

공간전압벡터 PWM을 이용한 7상 영구자석형 동기전동기의 구동 시스템

김한구, 최문규, 정병환, 목형수, 최규하
 건국대학교

7-Phase PMSM Motor Drive System Using Space Voltage Vector PWM

H.G. Kim, M.G. Choi, B.H. Jeong, H.S. Mok, G.H. Choe
 Konkuk Univ.

ABSTRACT

The motor research of pre-existing attaches importance about one and three motor of reduce torque ripple and speed control. 3-Phase PMSM Motor, which is generally used, has limited usage in high speed, due to pulsation torque and variable speed. To solve this problem, it is necessary to increase invariable, pole number or the number of slots. In this paper 7-Phase PMSM Motor of Steady state analysis of Torque and Output Voltage characteristic. 7-Phase modulation method with Space Voltage Vector is studied for ideal operation of controller.

1. 서론

오늘날 정밀한 제어 특성을 요구하는 산업용, 가정용 기기의 구동을 위해 영구자석형 동기전동기의 사용이 증대되고 있다. 이로 인해 기존의 전동기 연구는 단상 및 삼상 전동기에 대해 많은 연구가 이루어져 있다. 3상 전동기의 경우 맥동 토크와 속도 가변시 고속에서의 적용 범위에 제한 등의 문제점이 있다. 이를 해결하기 위하여 최근 상수, 극수 및 슬롯수를 증가시켜 문제를 해결하고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 따라서 본 논문에서는 7상 PMSM 전동기의 정상상태에서 토크 및 전압의 출력특성을 해석하고 한다.^[1]

2. 7상 PMSM 전동기 구동시스템

2.1 구동시스템 모델링

그림1과 2는 7상 PMSM 전동기의 단면도와 권선도를 나타내고 있으며 각상의 위상차는 공간적으로 $2\pi/7$ 가 되는 정현파 형태의 역기전기력을 갖는다. 그림 3은 전동기의 구동시스템을 나타낸다.

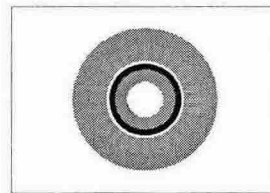


그림 1 전동기 단면도
 Fig 1 Motor of Sectional View

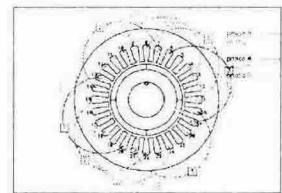


그림 2 전동기 권선도
 Fig 2 Motor of Winding View

7상 PMSM 전동기의 전압방정식은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$v_x = L \frac{di_x}{dt} + Ri_x + e_x$$

$$x = a, b, c, d, e, f, g \quad (1)$$

또한 출력전력과 출력토크의 관계식은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_M}$$

$$= \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c + e_d i_d + e_e i_e + e_f i_f + e_g i_g}{\omega_M}$$

$$= \frac{7E_m I_m}{2\omega_M} \quad (2)$$

이때 출력토크 T_e 에 의한 전동기의 운동방정식은 식(3)과 같이 모델링 된다.

$$T_e = J_m \frac{d\omega_M}{dt} + B_m \omega_M + T_L \quad (3)$$

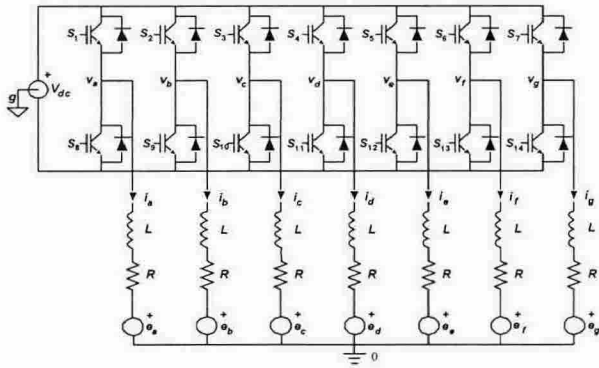


그림 3 7상 PMSM의 구동시스템
Fig 3 7-Phase PMSM Motor Drive System.

2.2 7상 PMSM의 동기좌표계 모델링

7상을 2상 d-q 정지좌표계 변환하면 식(4)와 같이 되고 2상 d-q 정지좌표계를 2상 d-q 동기좌표계로 변환하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_d^e \\ V_q^e \end{bmatrix} = \frac{2}{7} \begin{bmatrix} \cos(0) & \cos(-\frac{2\pi}{7}) & \cos(-\frac{4\pi}{7}) & \cos(-\frac{6\pi}{7}) & \cos(-\frac{8\pi}{7}) & \cos(-\frac{10\pi}{7}) & \cos(-\frac{12\pi}{7}) \\ \sin(0) & \sin(-\frac{2\pi}{7}) & \sin(-\frac{4\pi}{7}) & \sin(-\frac{6\pi}{7}) & \sin(-\frac{8\pi}{7}) & \sin(-\frac{10\pi}{7}) & \sin(-\frac{12\pi}{7}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \\ V_e \\ V_f \\ V_g \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} V_d^e \\ V_q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d^s \\ V_q^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3 제어기 설계

7상 PMSM 전동기 구동시스템의 모델에서 7상 변수가 포함된 수식에 대해 7상-2상 변환 할 경우 식(1)과 식(2)는 동기좌표계 d-q축상에서 식(6)와 식(7)같이 나타낼 수 있고 이때의 블록다이어그램은 그림4와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_d^e \\ V_q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} LP+R & \omega L \\ -\omega L & LP+R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega \Phi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T_e \omega_M = \frac{7}{2} \omega \Phi_f i_q \quad (7)$$

이를 통하여 변조기가 이상적이라 가정할 때 제어기의 인버터 출력 기준전압은 실제 인버터 출력전압과 일치하게 되므로 PI 제어기를 구성하면 식(8)과 같이 설계가 가능하며 이를 블록다이어그램으로 나타내면 그림5와 같다. 이 때 전동기의 역기전력 및 서로 다른 축의 전류에 의한 왜란이 발생하므로 제어기상에서 이를 전향보상 해주어야 한다.

$$V_q^e = (K_{II} + \frac{K_I}{s})(I_q^e - I_q^e) + E_d^e - \omega L I_d^e \quad (8)$$

$$V_d^e = (K_{II} + \frac{K_I}{s})(I_d^e - I_d^e) + E_d^e + \omega L I_q^e \quad (9)$$

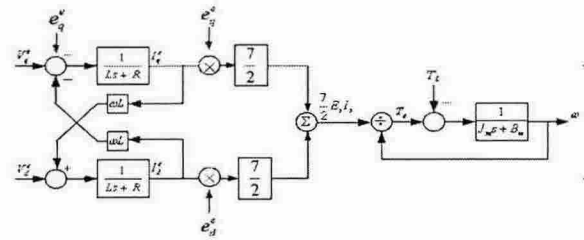


그림 4 동기좌표계 d-q축 상에서 구성한 7상 PMSM 전동기 구동시스템 모델
Fig 4 7-Phase PMSM Model at Synchronous Reference Frame

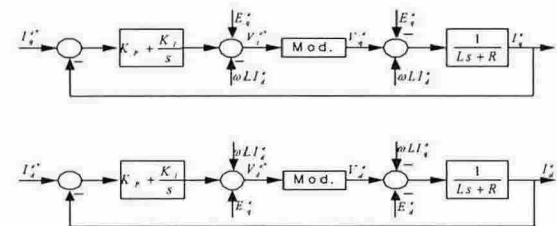


그림 5 동기좌표계 d-q축상에서 구성한 전류제어기
Fig 5 Current Controller of Synchronous Reference Frame

3. 7상 벡터변조기법

표 1은 전압출력벡터를 나타내며 이를 통하여 각상의 전압을 정지좌표계 d-q변환할 경우 각각의 출력벡터의 크기와 위상을 구할 수 있다. 그림 6은 표1에 따른 출력 벡터 테이블을 d-q축상에 배치한 것으로서 7개의 스위치 조합에 의한 벡터도를 나타내고 있다. 각각의 점은 모든 스위칭 조합의 개수 128개의 경우에 대하여 인버터 출력 전압벡터를 공간좌표계상에 투영한 것으로서 인버터의 스위치의 on, off의 비율이 3:4 또는 4:3이 아닐 경우에 출력벡터의 크기가 작아짐을 알 수 있으며 이러한 벡터를 사용할 경우 변조영역이 작아짐을 알 수 있다. 그림7은 최종적으로 사용가능한 경우의 출력벡터를 나타내었으며 이때 전류의 도통상태에 따른 출력벡터는 각각의 벡터의 중앙에 존재함을 알 수 있다.

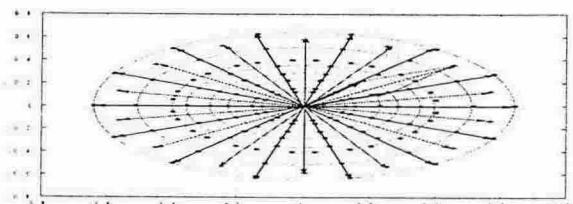


그림 6 인버터 출력벡터와 출력전압벡터의 기준벡터
Fig 6 Output Voltage Vector and Reference Vector of Output Voltage

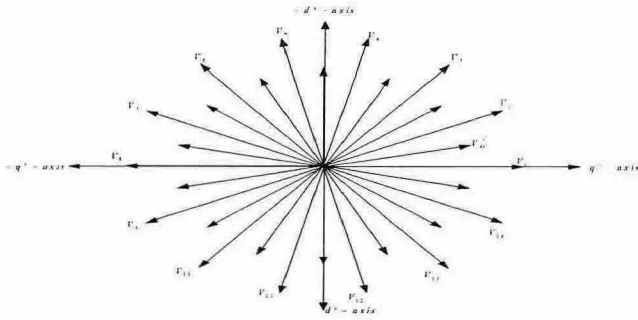


그림 7 사용가능한 인버터출력벡터와 출력전압벡터의 기준벡터
Fig 7 Usable Output Voltage Vector and Reference Vector of Output Voltage

표 1 스위치조합에 따른 각상 출력전압 및 d-q 출력전압벡터 ($\overline{V_{dq}}$)

Table 1 Inverter Output Voltage (v_{dq}) and d-q axis voltage vector ($\overline{V_{dq}}$) according to 7-phase Switching Condition

Nc	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	v _{d0}	v _{q0}	v _{d1}	v _{q1}	v _{d2}	v _{q2}	v _{d3}	v _{q3}	v _{d4}	v _{q4}	v _{d5}	v _{q5}	v _{d6}	v _{q6}	$\overline{V_{dq}}$	
-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0	1	4/7	4/7	-3/7	-3/7	-3/7	-3/7	4/7	4/7	0	0	0	0	0	0	0.642∠0
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
13	1	1	1	0	0	0	1	3/7	3/7	3/7	-4/7	-4/7	-4/7	3/7	3/7	3/7	0	0	0	0	0	0	0.642∠-13π/7
-	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

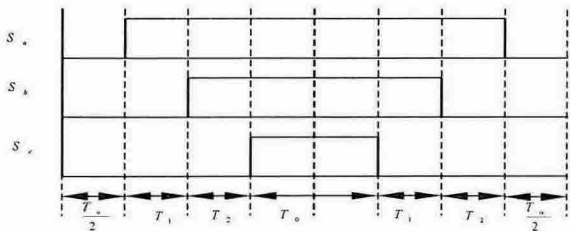


그림 8 7상 벡터변조방식의 스위칭 패턴
Fig. 8 Switching pattern of 7-phase vector modulation.

전동기 위치에 따른 출력전류와 그때의 출력전압벡터와의 관계를 고려하면 그림 8과 같은 7상 벡터변조방식의 스위칭 패턴을 얻을 수 있다.

4. 시뮬레이션

표 2 에서는 시뮬레이션에 사용된 전동기의 파라미터를 나타내고 있으며 그림 9는 인버터 각상 출력전압이 공간전압벡터 PWM 동작에 의하여 변조된 모양을 나타내고 있다. 그림 10은 무부하시의 각상 출력전류파형을 나타내고 있으며 상당히 정현파에 가까운 형태로 되는 것을 볼 수 있다.

표 2. 7상 PMSM 전동기의 파라미터
Table 2. Parameter of 7-phase PMSM Motor

전동기	7상 PMSM
저항(Rs)	1.07[Ω]
자기인덕턴스(Ls)	4.2e-3[H]
극수(P)	4극
역기전력상수(Ke)	0.0573V×sec/rad
토크상수(Kt)	0.332
회전자의 관성모멘트(Jm)	3.6e-4[g×cm×sec ²]
마찰계수(Bm)	1.0e-5[N]

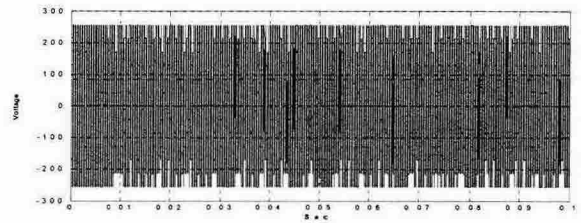


그림 9 각상의 공간전압벡터 출력전압파형
Fig 9 Output Voltage Waveform for Phase each

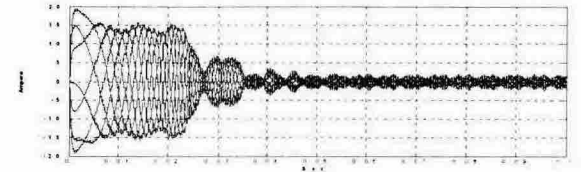


그림 10 각상의 출력전류파형(무부하시)
Fig 10 Output Current Waveform for Phase each (NO Load)

5. 결론

7상 PMSM전동기 시스템에 적용한 벡터변조기법, 제어기설계기술, 다상 PMSM 모델링 및 7상에서 2상으로의 변환에 관하여 연구하였다. 시뮬레이션을 통하여 검증하였고 향후 실험을 통하여 여러 형태의 다상 전동기에 적용 가능할 것으로 기대된다.

이 논문은 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원주관으로 수행 되었음

참고 문헌

[1] N. Hemati and M.C. Leu, "A complete model characterization of brushless DC motor." IEEE Trans. Ind. Applicat. vol.28, No. 1, pp.172-180, JAN./FEB. 1992.