

Paweł Zalas, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

SYNCHRONIZACJA SILNIKÓW DWUBIEGOWYCH Z ZAMKNIĘTYM UKŁADEM REGULACJI PRĄDU WZBUDZENIA

SYNCHRONIZATION PROCESS OF TWO-SPEED MOTORS WITH CLOSE-LOOP EXCITATION CURRENT CONTROL SYSTEM

Abstract: The work presents calculation results of synchronization process of a two-speed, silent-pole, high power synchronous motor. The calculations were based on the examined two-dimensional, field-circuit model for the high power motor, type GAe 1716/20t with switchable configuration connection of armature winding and field magnet. The motor is applied in fan drives in underground mines. The influence of the excitation voltage value greater than nominal and nominal during synchronization process on stator currents, excitation current, electromagnetic torque and rotational speed was examined. The influence of constant excitation voltage value and close-loop excitation current control on synchronization process have been compared. Dynamic diagrams of stator currents, excitation current, excitation voltage, electromagnetic torque and rotational speed during synchronization process as results of computer simulation are presented.

1. Wstęp

Najkorzystniejszą metodą regulacji wydajności wentylatorów głównych kopalni podziemnych, ze względu na charakterystykę sprawności [1], jest zmiana prędkości obrotowej maszyny napędowej. W napędach tych stosowane są dwubiegowe silniki synchroniczne dużej mocy o wzbudzeniu elektromagnetycznym. Skokowa zmiana prędkości obrotowej zapewnia wystarczającą regulację wydajności oraz zmniejszenie o ponad połowę mocy pobieranej przez wentylator. Ze względu na koszty przeprowadza się modernizację już pracujących silników jednobiegowych, polegającą na zastosowaniu przełączalnego uzwojenia stojana oraz przełączeniu uzwojenia wirnika (z zastosowaniem drugiej tulei pierścieniowej) [6]. W wyniku takiej modernizacji uzyskuje się zmianę liczby biegunów pola magnetycznego (np. z 16 na 20) i tym samym dwie prędkości obrotowe. Ponieważ maszyny te mają jawnobiegunową konstrukcję wirnika, to dla jednej prędkości obrotowej liczba biegunów mechanicznych jest inna niż liczba biegunów magnetycznych. Powoduje to znaczny wzrost elektromechanicznej stałej czasowej silnika na tej prędkości obrotowej. Zastosowanie w obwodzie wzbudzenia silnika dwubiegowego wzbudnicy statycznej z układem łagodnej synchronizacji, umożliwiającym załączenie napięcia stałego w korzystnej chwili czasowej [3], zapewnia skuteczną synchronizację do obu prędkości synchronicznych [4, 5]. Duża wartość wypadkowego momentu bezwładności

układu napędowego wentylatora, dziesięciokrotnie większa od momentu inercji silnika napędowego oraz stała wartość napięcia wzbudzenia powodują, że proces synchronizacji nie kończy się jednak z chwilą osiągnięcia przez silnik prędkości synchronicznej [5]. Sprężyste wzajemne oddziaływanie momentu synchronicznego i momentu mechanicznego oraz momentu bezwładności powodują znaczące oscylacje prędkości wokół wartości ustalonej. Wywołuje to znaczne pulsacje momentu elektromagnetycznego i kilkukrotne wydłużenie czasu procesu. Wzrost prądu wzbudzenia prowadzi do zwiększenia wartości momentu synchronizującego [4], ale wywołuje również duże zmiany wartości chwilowej momentu na wale maszyny roboczej. Skuteczną synchronizację silnika przy jednoczesnym znacznym skróceniu czasu ustalenia się przebiegów dynamicznych można uzyskać przez odpowiednie sterowanie wartością prądu wzbudzenia od chwili inicjacji procesu.

Celem pracy jest wykazanie możliwości minimalizowania pulsacji prędkości obrotowej oraz znacznego skrócenia czasu trwania stanów przejściowych podczas procesu synchronizacji na przykładzie dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe 1716/20t. Zaproponowano zamknięty układ regulacji prądu wzbudzenia, sterowany w funkcji wartości chwilowej prędkości obrotowej silnika oraz pokazano wyniki

obliczeń przebiegu procesu synchronizacji dla wybranych nastaw regulatorów.

2. Obliczenia procesu synchronizacji

Analizę procesu synchronizacji przeprowadzono wykorzystując opracowany model polowo-obwodowy silnika typu GAe 1716/20t [4, 5]. Podstawowe parametry silnika zestawiono w tabeli 1. Maszyny takie pracują w napędach wentylatorów głównych typu WPK 5.3 kopalni podziemnych. W celu weryfikacji modelu obliczeniowego wykonano pomiary badanego silnika zainstalowanego w stacji wentylatorowej zakładu górniczego. Na podstawie porównania wielkości obliczonych i pomierzonych stwierdzono, że opracowany model polowo-obwodowy dwubiegowego silnika synchronicznego jest poprawny [5].

Tabela 1.

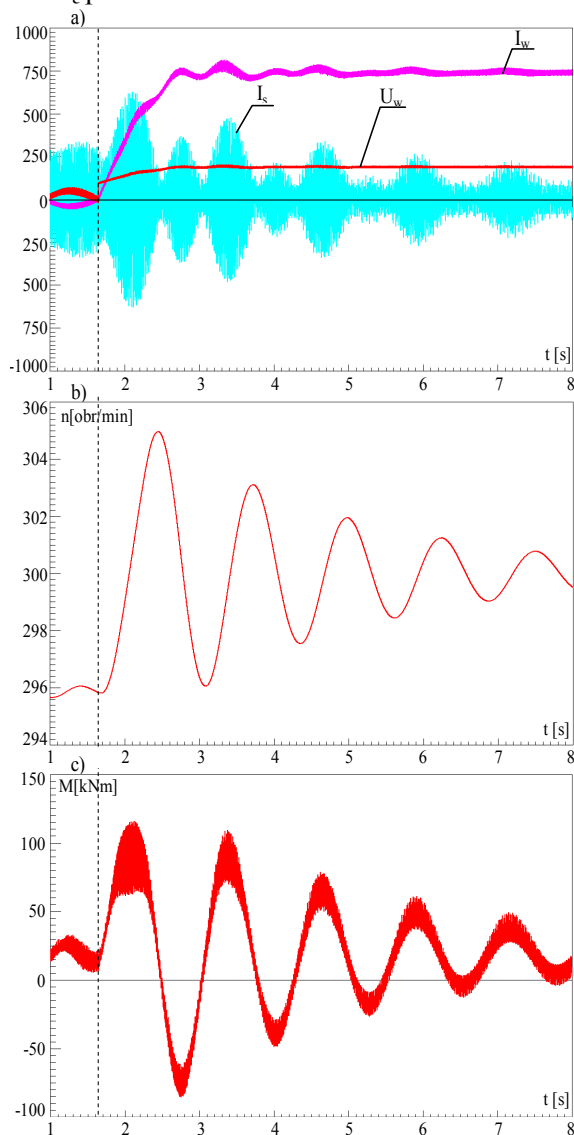
Dane znamionowe dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe 1716/20t

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, 2 i 4 pokazano obliczone przebiegi czasowe prądu stojana I_s , prądu wzbudzenia I_w , napięcia U_w na zaciskach uzwojenia wzbudzenia (a), prędkości obrotowej (b) oraz momentu elektromagnetycznego (c) podczas synchronizacji badanego silnika dla różnych wartości prądu wzbudzenia. Linia przerywaną zaznaczono chwilę inicjacji procesu.

Stosowane obecnie wzbudnice statyczne wyposażone są coraz częściej w zamknięty układ regulacji prądu wzbudzenia. Jego zadaniem jest programowa regulacja prądu podczas synchronizacji oraz jego stabilizacja podczas pracy ustalonej. Sterowanie programowe zapewnia, na określony czas (5-10 sekund), forsowanie prądu wzbudzenia, często do wartości większej od $2,5I_{wn}$ niezależnie od przebiegu procesu synchronizacji. Wyniki obliczeń dla tego sposobu synchronizacji i mniejszej prędkości obrotowej silnika dwubiegowego pokazano na rysunku 1.

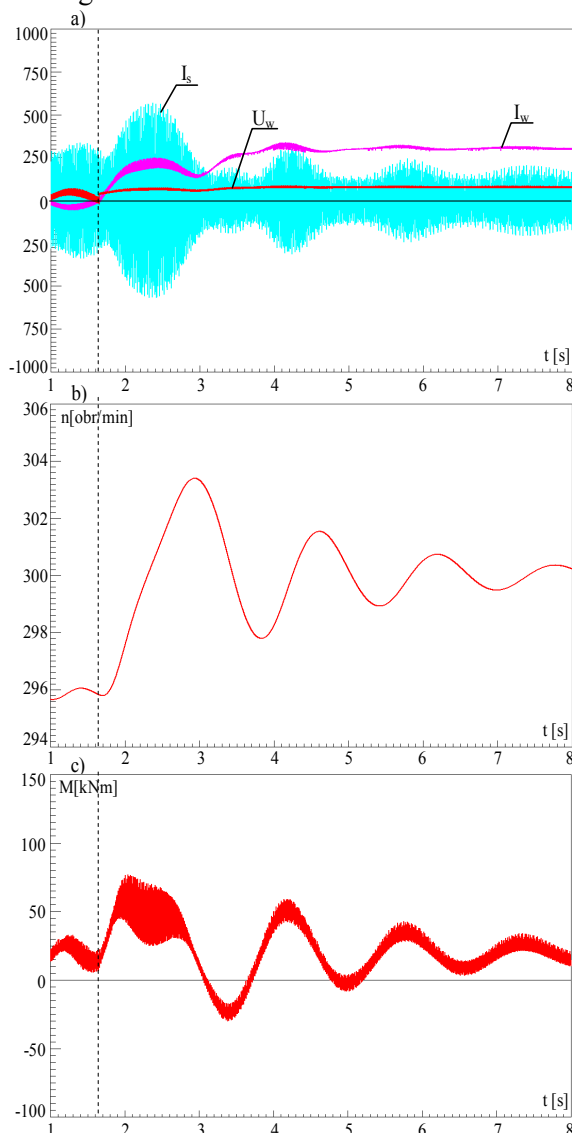
W obliczeniach przyjęto moment obciążenia $0,4 M_n$ oraz wypadkowy moment bezwładności układu napędowego wentylatora $J_z \approx 40\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, a proces synchronizacji został zainicjowany dla wartości kąta $\delta = 0^\circ$, gdzie δ jest kątem między osią pola stojana, a osią pola wirnika.



Rys. 1. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika i forsowania prądu wzbudzenia $2,5I_{wn}$, $p=10$

Przyjęty algorytm sterowania prądem wzbudzenia zapewnia skuteczną synchronizację silnika niezależnie od wzajemnego położenia osi pola stojana względem osi pola wirnika w chwili inicjacji procesu (rys. 1). Forsowanie prądu wzbudzenia pozwala na zwiększenie momentu synchronizującego, lecz powoduje znaczne pulsacje prędkości i udary prądów stojana oraz duże amplitudy zmian wartości chwilowych

momentu elektromagnetycznego (rys. 1c). Wywołuje to przeciążenia układu mechanicznego, co ma niekorzystny wpływ na bezawaryjną eksploatację układu napędowego. Duże oscylacje prędkości (rys. 1b) powodują, że czas ustalenia się procesów przejściowych, a tym samym czas synchronizacji, ulega znacznemu wydłużeniu. Uzyskanie tak dużej wartości prądu wzbudzenia wymaga również zwiększenia mocy urządzeń zasilających obwód wzbudzenia, mimo, że ich czas pracy jest krótki. Pełne wykorzystanie możliwości tych urządzeń odbywa się jedynie przez kilka sekund podczas każdego rozruchu silnika.



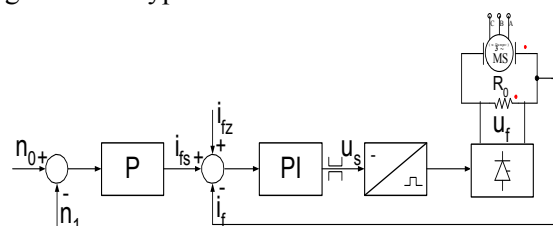
Rys. 2. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika i znamionowego prądu wzbudzenia, $p=10$

Na rysunku 2 pokazano wyniki obliczeń, dla identycznych warunków pracy silnika i zna-

mionowej, stałej wartości napięcia wzbudzenia. Widoczne na rysunku 2 pulsacje prądu I_w są wynikiem indukowanej składowej przemiennej napięcia w uzwojeniu magnesnicy podczas zmian wartości chwilowych poślizgu.

Wybór korzystnej chwili inicjacji procesu oraz znamionowa wartość napięcia wzbudzenia zapewniają skuteczną synchronizację silnika podczas pierwszej współfazowości pól stojana i wirnika (rys. 2). Stała wartość napięcia załączonego do uzwojenia wzbudzenia, w trakcie całego procesu synchronizacji, powoduje jednak duże chwilowe nadwyżki momentu elektromagnetycznego nad momentem obciążenia. Wywołuje to duże pulsacje prędkości obrotowej oraz występowanie zmiennego momentu o dużej amplitudzie na wale maszyny roboczej. Ma to niekorzystny wpływ na przebieg eksploatacji układu napędowego zwiększając zużycie łożysk oraz wytwarzając siły dynamiczne w uzwojeniach stojana. Czas ustalenia się przebiegów dynamicznych (rys. 2) jest znacznie dłuższy od czasu, w jakim silnik osiąga prędkość synchroniczną po rozpoczęciu procesu i wynosi ponad 7 sekund.

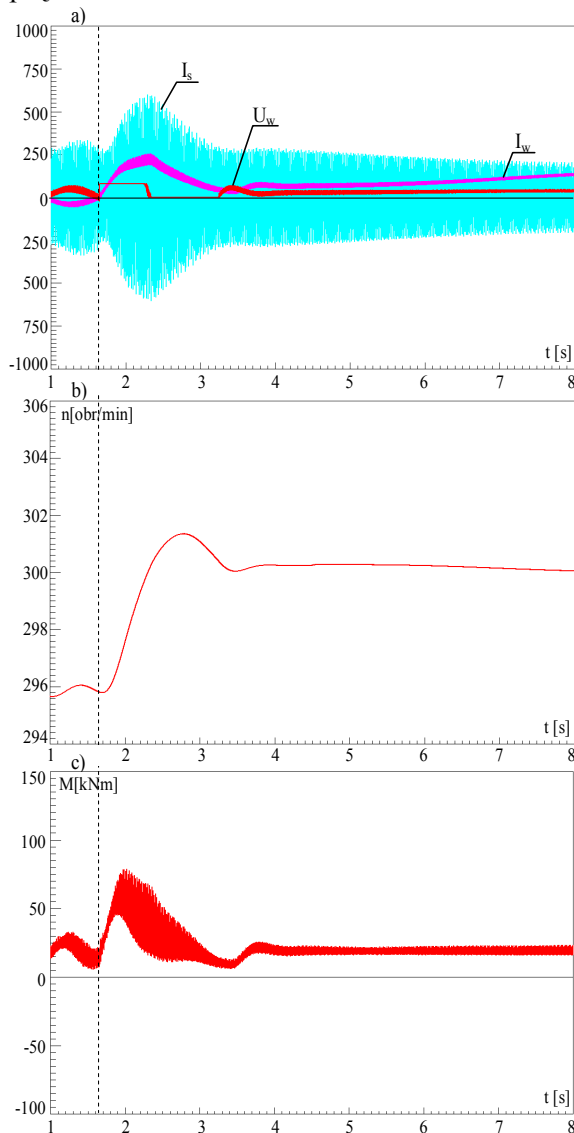
Skrócenie stanów przejściowych podczas procesu synchronizacji można uzyskać przez zmianę wartości prądu wzbudzenia z wykorzystaniem zamkniętego układu regulacji, sterowanego w funkcji prędkości obrotowej silnika. Na rysunku 3 pokazano przykładową strukturę układu regulacji z szeregowo połączonymi regulatorami typu P i PI.



Rys. 3. Schemat zamkniętego układu regulacji prądu wzbudzenia

Przedstawiony układ regulacji prądu wzbudzenia ma strukturę hierarchiczną, w której nadrzędnym jest człon stabilizacji prędkości obrotowej [2]. Układ pracuje z dwoma pętlami zwrotnymi: od prędkości obrotowej n_1 oraz od prądu wzbudzenia i_f . Załączenie układu następuje w chwili inicjacji procesu. Na rysunku 4 pokazano wyniki obliczeń odpowiednich wielkości podczas synchronizacji badanego silnika

z zastosowaniem zamkniętego układu regulacji prądu wzbudzenia.



Rys. 4. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika i zamkniętego układu regulacji prądu wzbudzenia, $p=10$

Zastosowanie zamkniętego układu regulacji pozwoliło znacznie skrócić czas procesu synchronizacji silnika w stosunku do metody forsowania prądu wzbudzenia (rys. 1 i 4). Znacząco zredukowano pulsacje momentu elektromagnetycznego ograniczając je do wartości dodatnich (rys. 4c). W przebiegu czasowym prędkości wirnika praktycznie nie występują oscylacje, a prędkość synchroniczna ustala się po upływie ok. 3 sekund od chwili rozpoczęcia procesu. Odpowiedni dobór nastaw regulatorów oraz duża wartość momentu bezwładności badanego układu napędowego powodują, że po załączeniu napięcia wzbudzenia silnik osiąga prędkość

nieznacznie większą od synchronicznej (rys. 4b). Zapewnia to warunki do łagodnej synchronizacji silnika od prędkości nadsynchronicznej, co zwiększa pewność procesu. Przyjęte w obliczeniach ograniczenie napięcia na wyjściu regulatora PI (rys. 3) zapewnia regulację prądu wzbudzenia w zakresie od 0 do wartości znamionowej. Pozwala to na uzyskanie wystarczającej szybkości układu regulacji bez konieczności okresowej zmiany polaryzacji napięcia stałego [5] lub forsowania prądu wzbudzenia.

3. Wnioski

Analiza wyników wykonanych obliczeń wykazała, że zastosowanie układu regulacji prądu wzbudzenia podczas synchronizacji silnika synchronicznego pozwala na łagodzenie stanów przejściowych i znaczne skrócenie czasu procesu. Zamknięty układ regulacji prądu magnetyczny zapewnia szybkie ustalenie się prędkości silnika minimalizując pulsacje momentu elektromagnetycznego i udary prądów stojana.

Literatura

- [1]. Antal L., Zawilak J.: *Dwubiegowy silnik synchroniczny - aspekty techniczne i ekonomiczne*, XXXVII SME, 19-22 czerwca 2001, Ustroń-Zawodzie, s. 353-360.
- [2]. Kaczmarek T., Zawirski K.: *Układy napędowe z silnikiem synchronicznym*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2000.
- [3]. Sobczyk T.: *Łagodna synchronizacja silników synchronicznych dużych mocy z asynchronicznego stanu pracy*, XX SME, Maszyny synchroniczne, Kazimierz Dolny, s. 28-29, 1984.
- [4]. Zalas P., Zawilak J.: *Wybór chwili załączenia napięcia wzbudzenia podczas synchronizacji silników synchronicznych*, Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel nr 71, s. 59-64, 2005.
- [5]. Zalas P.: *Analiza procesu synchronizacji silników synchronicznych z rozruchem asynchronicznym*, Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wroclaw 2007.
- [6]. Zawilak J.: *Uzwojenia zmiennobiegunowe maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Prace Naukowe IMiNE. PWr. 1986.

Adres Autorów

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