

Bronisław DRAK
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

USZKODZENIA UZWOJEŃ KLATKOWYCH WIRNIKÓW SILNIKÓW INDUKCYJNYCH DUŻEJ MOCY

Streszczenie. W artykule podano przykłady i analizę uszkodzeń uzwojeń klatkowych wirników silników indukcyjnych dużej mocy. Przedstawiono czynniki elektromechaniczne i termiczne wpływające na naprężenia i odkształcenia uzwojeń klatkowych. Podano wyniki symulacji komputerowych wybranych uszkodzeń uzwojeń klatkowych wirników. Zaprezentowano przykłady uszkodzeń klatek wirników oraz ich wpływ na skutki awarii silników. W podsumowaniu podano główne przyczyny uszkodzeń uzwojeń klatkowych wirników.

FAILURES OF SQUIRREL-CAGES OF HIGH POWER INDUCTION MOTOR ROTORS

Summary. Examples and analysis of failures' of high power induction motor squirrel-cages are presented in the paper. The influence of electromechanical and thermal factors on stresses and deformations of squirrel-cages is analyzed. The results of computer simulation of the chosen failures of squirrel-cages'are presented. The influence of the exemplary failure of squirrel-cages on the results of failures is discussed. The main for failures of squirrel-cages are given in the paper as arell.

1. WSTĘP

Silniki indukcyjne o zakresie mocy 200 do 6300 kW są stosowane głównie do napędów urządzeń potrzeb własnych w elektrowniach zawodowych i elektrociepłowniach. Są to przede wszystkim silniki indukcyjne z wirnikami o uzwojeniach jedno- lub dwuklatkowych, przystosowane do bezpośredniego załączenia do sieci (najczęściej 6 kV). Rzadziej stosowane są silniki wysokonapięciowe z biernymi prętami rozruchowymi.

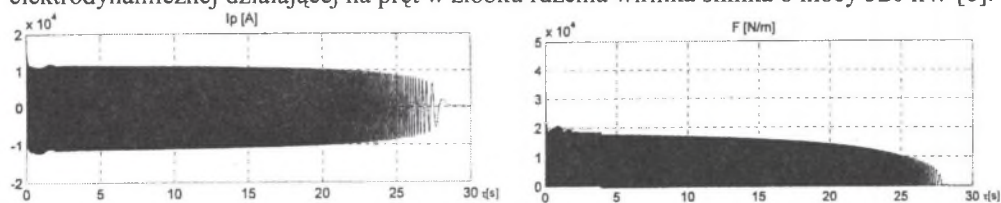
Statystyka własna z okresu ostatnich 10 lat, sporządzona na podstawie analizy przyczyn uszkodzeń ponad 350 silników dużej mocy [6], wskazuje, że uszkodzenie uzwojenia stojana jest bezpośrednią przyczyną około 80% awarii silników wysokonapięciowych [5]. Należy tu zaznaczyć, że uszkodzenie w uzwojeniu stojana najczęściej objawia się zewnętrznie w sposób nagły i bezpośrednio jest przyczyną awarii silnika. Uszkodzenie uzwojenia klatkowego wirnika, które prowadzi bezpośrednio do awarii silnika, jest w zasadzie procesem długotrwałym. Z tego względu częściowe jego uszkodzenie, polegające np. na pękaniu prętów uzwojenia klatki, jest zauważane w czasie przeglądów technicznych silnika i wirnik nie jest dopuszczany do dalszej eksploatacji bez usunięcia danego uszkodzenia. Dlatego procentowy udział uszkodzeń wirników będących bezpośrednią przyczyną awarii silnika jest tak znacząco niższy w porównaniu z uszkodzeniem w uzwojeniu stojana.

2. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA NAPRĘŻENIA MECHANICZNE W KLATCE WIRNIKA

Naprężenia mechaniczne w uzwojeniu klatkowym wirnika, tak w prętach, jak i w pierścieniach zwierających, są wynikiem działania:

- sił elektrodynamicznych, działających głównie na części żłobkowe prętów klatki,
- naprężeń wywołanych nierównomiernym rozkładem temperatury w prętach i pierścieniach zwierających, głównie w czasie rozruchu silnika
- naprężeń wywołanych działaniem sił odśrodkowych na pręty i pierścienie zwierające, głównie pod koniec rozruchu silnika.

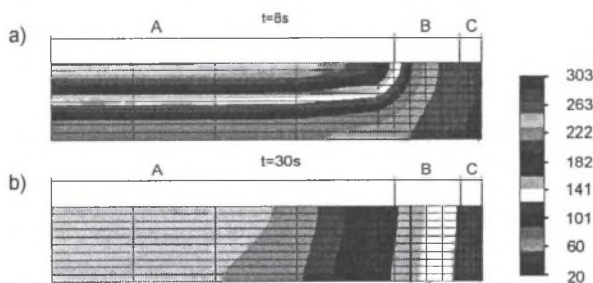
Siła *elektrodynamiczna* działająca na pręt uzwojenia klatkowego wirnika jest efektem oddziaływania prądu pręta i strumienia rozproszenia żłobkowego wywołanego tym prądem. Jest ona proporcjonalna do kwadratu prądu pręta, a dla prętów o przekroju prostokątnym jest zawsze skierowana do dna żłobka. Na rys.1 zaprezentowano przebieg prądu i siły elektrodynamicznej działającej na pręt w żłobku rdzenia wirnika silnika o mocy 320 kW [8].



Rys. 1. Obliczony przebieg nieustalony prądu I_p w pręcie i siły elektrodynamicznej F działającej na pręt w czasie rozruchu silnika [8]

Fig. 1. The transient current I_p in the bar and electrodynamic force F operating on the bar calculated during motor start-up [8]

Nierównomierny rozkład temperatury w uzwojeniu klatkowym wirnika w czasie rozruchu silnika jest skutkiem nierównomiernego rozkładu prądu na wysokości pręta (zjawisko wypierania prądu) oraz niejednakowego oddawania ciepła w części żłobkowej oraz w strefie pierścieni zwierających. Rozkład temperatury w pręcie klatki i w pierścieniu zwierającym na początku i na końcu rozruchu silnika o mocy 320 kW podano na rys. 2a, b [8], na których zaznaczono przez: A - część żłobkową pręta, B - wysięg prętów, C - pierścień zwierający.



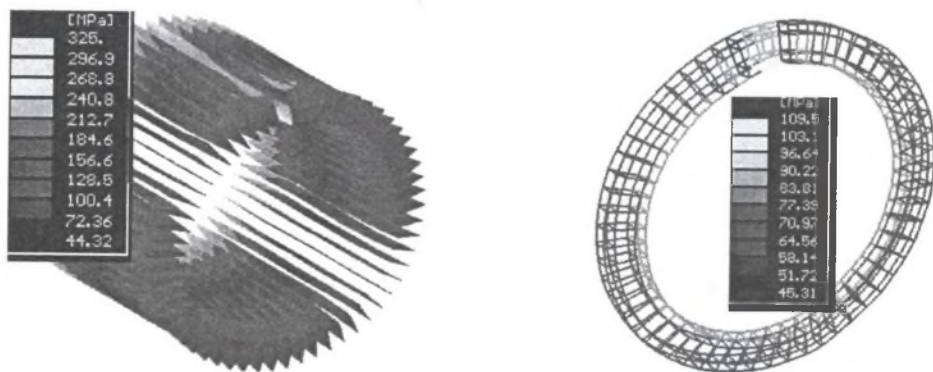
Rys. 2. Pole temperatury uzwojenia wirnika: a) po 8 s trwania rozruchu, b) po zakończeniu rozruchu [8]

Fig. 2. Temperature distribution in squirrel-cage of the rotor: a) after 8s of motor starting, b) after motor starting [8]

Pod koniec rozruchu silnika uwidacznia się *oddziaływanie sił odśrodkowych* na masy własne prętów klatki i pierścieni zwierających. Oddziaływanie tych sił na już uszkodzoną klatkę wirnika pod działaniem naprężeń termicznych może doprowadzić do uszkodzenia uzwojenia stojana i w konsekwencji do awarii silnika.

3. OBLICZENIA NAPRĘŻEŃ I DEFORMACJI UZWOJEŃ KLATKOWYCH WIRNIKÓW

Intensywność oddziaływań cieplnych i elektrodynamicznych w uzwojeniach klatkowych wirnika wywołanych prądami rozruchowymi jest najbardziej niekorzystna w przypadku długotrwałego rozruchu. Naprężenia mechaniczne w prętach klatki wirnika (w wimikach dwuklatkowych w klatce rozruchowej), wywołane nierównomiernym rozkładem temperatury, w przypadku długotrwałych rozruchów mogą przekroczyć naprężenia dopuszczalne i spowodować deformację klatki wirnika. Stan ten jest szczególnie niebezpieczny w przypadku, gdy występuje także niesymetria obwodowa w rozkładzie temperatury w prętach klatki wirnika. Przypadek taki występuje już wówczas, gdy jeden z prętów klatki wirnika osiąga niższe wartości temperatury w porównaniu z pozostałymi. Może to wystąpić, gdy szybciej oddaje ciepło do rdzenia wirnika z powodu ścisłego jego dopasowania w żłobku. Wówczas w pręcie występują mniejsze naprężenia wynikające z nierównomiernego rozkładu temperatury, ale jest on rozciągany przez pozostałe pręty klatki wirnika o wyższej temperaturze i sumaryczne naprężenia mogą przekroczyć naprężenia dopuszczalne dla materiału pręta. Taki przypadek może być początkiem uszkodzenia uzwojenia klatkowego wirnika polegającego na pękaniu prętów w strefie wyjścia prętów ze żłobków wirnika lub w strefie lutów twardych, łączących pręty klatki z pierścieniami zwierającymi. Na rys. 3 zaprezentowano wyniki obliczeń komputerowych naprężeń i odkształceń w uzwojeniu klatkowym wirnika występujących wówczas, gdy jeden pręt klatki osiąga niższe wartości temperatury w czasie rozruchu silnika. Powtarzające się kolejne takie przypadki są przyczyną kolejnych pęknięć prętów uzwojenia klatki, prowadzących w konsekwencji do poważnej awarii silnika tak wirnika, jak i stojana.

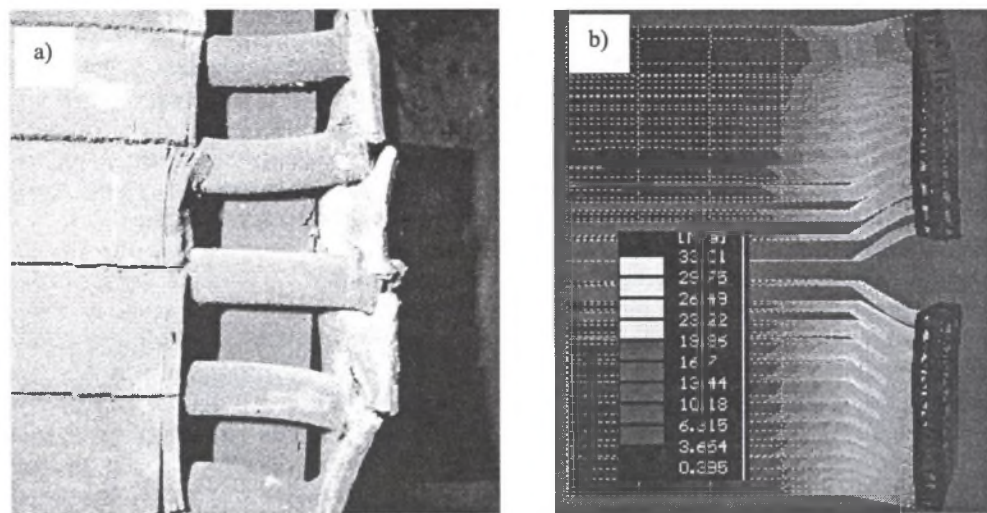


Rys. 3. Rozkład naprężeń i odkształceń uzwojenia klatkowego wirnika z jednym prętem o niższej temperaturze

Fig. 3. Distribution of stresses and deformation of squirrel-cage of the rotor with one bar in lower temperature

W czasie oględzin skutków awarii silników stwierdza się przypadki pękniętych i zdeformowanych pierścieni zwierających oraz zdeformowanych prętów klatki rozruchowej uzwojenia wirnika. Przypadek taki przedstawia zdjęcie na rys. 4a. Podobną deformację

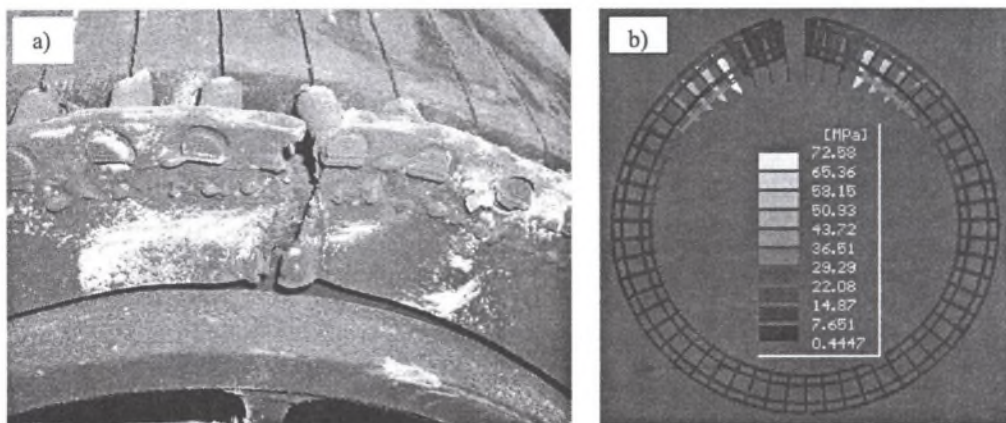
pierścienia i prętów uzwojenia klatkowego wirnika, uzyskaną w obliczeniach komputerowych, przedstawiono na rys. 4b, który jednocześnie prezentuje mapę naprężeń zastępczych w prętach i pierścieniu zwierającym, wywołanych siłami odśrodkowymi przy prędkości znamionowej silnika. Wynika z niej, że największe naprężenia występują przy wyjściu prętów ze żłobków rdzenia wirnika w prętach najbliżej umiejscowionych względem pękniętego pierścienia zwierającego.



Rys. 4. Deformacje i naprężenia w strefie pękniętego pierścienia zwierającego: a) ujęcie fotograficzne, b) wyniki symulacji komputerowej

Fig. 4. Deformation and stresses in zone of cracked ring: a) photo, b) results of computer simulation

W wirnikach dwuklatkowych, po awarii silnika, można stwierdzić pęknięcia i przerwy powstałe na skutek wytopienia prętów klatki rozruchowej. Uszkodzeniu ulegają niekiedy prawie wszystkie pręty klatki. Sporadycznie występują równocześnie uszkodzenia pierścieni zwierających. Taki przypadek przedstawia zdjęcie zaprezentowane na rys. 5a.



Rys. 5. Deformacje i naprężenia w strefie pękniętych prętów i pękniętego pierścienia zwierającego: a) ujęcie fotograficzne, b) wyniki symulacji komputerowej

Fig. 5. Deformations and stresses in cracking zone of cracked bars and end ring: a) photo, b) results of computer simulation

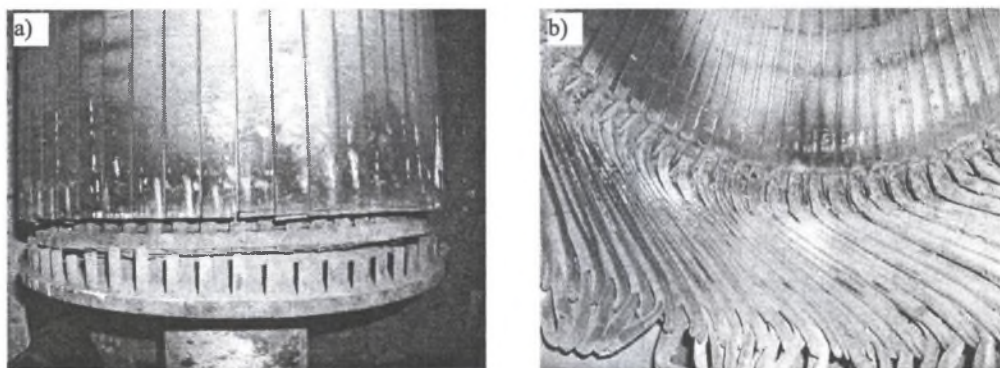
W wyniku deformacji promieniowej pękniętego pierścienia zwierającego nastąpiło wytarcie przez zdeformowany pierścień izolacji głównej i zwojowej na prostoliniowych wysięgach żłobkowych cewek uzwojenia stojana. W konsekwencji wystąpiła awaria silnika, której usunięcie wymagało pełnego przezwojenia stojana i wykonania nowej klatki rozruchowej wirnika.

Pęknięcie pierścienia zwierającego stwarza duże niebezpieczeństwo pęknięcia i przerw wskutek wytopienia łukiem elektrycznym kolejnych prętów uzwojenia klatkowego w strefie pękniętego pierścienia zwierającego. Wynika to z faktu zwiększonych naprężeń występujących w tych prętach. Obrazuje to mapa naprężeń zastępczych przedstawiona na rys. 5b.

4. SKUTKI AWARII SILNIKÓW SPOWODOWANYCH USZKODZENIEM UZWOJENIA KLATKOWEGO WIRNIKÓW

Uszkodzenie uzwojenia klatkowego wirnika, które jest bezpośrednią przyczyną awarii silnika, powoduje znaczne skutki awarii tak w wirniku, jak i stojanie. Poniżej zostanie podanych kilka przykładów skutków uszkodzenia klatki wirnika.

1. Na zdjęciu zaprezentowanym na rys. 6a podano dość często spotykane uszkodzenie klatki rozruchowej silnika (w tym przypadku silnika niskonapięciowego), polegające na zerwaniu i wytopieniu łukiem elektrycznym znaczącej liczby popękanych prętów klatki rozruchowej.



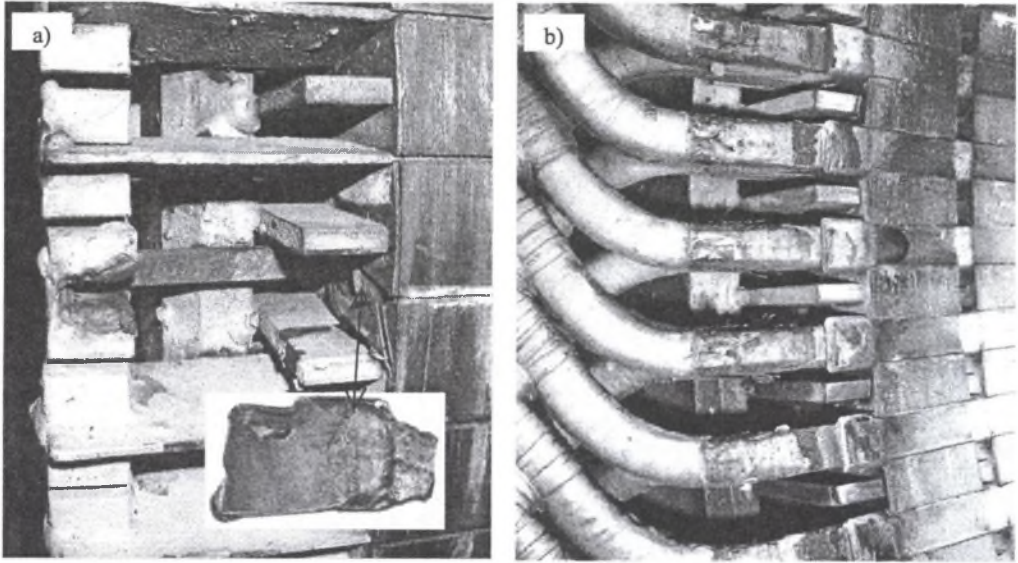
Rys. 6. Uszkodzenie uzwojenia klatkowego wirnika - a) oraz uzwojenia stojana - b) silnika niskonapięciowego

Fig. 6. Damages of rotor squirrel-cage - a), and stator winding - b) of low voltage motor

W tym silniku pierścień zwierający był podtrzymywany przez osiem kolejnych z 56 prętów klatki rozruchowej. Należy zaznaczyć, że tych osiem prętów było przerwanych łukiem elektrycznym po drugiej stronie rdzenia wirnika. Podczas ostatniej próby rozruchu silnika uległa także uszkodzeniu klatka pracy wirnika, a topiące się mosiądz i miedź spowodowały uszkodzenia izolacji na wysięgach żłobkowych uzwojenia stojana, powodując zwarcia zwojowe w cewkach tego uzwojenia (fot. 6b). Zaprezentowany przykład wskazuje na brak okresowych kontroli stanu klatki wirnika oraz na niewłaściwą obsługę techniczną silnika.

2. W silnikach jednoklatkowych z prętami o przekrojach trapezowych stosuje się kliny stalowe między dnem żłobka i prętem klatki w celu zlikwidowania luzu między prętem a żłobkiem. Kliny te są spawane punktowo do płyt prasujących rdzeń wirnika. Zdarza się bardzo często, że spawy te pękają i kliny przesuwają się do pierścieni zwierających (rys. 7a). Zwiększają się wówczas drgania pręta w wyniku działania sił elektrody-

micznych. Drgania te oraz nierównomierny rozkład temperatury w prętach klatki może spowodować zerwanie lutu łączącego dany pręt z pierścieniem zwierającym. W kolejności, siły odśrodkowe działające na pozapakietową część uszkodzonego pręta uzwojenia klatkowego powodują promieniowe jego odgięcie i zniszczenie izolacji w czołowej strefie cewek uzwojenia stojana.



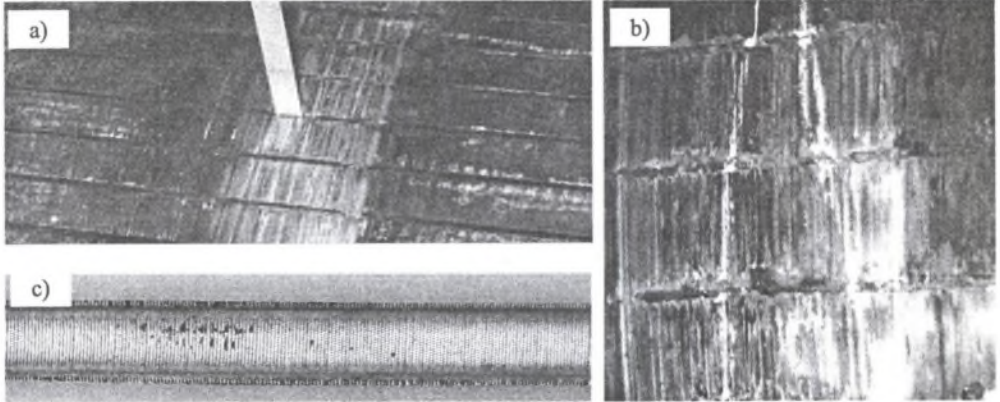
Rys. 7. Zerwanie pozapakietowej części pręta klatki wirnika - a) oraz uszkodzenie izolacji wysięgów żłobkowych cewek uzwojenia stojana - b)

Fig. 7. Rupture of bar in rotor's squirrel-cage - a) and insulation damage of groove in of stator winding coils - b)

W zaprezentowanym przykładzie nastąpiło także zerwanie uszkodzonego pręta (zdjęcie na rys. 7a) przy wyjściu ze żłobka rdzenia wirnika, który pod działaniem sił odśrodkowych zakleszczył się między cewkami uzwojenia stojana, niszcząc izolację i powodując zwarcie międzycewkowe, co spowodowało wyłączenie zasilania silnika przez jego zabezpieczenie elektryczne.

3. Uszkodzenie uzwojenia klatkowego wirnika występuje także często w jej strefie żłobkowej, tak w środkowej strefie długości rdzenia wirnika (rys. 8a), jak i w skrajnej strefie rdzenia (rys. 8b). W klatkach wykonanych z prętów takie uszkodzenie występuje najczęściej po kilkunastu i więcej latach pracy silnika. Jest to wynikiem stopniowego powstawania luzów między prętami klatki i żłobkiem, w którym są osadzone. Uwidacznia się wówczas oddziaływanie sił elektrodynamicznych, będących jednym z czynników (oprócz termicznych) wgniatania się blach rdzenia wirnika w pręty klatki (rys. 8c). Praktyka wykazuje, że w czasie demontażu prętów klatki po długoletnim okresie eksploatacji wirnika, duża ich liczba jest już luźno osadzona w żłobkach rdzenia wirnika. Występuje wówczas nierównomierne oddawanie ciepła z prętów klatki do rdzenia wirnika. Pręty dobrze przylegające do blach rdzenia wirnika osiągają niższą temperaturę w czasie rozruchu silnika i to jest przyczyną naprężeń rozciągających w nich występujących, prowadzących do zerwania prętów w strefie żłobkowej. Wgniecenia blach w pręty klatki są bowiem rodzajem karbu, znacznie obniżającego naprężenia dopuszczalne. Zerwanie pręta powoduje powstanie łuku elektrycznego powodującego topienie pręta (lub prętów klatki) oraz wytopienie blach

rdzenia wirnika. Topiący się metal przedostaje się do szczeliny powietrznej, powodując zatarcie na rdzeniu wirnika i stojana.



Rys. 8. Uszkodzenia uzwojenia klatkowego wirnika wewnątrz żłobków rdzenia wirnika: a) w środkowej strefie długości rdzenia, b) w skrajnej strefie rdzenia wirnika, c) wgniecenia blach rdzenia wirnika w pręt uzwojenia klatkowego

Fig. 8. Damages of rotor squirrel-cage inside rotor core islots: a) in the middle of core length, b) at the ends of rotor core, c) indentation of rotor core sheets in squirrel-cage bar

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Praca w elektromechanicznych stanach nieustalonych, a przede wszystkim długotrwały rozruch silnika, to stany, w których najczęściej mogą wystąpić uszkodzenia uzwojeń. Oddziaływanie sił elektrodynamicznych ma duży wpływ na naprężenia w prętach uzwojenia klatkowego wirnika w pierwszych okresach napięcia zasilania silnika. Naprężenia mechaniczne wywołane nierównomiernym rozkładem temperatury w uzwojeniu, tak w prętach, jak i pierścieniach zwierających, mają decydujący wpływ na naprężenia sumaryczne. Oddziaływanie sił odśrodkowych uwidacznia się pod koniec rozruchu silnika i bezpośrednio po jego zakończeniu, gdy temperatura uzwojenia jest jeszcze bardzo wysoka.
2. W wirnikach jednoklatkowych występuje w pierwszej kolejności pęknięcie lutów łączących pręty klatki z pierścieniami zwierającymi. Pęknięcia te są najczęściej zauważane w czasie okresowych przeglądów silnika i usuwane bezpośrednio w elektrowniach. Trudne do zauważenia są pęknięcia spawów punktowych, zabezpieczających kliny stosowane do usztywnień prętów klatki o przekroju trapezowym. Może wówczas dojść w czasie pracy silnika do oderwania pozapakietowej części pręta od pierścienia zwierającego i jego promieniowego odgięcia siłami odśrodkowymi, które w konsekwencji prowadzi do uszkodzenia uzwojenia stojana.
3. Pęknięcie kilku prętów klatki rozruchowej wirników dwuklatkowych powoduje podczas kolejnych rozruchów silnika lawinowe pęknięcia i wytopienia łukiem elektrycznym prętów w strefie między rdzeniem wirnika i pierścieniami zwierającymi, co w konsekwencji prowadzi do poważnej awarii wirnika i stojana.
4. Długoletnie obserwacje uszkodzeń silników po ich awarii i w czasie przeglądów okresowych wskazują, że w bardzo wielu przypadkach można zapobiec poważnej awarii silnika wywołanej uszkodzeniem uzwojenia klatkowego wirnika. Duży wpływ mają

okresowe badania stanu uzwojenia wirnika nie tylko w czasie przeglądów, ale także w czasie pracy silnika, w tym głównie w czasie jego rozruchu. Duże znaczenie ma także obsługa techniczna silnika w czasie jego eksploatacji, nie dopuszczająca do dalszej pracy silnika w przypadku zauważenia nieprawidłowości.

LITERATURA

1. Drak B.: Analiza awarii silników indukcyjnych dużej mocy. Zeszyty Problemowe. Maszyny Elektryczne, nr 54, BOBRME, Katowice 1997, s. 82-87.
2. Drak B.: Przyczyny awarii silników potrzeb własnych elektrowni blokowych i elektrociepłowni. Zeszyty Problemowe. Maszyny Elektryczne, nr 61, BOBRME KOMEL, Katowice 2000, s. 11-16.
3. Drak B., Rut R.: Naprężenia w luźnych głębokożłobkowych prętach klatek silników indukcyjnych w czasie długotrwałego rozruchu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ELEKTRYKA z. 177, Gliwice 2001, s. 49-56.
4. Drak B.: Wpływ uszkodzeń wirników klatkowych na skutki awarii silników indukcyjnych dużej mocy. Mat. XII Konferencji Energetyki, Szczyrk 2001, s. 229-240.
5. Drak B.: Statystyka uszkodzeń silników wysokonapięciowych prądu przemiennego w elektrowniach zawodowych. Zeszyty Problemowe. Maszyny Elektryczne, nr 65, BOBRME KOMEL, Katowice 2003, s. 41-46.
6. Drak B.: Ekspertyzy przyczyn awarii silników w elektrowniach i elektrociepłowniach. Prace niepublikowane, Gliwice 1994-2003.
7. Rut R.: Wpływ przyjmowania ciepła przez rdzeń wirnika na szybkość narastania temperatury w głębokożłobkowych prętach uzwojenia. Rozprawy Elektrotechniczne t. 33, z. 3-4, 1987, s.787-797.
8. Rut R.: Analiza niestabilnych stanów termicznych uzwojeń silników indukcyjnych dużej mocy w trudnych warunkach rozruchowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2001, s.180.

Recenzent: Dr hab. inż. Ryszard Rut
Profesor Politechniki Rzeszowskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 5 stycznia 2004 r.

Abstract

The paper deals with the analysis of damages in rotor squirrel-cages of high power induction motors and their influence on motor failures. Section 2 presents the factors influencing stresses and deformation of rotor squirrel-cages in transient state of motor operation: such as electrodynamic forces, stresses resulting from non-uniform temperature distribution in the rotor squirrel-cage and centrifugal forces.

Fig. 1 shows the current values in the cage bar and the electrodynamic force acting on this bar in a slot part for motor of 320 kW with the bars cage of rectangular section the temperature distribution in a bar and end ring during the motor starting is presented in Fig. 2.

The calculation results of thermal stresses in the rotor squirrel-cage with one bar of lower temperature are shown in Fig. 3, whereas Fig. 4 and Fig. 5 present the stresses and deformations of the rotor squirrel-cage under influenced of centrifugal forces and with the short-circuit ring cracked.

Section 4 presents some examples of the rotor squirrel-cage damage and their influence on the damage during the motor failure. Fig. 6 shows the damage of the rotor squirrel-cage and stator of a low-voltage motor, whereas Fig. 7 presents the damage of a deep-bar motor with a squirrel-cage of trapezoidal bars the examples of failures of damages the squirrel-cage bars inside the rotor cose slots and indetation of the squirrel-cage bar by the rotor cose sheets are shown in Fig. 8.

The analysis of the reasons for the motor failures caused by the rotor squirrel-cage damages is presented at the end of the paper.