

MOŻLIWOŚCI AUTOMATYCZNEJ OCENY STANU UKŁADU NAPĘDOWEGO Z MASZYNĄ INDUKCYJNĄ

Adam SOŁBUT

Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny
Katedra Energoelektroniki i Napędów Elektrycznych
15-351 Białystok, Wiejska 45d, fax: 746 94 00
email: asolbut@pb.bialystok.pl

Streszczenie

Praca zawiera propozycje algorytmów umożliwiających ocenę stanu układu napędowego z maszyną indukcyjną w czasie normalnej pracy układu. Jako sygnał diagnostyczny proponuje się stosowanie kwadratu wartości skutecznych ruchomych prądów i napięć. Zaproponowano także sposób obliczeń syntetycznego wskaźnika jakości umożliwiającego automatyczną ocenę stanu układu napędowego niezależnie od sposobu zasilania silnika.

Słowa kluczowe: diagnostyka, silniki indukcyjne, falowniki napięcia.

POSSIBILITIES OF AUTOMATIC STATE ESTIMATION OF AN INDUCTIONS MOTOR DRIVE

Summary

Propositions of algorithms providing estimation of the state of motor drive with inductions motor during normal motor run is discussed in the paper. The choice of diagnostic signals as moving RMS currents and voltages is proposed. The paper also includes a method of calculating the synthetic quality factor enabling automatic estimation of the state of motor drive independently of supply method.

Keywords: diagnostics, induction motors, voltage inverters.

1. WSTĘP

Diagnozowanie maszyny indukcyjnej prowadzi się zwykle w oparciu o sygnały wartości prądów fazowych [2], [3], [6]. Metody te związane są z analizą harmoniczną wartości chwilowej prądu stojana. Wymagają zatem dużej mocy obliczeniowej użytych procesorów. Dużym problemem są także problemy interpretacyjne, co znacznie utrudnia jednoznaczną ocenę stanu maszyny [6]. Większość dostępnych w literaturze prac dotyczących diagnozowania maszyn indukcyjnych dotyczy maszyn zasilanych napięciem sinusoidalnym z sieci.

Współczesne układy napędowe do zasilania maszyn wykorzystują układy przekształtnikowe o bardzo różnorodnych algorytmach sterowania. Falowniki użyte do budowy układu zwykle sterowane są z użyciem techniki mikroprocesorowej. Używane procesory mają obecnie dużą moc obliczeniową przy stosunkowo niskich kosztach. Pojawiła się zatem możliwość wykorzystania techniki mikroprocesorowej do diagnozowania on-line układu napędowego. Kształt napięć wyjściowych z takich urządzeń zawiera jednak szereg harmonicznym utrudniających stosowanie

metod diagnostycznych stosowanych przy napięciu sinusoidalnym [2],[7].

W pracy [2] wykazano, że przy takim sposobie zasilania, w przebiegu prądu stojana maszyny nieuszkodzonej mogą pojawić się harmoniczne charakterystyczne dla stanów awaryjnych. Trudno w takiej sytuacji dokonywać interpretacji wyników klasycznych metod diagnostycznych. Pojawienie się takich składowych może wynikać zarówno na skutek uszkodzeń maszyny jak i błędnego sterowania czy też stanów awaryjnych przekształtnika.

Współczesne układy napędowe umożliwiają zatem "wbudowanie" mechanizmów diagnostycznych do układów sterujących pracą maszyny [5]. Występuje natomiast potrzeba poszukiwania wskaźników jakości umożliwiających ocenę stanu układu napędowego jako całości [4]. Problem diagnozowania układu proponuję rozważyć w dwóch kategoriach: poszukiwania wskaźnika jakości i analizę sygnału (sygnałów) diagnostycznego w celu wskazania miejsca awarii. Do wskazania miejsca awarii maszyny uszkodzonej można z powodzeniem stosować metody klasyczne umożliwiające identyfikację awarii łożysk (mimośród statyczny i dynamiczny) lub uszkodzenia

klatki wirnika (pierścieni zwierających) [1][6]. W pracy [4] zaproponowano do diagnozowania układu napędowego stosowanie sygnału kwadratu wartości skutecznej ruchomej prądu stojana, zdefiniowanej jako:

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t i^2(\tau) d\tau \quad (1)$$

gdzie:

t – czas

i – wartość chwilowa prądu stojana

T – okres harmonicznego podstawowego napięcia zasilającego

Składowe i-te prądu stojana można opisać ogólnym równaniem:

$$i(t) = A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (2)$$

Wynikiem obliczenia kwadratu skutecznej ruchomej będą składniki, które można opisać jako:

$$I^2 = I_0^2 + \sum I_i^2 \sin(2\omega_i t + \psi_i) \quad (3)$$

Wartość tak obliczona ma składnik stały I_0 związany ze składowymi będącymi wielokrotnością harmonicznego podstawowego [4] oraz składniki o częstotliwości podwojonej względem składowych występujących w wartości chwilowej. Fakt ten umożliwia stosowanie metod diagnostycznych opartych na analizie harmonicznego przebiegu wartości skutecznej ruchomej poprzez poszukiwanie odpowiednich składowych prądu [1], [6], [7].

Sygnał tak zdefiniowany ma zalety ułatwiające poszukiwania wskaźników oceny układu napędowego. W czasie normalnej pracy układu, przy założeniu stałego momentu obciążenia, jego wartość jest stała w czasie. Awaria wirnika maszyny lub łożysk (mimośród) powoduje powstanie w przebiegu sygnału wartości o częstotliwościach zależnych od prędkości obrotowej (poślizgu).

2. KRYTERIA OCENY STANU

Przyjmując, że w czasie pomiaru moment obciążenia nie zmienia się, wskaźnik jakości oceniający klatki wirnika i łożysk możemy obliczyć jako [4]:

$$K_2 = \frac{I_{sk \max}^2}{I_{sk \min}^2} \quad (4)$$

gdzie:

$I_{sk \max}$ – wartość maksymalna skutecznej „ruchomej” w czasie pomiaru

$I_{sk \min}$ – wartość minimalna skutecznej „ruchomej” w czasie pomiaru

Istotnym czynnikiem umożliwiającym stosowanie sygnału kwadratu wartości skutecznej ruchomej jest znajomość aktualnej częstotliwości napięcia zasilającego. Niedopasowanie czasu całkowania do okresu podstawowego harmonicznego powoduje powstanie oscylacji w kwadracie skutecznej ruchomej składników o częstotliwości równej $2f$, a więc o częstotliwościach zbliżonych do pojawiających się na skutek uszkodzenia wirnika.

Oprócz uszkodzeń łożysk oraz klatki wirnika w praktyce występują także uszkodzenia uzwojeń stojana [6]. Uszkodzenia te powodują zwykle powstanie niesymetrii wartości prądów w poszczególnych fazach stojana. Niesymetria nie dotyczy wartości chwilowych, lecz wartości skutecznych. Analiza tej niesymetrii umożliwia zatem wskazanie awarii na obwód stojana. Proponowanym współczynnikiem oceny stanu uzwojeń stojana może być współczynnik zdefiniowany jako:

$$K_1 = \max\left(\frac{I_\alpha}{I_\beta}, \frac{I_\beta}{I_\alpha}\right) \quad (5)$$

gdzie:

I_α, I_β – wartości skuteczne ruchome prądów stojana obliczone w stacjonarnym układzie współrzędnych (układ $\alpha\beta$).

Współczynniki K_1 i K_2 wystarczają do oceny stanu maszyny, ale przy założeniu prawidłowo działającego układu zasilania (sterowania) przy stałym momencie obciążenia silnika. Do ich obliczenia potrzebny jest pomiar prądów fazowych w dwóch fazach stojana. Stany awaryjne związane z pojawieniem się składowej zerowej prądu (zwarcia do obudowy) powinny być identyfikowane poprzez stosowanie znanych zabezpieczeń różnicowo – prądowych. W związku ze stosowaniem układów przekształtnikowych wraz z układami regulacji automatycznej możliwe jest pojawianie się składowych prądu, podobnych jak w przypadku uszkodzeń maszyny, na skutek awarii sterowania, awarii przekształtnika lub na skutek błędnie (nieoptymalnie) dobranych nastaw regulatorów (w przypadku stosowania sprzężeń zwrotnych). Identyfikację przyczyny powstawania takich składników można dokonać poprzez pomiar napięć wyjściowych przekształtnika pomiędzy fazami maszyny. Wobec braku (w takich sygnałach) składowej zerowej, do analiz wystarczy dwa przetworniki napięcia. Do wskazania miejsca awarii proponuję użyć wskaźników oceny stanu układu zasilania identycznych jak dla prądów:

$$K_3 = \max\left(\frac{U_\alpha}{U_\beta}, \frac{U_\beta}{U_\alpha}\right) \quad (6)$$

$$K_4 = \frac{U_{sk \max}^2}{U_{sk \min}^2} \quad (7)$$

Wybór tak zdefiniowanych współczynników związany jest z poszukiwaniem jednego syntetycznego parametru umożliwiającego klasyfikację układu jako praca dopuszczalna lub awaria systemu. Jedną z możliwości jest stosowanie współczynnika oceniającego stan silnika:

$$K = K_1 K_3 \frac{K_2}{K_4} \quad (8)$$

Wartość tak obliczona uwzględnia istnienie pulsacji prądu będących skutkiem chwilowych zmian napięcia zasilającego.

Wszystkie opisywane wyżej możliwe stany awaryjne praktycznie mają różną skalę wartościowania. Praca maszyny z pękniętym jednym prętem wirnika jest dopuszczalna. Celem diagnostyki on-line jest nie tylko klasyfikacja stanu, lecz także obserwacja zmian stanu maszyny. Zwiększanie się współczynnika K w dłuższym okresie czasu daje informację o pogarszaniu się stanu maszyny, dzięki czemu możliwe staje się przewidywanie wystąpienia poważnej awarii. Analiza zmian proponowanych współczynników umożliwia wskazanie miejsca wystąpienia awarii na: zasilanie, sterowanie, stojan lub wirnik silnika napędowego.

3. ALGORYTM OBLICZEŃ WARTOŚCI SKUTECZNEJ RUCHOMEJ

Przeprowadzone rozważania teoretyczne oraz badania laboratoryjne wykazały przydatność stosowania sygnału kwadratu skutecznej ruchomej. Stosunkowo łatwa jest także realizacja praktyczna obliczenia takiej wielkości. Jedynym możliwym rozwiązaniem jest realizacja mikroprocesorowa.

Do realizacji algorytmu niezbędne jest przygotowanie bufora pamięci o rozmiarze zależnym od częstotliwości składowych występujących w prądzie stojana.

Obliczenie wartości kwadratu skutecznej ruchomej polega na wykonywaniu obliczeń w trakcie procedury obsługi przerwania wykonywanych co czas:

$$\Delta T = \frac{T}{MAX} \quad (9)$$

gdzie:

T – okres napięcia wyjściowego falownika

MAX – liczba próbek w okresie T

Kolejno należy wykonywać następujące operacje:

- pomiar aktualnej wartości chwilowej sygnału (prądu lub napięcia)
- obliczenie (np. metodą trapezów) części całkowania zależnej od aktualnej i poprzednio zmierzonej wartości prądu
- dodanie tej wartości do wyniku kwadratu skutecznej ruchomej sygnału
- odjęcie od wyniku tak samo obliczonej wartości dla czasu przesuniętego o okres T (na postawie pomiarów zapamiętanych w buforze)

Proponowany algorytm wymaga pamięci operacyjnej niezbędnej do przechowywania zmierzonych wartości prądu w okresie odpowiadającym częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia zasilającego. Pamięć ta wykorzystywana jest jako bufor kołowy dla pojedynczego kanału pomiarowego.

Sam algorytm jest stosunkowo prosty i możliwy do zastosowania wewnątrz procedur związanych ze sterowaniem układem napędowym. Obliczenia wartości proponowanych współczynników także nie stwarzają trudności.

4. BADANIA LABORATORYJNE

W celu sprawdzenia proponowanych rozwiązań wykonano szereg badań laboratoryjnych. Do badań wykorzystano seryjnie produkowany falownik firmy TWERD o mocy 4kW. Możliwe stany awaryjne modelowano poprzez wprowadzenie niesymetrii do obwodu silnika lub do obwodu zasilania poprzez dołączenie rezystancji dodatkowej. Awaryjne wirnika modelowano w sposób podobny.: Wykorzystano tu silnik pierścieniowy z niesymetrią obwodu wirnika. Do badań wykorzystano także silnik z celowo uszkodzoną klatką wirnika. Badania wykonywane były przy częstotliwości 50Hz. Obliczenia wartości skutecznej ruchomej wykonano, na podstawie zarejestrowanych przy wykorzystaniu kart pomiarowo – kontrolnych firmy Ambex Poland prądów i napięć silnika, przy wykorzystaniu programu autorskiego Angaf_win.

Przeprowadzone badania dla różnych stanów awaryjnej pracy układu napędowego z falownikiem napięcia i silnikiem klatkowym wykazały następujące wartości współczynników:

Stan techniczny silnika dobry:

1.02/1.09/1.006/1.005/1.11

Typ awarii:

$K_1/K_2/K_3/K_4/K$

Awaria falownika, silnik obciążony:

1.9/1.08/1.24/1.008/2.52

Awaria uzwojenia stojana, silnik obciążony:

1.9/1.08/1.01/1.008/2.06

Awaria uzwojenia stojana, bieg jałowy:

1.22/1.12/1.004/1.017/1.63

Awaria falownika, bieg jałowy:

1.13/1.35/1.03/1.008/1.55

W przypadku badań dla różnych stanów awaryjnej pracy układu napędowego z silnikiem pierścieniowym i falownikiem otrzymano następujące wyniki:

Stan techniczny silnika dobry:

1.009/1.23/1.004/1.008/1.24

Awaria w wirniku, bieg jałowy:

1.03/1.32/1.002/1.018/1.34

Awaria falownika i wirnika, bieg jałowy:

1.18/1.34/1.05/1.02/1.63

Awaria falownika, bieg jałowy:

1.46/1.21/1.08/1.008/1.89

Uszkodzenie uzwojenia stojana i wirnika, bieg jałowy:

1.28/1.3/1.002/1.01/1.65

Uszkodzenie uzwojenia stojana i awaria wirnika, silnik obciążony:

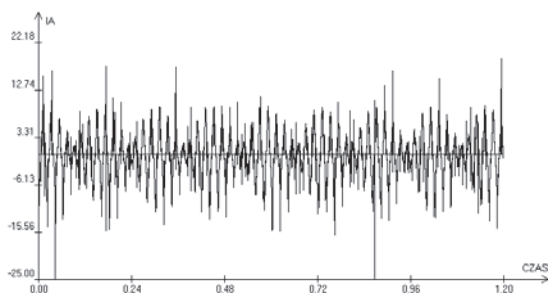
1.38/2.63/1.0005/1.02/3.56

Awaria falownika i wirnika, silnik obciążony:

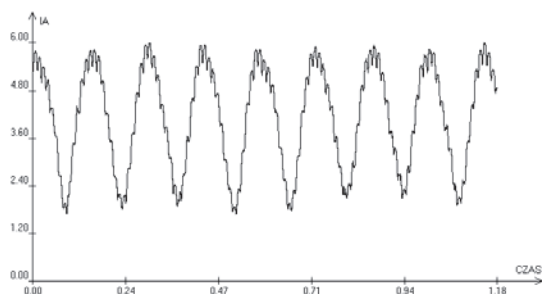
1.56/1.15/1.145/1.02/2.01

Widać wyraźnie, że dla użytego silnika pierścieniowego wartości współczynników określających stan uzwojenia wimika wykazują większe wartości bez wprowadzania celowej niesymetrii. Fakt ten jest uzasadniony istnieniem złącza ruchomego (pierścieni i szczotek), które w naturalny sposób wprowadza nieznaczną niesymetrię. Każda modelowana awaria powodowała wyraźny wzrost współczynnika K.

Na rys 1 i 2 przedstawiono przykładowe przebiegi wartości chwilowej prądu stojana maszyny uszkodzonej oraz odpowiadający przebieg wartości skutecznej ruchomej.



Rys.1. Wartość chwilowa prądu w fazie A stojana silnika pierścieniowego w przypadku niesymetrii obwodu wimika i stojana



Rys.2. Wartość skuteczną ruchomą przebiegu prądu z rys.1

5. WNIOSKI

Przeprowadzone analizy i badania wykazały przydatność proponowanego sposobu obliczania sygnałów diagnostycznych do analizy stanu pracy układu napędowego z falownikiem napięcia i silnikiem indukcyjnym. Istotnymi ograniczeniami proponowanych rozwiązań jest konieczność dostępu do informacji o aktualnej wartości częstotliwości napięcia zasilania. Proponowany sposób obliczeń sygnałów (wartość skuteczną ruchomą) ma szereg zalet umożliwiających użycie proponowanego sposobu obliczeń dla różnych algorytmów sterowania.

Automatyczna detekcja awarii na postawie proponowanych współczynników wymaga stworzenia algorytmów umożliwiających uwzględnienie stanów przejściowych.

LITERATURA

- [1] Drozdowski P., Petryna J., Weinreb K., Ocena skuteczności diagnozowania silników indukcyjnych poprzez analizę spektralną prądu stojana, XXXII International Symposium on Electrical Machines, Cracow 1996
- [2] Dybowski P. Wpływ zasilania napięciem odkształconym na widmo prądów stojana cz.2. XIII Seminarium Techniczne: Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych „Eksploatacja, diagnostyka i modernizacja silników elektrycznych” 19 – 21 maja 2004r, Ustroń Jaszowiec
- [3] Glinka T., Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle, BOBRME Komel, Katowice 2002
- [4] Sołbut A., Sygnał diagnostyczny dla silnika asynchronicznego zasilanego z falownika napięcia, "Diagnostyka" nr 32/2004
- [5] Sołbut Adam, Ocena stanu klatki wimika maszyny asynchronicznej zasilanej z falownika napięcia, VI Krajowa konferencja naukowa: Sterowanie w energoelektronice i napędzie elektrycznym SENE'2003, Łódź 19-21 listopada 2003 r. s.545-550
- [6] Swędrowski L., Nowa metoda diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego oparta na pomiarze i analizie widmowej prądu zasilającego, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Monografie nr.54, Gdańsk 2005
- [7] Thomson W. T., Stewart I. D.: On-line current monitoring for fault diagnosis in inverter fed induction motors. IEEE Third International Con. on Power Elec. and Driv., London 1988



Dr inż. Adam SOŁBUT jest pracownikiem Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej od 1982 roku. Doktorat obroniony w 1994 roku na temat „Analiza i badania porównawcze silnika indukcyjnego 6-fazowego i 3-fazowego zasilanego z falownika napięcia”.

W ramach pracy zawodowej zajmuje się zagadnieniami maszyn elektrycznych zasilanych napięciem odkształconym od sinusoidy. W badaniach wykorzystuje oryginalne autorskie oprogramowanie wspomagające analizę wyników pomiarów laboratoryjnych oraz własne opracowania programów symulacyjnych.