

Paweł Zalas, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

WPLYW PRZEMIENNEGO NAPIĘCIA WZBUDZENIA NA SYNCHRONIZACJĘ DWUBIEGOWEGO SILNIKA SYNCHRONICZNEGO

INFLUENCE OF AC EXCITATION VOLTAGE ON SYNCHRONIZATION OF TWO-SPEED SYNCHRONOUS MOTOR

Abstract: The paper presents the calculation results of synchronization processes through AC and DC excitation voltage for a selected model of two-speed synchronous motor with switchable armature and field magnet windings. The synchronous motor type GAe 1716/20t is used for driving the main fans type WPK 5.3 in deep underground mines. The effect of the instant of starting synchronization out of asynchronous operation and greater than nominal value of excitation voltage on the process's effectiveness and the dynamic waveforms was presented. The influence of AC excitation voltage on armature current, field current, field-winding-terminal voltage, electromagnetic torque and rotational speed during synchronization processes has been demonstrated. The calculation results are presented as diagrams over time.

1. Wstęp

Zwiększenie skuteczności procesu synchronizacji silników synchronicznych o wzbudzeniu elektromagnetycznym uzyskuje się powszechnie przez okresowe zwiększenie napięcia stałego (forsowanie prądu) zasilającego obwód magneśnicy. Coraz częściej stosowane są również układy łagodnej synchronizacji zapewniające załączenie napięcia wzbudzenia w wybranej, nie przypadkowej chwili, dla kąta $\delta = 0^\circ$, gdzie δ jest kątem między osią pola stojana, a osią pola wirnika. Ta metoda synchronizacji nie uwzględnia jednak zmiennych warunków pracy układu napędowego a przyjęta chwila rozpoczęcia procesu dla rozruchów ciężkich może okazać się niekorzystną. Prawidłowe i skuteczne działanie układu łagodnej synchronizacji wymaga również zainicjowania procesu w warunkach pracy asynchronicznej ustalonej, co dodatkowo wydłuża czas synchronizacji.

Wzajemne położenie biegunów pola stojana i pola wirnika w chwili załączenia napięcia wzbudzenia ma szczególne znaczenie podczas synchronizacji silników dwubiegowych, w których dla jednej z prędkości obrotowych liczba biegunów magnetycznych jest inna niż liczba biegunów mechanicznych [1, 3, 7]. Proces synchronizacji takich maszyn, pomimo zastosowania układów łagodnej synchronizacji oraz forsowania prądu wzbudzenia, nie zawsze przebiega skutecznie [3]. Wybór korzystnej chwili załączenia napięcia stałego do uzwojenia wzbudzenia zależy od wartości stałej czasowej

obwodu wzbudzenia, momentu obciążenia silnika, wypadkowego momentu bezwładności układu napędowego i jest różny dla różnych prędkości silnika dwubiegowego [3].

Skuteczną i łagodną synchronizację silnika w dogodnej chwili czasowej, bez konieczności analizy wzajemnego położenia osi pola stojana względem osi pola wirnika w chwili inicjacji procesu oraz bez forsowania prądu zapewnia synchronizacja napięciem przemiennym [5, 6]. Może to być realizowane przez modyfikację już zainstalowanej wzbudnicy statycznej i zastosowanie w obwodzie zasilania uzwojenia magneśnicy jednofazowego falownika napięcia. Umożliwia to zasilanie uzwojenia wzbudzenia, w stanie pracy asynchronicznej, napięciem przemiennym o częstotliwości zgodnej z przebiegiem napięcia indukowanego w uzwojeniu magneśnicy.

Celem pracy jest wykazanie wpływu przemiennej napięcia wzbudzenia na przebieg i skuteczność procesu synchronizacji dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe 1716/20t. Zaproponowaną metodę synchronizacji porównano z metodą klasyczną.

2. Obliczenia przebiegu procesu synchronizacji

W celu analizy wpływu przyjętej metody na przebieg procesu synchronizacji wykonano odpowiednie obliczenia, wykorzystując opracowany polowo-obwodowy model silnika typu

GAe 1716/20t [3, 4]. Podstawowe parametry badanego silnika pokazano w tabeli 1. Silniki tego typu stosowane są w napędach wentylatorów głównych typu WPK 5.3 kopalni podziemnych. Model obliczeniowy został zweryfikowany na podstawie pomiarów rzeczywistego silnika. Porównanie wielkości obliczonych i pomierzonych pozwoliło stwierdzić, że opracowany model polowo-obwodowy jest poprawny [3, 4].

Tabela 1.

Dane znamionowe dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe 1716/20t

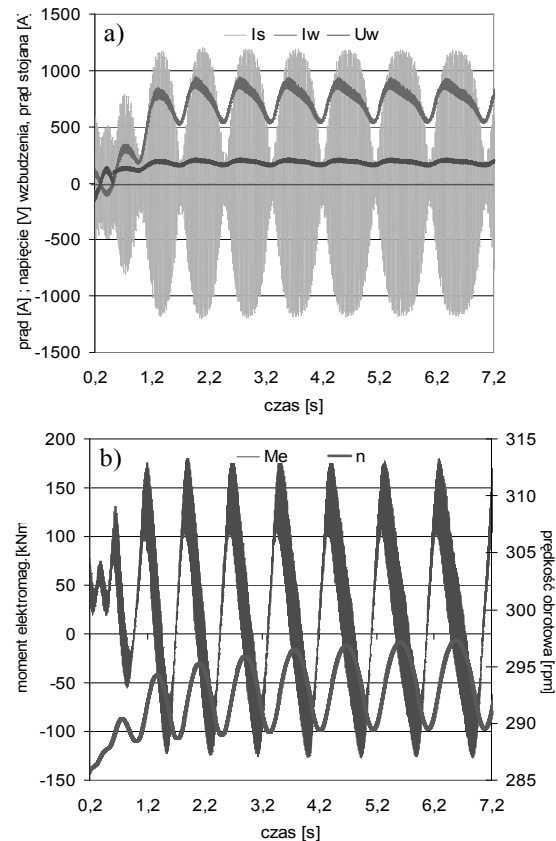
moc znamionowa	kW	2600	1200
napięcie stojana	V	6000 YY	6000 Y
prąd stojana	A	292	186
napięcie wzbudzenia	V	86	78
prąd wzbudzenia	A	337	300
prędkość obrotowa	obr/min	375	300
współczynnik mocy	-	0,9 poj.	0,77 ind.
sprawność	%	95,5	81,0

Na rysunkach 1- 4 pokazano obliczone przebiegi czasowe prądu stojana I_s , prądu wzbudzenia I_w , napięcia U_w na zaciskach uzwojenia wzbudzenia (a), prędkości obrotowej oraz momentu elektromagnetycznego (b) podczas procesów synchronizacji badanego silnika do mniejszej prędkości obrotowej, $p=10$. Dla tej prędkości obrotowej silnika dwubiegowego liczba biegunów mechanicznych jest inna niż liczba biegunów magnetycznych (odpowiednio 16 i 20) [1]. Powoduje to wzrost elektromechanicznej stałej czasowej układu napędowego oraz duży poślizg silnika podczas biegu asynchronicznego [3], co ma znaczący wpływ na przebieg procesu synchronizacji.

Na rysunku 1 pokazano wyniki obliczeń procesu synchronizacji, w którym napięcie stałe o wartości $2,5U_{wn}$ załączono dla kąta $\delta = 0^\circ$ i prędkości $n \approx 286$ obr/min. W obliczeniach przyjęto moment obciążenia $0,45 M_n$, co odpowiada obciążeniu, jakie na obiekcie rzeczywistym stanowi wentylator WPK 5.3 przy zamkniętych klapach aparatu kierowniczego [3], oraz uwzględniono wypadkowy moment bezwładności układu napędowego wentylatora $J_z \approx 40\,000$ kg·m² [3].

Rozpoczęcie procesu dla dużej wartości poślizgu silnika ($n \approx 286$ obr/min), pomimo znaczącej wartości prądu wzbudzenia, spowodowało

nie skutecznego przebiegu synchronizacji, zarówno podczas pierwszej jak i kolejnych współfazywości pola stojana oraz wirnika. Silnik utknął na prędkości podsynchronicznej (rys. 1) i ustaliła się praca asynchroniczna wzbudzonej maszyny synchronicznej [2], charakteryzująca się znaczącymi pulsacjami momentu i prędkości oraz dużymi udarami prądów silnika.

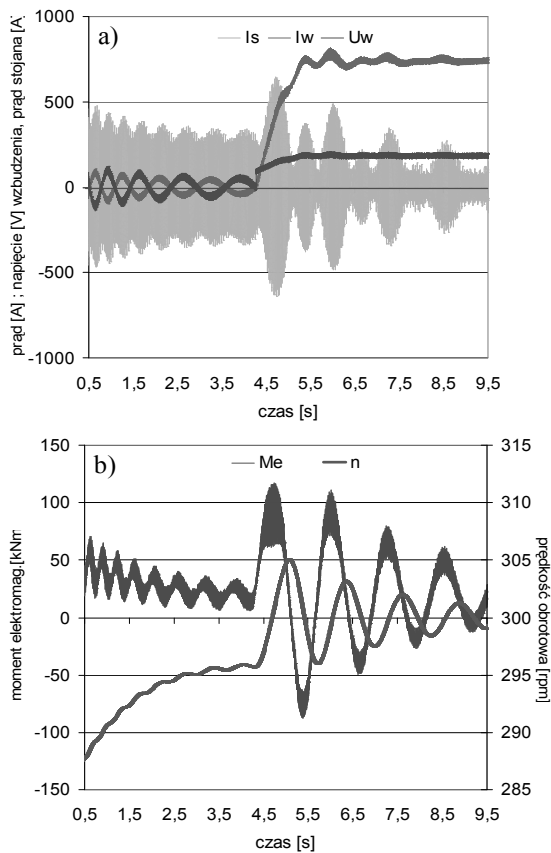


Rys. 1. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości $n \approx 286$ obr/min i forsowania prądu, $p=10$

Na rysunku 2 pokazano wyniki obliczeń procesu synchronizacji badanego silnika dwubiegowego, rozpoczętego w stanie pracy asynchronicznej ustalonej ($n \approx 296$ obr/min). W obliczeniach załączenie napięcia stałego o wartości $2,5 U_{wn}$ do uzwojenia wzbudzenia nastąpiło dla kąta $\delta = 0^\circ$ (rys. 2). Taki przebieg ma każdorazowo proces synchronizacji realizowany obecnie na obiekcie rzeczywistym, podczas każdego rozruchu silnika z zastosowaniem układu łagodnej synchronizacji i forsowania prądu wzbudzenia.

Przyjęta metoda synchronizacji silnika zapewniła skutecznego przebiegu procesu podczas pierwszej współfazywości pola twornika i magnetycznego. Forsowanie prądu wzbudzenia wywołało

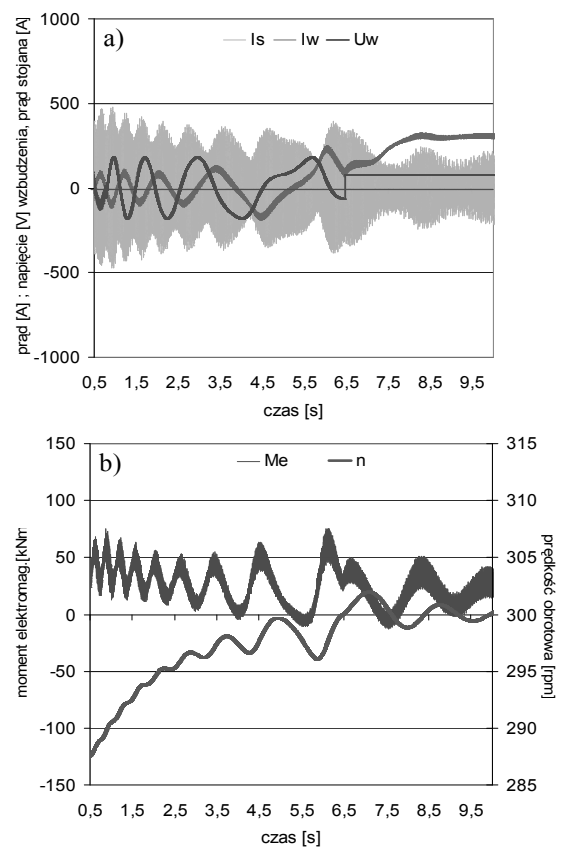
jednak znaczne pulsacje prędkości (rys. 2) i udary prądów stojana oraz duże amplitudy zmian wartości chwilowych momentu elektromagnetycznego. Duże oscylacje prędkości (rys. 2b) wokół wartości synchronicznej powodują, że czas ustalenia się procesów przejściowych, a tym samym czas synchronizacji, ulega znacznemu wydłużeniu. Znaczące zmiany wartości chwilowej momentu silnika mogą również wywoływać niekorzystne udary mechaniczne na wale maszyny roboczej, co powoduje dodatkowe obciążenie łożysk i ich szybsze zużycie.



Rys. 2. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika rozpoczętej w warunkach pracy asynchronicznej ustalonej i forsowania prądu, $p=10$

Na rysunku 3 pokazano wyniki obliczeń procesu synchronizacji dla identycznych warunków pracy jak poprzednio, uwzględniając w modelu silnika napięcie przemiennie, o amplitudzie 180V, zasilające obwód magnetyczny. Po osiągnięciu przez silnik prędkości synchronicznej nastąpiło załączenie stałego napięcia wzbudzenia o wartości znamionowej. W celu zwiększenia czytelności pokazanych wyników obli-

czeń rzeczywisty przebieg napięcia na wyjściu falownika zastąpiono napięciem uśrednionym. Zastosowanie zaproponowanej metody synchronizacji pozwoliło zmniejszyć amplitudy zmian wartości chwilowych momentu elektromagnetycznego oraz prędkości i udary prądów stojana w chwili osiągnięcia przez silnik prędkości synchronicznej (rys. 3). Zasilanie uzwojenia wzbudzenia w stanie pracy asynchronicznej napięciem przemiennym wywołało stopniowe zwiększenie prędkości obrotowej, zapewniając łagodną synchronizację silnika oraz krótki czas ustalenia się przebiegów dynamicznych.

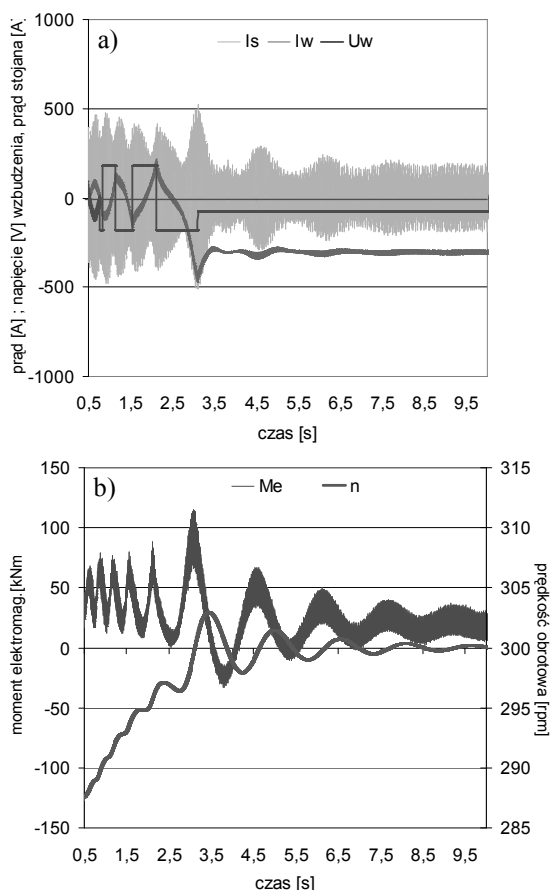


Rys. 3. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika napięciem zmiennym, $p=10$

Skrócenie czasu osiągnięcia przez silnik prędkości synchronicznej, przy jednoczesnym zwiększeniu skuteczności przyjętej metody synchronizacji podczas ciężkich rozruchów, można uzyskać przez odpowiednie przesunięcie w fazie napięcia przemiennego na wyjściu falownika względem napięcia indukowanego w uzwojeniu wzbudzenia [5, 6]. Przyjęty kształt napięcia na wyjściu falownika jako sinusoidalny istotnie wpływa na przebieg prądu wzbudzenia, a przez to na przebiegi wartości chwi-

lowych momentu silnika oraz prędkości obrotowej. Sinusoidalny kształt napięcia zapewnia łagodny przebieg zmian wartości obserwowanych wielkości. Zastosowanie prostokątnego przebiegu napięcia na wyjściu falownika zwiększa szybkość zmian prądu wzbudzenia, co ma istotny wpływ na przebieg procesu synchronizacji.

Na rysunku 4 pokazano wyniki obliczeń procesu synchronizacji dla identycznych warunków pracy badanego silnika oraz prostokątnego przebiegu napięcia przemienne, o amplitudzie 180V, zasilającego obwód magnetyczny. Przyjęto przesunięcie fazowe, o wartości 15°, napięcia na wyjściu falownika w stosunku do napięcia indukowanego w uzwojeniu wzbudzenia (napięcie falownika wyprzedza napięcie indukowane).



Rys. 4. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika odpowiednio dopasowanym napięciem zmiennym o kształcie prostokątnym, $p=10$

Przyjęte parametry napięcia przemienne na wyjściu falownika, zasilającego uzwojenie magnetyczne zapewniły skuteczny i łagodny przebieg procesu synchronizacji (rys. 4). Prosto-

kątny kształt napięcia falownika zapewnił znacznie szybsze zmiany wartości prądu wzbudzenia, skracając czas jego narostu oraz zanikania. Wzrost szybkości zmian prądu istotnie skrócił czas procesu, nie wywołując przy tym gwałtownych zmian w przebiegu wartości chwilowych momentu oraz prędkości obrotowej silnika, co mogłoby być powodem niekorzystnych udarów mechanicznych na wale maszyny roboczej.

3. Wnioski

Synchronizacja dwubiegowego silnika synchronicznego dużej mocy odpowiednio dobranym napięciem przemienne zapewnia znaczne skrócenie czasu procesu, łagodząc przebiegi dynamiczne odpowiednich wielkości. Pewna i łagodna synchronizacja silnika następuje w dogodnej chwili czasowej i w najkrótszym możliwym czasie po dokonaniu przez silnik rozruchu.

4. Literatura

- [1]. Antal L., Zawilak J.: *Pole magnetyczne synchronicznego silnika jawnobiegowego o dwóch prędkościach obrotowych*. Prace Nauk. IMNiPE PWr. nr 44, Studia i Mat. nr 19, 1996, s. 11-20.
- [2]. Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemienne*. Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998r.
- [3]. Zalas P.: *Analiza procesu synchronizacji silników synchronicznych z rozruchem asynchronicznym*. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2007.
- [4]. Zalas P., Zawilak J.: *Dwubiegowy silnik synchroniczny w ujęciu polowo-obwodowym*. Prace Nauk. IMNiPE PWr. nr 56, Studia i Materiały nr 23, 2003, s. 65-77.
- [5]. Zalas P., Zawilak J.: *Falownik napięcia w obwodzie wzbudzenia silnika synchronicznego dużej mocy*, Przegląd Elektrotechniczny, 2008, nr 12, s. 119-121.
- [6]. Zalas P., Zawilak J.: *Synchronizacja silników synchronicznych napięciem przemienne*, SME 2008, Prace Nauk. IMiNE. PWr. nr 62, S. i Mat. nr 28, 2008, s. 542-548.
- [7]. Zawilak J.: *Uzwojenia zmiennobiegowe maszyn elektrycznych prądu przemienne*. Prace Naukowe IMiNE. PWr. 1986.

Autorzy

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