

UKŁADY I METODY STEROWANIA ŁAGODNYM ROZRUCHEM SILNIKÓW INDUKCYJNYCH DUŻEJ MOCY

SOFT STARTING SYSTEMS AND CONTROL OF LARGE POWER INDUCTION MOTORS

Krzysztof Pieńkowski - Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wrocławska

W artykule przedstawiono energoelektroniczne układy sterowania łagodnym rozruchem silników indukcyjnych dużej mocy. Opisano układy 3-fazowych tyrystorowych sterowników napięcia zmiennego o komutacji sieciowej, które obecnie są najpowszechniej stosowane. Podano metody sterowania procesami łagodnego rozruchu z zastosowaniem sterowników tyrystorowych i opisano właściwości tych metod. Przedstawiono nowoczesne, obecnie rozwijane energoelektroniczne układy sterowania łagodnym rozruchem silników indukcyjnych dużej mocy. Opisano układ z tyrystorowym sterownikiem napięcia i dyskretnym sterowaniem częstotliwości przeznaczonym do rozruchu silników o bardzo dużej mocy i rozruchu napędów o dużym obciążeniu. Omówiono również nowe przekształtnikowe układy łagodnego rozruchu o komutacji wymuszonej z zastosowaniem tranzystorów mocy.

In the paper the power electronics control systems of soft starting of large power induction motors are presented. The systems of 3-phase thyristor controllers with natural commutation, which are most common applied in industry, are described. The control methods of soft starting are described in detail and the properties of these methods are presented. The novel, developed soft starting systems are presented. The high torque soft starter of large power induction motor based on using discrete frequency is discussed. The novel converter systems of soft starting with application of IGBT transistors and forced commutation are presented.

Słowa kluczowe: łagodny rozruch, silniki indukcyjne, klatkowe, układy rozruchu, metody rozruchu, sterowanie
Keywords: soft-start, induction squirrel-cage motors, starting systems, starting methods, control

Wprowadzenie

Silniki indukcyjne klatkowe należą do najpowszechniej obecnie stosowanych silników prądu zmiennego w zastosowaniach przemysłowych. Wynika to z ich prostej konstrukcji, dużej niezawodności, możliwości pracy w trudnych warunkach środowiskowych oraz niskich kosztów produkcji i eksploatacji. Silniki tego rodzaju są stosowane w przemyśle górnym, cementowym, przetwarzania surowców i do napędu innego rodzaju maszyn roboczych. Silniki te są wykonywane na wszystkie wartości znamionowe napięć niskiego i średniego napięcia. Moce znamionowe silników indukcyjnych niskiego napięcia mogą osiągać wartości do kilku MW, a silników średniego napięcia do kilkudziesięciu MW.

W wielu przypadkach silniki indukcyjne są stosowane w układach napędowych niewymagających sterowania prędkości kątowej i podczas pracy są zasilane bezpośrednio z sieci prądu zmiennego. Istotnym problemem jest wtedy ograniczenie wartości prądów pobieranych z sieci podczas rozruchu tych silników. Prąd rozruchowy silnika indukcyjnego jest wprost proporcjonalny do napięcia zasilania i odwrotnie proporcjonalny do impedancji zastępczej silnika. Wartość impedancji zastępczej silnika zmienia się w szerokim zakresie w funkcji poślizgu silnika, czyli prędkości kątowej silnika. W zakresie zmian prędkości silnika od zera do prędkości krytycznej odpowiadającej poślizgowi krytycznemu silnika impedancja względna silnika ma małą wartość, a dopiero po przekroczeniu prędkości krytycznej wartość impedancji silnika wielokrotnie wzrasta. Zjawisko to powoduje, że prąd rozruchowy silnika przy rozruchu bezpośrednim jest duży i osiąga 5÷8 -krotną

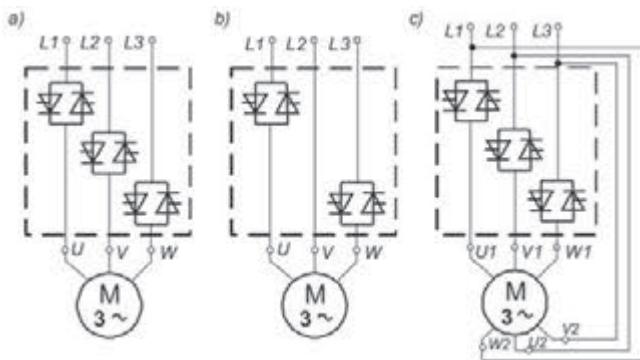
wartość prądu znamionowego silnika. Duże wartości prądów są powiązane z dużymi wartościami wytwarzanego momentu napędowego. Nadmierne wartości tych wielkości oddziałują niekorzystnie na sieć zasilającą oraz wytrzymałość i żywotność elementów układu mechanicznego. Konwencjonalne metody rozruchu silników indukcyjnych klatkowych tylko w ograniczonym stopniu pozwalają na wyeliminowanie tych problemów, a ich istotną wadą jest brak możliwości dopasowania charakterystyk rozruchowych do wymagań procesowych i zasilania z sieci.

Intensywny rozwój energoelektroniki i metod sterowania powoduje, że obecnie coraz częściej do rozruchu silników indukcyjnych klatkowych stosowane są specjalne przekształtniki energoelektroniczne. Przekształtniki te są urządzeniami o szerokich możliwościach programowego kształtowania procesów rozruchowych i zapewniają łagodny przebieg zmian wartości prądów rozruchowych i momentu rozruchowego silnika. Układy te są w przemyśle nazywane układami łagodnego rozruchu, rozrusznikami energoelektronicznymi, rozrusznikami tyrystorowymi, układami Soft-Start lub Soft-Starterami [4,6,7,8].

W artykule tym przedstawiono układy przekształtników energoelektronicznych stosowanych w układach łagodnego rozruchu silników indukcyjnych klatkowych dużej mocy niskiego i średniego napięcia. Omówiono metody sterowania tych przekształtników pozwalające na kształtowanie pożądanego przebiegów rozruchowych. Przedstawiono tendencje rozwojowe układów łagodnego rozruchu i topologie przekształtników energoelektronicznych będących obecnie przedmiotem badań naukowych i wdrożeniowych.

Układy łagodnego rozruchu z tyrystorowymi sterownikami napięcia

Układy topologiczne 3-fazowych tyrystorowych sterowników napięcia przemiennego stosowanych w układach łagodnego rozruchu 3-fazowych silników indukcyjnych klatkowych dużej mocy przedstawiono na rysunku 1. Układ z rysunku 1a jest układem podstawowym najbardziej powszechnie stosowanym w układach niskiego i średniego napięcia [4,8]. W obwodach głównych przekształtnika występuje zespół trzech modułów energoelektronicznych, z których każdy jest złożony z przeciwnie z sobą połączonych tyrystorów konwencjonalnych (SCR). W modułach dla układów średniego napięcia stosowane jest niekiedy połączenie szeregowe 2 lub 3 tyrystorów dla uzyskania odpowiedniej wytrzymałości blokowania napięcia zwrotnego. Sterowanie napięcia wyjściowego sterownika, czyli prądu rozruchowego silnika następuje przez sterowanie fazowe napięć sieciowych, czyli przez odpowiednie przesunięcie impulsów podawanych na bramki tyrystorów względem przejścia przez zero napięć fazowych sieci. Wymaga to pomiaru i wprowadzenia do układu sterowania przekształtnika wartości chwilowych napięć sieci i zsynchronizowania częstotliwości impulsów bramkowych z częstotliwością napięcia sieci. Wyłączanie tyrystorów sterownika następuje za pośrednictwem komutacji sieciowej, nazywanej też komutacją naturalną.



Rys. 1. Przekształtnikowe układy płynnego rozruchu o sterowaniu fazowym: a), b) - układy *In Line*; c) - układ *In Delta*

Fig. 1. Converter system of soft-starting with phase angle control: a), b) - *In Line* systems; c) - *In Delta* system

Na rysunku 1b przedstawiono układ łagodnego rozruchu o zmniejszonej liczbie tyrystorów. W układzie tym występują tylko dwa moduły energoelektroniczne, a trzeci przewód fazowy silnika jest bezpośrednio przyłączony do sieci. Wadą tego typu układu rozruchowego jest występowanie dużej niesymetrii prądów rozruchowych silnika, działających niekorzystnie na sieć zasilającą i obwody silnika. Niektórzy producenci tego rodzaju układów oferują stosowanie specjalnych metod sterowania pozwalającej na ograniczenie niesymetrii prądów do wartości nieprzekraczających kilkanaście procent [8].

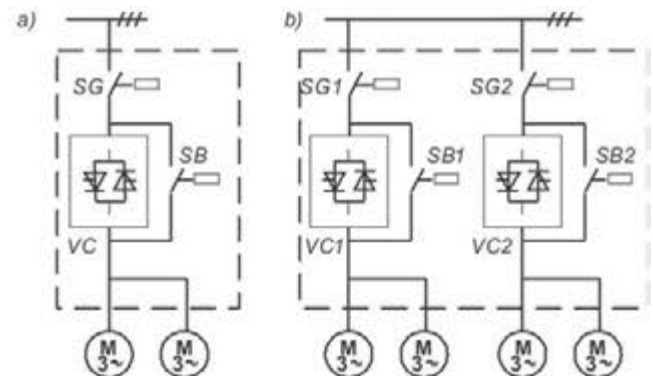
W układach przedstawionych na rysunkach 1a i 1b tyrystorowe moduły energoelektroniczne są przyłączone bezpośrednio między zaciski sieci zasilającej, a zaciski stojana silnika indukcyjnego o uzwojeniach fazowych połączonych w trójkąt lub w gwiazdę (układ *In Line*). W niektórych przypadkach przy rozruchu silników o uzwojeniu stojana połączonym w trójkąt może być celowe włączenie modułów energoelektronicznych sterownika do obwodów fazowych uzwojenia stojana (układ *In Delta* - rys.1c). Zaletą tego typu układu rozruchowego jest możliwość wykorzystania sterownika do rozruchu silników o większej mocy niż w przypadku rozruchu w układzie bezpo-

średnim. Stosowanie sterownika w układzie *In Delta* wymaga pewnej odmienności sterowania tyrystorów i konieczności sprawdzenia, czy praca w takim układzie została przewidziana przez producenta sterownika.

Po zakończeniu procesu rozruchu układ łagodnego rozruchu jest bocznikowany przez zastosowanie stycznika zwierającego sterownik (by-pass), który może stanowić wyposażenie sterownika lub być przyłączany zewnętrznie przez użytkownika.

W napędach maszyn górniczych i transportowych stosowane są często napędy wielosilnikowe. Przykładem są napędy przenośników taśmowych, w których przy napędzie 1-bębnowym może być zastosowany napęd 2-silnikowy, a w przypadku układu 2-bębnowego napęd 4-silnikowy. Napędy wielosilnikowe mogą wystąpić również w układach napędowych dużych pomp i wentylatorów oraz innych maszyn.

Oferowane komercyjnie tyrystorowe układy płynnego rozruchu są w niektórych przypadkach zastosowań wykonywane jako układy rozruchowe przeznaczone do jednoczesnego rozruchu kilku silników napędowych [4]. Zalecane jest aby do jednoczesnego rozruchu stosowane były silniki o równych lub porównywalnych wartościach mocy. Na rysunku 2a przedstawiono schematy obwodów głównych sterownika tyrystorowego, przeznaczonego do jednoczesnego rozruchu dwóch silników, a na rysunku 2b zespół dwóch tyrystorowych sterowników umieszczonych we wspólnej obudowie i przeznaczonych do jednoczesnego rozruchu czterech silników napędowych.



Rys. 2. Tyrystorowe układy łagodnego rozruchu napędów wielosilnikowych: a) do jednoczesnego rozruchu 2 silników; b) zintegrowany układ z dwoma sterownikami we wspólnej obudowie (VC - tyrystorowy sterownik napięcia; SG - stycznik główny, SB - stycznik by-pass)

Fig. 2. Thyristor (SCR) systems for soft-starting of multi-motor drives: a) for simultaneous starting of 2 motors; b) integrated system with two converters in common casing (VC - Thyristor Voltage Converter; SG - main contactor; SB - by-pass contactor)

Do sterowania rozruchem silników dużej mocy średniego napięcia stosowane są tyrystorowe sterowniki średniego napięcia. Producenci oferują wykonania komercyjne sterowników średniego napięcia o wartościach napięć znamionowych zgodnych z międzynarodowymi standardami i równych: 2.3kV, 3.3kV, 4.16kV, 6kV i 6.6kV, 10kV, 11kV, 13.2kV, 13.8kV i 15kV przeznaczonych do rozruchu silników o mocy znamionowej od 200 kW do 30 MW [8]. Współczesne tyrystorowe sterowniki napięcia oprócz obwodów energoelektronicznych wyposażone są w mikroprocesorowe układy sterowania pozwalające na programowanie sterownika, nadzór pracy sterownika i układu napędowego, diagnostykę, komunikację, monitorowanie i transmisję danych o pracy układu napędowego, sygnalizację stanów awaryjnych oraz wiele innych funkcji. Wymaga to za-

stosowania specjalnej konstrukcji sterownika z oddzieleniem obwodów energoelektronicznych i obwodów mocy średniego napięcia od obwodów elektronicznych i sterowania niskiego napięcia oraz od układów informatycznych.

Metody sterowania procesem łagodnego rozruchu

Przy stosowaniu tyrystorowych układów łagodnego rozruchu stosowane są różne metody sterowania przebiegiem procesem rozruchu [6,7,8]. Podstawowe metody i układy sterowania tyrystorowym sterownikiem do łagodnego rozruchu przedstawiono na rysunku 3.

Do metod tych należą:

1) Sterowanie z zadawanym przebiegiem czasowym napięcia zasilania silnika (sterowanie z zadawaną rampą napięcia silnika) (rys. 3a).

W układzie sterowania zadawana jest początkowa wartość napięcia wyjściowego sterownika i stromość narastania tego napięcia, programowanej jako czas wymagany do osiągnięcia wartości znamionowe napięcia. Przebieg czasowy zadawanego napięcia może być uzupełniony przez zastosowanie funkcji Kick-Start zapewniającej wymuszenie skokowej wartości napięcia w krótkim przedziale czasu na początku rozruchu. Jest to sterowanie w układzie otwartym nie wymagające żadnych sprzężeń zwrotnych. Liniowemu zwiększaniu napięcia zasilania silnika odpowiada paraboliczna zmienność w czasie momentu rozruchowego, czyli łagodne jego narastanie. Metoda ta jest najpowszechniej stosowana, ale nie jest zbyt odpowiednia dla rozruchu maszyn o dużej bezwładności i obciążonych dużym momentem mechanicznym.

2) Sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym od prądu rozruchowego silnika (rys. 3b). W układzie tym podczas rozruchu mierzone są wartości chwilowe prądów fazowych silnika i wyznaczana jest wartość skuteczna prądu rozruchowego, która w układzie regulacji jest porównywana z wartością zadaną prądu rozruchowego. Odchyłka regulacji jest podawana na regulator, który przez układ sterowania generuje sygnały sterowania zaworów przekształtnika. Metoda sterowania jest zalecana do układów rozruchowych wymagających utrzymywania stałej wartości prądu rozruchowego. Stosowane są również pewne modyfikacje tej metody sterowania. W niektórych przypadkach jako wartość zadana prądu rozruchowego stosowana jest rampa prądowa, w której prąd rozruchowy w określonym przedziale czasu narasta liniowo od pewnej zadanej wartości początkowej do zadanej wartości maksymalnej. Taka metoda sterowania jest szczególnie dogodna do rozruchu układów napędowych, które mogą być uruchamiane przy różnych stanach obciążenia. Przykładem jest przenośnik taśmowy, który może być uruchamiany jako pusty lub w stanie pełnego załadowania. Rozruch przenośnika pustego nastąpi już przy małej wartości zadanej prądu rozruchowego, a rozruch przenośnika obciążonego przy zadanej wartości maksymalnej prądu rozruchowego. Inna modyfikacja sterowania rozruchem ze sprzężeniem zwrotnym polega na tym, że jako wartość zadana wprowadzana jest wartość maksymalna prądu rozruchowego. Przeważająca część procesu rozruchu przebiega z zastosowaniem rampy napięcia. Jeżeli tempo wzrostu napięcia wyjściowego ze sterownika jest zbyt duże i prąd rozruchowy osiągnął zadaną w układzie sterowania wartość maksymalną, to dalsze zwiększanie napięcia wyjściowego ze sterownika jest wstrzymywane aż do momentu zmniejszenia prądu rozruchowego poniżej wartości maksymalnej.

3) Sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym od momentu rozruchowego silnika (rys. 3c).

W układzie tym podczas rozruchu mierzone są wartości chwilowe prądów i napięć fazowych silnika i na podstawie tych wartości wyznaczana jest estymowana wartość momentu rozruchowego silnika, wykorzystywana jako sygnał sprzężenia zwrotnego w układzie regulacji. Do układu regulacji wprowadzana jest też wartość zadana momentu rozruchowego silnika. Odchyłka regulacyjna jest podawana na regulator, który przez układ sterowania generuje sygnały sterowania zaworów sterownika. Sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym od momentu rozruchowego zapewnia przebieg rozruchu silnika ze stałym przyspieszeniem, czyli liniowym narastaniem prędkości kątowej. Metoda sterowania jest zalecana do układów napędowych o stałej wartości momentu mechanicznego. Niedogodnością metody jest trudność i złożoność estymacji momentu rozruchowego silnika. Możliwe są również pewne modyfikacje metody sterowania: sterowanie z zadaną rampą momentu i sterowanie z zadawaną wartością maksymalną momentu. Właściwości tych metod są podobne do metod sterowania ze sprzężeniem zwrotnym od prądu rozruchowego.

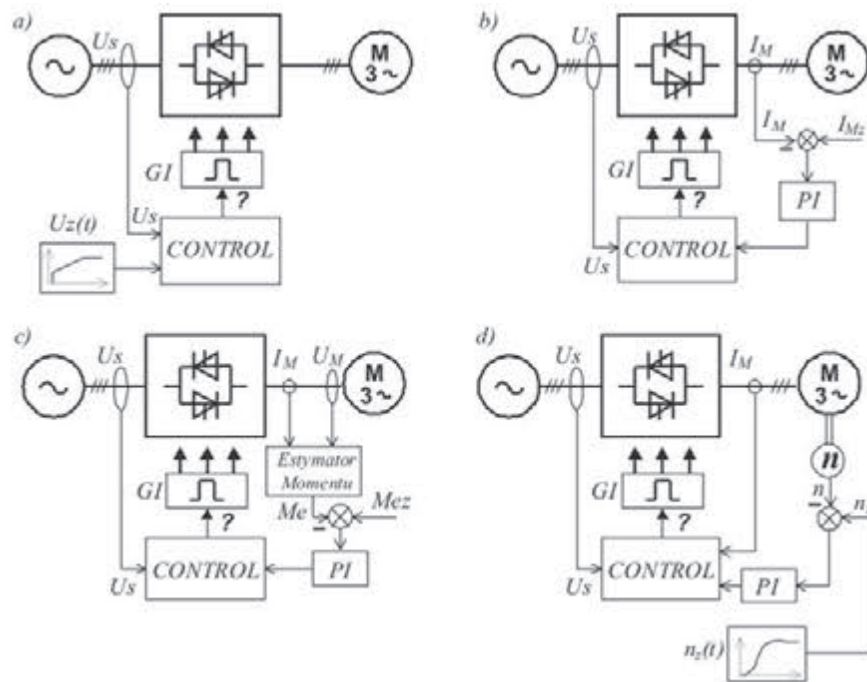
4) Sterowanie adaptacyjne rozruchem silnika (sterowanie z adaptacją przyspieszenia kątowego silnika) (rys. 3d).

W metodzie tej zadawany jest przebieg chwilowy trajektorii prędkości mechanicznej układu napędowego. Podczas rozruchu mierzona jest wartość chwilowa prędkości mechanicznej układu napędowego. Odchyłka regulacji jest podawana na regulator, który przez układ sterowania generuje sygnały sterowania zaworów przekształtnika.

Głównym zadaniem użytkownika jest dobór odpowiedniego przebiegu trajektorii prędkości zadanej. Zalecane są do implementacji trzy formy tych trajektorii: trajektoria ze stałym przyspieszeniem czyli liniowym przebiegiem prędkości, oraz dwie trajektorie z nieliniową zmiennością prędkości silnika, czyli rozruchu ze zmiennym przyspieszeniem. Z tych dwóch trajektorii jedna ma duże początkowe przyspieszenie kątowe, a małe końcowe, a druga charakteryzuje się wartościami odwrotnymi. Ta metoda sterowania jest nowa i wprowadzana obecnie w nowoczesnych układach sterowania łagodnym rozruchem, nazywanych układami inteligentnymi. Adaptacyjność metody sterowania polega na tym, że przebiegi wielkości sterowanych są po każdym rozruchu zapamiętywane w pamięci sterownika mikroprocesorowego. Na podstawie zapamiętanych wyników stale jest optymalizowany przebieg zadawanej w układzie sterowania trajektorii prędkości zadanej w celu ograniczenia wielkości prądu rozruchowego i dopasowania tej trajektorii do parametrów układu napędowego. Wybór początkowy odpowiedniej trajektorii prędkości zadanej wymaga szczegółowej analizy pracy układu napędowego. W przypadku rozruchu silników napędowych przenośników taśmowych pożądanym jest przebieg prędkości zgodny z przebiegiem tzw. S-funkcji, czyli rozruch z początkowym małym przyspieszeniem, a następnie z dużym przyspieszeniem.

Układy łagodnego rozruchu z dyskretnym sterowaniem częstotliwości

Przy stosowaniu tyrystorowych układów łagodnego rozruchu o sterowaniu fazowym napięcia mogą wystąpić problemy z rozruchem układów napędowych o dużej wartości momentu mechanicznego obciążenia i stałej wartości tego momentu w funkcji prędkości. Ze względu na zbyt małą wartość momentu rozruchowego.



Rys. 3. Metody sterowania tyrystorowego układu łagodnego rozruchu silników: a) sterowanie z zadaną rampą napięcia silnika, b) sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym od prądu rozruchowego silnika, c) sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym od momentu rozruchowego silnika, d) sterowanie z adaptacją przyspieszenia kątownego silnika

Fig. 3. Control methods of thyristor systems of soft-starting of induction motors: a) control with given ramp of motor voltage; b) control with feedback from motor starting current; c) control with feedback from motor starting torque; d) control with adaptation of motor angular acceleration

Moment rozruchowy silnika indukcyjnego jest odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości napięcia zasilającego uzwojenie stojana. Stąd wynika, że jeżeli na początku rozruchu silnik indukcyjny będzie zasilany napięciem o obniżonej częstotliwości to uzyska się znaczne zwiększenie momentu rozruchowego w porównaniu do rozruchu przy napięciu o częstotliwości sieciowej. Zastosowanie tej strategii sterowania pozwala na stosowanie do rozruchu układu napędowego o dużej wartości momentu obciążenia.

Przy wykorzystaniu topologii 3-fazowego sterownika napięcia (układu 6T) i sieci 50 Hz możliwe jest przez odpowiednie sterowanie zaworów i zachowanie komutacji sieciowej uzyskanie możliwości jednoczesnego sterowania napięciem i jednoczesnego nastawiania dyskretnych wartości częstotliwości napięcia zasilania silnika podczas rozruchu. Zasada sterowania jest oparta na odpowiednim włączaniu lub pomijaniu pewnej liczby półokresów napięcia sieci zasilającej do przebiegu chwilowego napięcia wyjściowego. Przy częstotliwości sieci równej 50 Hz nastawiane w ten sposób dyskretnie wartości częstotliwości napięcia wyjściowego wynoszą: $f_s = 50/k$, gdzie $k = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ jest kolejną liczbą całkowitą. Przy takim sterowaniu sterownik tyrystorowy złożony z 6 tyrystorów jest jednocześnie sterownikiem napięcia i przekształtnikiem częstotliwości. Zastosowanie na początku rozruchu niskiej częstotliwości napięcia zasilania silnika pozwala na uzyskiwanie dużych wartości momentów rozruchowych przy znacznie obniżonej wartości prądów rozruchowych. Taki układ rozruchowy jest oferowany komercyjnie przez firmę Rongxin Power Electronic jako układ do rozruchu silników o bardzo dużej mocy [8]. Pewna niekorzystna cecha tego układu rozruchu jest występowanie dość dużych oscylacji momentu rozruchowego na początku rozruchu spowodowanych niesymetrią napięć przy sterowaniu częstotliwościowym [5].

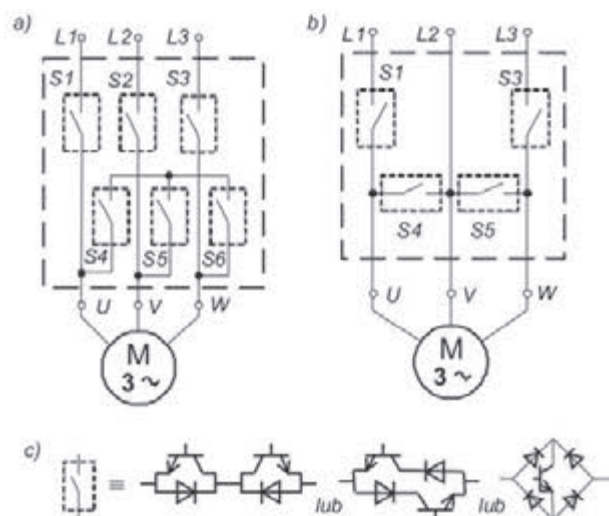
Układy łagodnego rozruchu z przekształtnikami o komutacji wymuszonej

Tyrystorowe sterowniki napięcia zmiennego o sterowaniu fazowym posiadają wiele niekorzystnych właściwości. Prądy

pobierane z sieci i prądy silnika mają przebieg okształcony, zawierający dużą liczbę składowych harmonicznych. Mała jest również sprawność układu i niski współczynnik mocy. Wady te mogą zostać wyeliminowane przez zastosowanie przekształtników z zaworami o komutacji wymuszonej pozwalającej na dowolne sterowanie zaworów lub zastosowanie dużej częstotliwości przełączeń zaworów [1,2,3].

Układy sterowników do łagodnego rozruchu będące przedmiotem obecnie prowadzonych badań naukowych i wdrożeń przedstawiono na rysunku 4.

Przedstawione na rysunku 4 przekształtniki energoelektroniczne złożone są z łączników (kluczy) energoelektronicznych o dwukierunkowym przewodzeniu. Istotną częścią łącznika jest jeden lub dwa tranzystory mocy typu IGBT lub MOSFET.



Rys. 4. Przekształtnikowe układy łagodnego rozruchu z przekształtnikami o komutacji wymuszonej: a) układ pełny, b) układ uproszczony, c) możliwe układy klucza energoelektronicznego o dwukierunkowym przewodzeniu

Fig. 4. Converter systems of soft-starting with PWM control: a) complete system; b) simplified system, c) possible circuits of power-electronic switch with bidirectional conduction

Zastosowanie w układzie przekształtnika tranzystorów mocy, czyli elementów w pełni sterowalnych pozwala na znacznie szersze możliwości kształtowania napięcia wyjściowego w porównaniu do przekształtników o sterowaniu fazowym. Stąd układy te charakteryzują się wysoką sprawnością i zmniejszonym oddziaływaniem na sieć zasilającą.

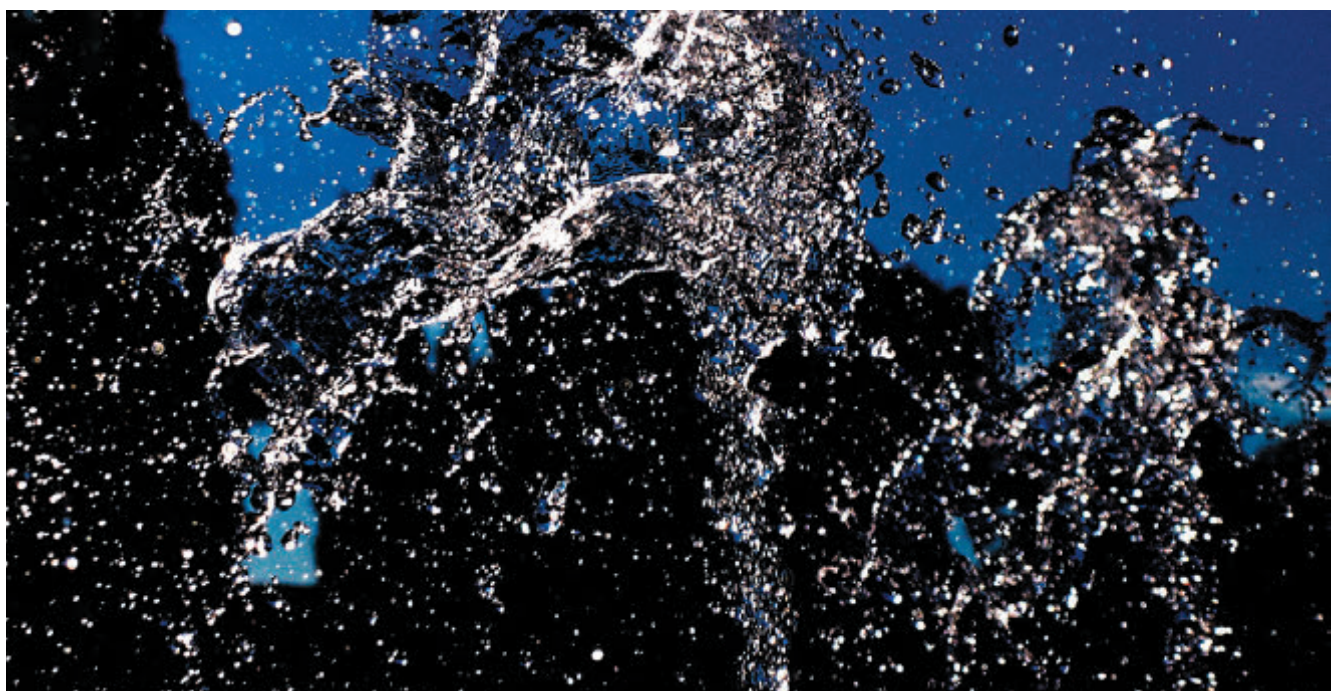
Podsumowanie

Zastosowanie energoelektronicznych układów do łagodnego rozruchu silników indukcyjnych dużej mocy zapewnia szereg korzystnych właściwości. Uzyskuje się możliwość pro-

gramowania charakterystyk rozruchowych i ich dopasowanie do wymagań maszyny roboczych, zwiększenie niezawodności pracy, możliwość automatyzacji procesów przemysłowych. Obecny stan techniki nie stawia praktycznie żadnych ograniczeń pod względem wysokości mocy układu napędowego, napięcia sieci oraz wymagań dotyczących układu sterowania.

Literatura

- [1] Hunyár M., Veszprémi K.: Pulse Width Modulated IGBT AC Chopper, *Periodica Polytechnica Ser. El. Eng.* Vol. 45, No. 3–4, 2001, pp 159–178
- [2] Nafeesa K. Saly George: Performance Comparison of Two-leg and Three-leg AC Voltage Controller-Fed Three Phase Induction Motor Drive. *Journal of. Electrical Systems* 8-1 (2012), pp.13-22
- [3] Saracoglu B., Kale M., Ozdemir E.: A Novel Technique for Optimal Efficiency Control of Induction Motor Fed By PWM IGBT AC Chopper. *Proc. of 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004*
- [4] Serafin R., Jędrus T., Macierzyński D.: Zasilanie i sterowanie przenośników taśmowych w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny z wykorzystaniem nowej generacji łączników. *Komel, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr 85, 2010, s.135-140
- [5] She Z., Liu J., Zhang B., Peng Y.: Research on High Torque Soft Starter of Induction Motors Based on Discrete Frequency. *Proc. of International Conference on Intelligent Control and Information Processing, August 13-15, 2010 - Dalian, China*, pp.711-714
- [6] Zenginobuz G., Cadirci I., Ermis M., Barlak C.: Performance Optimization of Induction Motors During Voltage-Controlled Soft Starting. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 19, No. 2, 2004, pp.278-288
- [7] Zenginobuz G., Çadirci I., Ermis M., Barlak C.: Soft Starting of Large Induction Motors at Constant Current With Minimized Starting Torque Pulsations. *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 37, No. 5, 2001, pp.1334-1347
- [8] Katalogi firm ABB, Allen-Bradley, Danfoss, Siemens, SOFTSTART (UK), Rongxin Power Electronic Co



Fot. Jerzy Pustelnik

Z cyklu: Analiza studiów przypadku