

Maciej Bernatt, BOBRME Komel, Katowice
Ryszard Rut, Jan Mróz, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

BEZPOŚREDNI ROZRUCH ZMNIĘJSZA TRWAŁOŚĆ SILNIKÓW KLATKOWYCH DUŻEJ MOCY

DIRECT ON LINE STARTING CAN DIMINISH MOTOR'S DURABILITY

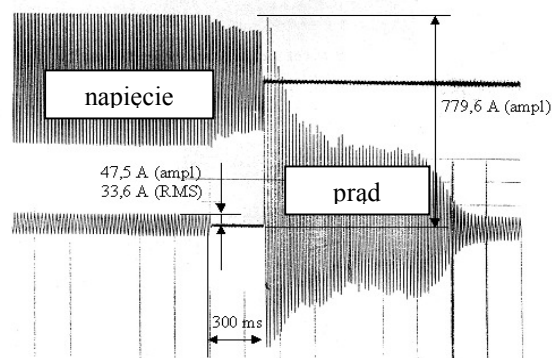
Abstract. Industrial AC cage rotor motors of nominal voltage 6000 and 10 000V are usually started by switching direct on line. Many failures of the motors is often the result of their design which do not take into account the thermal and mechanical stresses caused by initial starting current surges in stator and rotor (squirrel cage) windings, as well as electro-dynamic vibrations occurred at starting period. Proper choice and proper design of the rotor cage is of high importance for d.o.l. started induction motors of middle and high capacity. In the paper thermal and dynamic effects of starting current of d.o.l. started motors are evaluated, same examples of typical disintegrated squirrel cages showed and recommendations for motor's exploitation given.

Wstęp

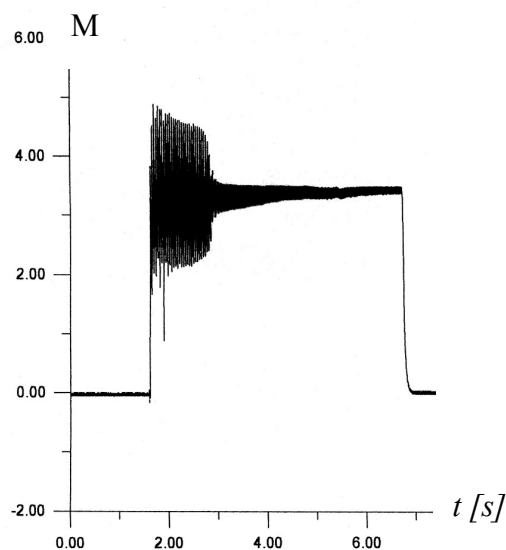
Rozruch silników klatkowych średniej i dużej mocy wysokiego napięcia (6000 oraz 10.000V), nie pracujących w układach regulacji obrotów odbywa się z reguły drogą bezpośredniego załączenia na pełne napięcie sieci. Uderzenie prądu rozruchowego niesie ze sobą efekty termiczne i elektrodynamiczne działające na strukturę silnika. Są one proporcjonalne do kwadratu natężenia prądu.

Ustalona wartość prądu rozruchowego może być w przybliżeniu pięć do siedmiu razy większa od wartości prądu znamionowego. W pierwszych chwilach rozruchu w prądzie występuje dodatkowo niesymetryczna składowa stała; w rezultacie wartości chwilowe prądu rozruchowego sięgają 10 do 16 krotności prądu znamionowego (wyrażanego w wartościach skutecznych). Jeszcze większe prądy mogą być generowane w przypadku szybkiego powtórnego załączenia silnika przy nie wygaszonym napięciu resztkowym i jego przeciwfazie w stosunku do napięcia sieci (działanie stosowanego w energetyce układu SZR).

Skutkiem przepływu prądu rozruchowego są siły elektrodynamiczne działające na uzwojenie stojana i klatkę wirnika oraz szybkie nagrzewanie się tych uzwojeń. W wirnikach klatkowych silników dużej mocy dla poprawy parametrów rozruchowych wykorzystywane jest zjawisko wypierania prądu; klatkowe uzwojenie silnika dużej mocy nagrzewa się bardzo nierównomiernie, prowadzi to do dużych naprężeń termicznych w strukturze klatki. Każdy rozruch prowadzi do zużywania się silnika.



Rys. 1. Proces powtórnego załączenia silnika klatkowego 800 kW, 6000 V, $2p=4$ (pomiar St. Prób Elektr. Opole)



Rys. 2. Oscylacje momentu silnika 800 kW, 6000 V, $2p=4$ przy załączeniu z zablokowanym wirnikiem (pomiar Stacja Prób Elektrownia Opole)

W pierwszych chwilach rozruchu występują silne oscylacje momentu obrotowego silnika, które mogą być niebezpieczne, jeśli nakładają się na zjawiska rezonansowe w wirniku. Ponadto podczas rozruchu w wirnikach klatkowych wykonanych techniką prętowania występuje iskrzenie między prętami klatki a pakietem blach; związana jest z tym zjawiskiem erozja elektroiskrowa prętów oraz blach.

Szacuje się, że przeciętny, prawidłowo zaprojektowany i poprawnie wykonany silnik klatkowy mocy od kilkuset do kilku tysięcy kW znieść może około 5000 rozruchów rozłożonych w odpowiednich odstępach czasowych. Jednak każdy pojedynczy rozruch zmniejsza zasób pracy (resurs) silnika, a rozruchy zbyt często po sobie następujące, lub trwające zbyt długo - prowadzą wprost do awarii.

Uzwojenie stojana

Uzwojenie stojana podczas rozruchu nagrzewa się znacznie szybciej niż przy pracy znamionowej. Proces nagrzewania uzwojenia w trakcie rozruchu można traktować jako adiabatyczny. Prędkość v narastania temperatury uzwojenia miedzianego (deg/sek) dla procesu adiabatycznego określa zależność:

$$v = j^2 / 150$$

gdzie: j - gęstość prądu w uzwojeniu stojana, (A/mm²).

Szacować można iż uzwojenie stojana silnika o mocy rzędu kilkaset kW po 30 sekundach rozruchu osiągnie przyrost temperatury:

ok. 50-60 deg dla silnika budowy zamkniętej – IP54

ok. 90-110 deg dla silnika budowy przewietrzanej – IP23

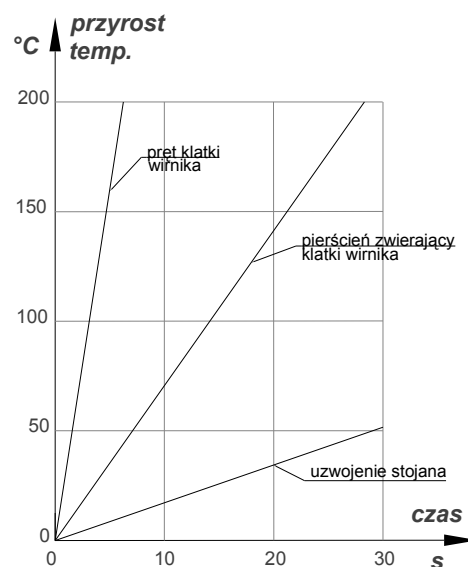
(W silnikach przewietrzanych, stopień ochrony IP23, stosuje się większe gęstości prądu w uzwojeniach niż w silnikach zamkniętych, IP54).

Osiągane w wyniku jednego rozruchu temperatury nie są szkodliwe dla współczesnych materiałów izolacyjnych klasy B i F (patrz tabela niżej), powodują jednak wydłużanie żłobkowych części cewek uzwojenia w stosunku do pakietu blach, co skutkuje powstawaniem dużych naprężeń stycznych działających na izolację między pakietem a przewodami cewek. Zastosowanie odpowiednich materiałów i technologii impregnacji uzwojenia ma zasadnicze znaczenie dla trwałości silników poddawanych częstym rozruchom.

Tab.1. Dopuszczalne temperatury pracy współczesnych materiałów izolacyjnych [°C]

Klasa izolacji	Trwałe obciążenie, praca ciągła	Przeciążenia krótkotrwałe powtarzalne	Przeciążenia krótkotrwałe, sporadyczne wg [5]
B	120	150	180
F	140	170	190

Dylatacje cieplne w trakcie rozruchu występują również w czołowych fragmentach uzwojenia stojana, tu jednak głównym zagrożeniem dla konstrukcji silnika są naprężenia od sił elektrodynamicznych działających na boki cewek, a także na przewody łączące poszczególne grupy cewek i przewody wyprowadzające. Efektem tych sił są drgania cewek, przewodów wyprowadzeń oraz drgania i ugięcia całego wieńca czoł. Występują tu również zjawiska rezonansu. Współczesne silniki indukcyjne wysokiego napięcia mają uzwojenie stojana wykonane tzw. techniką VPI. Układ izolacji jest trwały i bardzo odporny na wiele zagrożeń, a samo uzwojenie ma dużą wytrzymałość na siły i udary mechaniczne. Niemniej również w silnikach wykonanych techniką VPI właściwe mocowanie poszczególnych cewek, odpowiednie rozłożenie podpór, mocowanie wieńca czoł oraz mocowanie przewodów wyprowadzających ma duże znaczenie dla odporności silnika na dynamiczne działania prądu rozruchowego.

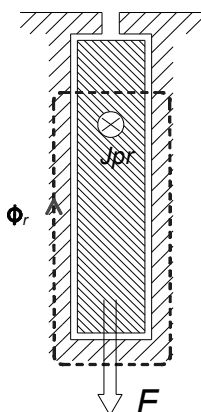


Rys. 3. Narastanie temperatury uzwojenia stojana i fragmentów klatki wirnika silnika 800 kW, $2p=4$ przy blokadzie wirnika ($s=1$)

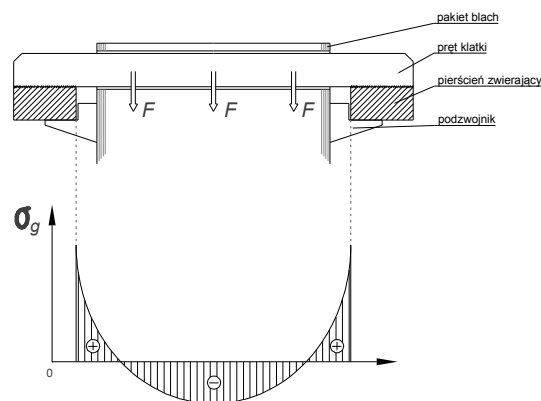
Klatka wirnika

Procesy cieplne i dynamiczne występujące w trakcie rozruchu silnika są głównymi czynnikami powodującymi zużycie i niszczenie uzwojeń klatkowych wirnika. W trakcie rozruchu uzwojenie klatkowe nagrzewa się gwałtownie. Zgodnie z zasadą zachowania energii, cała energia kinetyczna, którą w efekcie rozruchu osiągnie wirujący układ mechaniczny: silnik – urządzenie napędowe, wydzielić się musi w uzwojeniu klatkowym wirnika w postaci ciepła. W uzwojeniach klatkowych silników średniej i dużej mocy w celu poprawy ich parametrów rozruchowych wykorzystuje się z reguły zjawisko wypierania prądu. Powoduje ono rozłożenie gęstości prądu pręta na jego wysokości i nierównomierne nagrzewanie się uzwojeń klatkowych podczas rozruchu. Stromość narastania temperatury prętów i pierścieni zwierających może osiągać znaczne i zróżnicowane wartości i może powodować wystąpienie naprężeń niszczących w pakietowej oraz poza pakietowej części uzwojenia. Łącznie, niszczące działania w uzwojeniach klatkowych są wypadkową składowych generowanych przez:

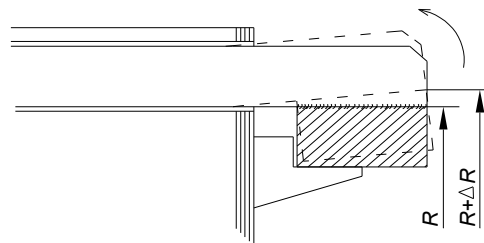
- żłobkowe siły elektrodynamiczne (Rys. 4 i 5),
- naprężenia termiczne, zwłaszcza w prętach wirników głębokożłobkowych,
- rozszerzalność cieplną pierścieni zwierających (Rys. 6),
- zjawiska rezonansowe,
- siły bezwładnościowe odśrodkowe i obwodowe.



Rys. 4. Siła elektrodynamiczna F jako efekt współdziałania prądu J_{pr} płynącego w pręcie oraz magnetycznego strumienia Φ_r rozproszenia żłobkowego wirnika



Rys. 5. Siła elektrodynamiczna F i wywołanie nią naprężenia zginające σ_g w prętach – rozkład na długości pręta (maksimum naprężeń w miejscu połączenia pręta z pierścieniem)



Rys. 6. Odształcenie pozapakietowej części klatki od rozszerzalności cieplnej pierścienia zwierającego

Cztery pierwsze wymienione zjawiska osiągać mogą niebezpieczny poziom właśnie podczas rozruchu.

Naprężenia występujące w klatce podczas rozruchu są bardzo trudne do obliczenia ze względu na skomplikowaną geometrię, zmienną temperaturę klatki, a więc i zmienność właściwości sprężystych oraz odkształcenia plastyczne materiału. Koniecznym jest przyjmowanie dużych uproszczeń w stosunku do rzeczywistego stanu klatki. Instytut Komel dysponuje metodami i programami obliczeń klatek opartymi m.in. na wynikach przyśpieszonych badań trwałościowych prowadzonych na silnikach modelowych. (badania takie w latach 90-tych prowadził Instytut Komel wspólnie z Politechniką Rzeszowską, wyniki zostały wykorzystane przy projektowaniu serii silników klatkowych mocy 200–2000 kW).

Naciąg magnetyczny

Działające między stojanem a wirnikiem promieniowe siły naciągu magnetycznego nie są zbyt wielkie w silnikach klatkowych w stanie pracy ustalonej. Jednak podczas rozruchu siły te

są wielokrotnie większe. W eksploatacji silników klatkowych znane są przypadki przejściowego zacierania wirnika o stojan właśnie tylko podczas rozruchu. Ślady takich zatarć można zauważyć na pakietach blach po demontażu silników, można je również usłyszeć jako charakterystyczny metaliczny stuk podczas rozruchu [3]. Zjawisko generacji tych sił nie jest dostatecznie wyjaśnione. Siły te muszą jednak być duże, skoro powodują sprężyste ugięcia wału i tarcz łożyskowych doprowadzające do uderzenia wirnika o stojan. Przy takich uderzeniach cierpią łożyska silnika, tak więc rozruchy prowadzić mogą również do przyspieszonego zużycia łożysk.

Przebiegi łączeniowe

Podczas każdego bezpośredniego załączenia silnika na sieć, i podczas każdego jego wyłączenia, generowane są przebiegi łączeniowe. Przebiegi mogą osiągać szczególnie duży poziom w przypadku pracy w układach SZR. Przebiegi łączeniowe stanowią zagrożenie - szczególnie dla izolacji zwojowej uzwojenia stojana.

Podsumowanie, wnioski

1. Rozruch realizowany drogą bezpośredniego załączenia na pełne napięcie sieci jest okresem największych narażeń silnika klatkowego podczas całej jego eksploatacji. Każdy rozruch powoduje zmniejszenie zasobu pracy (resursu) silnika. Zbyt długi, lub zbyt często powtarzany rozruch prowadzić może do uszkodzeń lub awarii. Uszkodzenia wywołane rozruchami zaczynają się zwykle w klatce wirnika, mają formę zarysowań, pęknięć lub przelamań prętów klatki, czasem także jej pierścieni zwierających. Przy długotrwałych lub zbyt często powtarzanych rozruchach w klatce mogą wystąpić wytopienia (Rys.7). Niewielkie uszkodzenia klatki, jak np. pęknięcie pojedynczego pręta (Rys. 8) nie obniżają momentu rozruchowego silnika, nie wpływają na czas trwania rozruchu [2] i dlatego mogą być niezauważalne dla obsługi. Uszkodzenie klatki wywołuje jednak zawsze asymetrię obwodu elektromagnetycznego silnika, pogarsza jego parametry (współczynnik sprawności, poślizg, przyrost temperatury stojana. Raz zaistniałe uszkodzenia klatki powiększają się przy każdym rozruchu; ostatecznie prowadzą do awarii i konieczności wyłączenia silnika.

W przypadku silników dużej mocy wysokiego napięcia racjonalnym postępowaniem w eksploatacji jest rejestrowanie ilości przebytych rozruchów oraz cykliczne (np. co 500 lub 1000 rozruchów) wykonywanie pomiarów diagnostycznych. Szczególnie zalecać należy diagnozowanie stanu klatki (klatek) wirnika oraz stanu układu izolacyjnego uzwojenia stojana. Dla układu izolacyjnego stojana zaleca się metodę badania prądem stałym [4], która pozwala dobrze prognozować dalszą trwałość układu izolacji. Metody diagnozowania stanu klatek i układu izolacji stojana zostały pozytywnie zweryfikowane w praktyce przemysłowej i stosowane są z dobrymi wynikami od szeregu lat również w Instytucie Komel.

Systematyczne diagnozowanie stanu klatki wirnika oraz stanu izolacji stojana pozwala eliminować niespodziewane (a zwykle bardzo kosztowne) awarie.

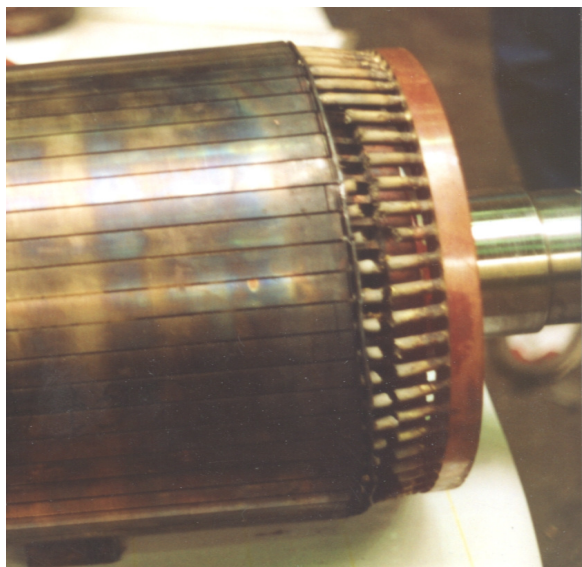
2. Standardowe silniki klatkowe średniej i dużej mocy znoszą zwykle nie więcej niż 5000 rozruchów. Silniki od których wymaga się większej ilości rozruchów lub wymaga się rozruchów długotrwałych (czas rozruchu powyżej 30 sekund) powinny być projektowane specjalnie dla określonych warunków rozruchowych i eksploatacyjnych. W Instytucie Komel opracowano (wykorzystując m.in. prace Politechniki Rzeszowskiej i Politechniki Śląskiej) odpowiednie metody obliczeniowe i wg nich zaprojektowano już wiele silników, które doskonale zdały egzamin eksploatacyjny w trudnych warunkach rozruchowych przy załączaniu na pełne napięcie sieci. Jeden z nich, o mocy 2000 kW odbył 70.000 rozruchów trwających po kilkanaście sekund (wirnik silnika po tym okresie musiał być odstawiony do remontu z przyczyny zaawansowanej elektroerozji klatki).

Literatura

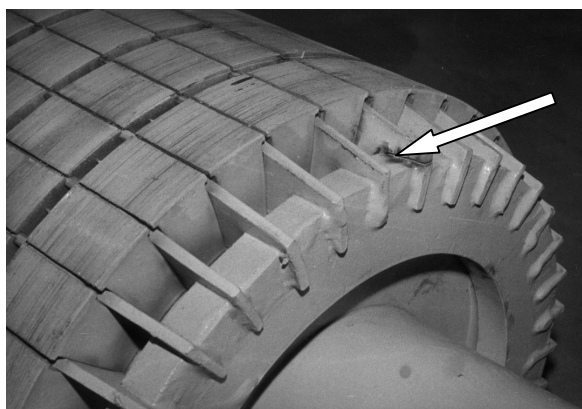
- [1]. Bernatt M., Rut R. i in. Naprężenia w prętach klatki wirnika w czasie rozruchu silnika indukcyjnego. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne KOMEL, Nr 16/1972.
- [2]. Bernatt M., Rut R., Mróz J. O uszkodzeniach klatek wirnika. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, KOMEL, Nr 78/2008 str. 1-6.
- [3]. Glinka T i in. Badanie sił naciągu magnetycznego w silnikach indukcyjnych. Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej nr 1190 / Elektrotechnika z. 12, str. 229-245 Kraków, 1988.
- [4]. Glinka T. – Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. Monografia, wyd. KOMEL, 1998.

[5]. Jokiniemi M. D.o.l. starting can cause problems. Electrical Times, October 10 1980.

[6]. Rut R. Analiza nieustalonych stanów termicznych uzwojeń silników indukcyjnych dużej mocy w trudnych warunkach rozruchowych. Monografia, Politechnika Rzeszowska, 2001.



Rys. 7. Zniszczona klatka rozruchowa silnika dwuklatkowego, 300 kW, $2p=4$ - termiczny efekt przepływu prądu rozruchowego



Rys. 8. Pęknięty pręt klatki silnika 500 kW, $2p=4$. Efekt działania żłobkowej siły elektrodynamicznej w trakcie rozruchu