

*silnik synchroniczny z magnesami trwałymi,
napęd hybrydowy*

Emil KRÓL*

SILNIK SYNCHRONICZNY Z MAGNESAMI TRWAŁYMI W NAPĘDZIE POJAZDU HYBRYDOWEGO

W artykule omówiono sposób doboru oraz miejsce montażu silnika synchronicznego do napędu pojazdu dostawczego, hybrydowego, bimodalnego. W pojeździe tym silnik elektryczny będzie zamontowany na wale Kardana. Zaprojektowano i wykonano specjalny silnik, który będzie pracował w dwóch trybach, jako napęd i jako generator ładujący akumulatory pokładowe. Zastosowany napęd cechuje się wysokim momentem oraz możliwością pracy w bardzo szerokim zakresie prędkości obrotowych.

1. WSTĘP

Napęd hybrydowy jest połączeniem dwóch rodzajów napędów. W samochodach osobowych i dostawczych jako napęd hybrydowy stosuje się połączenie silnika spalinowego z silnikiem elektrycznym. Jako silnik elektryczny, wykorzystywany jest silnik z magnesami trwałymi, ze względu na szereg zalet jakimi dysponuje. Jako silniki spalinowe w pojazdach hybrydowych stosuje się różnego typu napędy zasilane olejem napędowym, benzyną lub gazem. Silnik spalinowy przenosi moment poprzez różnego typu przekładnie lub jest połączony wspólnym wałem z silnikiem elektrycznym, który może pełnić również rolę prądnicy służącej do ładowania akumulatorów pokładowych pojazdu. W zależności od konfiguracji oraz potrzeb napędu, silniki, spalinowy i elektryczny mogą pracować razem (równolegle) podczas dużego zapotrzebowania na moment obrotowy (np. przyspieszanie lub jazda z dużym obciążeniem) lub oddzielnie. W zależności od konfiguracji elementów napędzających wyróżnia się układy hybrydowe szeregowy, równoległy i mieszane. W układzie szeregowym energia mechaniczna wytwarzana przez silnik spalinowy jest w całości przetwarzana na energię elektryczną gromadzoną w akumulatorach

* BOBRME KOMEL, al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice, e.krol@komel.katowice.pl

oraz dostarczaną do napędu silnika elektrycznego. W przypadku dużego zapotrzebowania na moc silnik elektryczny może korzystać z energii zgromadzonej w akumulatorach. W układzie równoległym część energii mechanicznej wytworzonej przez silnik spalinowy napędza pojazd, a pozostała część ładuje akumulatory. Podczas hamowania silnik elektryczny hamuje odzyskowo zwracając energię do akumulatora. Wadami napędu hybrydowego są, większa masa pojazdu oraz wyższa cena. Niewątpliwymi jego zaletami są redukcja emisji spalin oraz ograniczenie hałasu pojazdu. W omawianym pojeździe dostawczym zastosowano napęd hybrydowy bimodalny. W takim napędzie silnik elektryczny nigdy nie pracuje równocześnie z silnikiem spalinowym, może natomiast pracować jako prądnica do ładowania akumulatorów lub układ odzyskujący energię podczas hamowania. W pojeździe można wyróżnić trzy tryby pracy: tylko z wykorzystaniem napędu spalinowego, tylko z wykorzystaniem napędu elektrycznego oraz tryb awaryjny, w którym pojazd napędza silnik spalinowy, a silnik elektryczny pracuje jako prądnica ładująca akumulatory pokładowe. Tryb ten uważa się za awaryjny, ponieważ ładowanie akumulatorów korzystając z napędu spalinowego jest nieekonomiczne. Znacznie korzystniejsze jest ładowanie akumulatorów z sieci elektrycznej.

2. PARAMETRY NAPĘDU ELEKTRYCZNEGO

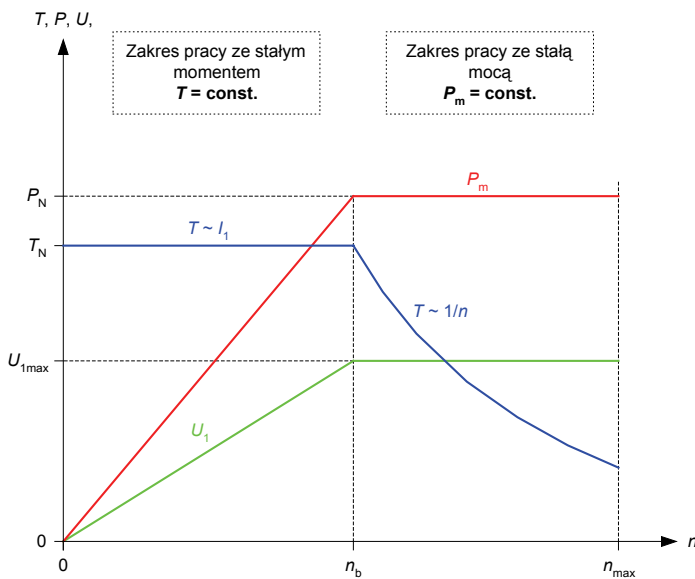
Dobór elektrycznego silnika napędowego pojazdu wymaga kompromisu między sprzecznymi parametrami napędu. Silnik powinien dysponować odpowiednio dużym momentem i mocą by zapewnić komfortową jazdę oraz przyspieszenia. Moc tę jednak należy ograniczyć ze względu na masę silnika elektrycznego oraz masę akumulatora. Ponadto wał silnika elektrycznego musi przenieść pełny moment silnika spalinowego, co powoduje konieczność zwiększenia średnicy wału silnika (rys. 1).



Rys. 1. Silnik napędowy ze sprzęgłami Kardana
Fig. 1. The drive motor with Cardan clutch

Kompromisowym rozwiązaniem jest wybór silnika synchronicznego z magnesami trwałymi z wirnikiem typu IPM (*interior permanent magnet*). Silnik taki zaprojektowano i wykonano w BOBRME Komel. Silniki tego rodzaju są coraz częściej stosowane w napędach trakcyjnych [2]. Posiadają szereg zalet, szczególnie istotnych dla napędów pojazdów. Do podstawowych zalet silników z magnesami trwałymi możemy zaliczyć:

- wysoki stosunek uzyskiwanego momentu lub mocy do objętości lub masy maszyny,
- dużą przeciążalność momentem,
- pracę w szerokim zakresie prędkości obrotowych,
- wysoką sprawność.



Rys. 2. Charakterystyki silnika z dwustrefową regulacją prędkości obrotowej
Fig. 2. The characteristics of motor with dual zone speed control

Silnik napędowy pracuje w dwóch strefach regulacji (ze stałym momentem i stałą mocą) (rys. 2). Spełnia też specyficzne wymagania dla tego typu napędu. Zapewnia pracę generatorową przy bardzo wysokich prędkościach obrotowych. Założono, że prędkość maksymalna pojazdu korzystającego tylko z silnika elektrycznego nie przekroczy 70 km/h, natomiast prędkość maksymalna pojazdu z silnikiem spalinowym wynosi ponad 140 km/h. Praca generatorowa będzie więc odbywać się w bardzo niekorzystnych warunkach dla falownika oraz akumulatora. Na zaciskach prądnicy pojawi się wysokie napięcie, co spowoduje konieczność kontrolowania prądu ładowania akumulatora. W silniku synchronicznym z magnesami trwałymi powstają dwie skła-

dowe momentu elektromagnetycznego. Oprócz występującej we wszystkich konstrukcjach silników PMSM składowej związanej z siłą magnetomotoryczną magnesów trwałych, w silnikach z wirnikiem IPM występuje jeszcze składowa reluktancyjna momentu synchronicznego. Składowa reluktancyjna związana jest z asymetrią magnetyczną wirnika. Cechą charakterystyczną asymetrii magnetycznej wirników w silnikach PMSM jest to, że reluktancja magnetyczna w osi d wirnika jest zwykle znacząco większa od reluktancji w osi q [3]. Im większą wartością ilorazu X_q/X_d charakteryzuje się zastosowana konstrukcja wirnika w danym silniku, tym większa jest wartość składowej reluktancyjnej momentu synchronicznego i tym samym jej udział w wypadkowym momencie synchronicznym T_e silnika może być większy. Zależnie od konstrukcji wirnika, składowa reluktancyjna ma zwykle od 5% do 30% udziału w wypadkowym momencie synchronicznym wytwarzanym przez silnik PMSM.

W silniku synchronicznym z wirnikiem IPM przy zastosowaniu odpowiedniego sterowania wykorzystuje się moment reluktancyjny. Sterowanie falownikiem musi utrzymać stosunki prądu w osiach d i q takie, aby utrzymać w każdym punkcie pracy silnika maksymalny moment elektromagnetyczny. Zależność na moment elektromagnetyczny T_e 3-fazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSM) zasilanego sinusoidalną falą prądu przyjmuje postać:

$$T_e = \frac{3 \cdot p}{2} [\psi_d I_q - \psi_q I_d] \quad (1)$$

a po uwzględnieniu że $\psi_d = L_d I_d + \psi_{mag}$ oraz $\psi_q = L_q I_q$:

$$T_e = \frac{3 \cdot p}{2} [I_q \psi_{mag} + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (2)$$

gdzie:

- ψ_d – strumień skojarzony z uzwojeniem stojana w osi d ;
- ψ_q – strumień skojarzony z uzwojeniem stojana w osi q ;
- ψ_{mag} – strumień wzbudzenia od magnesów trwałych skojarzony z uzwojeniem stojana;
- L_d, L_q – indukcyjności odpowiednio w osi d i q ;
- p – liczba par biegunów;
- I_d, I_q – składowe prądów uzwojenia stojana w osi d i q .

Wzór (2) stosuje się przy obliczaniu momentu elektromagnetycznego silników z wirnikiem który posiada różne reaktancje w osiach d i q .

Parametry zaprojektowanego i wykonanego elektrycznego silnika napędowego:

- Moc znamionowa – 45 kW,
- Moc maksymalna – 75 kW,
- Prędkość znamionowa – 1800 obr/min,
- Moment maksymalny – 400Nm,

Prędkość maksymalna przy pracy prądnicowej 5000obr/min,

Nowoczesne napędy elektryczne, stosowane w elektrycznych pojazdach drogowych, muszą charakteryzować się szerokim zakresem regulacji prędkości obrotowej, zwykle w zakresie od zera do kilku tysięcy obrotów na minutę. Opracowano kilka strategii sterowania [5] napędami elektrycznymi z silnikami PMSM o szeroko regulowanej prędkości obrotowej. W wyniku zastosowania tych strategii oraz dzięki odpowiedniej konstrukcji wirników w silnikach PMSM [4, 5], uzyskiwane są typowe charakterystyki elektromechaniczne napędu o prędkości regulowanej w szerokim zakresie, pokazane na rysunku 2. Na charakterystykach tych wyróżnić można dwie strefy regulacji prędkości, tzw. strefę stałego momentu i strefę stałej mocy. W pierwszej strefie regulacji prędkości obrotowej, od zera aż do tzw. prędkości bazowej n_b , silniki PMSM są sterowane wg takiego algorytmu, by pracowały przy optimum ilorazu osiąganego momentu elektromagnetycznego do prądu zasilania T/I_1 . W drugiej strefie regulacji prędkości, $P = \text{const}$. Powyżej prędkości bazowej n_b silnik pracuje w drugiej strefie regulacji prędkości, w której wzrost napięcia na zaciskach silnika U_1 nie jest już możliwy. Dalsze zwiększanie prędkości obrotowej wirnika osiągnane jest dzięki zastosowaniu techniki osłabiania strumienia magnetycznego głównego w szczelinie powietrznej silnika. Osłabianie strumienia w silnikach PMSM uzyskuje się poprzez wytworzenie odpowiedniej ujemnej podłużnej reakcji twornika skutkującej ograniczeniem napięcia $U_{1\text{max}}$.

Dwustrefowa metoda regulacji prędkości obrotowej napędu elektrycznego wymaga zastosowania złożonych algorytmów sterowania napędem o dużym nakładzie obliczeniowym. Dla potrzeb napędu pojazdu hybrydowego konieczne jest zastosowanie przekształtnika energoelektronicznego wyposażonego w wydajny procesor sygnałowy. Aby zapewnić możliwie wysoką niezawodność całego napędu, przekształtnik powinien być także wyposażony w różnego typu zabezpieczenia sprzętowe (np. nadnapięciowe, podnapięciowe, nadprądowe, temperaturowe itp.) ograniczające możliwość jego zniszczenia podczas codziennej eksploatacji w pojeździe hybrydowym.

3. KONSTRUKCJA MECHANICZNA NAPĘDU

Napędowy silnik elektryczny będzie zamontowany w układzie bezprzekładniowym, bezpośrednio na wale napędowym pojazdu, który przenosi moment obrotowy pomiędzy skrzynią biegów a tylnym mostem z mechanizmem różnicowym. Prędkość obrotowa wirnika w silniku elektrycznym będzie zawsze taka sama jak prędkość obrotowa wału napędowego pojazdu. Wał silnika elektrycznego został zaprojektowany tak, aby umożliwiał przeniesienie momentu silnika spalinowego (rys. 1). Moment, który wał silnika musi przenieść wynosi ponad 1100 Nm przy maksymalnym momencie silnika spalinowego i użytym pierwszym biegu skrzyni przekładniowej. Silnik elektryczny jest zaprojektowany tak, by w trybie elektrycznym napędu hybrydowego

najwyższą sprawność osiągał w możliwie szerokim zakresie prędkości pojazdu z przedziału od 0 do ok. 50 km/h. Ładowanie akumulatora pokładowego jest możliwe w dwóch stanach. Podczas jazdy pojazdu w trybie diesel, silnik elektryczny pracuje w trybie pracy generatorowej, ładowania lub doładowywania baterii pokładowych. W takim stanie pracy, sam silnik oraz pozostałe podzespoły elektrycznego układu napędowego, będą tak dopasowane elektrycznie, aby generowane napięcie, na zaciskach silnika (generatora) elektrycznego, podczas jazdy z większymi prędkościami, aż do prędkości maksymalnej włącznie, nigdy nie przekraczały wartości dopuszczalnych (bezpiecznych) i nie spowodowały uszkodzenia jednego z podzespołów napędu.

4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie w pojeździe napędu hybrydowego, bimodalnego pozwoli zmniejszyć koszty eksploatacji pojazdu oraz ograniczyć negatywne oddziaływanie na środowisko naturalne napędu spalinowego. Pełne wykorzystanie możliwości silnika z magnesami trwałymi jest możliwe przez zasilanie go z dedykowanego mu przekształtnika energoelektronicznego. Przekształtniki takie są zazwyczaj droższe niż stosowane powszechnie falowniki dla silników indukcyjnych.

Praca finansowana ze środków NCBiR w ramach projektu rozwojowego nr NR01-0085-10/2010.

LITERATURA

- [1] DĄBROWSKI Z., *Wały napędowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
- [2] GLINKA T., *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [3] BERNATT J., *Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi*, Wydawnictwo BOBRME Komel, Katowice 2011.
- [4] KRÓL E., ROSSA R., *Silniki z magnesami trwałymi o dużej przeciążalności momentem*, Zeszyty problemowe BOBRME, Komel 81/2009.
- [5] ROSSA R., KRÓL E., *Dwustrefowa regulacja prędkości obrotowej w nowoczesnych napędach elektrycznych opartych na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne”, BOBRME „Komel”, nr 81/2009, 125–129.

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR AS A HYBRID VEHICLE DRIVE

In the paper the concept of conversion a vehicle for bimodal hybrid car was described. A special synchronous permanent magnets motor attended to the hybrid vehicle was designed. New motor will be mounted directly on the Cardan shaft. The special motor which will operate in two modes, as the drive and as a generator charging the on board battery was designed and made. The used drive has a high torque and ability to operate in a very wide speed range.