

Piotr Kuzera, Jacek Przybyłka
DFME "DAMEL" S.A., Dąbrowa Górnicza

WYBRANE ROZWIĄZANIA OGRANICZANIA PRĄDÓW ROZRUCHOWYCH NA PRZYKŁADZIE SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH PRODUKCJI DFME DAMEL

SELECTED SOLUTIONS FOR LIMITING START CURRENTS ON THE EXAMPLE OF DFME DAMEL ELECTRIC MOTORS

Streszczenie: W artykule przedstawiono różne sposoby ograniczania prądów rozruchowych w silnikach indukcyjnych klatkowych. Wszystkie sposoby omówione zostały na przykładzie silników produkowanych przez DFME DAMEL S.A. Przedstawiono i porównano kilka podstawowych i powszechnie stosowanych sposobów rozruchu silników klatkowych wraz z ich zaletami i wadami, począwszy od najprostszego rozruchu bezpośredniego, a skończywszy na najbardziej zaawansowanym technologicznie – sterowaniu wektorowym z przemiennika częstotliwości.

Abstract: Article presents various methods of limiting of start-up currents in induction squirrel-cage motors. All methods were discussed on the example of motors produced by DFME DAMEL S.A. Several basic and commonly used methods of start-up of squirrel-cage motors along with their advantages and disadvantages were presented and compared, starting from the simplest direct start-up and concluding with the most technologically advanced – vector control from frequency converter.

Słowa kluczowe: silnik elektryczny, prąd rozruchowy, ograniczanie prądów rozruchowych
Keywords: electric motor, start current, limiting start currents

1. Wstęp

Silniki indukcyjne klatkowe, ze względu na stosunkowo prostą budowę, relatywnie niską cenę oraz dużą niezawodność, są powszechnie stosowane w górnictwie do napędów wszelkiego rodzaju urządzeń. Aby coraz skuteczniej wydobywać i transportować urobek dąży się do zwiększania mocy napędów. Im większy silnik tym sposób jego rozruchu jest trudniejszy, a jego wpływ na sieć zasilającą jest bardziej niekorzystny. Prądy rozruchowe w silnikach klatkowych są duże ($I_R = 6\div 9 \times I_N$), powoduje to dodatkowy spadek napięcia, który musi być uwzględniony na etapie projektowania całej instalacji elektrycznej. Udarowi prądu silnika towarzyszy również udar momentu, wywołujący niekorzystne stany mechaniczne narażające napędzane urządzenie na uszkodzenie. Z tego też powodu dąży się do ograniczenia prądów rozruchowych oraz ograniczenia momentu rozruchowego do poziomu wymaganego w danym napędzie.

W artykule omówiono i porównano kilka podstawowych i powszechnie stosowanych sposobów rozruchu silników wraz z ich zaletami i wadami. Wszystkie sposoby omówiono na przykładzie silników produkowanych przez DFME DAMEL S.A., która w swojej ofercie

ma do zaproponowania szereg rozwiązań obniżających krotność prądu rozruchowego. Niektóre z tych rozwiązań umożliwiają również dowolne nastawianie prądu i momentu uzyskiwanego w czasie rozruchu. Wszystkie opisane silniki przystosowane są do pracy w podziemnych częściach kopalń, w których występują zagrożenia wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Posiadają budowę przeciwwybuchową z osłoną ognioszczelną i zaliczone są do urządzeń grupy I kategorii M2 zgodnie z dyrektywą 2014/34/UE. Silniki zintegrowane z przemiennikiem częstotliwości posiadają dodatkowo wyjścia iskrobezpieczne lub światłowodowe obwodów sterowania.

Większość metod rozruchu silników asynchronicznych klatkowych ze względu na brak możliwości ingerencji w uzwojenie wirnika oparta jest na obniżaniu napięcia zasilania, co zgodnie ze wzorem (1.1), niekorzystnie wpływa na moment osiągniany przez silnik elektryczny.

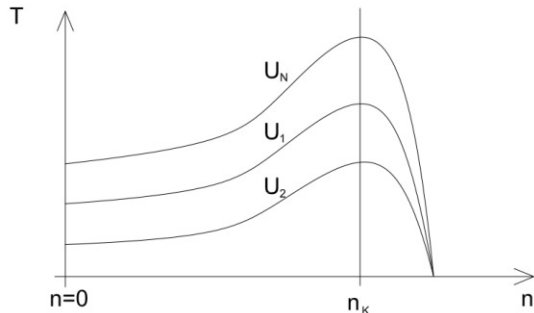
$$T = \frac{m_s R_r U_s^2}{2\pi n_s [s(X_s + X_r) + \frac{R_r^2}{s}]} \quad (1.1)$$

Przy określonym poślizgu ($s = \text{const}$) powyższy wzór można uprościć i zapisać następująco:

$$T = c \times U_2^2 \quad (1.2)$$

c – wielkość stała dla danej maszyny.

Graficznie powyższą zależność można przedstawić następująco, gdzie $U_N > U_1 > U_2$.



Rys. 1. Charakterystyka mechaniczna silnika dla różnych wartości napięcia zasilającego

2. Sposoby rozruchu silników asynchronicznych

Rozruchem nazywamy stan pracy od chwili załączenia napięcia do osiągnięcia prędkości około znamionowej. Przy omawianiu rozruchu istotne są takie parametry jak wartość prądu pobieranego z sieci w czasie rozruchu, czyli prąd rozruchowy I_R oraz wartość momentu rozwijanego przez silnik w czasie rozruchu, czyli moment rozruchowy T_R . W praktyce częściej operuje się na krotnościach prądu i momentu rozruchowego, czyli wartościach odniesionych do prądu i momentu znamionowego danego silnika.

W czasie załączenia silnika bezpośrednio na sieć zasilającą prąd rozruchowy odpowiada prądowi zwarcia zgodnie z zależnością (2.1).

$$I_R = \frac{U_f}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2.1)$$

Natomiast prąd znamionowy określa wzór (2.2).

$$I_N = \frac{U_f}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_N}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2.2)$$

Z porównania powyższych wzorów wynika, że prąd silnika klatkowego podczas rozruchu jest kilkakrotnie większy od prądu znamionowego, krotność ta w zależności od silnika wynosi od 6 do 9 wartości prądu znamionowego, co można zapisać następująco (2.3).

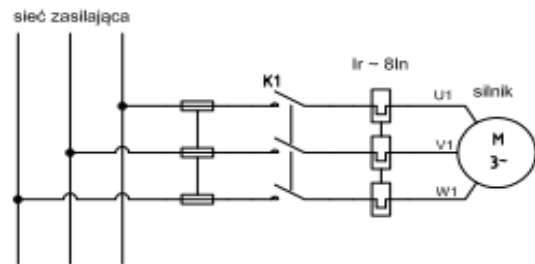
$$\frac{I_R}{I_N} = (6 + 9) \quad (2.3)$$

Firma DAMEL oprócz silników przystosowanych do ciężkich rozruchów posiadających wzmocnioną budowę klatki wirnika w swojej ofercie posiada też wiele rozwiązań mających

na celu ograniczenie prądów rozruchowych, co pokrótce przedstawiono w dalszej części artykułu.

2.1. Rozruch bezpośredni

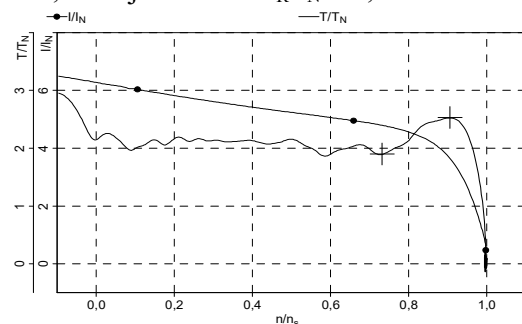
Najprostszą metodą rozruchu silnika indukcyjnego klatkowego jest jego bezpośrednie włączenie na znamionowe napięcie zasilające. Sposób ten, mimo iż najprostszy charakteryzuje się najbardziej niekorzystnymi warunkami rozruchowymi, takim jak duży pobór prądu rozruchowego ($I_R \approx 6 \div 9 I_N$), przysiad napięcia sieci oraz duże udary mechaniczne.



Rys. 2. Schemat ideowy układu do rozruchu bezpośredniego silnika

Taki sposób rozruchu jest niezalecany dla dużych silników startujących z momentem obciążenia. W takich przypadkach często stosowanym rozwiązaniem są sprzęgła hydrokinetyczne przenoszące obciążenie z wału silnika dopiero po osiągnięciu przez silnik obrotów około znamionowych.

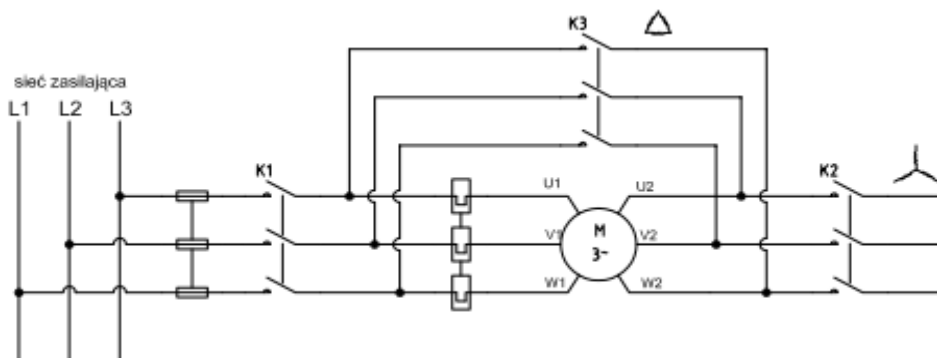
Poniżej przedstawiono charakterystyki rozruchowe silnika 2SP3 315L-4 (wersja A) 160kW, 1140V. W silniku tym prąd rozruchowy wynosi 792A, co daje krotność $I_R/I_N = 6,8$.



Rys. 3. Przebieg prądu i momentu rozruchowego silnika 2SP3 315L-4 (wersja A)

2.2. Rozruch gwiazda-trójkąt

Kolejnym po rozruchu bezpośrednim sposobem rozruchu silnika jest rozruch gwiazda-trójkąt. Metoda ta jest stosowana już od dawna i polega na obniżeniu napięcia zasilania stojana podczas rozruchu.



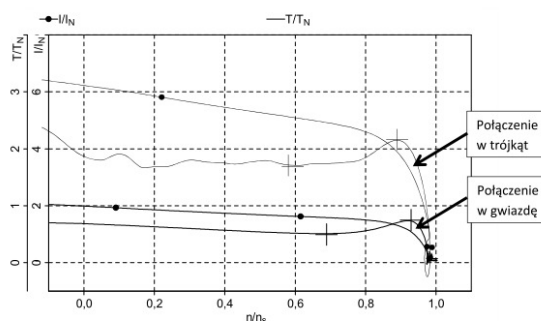
Rys. 4. Schemat ideowy układu do rozruchu gwiazda trójkąt

Aby można było stosować tą metodę silnik musi mieć wyprowadzone początki i końce wszystkich faz uzwojenia do skrzynki zaciskowej oraz musi być przeznaczony do pracy przy połączeniu w trójkąt. Przykładem takiego przełączalnego silnika w ofercie firmy DAMEL jest silnik 2SP1 280M-6A o mocy 75kW (rys.5) przystosowany do zasilania napięciem 660V (połączenie w trójkąt) i 1140V (połączenie w gwiazdę). Wadą takiego rozwiązania jest konieczność stosowania dodatkowego osprzętu przełączającego uzwojenie z gwiazdy w trójkąt, kolejną bardziej istotną wadą jest praktycznie trzykrotne obniżenie momentu rozruchowego. W początkowej fazie rozruchu uzwojenia stojana połączone są w gwiazdę. Napięcie fazowe silnika jest wtedy $\sqrt{3}$ razy mniejsze od znamionowego, a prąd pobierany z sieci jest 3 razy mniejszy, niż przy połączeniu w trójkąt. Moment rozwijany przez silnik jest zależny od kwadratu napięcia(1.3) tak, więc moment dla połączenia gwiazdowego również jest 3 razy mniejszy niż przy połączeniu w trójkąt. Z tego powodu ten sposób rozruchu stosuje się do tzw. rozruchów lekkich, gdzie początkowy moment obciążenia nie przekracza (0,2 ÷ 0,4) momentu znamionowego.



Rys. 5. Widok silnika 2SP1 280M-6A oraz widok wnętrza jego skrzynki zaciskowej

Na rys. 6 przedstawiono i porównano przebiegi prądu i momentu rozruchowego silnika 2SP1 280M-6A o mocy 75kW. Pomiary wykonano dla połączenia uzwojenia w gwiazdę i w trójkąt przy zasilaniu silnika napięciem $U_N = 660V$.



Rys. 6. Porównanie krotności prądu i momentu rozruchowego silnika 2SP1 280M-6A przy połączeniu w gwiazdę i w trójkąt

Po przeliczeniu wartości otrzymanych dla połączenia w trójkąt na parametry znamionowe uzyskujemy krotności prądu rozruchowego

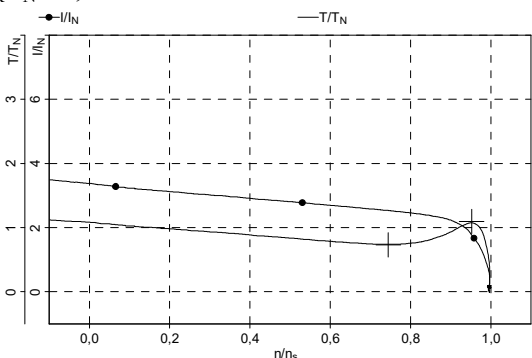
$I_R/I_N = 6,26$ i momentu rozruchowego $T_R/T_N = 2,0$. Dla połączenia w gwiazdę otrzymane krotności wynoszą odpowiednio $I_R/I_N = 1,99$, $T_R/T_N = 0,68$. Otrzymane wyniki pokrywają się z wynikami teoretycznymi, a z porównania rozruchu dla gwiazdy i trójkąta uzyskujemy wartości:

$$\frac{T_D}{T_Y} = 3,15 \qquad \frac{T_D}{T_Y} = 2,92$$

2.3. Silniki z ograniczoną krotnością prądu rozruchowego

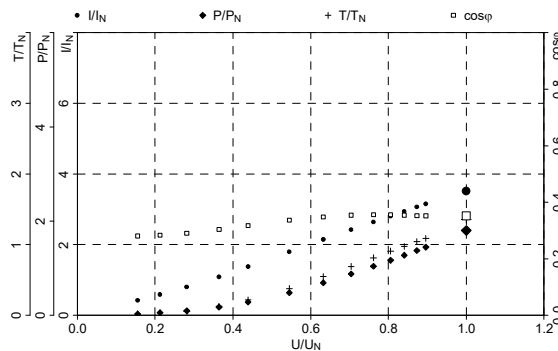
Nowością w ofercie DFME DAMEL S.A. jest seria silników z obniżoną krotnością prądu rozruchowego o mocach 30kW, 75kW, 160kW i 250kW na napięcie do 1140V do zastosowania w kombajnie chodnikowym. Silniki te poprzez odpowiednią konstrukcję obwodu magnetycznego podczas włączania na sieć sztywną nie powodują dużych uderów prądu ani przysiadów napięcia. Zaletą takiego silnika jest ograniczenie prądów rozruchowych przy rozruchu bezpośrednim bez konieczności stosowania jakichkolwiek innych urządzeń pomocniczych, a wartości momentów rozruchowych nie odbiegają od tych uzyskiwanych przy innych sposobach rozruchu. Poniżej przedstawiono przykładowe charakterystyki dla silników 2SP3 280S-4 - 75kW i 2SP3 315L-4 - 160kW.

W silniku 2SP3 280S-4 - 75kW uzyskano prąd rozruchowy poniżej 160A, co daje krotność $I_R/I_N = 3,46$.



Rys. 7. Charakterystyka mechaniczna silnika 2SP3 280S-4 75kW

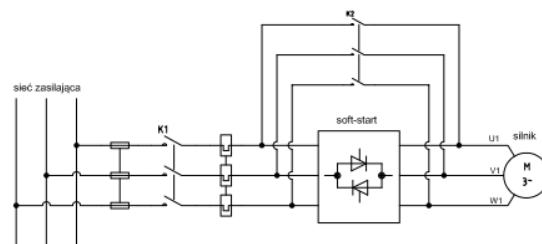
Natomiast w silniku 2SP3 315L-4- 160kW uzyskano prąd rozruchowy poniżej 400A (rys.8), co daje zakładaną krotność $I_R/I_N = 3,5$. Dla porównania analogiczny silnik 2SP3 315L-4 (wersja A) przedstawiony w pkt.2.1.uzyskiwał prąd rozruchowy równy 792A, co jest wartością niemal dwukrotnie większą.



Rys. 8. Charakterystyka przy zahamowanym wirniku silnika 2SP3 315L-4 160kW

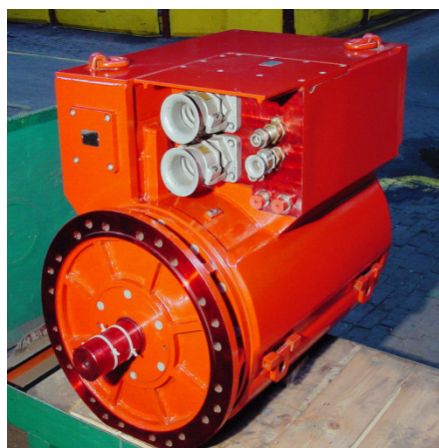
2.4. Silniki zintegrowane z układem soft-startu

Kolejnym sposobem obniżenia prądów pobieranych z sieci podczas rozruchu jest wykorzystanie techniki półprzewodnikowej do sterowania silników.



Rys. 9. Schemat ideowy układu z soft-startem

Firma DAMEL od wielu lat produkuje silniki zintegrowane z blokami energoelektronicznymi. Jednym z takich produktów jest silnik SG3T 315M-4 wyposażony w tyrystorowy układ płynnego rozruchu o mocy 200kW, na napięciu 1000V.



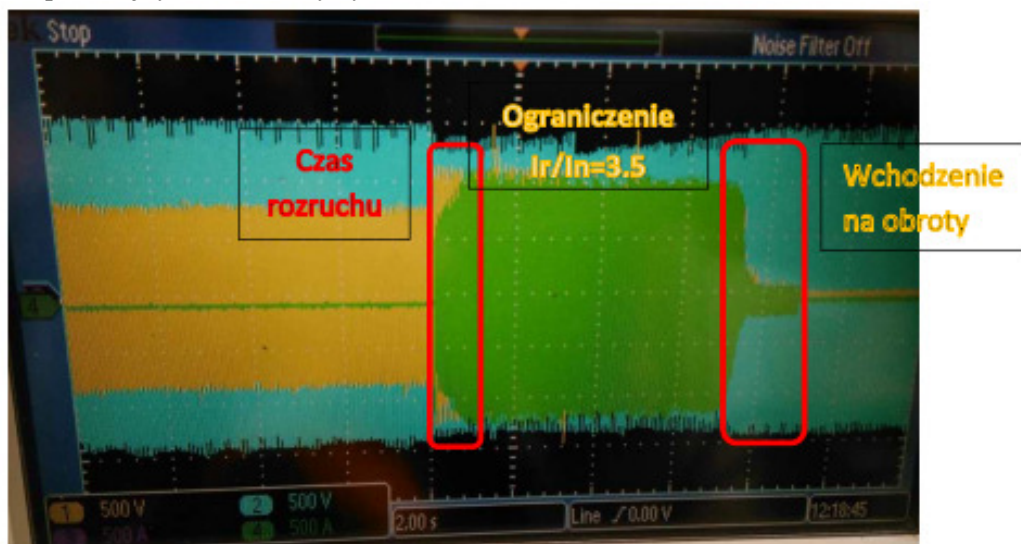
Rys. 10. Silnik zintegrowany z soft-startem typu SG3T 315M-4 o mocy 200kW

Zastosowanie układu płynnego rozruchu pozwala w łatwy sposób zaprogramować czas

trwania rozruchu, czas przeciążenia, wartość początkową prądu rozruchowego oraz krotność prądu rozruchowego. Sterowanie napięcia przemiennego odbywa się przez opóźnienie załączenia zaworów w stosunku do punktu naturalnej komutacji. Po zakończeniu rozruchu układ softstartu zostaje zwarty stycznikiem obejściowym, ograniczając straty w modułach w czasie pracy silnika. Podczas rozruchu punkt pracy przesuwa się płynnie po kolejnych charakterystykach me-

chanicznych (rys.1). Obniżenie napięcia powoduje zmniejszenie momentu krytycznego, bez zmiany poślizgu krytycznego. W związku z tym moment rozruchowy silnika zintegrowanego z układem softstartu można określić zgodnie z zależnością (2.1):

$$T_R = T_N \times \left(\frac{U_R}{U_N}\right)^2 \quad (2.1)$$



Rys. 11. Rozruch silnika zasilanego z układu softstartu z zadaniem obciążeniem. Ograniczenie krotności prądu na poziomie $I_R/I_N = 3,5$. Czas rozruchu 8sek.
Niebieski – napięcie zasilania; zielony – prąd silnika,

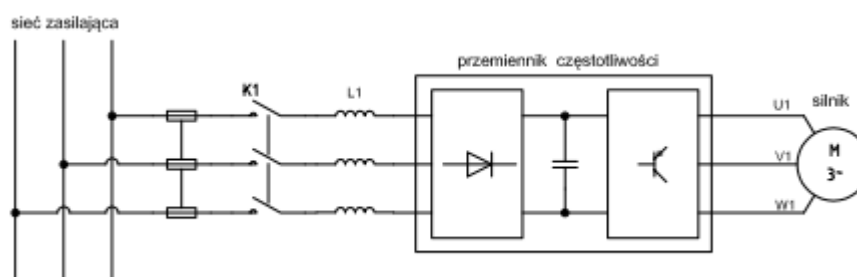
Zaletą układu jest płynna możliwość nastawienia czasu i prądu rozruchowego, a w sytuacji awaryjnej możliwy jest bezpośredni rozruch silnika poprzez załączenie stycznika obejściowego. Dzięki zabudowaniu układu na silniku uzyskujemy niewielkie rozmiary i kompaktową budowę. Dodatkowo możliwe jest wyprowadzenie wszystkich informacji na temat rozruchu i pracy poprzez łącze RS485. Takie rozwiązanie umożliwia nawet w prostym napędzie podłączenie się do systemu kontroli i wizualizacji.

Wykorzystując softstart można regulować moment obrotowy do dokładnego poziomu wymaganego, niezależnie czy aplikacja rusza jałowo czy obciążona. Zmniejszając moment rozruchowy, złagodzone zostają naprężenia mechaniczne na elementach napędu, obniża się dzięki temu koszty serwisu i konserwacji. Softstart zmniejsza również prąd rozruchowy, przez co można uniknąć spadków napięcia w sieci zasilającej.

2.5. Silniki zintegrowane z przemiennikiem częstotliwości

Fakt, iż silnik indukcyjny w czasie łagodnego rozruchu nie rozwija dużego momentu rozruchowego stanowi jedną z najpoważniejszych jego wad. Jednak rozwój techniki półprzewodnikowej i zastosowanie falowników do zasilania silników klatkowych pozwala wyeliminować tę niedogodność. Przeźmiennik częstotliwości nie tylko ogranicza prąd rozruchowy, ale przede wszystkim daje niemal całkowitą kontrolę nad pracą silnika.

W ofercie firmy DAMEL już od 2006 roku znajdują się silniki zintegrowane z przemiennikiem częstotliwości. 12 lat doświadczenia w tej dziedzinie zaowocowało wieloma grupami silników zintegrowanych na moce od 60kW do 1250kW, na napięcia zasilania od 500V do 3300V. Przeźmienniki te mogą pracować zarówno przy sterowaniu skalarnym ($U/f = \text{const}$), jak i wektorowym, ze zwrotem energii do sieci lub bez.



Rys. 12. Schemat ideowy układu z przebiennikiem częstotliwości

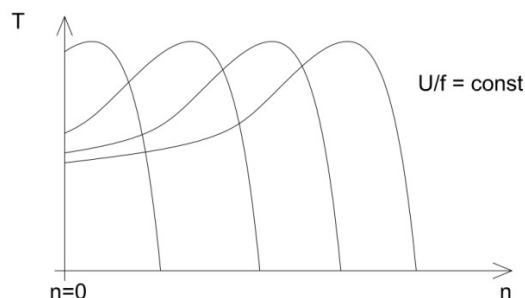
Silnik zintegrowany z przebiennikiem częstotliwości ze zwrotem energii do sieci typu SG3Fz 450L-4A o mocy 500kW zaprezentowany na Targach Górnictwa – Katowice 2017, został nagrodzony medalem I stopnia, w kategorii „Innowacyjne technologie”.



Rys. 13. Silnik zintegrowany z przebiennikiem częstotliwości SG3Fz 450L-4A 500kW 1140V

Płynna zmiana częstotliwości oraz amplitudy napięcia zasilającego uzwojenie od zera do wartości ustalonej zapewnia łagodny rozruch silnika przy zachowaniu stałej wartości momentu krytycznego. Zmiana częstotliwości po-

woduje przesunięcie charakterystyki mechanicznej, bez obniżenia momentu krytycznego (rys. 14). W porównaniu do klasycznych sposobów rozruchu uzyskiwany jest znacznie wyższy moment rozruchowy, który pozwala przeprowadzać rozruch pod pełnym obciążeniem.



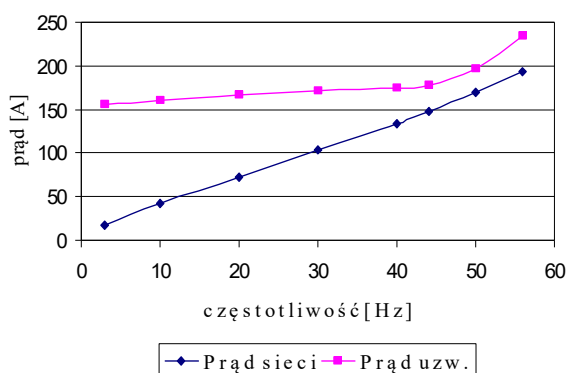
Rys. 14. Charakterystyka mechaniczna silnika przy zmianie napięcia i częstotliwości

W silnikach produkcji DAMEL stosowany jest napięciowy przebiennik częstotliwości ze sterowaniem mikroprocesorowym. Do najważniejszych funkcji realizowanych przez sterownik i przebiennik częstotliwości należy zaliczyć:

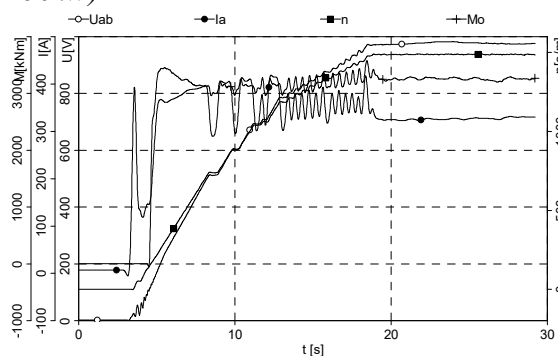
- łagodny rozruch i regulację prędkości obrotowej w zakresie częstotliwości $3 \div 100\text{Hz}$ ($90 \div 3000 \text{ obr/min}$) oraz możliwość dopasowania charakterystyki rozruchowej do rodzaju obciążenia,
- uzyskanie maksymalnego momentu obrotowego od minimalnych obrotów – Rys. 16.
- mały prąd pobierany z sieci przy uzyskaniu pełnym momencie obrotowym – Rys. 15.
- możliwość ciągłej pracy z dowolną prędkością w całym zakresie częstotliwości,
- zabezpieczenie temperaturowe i przeciążeniowe silnika,
- możliwość wizualizacji pracy napędu – poprzez wykorzystanie iskrobezpiecznych portów komunikacyjnych RS485,

Tabela 1.

	Prąd rozruchowy	Moment rozruchowy	Czas rozruchu
Rozruch bezpośredni	$6 \div 8 \times I_N$	T_R	1 sek
Rozruch Y-Δ	$2 \times I_N$	$0,7 \times T_N$	5 sek
Silniki z ograniczonym prądem rozruchowym	$3,5 \times I_N$	$1,1 \times T_N$	4 sek
Soft-start	$1 \div 5 \times I_N$	$T_R = T_N \times \left(\frac{U_R}{U_N}\right)^2$	$2 \div 20$ sek
Przełącznik częstotliwości	$0,1 \times I_N$	$T_R = T_{kr}$	dowolny



Rys. 15. Pobór prądu w czasie rozruchu ze stałym obciążeniem (silnik SG3F 355L-4 250kW)



Rys. 16. Rozruch silnika 2SG3F 450L-4A o mocy 500kW, 1000V, ze stałym obciążeniem $T=T_N$, $f=0 \div 50$ Hz. Napięcie U_{ab} – napięcie na uzwojeniu, Prąd I_a – prąd płynący w uzwojeniu, Prędkość obrotowa n , Moment M_o – na wale silnika

3. Porównania i wnioski

Jak przedstawiono w artykule, istnieje wiele sposobów „włączania” silnika, od najprostszycy rozwiązań polegających na bezpośrednim zasilaniu stojana, aż do układów z przełącznikiem częstotliwości, które umożliwiają praktycznie pełną kontrolę nad pracą silnika. W tabeli 1

zestawiono i porównano podstawowe parametry uzyskiwane przy poszczególnych sposobach rozruchu. Wszystkie przedstawione rozwiązania proponowane są przez DFME DAMEL S.A., a większość z nich ma już ugruntowaną pozycję na rynku górniczym zarówno krajowym, jak i zagranicznym. Ograniczenie prądów i momentów rozruchowych pozwala łagodnie rozpędzać większość napędów, a co za tym idzie pozytywnie wpływa to na ich charakterystykę roboczą i wydłuża ich żywotność. Oszczędza się w ten sposób na materiałach pomocniczych, poprawia się zachowanie maszyny roboczej i wydłuża się jej trwałość. Obniżenie prądów rozruchowych umożliwia również stosowanie mniejszych mocy transformatorów i szaf sterowniczych zasilających napędy.

Indukcyjne silniki asynchroniczne, zintegrowane z energoelektronicznymi układami zasilania, wykazują wiele zalet w stosunku do silników tradycyjnych zasilanych bezpośrednio z sieci. Jeżeli aplikacja wymaga dużych momentów rozruchowych oraz stałej kontroli i regulacji prędkości obrotowej w czasie pracy, to najskuteczniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie silnika zasilanego z przełącznika częstotliwości. Jeżeli natomiast wymogi aplikacji obejmują tylko ograniczenie prądu początkowego i łagodny rozruch, bez konieczności stałej regulacji prędkości i momentu, to zastosowanie soft-startu wydaje się odpowiednim rozwiązaniem, które w porównaniu z falownikiem jest znacznie tańsze. Dobór odpowiedniego napędu zawsze leży po stronie projektanta, który powinien dobrać proponowane rozwiązania techniczne zgodnie z wymaganiami klienta i charakterystyką napędu. Firma DAMEL wychodząc naprzeciw wymaganiom rynku oferuje pełen wachlarz produktów mogących zaspokoić oczekiwania nawet najbardziej wymagających klientów.

Literatura

- [1]. Antoni M. Plamitzer.: Maszyny Elektryczne. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1982.
- [2]. Zawilak T., Zawilak J.: Łagodny rozruch silników prądu przemiennego dużej mocy. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 81/2009.
- [3]. Bernatt M., Bernatt J.: Silnik z wbudowanym blokiem tyrystorowym – nowa generacja napędów przenośnikowych zgrzeblowych. Maszyny Górnicze, Komag Nr.84, 2000 s.69-73.
- [4]. Bernatt M., Bernatt J.: Nowa generacja silników indukcyjnych zasilanych z przekształtnika tyrystorowego sterowanych mikroprocesorem. Maszyny

Elektryczne - Zeszyty Problemowe Komel Nr.62, 2001 s.169-174.

[5]. Bernatt M., Bernatt J.: Silnik indukcyjny z wbudowanym blokiem tyrystorowym – nowa generacja górniczych napędów dołowych. Wiadomości Elektrotechniczne Nr.5, 2001 s.194.

[6]. Budzyński Z., Kołodziej H., Przybyłka J.: Silnik indukcyjny zintegrowany z przemiennikiem częstotliwości w wykonaniu przeciwwybuchowym na napięcie 1000V (1140V). Zeszyty Problemowe Komel Nr.71, 2005 s.15-20.

[7]. Przybyłka J.: Nowoczesne układy napędowe produkcji DFME DAMEL S.A. przeznaczone do pracy w strefach zagrożonych wybuchem z możliwością regulacji prędkości obrotowej i monitoro-

wania pracy napędu. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Komel Nr.76, 2007 s.47-53.

[8]. Przybyłka J.: Napędy elektryczne o regulowanej prędkości obrotowej produkcji DFME DAMEL S.A. do przenośników taśmowych. Transport przemysłowy i maszyny robocze Nr.1 (35)/2017 s.42-45.

Autorzy

Dąbrowska Fabryka Maszyn Elektrycznych DAMEL S.A.

Al. J. Piłsudskiego 2, 41-300 Dąbrowa Górnicza

e-mail: pkuzera@damel.com.pl

jprzybylka@damel.com.pl