_{pit} \cos \beta)^2]$
Rasa zewnętrzna	$f_{ro} = (n/2) f_{rm} [1 - (D_{ball}/D_{pit} \cos \beta)]$
Wyścięg wewnętrzny	$f_{pt} = (n/2) f_{rm} [1 + (D_{ball}/D_{pit} \cos \beta)]$

Gdzie

- Z jest częstotliwością prędkości obrotowej wirnika, równą obrotom na minutę podzielonej przez 60;
- N jest liczbą piłek;
- β jest kątem zwilżenia;
- D_{pit} jest średnicą podziałową;
- D_{ball} jest średnicą kuli.

Częstotliwość występowania defektów bieżni wewnętrznej i zewnętrznej można oszacować na podstawie wzorów ze wzoru (7), jeżeli liczba kulek mieści się w przedziale od 6 do 19.

$$F_o = 0,4 \text{ niern}$$

$$F_I = 0,6 \text{ niern}$$

(7)

Przybliżone wzory podane we wzorze (7) można stosować również do łożysk tocznych posiadających od 12 do 18 wałeczków.

Dlatego też, używając przyrządu zdolnego do pomiaru i identyfikacji tych składowych prądów, aby sprawdzić, czy są obecne i dominujące, można zidentyfikować lokalizację defektów łożysk. Ponadto, wielkości harmonicznych prądów spowodowanych defektami łożysk można śledzić, aby sprawdzić, czy występuje starzenie się łożysk i czy awaria może być nieuchronna.

Oprogramowanie niektórych przyrządów pomiarowych CSA zawiera szczegółowe informacje o wymiarach łożysk tocznych i oblicza oczekiwane częstotliwości dla konkretnych defektów podanych w wzorach podanych w tabeli 1.

4.2.7 Wykrywanie innych problemów mechanicznych

Zmiany w mimośrodowości szczeliny powietrznej powodują zmiany w przebiegu strumienia szczeliny powietrznej. W przypadku mimośrodowości dynamicznej położenie wirnika może się zmieniać, a wszelkie oscylacje w promieniowej długości szczeliny powietrznej powodują zmiany w strumieniu szczeliny powietrznej. W konsekwencji może to indukować składowe prądu stojana o częstotliwościach podanych wzorem (8):

$$f_{mf} = \frac{1}{2} \left(\frac{f_1}{Z} \pm \frac{f_{wr}}{m} \right) \quad (8)$$

Gdzie

f_1 jest częstotliwością zasilania;

Z jest częstotliwością prędkości obrotowej wirnika;

m jest liczbą harmoniczną 1,2,3...;

f_{wr} jest częstotliwością składowej prądu wynikającą ze zmian szczeliny powietrznej.

W rezultacie problemy takie jak niewspółosiowość wału/sprzęgła, zużycie łożysk ślizgowych i inne problemy mechaniczne (w tym występujące w urządzeniach napędzanych), które potencjalnie mogą skutkować zaburzeniami dynamiki wirnika, można wykryć, analizując widmo prądu.

4.2.8 Podejście wektorowe Parka

Wektor Parka to matematyczne podejście do przedstawienia trzech faz jako dwóch faz ortogonalnych, co pozwala na znacznie prostszą analizę. Może być ono wykorzystane do monitorowania prądów zasilania silnika indukcyjnego przy użyciu metody podanej w [Załączniku A](#). To nieinwazyjne podejście zostało pomyślnie zastosowane w środowiskach przemysłowych do diagnozowania usterek trójfazowego silnika indukcyjnego, takich jak nierównowaga napięcia zasilania, mimośrodowość szczeliny powietrznej, błędy międzyzwojowe uzwojenia stojana, rozbieżności mechaniczne, przerwy w uzwojeniu wirnika w silnikach z wirnikiem uzwojonym oraz zerwane pręty wirnika lub pierścienie końcowe w silnikach klatkowych (Odniesienia [11]–[14]).

Zaawansowana implementacja podejścia wektorowego Parka, znana jako rozszerzone podejście wektorowe Parka (EPVA), dodatkowo poprawia diagnostykę usterek online w eksploatacji trójfazowych silników indukcyjnych (patrz [Załącznik A](#)). Ta technika ma zastosowanie do silników bezpośrednio podłączonych do zasilania głównego lub zasilanych z falowników i jest również zdolna do diagnozowania usterek trójfazowych silników indukcyjnych, gdy występują pojedynczo lub w połączeniu.

Aby odróżnić wpływ uszkodzeń wirnika od wpływu związanego z napędzaniem obciążen zmieniających się w czasie, można zastosować podejście Parka wykorzystujące układ odniesienia synchronicznego (patrz [załącznik A](#)).

4.3 Analiza prądu elektrycznego, napięcia i mocy

4.3.1 Ogólne

Oprócz prądu zasilania silnika, napięcie zasilania jest również łatwo dostępne i może dostarczyć dodatkowych informacji, które są niezbędne do analizy stanu silnika. Moc elektryczna, będąc wielkością bezpośrednio związaną z prądem i napięciem, nabiera w tym kontekście szczególnego znaczenia.

Monitorowanie prądów trójfazowych, napięć zasilania fazowego i mocy pobieranej z wyłącznika obwodu silnika lub centrali sterowania silnikiem (MCC) podczas pracy i rozruchu może umożliwić wcześniejszą identyfikację usterek związanych z uzwojeniem stojana i wirnika silnika.

4.3.2 Uruchamianie testów

Do testów wykonawczych zalicza się:

- Niezrównoważone prądy spowodowane nierównowagą impedancji lub nierównym napięciem zasilania: Ogólnie rzecz biorąc, niewielka nierównowaga napięć fazowych powoduje znacznie większą nierównowagę prądów fazowych. Wpływ niesymetrycznych napięć na wielofazowe silniki indukcyjne jest równoważony wprowadzeniem „napięcia o kolejności ujemnej” mającego obrót przeciwny do tego, który występuje w przypadku zrównoważonych napięć fazowych. To napięcie o kolejności ujemnej wytwarza strumień szczeliny powietrznej, który obraca się przeciwnie do obrotu wirnika, co powoduje wyższe prądy. Prądy te powodują przegrzanie uzwojenia stojana i wirnika, jeśli obciążenie silnika nie zostanie zmniejszone. Niesymetryczne prądy liniowe mogą również wynikać z niesymetrycznej impedancji fazowej z powodu takich defektów, jak połączenia o wysokiej rezystancji lub zwarcia izolacji zwojów cewki. Te ostatnie prawdopodobnie zostaną wykryte tylko wtedy, gdy zwarcie izolacji zwojów jest daleko od najbliższego uziemienia.
- Nierównomierne napięcie zasilania spowodowane nierównomiernym obciążeniem układu zasilania lub połączeniami o dużej rezystancji: Jak wskazano powyżej, niewielkie nierównomierne napięcie może powodować znacznie większe nierównomierne natężenie prądu.
- Monitorowanie mocy wejściowej silnika: Wzrost zużycia energii przez silnik w czasie zazwyczaj wskazuje na zmniejszenie się wydajności układu napędowego na skutek degradacji podzespołów silnika lub napędzanego sprzętu.
- Analiza harmonicznego napięcia: Identyfikuje obecność harmonicznego w napięciu zasilania silnika z innych urządzeń, takich jak napędy silników o zmiennej prędkości typu przekształtnikowego. Takie harmoniczne mogą być przyczyną dodatkowych strat w silniku, które zwiększają temperaturę roboczą uzwojenia stojana (Odniesienie [27]).

4.3.3 Rozpoczęcie testów

Rozpoczęcie testów obejmuje następujące etapy.

- Zwiększenie czasu rozruchu silnika wskazuje na możliwe przerwy w uzwojeniu klatki wirnika i/lub zwiększa w napędzanym sprzęcie moment obrotowy spowodowany degradacją podzespołów.
- Pomiary początkowe pierwszych kilku cykli prądu i prądu aż do osiągnięcia znamionowej prędkości silnika mogą potwierdzić obecność wysokiego prądu przejściowego spowodowanego niską reaktancją podprzejściową w silnikach o wysokiej sprawności i innymi przyczynami zadziałania zabezpieczeń silnika.

4.3.4 Modelowe układy napięcia i prądu

Jest to technika wykorzystująca informacje dostępne z sygnałów prądu i napięcia we wszystkich trzech fazach jednocześnie. Systemy oparte na modelach są w stanie zidentyfikować wiele takich samych zjawisk, jakie można zaobserwować również za pomocą bardziej konwencjonalnych technik, obejmujących obszary elektryczne, mechaniczne i operacyjne (Odniesienie [17]).

Systemy oparte na modelach działają na liniach pokazanych na poniższym rysunku 6 i mierzą zarówno prąd, jak i napięcie, gdy silnik jest w ruchu, a następnie automatycznie tworzą matematyczny model zależności między prądem a napięciem. Poprzez zastosowanie tego modelu do zmierzonego napięcia obliczany jest modelowany prąd, który jest porównywany z rzeczywistym zmierzonym prądem. Odchylenia między zmierzonym prądem a modelowanym prądem reprezentują niedoskonałości w silniku i systemie napędzanego sprzętu, które można analizować, używając kombinacji wektora Parka w celu uproszczenia prądów trójfazowych do dwóch faz ortogonalnych (D&Q), analizy Fouriera w celu uzyskania wykresu gęstości widmowej mocy oraz algorytmicznej oceny powstałego widma w celu zidentyfikowania określonych usterek lub trybów awarii.

Te systemy są przeznaczone do stałej instalacji jako rozwiązanie do monitorowania stanu, a nie jako krótkoterminowe urządzenie pomiarowe diagnostyczne, a ich wyjścia można zintegrować z normalnymi systemami zakładu. Będąc trwałymi połączeniami, trendy historyczne są automatycznie rejestrowane.

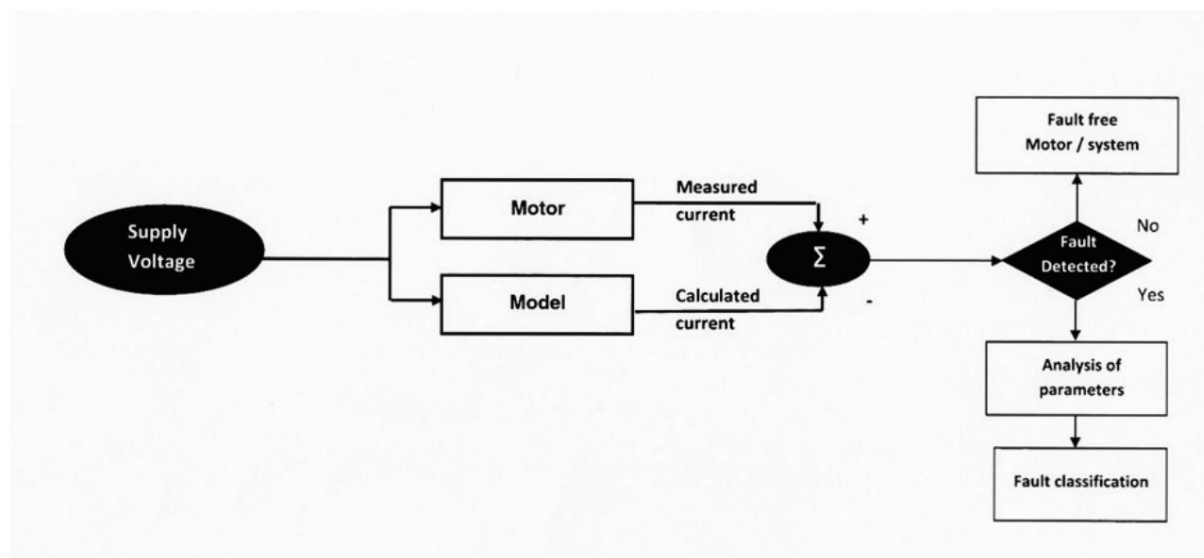
Rodzaje wyników, jakie mogą tworzyć tego typu urządzenia, obejmują pojedynczy ekran, wyświetlacze świateł drogowych pokazujące ogólną pracę sprzętu, wraz z diagnozą szeregu problemów mechanicznych, elektrycznych i operacyjnych oraz wykresy trendów pokazujące, jak te parametry zmieniają się w czasie. Koncepcja tego typu urządzenia polega na tym, że może być ono używane przez zwykłych operatorów i konserwatorów zakładów bez potrzeby specjalistycznej interpretacji widm, chociaż podstawowe wykresy widmowe są dostępne, jeśli jest to wymagane.

Rodzaje usterek, które można wykryć, obejmują szereg problemów mechanicznych, takich jak niewyważenie, niewspółosiowość i problemy z łóżyskami w silniku i napędzanym sprzęcie, a także problemy elektryczne, w tym awarie izolacji, luźne uzwojenia stojana, problemy z rowkami wirnika, niewyważenie prądu lub napięcia i zniekształcenia harmoniczne. Ponieważ systemy te mierzą zarówno prąd, jak i napięcie, monitorują również moc i są w stanie identyfikować problemy spowodowane nietypowymi warunkami pracy oraz identyfikować przyczyny utraty wydajności.

Ponieważ systemy oparte na modelach badają wyłącznie różnice między prądami rzeczywistymi i prognozowanymi, skutecznie filtrują wszystkie normalne sygnały elektryczne, które są tak oczywiste w konwencjonalnej analizie widmowej prądu (CSA), pozostawiając do analizy znacznie prostszy zestaw sygnałów.

Ponieważ te systemy opierają się na relacji między napięciem a prądem, dobrze radzą sobie z systemami napędzanymi falownikiem, w których napięcie wejściowe może mieć zmienną częstotliwość i może występować zaszumiony przebieg o wysokiej zawartości składowych harmonicznych. Systemy oparte na modelach skutecznie filtrują cały ten szum w sygnale napięcia z wynikowego sygnału prądu, pozostawiając jedynie podstawowe niedoskonałości.

Łatwość użytkowania i niski koszt tego typu sprzętu sprawiają, że nadaje się on do tańszego sprzętu o niższym znaczeniu.



Rysunek 6 — System monitorowania napięcia i prądu oparty na modelu

4.4 Analiza strumienia magnetycznego

Każde zniekształcenie gęstości strumienia szczeliny powietrznej spowodowane defektami wirnika lub stojana powoduje powstanie osiowego strumienia homopolarnego w wale, który można wykryć za pomocą cewki poszukiwawczej zamontowanej wokół wału. Zakres defektów zarówno stojana, jak i wirnika można wywnioskować z widma strumienia osiowego uzyskanego poprzez przeprowadzenie transformacji Fouriera na przebiegu cewki poszukiwawczej. Technika ta ma zastosowanie w szerokim zakresie silników, ale istnieje możliwość, że w przypadku niektórych konstrukcji silników obudowa może osłabiać amplitudę strumienia osiowego wykrywanego przez cewkę poszukiwawczą zamontowaną na zewnątrz. Utrudnia to ilościową ocenę rozmiaru uszkodzenia bez odcisku palca poszczególnych silników.

4.5 Analiza wyładowań niezupełnych

4.5.1 Zasady dotyczące wyładowań niezupełnych

Ostrzeżenie o początku awarii elektrycznej w uzwojeniu stojana silnika można uzyskać poprzez pomiar online aktywności PD. Stopniowa degradacja izolacji uzwojenia prowadzi do wzrostu aktywności PD, ale ilościowy związek między tą aktywnością a pozostałym okresem użytkowania izolacji, który jest wymagany do monitorowania stanu, nie został jeszcze pomyślnie udowodniony.

PD to małe iskry elektryczne, które występują w konwencjonalnych uzwojeniach stojana 50 lub 60 Hz o napięciu znamionowym 3,3 kV lub wyższym (IEC 60270[6] i odniesienie [23]). PD nie występuje lub jest nieistotne w dobrze wykonanych uzwojeniach stojana, które są w dobrym stanie. Jednakże, jeśli system izolacji uzwojenia stojana jest źle wykonany lub uzwojenie uległo pogorszeniu z powodu przegrzania, ruchu cewki lub zanieczyszczenia, wówczas może wystąpić PD.

Test PD bezpośrednio mierzy prądy impulsowe wynikające z PD w uzwojeniu. Jak opisano w IEEE 1434[7] i IEC/TS 60034-27-2[5] dla stojanów z uzwojeniem formowanym, istnieje wiele metod testowych.

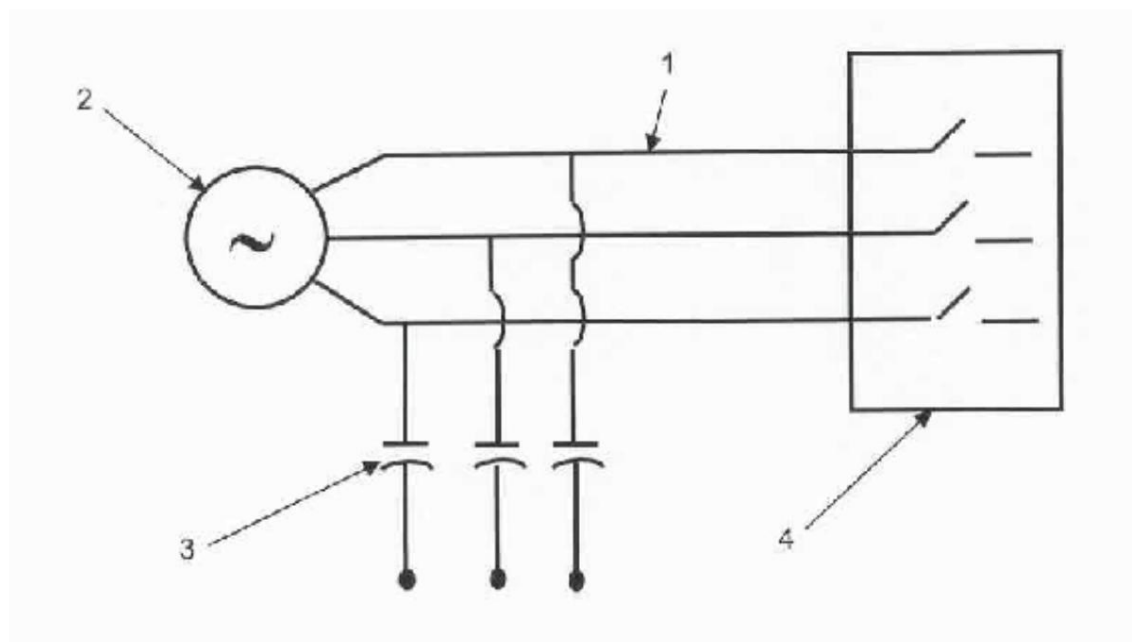
Opisane tutaj metody dotyczą silnika będącego w eksploatacji i pracującego przy normalnym obciążeniu.

PD występuje tylko wtedy, gdy w układzie izolacji stojana lub na powierzchni izolacji powstaje wypełniona powietrzem pustka (IEC 60270[6]). Przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym, gdy napięcie w pustce osiąga szczyt około 3 kV/mm i występuje impuls PD, następuje bardzo szybki przepływ elektronów z jednej strony wypełnionej powietrzem pustki na drugą stronę. Ponieważ elektrony mają ładunek i poruszają się z prędkością bliską prędkości światła na małej odległości, powstaje impuls prądu, który może trwać bardzo krótko, wynoszący kilka nanosekund. Transformata Fouriera impulsu prądu generuje częstotliwości od DC do kilkuset megaherców (IEEE 1434[7]).

4.5.2 Pomiar PD online za pomocą sprzęgaczy pojemnościowych

Każde urządzenie wraz z linią na wysokie częstotliwości może wykryć prądy impulsowe PD. W teście PD na kompletnych uzwojeniach najczęstszym sposobem wykrywania prądów PD w konwencjonalnych stojanach 50 lub 60 Hz jest użycie kondensatorów wysokonapięciowych podłączonych do zacisku stojana każdej fazy. Zazwyczaj w przypadku silników sprzęgacze PD o pojemnościach od 80 pF do 2 nF są podłączone do zacisków silnika, jak pokazano na rysunku 7.

i do skrzynki zaciskowej, za pomocą kabli koncentrycznych, aby umożliwić pomiary PD. Kondensator ma bardzo wysoką impedancję dla wysokiego napięcia AC w stojanie, podczas gdy jest bardzo niską impedancją dla prądów impulsowych PD o wysokiej częstotliwości. Wyjście kondensatora wysokonapięciowego napędza obciążenie rezystancyjne. Prąd impulsowy PD, który przepływa przez kondensator, tworzy impuls napięcia na rezystorze, który może być wyświetlany na oscyloskopie, analizatorze widma częstotliwości lub przyrządzie pomiarowym PD. Transformata Fouriera pojedynczego impulsu PD zawiera częstotliwości od DC do kilkuset megaherców, jeśli czujnik PD jest optymalnie zlokalizowany w pobliżu źródła PD. Wiele rodzajów zakłóceń wytwarza impulsy, ale zawartość częstotliwości impulsów w czujniku PD może być niższa niż PD uzwojenia stojana. Na przykład iskrzenie spowodowane słabymi połączeniami elektrycznymi lub PD lub innymi impulsami podobnymi do PD w innych urządzeniach, które są oddalone od testowanej maszyny, często wytwarza częstotliwości do zaledwie kilku megaherców. Tak więc jedną z metod oddzielania PD od zakłóceń jest stosowanie filtrów analogowych lub cyfrowych, które preferencyjnie reagują na impulsy w określonych zakresach częstotliwości. System pomiaru PD (czujnik i elektronika detekcyjna) jest opisywany jako mający niższą częstotliwość odcięcia i górną częstotliwość odcięcia. Typowe zakresy częstotliwości dla systemów pomiaru PD online to zakres niskich częstotliwości (LF: poniżej 3 MHz), zakres wysokich częstotliwości (HF: od 3 MHz do 30 MHz), zakres bardzo wysokich częstotliwości (VHF: od 30 MHz do 300 MHz) lub zakres ultrawysokich częstotliwości (UHF: od 300 MHz do 3 GHz) (ISO 13374-1[1]). Podczas stosowania systemów pomiarowych w zakresie niskich częstotliwości (LF: poniżej 3 MHz) (Odniesienie [18]), niższe częstotliwości podlegają znacznemu wpływowi nośnej linii energetycznej, przełączenia silnika zasilanego przez przetwornicę i zakłóceń układu wzbudzenia, które należy stłumić. Ważnym czynnikiem jest eliminacja szumów, które można ocenić jako wyładowania niezupełne uzwojenia. W tym celu skuteczne okazało się stosowanie sprzęgaczy pojemnościowych i długich przewodów zasilających silnik (> 30 m).



Klawisz

1	kabel zasilający	3	kondensatory detekcji PD
2	silnik	4	wył łąznik obwodu

Rysunek 7 — Typowy układ sprężaczy pojemnościowych do pomiaru wyl ądowań niezupeł nych silnika

Generalnie, im wyż sza górna częstotliwość odcięcia układu wykrywania PD, tym większy stosunek sygnału do szumu, a zatem mniejsze ryzyko fałszywych wskazań. Jednak im wyż sza dolna częstotliwość odcięcia, tym mniejsze prawdopodobieństwo wykrycia PD, które jest oddalone od czujnika. Zakładając, że czujnik PD znajduje się przy zaciskach wysokiego napięcia uzwojenia stojana, układ PD o niskiej częstotliwości jest wrazliwy na PD w większej liczbie cewek niż układ PD o wysokiej częstotliwości. Należy jednak pamiętać, że w testach PD online, cewki w pobliżu zacisku wysokiego napięcia są jedynymi, które prawdopodobnie będą miały wysoki poziom aktywności PD, ponieważ napięcie jest wyższe niż w przypadku cewek oddalonych od zacisków. Jednak inne zjawiska iskrzenia i łuku, które mogą znacznie uszkodzić izolację, mogą być również wykrywane przez urządzenia pomiarowe PD i mogą występować w całym uzwojeniu nawet w miejscach o niskim potencjale blisko przewodu neutralnego, np. iskrzenie wibracyjne z półprzewodnikowego materiału powłoki cewki/pręta o zbyt niskiej rezystywności.

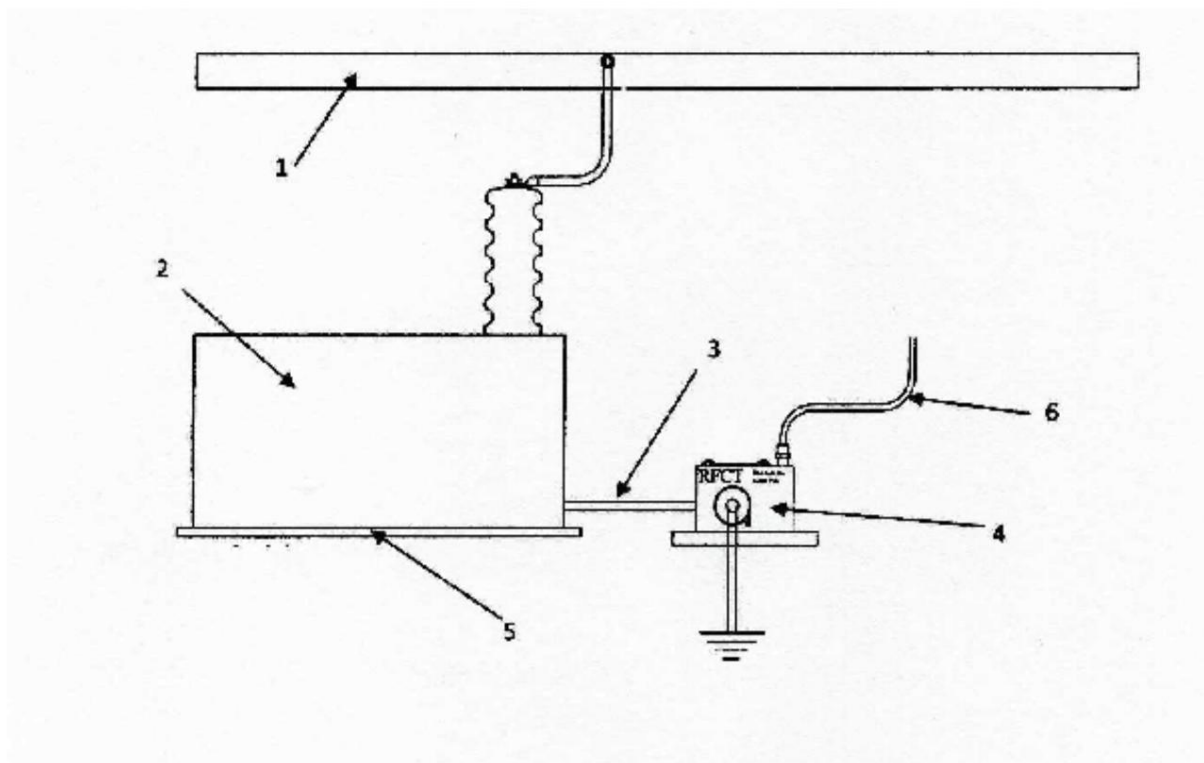
Dlatego systemy monitorowania wyl ądowań niezupeł nych wykorzystujące sprężacze o większej pojemności mają większą szansę na wykrycie degradacji izolacji spowodowanej tego typu defektem.

4.5.3 Monitorowanie wyl ądowań niezupeł nych online za pomocą transformatorów częstotliwości radiowej

Transformatory prądowe RF i inne transformatory prądowe o wysokiej częstotliwości mogą być skuteczne w monitorowaniu silników i innych urządzeń, które mogą być podatne na aktywność PD (Odniesienie [17]). Urządzenia te są często używane, ponieważ można je łatwiej zainstalować i nie działają przy wysokim napięciu. Transformator prądowy (CT) o szerokopasmowej odpowiedzi impulsowej może być używany do pomiaru impulsów PD o wysokiej częstotliwości. Jest on zbudowany z rdzenia ferrytowego i zwykle jest zamknięty w obudowie metalowej. Większość dostępnych w handlu transformatorów prądowych jest wyposażona w krzywą przenoszenia opisującą jego odpowiedź częstotliwościową i poziom sygnału wyjściowego. Sygnał wyjściowy z transformatora częstotliwości radiowej (RFCT) może mieć bardziej oscylacyjny charakter niż z innych czujników PD, jeśli CT nie został odpowiednio dopasowany pod względem impedancji. Ponadto sygnał może również zawierać szum, a wykrywanie PD uzwojenia stojana za pomocą takich urządzeń wymaga specjalistycznej wiedzy lub zaawansowanej techniki separacji szumów.

Cewki RFCT można zainstalować wokół kabla uziemiającego kondensatora udarowego, jak pokazano na [rysunku 8](#) (Odniesienie [15]), na kablach przy zaciskach silnika, na przewodach uziemiających silnika i na połączeniach z uziemieniem z osłoniętymi kablami. Jednym z problemów ze stosowaniem ich do kabli uziemiających kondensatorów udarowych jest to, że

jest znacznym tłumieniem sygnału w PD, co utrudnia separację szumów. Ponadto, dla pojedynczego RFCT w przewodzie uziemiającym silnika, nie można zidentyfikować PD z poszczególnych faz.



Klawisz

1 uzwojenie magistrali-silnika 3 kabel uziemiający kondensatora przepięciowego 5 izolacja

2 kondensatory udarowe

4 RFCT

6 kabli koncentrycznych do pomiaru PD

Rysunek 8 — Pomiar wyladowań niezupełnych przy użyciu RFCT w kablu uziemiającym kondensatora udarowego

W przypadku przekładnika prądowego otaczającego przewód pierwotny kabla, przez który może płynąć znaczny prąd o częstotliwości 50 Hz lub 60 Hz, w obwodzie magnetycznym przekładnika prądowego powinna znajdować się przerwa powietrzna, aby zapobiec nasyceniu.

4.5.4 Wady izolacji, które można wykryć za pomocą wyladowań niezupełnych

Każdy PD wytwarza własny impuls. Niektóre impulsy PD są większe od innych. Ogólnie rzecz biorąc, wielkość konkretnego impulsu PD jest proporcjonalna do rozmiaru luki lub defektu, w którym wystąpił PD. W konsekwencji, im większy wykryty impuls PD, tym większy defekt, który zapoczątkował wyladowanie. Natomiast mniejsze defekty mają tendencję do wytwarzania mniejszych impulsów PD. Atrakcyjność testu PD polega na tym, że koncentruje się on na większych impulsach i ignoruje mniejsze impulsy. Test PD umożliwia pomiar największych defektów. Ponieważ awaria prawdopodobnie będzie miała swój początek w największych defektach, a nie w mniejszych defektach, test PD może wskazać stan uzwojenia w części wykazującej maksymalne pogorszenie.

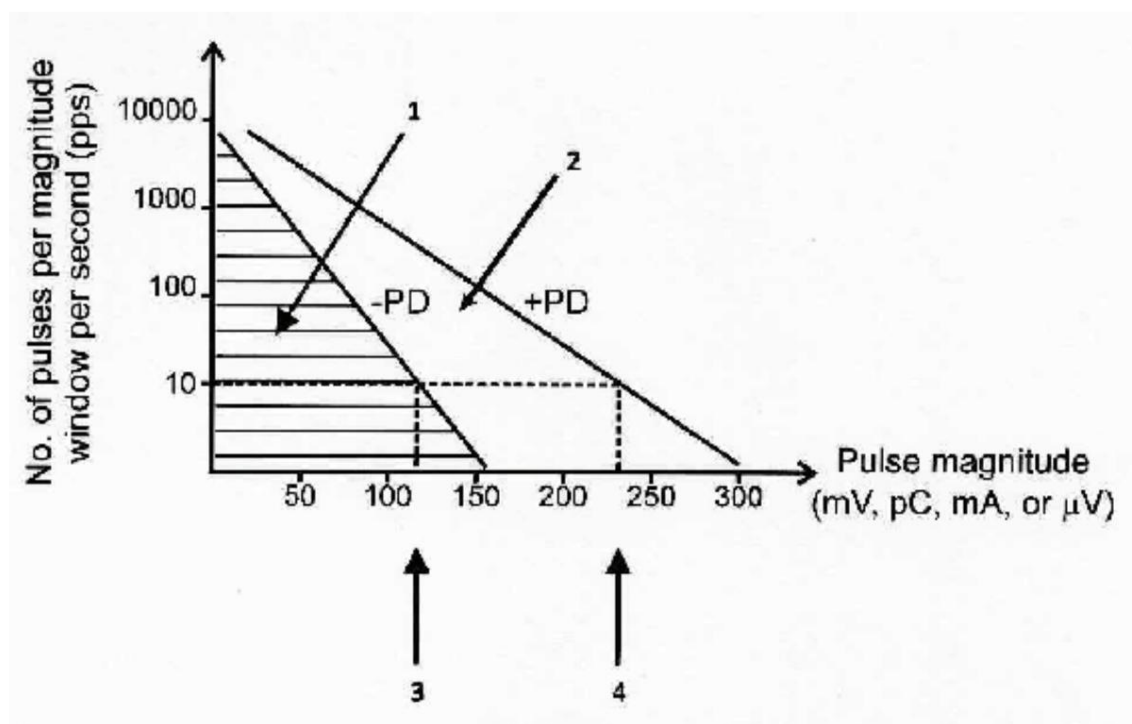
Kluczowym pomiarem w teście PD jest szczytowa wielkość PD, Q_m , tj. wielkość najwyższego impulsu PD. Zasadniczo wartość ta jest określana dla określonej częstotliwości powtarzania impulsów. Rysunek 9 przedstawia przykład częstotliwości powtarzania impulsów wynoszącej 10 impulsów na sekundę (PPS). Należy zauważyć, że Q_m można mierzyć w mV, pC, mA lub μV .

Nie ma standardu dla stałej czasowej detektora PD; szerokość pasma roboczego lub inne charakterystyki systemów pomiarowych PD są dostarczane przez różnych dostawców, więc porównanie danych z różnych systemów pomiarowych PD jest trudne. Jednak testy PD można porównywać, jeśli wyniki uzyskano przy użyciu tego samego sprzętu (sprzęgaczy PD i przyrządu) i dostępna jest metoda analizy wartości Q_m . Można określić, która faza ma najwyższą Q_m , a zatem, która faza ma największą

pogorszenie. Można również porównać kilka podobnych maszyn, aby zobaczyć, która ma najwyższe PD. Na koniec można porównać PD z tego samego stojana w czasie, tj. trend danych. Ogólnie rzecz biorąc, jeśli PD podwaja się co sześć miesięcy, to tempo pogorszenia gwałtownie wzrasta.

Analiza danych z testu PD w celu określenia jego charakterystyki umożliwia identyfikację degradacji izolacji uzwojenia i wad produkcyjnych. Tabela 2 podsumowuje typowe wady izolacji uzwojenia stojana, które producenci sprzętu do monitorowania PD twierdzą, że są w stanie zidentyfikować na podstawie lokalizacji impulsów PD w odniesieniu do jednego cyklu napięcia faza-ziemia silnika.

Przykłady wzorców impulsów PD z systemów pomiarowych PD o wysokiej i niskiej częstotliwości oraz dla jednostek mV i pC podano na rysunkach 10 do 12. Jak widać na rysunkach 10 i 11, istnieją wzorce mniej więcej wyśrodkowane na 45° i 225° w cyklu napięcia faza-ziemia, które mają podobne wielkości impulsów w dodatnich i ujemnych pół cyklach napięcia, wskazujące na rozwarstwienie izolacji ściany uzziemienia uzwojenia stojana z powodu starzenia się termicznego żywicy wiążącej. Rysunek 10 pokazuje kąt fazowy, Φ , przy którym występuje PD, wykreślony w stosunku do wielkości, q , każdego pojedynczego wyładowania. Liczba wyładowań występujących w każdym punkcie jest pokazana kolorem, od zielonego wskazującego niską gęstość lub pojedyncze impulsy, poprzez żółty do czerwonego dla wyższych stężeń wyładowań. Rysunek 11 przedstawia wielkość impulsu w stosunku do kąta fazowego wystąpienia z kodem kolorów wskazującym wielkości impulsów PD dla różnych zakresów częstotliwości powtarzania impulsów na sekundę (PPS). Rysunek 12 przedstawia wzorce impulsów w dwóch fazach, które są w fazie, mają przeciwną biegunowość i są wyśrodkowane pod kątami $\pm 30^\circ$ od „klasycznych” kątów fazowych 45° i 225° , co spełnia kryteria międzyfazowego PD.



Klawisz

- 1 -NQN: proporcjonalnie do powierzchni pod wykresem ujemnego pół cyklu napięcia PD
- 2 +NQN: proporcjonalnie do powierzchni pod napięciem dodatnim wykresem pół cyklu PD
- 3 -Qm: ujemna wielkość impulsu PD przy 10 impulsach na sekundę
- 4 +Qm: dodatnia wielkość pół cyklu PD przy 10 impulsach na sekundę

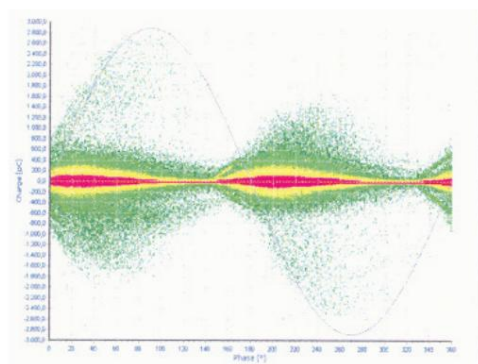
Rysunek 9 — Podsumowanie wartości PD

Tabela 2 — Niedobory izolacji wykrywalne za pomocą monitorowania wylądowań niezupełnych

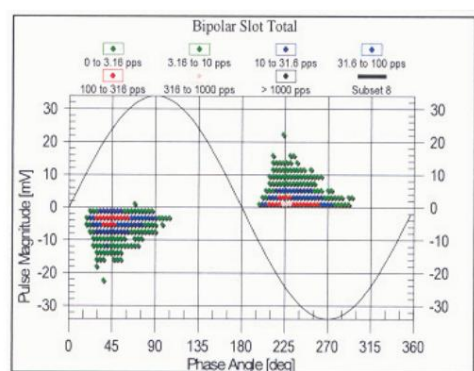
Izolacja niedobór	Lokalizacja impulsów PD względem napięcia fazowego	Inne czynniki wpływające Poziomy PD	Uwagi
Degradacja termiczna izolacji ściany fundamentowej	Skupiska ujemnego PD wokół 45° i dodatniego PD wokół 225° o mniej więcej równej wielkości (patrz rysunek 11)	Temperatura uzwojenia: im wyższa temperatura tym mniejsze wielkości wylądowań niezupełnych	Ten rodzaj degradacji powoduje rozwarstwienie izolacji ściany fundamentowej z powodu starzenia termicznego żywicy wiążącej. Powstały rozkład pustych przestrzeni jest dość równomierny na całej grubości izolacji ściany fundamentowej. Można go również wykryć za pomocą testu off-line
Cykle termiczne	Skupiska ujemnych PD w okolicach 45° i dodatnich PD około 225°, przy czym PD ujemne jest znacznie wyższe niż PD dodatnie	Poziomy mogą również spadać wraz ze wzrostem temperatury uzwojenia	Izolacja ściany uziemiającej zaczyna oddzielać się od stosu przewodów z powodu naprężenia ścinającego wytworzonego przez różnice w współczynnikach rozszerzalności miedzi i izolacji, tj. miedzi jest znacznie wyższy. Bardziej prawdopodobne jest wystąpienie w dużych silnikach z długimi rdzeniami. Pustki obok przewodów mogą również wynikać ze słabej penetracji żywicy w uzwojeniach impregnowanych próżniowo (VPI). Można je również wykryć za pomocą testu offline
Luźne uzwojenia w szczelinach	Skupiska ujemnych PD w okolicach 45° i dodatnich PD około 225°, przy czym dodatnie PD jest znacznie wyższe niż ujemne PD	Wielkość pozytywna PD wzrasta wraz z obciążeniem silnika	Na dodatnie wielkości PD wpływają wielkość prądu I przepływającego przez uzwojenie stojana. W rezultacie powstają siły elektromagnetyczne o częstotliwości 100 lub 120 Hz proporcjonalne do I ² . Dodatnie poziomy PD może na często zmniejszyć przez ponowne klinowanie. Nie jest to powszechny problem w przypadku globalnych uzwojeń VPI. Nie można wykryć za pomocą testu offline
Zdegradowana powłoka przewodząca napięcie szczelinowe kontrolująca naprężenie	Skupiska ujemnych PD w okolicach 45° i dodatnich PD około 225°, przy czym dodatnie PD jest znacznie wyższe niż ujemne PD	Wielkość dodatniego PD nie zwiększa się wraz z obciążeniem motorycznym	Powłoki malowane są bardziej podatne na degradację niż powłoki taśmowe. Można je również wykryć za pomocą testu offline
Zdegradowana gradacja napięcia na interfejsach powłoki przewodzącej powłoki znajdującej się poza łóbkami stojana	Skupiska wylądowań niezupełnych przy przejściach przez zerowe napięcie 0° i 180° oraz 90° i 270° w przypadku poważnej degradacji	Dzieje się tak w cewkach znajdujących się w pobliżu końca linii każdej fazy, gdzie naprężenia napięciowe na interfejsie są najwyższe	Jest to bardzo powolny mechanizm degradacji izolacji, ponieważ PD działa równolegle do powierzchni izolacji. Można go wykryć za pomocą kamery ultrafioletowej z testu offline.
Niewłaściwe rozmieszczenie i/lub zanieczyszczenie uzwojeń końcowych, połączeń międzyfazowych lub połączeń skrzynki zaciskowej	Skupiska PD przemieszczone Poziomy aktywności PD różnią się od 45° do 225° w pozycji z wilgotnością powietrza. Anteny o ± 30° w różnych fazach wzrostu wilgotności powietrza, czyli w fazie ogólnie zmniejsza PD i przeciwnych poziomów polaryzacji (patrz rysunek 12)		PD spowodowane zanieczyszczeniem może zmniejszyć poprzez czyszczenie uzwojenia, a to spowodowane niewystarczającym odstępem, poprzez wypełnienie przestrzeni międzyfazami materiałem izolacyjnym, takim jak silikonowa guma elektryczna. Można wykryć za pomocą testu offline

Należy pamiętać, że monitorowanie wylądowań niezupełnych nie jest w stanie wykryć następujących mechanizmów starzenia się uzwojenia stojana:

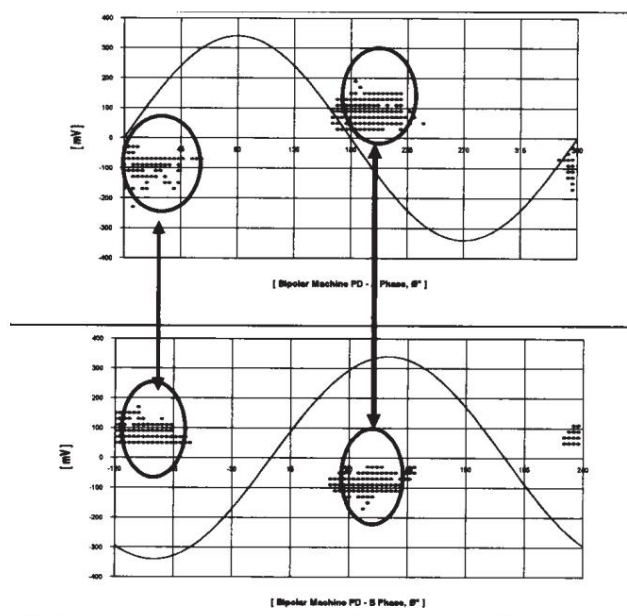
- luźne usztywnienie nawoju końcowego, które może prowadzić do degradacji izolacji na skutek ścierania z powodu względnego ruchu pomiędzy komponentami;
- degradacja izolacji zwojów cewki na skutek starzenia cieplnego, ścieranie na skutek utraty połączenia pomiędzy żyłami/przewodnikami, co powoduje osłabienie izolacji zwojów, co może być skutkiem awarii, gdy uzwojenie jest narażone na skoki napięcia o dużych wartościach.



Rysunek 10 — Wykres Φ -qn niskiej częstotliwości dla fazy uzwojenia stojana ze starzeniem cieplnym
(Odniesienie [18]).



Rysunek 11 — Wykres analizy faz impulsów o wysokiej częstotliwości dla fazy uzwojenia stojana ze starzeniem cieplnym



Rycina 12 — Międzyfazowa PD spowodowana zanieczyszczeniem lub nieodpowiednim odstępem

4.6 Badanie zakłóceń elektromagnetycznych

Badanie zakłóceń elektromagnetycznych (EMI) to technika umożliwiająca wykrywanie i identyfikację wyładowań niezupełnych (PD) wynikających z wad izolacji, a także efektu elektrycznego powstającego w wyniku uszkodzenia przewodu

i defekty mechaniczne. EMI został o zastosowane w silnikach indukcyjnych w zastosowaniach komunalnych, petrochemicznych i ciężkim przemysłu. Test jest przeprowadzany, gdy silnik jest w eksploatacji w normalnych warunkach obciążenia.

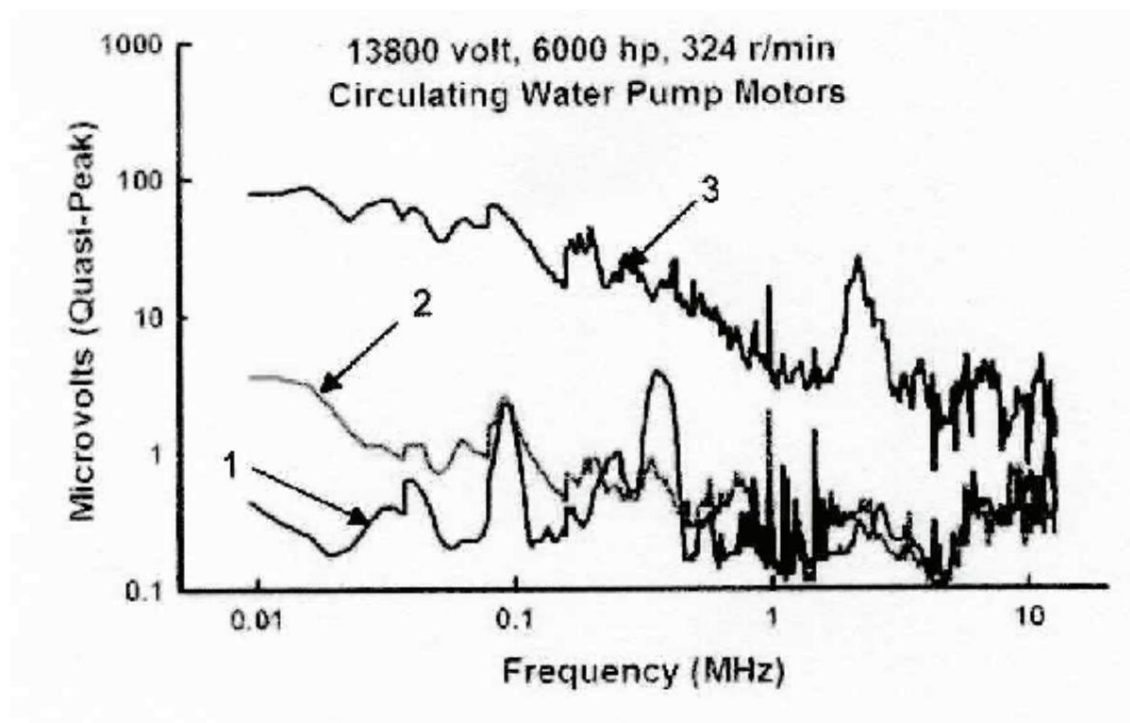
EMI to precyzyjny pomiar w dziedzinie częstotliwości oraz identyfikacja energii o częstotliwości radiowej, która powstaje w wyniku wyładowań niezupełnych (PD), omówionych w punkcie 4.5.3, oraz łuków elektrycznych powstających w wyniku uszkodzeń silnika, takich jak prądy wału u przechodzące przez ocierające się łożyska lub uszczelki, uszkodzone pręty wirnika, uszkodzone przewody stojana, luźne połączenia, niewystarczające uziemienie wału u oraz niektóre rodzaje problemów mechanicznych, takie jak niewspółosiowość sprzęgła.

Testowanie EMI odbywa się zgodnie z normą CISPR 16-1-1[8] i nie wymaga instalacji żadnego stałego sprzętu. Nie wprowadza również żadnych sygnałów i nie powoduje wyłączenia żadnego sprzętu. Wykorzystuje rozdzielony pierścieniowy transformator prądu o częstotliwości radiowej (RFCT), który jest umieszczony wokół uziemienia bezpieczeństwa lub przewodu zasilającego testowanego silnika i mierzy sygnały generowane przez defekty komponentu lub systemu.

Diagnostyka EMI mierzy szerokie spektrum częstotliwości radiowych, aby umożliwić inżynierowi EMI oglądanie różnych wzorców na każdej częstotliwości, w tym, ale nie wyłącznie, korony, wyładowania szczelinowe, szum losowy i łuk elektryczny. Zazwyczaj takie widma wyświetlają wielkość sygnału w mikrowoltach (quasi-szczyt) w stosunku do częstotliwości, jak pokazano na rysunku 13. Wyładowanie koronowe, wyładowanie szczelinowe i szum losowy to rodzaje wyładowań niezupełnych, z których każdy ma unikalny wzór. Czwarty wzór, łuk elektryczny, nie może być mierzony za pomocą technik PD, ponieważ ma przepływ prądu i z definicji nie jest wyładowaniem niezupełnym. Można wykorzystać przenośny przyrząd w połączeniu z oprogramowaniem EMI w celu dalszej identyfikacji i dokładnego określenia lokalizacji każdego defektu. To urządzenie mierzy sygnały EMI emitowane z każdego defektu komponentu lub systemu i pozwala inżynierowi EMI słuchać szumu radiowego generowanego przez te defekty.

Ponieważ szerokie spektrum częstotliwości radiowych jest monitorowane pod kątem PD i łuku elektrycznego, liczne warunki można wykryć za pomocą pierwszego testu. Zidentyfikowano następujące elementy: zanieczyszczenie brudem i wilgocią uzwojeń stojana, luźne uzwojenia stojana, luźne połączenia przewodów, zerwane pręty wirnika, prądy wału przez łożyska lub tarcie uszczelki, niewspółosiowość sprzęgła, wadliwe kable zasilające, niewłaściwe naprawy konserwacyjne i wadliwe przebudowy. Doświadczony inżynier ds. testów jest wymagany do zidentyfikowania wzorców defektów o znaczeniu w widmie EMI ze stacji radiowych, nadajników danych i sygnałów elektroniki mocy, które pojawiają się na częstotliwościach w zakresie generowanych przez defekty silnika. Ponadto ta technika monitorowania nie identyfikuje fazy (faz), w której (których) występuje aktywność PD uzwojenia stojana.

Przykład widma EMI podano na rysunku 13. Rysunek ten pokazuje wykresy EMI dla trzech silników pomp obiegowych wody zidentyfikowanych jako A, B i C, ze znacznie wyższymi poziomami μV dla silnika C. W sygnaturze EMI dla silnika C można określić, że występuje aktywność w szczelinach stojana z powodu wysokich poziomów quasi-szczytowych (QP) poniżej 1,0 MHz. Wzrost QP w pobliżu 2 MHz wskazuje na aktywność PD na krawędzi rdzenia przy stopniowaniu napięć i nakładaniu się powłoki szczeliny. Wysokie poziomy QP przy 5 MHz i wyższych wskazują na aktywność w ramionach końcowych. Skoki w pobliżu 1 MHz to lokalne stacje radiowe AM. W przypadku silników A i B wzrosty o 100 kHz i 500 kHz to lokalne nośne linii energetycznych.



Klawisz

1 silnik A: średnia = 0,4 μV 2 silnik B: średnia = 0,5 μV 3 silnik C: średnia = 14,4 μV

Rysunek 13 — Sygnatura EMI silnika z wyższą obrotowością szczelinowym, pogorszeniem jakości materiału w skali napięcia napięciowego i zanieczyszczeniem uzwojeń końcowych stojana

4.7 Analiza prądu wirnika

Prąd wirnika silnika indukcyjnego jest łatwo dostępny tylko w maszynach z wirnikiem uzwojonym i dlatego jest mniej wygodnym parametrem do monitorowania niż prąd stojana. Jednak w takich maszynach obwód wirnika jest słabo chroniony w większości instalacji. Wady w złaczach lutowanych i połączeniach pierścieni ślizgowych często powodowały poważne uszkodzenia, ponieważ nie były wykrywane na bieżąco. Przegrzanie wirnika może być również spowodowane brakiem równowagi prądu w zewnętrznych rezystorach podłączonych do pierścieni ślizgowych.

Konwencjonalne metody pomiaru prądu są niezadowalające, ponieważ prąd wirnika ma częstotliwość poślizgu, a zatem jest znacznie poniżej częstotliwości zasilania. Ta niska częstotliwość wymaga użycia specjalnych przetworników prądu z rdzeniem powietrznym lub cewek Rogowskiego.

4.8 Analiza napięcia wału

Dobrze wiadomo, że każde zniekształcenie wewnętrzne rozkładu strumienia w maszynie elektrycznej może powodować napięcia wału, a szkodliwe skutki prądów wytwarzanych przez takie napięcia od dawna są uznawane za przyczynę prądów wału, które mogą powodować awarie łożysk. Takie napięcia wału wynikają z asymetrii w obwodzie magnetycznym silnika z powodu zmian właściwości stali rdzenia magnetycznego w obrębie obracających się ścieżek strumienia magnetycznego. Powoduje to indukowanie napięcia prądu przemiennego pętli przewodzącej obejmującej wał silnika, łożyska, wsporniki końcowe i zewnętrzną ramę silnika. Jeśli indukowane napięcie jest wystarczające, aby przebić izolację zapewnianą przez środek smarny, prąd przepływa przez pętlę, obejmując oba łożyska.

Monitorowanie napięć wału w celu wykrycia usterek w maszynie nie jest dotychczas powszechne, ponieważ pomiary są mało wiarygodne i niejednoznaczne; ostatnie osiągnięcia sprawiły jednak, że ta metoda stała się bardziej niezawodna i użyteczna.

Załącznik A (informacyjny)

Podejście wektorowe Parka

W zależności od zmiennych fazowych sieci (i_A , i_B , i_C) składowe wektora Parka prądu zasilającego (i_D , i_Q) podane są wzorami (A.1) i (A.2):

$$i_D = \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \right) i_A - \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right) i_B - \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right) i_C \quad (\text{A.1})$$

$$i_Q = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) i_B - \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) i_C \quad (\text{A.2})$$

W idealnych warunkach zrównoważone prądy trójfazowe prowadzą do wektora Parka, którego składowe są podane wzorami (A.3) i (A.4):

$$i_D = \left(\frac{\sqrt{6}}{2} \right) I_M \sin(\omega t) \quad (\text{A.3})$$

$$i_Q = \left(\frac{\sqrt{6}}{2} \right) I_M \cos(\omega t) \quad (\text{A.4})$$

Gdzie

I_M jest maksymalną wartością prądu fazy zasilającej (A);

ω jest częstotliwością kątową zasilania (rad/s);

t jest zmienną czasową (s).

Reprezentacją wektora Parka prądu silnika przy prawidłowej, zrównoważonej pracy jest okrąg, którego środek znajduje się w początku układu współrzędnych.

W warunkach nieprawidłowych wzory (A.3) i (A.4) nie są już ważne, w związku z czym obserwowany wzór ulega odchyleniu w zależności od powiązanego błędu.

Filozofia działania podejścia wektorowego Parka opiera się zatem na identyfikowaniu unikalnych wzorców sygnałów w uzyskanych miejscach, odpowiadających bieżącej reprezentacji wektorowej Parka.

Podejście wektorowe Parka można z powodzeniem wykorzystać do wykrywania wielu usterek, które mogą wystąpić w trójfazowych silnikach indukcyjnych. W warunkach uszkodzenia uzwojenia stojana, wzór wektorowy Parka staje się eliptyczny. Eliptyczność wzoru jest proporcjonalna do powagi uszkodzenia, a orientacja jego głównej osi zależy od wadliwej fazy. Z drugiej strony, względna grubość uzyskanego wzoru pierścienia, w przypadku obecności uszkodzonych szczelin wirnika w silnikach indukcyjnych, może być wykorzystana do diagnozowania takich usterek. W przypadku usterek mimośrodowych w trójfazowych silnikach indukcyjnych, wzór wektorowy Parka jest rozpoznawany jako mający charakterystyczny kształt. Informacje o powadze uszkodzenia pochodzą z obszaru podziału wektorowego wzoru Parka prądu silnika.

W przypadku napędów silników indukcyjnych zasilanych falownikiem, zdrowy wzorec działania podejścia wektorowego Parka nie jest kołowy; jednak rozróżnialne odchylenia we wzorze mogą być wykorzystane do diagnozowania usterek w elektronicznych komponentach mocy sterowania napędem. Na przykład kierunek orientacji wzorca jest skutecznym wskaźnikiem do definiowania wszelkich usterek zwarcia lub rozwarcia obwodu na jednym przełączniku półprzewodnikowym.

Zaawansowana implementacja podejścia wektorowego Parka, znana jako rozszerzone podejście wektorowe Parka (EPVA), opiera się na analizie widmowej poziomu prądu przemiennego bieżącego modułu wektorowego Parka, zdefiniowanego zgodnie ze wzorem (A.5):

$$M_i = \sqrt{\frac{I_D^2}{D} + \frac{I_Q^2}{Q}} \quad (\text{A.5})$$

Poziom prąd stały, generowany głównie przez składową podstawową prądu zasilania silnika, nie zawiera przydatnych informacji na temat składowych bezpośrednio powiązanych z usterką silnika.

EPVA łączy prostotę dawnego podejścia wektorowego Parka i szczegółowy wgląd dostarczany przez analizę widmową. Co więcej, eliminuje niektóre ograniczenia techniczne konwencjonalnej analizy widmowej prądu silnika. W rzeczywistości powszechnie wiadomo, że czasami trudno jest odfiltrować składową podstawową prądu zasilania silnika bez wpływu na składowe wstęgi bocznej. Natomiast charakterystyczne składowe w widmie EPVA można łatwo rozdzielić, ponieważ składowa podstawowa jest daleko od siebie, a jej amplituda jest automatycznie zredukowana przez transformację Parka. Ponadto, biorąc pod uwagę prąd we wszystkich trzech fazach, EPVA zapewnia bardziej znaczące widmo niż to uzyskane przy użyciu konwencjonalnej analizy widmowej prądu silnika.

Będąc szczególnie użyteczną do diagnostyki jednoczesnego występowania wielu usterek maszyn, ta technika generuje sygnaturę, która jest wyraźna dla każdego składowego widmowego przy zdrowej, zrównoważonej pracy i w której, przy wadliwym działaniu, każda usterka jest identyfikowana przez obecność określonych składowych widmowych. Złamane szczeliny wirnika są identyfikowane, w sygnaturze EPVA, przez obecność składowego widmowego przy częstotliwości dwukrotnie większej od poślizgu silnika, podczas gdy usterka mimośrodowości lub mechaniczne rozbieżności obciążenia są wykrywalne przez identyfikację składowego widmowego w sąsiedztwie częstotliwości obrotowej mechanicznej. Usterka uzwojenia stojana może być wykryta przez identyfikację, w sygnaturze EPVA, składowego widmowego przy częstotliwości dwukrotnie większej od podstawowej częstotliwości zasilania.

Ze względu na powszechne stosowanie silników indukcyjnych w przemyśle, niektóre z nich napędzają obciążenia, które są dalekie od stałych. Sprężarki i procesy zależne od czasu o niskiej częstotliwości oscylacji są dość powszechnymi zastosowaniami. Obciążenia te wprowadzają dodatkowe składowe do widma prądów zasilania silnika, które mogą maskować efekty wywołane przez ewentualną awarię wirnika. Dlatego w przypadku obciążenia zmieniającego się w czasie wyniki uzyskane przez analizę widmową prądu silnika mogą być mylone z wynikami uzyskanymi, gdy silnik ma awarię wirnika, ponieważ rozróżnienie tych dwóch warunków pracy jest prawie niemożliwe.

Dalsze prace nad wykorzystaniem podejścia wektorowego Parka kulminują w technice — podejściu Parka do wektora synchronicznego układu odniesienia — która może dać wskazówkę dotyczącą asymetrii wirnika, nawet jeśli moment obciążenia silnika zmienia się w czasie. W przypadku zdrowej, zrównoważonej pracy, wzór wektorowy synchronicznego układu odniesienia [$i_Q = f(i_D)$] jest pojedynczą kropką. W przypadku awarii wirnika staje się on eliptyczną figurą zorientowaną wzdłuż drugiego kwadrantu osi współrzędnych, podczas gdy obciążenie zmienne w czasie objawia się pojawieniem się eliptycznej figury zorientowanej wzdłuż pierwszego kwadrantu osi.

Bibliografia

- [1] ISO 13374-1, Monitorowanie stanu i diagnostyka maszyn — Przetwarzanie, komunikacja i prezentacja danych — Część 1: Wytyczne ogólne
- [2] ISO 13379 (wszystkie części), Monitorowanie stanu i diagnostyka maszyn — Interpretacja danych i techniki diagnostyczne
- [3] ISO 13381-1, Monitorowanie stanu i diagnostyka maszyn — Prognozyka — Część 1: Wytyczne ogólne
- [4] ISO 17359, Monitorowanie stanu i diagnostyka maszyn — Wytyczne ogólne
- [5] IEC/TS 60034-27-2, Maszyny elektryczne wirujące — Część 27-2: Pomiary wyładowań niezupełnych w czasie rzeczywistym na izolacji uzwojenia stojana maszyn elektrycznych wirujących
- [6] IEC 60270, Techniki badań wysokiego napięcia — Pomiary wyładowań niezupełnych
- [7] IEEE 1434, przewodnik IEEE dotyczący pomiaru wyładowań niezupełnych w maszynach wirujących
- [8] CISPR16-1-1, Specyfikacja urządzeń i metod pomiaru zaburzeń radiowych i odporności na nie — Część 1-1: Aparatura pomiarowa zaburzeń radiowych i odporności — Aparatura pomiarowa
- [9] NEMA MG 1-2011, Rewizja 1-2010, Silniki i generatory
- [10] Benbouzid MEH Bibliografia dotycząca wykrywania i diagnostyki usterek silników indukcyjnych. IEEE Trans. Energia. Konwersuje. 1999, 14 s. 1065–1074
- [11] Cardoso AJM, Cruz SMA, Fonseca DSB Diagnostyka uszkodzeń uzwojenia stojana międzyzwojowego w silnikach indukcyjnych trójfazowych, metodą wektorową Parka. IEEE Trans. Energ. Convers. 1999, 14 s. 595–598
- [12] Cardoso AJM i Saraiva ES Komputerowo wspomagane wykrywanie mimośrodowości szczeliny powietrznej w pracy trójfazowych silników indukcyjnych metodą wektorową Parka. IEEE Trans. Ind. Appl. 1993, 29 s. 897–901
- [13] Cruz SMA i Cardoso AJM Diagnostyka uszkodzeń klatki wirnika w silnikach indukcyjnych trójfazowych za pomocą rozszerzonego podejścia wektorowego Parka. Maszyny elektryczne i systemy energetyczne. 2000, 28 s. 289–299
- [14] Cruz SMA i Cardoso AJM Diagnostyka uszkodzeń uzwojenia stojana w silnikach trójfazowych synchronicznych i asynchronicznych przy użyciu rozszerzonego podejścia wektorowego Parka. IEEE Trans. Ind. Appl. 2001, 37 strony 1227–1233
- [15] Culbert IM, Dhirani H., Gupta BK Pomiar wyładowań niezupełnych w dużych silnikach w elektrowni. W: Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference, Cincinnati, OH, s. 537–540, 2001
- [16] Culbert IM i Rhodes W. Wykorzystanie obecnej technologii analizy sygnałów do niezawodnego wykrywania defektów uzwojenia klatkowego w silnikach indukcyjnych klatkowych. IEEE Trans. Ind. Appl. 2007, 43 s. 422–442
- [17] Duyar A. i Bates A. Monitorowanie stanu silnika; MCM; Niedroga, prosta w użyciu technologia monitorowania stanu oparta na modelu. J. Maintenance Asset Management. 2006, 21 s. 13–22
- [18] Brutto DW Monitorowanie wyładowań niezupełnych maszyn wirujących — sieciowanie aplikacji i interpretacja, 10. Warsztat EPRI poświęcony turbinom parowym i generatorom, Phoenix, AZ, 2007-08
- [19] Kilman GB i Stein J. Wykrywanie usterek silników indukcyjnych za pomocą pasywnego monitorowania prądu, Proc Int. Konferencja (ICEM'90), MIT, Boston, MA, 1990, s. 13–17
- [20] Schoen RR, Habetler TG, Kamran F., Bartfield RG Wykrywanie uszkodzeń łóżysk silnika przy użyciu monitorowania prądu stojana. IEEE Trans. Ind. Appl. 1995, 31 s. 1274–1279

- [21] Stone GC, Boulter EA, Culbert IM, Dhirani H. Izolacja elektryczna maszyn wirujących — Projektowanie, ocena, starzenie, testowanie i naprawa. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2004
- [22] Stone GC i Warren V. Obiektywne metody interpretacji danych o wyładowaniach niezupełnych w uzwojeniach stojana maszyny wirującej. IEEE Trans. Ind. Appl. 2006, 42 s. 195–200
- [23] Tavner PJ, & Penman J. Monitorowanie stanu maszyn elektrycznych. Letchworth: Research Studies Press, 1987
- [24] Thomson WT i Fenger M. Analiza sygnatury prądu w celu wykrywania usterek silników indukcyjnych. IEEE Ind. Appl. Mag. 2001, 7 (4) s. 26–34
- [25] Thomson WT, Fenger M., Lloyd B. Opracowanie narzędzia do wykrywania usterek w silnikach indukcyjnych za pomocą analizy sygnatury prądu, 2003 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference, Dallas, TX, 2003-05-04/09
- [26] Thomson WT i Gilmore RJ Motor analiza sygnatury prądu w celu wykrywania usterek w silnikach indukcyjnych — podstawy, interpretacja danych i historie przypadków przemysłowych. W: Proceedings of the 32nd Turbomachinery Conference, 2003
- [27] Thomson WT i Rankin D. Historie przypadków diagnostyki uszkodzeń uzwojenia wirnika w silnikach indukcyjnych. W: 2nd Int. Conf Proc on Condition Monitoring, University College Swansea, 1987-03
- [28] Timperley JE i Chambers EK Lokalizowanie defektów w dużych maszynach wirujących i powiązanych układach elektrycznych za pomocą diagnostyki EMI. 34. sesja CIGRE, referat 11-311, Paryż, 1992-09
- [29] Timperley JE i Michalec JR Niezawodność działania poprzez właściwą specyfikację elementów obrotowych maszyny. IEEE Trans. Ind. Appl. 1993, 29 s. 225–232
- [30] Timperley JE i Nichols DK Pomiar defektów silnika 2300 V z wykorzystaniem technik diagnostyki EMI on-line. W: IEEE DEIS International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, VA, 1998-06

Brytyjska Instytucja Normalizacyjna (BSI)

BSI to krajowa instytucja odpowiedzialna za przygotowywanie Norm Brytyjskich oraz innych publikacji, informacji i usług związanych z normami.

BSI jest zarejestrowane na mocy Royal Charter. British Standards i inne produkty normalizacyjne są publikowane przez BSI Standards Limited.

O nas

Łączymy biznes, przemysł, rząd, konsumentów, innowatorów i innych, aby przekształcić ich połączone doświadczenie i wiedzę specjalistyczną w standardy -oparte na rozwiązaniach.

Wiedza zawarta w naszych standardach została starannie zebrana w niezawodnym formacie i udoskonalona w ramach naszego otwartego procesu konsultacji.

Organizacje każdej wielkości i z każdego sektora wybierają standardy, aby pomóc im osiągnąć swoje cele.

Informacje o normach

Możemy dostarczyć Ci wiedzę, której potrzebuje Twoja organizacja odnieść sukces. Dowiedz się więcej o British Standards, odwiedzając naszą stronę internetową bsigroup.com/standards lub kontaktując się z naszym zespołem obsługi klienta lub Centrum wiedzy.

Standardy zakupowe

Możesz kupić i pobrać wersje PDF publikacji BSI, w tym brytyjskie i przyjęte norm europejskich i międzynarodowych, za pośrednictwem naszej witryny internetowej bsigroup.com/shop, gdzie możesz również nabyć egzemplarze drukowane.

Jeśli potrzebujesz norm międzynarodowych i zagranicznych innych Organizacji Opracowujących Normy, możesz zamówić ich egzemplarze drukowane w naszym Dziale Obsługi Klienta.

Subskrypcje

Nasza oferta usług subskrypcyjnych została zaprojektowana tak, aby umożliwić korzystanie ze standardów łatwiej dla Ciebie. Aby uzyskać więcej informacji na temat naszych produktów subskrypcyjnych, przejdź do

Więcej informacji możesz znaleźć na stronie bsigroup.com/subscriptions.

Dzięki British Standards Online (BSOL) będziesz mieć natychmiastowy dostęp do ponad 55 000 brytyjskich oraz przyjętych norm europejskich i międzynarodowych z poziomu swojego komputera.

Dostępna jest 24 godziny na dobę, 7 dni w tygodniu i aktualizowana codziennie, dzięki czemu zawsze będziesz na bieżąco.

Możesz być na bieżąco z rozwojem norm, a także uzyskać znaczne zniżki na zakup norm, zarówno w pojedynczych egzemplarzach, jak i w formie subskrypcji, zostając Członkiem Subskrybującym BSI.

PLUS to usługa aktualizacji dostępna wyłącznie dla członków subskrybujących BSI. Automatycznie otrzymasz najnowszą wersję papierową swoich standardów, gdy tylko zostaną zmienione lub zastąpione.

Aby dowiedzieć się więcej o zostaniu członkiem subskrybującym BSI i korzyściach

Więcej informacji na temat członkostwa możesz znaleźć na stronie bsigroup.com/shop.

Dzięki licencji Multi-User Network Licence (MUNL) możesz hostować publikacje standardów w swoim intranecie. Licencje mogą obejmować tak małą lub tak dużą liczbę użytkowników, jak chcesz. Dzięki aktualizacjom dostarczonym natychmiast po ich udostępnieniu możesz mieć pewność, że Twoja dokumentacja jest aktualna. Aby uzyskać więcej informacji, wyślij wiadomość e-mail na adres bsmusales@bsigroup.com.

Siedziba główna grupy BSI

389 Chiswick High Road Londyn W4 4AL Wielka Brytania

Poprawki

Nasze Normy Brytyjskie i inne publikacje są aktualizowane poprzez wprowadzanie zmian lub rewizji.

Ciągle poprawiamy jakość naszych produktów i usług, aby przynieść korzyści Twojej firmie. Jeśli znajdziesz nieścisłość lub niejasność w British Standard lub innej publikacji BSI, poinformuj o tym Knowledge Centre.

Prawo autorskie

Wszystkie dane, oprogramowanie i dokumentacja zawarte we wszystkich publikacjach British Standards i innych publikacjach BSI są własnością i są chronione prawami autorskimi BSI lub innej osoby lub podmiotu, który posiada prawa autorskie do wykorzystanych informacji (takich jak międzynarodowe organy normalizacyjne) i formalnie udzielił licencji na takie informacje BSI do komercyjnej publikacji i użytku. Z wyjątkiem przypadków dozwolonych na mocy ustawy o prawach autorskich, wzorach i patentach z 1988 r. żaden fragment nie może być powielany, przechowywany w systemie wyszukiwania ani przesyłany w żadnej formie ani za pomocą żadnych środków – elektronicznych, fotokopii, nagrywania lub w inny sposób – bez uprzedniej pisemnej zgody BSI. Szczegóły i porady możesz uzyskać w Departamencie praw autorskich i licencji.

Przydatne kontakty:

Obsługa klienta

Telefon: +44 845 086 9001

E-mail (zamówienia): orders@bsigroup.com

E-mail (zapytania): cservices@bsigroup.com

Subskrypcje

Telefon: +44 845 086 9001

Adres e-mail: subscriptions@bsigroup.com

Centrum wiedzy

Telefon: +44 20 8996 7004

Adres e-mail: knowledgecentre@bsigroup.com

Prawa autorskie i licencjonowanie

Telefon: +44 20 8996 7070

Adres e-mail: copyright@bsigroup.com

bsi.

...making excellence a habit.™