

PWM 방식에 의한 BDCM 구동시의 토크 리플 해석 및 평가

*윤병도, *김윤호, *조병국, *국윤상
*중앙대학교

Evaluation and Analysis of Torque ripples in BDCM Drives with PWM methods

*Byung-Do Yoon, *Yoon-Ho Kim, *Byung-guk cho, *Yoon-Sang Kook
*Dept. of Electrical Eng., Chung-Ang Univ.

Abstract

In industrial drive of the BDCM motor, voltage source inverter is oftenly used. In this paper in operation of the inverter for the BDCM drives, some PWM techniques are applied and the mathematical torque ripple model is developed to investigate the performance of the PWM techniques.

The simulation results show that the multiple pulse modulation is practically introduces the lowest torque ripple components.

1. 서론

사다리꼴 역기전압을 갖는 영구 자석 동기 전동기인 브러쉬리스 직류 전동기는 낮은 관성모멘트와 높은 효율을 가지고 있어 고성능 서보 전동기로 많이 이용되고 있다. 일정한 토크를 얻기 위해서는 역기 전압이 평탄한 부분에 구형적인 전류를 인가하는 히스테리시스 전류 제어형 인버터가 많이 이용된다. 그러나 히스테리시스 전류 제어는 각 상의 전류 오차로 각 상의 스위칭이 불규칙적으로 일어나므로 스위칭 소자의 손실이 증가하고 제어가 복잡해지는 단점이 있다. 따라서 브러쉬리스 직류 전동기 구동 시스템으로 실제적으로 PWM 인버터가 많이 이용되고 있다. 이러한 PWM 인버터의 출력 파형을 변조하기 위해 널리 사용되고 있는 방법은 반송파(carrier signal)와 기준파(reference signal)를 비교하여 인버터 출력 파형을 변조하는 PWM방식이 많이 이용되고 있다. [1]

본 논문에서는 브러쉬리스 직류 전동기의 등가 모델을 이용하여 입력전압과 토크와의 관계를 수식적인 형태로 표현하였으며 실제적으로 BDCM 전동기 구동에 이용되는 PWM방식에서 반송파 신호를 일반적인 경우, 정현파, 제형파, 그리고 구형파로 각각 주어졌을 때 토크 리플을 조사하여 이와 같은 파형에 따른 토크 리플을 비교하여 어느 PWM방식이 BDCM 구동에 양호한가를 고찰해 본다. 또한 각각의 경우에 대하여 DC 전원 분석을 통하여 인버터 스위칭에 따른 DC 전원에 미치는 영향에 대해서도 고찰해 보고자 한다.

1.1. PWM 파형 해석

전압인 인버터 구동방법으로 다중 펄스폭 변조방식이 많이 이용되고 있으며, 다중 펄스폭 변조방식은 반송파(carrier signal)와 기준파(reference signal)를 비교하여 인버터 출력전압을 발생한다. [2] 본 논문에서는 수식적 토크 모델용이하게 구할 수 있는 중성점을 가진 PWM 인버터를 대상으로 하였다. 브러쉬리스 직류 전동기를 구동하기 위한 중성점을 가진 기본적인 3상 PWM 인버터의 회로 구성도는 그림 1과 같다.

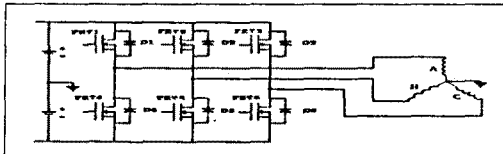


그림 1 중성점을 갖는 3상 다중 펄스 인버터

그림 2는 BDCM에 인가되는 스위칭 펄스를 발생시키기 위해 반송파 신호를 일반적인 경우, 정현파, 제형파, 그리고 구형파일 경우에 대한 각각의 PWM방식을 나타내고 있다.

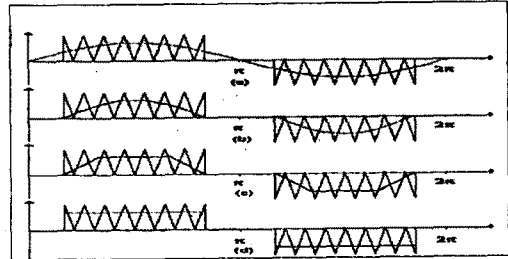


그림 2 여러가지 경우에 대한 PWM 방식
(a) 일반적인 경우 (b) 정현파 경우
(c) 제형파 경우 (d) 구형파 경우

그림 3은 BDCM의 한 상에 대한 전압, 역기 전력, 그리고 전류에 대한 파형이며 V_n 은 인버터의 스위칭에 의한 한 상의 전압 파형이고, E_a 는 역기전력 파형을 나타내며 I_a 는 전류 파형을 나타낸다.

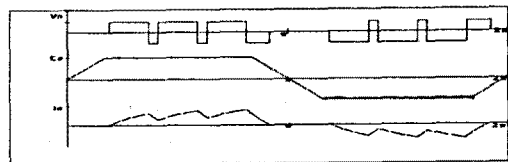


그림 3 브러쉬리스 직류전동기의 상전압 파형

다중 펄스폭 변조방식에 의한 한 상의 인가전압 $v_n(\omega t)$ 을 일반적인 푸리에 급수로 표현하면 다음과 같다.

$$v_n(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

출력전압의 파형은 반파대칭이므로 홀수 차수만이 존재하고 이고 구간 0에서 π 까지만을 고려하여 a_n 과 b_n 을 구하면 다음과 같이 표현한다.

$$v_n(\omega t) = \frac{2V}{n\pi} \sum_{n=2m-1}^{\infty} ((\sin n\alpha_1 - \sin n\gamma) \cos n\omega t + (2\cos n\alpha_1 - 4\cos n\alpha_2 - 4\cos n\alpha_3 + \cos n\gamma) \sin n\omega t) \quad (2)$$

(단, $m = 1, 2, 3, \dots$)

여기에서 γ 는 턴 오프시의 프리윌링 구간에 의하여 나타나는 각이다.

그림 3의 역기전압을 푸리에 급수로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$e_a(\omega t) = \sum_{n=2m-1}^{\infty} e_n \sin n\omega t \quad (3)$$

(단, $m = 1, 2, 3, \dots$)

여기서 $e_n = \frac{4E}{\pi F} \left(-\frac{\sin nF}{n^2} \right)$ 이다.

III. 수학적 토오크 리플 해석

R, L 부하인 가상 중성점을 고려한 한 상의 전동기 전압 방정식은 식 (4)로 표현된다.

$$v_n(\omega t) = R \cdot i_a + L \cdot \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (4)$$

이 식 (4)는 입력전압 $v_n(\omega t)$ 과 역기전력 $e_a(\omega t)$ 와의 차로 식 (6)과 같이 표현된다.

$$v_n(\omega t) - e_a(\omega t) = R \cdot i_a + L \cdot \frac{di_a}{dt} \quad (5)$$

$$v_a(\omega t) = \sum_{n=2m-1}^{\infty} ((a_n - e_n) \cos n\omega t + (b_n - e_n) \sin n\omega t) \quad (6)$$

(단, $m = 1, 2, 3, \dots$)

로 된다.

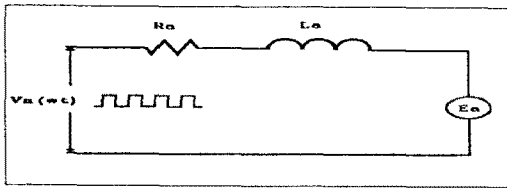


그림 4 한 상의 등가회로

식 (6)을 저항과 인덕턴스로 계산된 각 차수의 임피던스로 나누어 주면 전류에 대한 푸리에 급수 표현은 식 (7)로 표현한다.

$$i_a(\omega t) = \sum_{n=2m-1}^{\infty} (I_{an} \cos(n\omega t - \phi_n) + I_{bn} \sin(n\omega t - \phi_n)) \quad (7)$$

단 $m = 1, 2, 3, \dots$ 이다.

이와 같이 얻어진 식으로 한 상만의 토오크 T_e 를 표현하면 식 (8)과 같다.

$$T_e = \frac{e_a \cdot i_a}{\omega_r} \quad (8)$$

식 (8)에서 $e_b \cdot i_b$ 는 $e_a \cdot i_a$ 와 $-2/3 \pi$, $e_c \cdot i_c$ 는 $e_a \cdot i_a$ 와 $2/3 \pi$ 의 위상차가 생긴다. 위상차를 고려하여 계산하면 토오크의 각 차수중에 6배수 차수만이 존재하고 나머지는 0으로 되어 이 식을 정리하면 다음과 같이 된다. [3]

$$T_{em} = [T_0 + T_{6c} \cos 6\omega t + T_{6s} \sin 6\omega t + T_{12c} \cos 12\omega t + T_{12s} \sin 12\omega t + T_{18c} \cos 18\omega t + T_{18s} \sin 18\omega t + \dots] \quad (9)$$

식 (9)에서 토오크의 각 차수의 크기는 다음과 같이 표현된다.

$$T_0 = 3P_0 = 3/2\omega_r \cdot [e_1(I_{a1} \sin \phi_1 + I_{b1} \cos \phi_1) + e_3(I_{a3} \sin \phi_3 + I_{b3} \cos \phi_3) + e_5(I_{a5} \sin \phi_5 + I_{b5} \cos \phi_5) + e_7(I_{a7} \sin \phi_7 + I_{b7} \cos \phi_7) + \dots] \quad (10a)$$

$$T_{6c} = 3P_{6c} = 3/2\omega_r \cdot [(e_7 - e_5)(I_{a1} \sin \phi_1 + I_{b1} \cos \phi_1) + (e_9 - e_3)(I_{a3} \sin \phi_3 + I_{b3} \cos \phi_3) + (e_{11} - e_1)(I_{a5} \sin \phi_5 + I_{b5} \cos \phi_5) + (e_{13} + e_1)(I_{a7} \sin \phi_7 + I_{b7} \cos \phi_7) + \dots] \quad (10b)$$

$$T_{6s} = 3P_{6s} = 3/2\omega_r \cdot [(e_7 + e_5)(I_{a1} \cos \phi_1 - I_{b1} \sin \phi_1) + (e_9 + e_3)(I_{a3} \cos \phi_3 - I_{b3} \sin \phi_3) + (e_{11} + e_1)(I_{a5} \cos \phi_5 - I_{b5} \sin \phi_5) + (e_{13} - e_1)(I_{a7} \cos \phi_7 - I_{b7} \sin \phi_7) + \dots] \quad (10c)$$

$$T_{12c} = 3P_{12c} = 3/2\omega_r \cdot [(e_{13} - e_{11})(I_{a1} \sin \phi_1 + I_{b1} \cos \phi_1) + (e_{15} - e_9)(I_{a3} \sin \phi_3 + I_{b3} \cos \phi_3) + (e_{17} - e_7)(I_{a5} \sin \phi_5 + I_{b5} \cos \phi_5) + (e_{19} - e_5)(I_{a7} \sin \phi_7 + I_{b7} \cos \phi_7) + \dots] \quad (10d)$$

$$T_{12s} = 3P_{12s} = 3/2\omega_r \cdot [(e_{13} + e_{11})(I_{a1} \cos \phi_1 - I_{b1} \sin \phi_1) + (e_{15} + e_9)(I_{a3} \cos \phi_3 - I_{b3} \sin \phi_3) + (e_{17} + e_7)(I_{a5} \cos \phi_5 - I_{b5} \sin \phi_5) + (e_{19} + e_7)(I_{a7} \cos \phi_7 - I_{b7} \sin \phi_7) + \dots] \quad (10e)$$

...와 같이 18차, 24차 등도 같은 방식으로 이루어진다.

PWM제어 방식을 이용한 BDCM의 출력 토오크는 역기전력과 입력전압의 각각의 고조파 성분과의 관계로 부터 토오크 리플이 발생하고 입력전압과 역기전력의 적절한 조합으로 감소될 수 있음을 알수있다. 여기서 토오크의 기본파와 T_0 는 DC 성분이고 T_6, T_{12}, \dots 는 토오크의 리플을 야기하는 고조파 성분이다. 식 (2)에서 입력전압 $v_n(\omega t)$ 은 스위칭 소자의 도통각 α_k 의 함수이므로, 다중펄스 인버터의 도통각 α_k 를 제어하면 브러쉬리스 직류 전동기의 토오크 리플을 현저히 감소시킬 수 있는 구동이 가능하게 된다.

IV. 시뮬레이션 결과

사용된 4가지 PWM방식을 비교하기 위하여 시뮬레이션은 SPICE를 이용하여 수행하였으며 그림 5는 PWM방식에서 가장 많이 이용되고 있는 일반적인 방법을 나타내고 그림 5(a)는 그때의 전류 토오크 파형을 나타내고 있으며 그림 5(b)는 토오크 파형에 대한 주파수 분석을 보여주고 있으며 그림 5(c)는 그때의 DC 링크 전류에 대한 주파수 분석을 보여주고 있다. 그림 6은 반송파가 정현파일때의 경우에 대해 그림 7은 반송파가 제형파일때의 경우 그림 8은 반송파가 구형파일때의 경우에 대해서 각각의 파형에 대해 나타내고 있다.

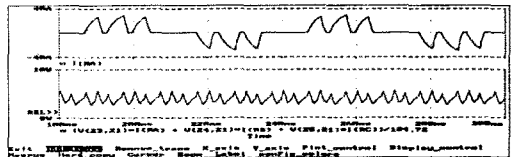
시뮬레이션 파형에서 나타난 것은 1000rpm, 펄스수가 3개인 경우에 대한 조건하에서 시뮬레이션을 한것으로 토오크 파형은 일반적인 경우나 구형파인 경우에도 비슷하지만 토오크 리플은 구형파보다 일반적인 경우가 약간 양호하다. 또한 제형파와 정현파인 경우에는 토오크 파형이 비슷하지만 제형파가 토오크 리플은 약간 양호 하게 나타난다. DC 링크 전류에 대한 영향은 구형파인 경우가 가장 양호하다.

여기에서 토오크 리플 T_{ripple} 은 토오크의 각각의 리플 성분의 합을 이용하여 식 (11)과 같이 표현된다.

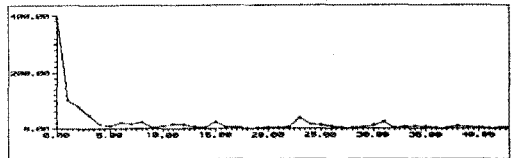
$$T_{ripple} = \sqrt{T_6^2 + T_{12}^2 + T_{18}^2 + \dots} \quad (11)$$

또한 TRF(Torque Ripple Factor)는 T_{ripple} 과 T_0 의 비로 나타낸다.

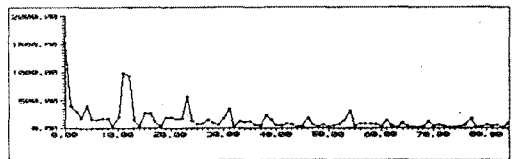
$$TRF = \frac{T_{ripple}}{T_0} \quad (12)$$



(a) 전류 및 토오크 파형

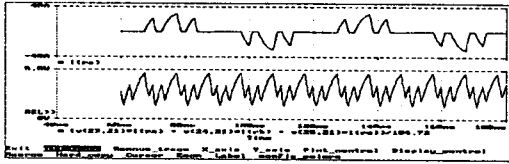


(b) 토오크에 대한 주파수 분석

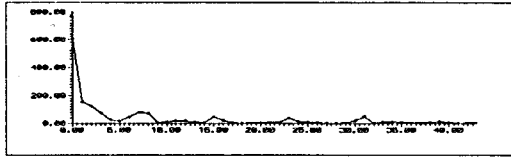


(c) DC 링크 전류에 대한 주파수 분석

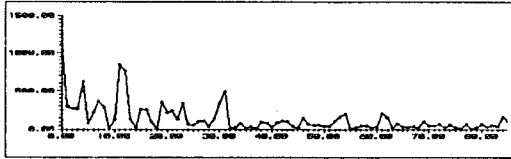
그림 5 일반적인 경우에 대한 시뮬레이션 파형



(a) 전류 및 토크 파형

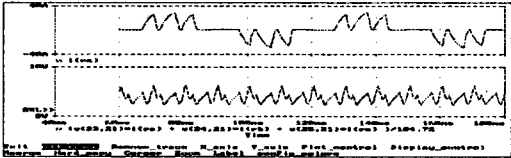


(b) 토크에 대한 주파수 분석

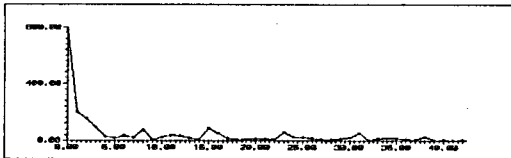


(c) DC링크 전류에 대한 주파수 분석

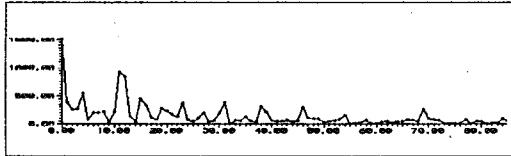
그림 6 정현파일 경우에 대한 시뮬레이션 파형



(a) 전류 및 토크 파형

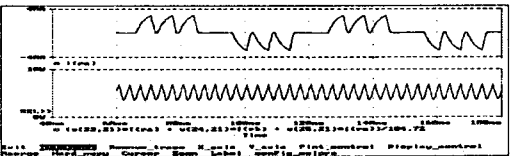


(b) 토크에 대한 주파수 분석

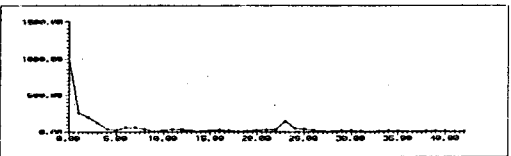


(c) DC링크 전류에 대한 주파수 분석

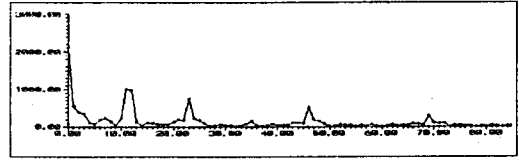
그림 7 제형파일 경우에 대한 시뮬레이션 파형



(a) 전류 및 토크 파형



(b) 토크에 대한 주파수 분석



(c) DC링크 전류에 대한 주파수 분석

그림 8 구형파일 경우에 대한 시뮬레이션 파형

다음은 펄스수의 변화에 따른 경우와 속도 변화에 따른 경우에 대해 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 그림 9의 경우에는 펄스수가 3, 5, 7개일 경우에 대해 각각의 토크 리플을 그래프로 나타내었다. 정현파와 제형파는 펄스수를 증가함에 따라 토크 리플이 약간씩 증가하고 구형파와 일반적인 경우는 감소하고 5개 이상에서는 구형파가 가장 양호하게 나타난다. 그림 10은 속도 변화에 따르는 토크 리플을 나타낸 것으로 낮은 속도에서는 정현파와 일반적인 경우가 양호하고 고속에서는 구형파인 경우와 일반적인 경우가 양호하게 나타난다. 그러나 정현파인 경우에는 속도를 증가시키도 토크 리플은 증가하는 경향이 있다.

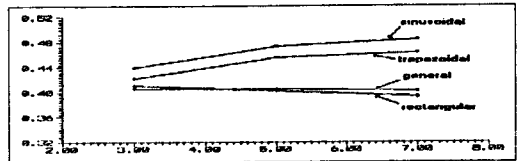


그림 9 펄스수 변화에 따른 토크 리플

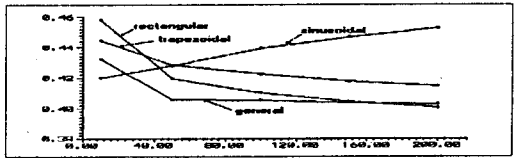


그림 10 속도 변화에 따른 토크 리플

V. 결론

본 논문에서는 입력 전압과 토크와의 관계를 수식적으로 표현 하였으며 실제적으로 BDCM 구동에 사용하는 PWM방법으로 구형파를 반송파로 하는 다중 펄스폭 변조 방식외에 일반적인 경우, 제형파인 경우, 정현파인 경우들에 대하여 토크 리플에 어떠한 영향을 미치는가를 관찰하였다.

그 결과 저속과 고속에서는 구형파가 가장 양호하고 펄스수를 증가에 따른 토크 리플도 구형파가 가장 양호 하게 나타났지만 일반적인 방법도 BDCM구동에서는 토크 리플에 크게 영향을 미치지 않는다. 또한 PWM에 따르는 DC 링크 전류에 미치는 영향을 고찰해본 결과 이때는 구형파인 경우가 가장 양호하게 나타남을 시뮬레이션을 통해 알수 있었다. 이는 원하는 속도에 따라 DC 링크 전류를 고려하여 적절한 PWM방식을 선택하여야 함을 나타내 주고 있다.

참고 문헌

- [1] P.Pillay and R.Krishan, "Modeling, Simulation And Analysis of Permanent-Magnet Motor Drivers", IEEE trans. Ind. App., vol.25, NO.2, Mar/Apr, 1989.
- [2] P.Pillay and R.Krishnan, "Control Characteristic and Speed Controller Design for A High Performance Permanent Magnet Synchronous Motor Drive", IEEE PESC, 1987.
- [3] Honng, "Minimization of Torque Ripple in Brushless DC Motor Drives", IEEE Trans, Vol.1A-22, No.4, July/August 1986.