

### 7.5kW급 축방향 자속형 Brushless DC 전동기의 속도제어에 관한 연구

문지우, 김병국, 김미정, 원진국, 조윤현, 전연도\*, 구대현\*  
 동아대학교, \*한국전기연구원

#### A study on the speed control of the 7.5kW Axial Flux type Brushless DC motor

Ji-Woo Moon, Byong-Kuk Kim, Mi-Jung Kim, Jin-Kuk Won, Yun-Hyun Cho, Yon-Do Chun, Dea-Hyun Koo\*  
 Dong-A University, \*Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 현재 산업분야에서는 보편적으로 방경방향 자속(Radial Flux)형 전동기가 사용되고 있다. 때문에 대용량의 경우 축방향 길이가 길어지게 되고 구조적 제약이 있는 곳에서의 적용이 어렵다. 이와 달리 축방향 자속(Axial Flux)형 전동기의 응용 범위는 광범위하며 기구적, 구조적으로 많은 이점을 지니고 있다. 본 논문에서는 7.5kW급 축방향 자속형 Brushless DC(BLDC) 전동기의 구동회로 및 속도제어 알고리즘을 구성하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 결과를 검토하였다.

#### 1. 서 론

생산라인에 사용되는 공작 기기에서는 고속, 고정도화와 기계자체의 기구의 간략화에 따르는 전동기의 소형화, 고효율, 고기능화가 요구되며, 기계에 일체화된 직접구동 전동기가 요구된다. 또한 자동차 부분으로 대표적인 전기자동차에서는 운전 영역에서 고토크, 고효율 전동기가 요구되며, 차량구동장치의 평가 장치로서 고토크를 요구한다. 이러한 관점에서 종래의 단위무게당 3.2Nm/kg, 3.7Nm/kg에서 단위무게당 9.4Nm/kg을 요구하는 새로운 전동기가 요구된다.

본 연구의 목적은 고효율과 고 신뢰성, 소형-경량화가 요구되는 산업 분야에 감속기 없이 직접 동력을 전달할 수 있고, 직접 구동 시스템의 구현으로 시스템의 소형화, 경량화, 고효율화 및 유지 보수작업이 거의 필요 없는 직접구동용 7.5kW급 축방향 자속형 Brushless DC(BLDC) 전동기의 속도 제어에 관한 연구를 실시하였다. 본 연구에서는 TMS320LF2407A DSP controller를 이용하여 알고리즘을 구현 하였으며, 이를 Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션 및 실험을 통해 증명하였다.

#### 2. 축방향 자속형 BLDC 전동기의 모델링

축방향 자속형 BLDC 전동기의 전압 방정식은 방경방향 자속형 BLDC 전동기의 전압 방정식과 동일하다. Y결선된 축방향 자속형 BLDC 전동기에서 전압방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)을 상태 공간 형태의 미분 방정식으로 나타내면 각상에서의 전류는 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \right\} \quad (2)$$

손실을 무시한다면 BLDC 전동기의 발생 토크는 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$T_e = \frac{(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)}{\omega_r} \quad (3)$$

여기서,  $v_a, v_b, v_c$ : 모터의 상 전압,  $L_s$ : 상의 전기자 인덕턴스  $R$ 은 상의 전기자저항,  $i_a, i_b, i_c$ : 상전류,  $e_a, e_b, e_c$ : 상의 역기전력  $\omega_m$ : 각속도 이다.

각 상의 전류와 역기전력이 같다고 가정하면 토크는 식 (4)이고,

$$T_e = \frac{2EI}{\omega_m} \quad (4)$$

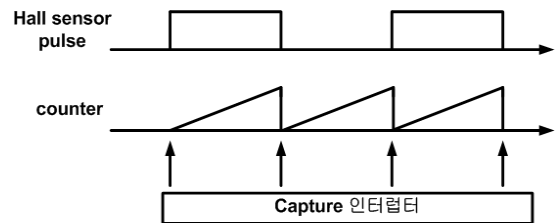
기계적 운동, 토크 방정식은 식 (5)와 같다.

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (5)$$

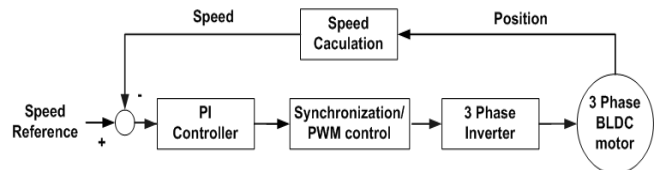
여기서,  $T_L$ 은 부하 토크,  $J$ 는 관성 모멘트,  $B$ 는 마찰계수이다.

#### 3. T-method를 이용한 속도제어 알고리즘

전동기의 속도제어를 위해서는 M-method, T-method, M/T-method 등을 이용하여 속도를 측정한다. M-method의 경우 일정한 샘플링 시간마다 발생하는 엔코더 펄스의 개수를 세어 전동기의 회전 속도를 측정하는 방식이다. M-method의 경우 구현이 간단하고 측정 시간이 일정하다는 장점이 있으나 저속에서의 속도 측정시 측정의 해상도가 나빠지는 단점이 있다. T-method의 경우 펄스와 펄스 사이의 시간 간격을 측정하여 전동기의 회전속도를 측정하는 방식이며, 이 방식의 경우 저속에서 정밀한 속도를 측정 할 수 있는 장점이 있으나, 속도에 따라 가변되는 문제점이 있다. M/T-method의 경우 M-method와 T-method를 같이 사용하는 방식이며, 이 방식의 경우 M-method와 T-method를 조합한 방식이다. 본 논문에서는 T-method를 사용하였으며, 위치 센서의 경우 가격이 저렴하며 회전자의 위치 검출이 용이한 홀센서를 이용하여 속도 제어를 실시하였다. 적용한 T-method의 경우 마이크로프로세서의 Capture 인터럽터를 이용하여 홀센서 신호의 시간을 카운터 하는 방식을 사용하였다. 그림 1은 본 논문에서 구현한 T-method의 속도 측정 방식을 보여주며, 제어시스템의 구성도는 그림 2와 같다.



<그림 1> T-method를 이용한 속도측정



<그림 2> 속도제어 시스템 구성도

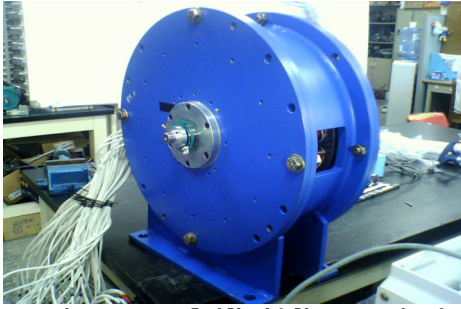
#### 4. 시뮬레이션 및 실험

본 논문에서는 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였으며, TMS320LF2407 DSP를 사용하여 알고리즘을 구현하였다.

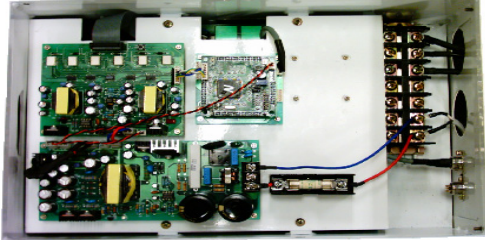
시뮬레이션 및 실험에 사용된 전동기의 파라메타는 표 1과 같으며, 그림 3과 4는 실험에 사용된 7.5kW 축방향 자속형 BLDC 전동기와 인버터를 보여준다.

<표 1> 전동기 파라메타

항 목	수 치	항 목	수 치
Output Power	7.5[kW]	Pol number	16극
Voltage	AC380[V]	Phase resistance	0.735[Ω]
Current	23[A]	Turn per phase	70[turn]
Speed	1800[rpm]	PM	Nd-Fe-B

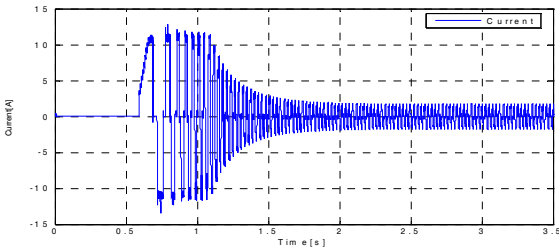


〈그림 3〉 7.5kW 축방향 자속형 BLDC 전동기

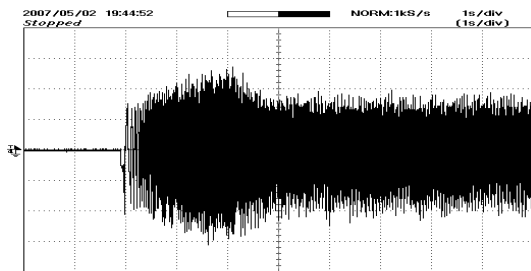


〈그림 4〉 7.5kW 축방향 자속형 BLDC 전동기 인버터

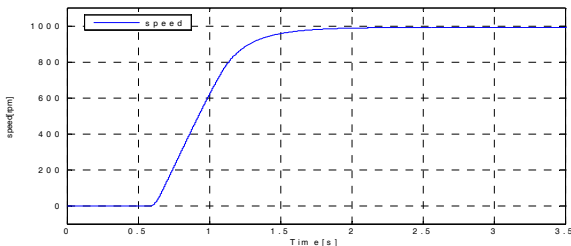
그림 5, 6, 7과 8은 지령속도 1000[rpm]에서의 시뮬레이션 및 실험에 의한 전류응답특성 및 속도 응답특성을 보여준다. 시뮬레이션의 경우 최대 전류가 13[A]정도이며 전류는 약 1[s]후 안정화되어진다. 실험과정의 경우 저속기동(slow-speed start)를 실시하여 기동시 최대전류는 5[A]정도로 줄어들었으나, 전류 및 속도는 약 3[s]후 안정화되어진다.



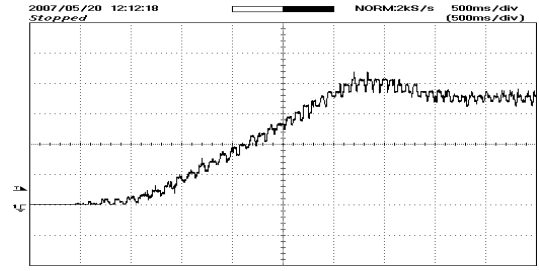
〈그림 5〉 시뮬레이션에 의한 전류응답특성(0.5s/div, 5A/div)



〈그림 6〉 실험에 의한 전류응답특성(2A/div, 1s/div)

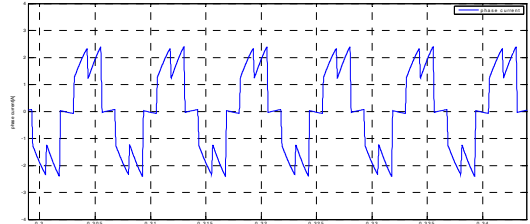


〈그림 7〉 시뮬레이션에 의한 속도응답특성(200rpm/div, 0.5s/div)

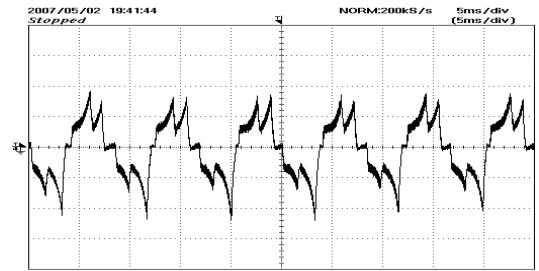


〈그림 8〉 실험에 의한 속도응답특성(500ms/div)

그림 9, 10은 속도 1000[rpm]에서의 상전류 파형을 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과와 같이 전류 리플이 발생하는 것을 보아 토크리플이 발생함을 알 수 있다.



〈그림 9〉 시뮬레이션에 의한 상전류 파형(1A/div, 5ms/div)



〈그림 10〉 실험에 의한 상전류 파형(2A/div, 5ms/div)

## 5. 결 론

본 논문에서는 방경방향 자속형 전동기에 비해 응용 범위가 광대하며 기구적, 구조적으로 많은 이점을 가진 축방향 자속형 BLDC 전동기의 속도제어에 관한 연구를 실시하였다. TMS320LF2407 DSP를 이용하여 7.5kW 축방향 자속형 BLDC 전동기의 속도제어를 실시하였다. 제어기 구성을 위해 전동기를 모델링 하였으며 이를 바탕으로 시뮬레이션 및 실험을 실시하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 속도제어 제어가 잘 이루어짐을 확인할 수 있었다. 향후에는 전류리플을 줄이기 위한 연구가 진행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 에너지관리공단의 에너지·자원기술개발사업의 지원으로 수행된 논문임을 밝힙니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 설승기, "전기기기제어론", 홍릉과학출판사
- [2] TI, Implementation of a Speed Controlled Brushless DC Drive Using TMS320F240, 1997
- [3] T. J. E Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives", Clarendon Press, Oxford 1989.
- [4] Ki-Hong Park, "Speed Control of High-Performance Brushless DC Motor Drives by Load Torque Estimation", Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC '03. 2003 IEEE 34th Annual, Volume 4, 15-19 June 2003 Page(s):1677 - 1681 vol.4
- [5] 조원영, "새로운 타입의 축방향 자속형 영구자석 전동기의 설계 및 특성 해석" 동아대학교 전기공학과 석사 졸업논문 2007년