

Jerzy HICKIEWICZ, Krystyna MACEK-KAMIŃSKA

POLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT UKŁADÓW ELEKTROMECHANICZNYCH I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ

Wybrane zagadnienia w diagnostyce silników indukcyjnych

Dr hab. inż. Jerzy HICKIEWICZ

Profesor Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki. Autor ponad 200 publikacji z zakresu modelowania i diagnostyki układów elektromechanicznych.



e-mail: j.hickiewicz@po.opole.pl

Dr hab. inż. Krystyna MACEK-KAMIŃSKA

Profesor Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Dyrektor Instytutu Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej. Autorka ponad 100 publikacji z zakresu modelowania i diagnostyki układów elektromechanicznych.



e-mail: k.macek-kaminska@po.opole.pl

Streszczenie

Omówiono jakim badaniom winno się poddawać silniki indukcyjne w napędach elektrownianych. Szczególną uwagę zwrócono na silniki WN klatkowe w napędach potrzeb własnych. Przedstawiono potrzebę badań symulacyjnych i warunki jakie muszą być spełnione aby ich wyniki były wiarygodne. Zwrócono uwagę na eksploatacyjne pomiary diagnostyczne pozwalające na ocenę stanu silników i przydatność do dalszej pracy. Pokazano możliwości jakie w tym zakresie stwarzają: badania stanu izolacji napięciem stałym, badania stanu konstrukcji mechanicznej stojana pobudzeniem przez impuls elektromagnetyczny.

Słowa kluczowe: silniki elektryczne, modelowanie i symulacja stanów dynamicznych, diagnostyka silników indukcyjnych, pomiary eksploatacyjne.

Selected problems in the diagnosis of induction motors

Abstract

The paper presents selected diagnostic tests which will be performed on induction motors used in electric drives in power plants [1, 2, 3]. In dynamic states, such as start-up, re-connection, etc., a rapid increase in the current and electromagnetic internal forces acting in the motor can occur. The dynamic states can cause a damage of the machine. There are proposed some dynamic simulation studies of electric drives as a method of diagnosing the causes of damage. The mathematical model of the induction machine (Section 2) [4, 5] [7, 8] is presented. There is also cited, previously developed by one of the authors [6], the method for determining the electromagnetic parameters of the model. In order to show the usefulness of the method, a comparison of measurements and calculations of some examples of dynamic processes is performed (Fig. 2). It concerns the energy-efficient induction motors [9] (Section 3). An example of comparison of the stator currents of energy-efficient motors obtained from simulating the dynamics of their start-up is presented in Fig. 5. It was noted that the damage of the rotor cage (Section 4) after improving the design of cages [10] and simplifying the methods for diagnosing the state of frames [11] [14] ceased to be a frequent cause of the induction motor damages. Measurements of the insulation state by constant voltage excitation, introduced by T. Glinka [12, 13] and widely used in power industry [14], are discussed in Section 5 (Fig. 6). The ways of estimating the insulation state are presented in [14, 15]. The usefulness of this method was proved on the motors activated after the flood [16]. The methods for testing the winding insulation are listed [17, 18, 19, 20]. The possibility of diagnosing the state of mechanical structures (housing, fixing, packages, etc.) by the method of stimulating with an electromagnetic pulse is also shown (Section 6). [14, 21]. In the conclusions (Section 7) the necessity of dynamic simulation testing to verify the correctness of the selection of engines and to forecast the damages of engines is emphasized. The method for testing the winding insulation and the diagnosing of the state of mechanical structures by an electromagnetic pulse are assumed to be the ones of the future and development. The problem of diagnosing rolling bearing is not taken into consideration in the paper.

Keywords: electric motors, modeling and simulation of dynamic states, diagnostics of induction motors, operating diagnostic measurements.

1. Wstęp

Jednymi z najczęściej stosowanych maszyn napędzających są silniki elektryczne. Fakt ten wynika z kilku przyczyn, a mianowicie: łatwości zasilania ich energią, łatwości sterowania, stosunkowo dużej niezawodności. Wśród silników elektrycznych najbardziej dogodnie w eksploatacji są silniki indukcyjne, szczególnie z wirnikiem klatkowym. Stanowią one około 90% ogólnej ilości silników zainstalowanych w przemyśle na świecie. Również ich łączna moc stanowi w różnych krajach około 90% ogólnej mocy silników elektrycznych zainstalowanych w przemyśle. Podobnie w elektrowniach stanowią one podstawową maszynę napędzającą.

Silniki indukcyjne stosowane w napędach elektrownianych, szczególnie WN w napędach potrzeb własnych, z uwagi na konieczność zapewnienia dyspozycyjności i niezawodności pracy bloku energetycznego, poddawane są różnego rodzaju badaniom. W trakcie projektowania układów napędowych, bądź przy zmianie cyklu ich pracy, doborze zabezpieczeń itp. bardzo przydatne są badania symulacyjne różnego rodzaju dynamicznych stanów pracy, takich jak rozruchy, powtórne załączenia itp. Pozwala to ocenić zjawiska zachodzące w układach napędowych, w szczególności grupowych, jak również określić oddziaływania tych stanów na sąsiednie odbiorniki. W trakcie eksploatacji silniki winne być poddawane różnego rodzaju pomiarom diagnostycznym [1, 2, 3], pozwalającym ocenić ich stan i przydatność do dalszej pracy.

2. Badania symulacyjne silnika indukcyjnego

Model matematyczny [4, 5] silnika indukcyjnego dwuklatkowego lub głębokożłobkowego sformułowano zakładając symetrię budowy silnika, liniowość charakterystyk magnesowania głównego obwodu magnetycznego jak i strumieni rozproszenia, jednoharmoniczny rozkład indukcji w szczelinie powietrznej oraz pomijając straty w obwodzie magnetycznym. Wielkości wirnika wprowadzono na stronę stojana. Dokonano dwuosiowej transformacji obwodów wirnika na płaszczyznę stojana przyjmując po dwa obwody zastępcze w osi U oraz V, (rys. 1). Przyjęto sztywne sprzęgnięcie silnika z urządzeniem napędzanym. Przy tak sformułowanych założeniach przyjęto następujący model matematyczny maszyny indukcyjnej:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} R_s \mathbf{A} & 0 & 0 \\ \omega_e L_m \mathbf{B} & R_r \mathbf{E}_1(\omega_e) & \omega_e L_m \mathbf{N} \\ \omega_e L_m \mathbf{B} & \omega_e L_m \mathbf{N} & R_r \mathbf{E}_2(\omega_e) \end{bmatrix} \mathbf{i}_M + \begin{bmatrix} L_s \mathbf{A} & L_m \mathbf{C} & L_m \mathbf{C} \\ L_m \mathbf{D} & L_r \mathbf{1} & L_m \mathbf{1} \\ L_m \mathbf{D} & L_m \mathbf{1} & L_r \mathbf{2} \mathbf{1} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \mathbf{i}_M \quad (1)$$

oraz

$$J\dot{\varphi} = M_e - M_L - D\dot{\varphi} \quad (2)$$

gdzie:

φ – kąt obrotu wirnika względem stojana,
 $\mathbf{U}=[u_{ab} \ u_{bc} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ – wektor napięć,
 $\mathbf{i}_M=[i_a \ i_b \ i_{u1} \ i_{u2} \ i_{v1} \ i_{v2}]^T$ – wektor prądów,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix},$$

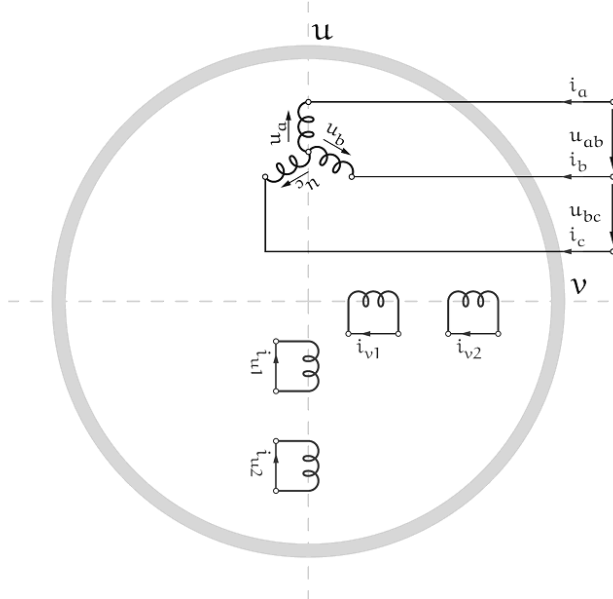
$$\mathbf{C} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & -1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & 0 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_i(\omega_e) = \begin{bmatrix} 1 & \omega_e T_{ri} \\ -\omega_e T_{ri} & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

J – moment bezwładności,
 D – współczynnik tłumienia,
 $\omega_e = p\dot{\varphi}$ – prędkość kątowna elektryczna,
 M_L – moment obciążenia,

$$M_e = pL_m [i_a \ i_b] \mathbf{B}^T \begin{bmatrix} i_{u1} + i_{u2} \\ i_{v1} + i_{v2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

M_e – moment elektromagnetyczny silnika
 p – liczba par biegunów,
 $L_m = 3/2L_{\mu}$; $L_s = L_m + L_{\sigma s}$; $L_{ri} = L_m + L_{\sigma ri}$
 $T_{ri} = L_{ri}/R_{ri}$ – stała czasowa i -tego obwodu wirnika.

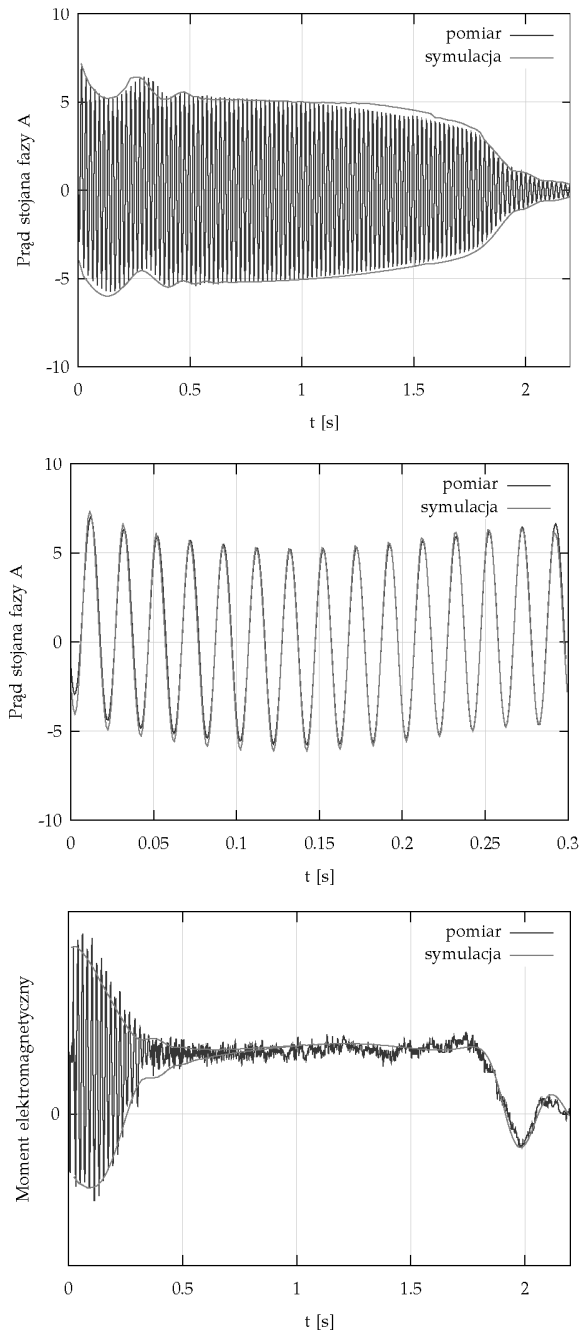


Rys. 1. Schemat układu uzwojeń maszyny indukcyjnej po transformacji wirnika do osi U i V nieruchomych względem stojana

Fig. 1. Arrangement of the induction motor windings after transformation of the rotor to the U, V axes fixed to the stator

Ten model silnika indukcyjnego jest szczególnie wygodny w różnych przypadkach niesymetrii zasilania stojana np. niejednoczesnego załączania poszczególnych faz, zasilania z układów przekształtnikowych itp., bowiem uzwojenia stojana w tym modelu pozostają w układzie naturalnym. Istotnym z punktu widzenia dokładności obliczeń jest prawidłowe wyznaczenie parametrów elektromagnetycznych modelu tzn. rezystancji i indukcyjności własnych i wzajemnych. Bardzo dogodną do określenia wartości tych parametrów jest metoda estymacji parametrów, na podstawie charakterystyk statycznych, bądź przebiegów czasowych momentu elektromagnetycznego, lub prądu [6].

Na rysunku 2. pokazano pomiarowe i symulacyjne przebiegi prądu fazowego stojana oraz momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu nieobciążonego silnika SZJre-134t o mocy 1MW.



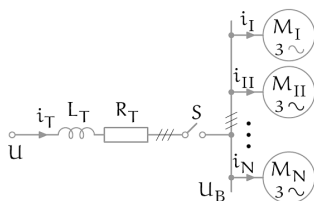
Rys. 2. Przebiegi prądu stojana i momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu silnika SZJre-134t. Wartości prądu i momentu elektromagnetycznego wyrażono w jednostkach względnych odniesionych do wartości znamionowych

Fig. 2. Stator current and electromagnetic torque during the start-up of the SZJre-134t motor. Current and electromagnetic moment values in relative units

Prezentowany model silnika może być stosowany zarówno do badań stanów dynamicznych pojedynczego silnika jak i napędów grupowych zasilanych z wspólnego transformatora (rys. 3) [7, 8].

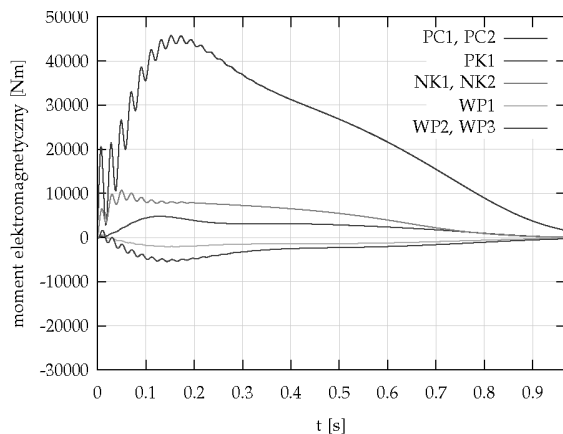
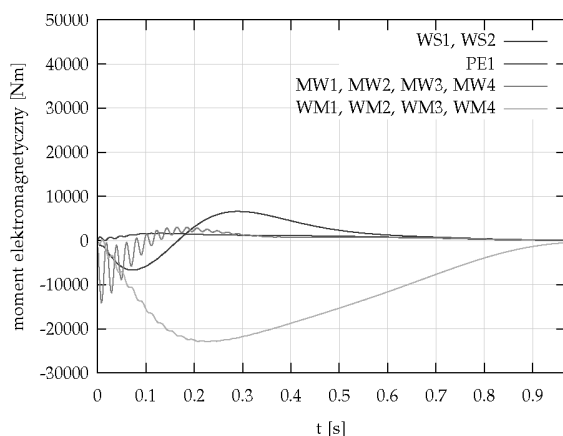
Na rysunku 4. przedstawiono przebiegi momentu elektromagnetycznego silników w trakcie wybiegu grupowego uzyskane w wyniku przeprowadzonym badań symulacyjnych. Użyte skróty oznaczają: WS – wentylator spalin, PE – pompa uzdatniania kondensatu, MW – młyn węglowy, WM – wentylator młynowy, PC – pompa wody chłodzącej, PK – pompa kondensatu główna, NK – pompa cyrkulacyjna, WP1 – wentylator powietrza pierwotnego

nego, WP2, WP3 – wentylatory powietrza wtórnego. Jak widać z rysunku część maszyn staje się silnikami, część generatorami.



Rys. 3. Schemat połączeń układu N silników zasilanych ze wspólnego transformatora o parametrach L_T, R_T

Fig. 3. Wiring of the N Motors powered from a common transformer of L_T, R_T parameters



Rys. 4. Przebiegi momentów elektromagnetycznych poszczególnych napędów podczas wybiegu grupowego

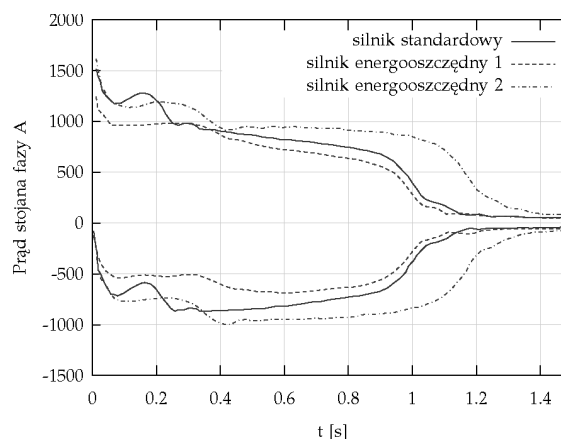
Fig. 4. Electromagnetic torque of selected drives during group coasting

Najważniejszą praktycznie cechą badań symulacyjnych jest ich znacznie niższy koszt niż odpowiadających im badań eksperymentalnych. Istnieje możliwość uzyskania wyników badań symulacyjnych o dobrej dokładności pod warunkiem zastosowania sprawdzonych modeli matematycznych i co najważniejsze z odpowiednio dokładnie określonymi parametrami modeli. Badania symulacyjne pozwalają ponadto na prowadzenie badań przy założeniach bardzo ekstremalnych warunków, nawet takich, w których nie byłoby możliwości wykonania badań eksperymentalnych.

3. Silniki energooszczędne

Zaproponowana metoda bardzo dobrze nadaje się do sprawdzenia, pod względem dynamicznym, poprawności doboru coraz częściej stosowanych energooszczędnych silników indukcyjnych, o podwyższonych wartościach sprawności. Jest to szczególnie

ważne, ponieważ silniki te, pozwalające na oszczędności zużycia energii elektrycznej i emisji CO_2 , są dogodne pod względem ekologicznym (obniżony poziom hałasów i drgań), o dużej trwałości, mogą niekiedy posiadać gorsze własności rozruchowe [9]. Dlatego, szczególnie w przypadku napędów o trudnych warunkach rozruchowych, celowym wydaje się przeprowadzenie, jeszcze na etapie ich projektowania, oceny rozruchu, na podstawie badań symulacyjnych przebiegów rozruchowych, zaproponowaną metodą. Na rys. 5. porównano wyniki symulacji obwiedni przebiegów prądów rozruchowych uzyskane dla alternatywnych silników do napędu wentylatora powietrza pierwotnego – standardowego i dwóch energooszczędnych: 1 – o podobnych własnościach rozruchowych co standardowy i 2 – o gorszych.



Rys. 5. Przebiegi prądów rozruchowych silnika standardowego i dwóch silników energooszczędnych

Fig. 5. Stator currents of a standard motor and two energy-efficient motors

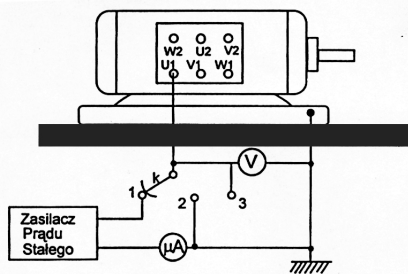
4. Uszkodzenia klatek

Uszkodzenia klatek wirników silników indukcyjnych klatkowych, które w latach 80. ubiegłego stulecia stanowiły prawdziwą plagę w elektrowniach ciepłych węglowych, obecnie występują bardzo rzadko. Powodem tego były: udoskonalona konstrukcja klatki, zapoczątkowana pracą [10], jak również większa kultura eksploatacji silników oraz prosta i wygodna w warunkach eksploatacyjnych metoda diagnostyki stanu klatek. Metoda ta, która powszechnie się przyjęła, polega na analizie częstotliwościowej prądu obciążenia silnika i wykrywaniu tzw. „częstotliwości poślizgowych”, bądź na rejestracji i analizie przebiegu czasowego prądu rozruchowego, pozwala na dokładną ocenę stanu klatki [11]. Ponadto silniki z niedużą liczbą uszkodzonych prętów (rzędu kilku procent) mogą jeszcze poprawnie pracować, nie pogarszając wyraźnie swoich własności eksploatacyjnych. Jednak uszkodzenie to ma tendencje do pogłębiania się. Najniebezpieczniejszymi skutkami uszkodzenia klatki jest uszkodzenie połączeń czołowych uzwojenia stojana i konieczność kosztownego przewijania stojana, które może wywołać promieniowe odchylenie uszkodzonej końcówki pręta klatki. Z tych względów, prowadzone w praktyce przemysłowej okresowe pomiary diagnostyczne stanu klatki są konieczne.

5. Diagnostyka stanu izolacji

Metoda pomiaru i oceny stanu izolacji uzwojeń napięciem stałym, zapoczątkowana przez D. Vajdę [12], została wprowadzona w Polsce przez T. Glinkę [13]. Metoda ta powszechnie stosowana jest w energetyce i przemyśle [14] do określenia stanu izolacji uzwojeń stojana silników WN. Wymaga ona stosunkowo prostej aparatury. Jest to metoda bezpieczna dla badanego obiektu, bowiem wartość napięcia można ograniczyć do takiej na jaką pozwala stan izolacji. Metoda polega na wykonaniu pomiarów (rys. 6):

- Charakterystyki $R_{60}=f(U)$. Przykładając kolejno napięcie stałe (położenie 1 wyłącznika K), a następnie mierząc prąd po czasie 60s, wyznacza się wartość rezystancji izolacji R_{60} . Ekstrapolacja tej charakterystyki pozwala na wyznaczenie tzw. hipotetycznego napięcia przebicia U_p .
- Charakterystyki $I_{15}=f(U)$. Mierzy się podobnie prąd po czasie 15s.
- Przebiegu $I_p=f(t)$. Po załączeniu napięcia stałego mierzy się przebieg czasowy prądu.
- Przebiegu napięcia odbudowy $U_{odb}=f(t)$. Pomiar ten wykonuje się następująco: po naładowaniu układu izolacyjnego przez zasilenie napięciem (położenie 1 wyłącznika K) i krótkotrwałym zwarciu układu izolacyjnego (położenie 2) pomiar przebiegu czasowego napięcia odbudowy dokonuje się w położeniu 3 wyłącznika.



Rys. 6. Układ pomiarowy do pomiaru przebiegów czasowych i charakterystyk przy pomiarze izolacji napięciem stałym

Fig. 6. System for measuring the waveforms and characteristics during the insulation measurement with direct voltage

Wnioskowanie o stanie izolacji można przeprowadzić na podstawie zmierzonych charakterystyk i przebiegów, a najlepiej przez porównanie zmierzonych w różnych okresach czasu.

W celu łatwiejszej oceny stanu izolacji uzwojeń zaproponowano [14] liczbowy wskaźnik stanu izolacji W_L , w którym występują: ustalona wartość prądu ładowania $I_{pu}(\mu A)$, względna wartość hipotetycznego napięcia przebicia U_p/U_N , czas, po którym napięcie odbudowy dochodzi do tej wartości, zwany czasem odbudowy t_{od} oraz napięcie znamionowe U_N .

$$DFL = \frac{I_{pu} U_N}{t_{od} \frac{U_p}{U_N}}$$

Z kolei ocenę punktową stanu izolacji w skali od 0 do 5 wprowadził w swoich pracach T. Glinka [15].

W Elektrowni Opole od 1992 roku są prowadzone systematyczne pomiary napięciem stałym z ich archiwizacją. Ocena stanu izolacji na podstawie tych pomiarów wymaga pewnego doświadczenia, ale przydatność tej metody została sprawdzona w Elektrowni Opole w ekstremalnych warunkach w trakcie uruchamiania zalanych silników WN po powodzi [16].

Diagnostyka stanu izolacji zwojowej może pozwalać na śledzenie najważniejszych zmian pogorszenia stanu izolacji. Służy do tego celu metoda pobudzenia impulsowego [17, 18].

Badania stanu izolacji zwojowej polegający na badaniu fali napięciowej wzbudzonej w uzwojeniu po wyłączeniu prądu stałego został zaproponowany przez zespół pracowników BOBR ME Komel [19] i zgłoszony do opatentowania [20].

6. Diagnostyka stanu mechanicznego

Diagnostyka stanu technicznego konstrukcji stojana ma na celu wykrywanie uszkodzeń konstrukcji stojana takich jak np. pęknięcie konstrukcji obudowy, złe mocowanie pakietów żelaza, uszkodzenie gniazd łożyskowych itp. Metoda polega na pobudzeniu impulsem elektromagnetycznym powstającym na skutek zwarcia udarowego, bądź rozładowania baterii kondensatorów przez

uzwojenie stojana i badanie prędkości drgań obudowy w kierunku prostym do osi wału silnika, jako odpowiedzi na pobudzenie elektromagnetyczne. Zwarcie udarowe silnika uzyskuje się przez zwarcie uzwojeń stojana po krótkim czasie swobodnego wybiegu, gdy jeszcze strumień magnetyczny nie uległ wygaszeniu. Moment elektromagnetyczny ma charakter wąskiego ujemnego impulsu o stosunkowo dużej wartości, zależnej od wartości napięcia resztkowego, przy której dokonano zwarcia i stanowi bardzo silne pobudzenie. Metoda zwarcia udarowego może też posłużyć do pomiaru częstotliwości drgań własnych wirnika [21].

7. Wnioski

Wydaje się, że badania symulacyjne dynamiki silników indukcyjnych mogą być bardzo przydatne przy sprawdzeniu ich doboru pod względem dynamicznym, doborze zabezpieczeń jak i symulacji ekstremalnych stanów pracy napędów. Są bezpieczne i tańsze niż badania eksperymentalne. Celowym wydaje się stosowanie ich w fazie projektowania układów napędowych, szczególnie w przypadku napędów o trudnych warunkach rozruchowych, gwałtownych przeciążeniach, itp. zakłóceniach obciążenia i zasilania.

Metoda oceny stanu izolacji uzwojeń napięciem stałym, zwłaszcza prowadzona systematycznie od początku zainstalowania silnika, pozwalają na dobrą informację o jej zużyciu. Dzięki śledzeniu tego zużycia w czasie eksploatacji, możliwe jest przewidywanie czasu jej uszkodzenia. W porównaniu do metod opartych na pomiarze tgδ i badaniu wyładowań niezupełnych metoda ta jest tańsza, stosowana i wdrażana bez większych trudności i nakładów w elektrowniach, elektrociepłowniach i dużych zakładach przemysłowych. Celem przyszłościowym wydaje się rozwój metod diagnozowania izolacji zwojowej i ich zastosowanie przyszłościowo.

Metoda oceny stanu konstrukcji stojana pobudzeniem mechanicznym wydaje się dobrze rokować, zwłaszcza przez wykorzystanie zwarcia udarowego. Impuls momentu zwarcia udarowego posiada jednak dużą energię, ale poprzez czas trwania zwarcia można nim sterować.

W opracowaniu nie poruszono problemu diagnozowania łożysk. Uszkodzenia łożysk to jedno z najczęstszych uszkodzeń maszyn elektrycznych, a diagnostyka łożysk wymaga również szczególnej uwagi.

8. Literatura

- [1] Hickiewicz J.: „Diagnostyka maszyn elektrycznych indukcyjnych”. Informator Instytutu Wojsk Lotniczych, III Krajowa Konferencja Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów, Szczyrk, 1995.
- [2] Dzierżanowski A., Hickiewicz J., Szymaniec S., Wach P.: „Diagnostyka napędów potrzeb własnych elektrowni”. Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Naukowej Aktualne problemy w elektroenergetyce, tom I Kontrola, Politechnika Śląska, Gliwice-Kozubnik 1993, str. 113-121.
- [3] Hickiewicz J., Ławrowski Z., Macek-Kamińska K.: „Silniki indukcyjne w napędach elektrycznych”. IV Konferencja Elektrownie ciepłe eksploatacja-modernizacja-remonty, Słok, wrzesień 1999, str. 101-104.
- [4] Hickiewicz J., Macek-Kamińska K., Kamiński M.: „Dynamyczne modele obliczeniowe maszyn indukcyjnych i ich identyfikacja”. Maszyny Elektryczne Zeszyty Problemowe BOBR ME Komel nr 69/2004, str. 133-138.
- [5] Hickiewicz J., Macek-Kamińska K., Wach P.: „A simulation of common-bus drivers in power plants”. Archiv für Elektrotechnik 75 (1992), s. 293-302.
- [6] Macek-Kamińska K.: „Estymacja parametrów modeli matematycznych silników indukcyjnych dwuklatkowych i głębokożłobkowych”. WSI w Opolu, Studia i monografie z. 61, Opole 1992.
- [7] Hickiewicz J., Macek-Kamińska K., Kamiński M., Wach P.: „Badania symulacyjne i eksperymentalne napędów grupowych potrzeb własnych elektrowni”. Wiadomości Elektrotechniczne, 1990, nr 7-8, s. 179-182.

- [8] Hickiewicz J., Kamiński M., Macek-Kamińska K., Wach P.: „Ocena zasilania rezerwowego napędów potrzeb własnych bloku energetycznego”. XXXII International Symposium on Electrical Machines, Cracow (Poland), June 26-29, 1996, p. 69-74.
- [9] Herman W., Hickiewicz J., Macek-Kamińska K., Kamiński M.: „Silniki indukcyjne klatkowe o podwyższonej sprawności w elektrowniach”, *Maszyny Elektryczne Zeszyty Problemowe BOBR ME Komel* nr 73/2005, str. 31-35.
- [10] Zuziak P.: „Optymalizacja konstrukcji klatek silników asynchronicznych wysokiego napięcia na podstawie analizy naprężeń”, *Energetyka* nr 7, 1987, str. 151-154.
- [11] Szymaniec S.: *Badania wibroakustyczne silników indukcyjnych trójfazowych klatkowych. Rozprawa doktorska. Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej*, 1985.
- [12] Vajda D.: „Issledowanija povrejezdenij izolacii”, *Energia*, Moskwa 1968.
- [13] Glinka T.: „Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle”. *BOBR ME, KBN, Katowice* 1998.
- [14] Ławrowski Z.: „Diagnostyka silników klatkowych wysokiego napięcia w energetyce na przykładzie Elektrowni Opole”. *Rozprawa doktorska, Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej, Gliwice* 1999.
- [15] Glinka T.: „Klasyfikacja stopnia zużycia izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych”. *Zeszyty Problemowe BOBR ME Komel*, nr 68/2004, str. 13-17.
- [16] Ławrowski Z.: „Doświadczenia powodziowe dotyczące stanu izolacji silników wysokiego napięcia”. *Materiały konferencyjne 4SPE-98, Wiadomości Elektrotechniczne* nr 4, 1988, s. 196-199.
- [17] Stone G. C., Boulter E. A., Culbert I., Dhirani H.: „*Electrical insulation for rotating machines*”, *IEEE PRESS Series on Power Engineering*, USA, 2004.
- [18] Szymaniec S.: „Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji”, *Studia i monografie z. 193, Politechnika Opolska*, 2006.
- [19] Decner A., Glinka T., Polak A.: „Badania diagnostyczne izolacji zwojowej”. *Zeszyty Problemowe BOBR ME Komel*, nr 78/2008, str. 103-106.
- [20] Zgłoszenie patentowe P 382388 Układ pomiarowy i metoda badania izolacji zwojowej, *BOBR ME Komel*
- [21] Hickiewicz J., Ławrowski Z., Sikora G.: „Porównane wyników pomiarów silnika indukcyjnego pobudzonego różnymi sposobami do drgań”, *Wiadomości Elektrotechniczne* nr 4, 2007, str. 32-34.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

WYDAWNICTWO

Pomiary Automatyka Kontrola



specjalizuje się w wydawaniu czasopisma i książek popularno-naukowych w dziedzinie automatyki i pomiarów

Osoby i firmy przemysłowe zainteresowane współpracą z Wydawnictwem proszone są o kontakt bezpośredni dla uściślenia szczegółów współpracy

Wydawnictwo PAK
00-050 Warszawa
ul. Świętokrzyska 14A
tel./fax 022 827 25 40

Redakcja PAK
44-100 Gliwice
ul. Akademicka 10, p. 30b
tel./fax 032 237 19 45
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl