

벡터제어를 이용한 7상 BLDC 전동기의 구동시스템에 관한 연구

전윤석, 이병인, 이용균, 목형수
건국대학교 전기공학과

A Study on 7-Phase BLDC Motor Drive System with Vector Modulation

Yoon-Seok Jeon, Byung-In Lee, Yong-Goon Lee, Hyung-Soo Mok
Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University

Abstract - 3-Phase BLDC Motor, which is generally used, has limited usage in high speed, due to pulsation torque occurring commutation and variable speed. To solve this problem, it is necessary to increase invariable, pole number, or the number of slots. Currently, due to rapid growth of semiconductor technology and trend toward smaller and cheaper production of switching device, multi-phase BLDC Motor for high speed, high output power is being actively pursued to produce. In this paper 7-Phase BLDC Motor drive system is designed and Vector modulator is studied.

1. 서 론

오늘날 전동기의 수요는 날로 급증하고 있으며 이중 BLDC 전동기는 DC 전동기와 같은 속도-토크 특성을 가지므로 제어에 적합하면서도 유지보수가 용이한 장점을 가지며 최근의 전력 스위칭 소자 및 제어기술의 발달로 그 사용이 급증하고 있다. 그러나 일반적으로 사용되고 있는 3상 BLDC 전동기의 경우 전류(轉流)시 발생하는 맥동토크와 이로 인한 진동 및 소음으로 고속에서 그 적용범위가 제한되고 있다. 이러한 3상 BLDC 전동기의 맥동토크 문제를 해결하기 위해서는 BLDC 전동기의 상수, 극수 또는 슬롯수를 증가시키는 것이 필요하며 최근의 반도체 기술의 발달로 인한 스위칭 소자의 소형화, 저가화 추세에 힘입어 고속·고출력용의 다상 BLDC 전동기의 개발이 활발히 추진되고 있다. 이러한 다상 BLDC 전동기중 7상 BLDC 전동기의 경우는 맥동토크가 적으며 동일 드라이버 용량을 가질 경우 3상에 비해 300%의 출력을 가지며 상당 출력밀도로서는 12%의 높은 출력밀도를 가진다. 그러나 고속모터는 정격속도에서의 역기전력 제한을 위하여 낮은 권선수를 가지며 따라서 권선 인덕턴스 또한 낮아지게 된다. 따라서 이러한 낮은 권선 인덕턴스에 의하여 전류의 리플이 커지는 단점이 있으며 특히 저속구간에서 그 특성이 심화되므로 일반적인 히스테리시스 제어기의 경우 스위칭 주파수가 극히 높아지는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 7상 BLDC 전동기의 모델링을 d-q축 상에서 구성함으로써 전동기의 제어를 간략화시키는 한편 스위칭 주파수를 일정하게 할 수 있는 벡터제어기법에 대하여 연구하였다.

2. 본 론

2.1 7상 BLDC 전동기 구동시스템

그림 1은 7상 BLDC 전동기의 구동시스템을 나타내고 있다. 이러한 7상 BLDC는 각상의 역기전력과 인덕턴스 및 저항 성분으로 모델링 될 수 있으며 구동회로는 브릿지회로를 사용하였다. 또한 전동기의 이상적인 역기전력은 그림 2에 나타낸 것과 같이 도통구간은 $\frac{6\pi}{7}$ 이며 각

상의 위상차가 $\frac{2\pi}{7}$ 가 되는 사다리꼴 파형이 되며 이때 출력전력 및 출력토크를 일정하게 하기 위해서는 도통구간에서만 구형파의 상전류가 흐르도록 해야 한다.

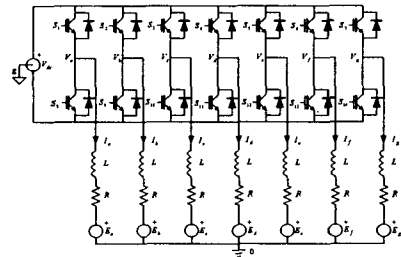


그림1 7상 BLDC 전동기의 구동회로

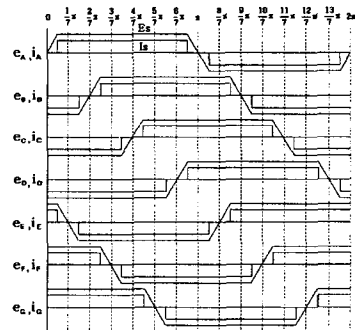


그림 2 역기전력 및 상전류 파형

이러한 7상 BLDC 전동기의 모델은 다음과 같이 식 (1)~(3)으로 표현될 수 있다. 이때 자기 및 상호 인덕턴스 성분은 각 상의 타 상에 대한 영향이 동일하므로 상대평준화 기법에 의하여 상인덕턴스로 표시할 수 있다.

$$v_x = L \frac{di_x}{dt} + R i_x + e_x \quad (1)$$

where $x = a, b, c, d, e, f, g$

또한 7상 BLDC 전동기는 항상 6개의 상이 직류와 같이 도통하므로 출력전력과 출력토크의 관계는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_M} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c + e_d i_d + e_e i_e + e_f i_f + e_g i_g}{\omega_M} \quad (2)$$

$$= \frac{6 E_f I_s}{\omega_M}$$

또한 전동기의 운동방정식은 다음과 같이 부하토크에 대한 왜란이 포함되는 형태로 나타낼 수 있다.

$$T_e = J \frac{dw_M}{dt} + Bw_M + T_L \quad (3)$$

2.2 7상 BLDC전동기의 d-q축 모델링

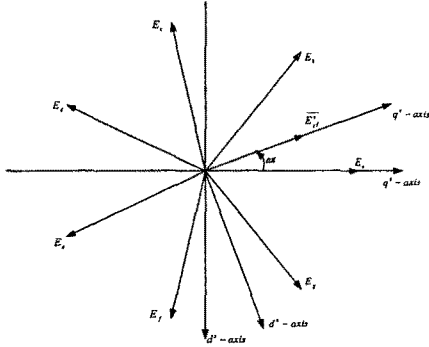


그림 3 7상 시스템의 d-q축 변환

그림 3은 7상시스템의 정지좌표계 변환 및 동기좌표계 변환에 대하여 나타내고 있다. 이러한 변환행렬은 식 (4)~(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{E_{a2g}} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \\ E_d \\ E_e \\ E_f \\ E_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(0) & \sin(0) \\ \cos(-\frac{2\pi}{7}) & \sin(-\frac{2\pi}{7}) \\ \cos(-\frac{4\pi}{7}) & \sin(-\frac{4\pi}{7}) \\ \cos(-\frac{6\pi}{7}) & \sin(-\frac{6\pi}{7}) \\ \cos(-\frac{8\pi}{7}) & \sin(-\frac{8\pi}{7}) \\ \cos(-\frac{10\pi}{7}) & \sin(-\frac{10\pi}{7}) \\ \cos(-\frac{12\pi}{7}) & \sin(-\frac{12\pi}{7}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d^* \\ E_q^* \end{bmatrix} = T_{72} \overline{E_{dq}^*} \quad (4)$$

$$\overline{E_{dq}^*} = \frac{2}{7} T_{72}^T \overline{E_{a2g}} \quad (5)$$

$$\overline{E_{dq}^*} = \begin{bmatrix} E_d^* \\ E_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d^e \\ E_q^e \end{bmatrix} = T(\omega t) \overline{E_{dq}^e} \quad (6)$$

$$\overline{E_{dq}^e} = T(-\omega t) \overline{E_{dq}^*} \quad (7)$$

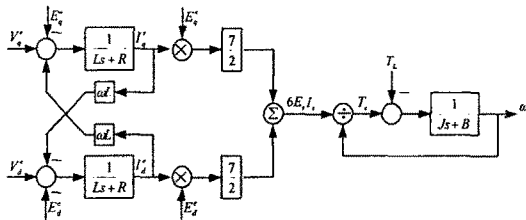


그림 4 7상 BLDC 전동기의 d-q축 모델

따라서 이를 이용하여 식 (1)~(2)를 변환하면 다음과 같이 나타낼 수 있으며 이를 블록다이어그램으로 표시하면 그림 4와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_q^e \\ V_d^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} LP + R & \omega L \\ -\omega L & LP + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_q^e \\ I_d^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_q^e \\ E_d^e \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$w_M T_e = P_e = \frac{7}{2} (E_q^e I_q^e + E_d^e I_d^e) = 6E_d I_d \quad (9)$$

2.3 제어기 설계

그림 5는 실제 상전류 센싱기법을 나타내고 있다. 전 동기 엔코더 신호를 논리회로를 통하여 상전류의 기준파형을 구한 후 이를 정지좌표계 d-q변환을 한 후 절대값을 취하여 나누어 주면 $\cos \omega t$ 및 $\sin \omega t$ 를 구할 수 있으므로 이를 통해 상전류를 변환하게 된다. 이때 엔코더의 신호는 불연속적이므로 ωt 또한 연속적이지 아니라 불연속적으로 변화하게 된다.

이를 통하여 변조기가 이상적이라 가정하면 전류제어기와 속도제어기는 그림 6,7과 같이 PI제어기로서 구성할 수 있으며 일반적인 폐루프 해석으로서 이득을 구할 수 있다. 이 때 역기전력에 따른 왜란 보상은 역기전력 상수에 의하여 계산되어지며 ω 는 전동기 속도를 통해 알 수 있다. 이러한 제어기를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$V_q^* = (K_{PI} + \frac{K_I}{s})(I_q^* - I_q^e) + E_q^e - \omega L I_d^e \quad (10)$$

$$V_d^* = (K_{PI} + \frac{K_I}{s})(I_d^* - I_d^e) + E_d^e + \omega L I_q^e \quad (11)$$

$$\text{where } K_{PI} = 2\zeta \omega_n L - R$$

$$K_I = \omega_n^2 L$$

또한 속도제어기는 식(3) 및 (9)를 이용한 선형화 과정을 거쳐 다음과 같이 설계 할 수 있다.

$$I_d^* = \frac{2w^*}{7E_q^e} (K_{SP} + \frac{K_{SI}}{s})(w^* - w) \quad (12)$$

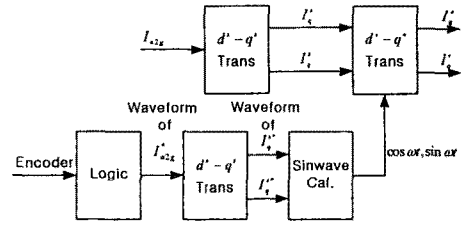


그림 5 상전류의 d-q변환

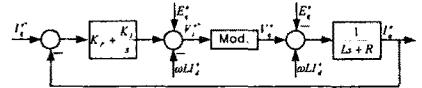


그림 6 7상 BLDC 전동기의 전류제어기

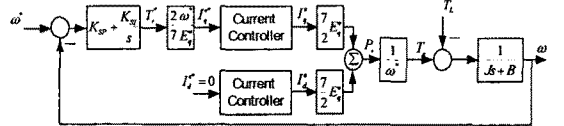
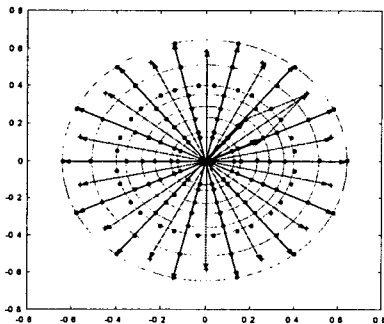


그림 7 7상 BLDC 전동기의 속도제어기

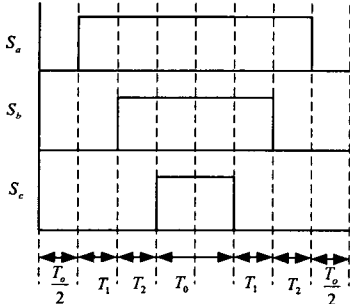
2.4 7상 BLDC 전동기를 위한 벡터변조기법

앞 절에서와 같은 제어기가 정상적으로 동작하기 위해서는 7상 출력전압을 기준전압과 동일하게 출력하여 줄 수 있는 스위칭 패턴을 만들도록 변조기를 구성하는 것이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 7상 벡터변조기법에 대하여 연구하였다. 그림 8(a)는 7개의 스위치 조합에 의한 벡터도를 나타내고 있다. 이때 7상 스

위치의 조합은 총 $2^7 = 128$ 개이지만 사용 가능한 벡터는 모든 스위치가 동일한 on-off 상태에 있는 영벡터 2개와 출력벡터 14개이며 이러한 스위칭 패턴에 따른 출력전압벡터는 각각 크기가 $0.642 V_{dc}$ 이며 $\pi/7$ 의 위상차를 가지게 된다. 그 이유는 on-off되는 스위치의 비율이 큰 차이가 날 경우 출력전압벡터의 크기가 너무 작아지기 때문이며 따라서 최대 변조는 14개의 벡터에 의해서만 이루어지게 된다. 이때 출력전류의 위상각은 불연속적으로 이동하게 되며 이는 각각의 출력벡터의 중앙에 위치하게 됨으로서 양측의 두개의 벡터로서 출력할 수 있다. 이때 각각의 전동기 위치에 따른 출력전류와 그때의 출력전압벡터와의 관계를 고려하면 양의 전류가 흐르는 상, 음의 전류가 흐르는 상 및 0전류가 흐르는 상에 따라 그림 8(b)와 같은 스위칭 패턴을 얻을 수 있다.



(a) 7상 벡터전압



(b) 출력스위칭 패턴

그림 8 7상 벡터전압 및 스위칭 패턴

이때 S_a 는 양의 전류가 흐르는 상의 스위치이며 S_b 는 0의 전류, S_c 는 음의 전류가 흐르는 상의 스위치이다.

또한 이때 출력전압의 기준벡터는 각 벡터의 출력벡터 중앙에 위치하므로 스위칭 시간 T_0, T_1 과 T_2 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_1 = T_2 = \frac{|V_{dq}^*| T_s}{2 \times 0.642 V_{dc} \cos \frac{\pi}{14}} \quad (13)$$

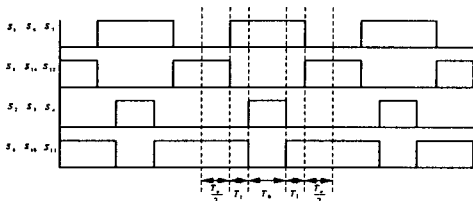


그림 9 6상 벡터의 스위칭 패턴

이러한 벡터변조방식은 출력벡터를 이용하여 여러 다상 모터에 적용가능하다. 그러나 BLDC 전동기의 2상 변환은 엔코더 신호로 조합된 전류기준신호로서 위상을 계산하므로 사다리꼴 파형의 역기전력성분은 일종의 왜란으로 작용하게 된다. 따라서 3상 BLDC 전동기의 2상 여자 방식과 마찬가지로 비도통상의 상하단의 스위치를 모두 OFF시켜주어야만 한다. 이때의 6상 벡터의 스위칭 패턴을 그림 9에 나타내었다.

3. 시뮬레이션

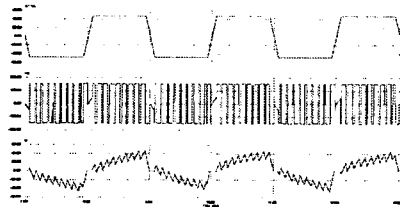


그림 10 7상 BLDC 전동기의 역기전력 파형, 공급전압 및 상전류

그림 10은 2kW급 20000RPM 7상 BLDC 전동기를 6상 벡터구동을 하였을 때의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 각 상의 상역기전력은 사다리꼴 파형과 같이 나타나며 각 상의 공급전압은 PWM변조의 형태로 나타나지만 비도통 구간에서는 상하의 스위치가 모두 Off되므로 역기전력과 동일한 전압이 나타남을 알 수 있다. 이때 상전류는 동시작시 과도상태가 나타나므로 이에 대한 고려가 필요함을 알 수 있다.

4. 결 론

이상과 같은 논의에 의해서 7상 BLDC전동기 시스템의 2상 모델링과 이를 통한 전류제어기 구성시 필요한 7상 벡터변조 및 사다리꼴 파형의 역기전력에 의한 전류 왜곡을 방지하기 위한 6상 벡터방식에 대하여 고찰하였다. 이러한 방식은 저속에서 스위칭 주파수가 증가하게 되는 히스테리시스방식에 비하여 스위칭 주파수가 고정되며 미소한 전압차도 각각의 벡터의 인가시간을 제어함으로써 정밀한 속도제어가 가능할 것으로 사료된다. 또한 이러한 벡터변조방식은 7상 BLDC 전동기뿐만 아니라 일반적인 다상 영구자석형 전동기의 모델링 및 벡터변조에 적용이 가능하며 이에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] G. R. Slemon, "High-Efficiency Drives Using Permanent Magnet Motors", IEEE IECON'93, pp.725-730, 1993
- [2] T. J. E. Miller, and Hendershot, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motor Drives", Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1994
- [3] I. Takahashi, "A Super High Speed PM Motor Drive System By a Quasi-Current Source Inverter", IEEE Transactions on Industry Application, vol. 30, No. 3, pp.683-690, 1994
- [4] P. Pillay, and R. Krishnan, "Modeling of Permanent Magnet Motor Drives", IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 35, No. 1, pp. 537-541, 1998