

## MSTC를 이용한 7상 BLDC 모터 구동시스템

\*이 석, 전윤석, 김홍민, 목형수, \*\*김덕근

\*건국대학교 전기공학과 \*\*코모텍(주)

### 7-Phase BLDC Motor Drive System using MSTC

\*S. Lee, Y.S. Jeon, H.M. Kim, H.S. Mok, \*\*D.G. Kim

\*Dept. Electrical Eng. Univ. \*\*Komotek

#### ABSTRACT

Recently, the demand of motor for industrial, household machinery is increasing. As Switching devices and control technology are progressing, so the use of BLDC Motor is increasing. But 3-Phase BLDC Motor generally used has pulsating torque and speed variation in commutation, so the range of it's application is limited high speed application<sup>[1][7]</sup>. Especially, to solve these problems, it is necessary to increase phase of Motor, so study of Poly-Phase BLDC Motor is progressing. In this paper, we designd 7-Phase BLDC Motor drive system and MSTC(Minimum Switching Time Controller).

#### 1. 서 론

현재 모터의 수요는 날로 급증하고 있으며 이중 BLDC 모터는 DC 모터와 같은 속도-토크 특성을 가지므로 제어에 적합하면서도 유지보수가 용이한 장점을 가진다. 그리고 전력 스위칭 소자 및 제어 기술의 발달로 그 사용이 급증하고 있다.

그러나 일반적으로 사용되고 있는 3상 BLDC 모터의 경우 전류(轉流)시 발생하는 맥동토크와 이로 인한 속도 변동으로 고속에서 그 적용범위가 제한되고 있다<sup>[1][7]</sup>. 이러한 3상 BLDC 모터의 맥동토크 문제를 해결하기 위해서는 BLDC 모터의 상수, 극수 또는 슬롯수를 증가시키는 것이 필요하며<sup>[7]</sup> 최근의 반도체 기술의 발달로 인한 스위칭 소자의 소형화 저가화 추세에 힘입어 고속, 고�출력용의 다상 BLDC 모터의 개발이 활발히 추진되고 있다.

이러한 다상 BLDC 모터중 7상 BLDC 모터의 경우는 맥동토크가 적으며 동일 드라이버 용량을 가질 경우 3상에 비해 300%, 6상에 비해 12%의 높은 출력밀도를 가진

다.

하지만 고속모터는 낮은 권선 인덕턴스에 의하여 저속 구간에서 모터의 역기전력이 낮아 히스테리시스 제어기의 경우 스위칭 주파수가 크게 증가하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 7상 BLDC구동시스템을 설계 및 해석하였으며 스위칭 주파수 증가를 방지하기 위하여 MSTC(Minimum Switching Time Controller)기법을 사용한 전류제어기를 설계하였으며 시뮬레이션과 실험을 통해서 검증하였다.

#### 2. 7상 BLDC 모터 구동시스템

7상 BLDC 모터의 기본 구조는 각상의 권선이 전기각으로  $2/7\pi$ 간격으로 배치되어 있으며, 일정한 토크출력과 최대한의 출력밀도를 얻기 위해서는 항상 6개의 상이 도통해야 하므로 각 상 권선내의 두 개의 도체는 전기각으로  $6/7\pi$ 간격으로 배치된다. 이러한 7상 BLDC 모터의 이상적인 역기전력 파형은 그림 1와 같이 각 반주기동안  $6/7\pi$ 의 평탄한 구간을 가지는 사다리꼴 파형이다. 따라서 일정한 토크를 발생시키기 위해서는  $6/7\pi$ 의 도통구간 동안 전류가 일정하게 흐르도록 제어하여야 한다.

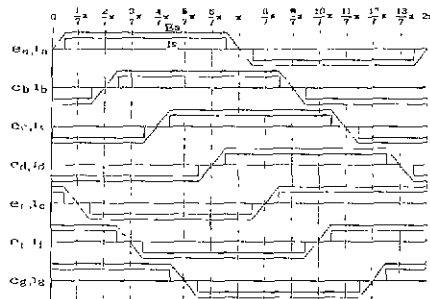


그림 1 7상 BLDC 모터의 역기전력 및 전류

Fig. 2 Back EMF and Current of 7-Phase BLDC Motor

이러한 7상 BLDC 모터의 구동을 위하여 그림 2와 같은 구동시스템을 설계 및 해석하였다. 속도 제어기는 PI제어기로 구성되어 있으며 Current Regulator는 도통구간 및 전류를 제어하게 된다

그림 2의 구동시스템의 모델은 식 (1) (2) (3)과 같이 표현된다.

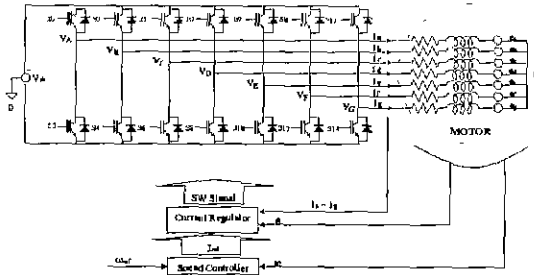


그림 2 7상 BLDC 모터 구동시스템  
Fig. 2 7-Phase BLDC Motor Drive System

$$V_X = 2(L - M) \frac{di}{dt} + e_X \quad (1)$$

단,  $X = A, B, C, D, E, F, G$

$$i_a + i_b + i_c + i_d + i_e + i_f + i_g = 0 \quad (2)$$

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (3)$$

$$T_e = \frac{e_A i_a + e_B i_b + e_C i_c + e_D i_d + e_E i_e + e_F i_f + e_G i_g}{\omega} \quad (4)$$

$$= \frac{6E_s I_s}{\omega}$$

식 (4)에서 볼 수 있듯이 7상 BLDC 모터에서는 순시적으로 6상이 도통되므로 토크는 각상 역기전력과 전류곱의 6배에 비례함으로써 동일한 소자 정격을 가지는 3상 BLDC 모터 시스템에 대하여 300%의 높은 출력밀도를 가지게 된다.

### 3. MSTC (Minimum Switching Time Controller)

본 논문에서 히스테리시스 제어기의 경우 저속에서 스위칭 주파수가 크게 상승함으로써 스위치 소자의 특성에 따라 오동작을 할 수 있으므로 이를 방지하기 위하여 그림 3과 같이 스위치 턴 온-오프시에 스위치 소자의 최소 온-오프 유지시간동안 상태를 유지시킨후 스위치를 턴 온-오프시키는 MSTC를 제안하였다.

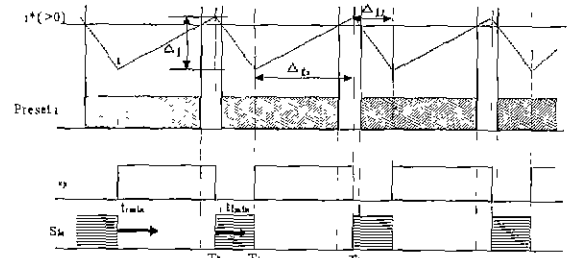


그림 3 MSTC의 스위칭 파형  
Fig. 3 Switching waveform of MSTC

그림 4는 이러한 MSTC의 제어 블록을 나타내고 있다.

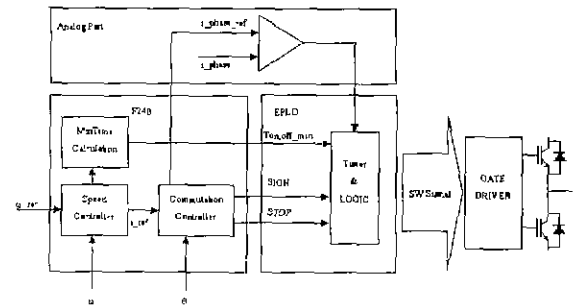


그림 4 전류제어기  
Fig. 4 Current controller

그림 3에서의 전류 리플 및 스위칭 주파수는 식 (5)부터 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$\Delta t_r = \frac{(V_c + 2E)}{(V_c - 2E)} \Delta t_f \quad (5)$$

$$f_s = \frac{1}{\Delta t_r + \Delta t_f} = \frac{V_c - 2E}{2V_c} \frac{1}{\Delta t_f} \quad (6)$$

$$i) \quad t_{rmin} \geq \frac{V_c + 2E}{V_c - 2E} \Delta t_{fmin} \quad (7)$$

$$f_s = \frac{V_c - 2E}{2V_c} \frac{1}{t_{fmin}} \quad (8)$$

$$\Delta i = \frac{V_c + 2E}{2(L - M)} t_{fmin} \quad (9)$$

$$ii) \quad t_{rmin} < \frac{V_c + 2E}{V_c - 2E} \Delta t_{fmin} \quad (10)$$

$$f_s = \frac{V_c + 2E}{2V_c} \frac{1}{t_{rmin}} \quad (11)$$

$$\Delta i = \frac{V_c - 2E}{2(L - M)} t_{rmin} \quad (12)$$

$t_{rmin}$  : 최소 Build up 유지시간

$t_{fmin}$  : 프리휠링 유지시간

그림 4는  $t_{rmin}$  과  $t_{fmin}$  이 여러 값으로 조정될 때의 속도에 따른 스위칭 주파수를 보여주고 있으며 굵은 실선은  $t_{rmin} = t_{fmin} = 5$  [us] 일 때의 스위칭 주파수의 궤적을 나타내고 있다.

본 논문에서 사용하고자하는 MSTC의 경우  $\Delta t_r = t_{rmin}$ ,  $\Delta t_f = t_{fmin}$  가 되도록 하며  $t_{rmin}$  과  $t_{fmin}$  은 식 (13) (14)에 의해 구할 수 있다.

$$t_{rmin} = \frac{(V_c + 2E)}{(V_c - 2E)} t_{fmin} \quad (13)$$

$$f_s = \frac{1}{\Delta t_r + \Delta t_f} = \frac{V_c - 2E}{2V_c} \frac{1}{t_{fmin}} \\ = \frac{V_c + 2E}{2V_c} \frac{1}{t_{rmin}} \quad (14)$$

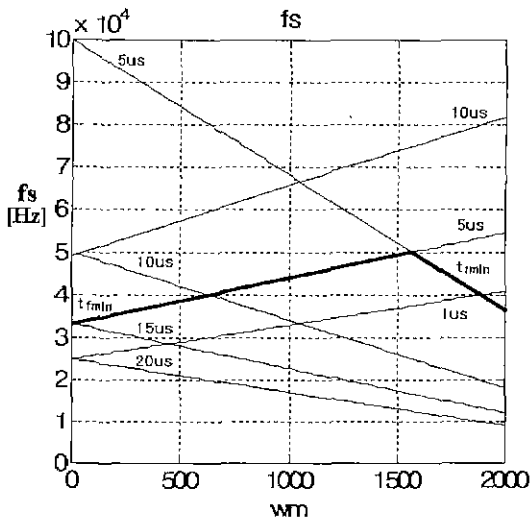


그림 5 속도에 따른 스위칭 주파수  
Fig. 5 Switching frequency according to speed

#### 4. 시뮬레이션

본 논문에서 보여주고 있는 7상 BLDC 모터의 시뮬레이션은 고정 주파수 MSTC를 적용한 파형이며 최소 Build up 유지시간과 프리휠링 시간을 각각 5[us]로 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 6부터 그림 8은 각각 7000[rpm], 10000[rpm], 15000[rpm]의 속도 변화에 따른 A상 Upper와 Lower측의 스위칭 신호 및 전류파형을 보여주고 있으며 시뮬레이션 결과 BLDC 모터가 고속으로 운전되더라도 MSTC에 의해서 최소

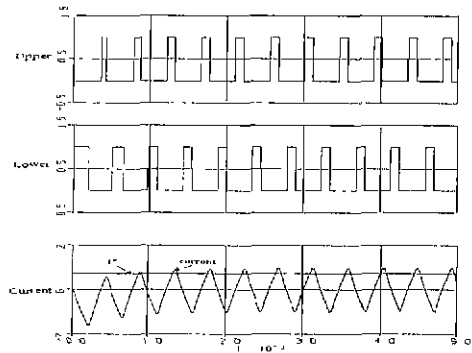


그림 6 속도 5000[rpm]일 때의 Upper, Lower 스위칭 신호 및 전류 파형  
Fig. 6 When speed 5000[rpm], waveform of Upper, Lower switching signal and current

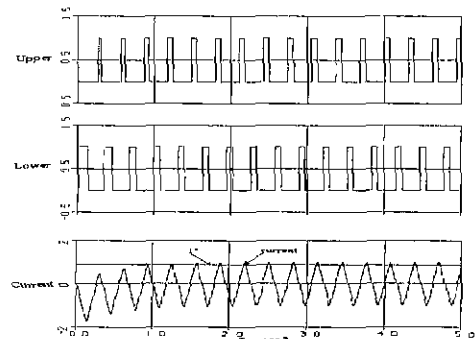


그림 7 속도 10000[rpm]일 때의 Upper, Lower 스위칭 신호 및 전류 파형  
Fig. 7 When speed 10000[rpm], waveform of Upper, Lower switching signal and current

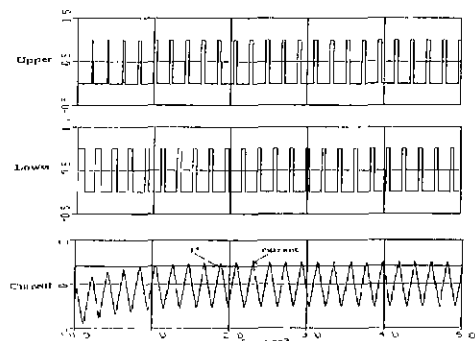


그림 8 속도 15000[rpm]일 때의 Upper, Lower 스위칭 신호 및 전류 파형  
Fig. 8 When speed 15000[rpm], waveform of Upper, Lower switching signal and current

유지시간과 프리휠링 시간을 유지시키면서 스위칭

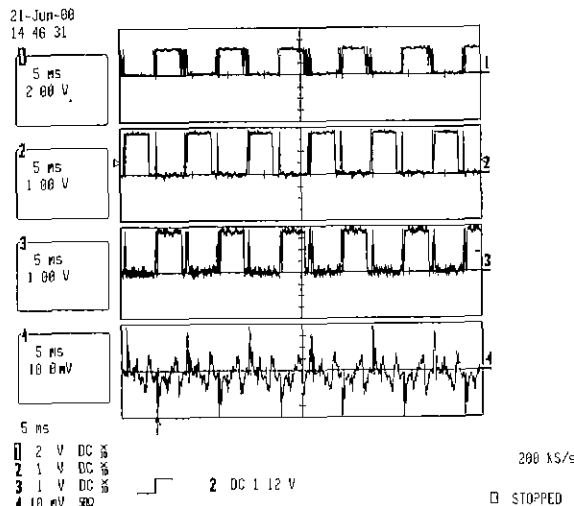
함으로서 스위칭 주파수의 이상적인 증가를 방지함을 알 수 있다.

### 5. 실험 결과

본 논문의 실험에서 사용한 전동기의 사양은 표 1과 같으며 최소 Build up 유지시간과 프리휠링 시간은 EPLD를 사용하여 스위칭 소자에 신호를 주는 방식을 택하였다.

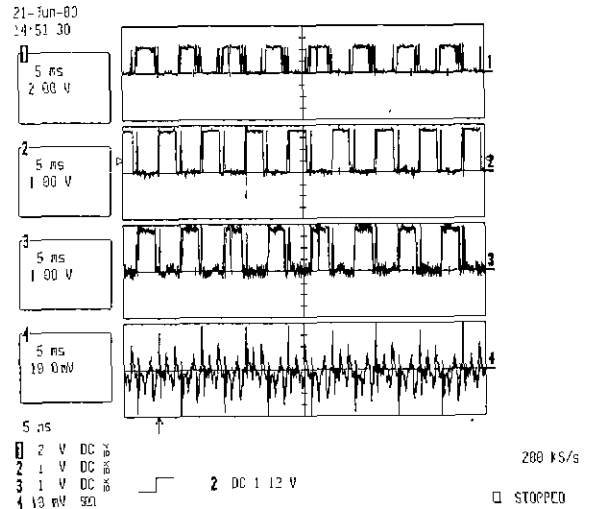
표 1 7상 BLDC 모터 사양 및 파라미터  
Table 1 specification and parameter of 7-Phase BLDCM

전동기	7상 BLDC 모터
정격 출력	800 [w]
저항(R)	0.476 [ $\Omega$ ]
자기인덕턴스(L)	0.3938 [mH]
상호인덕턴스(M)	0.07 [mH]
역기전력 상수(ke)	0.00477 [V/rad/sec]
$t_{rmin}$	5 [ $\mu$ s]
$t_{fmin}$	5 [ $\mu$ s]
스위칭 소자	IR2110
MOSFET	IRFPC50
DSP	TMS320F240
EPLD	EPF10K20TC144-3

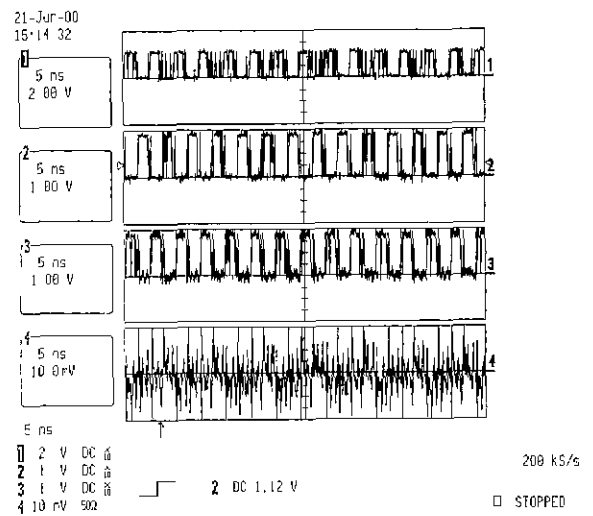


1 : Preset current 파형 2 : Upper 스위치 파형  
3 : Lower 스위치 파형 4 : 상전류 파형  
그림 9 속도 7000 [rpm]일 경우  
1 : Waveform of preset current  
2 : Waveform of upper switching  
3 : Waveform of lower switching  
4 : Waveform of phase current  
Fig. 9 Case of speed 7000 [rpm]

그림 8부터 그림 10은 제안한 전류제어기인 MSTC를 적용한 7상 BLDC 모터의 A상 preset 전류, Upper 스위치, Lower 스위치의 스위칭 파형과 전류의 파형이다. 시뮬레이션 결과와 같이 스위칭은 제안한 전류제어기인 MSTC의 최소 Build up 유지시간과 프리휠링 유지시간에 의해 스위칭 되



1 : Preset current 파형 2 : Upper 스위치 파형  
3 : Lower 스위치 파형 4 : 상전류 파형  
그림 10 속도 10000 [rpm]일 경우  
1 : Waveform of preset current  
2 : Waveform of upper switching  
3 : Waveform of lower switching  
4 : Waveform of phase current  
Fig. 9 Case of speed 10000 [rpm]



1 : Preset current 파형 2 : Upper 스위치 파형  
3 : Lower 스위치 파형 4 : 상전류 파형  
그림 11 속도 15000 [rpm]일 경우  
1 : Waveform of preset current  
2 : Waveform of upper switching  
3 : Waveform of lower switching  
4 : Waveform of phase current  
Fig. 10 Case of speed 15000 [rpm]

는 것을 볼 수 있다

### 6. 결론

본 논문에서는 고속 고효율 모터인 7상 BLDC 모터의 구동 시스템과 전류제어기인 MSTC를 설

계 및 해석하였으며 최소 Build up 유지시간과 프리휠링 유지시간을 구하여 제안한 전류제어기인 MSTC에 적용하여 시뮬레이션과 실험을 해보았다.

그 결과 해석한 7상 BLDC 모터의 구동시스템과 제안한 전류제어기인 MSTC가 고속모터에 적합하다는 것을 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

이 논문은 산업자원부에서 시행하는  
공업기반 기술개발 사업의 연구비 지원에  
의하여 연구되었음

### 참 고 문 헌

- [1] Hamid A. Toliyat, "Analysis and Simulation of Five-Phase Variable-Speed Induction Motor Drives Under Asymmetrical Connections," IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL.13, NO.4, pp748-756, 1998.
- [2] T. Zouaghi, P. Barret, D. Vielpeau and M. Ploujadoff, "Modelling of Rectified Ployphase Salient-Pole Synchronous Machines : Influence of End-Winding Leakages on short-Circuit Operation Diode Current," ETEP, Vol. 7, No 4, pp257-263, 1997.
- [3] James W. Piper, "Discussion of A Super High Speed PM Motor Drive System by a Quasi-Current Source Inverter," IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol. 31, NO. 4, pp848-849, 1995.
- [4] Lin Fong Teng and King Jet Tseng and Fang Lin Luo, "A Digitally-Controlled 5 Phase 22-poles PM Brushless DC Motor for Direct-Driven Electrical Vehicles," ICARCV'98, pp789-793, 1998.
- [5] T. Izhar and P. D. Evans, "PERMANENT MAGNET MULTIPOLE 6-PHASE BRUSHLESS DC MOTOR FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS," EPE'97, pp1.319-1.123, 1997.
- [6] Jessen Chen and Pei-Chong Tang, "A Sliding Mode Current Control Scheme for PWM Brushless DC Motor Drives," IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL.14, MO.3, pp541-551, 1999