

Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi z rozruchem asynchronicznym

Przedmiotem wynalazku jest silnik synchroniczny z magnesami trwałymi z rozruchem asynchronicznym, który pracuje przy zasilaniu napięciem z sieci elektroenergetycznej o stałej wartości i stałej częstotliwości.

Znane są silniki asynchroniczne synchronizowane, tzw. SASy, są to silniki indukcyjne pierścieniowe. Rozruch silników odbywa się przy pomocy rezystorów rozruchowych włączanych w obwód uzwojenia wirnika poprzez pierścienie ślizgowe i szczotki. Prąd rozruchowy zwykle nie przekracza dwukrotnej wartości prądu znamionowego, przy czym moment rozruchowy jest znacząco większy od momentu znamionowego. Po rozruchu uzwojenie wirnika jest zasilane prądem stałym i silnik się samoczynnie synchronizuje, a po synchronizacji pracuje jako silnik synchroniczny. Zaletą tych silników, w stosunku do silników indukcyjnych pierścieniowych realizujących to samo zadanie, jest wyższa sprawność i $\cos\varphi$ pojemnościowy. Silniki te są stosowane w napędach dużej mocy i są zasilane bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej napięcie 6 kV lub 10 kV. Niedogodnością tego rozwiązania jest układ wzbudzenia, straty mocy w obwodzie wzbudzenia obniżają sprawność układu napędowego, ponadto pierścienie wymagają okresowego przeglądu i czyszczenia, a szczotki ścierają się i należy je wymieniać.

Znane jest rozwiązanie silnika synchronicznego z magnesami trwałymi z rozruchem asynchronicznym (Patent RP nr 218489, opubl. 31.12.2014 r.) według którego wirnik silnika ma zarówno magnesy trwałe jak i uzwojenie klatkowe. Magnesy trwałe są umieszczone w szczelinach w środku jarzma wirnika, a uzwojenie klatkowe składa się z prętów miedzianych umieszczonych w żłobkach na obwodzie zewnętrznym wirnika zwartych pierścieniami na czołach. Uzwojenie klatkowe służy do rozruchu asynchronicznego silnika. Gdy wirnik w czasie rozruchu osiągnie prędkość obrotową podsynchroniczną, to strumień magnetyczny magnesów trwałych samoczynnie synchronizuje go i silnik pracuje jako synchroniczny. Jednak w czasie rozruchu moment elektromagnetyczny asynchroniczny, generowany przez uzwojenie klatkowe, przy prędkościach od zera do około połowy prędkości znamionowej ($0 \leq n \leq 0,5n_N$), jest znacząco mniejszy od momentu znamionowego silnika, przy czym prąd rozruchowy jest od 5 do 7 razy większy od prądu znamionowego. W czasie pierwszego półokresu po załączeniu napięcia występuje prąd udarowy i moment udarowy, które przy niekorzystnej chwili załączenia napięcia, są znacznie większe. Ponadto w klatce wirnika wydziela się ciepło równe w przybliżeniu energii kinetycznej wszystkich mas wirujących sprzęgniętych z wałem silnika. Ciepło to powoduje wzrost temperatury klatki

wirnika i zagraża rozmagnesowaniu termicznemu magnesów trwałych. Rozmagnesowanie następuje już w temperaturze ($120^{\circ} - 150^{\circ}\text{C}$) i oczywiście wyższej. Silniki z uzwojeniem klatkowym mogą być stosowane do napędu urządzeń mechanicznych i maszyn roboczych o krótkich czasach rozruchu, np. do napędu pomp, w których moment obciążenia jest kwadratową funkcją prędkości obrotowej. Jednak wiele maszyn roboczych ma duży moment rozruchowy, niejednokrotnie większy od momentu znamionowego, przykładem są: taśmociągi z załadowaną taśmą, zasypane młyny węglowe w elektrowniach i elektrociepłowniach i w zakładach wzbogacania rud miedzi. Urządzenia mechaniczne i maszyny robocze o dużym momencie bezwładności charakteryzują się długimi czasami rozruchu, są to np. duże wentylatory przewietrzania kopalń, wentylatory wydmuchu spalin w elektrowniach i elektrociepłowniach i inne. Do napędu wymienionych urządzeń mechanicznych i maszyn roboczych nie można zastosować silnika z wirnikiem z magnesami trwałymi i uzwojeniem klatkowym. Problem rozruchu rozwiązuje uzwojenie rozruchowe pierścieniowe znane z patentu RP 226639 (ogłoszono 31.08.2017r.). W rozwiązaniu tym magnesy trwałe są umieszczone w szczelinach w jarzmie wirnika, a uzwojenie jest umieszczone w słóbkach na obwodzie wirnika. Uzwojenie jest trójfazowe wykonane z drutu miedzianego izolowanego i jest połączone w gwiazdę bądź w trójkąt, a końce faz są dołączone do trzech pierścieni ślizgowych umieszczonych na wale wirnika.

Przy pracy synchronicznej, silniki wykonane według wymienionych patentów, są dużej mocy i pracują przy zasilaniu napięciem bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej np. 6 kV lub 10 kV i mają, w stosunku do silników indukcyjnych realizujących to samo zadanie, większą sprawność energetyczną i współczynnik mocy $\cos\varphi \approx 1$, lecz ich przeciążalność momentem jest mała i mają tendencję wypadania z synchronizmu. Celem wynalazku jest zwiększyć przeciążalność momentem silników przy pracy synchronicznej i zachowaniu uzwojenia rozruchowego pierścieniowego.

Według wynalazku silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi z rozruchem asynchronicznym ma magnesy trwałe umieszczone w gniazdach na obwodzie zewnętrznym jarzma wirnika. Między magnesami różnej biegunowości są zęby jarzma wirnika. Uzwojenie rozruchowe jest umieszczone w słóbkach pod magnesami trwałymi. Magnesy trwałe każdego bieguna korzystnie składają się z n segmentów rozłożonych na łuku obwodowym jarzma wirnika, a każdy z segmentów jest umieszczony we własnym gnieździe, przy czym między segmentami są zęby jarzma wirnika. Uzwojenie wirnika korzystnie jest m fazowe pierścieniowe. Uzwojenie wirnika może być także klatkowe.

Przedmiot wynalazku jest zilustrowany przykładem rozwiązania na rysunkach przedstawiających: fig. 1 schemat ogólny silnika, fig. 2 wycinek dwubiegunowy jarzma wirnika z magnesami trwałymi niedzielonymi ($n = 1$) i trzema żłobkami, fig. 3 wycinek dwubiegunowy jarzma wirnika z magnesami trwałymi niedzielonymi ($n = 1$) i dwoma żłobkami, fig. 4 wycinek dwubiegunowy jarzma wirnika z magnesami trwałymi podzielonymi na dwa segmenty ($n = 2$) i jednym żłobku pod każdym segmentem oraz fig. 5 wycinek dwubiegunowy jarzma wirnika z magnesami trwałymi podzielonymi na trzy segmenty ($n = 3$) i jednym żłobku pod każdym segmentem.

Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi z rozruchem asynchronicznym jest zilustrowany na rysunku fig. 1. Silnik ma magnesy trwałe **3** umieszczone w gniazdach na obwodzie zewnętrznym jarzma wirnika **4**. Między magnesami **3** różnej biegunowości są zęby jarzma wirnika **4**. Uzwojenie **2** rozruchowe jest umieszczone w żłobkach **6** pod magnesami trwałymi **3**. Wzajemne usytuowanie magnesów trwałych **3** i uzwojenia jest pokazane na rysunkach fig. 2 do fig. 5. Na rysunku fig. 2 pokazano wycinek **5** dwubiegunowy jarzma wirnika **4** z magnesami trwałymi **3** niedzielonymi ($n = 1$). Magnesy trwałe **3** są umieszczone w gniazdach. Pod każdym magnesem **3** są trzy żłobki **6**. W żłobkach **6** pod magnesami **3** korzystnie jest umieścić uzwojenie trójfazowe ($m = 3$). W jednym żłobku **6** umieszczony jest bok uzwojenia **2** jednej fazy. Jest to uzwojenie **2** pierścieniowe. Końcówki uzwojenia **2** są wyprowadzone na pierścienie ślizgowe **8**. Pierścienie **8** są osadzone na tulei izolacyjnej **9**, która jest umieszczona na wale **7** silnika, jak to pokazano na rysunku fig. 1. Uzwojenie pierścieniowe **2** jest korzystne, gdyż rozruch silnika jest łagodny, wykonuje się go rezystorami rozruchowymi włączanymi poprzez szczotki i pierścienie **8**, identycznie jak w silnikach indukcyjnych pierścieniowych. Po rozruchu szczotki są podnoszone. W silnikach stosowanych do napędów maszyn roboczych o krótkim czasie rozruchu uzwojenie może być klatkowe. Na rysunku fig. 3 przedstawiono wycinek **5** dwubiegunowy jarzma wirnika **4** z magnesami trwałymi **3** niedzielonymi ($n = 1$). Magnesy trwałe **3** są umieszczone w gniazdach. Między biegunami magnesów są zęby jarzma wirnika **4**. Pod każdym magnesem **3** są dwa żłobki. W żłobkach **6** pod magnesami **3** korzystnie jest umieścić uzwojenie dwufazowe ($m = 2$). W jednym żłobku **6** jest umieszczony bok uzwojenia jednej fazy. Jest to uzwojenie **2** dwufazowe pierścieniowe. Końcówki uzwojenia **2** są wyprowadzone na pierścienie ślizgowe **8**. Dla silników przeznaczonych do napędów maszyn roboczych o krótkim czasie rozruchu w żłobkach **6** można umieścić uzwojenie klatkowe. Na rysunku fig. 4 przedstawiono wycinek **5** dwubiegunowy jarzma wirnika **4** z magnesami trwałymi **3** podzielonymi na łuku obwodu jarzma na dwa segmenty ($n = 2$). Każdy z segmentów jest

umieszczony we własnym gnieździe. Pod każdym segmentem jest żłobek 6. Między segmentami magnesów trwałych 3 o tej samej biegunowości jest żąb jarzma wirnika 4. W żłobkach 6 pod magnesami 3 korzystnie jest umieścić uzwojenie dwufazowe ($m = 2$). W jednym żłobku 6 znajduje się bok uzwojenia 2 jednej fazy. Końcówki uzwojenia 2 należy połączyć z pierścieniami ślizgowymi. Jest to uzwojenie 2 dwufazowe pierścieniowe. Zamiast uzwojenia pierścieniowego może być wykonane uzwojenie klatkowe. Na rysunku fig. 5 przedstawiono wycinek 5 dwubiegunowy jarzma wirnika 4 z magnesem trwałym 3 podzielonym na łuku obwodu jarzma na trzy segment ($n = 3$). Każdy z segmentów jest umieszczony we własnym gnieździe. Pod każdym z tych segmentów jest żłobek 6. Między segmentami magnesów trwałych 3 o tej samej biegunowości jest żąb jarzma wirnika 4. W żłobkach 6 pod magnesami 3 korzystnie jest umieścić uzwojenie 2 trójfazowe ($m = 3$). W jednym żłobku 6 jest umieszczony bok uzwojenia 2 jednej fazy. Końcówki uzwojenia należy połączyć z pierścieniami ślizgowymi, jak na rysunku fig. 1. Jest to uzwojenie 2 trójfazowe pierścieniowe. Zamiast uzwojenia 2 pierścieniowego może być wykonane także uzwojenie klatkowe.

Silnik indukcyjny synchronizowany polem magnetycznym wzbudzany przez magnesy trwałe umieszczone na zewnętrznym obwodzie wirnika ma małą szczelinę powietrzną między stojanem i wirnikiem. Szczelina powietrzna jest determinowana wyłącznie względami mechanicznymi. Wirnik w czasie rozruchu i pracy synchronicznej nie może ocierać się o stojan. Dla siły magnetomotorycznej uzwojenia 1 stojana permeancję obwodu magnetycznego Λ_m jest proporcjonalna do sumy iloczynów: przenikalności magnetycznej względnej ($\mu_\delta = 1$) i długości linii pola magnetycznego δ w szczelinie powietrznej oraz przenikalności magnetycznej względnej ($\mu_{PM} \approx 1,05$) i długości linii pola magnetycznego l_{PM} w magnesach trwałych

$$\Lambda_m \sim (\delta \cdot \mu_\delta + \mu_{PM} \cdot l_{PM}).$$

W silnikach z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz jarzma wirnika permeancja

$$\Lambda_m \sim (\delta \cdot \mu_\delta).$$

Moment synchroniczny maksymalny silnika T_{max} jest proporcjonalny do permeancji

$$(T_{max} \sim \Lambda_m).$$

Wykazano zatem, że silnik synchroniczny z magnesami trwałymi umieszczonymi na obwodzie zewnętrznym wirnika będzie miał większą przeciążalność momentem od silnika synchronicznego z magnesami trwałymi zabudowanymi w szczelinach jarzma wirnika.

Charakterystyka momentu asynchronicznego (charakterystyka rozruchowa) będzie mniejsza niż w silniku z uzwojeniem rozruchowym umieszczonym w żłobkach na zewnątrz wirnika. Przy uzwojeniu rozruchowym pierścieniowym nie ma to znaczenia, gdyż poprzez rezystory rozruchowe można tak sterować zmianą rezystancji w obwodzie uzwojenia, aby rozruch odbywał się w strefie momentu asynchronicznego maksymalnego.

- 1 – uzwojenie twornika
- 2 – uzwojenie wirnika
- 3 – magnesy trwałe
- 4 – jarzmo wirnika
- 5 – wycinek dwubiegunowy blachy jarzma wirnik
- 6 – żłobek wirnika
- 7 – wał silnika
- 8 – pierścienie ślizgowe
- 9 – tuleja izolacyjna



DYREKTOR
dr hab. inż. Jakub Bernatt
prof. KOMEL