

Włodzimierz Koczara, Zbigniew Szulc, Jerzy Przybylski  
Politechnika Warszawska, Warszawa

## ROZRUCH SILNIKA INDUKCYJNEGO KLATKOWEGO NAPĘDZAJĄCEGO POMPE DUŻEJ MOCY W TRUDNYCH WARUNKACH EKSPLOATACYJNYCH

### START OF THE CAGE INDUCTION MOTOR IN RUGGED CONDITIONS

**Abstract:** High power induction motors produce high starting currents and high voltage drops on the supply system. Especially difficult problems are when high inertia load is driven by the motors and when the short circuit power of the supply system is low. Then the starting time is very long and sometimes not possible. Application of the power electronic converter significantly reduces starting current which is fully controllable according references. Paper presents results of calculations of the starting processes for directly connected motor and a case of the power electronic converter.

#### 1. Wstęp

Silniki indukcyjne klatkowe posiadają szereg znanych zalet eksploatacyjnych, które przyczyniają się do częstego ich stosowania. Pewną niedogodnością są zjawiska elektromechaniczne występujące podczas rozruchu tego typu silnika w warunkach szczególnie trudnych. W niniejszym artykule rozpatrzone będą dwa takie przypadki dotyczące napędu pomp wirujących. Pierwszy, dotyczy rozruchu silnika napędzającego pompę pracującą w procesie technologicznym zakładu przemysłu chemicznego.

Ze względu na dynamikę i niezawodność procesu technologicznego pompy pracują tylko z kłapami zwrotnymi bez zasuw. Rozruch takiej pompy wymaga od silnika napędowego dostarczenia energii na rozpędzenie masy czynnika tłocznego, znajdującego się w rurociągu, do takiej prędkości, aby uzyskać wymaganą wydajność (natężenie przepływu) w określonym czasie.

Przy dużej ilości czynnika (długi rurociąg) moment bezwładności sprowadzony do wału silnika może mieć dużą wartość. Czas rozruchu osiąga duże wartości niedopuszczalne ze względów technologicznych i grożący przegrzaniem silnika.

Drugi przypadek dotyczy pompy wody zasilającej w elektrociepłowni. W przypadku black-out (awarii systemowej) elektrociepłowni, jej źródłem zasilania w energię elektryczną jest inna elektrociepłownia, w której pracują generatory (w niewielkiej liczbie) często o małej mocy (kilkadziesiąt MVA). Największym odbiornikiem elektrycznym w przywracanej do eksploatacji elektrociepłowni po black-out-cie

jest silnik napędowy pompy wody zasilającej (kilka MW). Dokonanie jego rozruchu przy zasilaniu z tych generatorów odległych o setki kilometrów, najczęściej poprzez linię WN powoduje utrudnienie, gdyż moc zwarciowa w punkcie przyłączenia silnika jest mała (kilkadziesiąt MVA). Duży prąd rozruchowy (5 do 6 razy większy od wartości znamionowej) silnika powoduje spadek napięcia rzędu 30% - 40 % co grozi jego utknięciem.

Współczesna technika napędu elektrycznego umożliwi poprawę warunków rozruchu w powyższych przypadkach. Do tego celu najlepiej zastosować przemienniki częstotliwości (PC) wykorzystane tylko do rozruchu lub też do regulacji prędkości obrotowej maszyny roboczej jeżeli istnieje taka potrzeba. W artykule zaprezentowano takie rozwiązania opisanych przypadków.

#### 2. Opis zjawisk rozruchowych

W przypadku rozruchu pompy w zakładzie chemicznym, kiedy pracuje ona bez zasuw, silnik musi dostarczyć w zależności od prędkości obrotowej energię ( $E_m$ ) mechaniczną wynoszącą [1]:

$$E_m = E_l + \frac{mv^2}{2} + J \frac{\Omega^2}{2} \quad (1)$$

przy czym:

$E_l$  – energia potrzebna do wytworzenia ciśnienia i wydajności o wartościach wymaganych przez proces technologiczny

$m$  – masa czynnika w rurociągu

$v$  – prędkość liniowa czynnika w rurociągu,

$J$  – moment bezwładności wirnika silnika pompy i sprzęgła,  
 $\Omega$  – prędkość kątowna silnika (i pompy)

Uwzględniając, że moc na wale pompy ( $P_w$ ) wynosi:

$$P_w = \frac{dE_m}{dt} \quad (2)$$

oraz moment na wale:

$$M = \frac{P_w}{\Omega} \quad (3)$$

uzyskuje się podstawowe równanie ruchu obrotowego wirnika silnika:

$$M_s = M_l + (J_v + J) \frac{d\Omega}{dt} \quad (4)$$

przy czym:

$M_s$  – moment rozwijany przez silnik

$M_l$  – moment oporowy pompy

$$J_v = \frac{\rho l}{S} * \left( \frac{Q_N}{\Omega_N} \right)^2 \quad (5)$$

Moment bezwładności ( $J_v$ ) związany z masą czynnika w rurociągu obliczyć można znając wartości:

$\rho$  – masa właściwa czynnika tłoczonego,

$l$  – długość rurociągu,

$S$  – pole przekroju rurociągu,

$Q_N$  – wydajność znamionowa pompy,

$\Omega_N$  – prędkość kątowna znamionowa pompy.

Znając równanie na moment silnika ( $M_s$ ) w zależności od wielkości elektrycznych ( $u$ ,  $i$ ,  $f$ ) i jego parametrów ( $R$ ,  $L$ ) można rozwiązać (4) otrzymując zależność prędkości obrotowej  $\Omega$  od czasu. W rzeczywistości występują dodatkowe zjawiska związane z uderzeniami hydraulicznymi spowodowanymi włączeniem zespołu pompowego [2]. Pominięcie ich w rozpatrywanym przypadku upraszcza zjawisko rozruchu. Im krótszy rurociąg tym wpływ uderzeń hydraulicznych jest mniejszy.

Do tego celu w artykule niniejszym zastosowano język symulacyjny PSIM 6.0. W rozpatrywanym przypadku parametry pompy rurociągu i tłoczonego czynnika wynosiły:

$$Q_N = 0,655 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Omega_N = 100 \text{ 1/s}$$

$$l = 1700 \text{ m}$$

$$\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$$

Podstawowe parametry znamionowe silnika:

$$P_N = 200 \text{ kW}$$

$$U_{SN} = 6000 \text{ V}$$

$$n_N = 989 \text{ obr/min}$$

$$I_{SN} = 24,7 \text{ A}$$

$$\eta_N = 94 \%$$

$$\cos\phi_N = 0,83$$

$$I_r/I_{SN} = 5,5$$

$$M_r/M_{SN} = 1,1$$

$$P_M = M_{\max}/M_{SN} = 2,5$$

$$J_S = 7,8 \text{ kgm}^2$$

Na podstawie powyższych parametrów obliczono:

$$J_v = 328,3 \text{ kgm}^2$$

Uwzględniając moment bezwładności pompy i sprzęgła przyjęto:

$$J = 11,4 \text{ kgm}^2$$

W drugim przypadku, napędu pompy wody zasilającej w elektrociepłowni, rozruch następuje przy zamkniętych zasuwach [3]. Moment obciążenia zmienia się w funkcji prędkości kątownej według zależności:

$$M_l \sim \Omega^2 \quad (6)$$

przy czym osiąga wartość ok. połowy momentu znamionowego silnika przy prędkości znamionowej. Podstawowe parametry silnika:

$$P_N = 4000 \text{ kW}$$

$$U_{SN} = 6 \text{ kV}$$

$$I_{SN} = 444 \text{ A}$$

$$n_N = 2975 \text{ obr/min}$$

$$\eta_N = 95,9 \%$$

$$\cos\phi_N = 0,9$$

$$I_r/I_{SN} = 5,5$$

$$M_r/M_{SN} = 1,0$$

$$M_{\max}/M_{SN} = 2,1$$

$$J_S = 180 \text{ kgm}^2$$

Moment bezwładności sprzęgła i pompy przyjęto wartość  $12 \text{ kgm}^2$ .

Moc zwarciowa ( $S_z$ ) w punkcie zasilającym silnik przy jego rozruchu w warunkach black-out-u elektrociepłowni wynosi:

$$S_z = 41 \text{ MVA}$$

W związku z tym reaktancja zwarcia wynosi:

$$X_z = \frac{U_s^2}{S_z} \quad (7)$$

Napięcie ( $U_s$ ) przed rozruchem silnika wynosiło:

$$U_S = 6,6 \text{ kV}$$

stąd:

$$X_Z = \frac{(6600)^2}{41 \cdot 10^6} = 1,06 \Omega$$

Powyższe parametry silnika i sieci zasilającej zostaną wykorzystane do obliczeń komputerowych charakterystyk rozruchowych, przy pomocy języka symulacyjnego PSIM 6.0.

Rozpatrując przypadek pompy pracującej w zakładzie chemicznym tłoczącej ciecz w długim rurociągu gdzie zastosowano silnik o mocy 200 kW okazuje się, że ta moc jest wystarczająca w stanie ustalonym pracy. Producent silnika podaje [4], że dopuszczalny zewnętrzny moment bezwładności przy kwadratowej charakterystyce obciążenia (jak dla pompy) nie może przekroczyć wartości ( $J_{zmax}$ ):

$$J_{zmax} = 290 \text{ kgm}^2$$

Ponieważ dla rozpatrywanej pompy i rurociągu zachodzi zależność:

$$\begin{aligned} J_V + J &= 372,1 + 11,4 \\ J_V + J &= 383,5 \text{ kgm}^2 \\ J_V + J &> J_{zmax} \end{aligned} \quad (8)$$

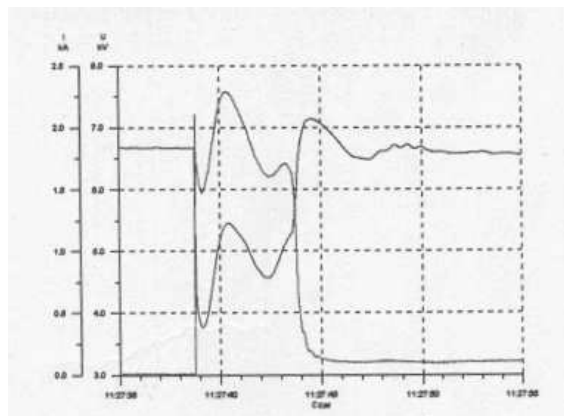
należy dobrać większy silnik.

Na podstawie [4] dopiero dla mocy silnika

$$\begin{aligned} P_N &= 315 \text{ kW} \\ J_{zmax} &= 440 \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

a więc właśnie taki silnik należałoby zastosować.

W przypadku drugim kiedy rozruch silnika napędowego pompy wody zasilającej dokonuje się przez zasilanie z sieci energetycznej o małej mocy zwarciowej, przebiegi wartości skutecznej prądu stojana i napięcia na jego zaciskach zostały przedstawione na rys. 1. Maksymalna wartość prądu w czasie rozruchu osiągnęła wartość 2300 A ( $5,2 I_{SN}$ ) a napięcie spadło do wartości 3,8 kV (przy początkowej wartości przed rozruchem – 6,6 kV). Przy tak niskim napięciu groziło to utykaniem silnika. Sieć zasilająca silnik posiadała dwa źródła zasilania w postaci generatorów 25 MVA i 6,5 MVA. Tylko dzięki zadziałaniu regulatorów napięcia tych generatorów rozruch silnika powiódł się.



Rys. 1. Przebieg wartości skutecznych prądu i napięcia stojana silnika 4000 kW napędzającego pompę wody zasilającej podczas rozruchu [3]

### 3. Zastosowanie pc do rozruchu

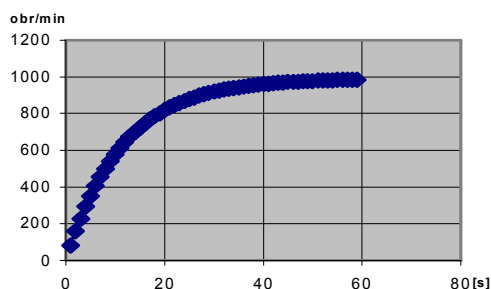
Przedstawione powyżej przykłady wskazują na konieczność: przewymiarowania silnika o ponad 50 % mocy znamionowej w pierwszym przypadku lub zwiększenia mocy znamionowej generatorów w drugim. W przeciwnym wypadku groziło to zadziałaniem zabezpieczeń termicznych silnika (wystąpiło takie zjawisko podczas eksploatacji podobnego rurociągu i pompy) lub zadziałaniem zabezpieczeń prądowo-czasowych w razie utyku silnika pompy wody zasilającej.

Nowoczesna technika układów napędowych umożliwia zastosowanie do rozruchu przemienników częstotliwości, które przy pomocy sterowania wektorowego (typu FOC lub DTC) pozwalają znacznie poprawić proces rozruchu.

Dla przypadku pierwszego można zastosować silnik klatkowy niskonapięciowy (np. o napięciu znamionowym 660 V) i mocy 200 kW zasilany z przemiennika częstotliwości o parametrach znamionowych dobranych do mocy znamionowej silnika. Dla silnika o tej mocy i napięcia należałoby zastosować PC o prądzie wyjściowym typowym 225 A (rozwiązanie jednej ze znanych w krajowym przemyśle firm). Rozwiązanie przemysłowe tego PC umożliwia sterowanie wektorowe prądem stojana. Innym rozwiązaniem może być metoda przedstawiona w [5]. Ta metoda pozwala po rozruchu przełączyć silnik z zasilania z PC na zasilanie z sieci w sposób synchroniczny.

Zakładając, że metoda wektorowa pozwoli wymusić stały moment silnika, równy co do wartości znamionowemu (co udowodniono w [6]) przy prądzie stojana równym  $I_{SN}$  otrzymuje

się przebieg prędkości obrotowej podczas rozruchu, który został przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Przebieg prędkości obrotowej silnika o mocy 200 kW podczas rozruchu przy pomocy PC sterowanego metodą wektorową. Silnik napędza pompę z długim rurociągiem.

Ograniczona wartość prądu stojana do znamionowej nie przegrzewa silnika pomimo długiego czasu rozruchu.

Podobne rozwiązanie można zastosować do rozruchu silnika o mocy 4000 kW w opisanych wyżej warunkach.

W tym wypadku nie jest możliwa wymiana silnika na niskonapięciowy. Jako PC trzeba zastosować jedno z urządzeń przedstawionych w [5]. PC średniego napięcia sterowany metodą wektorową może wymusić moment silnika też równy znamionowej wartości (lub mniejszej przy możliwym dłuższym czasie rozruchu). Przy prądzie równym wartości znamionowej silnika ( $I_{SN} = 444$  A) spadek napięcia w sieci wynosi: (w warunkach opisanych powyżej)

$$\Delta U = \sqrt{3} * X_Z * I_{SN}$$

$$\Delta U = \sqrt{3} * 1,06 * 444 = 814 \text{ V}$$

co odpowiada procentowej wartości

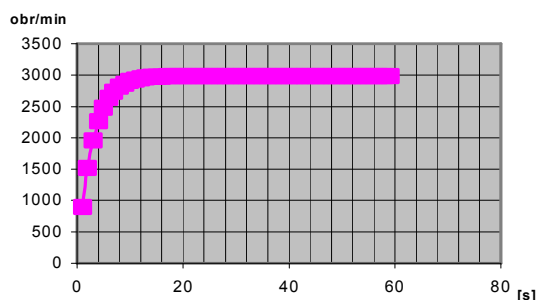
$$\Delta U[\%] = \frac{814}{6600} * 100 \% = 12,3 \%$$

Przy bezpośrednim rozruchu:

$$\Delta U[\%] = \frac{6600 - 3800}{6000} * 100 \% = 33,3 \%$$

W praktyce, szczególnie w tym drugim przykładzie, kiedy możliwe jest wydłużenie czasu rozruchu, można zmniejszyć wartość prądu rozruchowego poniżej wartości znamionowej.

Zmniejszeniu ulegnie wówczas spadek napięcia co może mieć istotne znaczenie.



Rys. 3. Przebieg prędkości obrotowej silnika o mocy 4000 kW napędzającego pompę wody zasilającej i sterowanego wektorowo podczas rozruchu.

W tym przypadku moc PC-SN można dobrać tylko dla warunków rozruchu i wyniesie ona około 2500 kW. Pompy wody zasilającej pracują przy takich mocach z uwzględnieniem regulacji prędkości obrotowej przez sprzęgło hydrokinetyczne. Zastosowanie PC-SN dobrane na pełną moc silnika pozwala wyeliminować sprzęgło hydrokinetyczne i zwiększyć sprawność procesu regulacji prędkości obrotowej.

#### 4. Wnioski

Rozpatrzone w referacie dwa przypadki ekstremalnych warunków rozruchu silników indukcyjnych średniej i dużej mocy, z zastosowaniem przemienników częstotliwości pozwalają wyciągnąć następujące wnioski:

- duży moment bezwładności na wale silnika nie musi być powodem do przewymiarowywania silnika gdyż można zastosować PC sterowany metodą wektorową co zmniejsza wartość prądu rozruchowego przy stałym momencie silnika,
- mała moc zwarciova sieci zasilającej również nie stanowi przeszkody do rozruchu dużego silnika po zastosowaniu PC sterowanego metodą wektorową,
- moc PC można dobrać tylko do rozruchu (może być do 50 % mniejsza od mocy silnika) lub do rozruchu i regulacji prędkości obrotowej (równa mocy znamionowej silnika)
- najnowsze układy półprzewodnikowe mocy umożliwiają stosowanie PC praktycznie do każdej wartości mocy silnika (20 MW) i napięcia do 6,6 kV.

#### 5. Literatura

- [1]. Jackowski K., Jankowski Z., Jędral W.: Układy pompowe. WPW, Warszawa 1992
- [2]. Skiba J: Obliczanie przebiegu uderzenia hydraulicznego spowodowanego włączeniem zespołów

pompowych. XI Krajowa Konferencja NT – Zagadnienia zaopatrzenia w wodę miast i wsi, Poznań 1988

[3]. Jędroszczyk J., Murzyński A., Rzeczkowski E.: Elektrociepłownia Ostrołęka jako źródło napięcia i mocy rozruchowej dla Elektrociepłowni Siekierki w wypadku awarii katastrofalnej. ENERGETYKA 2004, Nr 2

[4]. High Voltage Squirrel Cage Motors – Produkt Catalogue CANTON, MOTOR-EMIT-2002

[5]. Grzeczkwicz M., Koczara W., Szulc Z.: Rozruch silnika indukcyjnego zasilanego z falownika średniego napięcia z uwzględnieniem synchronicznego przełączenia na sieć. Konferencja PEMINE – Komel, Ustroń 2005-03-15

[6]. Koczara W., Szulc Z.: Zastosowanie przekształtników energoelektronicznych do rozruchu silników indukcyjnych dużej mocy. SENE 2003, Łódź.

### **Autorzy**

Włodzimierz Koczara, Zbigniew Szulc, Jerzy Przybylski

Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej  
Politechniki Warszawskiej

Zakład Napędu Elektrycznego

[koczara@isep.pw.edu.pl](mailto:koczara@isep.pw.edu.pl)

[szulcz@isep.pw.edu.pl](mailto:szulcz@isep.pw.edu.pl)

[jprzybyl@isep.pw.edu.pl](mailto:jprzybyl@isep.pw.edu.pl)