RZECZPOSPOLITA POLSKA

Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **223852**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **401112**

(22) Data zgłoszenia: **09.10.2012**

(51) Int.Cl.
H02P 6/08 (2016.01)
H02P 21/14 (2016.01)

(54) **Sposób sterowania 3-fazowego falownika napięcia przeznaczonego do zasilania silnika synchronicznego z magnesami trwałymi PMSM w trybie hamowania odzyskowego**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
14.04.2014 BUP 08/14

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
30.11.2016 WUP 11/16

(73) Uprawniony z patentu:
POLITECHNIKA ŚLĄSKA, Gliwice, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:
TOMASZ BISKUP, Bytom, PL
ALEKSANDER BODORA, Gliwice, PL
ARKADIUSZ DOMORACKI, Bytom, PL

(74) Pełnomocnik:
rzecz. pat. Katarzyna Borkowy

PL 223852 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób sterowania 3-fazowego falownika napięcia przeznaczonego do zasilania silnika synchronicznego z magnesami trwałymi PMSM w trybie hamowania odzyskowego.

Sterowanie silników z magnesami trwałymi o sinusoidalnej sile elektromotorycznej (PMSM), wymaga wymuszenia przepływu prądu przez uzwojenia silnika, zależnie od położenia wirnika przy ustalonym sposobie jego namagnesowania. Znany jest klasyczny układ zasilania silnika PMSM, gdzie uzwojenia stojana silnika są dołączone do 3-fazowego falownika napięcia, zbudowanego w oparciu o tranzystory. Falownik pozwala na wymuszenie napięcia i prądu o odpowiedniej orientacji względem położenia wirnika. Ze względu na budowę i właściwości silników PMSM w sterowaniu wykorzystuje się typowo układ współrzędnych związany z wirnikiem (d,q). W zależności od konstrukcji wirnika silnika wyróżnia się:

w pierwszym wariancie silniki z magnesami naklejanymi na powierzchnię wirnika, gdzie zastępcze składowe indukcyjności w osiach d i q są równe $L_d = L_q$;

w drugim wariancie silniki z magnesami zagłębionymi w wirniku, gdzie zastępcze składowe indukcyjności w osiach d i q są różne $L_d < L_q$.

Dla pierwszej grupy silników znane są metody sterowania układu napędowego z silnikiem PMSM z określonym kryterium – maksymalizacji momentu elektromagnetycznego rozwijanego przez silnik; utrzymania stałego współczynnika mocy $\cos \varphi = 1$; maksymalizacji stosunku uzyskiwanego momentu do wartości skutecznej prądu silnika.

Zróżnicowanie indukcyjności w obu osiach (d,q) dla silników z magnesami zagłębionymi komplikuje algorytm sterowania, bowiem optymalny, z punktu widzenia momentu rozwijanego przez silnik, stosunek składowych prądu w obu osiach zależy od punktu pracy silnika (obciążenia, prędkości wirowania silnika) oraz wartości chwilowych parametrów silnika (L_d, L_q). Dla prędkości wirowania silnika powyżej znamionowej dodatkowo układ sterowania musi uwzględnić potrzebę od wzbudzenia silnika i wypracowania odpowiedniej wartości składowej prądu I_d na te potrzeby.

Z polskiego opisu zgłoszenia patentowego nr 384597 znany jest sposób sterowania silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych PMSM zasilanego falownikiem prądu polegający na tym, że postać sygnałów odpowiadających zmiennym multiskalarnym x11, x12, x22 ustala się przekształcając sygnał prędkości kątowej wału (ωr), sygnały odpowiadające składowym wektora prądu stojana silnika $i\alpha$, $i\beta$ oraz sygnały odpowiadające składowym wektora strumienia od magnesów trwałych $\Psi f\alpha$, $\Psi f\beta$ rozpatrywanym w nieruchomym prostokątnym układzie współrzędnych zgodnie z zależnościami: $x11 = \omega r$, $x12 = i\beta\Psi f\alpha - i\alpha\Psi f\beta$, $x22 = i\alpha\Psi f\alpha + i\beta\Psi f\beta$. Sygnały (v1, v2) odpowiadające sterowaniom odsprzęgającym ustala się przekształcając sygnały odpowiadające składowym wektora strumienia od magnesów trwałych, $\Psi f\alpha$, $\Psi f\beta$ rozpatrywanym w nieruchomym prostokątnym układzie współrzędnych, sygnał odpowiadający kwadratowi strumienia skojarzonego od magnesów trwałych x21 oraz sygnały wyjściowe (m1, m2) z układu regulatorów zmiennych multiskalarnych; x11, x12, x22 zgodnie z zależnościami v1, v2, podanymi niżej wzorem (A), przy czym zadane sygnały sterujące dla falownika napięcia $u\alpha z$, $u\beta z$, ustala się przekształcając sygnały (v1, v2) odpowiadające sterowaniom odsprzęgającym oraz sygnały odpowiadające składowym wektora strumienia od magnesów trwałych $\Psi f\alpha$, $\Psi f\beta$ zgodnie z zależnościami $u\alpha z$, $u\beta z$ podanymi niżej wzorem (B), gdzie $x21 = \Psi 2f\alpha + \Psi 2f\beta$, Ls – indukcyjność stojana silnika, Ti – stała czasowa.

Z polskiego opisu zgłoszenia patentowego nr 384771 znany jest sposób sterowania silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych PMSM zasilanym falownikiem napięcia polegający na tym, że postać sygnałów odpowiadających zmiennym multiskalarnym ustala się przekształcając sygnał prędkości kątowej wału (ωr), sygnały odpowiadające składowym wektora prądu stojana silnika ($i\alpha$, $i\beta$) oraz sygnały odpowiadające składowym wektora strumienia od magnesów trwałych ($\psi f\alpha$, $\psi f\beta$) rozpatrywanym w nieruchomym prostokątnym układzie współrzędnych zgodnie z zależnościami: $x11 = \omega r$, $x12 = i\beta\psi f\alpha - i\alpha\psi f\beta$, $x22 = i\alpha\psi f\alpha + i\beta\psi f\beta$, sygnały (v1, v2) odpowiadające sterowaniom odsprzęgającym ustala się przekształcając sygnały odpowiadające składowym wektora strumienia od magnesów trwałych ($\psi f\alpha$, $\psi f\beta$) rozpatrywanym w nieruchomym prostokątnym układzie współrzędnych, sygnał odpowiadający kwadratowi strumienia skojarzonego od magnesów trwałych oraz sygnały wyjściowe (m1, m2) z układu regulatorów zmiennych multiskalarnych zgodnie z zależnościami: (A), przy czym zadane sygnały sterujące dla falownika napięcia ($u\alpha z$, $u\beta z$) ustala się przekształcając sygnały (v1, v2) odpowiadające sterowaniom odsprzęgającym oraz sygnały odpowiadające składowym wektora

strumienia od magnesów trwałych ($\psi f\alpha$, $\psi f\beta$) zgodnie z zależnościami: (B), gdzie: x21 = $\psi 2f\alpha + \psi 2f\beta$, Ls – indukcyjność stojana silnika, Ti – stała czasowa.

Sposób według wynalazku polega na tym, że w czasie pracy generatorowej wartości zadane składowych prądu w układzie współrzędnych wypracowywuje się przez niezależne regulatory tak, że prąd składowej wyznacza się przez regulator współczynnika głębokości modulacji, przy czym wartością zadaną jest dla niego stała wartość referencyjna, którą ustala się na poziomie niższym od maksymalnej dla modulatora, a wartością rzeczywistą jest wartość chwilowa współczynnika głębokości modulacji pochodząca z modulatora, przy tym regulator ma niesymetryczne wartości ograniczenia na sygnał wyjściowy, natomiast prąd składowej q otrzymuje się jako iloczyn znaku prędkości obrotowej silnika i sygnału z regulatora prądu ładowania, przy czym wartością zadaną dla tego regulatora jest prąd źródła.

Wartość referencyjna ustala się na poziomie 2–5% niższym od maksymalnej wartości współczynnika głębokości modulacji, jaką może zrealizować wykorzystywany w układzie modulator, a ograniczenia dla wartości wyjściowej regulatora współczynnika głębokości modulacji ustala się na podstawie dopuszczalnej wartości skutecznej prądu silnika i maksymalnej prędkości napędu w czasie procesu ładowania, przy tym podobnie ograniczenia dla regulatora prądu ładowania ustala się na podstawie dopuszczalnej wartości skutecznej prądu silnika.

Wynalazek umożliwia generatorową pracę silnika z prędkością ponad znamionową i niezależną regulację prądu zwracanego do źródła zasilania. Ma to znaczenie dla napędów pojazdów hybrydowych, czyli spalinowych współpracujących z napędem elektrycznym. Zwykle silnik elektryczny ma znaczenie pomocnicze, pozwala na poruszanie się z prędkością zdecydowanie mniejszą od maksymalnej pojazdu w warunkach szczególnych (miasto, zamknięte strefy dla pojazdów spalinowych, zamknięte hale o dużej kubaturze). Napęd elektryczny może także służyć jako generator doładowujący źródło zasilania (np. akumulator) w czasie jazdy z wykorzystaniem silnika spalinowego lub w czasie hamowania. W takich warunkach pojazd może poruszać się z prędkościami liniowymi, które powodują znaczne przekroczenie prędkości znamionowej wirowania silnika. Właśnie wtedy, przy założonej stosunkowo niewielkiej mocy zwracanej do źródła w stosunku do mocy znamionowej silnika elektrycznego, rozdzielenie torów wypracowania poszczególnych składowych prądu upraszcza układ sterowania, nie powodując znaczącego wzrostu strat w układzie napędowym. Założenie o stosunkowo niewielkiej mocy zwracanej do źródła **U** w czasie jazdy za pomocą napędu spalinowego jest słuszne, bowiem tylko niewielka część mocy silnika spalinowego może być wykorzystana do tego celu, a znacznie większa na potrzeby poruszania się pojazdu i pokonanie oporów mechanicznych.

Przedmiot wynalazku przedstawiono na rysunku, na którym przedstawiono strukturę układu sterowania w trybie hamowania odzyskowego napędu z silnikiem PMSM.

W układzie sterowania sygnały pomiarowe: prądów silnika (wystarczy pomiar dwóch z nich) $\mathbf{i_a}$, $\mathbf{i_b}$, $\mathbf{i_c}$, oraz kąt położenia wirnika silnika PMSM Θ wprowadza się do bloków pozwalających na transformację do układu współrzędnych (d q) związanego z wirnikiem i wypracowanie składowych prądu w tym układzie $\mathbf{I_d}$ i $\mathbf{I_q}$. Zadana wartość prądu źródła $\mathbf{I_{DCzad}}$ jest wypracowywana w nadrzędnym układzie sterowania kontrolującym źródło energii **U** (akumulator, superkondensator), a wartość rzeczywista tego prądu $\mathbf{I_{DC}}$ jest bezpośrednio mierzona lub odtwarzana na podstawie odpowiedniego modelu obiektu. Sygnał wyjściowy $\mathbf{I_{dzad}}$ uwzględnia kierunek wirowania silnika **sig(ω)**, bowiem składowa q prądu o wartości dodatniej dla jednego kierunku wytwarza moment napędowy, a dla drugiego kierunku moment hamujący. Wartość referencyjna współczynnika głębokości modulacji $\mathbf{M_{ref}}$ jest zwykle ustalona na stałym poziomie, a wartość rzeczywista tego współczynnika **M** pochodzi z modulatora. Układ regulacji z regulatorami prądów w obu osiach d i q wypracowuje składowe zadane napięcia transformowane do układu nieruchomego (α β). Wartości zadane napięcia $\mathbf{U_\alpha}$ i $\mathbf{U_\beta}$ są wykorzystywane do generowania sygnałów sterujących tranzystory **T1**-**T6** przekształtnika **F** przez modulator, przy aktualnie mierzonej wartości napięcia zasilania $\mathbf{U_{DC}}$.

Sposób sterowania polega na tym, że w czasie pracy generatorowej wartości zadane składowych prądu $\mathbf{I_{dzad}}$ i $\mathbf{I_{qzad}}$ w układzie współrzędnych (d,q) wypracowywuje się przez niezależne regulatory tak, że prąd składowej d $\mathbf{I_{dzad}}$ wyznacza się przez regulator współczynnika głębokości modulacji **RM**, przy czym wartością zadaną jest dla niego stała wartość referencyjna $\mathbf{M_{ref}}$, którą ustala się na poziomie niższym od maksymalnej dla modulatora M_{max}, a wartością rzeczywistą jest wartość chwilowa współczynnika głębokości modulacji **M** pochodząca z modulatora, przy tym regulator ma niesymetryczne wartości ograniczenia na sygnał wyjściowy $\mathbf{I_{dzad}}$, pozwalające na uzyskiwanie wartości w przedziale ($-I_{dzadmax}$, 0), natomiast prąd składowej q $\mathbf{I_{qzad}}$ otrzymuje się jako iloczyn znaku prędkości

obrotowej silnika **sig(ω)** i sygnału z regulatora prądu ładowania $\mathbf{RI_{DC}}$, przy czym wartością zadaną dla tego regulatora jest prąd źródła $\mathbf{I_{DCzad}}$, przy tym wartość rzeczywista tego prądu $\mathbf{I_{DC}}$ może być mierzona w układzie lub odtwarzana, a regulator ma symetryczne poziomy ograniczenia sygnału wyjściowego $\mathbf{I_{qzad}}$, pozwalające na uzyskiwanie wartości w przedziale ($-I_{qzadmax}$, $I_{qzadmax}$).

Wartość referencyjna $\mathbf{M_{ref}}$ ustala się na poziomie 3% niższym od maksymalnej wartości współczynnika głębokości modulacji M_{max}, jaką może zrealizować wykorzystywany w układzie modulator, a ograniczenia dla wartości wyjściowej regulatora współczynnika głębokości modulacji **RM** ($-I_{dzadmax}$, 0) ustala się na podstawie dopuszczalnej wartości skutecznej prądu silnika i maksymalnej prędkości napędu w czasie procesu ładowania, przy tym podobnie ograniczenia dla regulatora prądu ładowania $\mathbf{RI_{DC}}$ ($-I_{qzadmax}$, $I_{qzadmax}$) ustala się na podstawie dopuszczalnej wartości skutecznej prądu silnika.

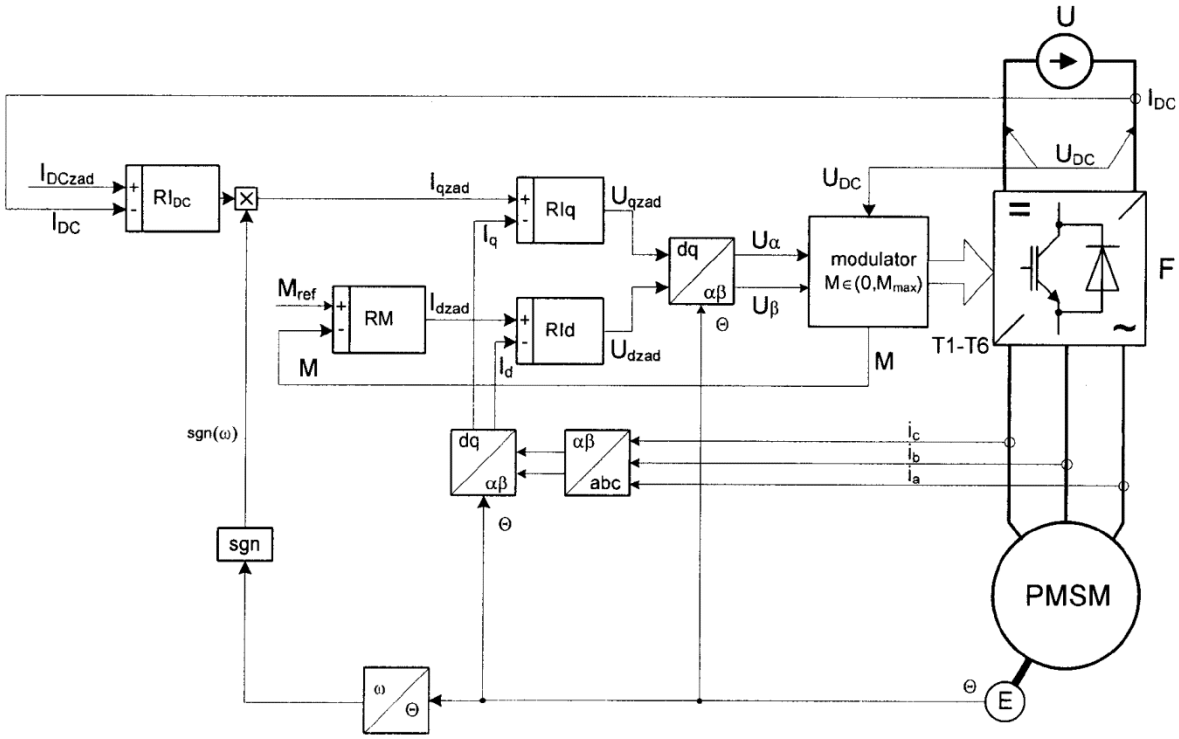
Wartość współczynnika $\mathbf{M_{ref}}$ jest stała, zapewnia właściwy margines bezpieczeństwa by nie dopuścić do nasycenia modulatora. Wraz ze wzrostem prędkości silnika w pobliże prędkości znamionowej, przy właściwie dobranym napięciu $\mathbf{U_{DC}}$ źródła zasilania **U** współczynnik głębokości modulacji **M** zbliża się do maksymalnej wartości M_{max}, w związku z tym wartość skuteczna napięcia wyjściowego przekształtnika **F** także zbliża się do maksymalnej wartości. Składowa prądu w osi d $\mathbf{I_d}$ pozwala na zmniejszenie strumienia skojarzonego i odwzbudzenie silnika, a przez to redukcję siły elektromotorycznej rotacji.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób sterowania 3-fazowego falownika napięcia przeznaczonego do zasilania silnika synchronicznego z magnesami trwałymi PMSM w trybie hamowania odzyskowego, **znamienny tym**, że w czasie pracy generatorowej wartości zadane składowych prądu $\mathbf{I_{dzad}}$ i $\mathbf{I_{qzad}}$ w układzie współrzędnych (d,q) wypracowywuje się przez niezależne regulatory tak, że prąd składowej d $\mathbf{I_{dzad}}$ wyznacza się przez regulator współczynnika głębokości modulacji **RM**, przy czym wartością zadaną jest dla niego stała wartość referencyjna $\mathbf{M_{ref}}$, którą ustala się na poziomie niższym od maksymalnej dla modulatora M_{max}, a wartością rzeczywistą jest wartość chwilowa współczynnika głębokości modulacji **M** pochodząca z modulatora, przy tym regulator ma niesymetryczne wartości ograniczenia na sygnał wyjściowy $\mathbf{I_{dzad}}$, natomiast prąd składowej q $\mathbf{I_{qzad}}$ otrzymuje się jako iloczyn znaku prędkości obrotowej silnika **sig(ω)** i sygnału z regulatora prądu ładowania $\mathbf{RI_{DC}}$, przy czym wartością zadaną dla tego regulatora jest prąd źródła $\mathbf{I_{DCzad}}$.

2. Sposób sterowania według zastrz. 1, **znamienny tym**, że wartość referencyjna $\mathbf{M_{ref}}$ ustala się na poziomie 2–5% niższym od maksymalnej wartości współczynnika głębokości modulacji M_{max}, jaką może zrealizować wykorzystywany w układzie modulator, a ograniczenia dla wartości wyjściowej regulatora współczynnika głębokości modulacji **RM** ($-I_{dzadmax}$, 0) ustala się na podstawie dopuszczalnej wartości skutecznej prądu silnika i maksymalnej prędkości napędu w czasie procesu ładowania, przy tym podobnie ograniczenia dla regulatora prądu ładowania $\mathbf{RI_{DC}}$ ($-I_{qzadmax}$, $I_{qzadmax}$) ustala się na podstawie dopuszczalnej wartości skutecznej prądu silnika.

Rysunek


U
IDC
UDC
IDCzad
RIDC
Iqzad
Iq
RIq
Uqzad
dq
αβ
Uα
Uβ
Θ
modulator
M∈(0,Mmax)
F
Mref
RM
Idzad
Id
RId
Udzad
M
T1-T6
sgn(ω)
ic
ib
ia
abc
sgn
PMSM
ω
E

Departament Wydawnictw UPRP
Cena 2,46 zł (w tym 23% VAT)