

Paweł Zalas, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

SAMOCZYNNA SYNCHRONIZACJA SILNIKÓW LSPMSM

AUTOMATIC SYNCHRONIZATION OF MOTORS TYPE LSPMSM

Streszczenie: W artykule przedstawiono numeryczną analizę procesu ponownego załączenia i synchronizacji silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM) różnej mocy, wykorzystując opracowane ko-symulacyjne polowo-obwodowe modele silników. Zbadano wpływ okresowego zmniejszenia wartości napięć zasilających podczas procesu łagodnego załączenia wirującego silnika na sieć zasilającą, bez konieczności zatrzymania maszyny i podczas procesu synchronizacji, na jego przebieg i skuteczność. Zaproponowany układ sterowania, pozwalający na łagodne załączenie wirującego silnika, może zostać zastosowany podczas procesów synchronizacji silników synchronicznych o rozruchu dwustopniowym i jednej docelowej, znamionowej prędkości synchronicznej.

Abstract: The article presents a numerical analysis of the process of automatic self reconnection and synchronization of low- and medium-power energy-efficient line-start permanent magnet synchronous motors, using a specially developed co-simulation field-circuit models of the motors. The influence of periodic reduction of the supply voltage values during the process of smooth switching of the rotating motor to the supply network, without the need to stop the machine and during the synchronization process has been examined. The proposed control system, allowing for gentle connection of the rotating motor, can be used during synchronization processes of synchronous motors with two-stage start-up and one target, rated synchronous speed.

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

Keywords: electrical machines, synchronous motor, synchronization, permanent magnet, direct on line starting

1. Wstęp

Silniki synchroniczne wzbudane magnesami trwałymi o nowoczesnych konstrukcjach, ze względu na ogólnoświatowe dążenie do oszczędzania energii elektrycznej, coraz częściej zastępują powszechnie stosowane silniki indukcyjne, zarówno o konstrukcji klatkowej oraz pierścieniowej, jak również silniki asynchroniczne synchronizowane o wzbudzeniu elektromagnetycznym. Nowoczesne maszyny elektryczne tego typu [5, 7, 9] o rozruchu bezpośrednim (z ang. LSPMSM - Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor), oprócz wielu swoich zalet wynikających z bardzo dobrych, energooszczędnych parametrów eksploatacyjnych, charakteryzują się prostotą konstrukcji i bezproblemową obsługą, analogicznie do silników indukcyjnych. Silniki LSPMSM o typowej budowie mają jednak nienajlepsze właściwości rozruchowe oraz ograniczoną zdolność do synchronizacji, realizowanej samoczynnie po osiągnięciu prędkości bliskiej synchronicznej [4, 10, 12, 13]. W odróżnieniu od silników synchronicznych o wzbudzeniu elektromagnetycznym magnesy trwałe umieszczone

w wirniku wytwarzają stały strumień, wywołujący podczas rozruchu moment hamujący. Wpływa on niekorzystnie na wypadkowy moment rozruchowy oraz przebieg momentu napędowego, w szczególności w dolnym zakresie prędkości obrotowych.

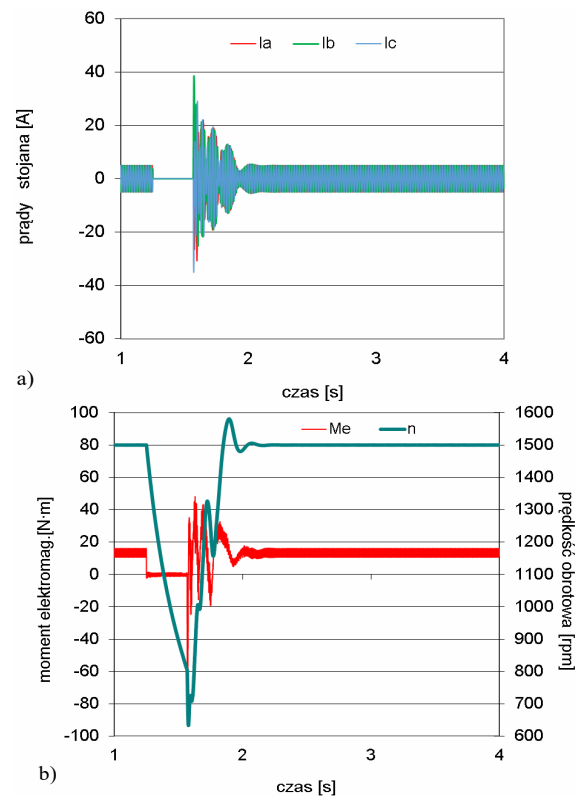
Znaczącą metodą poprawy właściwości rozruchowych silników tego typu, przy jednoczesnym zwiększeniu zdolności do synchronizacji realizowanej samoistnie, zapewnia zastosowanie w wirniku dwuklatkowego uzwojenia rozruchowego o odpowiednio dobranym kształcie oraz właściwy dobór materiału prętów klatki pozwalający na odpowiednie ukształtowanie momentu asynchronicznego i kompensację momentu hamującego od magnesów trwałych [13]. Zapewnia to również uzyskanie dużej wartości momentu przy prędkościach bliskich synchronicznej umożliwiającą uzyskanie dużych wartości momentu wpadu oraz pozwala na uzyskanie momentu rozruchowego większego od momentu znamionowego w pełnym przedziale prędkości obrotowej [6, 13].

Inną metodą poprawy właściwości rozruchowych silników synchronicznych wzbudzonych magnesami trwałymi jest zastosowanie przełączalnego dwubiegowego uzwojenia stojana [2, 4]. Zaproponowana metoda umożliwia przeprowadzenie rozruchu do prędkości większej od docelowej prędkości znamionowej (rozruch dwustopniowy) oraz łagodną synchronizację z prędkości nadsynchronicznej [1, 4]. Liczba biegunów pola magnetycznego stojana, podczas rozruchu, jest mniejsza od liczby biegunów wirnika utworzonych przez magnesy trwałe, co prawie całkowicie eliminuje wytwarzany przez nie moment hamujący. Proces rozruchu silników z zastosowaną metodą przebiega podobnie łagodnie jak w typowym silniku indukcyjnym. Zachowanie ciągłości procesów technologicznych produkcji oraz pracy w systemach ruchu ciągłego [8, 11] np. w procesach wentylacji i odwodnienia głównego kopalń oraz zachowanie bezpieczeństwa urządzeń i obsługi wymaga stosowania elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ), w tym automatyki SPZ i SZR, minimalizującej skutki chwilowych zaników napięć zasilających. W przypadku silników LSPMSM, zwłaszcza pracujących w układach napędowych o dużych momentach bezwładności, indukowane przez pole wzbudzenia siły elektromotoryczne w uzwojeniach twornika rozpedzonej, 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. Celem artykułu jest przedstawienie wyników analizy numerycznej procesu samoczynnego ponownego załączenia silników LSPMSM różnej mocy na sieć zasilającą po chwilowym zaniku napięć zasilających z wykorzystaniem opracowanego układu sterowania [3] oraz odpowiedniego algorytmu sterowania, umożliwiającego łagodną realizację tego procesu. Zbadano również wpływ okresowego zmniejszenia wartości napięć zasilających podczas procesu synchronizacji na jego przebieg i skuteczność.

2. Wyniki badań numerycznych

Badania numeryczne procesu łagodnego ponownego załączenia silników typu LSPMSM na sieć zasilającą wykonano z wykorzystaniem opracowanych w tym celu modeli polowo-obwodowych. Część polową modeli obliczenio-

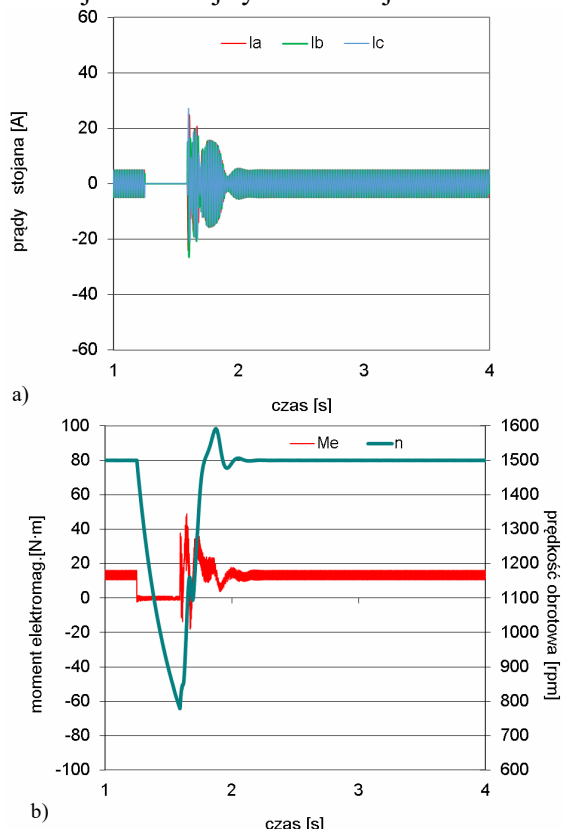
wych wykonano w programie Maxwell firmy Ansys. W celu realizacji opracowanego algorytmu sterowania pracą automatyki SPZ silników w części obwodowej modeli obliczeniowych wykorzystano środowisko Simplorer również firmy Ansys. W modelach obliczeniowych wykorzystano konstrukcję mechaniczną silnika małej 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.



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

Na rysunkach 1 i 2 pokazano przebiegi czasowe prądów stojana (a) oraz momentu elektromagnetycznego i prędkości obrotowej (b) podczas procesów ponownego załączenia silnika LSPMSM małej mocy na sieć zasilającą. W badaniach numerycznych (rys. 1, 2) w chwili $t=1,25$ s uwzględniono chwilowy zanik napięć zasilających z równoczesnym odłączeniem silnika. Ponowne załączenie silnika było realizowane w sposób niekontrolowany (rys. 1) oraz

z wykorzystaniem opracowanego algorytmu sterowania [3] i z uwzględnieniem półprzewodnikowych przełączników SSR (rys. 2). Wyniki analiz numerycznych przedstawione na rysunkach 1 i 2 pokazują, że kontrolowany przebieg procesu załączenia napięć zasilających uzwojenia stojana badanego silnika małej mocy, po chwilowym ich zaniku, może znacząco ograniczyć udary prądów oraz momentu silnika i pulsacje prędkości obrotowej skracając czas ponownej skutecznej synchronizacji silnika.

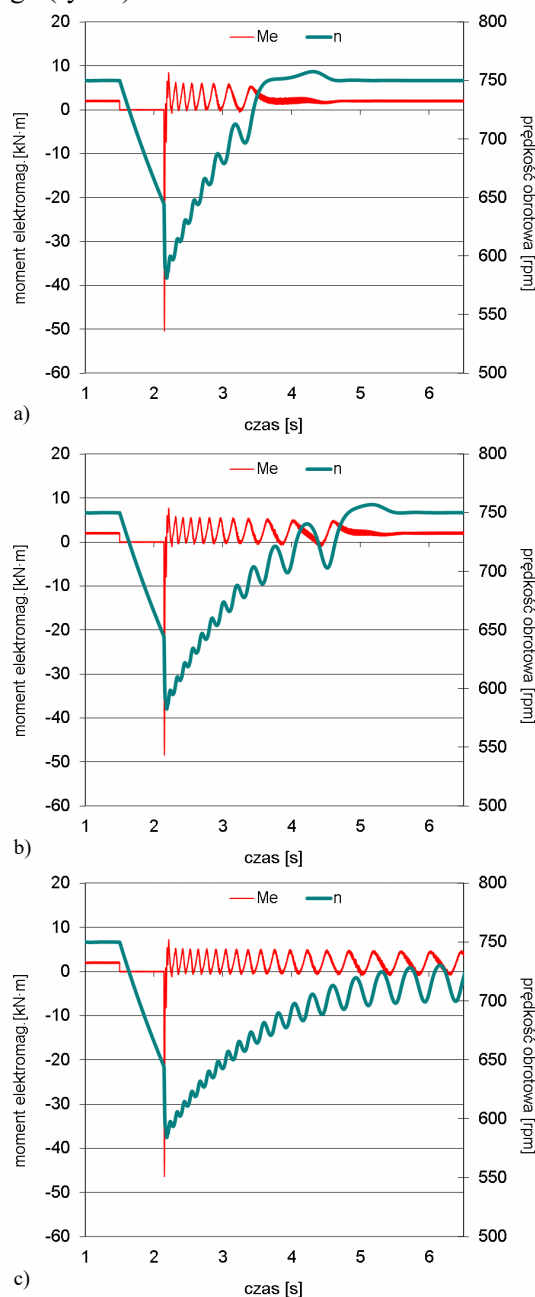


Rys. 2. Przebiegi czasowe wielkości podczas kontrolowanego ponownego załączenia silnika, $P_n=1,5\text{ kW}$, $2p=4$, przełączniki SSR-IO

Zagrożenia związane z niekontrolowanym załączeniem na sieć zasilającą wirujących silników LSPMSM zwiększają się wraz ze wzrostem mocy maszyny. Na przebieg i skuteczność procesu synchronizacji wpływa również okresowe zmniejszenie wartości ponownie załączanych napięć zasilających.

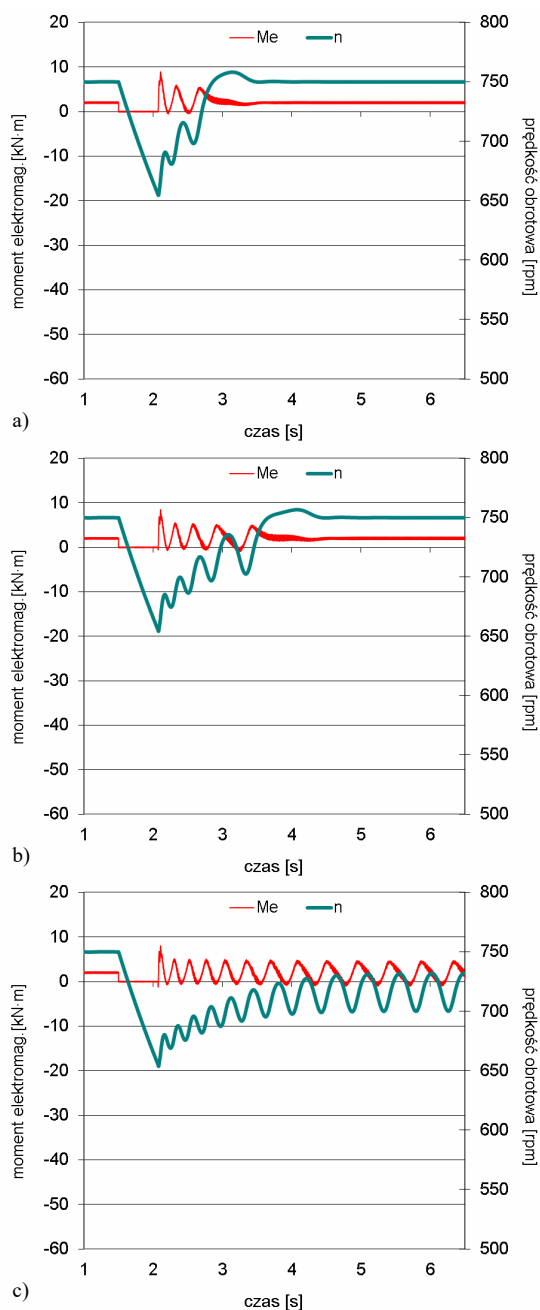
Na rysunkach 3 i 4 pokazano przebiegi czasowe momentu elektromagnetycznego i prędkości obrotowej podczas procesów ponownego załączenia silnika LSPMSM średniej mocy na sieć zasilającą, uwzględniając możliwe wystąpienie na obiekcie rzeczywistym okresowe zmniejszenie wartości napięć zasilających maszyny. W bada-

niach numerycznych (rys. 3 i 4) w chwili $t=1,5\text{ s}$ uwzględniono chwilowy zanik napięć zasilających z równoczesnym odłączeniem silnika. Ponowne załączenie silnika było realizowane w sposób niekontrolowany (rys. 3) oraz z wykorzystaniem opracowanego algorytmu sterowania i z uwzględnieniem półprzewodnikowych przełączników SSR o charakterystyce ZS załączających "w zerze" napięcia [3] oraz załączające w dowolnej chwili (IO), czyli bezwzględnie po pojawieniu się sygnału sterującego (rys. 4).



Rys. 3. Przebiegi czasowe wielkości podczas niekontrolowanego ponownego załączenia silnika, $P_n=160\text{ kW}$, $2p=8$

W analizach numerycznych, których wyniki przedstawiono na rysunkach 3 i 4, przyjęto również zmniejszenie wartości napięć zasilających, po ponownym załączeniu sieci zasilających, odpowiednio o 10% (a), 15% (b) oraz 20% (c) w odniesieniu do wartości znamionowej.



Rys. 4. Przebiegi czasowe wielkości podczas kontrolowanego ponownego załączenia silnika, $P_n=160\text{ kW}$, $2p=8$, przekaźniki SSR-IO

Niekontrolowane przypadkowe załączenia badanego silnika średniej mocy na sieć zasilającą wywołało spodziewane niedopuszczalne przebiegi chwilowe obserwowanych wartości

(rys. 3). Zastosowanie przekaźników sterujących SSR o charakterystyce IO dzięki bardzo dobrym parametrom łączeniowym (czas załączenia poniżej 0,1 ms) zapewnia ograniczenie niekorzystnych uderów prądów oraz momentu silnika i łagodną synchronizację w krótkim czasie po powrocie napięć zasilających (rys. 4a, 4b) lub ustalenie się pracy asynchronicznej silnika w wyniku okresowego zmniejszenia wartości napięć zasilających maszyny (rys. 3c, 4c). Ponowny proces synchronizacji badanego silnika synchronicznego średniej mocy z ustalonej pracy asynchronicznej, w wyniku zmiany wartości załączanych napięć zasilających uzwojenia stojana na wartość znamionową, przebiega skutecznie bez zakłóceń. Zagadnienie to będzie analizowane w dalszych badaniach nad synchronizacją silników LSPMSM.

3. Wnioski

Zastosowany układ sterowania [3] zapewnia łagodne załączenie wirującego silnika LSPMSM na sieć zasilającą po chwilowym zaniku napięć zasilających oraz łagodną synchronizację silnika w krótkim czasie lub ustalenie się pracy asynchronicznej maszyny. Zaproponowane rozwiązanie zapewnia skuteczność analizowanego procesu, szczególnie w zakresie małych wartościach poślizgu silnika, bez konieczności zatrzymania i dokonania ponownego rozruchu, co zapewnia zachowanie ciągłości procesów technologicznych produkcji oraz pracy w systemach ruchu ciągłego. Opracowany układ sterowania zapewnia skuteczność analizowanego procesu, niezależnie od mocy silnika. Podstawowym ograniczeniem w silnikach średniej i dużej mocy pozostają dostępne układy łącznikowe, ze względu na ich czas działania oraz ograniczone zakresy prądowe.

Obliczenia wykonano przy użyciu zasobów udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe (<http://wcss.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, s. 155–163.

- [3]. P. Zalas, J. Zawilak, "Samoczynne ponowne załączenie silników LSPMSM", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 3, s. 129–132, 2016.
- [4]. P. Zalas, T. Zawilak, J. Zawilak, "Synchronization process of permanent magnet synchronous motor from over synchronous speed", 10.1109/WZEE.2015.7394041, *IEEE* 2015.
- [5]. J. Zawilak, T. Zawilak, "Energooszczędne silniki synchroniczne dużej mocy wzbudzone magnesami trwałymi", *Przegląd Elektrotechniczny*, 10/2015, s. 117–120.
- [6]. J. Zawilak, T. Zawilak, "High efficiency permanent magnet synchronous motor", *Przegląd Elektrotechniczny*, 1/2014, s. 224–226.
- [7]. T. Zawilak, J. Zawilak, "Properties and parameters of the synchronous motors with permanent magnets", *Przegląd Elektrotechniczny*, 11/2017, s. 94–97.
- [8]. T. Zawilak, J. Zawilak, "Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie młyna kulowego", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 3, s. 169–173, 2016.
- [9]. T. Zawilak, J. Zawilak, "Synchronous motors excited by permanent magnets in high power drives", *Przegląd Elektrotechniczny*, 2/2017, s. 173–176.
- [10]. T. Zawilak, J. Zawilak, "Wpływ warunków zasilania na parametry eksploatacyjne silnika z magnesami trwałymi", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 108, s. 185–190, 2015.
- [11]. T. Zawilak, "Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie pompy dużej mocy", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 106, s. 247–251, 2015.
- [12]. T. Zawilak, "Składowa przemiana momentu podczas rozruchu bezpośredniego silnika z magnesami trwałymi", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 2, s. 247–250, 2017.
- [13]. 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