

Emil Król
BOBRME Komel, Katowice

SILNIKI Z MAGNESAMI TRWAŁYMI ORAZ SILNIKI INDUKCYJNE – CZYNNIKI OBNIŻAJĄCE SPRAWNOŚĆ

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR AND INDUCTION MOTOR - FACTORS DECREASING THE EFFICIENCY

Abstract: The paper details with a comparison of an energy effectiveness of induction motors and permanent magnet synchronous motors. The causes of loss generation in different types of electric motors and possibilities of their reduction are distressed. Losses and energy effectiveness of electric motor are parameters and quantities in which the user is interested directly because these quantities have the huge impact on the technical and economical parameters of motors. In the paper, two water-cooled mining motors with the nominal power of about the 85kW and with identical overall dimensions are described and compared regarding their energy effectiveness. The first these motors is an induction motor with efficiency $\eta = 92.6\%$ and the second one is the interior permanent magnet synchronous motor (IPM) with efficiency $\eta = 95.8\%$. It can be deduced from the presented calculation results, that by the use of permanent magnet motors the efficiency of drives can be increased significantly.

1. Wstęp

Silniki z magnesami trwałymi są znane już od ponad 150 lat [1], początkowo były to głównie silniki prądu stałego z niskoenergetycznymi magnesami trwałymi. Wraz z rozwojem technologii materiałów magnetycznych w szczególności magnesów z pierwiastków ziem rzadkich (NdFeB, SmCo) oraz rozwoju energoelektroniki zaczęto produkować silniki z magnesami trwałymi wysokoenergetycznymi. Początek ekspansji silników z magnesami trwałymi z ziem rzadkich można datować na lata 90 ubiegłego wieku.

Obecnie silniki z magnesami trwałymi zdobywają coraz większą popularność, głównie dzięki:

- wysokiej sprawności w całym zakresie prędkości obrotowej;
- dużej przeciążalności momentem;
- szerokiemu zakresowi prędkości obrotowej;
- mniejszym wymiarom gabarytowym (w porównaniu do silników indukcyjnych lub silników prądu stałego);
- efektywnej regulacji prędkości obrotowej;
- dużej niezawodności ruchowej w porównaniu do silników prądu stałego.

Spośród silników z magnesami trwałymi można wyróżnić dwie podstawowe grupy:

- bezszczotkowe silniki prądu stałego (BLDC);
- silniki synchroniczne (PMSM).

Coraz to doskonalsze układy sterowania silnikami z magnesami trwałymi oraz doskonałe

własności ruchowe samych silników spowodowały, iż coraz częściej silniki prądu stałego z komutatorem mechanicznym oraz asynchroniczne silniki indukcyjne wypierane są przez silniki z magnesami trwałymi.

2. Straty w silnikach indukcyjnych

Straty i sprawność są wielkościami, które bezpośrednio interesują użytkownika, ponieważ decydują one o wskaźnikach technicznych i ekonomicznych maszyny.

Straty mocy w silniku można podzielić na dwie grupy:

- stałe (nie zależą od obciążenia maszyny);
- zmienne (zależą od obciążenia maszyny);

Do strat stałych zaliczają się [2], [3]:

- straty w żelazie maszyny ΔP_{Fe} ;
- straty dodatkowe na biegu jałowym ΔP_{d0} ;
- straty mechaniczne ΔP_m ;
- straty w uzwojeniach wynikające z przepływu prądu jałowego ΔP_{Cu0} .

Do strat zmiennych zalicza się [2], [3]:

- straty w uzwojeniach maszyny wynikające z przepływu prądu obciążenia ΔP_{Cu} ;
- straty dodatkowe obciążeniowe ΔP_d ;

Moc użyteczna na wale silnika opisuje wzór:

$$P_u = P_1 - \sum \Delta P \quad (1)$$

gdzie:

P_u – moc użyteczna na wale silnika;

P_1 – moc elektryczna doprowadzona silnika;

$\sum \Delta P$ - suma wszystkich strat w silniku.

Sprawność silnika jest opisana wzorem:

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

Straty występujące w uzwojeniu stojana i wirnika przy obciążeniu znamionowym (ΔP_{Cu}) wynoszą w przybliżeniu od 3% do 15% mocy znamionowej, przy czym straty w uzwojeniu na poziomie 3% występują dla maszyn wielkiej mocy. Straty w uzwojeniu zazwyczaj dzielą się po połowie na stojan i wirnik.

Straty w obwodach magnetycznych (ΔP_{Fe}) silnika przy znamionowej częstotliwości i napięciu nie przekraczają zwykle 5% mocy znamionowej.

Straty mechaniczne zazwyczaj wahają się w granicach od 0.5% do 1.5% mocy znamionowej i zależą w istotny sposób od rodzaju zastosowanych łożysk, sposobu chłodzenia oraz prędkości obrotowej maszyny.

Oprócz wymienionych wyżej strat należy uwzględnić straty dodatkowe, które występują zarówno w uzwojeniu jak i obwodzie magnetycznym maszyny. Straty dodatkowe w większości powstają wskutek działania harmonicznych różnego rodzaju i rzędu. Obliczanie oraz pomiar tych strat jest bardzo kłopotliwy, a duży wpływ na ich wartość mają czynniki związane z procesem technologicznym produkcji silników.

W normie przyjęto, że straty dodatkowe biegu jałowego będą dodane do strat w żelazie natomiast straty dodatkowe obciążeniowe wynoszą 0.5% mocy znamionowej. Nie jest to założenie słuszne szczególnie przy obliczaniu sprawności silników zasilanych z przekształtników energoelektronicznych, gdzie silniki zasilane są napięciem ze stosunkowo wysoką zawartością wyższych harmonicznych.

3. Budowa i straty silników z magnesami trwałymi

Silniki z magnesami trwałymi w większości bazują na rozkrojach blach stojanów stosowanych w silnikach asynchronicznych. Podyktowane jest to głównie względami ekonomicznymi jak również dużą dostępnością innych części koniecznych do budowy silnika. Wirniki silników z magnesami trwałymi projektowane są indywidualnie i wykonywane jako lite lub pakietowane z blachy elektromagnetycznej.



Rys. 1. Silnik z magnesami trwałymi o mocy 11kW wykonany z wykorzystaniem części standardowego silnika asynchronicznego

Z uwagi na duże podobieństwo budowy pakietów blach stojana i budowy uzwojeń stojanów pomiędzy silnikami z magnesami trwałymi a silnikami asynchronicznymi, straty w żelazie ΔP_{Fe} silnika z magnesami utrzymują się na podobnym poziomie, co w silnikach asynchronicznych zasilanych z przekształtnika energoelektronicznego. Natomiast straty w uzwojeniu stojana ΔP_{Cu} są mniejsze, ponieważ silniki z magnesami trwałymi wymagają mniejszej liczby zwojów na fazę przy takim samym napięciu zasilającym. Ze względu na brak uzwojenia w wirniku oraz na pracę synchroniczną straty w wirniku silnika z magnesami trwałymi praktycznie nie występują. Jedynym źródłem strat w wirniku są straty dodatkowe. Suma strat poszczególnych jest w silniku z magnesami trwałymi mniejsza. Dzięki temu sprawność silnika jest wyższa, a co za tym idzie obciążenia cieplne silników z magnesami są znacznie niższe. Można zaprojektować silnik z magnesami trwałymi tak, aby utrzymać sprawność i inne parametry elektromechaniczne na podobnym poziomie, co w silnikach asynchronicznych, równocześnie zmniejszając ich wymiary gabarytowe i masę. Można również zaprojektować silnik tak, aby uzyskać znacznie lepsze parametry elektromechaniczne silnika (moc, moment, przeciążalność) przy tych samych wymiarach i masie.

4. Porównanie silnika z magnesami trwałymi i silnika asynchronicznego

Do porównania wykorzystano górniczy silnik asynchroniczny chłodzony wodą o mocy 85kW i silnik z magnesami trwałymi o identycznych

wymiarach gabarytowych również chłodzony wodą z wirnikiem typu IPM (od ang. Interior Permanent Magnet, magnesy umieszczone wewnątrz wirnika). Silniki oprócz różnych wirników, różniły się również uzwojeniem stojana. W silniku z magnesami trwałymi uzwojenie zostało wykonane jako jednowarstwowe oraz tak, aby nie było tam gałęzi równoległych. Silnik z magnesami wymagał mniejszej liczby zwojów szeregowych na fazę, dzięki czemu była możliwość wykonania uzwojenia większą liczbą drutów równoległych, co uwidacznia się w rezystancji fazowej silnika oraz mniejszych stratach mocy ΔP_{Cu} . Przy pracy z obciążeniem znamionowym (85kW), obciążenie cieplne silnika z magnesami trwałymi było znacznie niższe niż analogicznego silnika asynchronicznego, co przekłada się na większą żywotność izolacji i podzespołów silnika.

Silnik z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika IPM ma dwie składowe momentu synchronicznego:

- moment od magnesów;
- moment reluktancyjny.

Maksymalna wartość wypadkowego momentu synchronicznego silnika IPM jest znacznie wyższa, niż maksymalna wartość momentu asynchronicznego (momentu krytycznego) silnika indukcyjnego o tych samych wymiarach części czynnych obwodu elektromagnetycznego. Aby w pełni wykorzystać moment reluktancyjny i moment od magnesów należy silnik IPM zasilić z przekształtnika z zaimplementowanym algorytmem umożliwiającym nastawianie kąta fazowego położenia wskazu prądu stojana względem osi magnetycznej d wirnika [4]. W Tabeli 1 i 2 zestawiono porównawczo obliczone parametry omawianych silników, indukcyjnego oraz silnika z magnesami trwałymi IPM przy założeniu, że silnik indukcyjny jest zasilany sinusoidalną falą napięcia a silnik IPM sinusoidalną falą prądu.

Tab. 1. Porównanie wyników obliczeń silnika asynchronicznego i silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (dla takiej samej mocy znamionowej)

| | Silnik asyn- chroniczny | Silnik PMSM |
|------------------------------|----------------------------|----------------|
| P_1 [kW] | 91.8 | 88.7 |
| P_n [kW] | 85 | 85 |
| U_n [V] | 480 | 480 |
| I_n [A] | 130 | 128 |

| | | |
|-------------------------------------|-------------|-------------|
| n [obr/min] | 1470 | 1500 |
| f [Hz] | 50 | 50 |
| η [%] | 92.6 | 95.8 |
| Masa miedzi uzw. stojana [kg] | 39 | 36 |
| ΔP_{Cu} [kW] | 4.2 | 1.1 |
| ΔP_m [kW] | 1.0 | 1.0 |
| ΔP_{Fe} [kW] | 1.2 | 1.2 |
| ΔP_d [kW] | 0.4 | 0.4 |
| $\Sigma \Delta P$ [kW] | 6.8 | 3.7 |

Tab. 2. Porównanie wyników obliczeń silnika asynchronicznego i silnika synchronicznego z magnesami trwałymi dla sumy strat jak w silniku asynchronicznym

| | Silnik asyn- chroniczny | Silnik PMSM |
|------------------------------|----------------------------|----------------|
| P_1 [kW] | 91.8 | 140.0 |
| P_n [kW] | 85 | 135 |
| U_n [V] | 480 | 480 |
| I_n [A] | 130 | 195 |
| n [obr/min] | 1470 | 1500 |
| f [Hz] | 50 | 50 |
| η [%] | 92.6 | 96.5 |



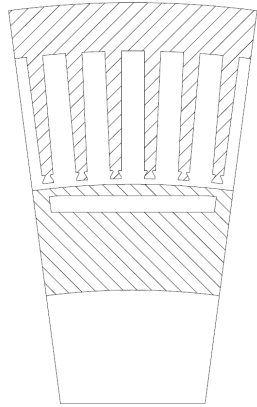
Rys. 2. Silnik górniczy o mocy 85kW

Tab. 3. Porównanie parametrów obliczeniowych różnych typów silników o mocy 1250kW

| | PMSM | Indukc. | SAS1832s |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| P_n [kW] | 1250 | 1250 | 1250 |
| U_n [V] | 6000 | 690 | 6000 |
| I_n [A] | 180 | 1746 | 144 |
| n [obr/min] | 187.5 | 185.6 | 187.5 |
| f [Hz] | 37.5 | 50 | 50 |
| η [%] | 96.4 | 93.6 | 93.4 |
| D_z [mm] | 1250 | 1640 | 2860 |
| L_{Fe} [mm] | 1050 | 1050 | 1520 |

W Tabeli 3 zestawiono wyniki obliczeń i wymiary gabarytowe silników różnych typów:

silnika z magnesami trwałymi, silnika indukcyjnego asynchronicznego i silnika indukcyjnego synchronizowanego.



Rys. 3. Jeden biegun silnika PMSM o mocy 1250kW, $n=187.5$ obr/min

5. Podsumowanie

Silniki z magnesami trwałymi posiadają bardzo dobre właściwości regulacyjne i cechują się wysoką sprawnością. Niestety w kraju nadal są bardzo rzadko używane w przemyśle. Wszędzie tam, gdzie głównym kryterium doboru silnika jest cena, silniki z magnesami przegrywają na starcie z silnikami asynchronicznymi. Aktualnie silniki z magnesami trwałymi pracują tam, gdzie z różnych przyczyn (gabaryty, masa, parametry rozruchowe i regulacyjne) nie można było zastosować silników asynchronicznych.

Obecne konstrukcje silników z magnesami trwałymi są ściśle dedykowane dla konkretnego napędu, gdzie najczęściej parametrem priorytetowym jest masa silnika lub gęstość mocy z jednostki objętości.

Aby w pełni wykorzystać możliwości silnika z magnesami trwałymi, silnik powinien być zasilony z dedykowanego do niego przekształtnika energoelektronicznego. Obecnie te przekształtniki nie są tak rozpowszechnione i uniwersalne jak przekształtniki dla silników asynchronicznych, z tej przyczyny cena przekształtników do silników z magnesami trwałymi utrzymuje się na wyższym poziomie. Przekształtniki do silników z magnesami trwałymi zwykle wykonywane są jako dedykowane dla jednego konkretnego silnika.

Należy również zaznaczyć, że sprawność silnika asynchronicznego i silnika z magnesami trwałymi zasilanych z przekształtnika energoelektronicznego zależy w dużej mierze od jakości (kształtu) napięcia i prądu, jakim przekształtnik zasilany jest dany silnik. W przypadku du-

żej zawartości harmonicznych straty dodatkowe gwałtownie rosną i sprawność silnika maleje.

6. Literatura

- [1]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [2]. Latek W.: *Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa;
- [3]. Plamitzer A. M.: *Maszyny elektryczne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa.
- [4]. Rossa R.: *Zastosowanie metody polowo-obwodowej do obliczania parametrów silników synchronicznych z magnesami trwałymi przy pracy synchronicznej*. Zeszyty problemowe BOBRME Komel Nr 72/2005

Autor

mgr inż. E. Król
 info@komel.katowice.pl
 Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy
 Maszyn Elektrycznych „KOMEL”
 40-203 Katowice, Al. Roździeńskiego 188.