

Paweł Zalas, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

SAMOCZYNNE PONOWNE ZAŁĄCZENIE SILNIKÓW LSPMSM

AUTOMATIC SELF RECONNECTION OF MOTORS TYPE LSPMSM

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki analizy procesu samoczynnego ponownego załączenia silników LSPMSM różnej mocy. Zaproponowano układ sterowania pozwalający na łagodne załączenie wirującego silnika na sieć zasilającą bez konieczności zatrzymania maszyny, a tym samym całego układu napędowego i tymczasowego wstrzymania procesu technologicznego. Numeryczną analizę procesu ponownego załączenia wykonano wykorzystując opracowane ko-symulacyjne połowo-obwodowe modele silników.

Abstract: This paper presents the results of a numerical analysis of the process of automatic self reconnection a low- and medium-power energy-efficient line-start permanent magnet synchronous motors. The proposed control system allows smoothly switching the rotating motor to mains without stopping the machine and thus the entire drive system and the temporary suspension of the technological process. Numerical analysis of the process of automatic self reconnection and synchronization was performed by using a specially developed co-simulation field-circuit models of the motors.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, silnik synchroniczny, synchronizacja, magnesy trwałe, rozruch bezpośredni

Keywords: electrical machines, synchronous motor, synchronization, permanent magnet, line start

1. Wstęp

Nowoczesne, energooszczędne konstrukcje silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi coraz częściej zastępują silniki indukcyjne zarówno o konstrukcji klatkowej oraz pierścieniowej, jak również silniki asynchroniczne synchronizowane. Silniki tego typu o rozruchu bezpośrednim (z ang. LSPMSM - Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor), oprócz wielu swoich zalet wynikających z bardzo dobrych parametrów eksploatacyjnych, charakteryzują się prostotą konstrukcji i łatwą obsługą, analogicznie do silników indukcyjnych. Silniki LSPMSM o typowej budowie mają jednak nie najlepsze właściwości rozruchowe oraz ograniczoną zdolność do synchronizacji realizowanej samoistnie po osiągnięciu prędkości bliskiej synchronicznej [3, 6]. Znaczącą poprawę właściwości rozruchowych silników tego typu przy jednoczesnym zwiększeniu zdolności do synchronizacji, po osiągnięciu prędkości podsynchronicznej, zapewnia zastosowanie rozwiązań wykorzystujących zjawisko wypierania prądu [6]. Zastosowanie w wirniku dwuklatkowego uzwojenia rozruchowego o odpowiednio dobranym kształcie oraz właściwy dobór materiału prętów klatki pozwala na odpowiednie ukształtowanie momentu asynchronicznego i kompensację momentu hamującego od magnesów trwałych [6]. Zapewnia

to również uzyskanie dużej wartości momentu przy prędkościach bliskich synchronicznej umożliwiających uzyskanie dużych wartości momentu wpadu oraz pozwala na uzyskanie momentu rozruchowego większego od momentu znamionowego w pełnym przedziale prędkości obrotowej [5, 6]. Zaproponowana metoda poprawy właściwości silników LSPMSM została sprawdzona [5] w warunkach przemysłowych.

Inną metodą poprawy właściwości rozruchowych silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi jest zastosowanie przełączalnego dwubiegowego uzwojenia stojana [2, 4]. Odpowiednie przełączanie uzwojeń do konfiguracji zapewniającej uzyskanie mniejszej liczby biegunów magnetycznych (np. z $2p=8$ do $2p=6$) umożliwia przeprowadzenie rozruchu do prędkości większej od docelowej prędkości znamionowej (rozruch dwustopniowy) oraz łagodną synchronizację z prędkości nadsynchronicznej [1, 3]. Liczba biegunów pola magnetycznego stojana jest wówczas mniejsza od liczby biegunów wirnika utworzonych przez magnesy trwałe, co prawie całkowicie eliminuje wytwarzany przez nie moment hamujący. Rozruch przebiega podobnie łagodnie jak w typowym silniku indukcyjnym.

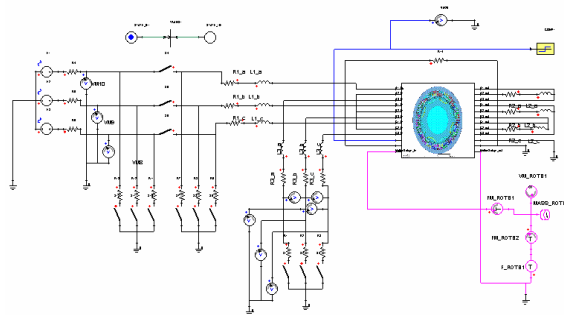
W celu zachowania bezpieczeństwa urządzeń i obsługi oraz w celu zachowania ciągłości procesów technologicznych produkcji stosowana jest elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa (EAZ), w tym automatyka SPZ i SZR minimalizująca skutki chwilowych zaników napięć zasilających. Jednak w przypadku silników LSPMSM indukowane przez pole wzbudzenia siły elektromotoryczne w uzwojeniach twornika rozprędzonej, wirującej maszyny nie pozwalają na niekontrolowane załączenia tych uzwojeń na napięcia sieciowe. Przypadkowe załączenie silnika na sieć zasilającą mogłoby skutkować znaczącymi udarami prądów oraz momentu silnika i doprowadzić do uszkodzenia maszyny. W artykule przedstawiono wyniki analizy numerycznej procesu samoczynnego ponownego załączenia silników LSPMSM różnej mocy na sieć zasilającą po chwilowym zaniku napięć zasilających z wykorzystaniem opracowanego układu sterowania oraz odpowiedniego algorytmu sterowania, umożliwiającego łagodną realizację tego procesu.

2. Wyniki badań numerycznych

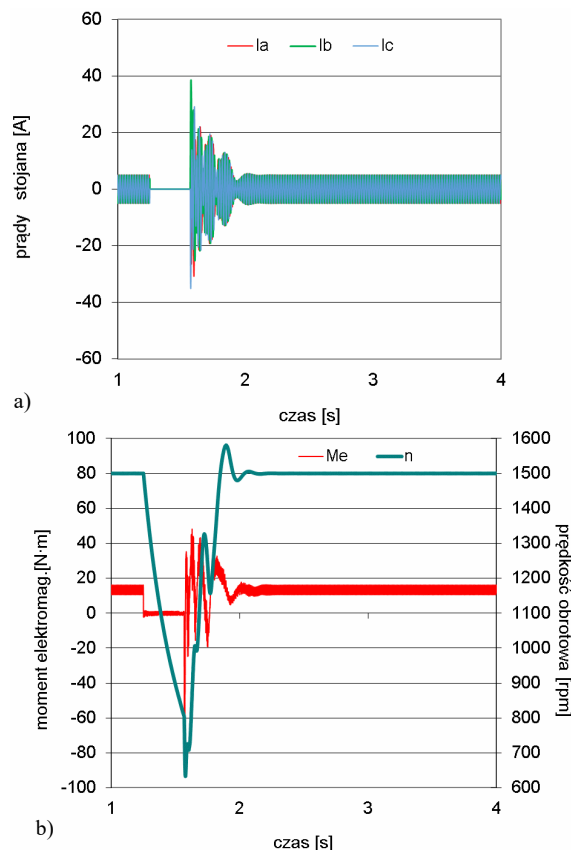
W celu sprawdzenia możliwości łagodnego ponownego załączenia silników typu LSPMSM na sieć zasilającą wykonano analizy numeryczne z wykorzystaniem opracowanych w tym celu modeli polowo-obwodowych. W modelach obliczeniowych wykorzystano konstrukcję mechaniczną silnika małej mocy o wielkości mechanicznej 90 i mocy 1,5 kW ($2p=4$) oraz silnika średniej mocy o wielkości mechanicznej 355 i mocy 160 kW ($2p=8$). W obliczeniach przyjęto znamionowe obciążenie silników o charakterystyce wentylatorowej oraz uwzględniono w obu przypadkach wypadkowy moment bezwładności układu napędowego 10-cio krotnie większy od momentu inercji wirnika silnika napędowego. Część połową modeli obliczeniowych wykonano w programie Maxwell firmy Ansys. W celu realizacji opracowanego algorytmu sterowania pracą automatyki SPZ silników w części obwodowej modeli obliczeniowych wykorzystano środowisko Simplorer również firmy Ansys. Przykładowy schemat zasilania oraz sterowania pracą silnika w postaci modelu ko-symulacyjnego pokazano na rysunku 1.

Na rysunkach 2, 3, 4 pokazano przebiegi czasowe prądów stojana (a) oraz momentu elektromagnetycznego i prędkości obrotowej (b) podczas procesów ponownego załączenia sil-

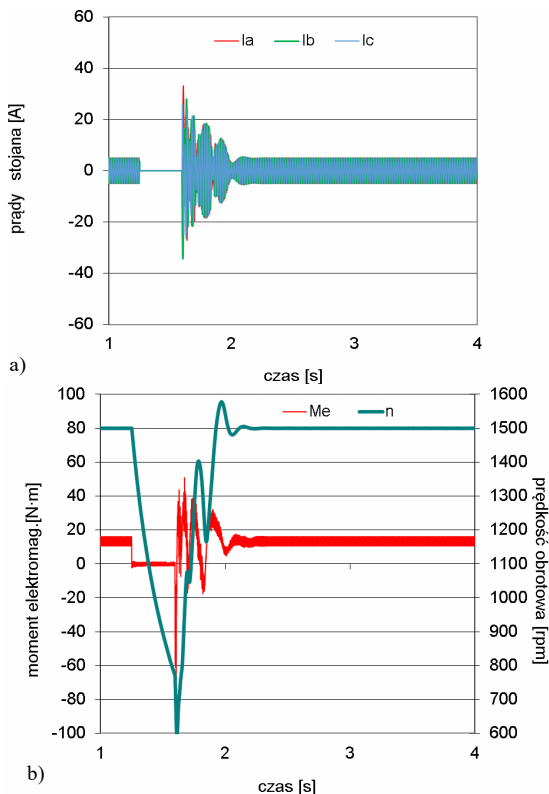
nika LSPMSM małej mocy na sieć zasilającą. W badaniach numerycznych (rys. 2, 3, 4) w chwili $t=1,25$ s uwzględniono chwilowy zanik napięć zasilających z równoczesnym odłączeniem silnika. Ponowne załączenie silnika było realizowane w sposób niekontrolowany (rys. 2) oraz z wykorzystaniem opracowanego algorytmu sterowania i z uwzględnieniem półprzewodnikowych przekaźników SSR o charakterystyce ZS załączających "w zerze" napięcia (rys. 3) oraz załączające w dowolnej chwili (IO), czyli bezzwłocznie po pojawieniu się sygnału sterującego (rys. 4).



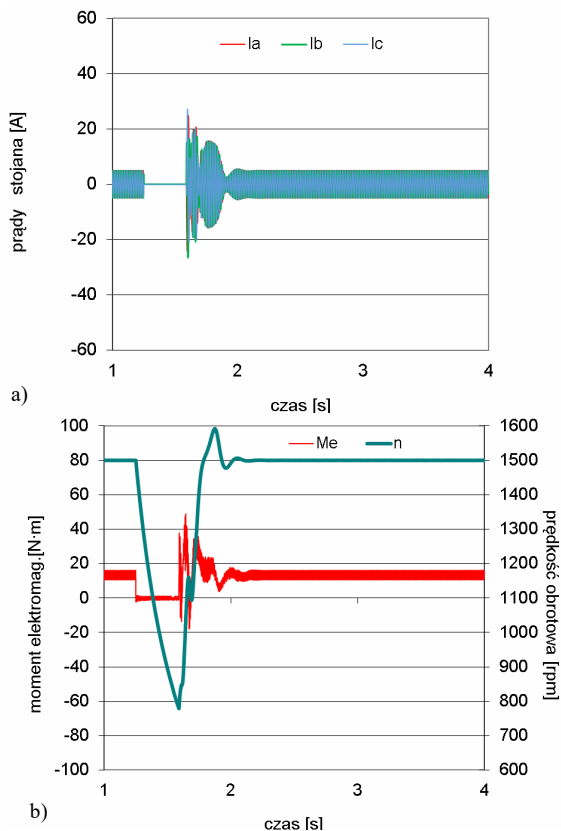
Rys. 1. Schemat ko-symulacyjnego modelu obliczeniowego



Rys. 2. Przebiegi czasowe wielkości podczas niekontrolowanego ponownego załączenia silnika, $P_n=1,5$ kW, $2p=4$



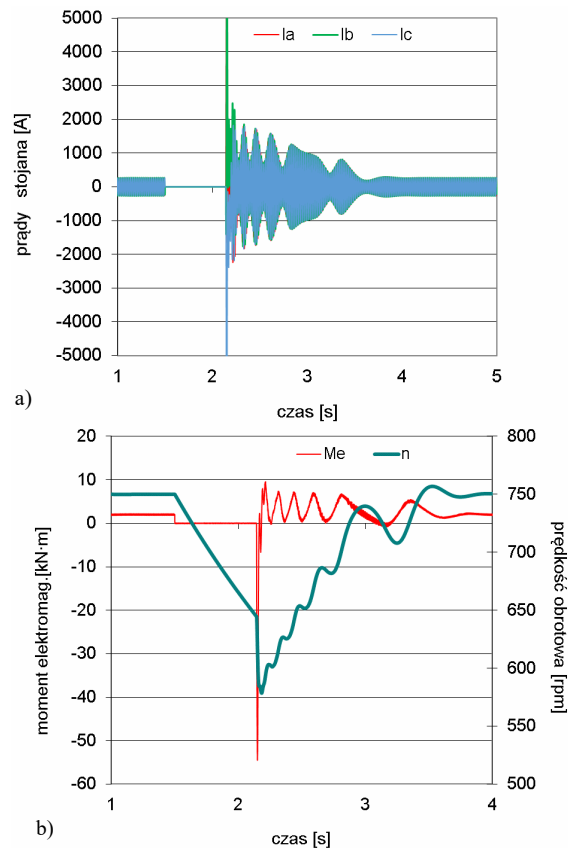
Rys. 3. Przebiegi czasowe wielkości podczas kontrolowanego ponownego załączenia silnika, $P_n=1,5\text{ kW}$, $2p=4$, przekaźniki SSR-ZS



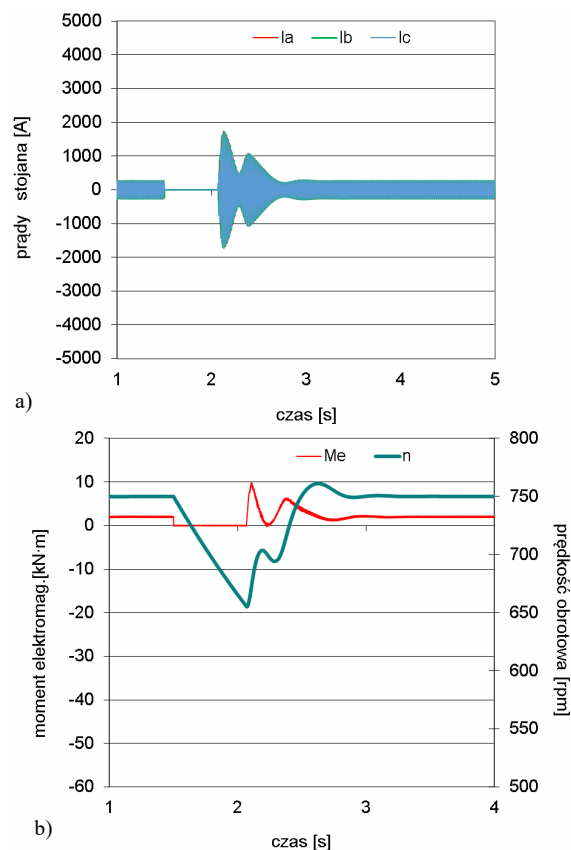
Rys. 4. Przebiegi czasowe wielkości podczas kontrolowanego ponownego załączenia silnika, $P_n=1,5\text{ kW}$, $2p=4$, przekaźniki SSR-IO

Niekontrolowane przypadkowe załączenia badanego silnika małej mocy na sieć zasilającą wywołało spodziewane niedopuszczalne przebiegi chwilowe obserwowanych wartości. Przekładniki SSR o charakterystyce ZS zapewniają ograniczenie prądu podczas rozruchu zatrzymanego silnika, jednak podczas synchronizacji z siecią zasilającą wirującej maszyny synchronicznej, wzbudzonej magnesami trwałymi, ich algorytm działania nie jest najkorzystniejszy. Zastosowanie przekaźników sterujących SSR o charakterystyce IO dzięki bardzo dobrym parametrom łączeniowym (czas załączenia poniżej 0,1 ms) zapewnia ograniczenie niekorzystnych udarów prądów oraz momentu silnika oraz łagodną synchronizację silnika w krótkim czasie po powrocie napięć zasilających.

Zagrożenia związane z niekontrolowanym załączeniem na sieć zasilającą silników LSPMSM zwiększa się wraz ze wzrostem mocy maszyny. Na rysunkach 5 i 6 pokazano przebiegi czasowe obserwowanych wielkości podczas procesów ponownego załączenia silnika LSPMSM średniej mocy na sieć zasilającą.



Rys. 5. Przebiegi czasowe wielkości podczas niekontrolowanego ponownego załączenia silnika, $P_n=160\text{ kW}$, $2p=8$



Rys. 6. Przebiegi czasowe wielkości podczas kontrolowanego ponownego załączenia silnika, $P_n=160\text{ kW}$, $2p=8$

Wyniki analiz numerycznych przedstawione na rysunkach 5 i 6 pokazują, że kontrolowany przebieg procesu załączenia napięć zasilających uzwojenie stojana, po chwilowym ich zaniku, może znacząco ograniczyć udary prądów oraz momentu silnika i pulsacje prędkości obrotowej skracając czas ponownej skutecznej synchronizacji silnika.

3. Wnioski

Opracowany układ sterowania oraz algorytm sterowania zapewnia łagodne załączenie silnika LSPMSM na sieć zasilającą po chwilowym zaniku napięć zasilających, bez konieczności zatrzymania i dokonania ponownego rozruchu, co zapewnia zachowanie ciągłości procesów technologicznych, np. podczas produkcji.

Zaproponowane rozwiązanie jest szczególnie skuteczne w zakresie małych wartości poślizgu silnika, przy prędkościach bliskich synchronicznym. Jest to najbardziej newralgiczny zakres pracy wirującej maszyny wzbudzonej magnesami trwałymi ze względu na wartości napięć indukowanych w uzwojeniach twornika. Opracowany układ sterowania zapewnia skuteczność analizowanego procesu, niezależnie od mocy silnika. Podstawowym ograniczeniem w silnikach średniej i dużej mocy pozostają układy łącznikowe, ze względu na ich czas działania oraz ograniczone zakresy prądowe.

Obliczenia wykonano przy użyciu zasobów udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe (<http://wcssp.pl>), grant obliczeniowy Nr 400.

4. Literatura

- [1]. P. Zalas, J. Zawilak: "Proces synchronizacji silnika synchronicznego dużej mocy z prędkości nadsynchronicznej", SME 2014, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 103, s. 37–40, 2014.
- [2]. P. Zalas, J. Zawilak: "Gentle synchronization of two-speed synchronous motor with asynchronous starting," *Electrical Engineering (Berlin)*. 2012, vol. 94, nr 3, 155-163.
- [3]. P. Zalas, T. Zawilak, J. Zawilak: "Synchronization process of permanent magnet synchronous motor from over synchronous speed", 10.1109/WZEE.2015.7394041, *IEEE* 2015
- [4]. J. Zawilak: „Uzwojenia zmiennobiegowe maszyn elektrycznych prądu przemiennego”, *Prace Naukowe IMiNE*, PWr. 1986.
- [5]. J. Zawilak, T. Zawilak: "High efficiency permanent magnet synchronous motor", *Przegląd Elektrotechniczny*, 1/2014, s. 224–226
- [6]. T. Zawilak: "Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet machines", *Przegląd Elektrotechniczny*, 2/2013, s. 177–179.

Autorzy

Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław
e-mail: pawel.zalas@pwr.edu.pl
jan.zawilak@pwr.edu.pl