

단일전류센서를 이용한 브러시리스 직류 전동기의 새로운 센서리스 제어에 관한 연구

김병복\*, 장재완, 장기봉, 이 주  
한양대학교 전기공학과

A Research for Novel Brushless Direct Current Motor  
Position Sensorless Drive Using Single Current Sensor

Kim Byung Bok\*, Jang Jae wan, Jang Ki Bong, Lee Ju  
Dept. Electrical Engineering of Hanyang Univ.

**Abstract** - This paper proposes a new sensorless drive system for the trapezoidal Brushless Direct Current (BLDC) motor requiring mechanical position or speed sensor. The proposed method is using only one current sensor. For this an indirect rotor position sensing method from the periodically variation DC Link current waveform. DC Link current waveform change from high to low when BLDC commutate status. This algorithm was verified by simulations using MATLAB SIMULINK and experiment.

1. 서 론

브러시리스 직류 전동기는 성능이 좋고 제어방법이 간단해 여러가지 분야에 응용되고 있는 전동기이다. 하지만, 구동시 회전자의 초기 위치 검출을 위해 위치센서가 필요하다는 단점이 있다.

따라서 브러시리스 직류 전동기의 센서리스 구동방식에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 기존의 센서리스 구동 방식은, 전동기의 수학적 모델링을 이용한 복잡한 계산 방식과 부가적인 신호인 전류와 전압을 얻기 위해 복잡한 회로를 사용하는 방식으로 구분된다. 이러한 방식은 구현이 어렵고 비용이 많이 든다.

본 연구에서는 브러시리스 직류 전동기 구동을 위한 인버터의 DC Link 입력단의 전류변화를 이용하여, 이 신호를 센서리스 구동을 위한 신호로 사용할 수 있는 가능성을 시뮬레이션을 통하여 확인하였으며 속도제어를 사용하여 비교적 부하변동이 적은 곳에 응용하였다. 또한 TMS320F240을 이용한 실험을 통해 이를 검증하였다.

2. 전동기 모델링

브러시리스 직류전동기는 회전자에 영구자석을 부착하고, 고정자에 전기자 권선을 갖는 영구자석형 동기전동기의 구조를 갖는다. 또한, 인버터를 이용해 고정자의 전기자 권선에 순차적인 전압을 인가하여 발생하는 여자전류에 의해 회전하게 된다.

그림 1은 전형적인 3상 구형과 구동형 브러시리스 직류 전동기의 회전자 위치에 따른 이상적인 역기전력 및 전류, 토크 파형을 나타낸다. 여기서  $e_a, e_b, e_c$ 와  $i_a, i_b, i_c$ 는 각 상의 역기전력과 전류이고  $T_a, T_b, T_c$ 는 각 상의 발생 토크이다.

그림 1에서 일정한 토크 발생을 위해 전동기의 역기전력 또는 토크 함수가 일정한 값을 갖는 120°의 통전 구간에서 구형과 형태의 전류 인가가 필요하며, 전기가 60°마다 상전류 전환을 실시하는 3상 2여자 120°도통 방식으로 구동되어야 한다.[1]

또한 구형과 역기전력을 가지는 브러시리스 직류전동기의 구동을 위한 인버터는 두개의 상을 여자하게 된다.

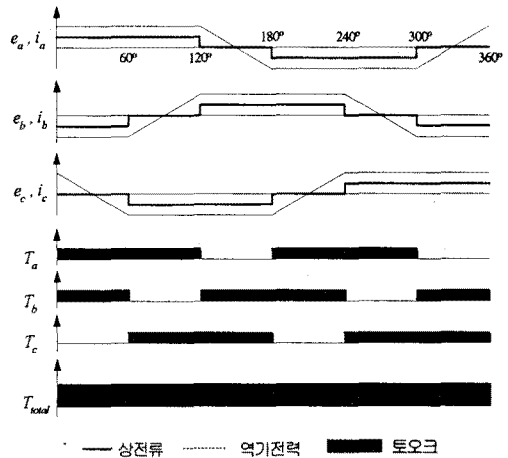


그림 1. 브러시리스 직류전동기의 상전류, 역기전력, 토크 파형

식(1),(2)는 전동기의 전압방정식과 출력식이며 식(3)의 운동방정식을 적용하여 그림 2의 한 상의 브러시리스 직류 전동기의 시뮬레이션 모델을 제시하였다.

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

$$P_{out} = T_e \omega_m = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (2)$$

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

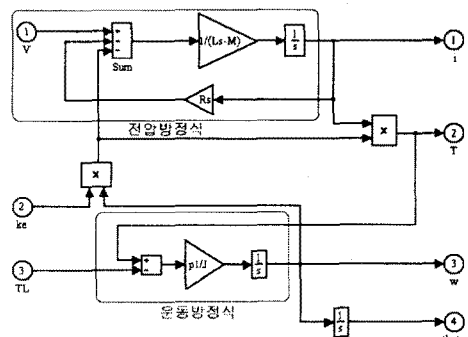


그림 2. 한 상의 브러시리스 직류전동기의 시뮬레이션 모델

### 3. 기존의 센서리스 구동방법

지금까지 구형과 브러시리스 직류전동기의 센서리스 운전을 위한 여러 방법들이 제안되어 왔다.

그 방법은 (1) 전류, 전압을 측정하고 기본적인 모터 방정식과 대수적 연산을 하는 것 (2) 상태 관측기를 이용하는 것 (3) 역기전력을 이용하는 것으로 구분할 수 있다.[2]

단자 전압의 제 3고조파를 이용하는 방식은 하드웨어적으로 상 전환 시점이 결정되므로 구동용 프로세서에 부담을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 역기전력 파형과 상전류가 비교적 정확한 동기를 유지할 수 있으므로 넓은 속도 범위에서 안정적인 센서리스 운전이 가능한 방법이다. 그러나, 저속 영역에서 운전시 측정되는 단자 전압의 크기가 매우 작아 제 3고조파 검출이 어렵게 된다. 또한, 일반적으로 제공되지 않는 전동기의 중성점을 이용해야 한다는 단점도 있다.[3]

단자 전류의 파형을 이용하는 방식은 넓은 속도 영역에서 센서리스 운전이 가능하지만 단자 전류 파형의 검출을 위해 3개의 독립된 양극성 전원이 필요하므로 센서리스 드라이브 구현에 많은 비용이 소요된다. 또한 저속 운전시 환류 다이오드에 흐르는 단자 전류의 값이 작아서 검출이 어렵고, 고속 운전시에는 위치 분해능이 저하된다는 단점을 가지고 있다.[4]

이상으로, 위치 센서를 없애는 대신 회전자의 간접적인 위치를 파악하기 위하여 주로 역기전력 정보를 이용하였다는 것을 알 수 있다. 이러한 방법의 실제 구현을 위해서는 역기전력을 측정하는 센서와 신호처리를 위한 부가 회로 및 DSP로 신호를 입력하기 위한 절연분리회로를 사용해야 하는 등의 가격적인 부담이 있다. 또한 이와 더불어 고조파 신호를 저역통과필터(LPF)를 사용하여 필요한 신호로 바꿔야 하므로 위상 지연의 문제를 해결하기 위한 튜닝이 필요하다.

### 4. 새로운 회전위치 검출 알고리즘

#### 4.1 DC Link단 입력전류 분석

본 연구에서는 DC Link단 입력전류의 변화가 상 전환 시점과 밀접한 관련이 있다는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. DC Link단 입력전류를 이용하여 제안한 알고리즘의 시뮬레이션을 위해 MATLAB SIMULINK와 사용자 정의 함수를 만들 수 있는 s-function를 사용하여 BLDC와 인버터를 모델링하였다.[5][6]

그림 3은 SIMULINK를 이용한 BLDC 및 DC Link 전류 모델링을 나타낸다. 여기서는 위치신호를 받아 각 상의 역기전력과 인버터 구동을 위한 모드를 출력하는 back\_emf & MODE 블록과 각 상의 인가전압을 출력하는 inverter블록, 그리고 상전류, 토크, 위치, 속도를 출력하는 BLDC 블록으로 구성되어 있다. 또한, 역기전력을 계산하는 EMF calc. 블록과 전동기의 Y-결선을 고려한 Vabc 블록으로 구성되어 있다.

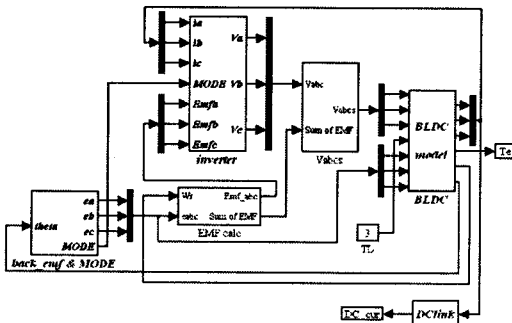


그림 3. SIMULINK를 이용한 BLDC 및 DC Link 전류 모델링

#### 4.2 DC Link단 입력전류의 센서리스 신호 사용

그림 4(a)는 DC Link단 입력전류와 회전자 위치를 나타내며 이는 DC Link단 입력전류의 상승부분과 하강부분으로 나눌 수 있다. 이는 입력전압에 의해 전류가 상승하는 부분과 상전류 전환 후 이전의 상전류가 다른 곳의 패스를 형성해 소멸함으로써 입력이 감소하는 부분으로 본 신호를 사용할 수 있음을 알게 된다.

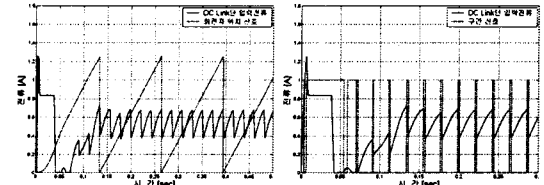
따라서, DC Link단 입력전류를 이용한 센서리스 신호(즉, 위치 신호)를 사용하기 위해서는 DC Link단 입력전류를 상승부와 하강부로 나누는 알고리즘과 DC Link단 입력전류 변화의 시간차를 계산하는 알고리즘이 필요하다.

#### 4.3 센서리스 신호 발생 알고리즘

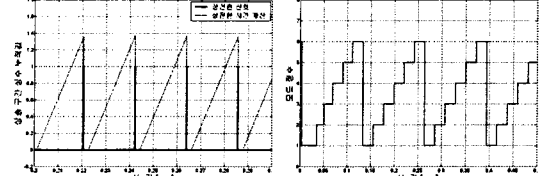
DC Link단 입력전류를 상승부와 하강부를 나누는 방식은 기울기를 계산하는 방식으로 이루어진다.

$$I_{New} - I_{Old} < K \quad (4)$$

이는 식(4)에 의해 구간을 판별하고, 각 구간의 구간상수를 지정하여 상승부의 시간과 하강부의 시간을 누적하여 계산된다. 이로 인해 상 전류전환이 발생하면 상 전환 시간을 계산할 수 있게 된다. 그림 4(b)는 위의 시뮬레이션 결과이고, 그림 4(c)는 상전류 전환 신호와 상 전환 시간의 계산 결과이며, 그림 4(d)는 이것을 통한 위치 추정 신호의 결과이다. 그림 5는 이상의 알고리즘을 순서도로 나타낸 것이다.



(a) DC Link단 입력전류, 회전자 위치 (b) DC Link단 입력전류, 구간 신호



(c) 상전류 전환 신호와 상전환 시간 (d) 위치 추정 신호

그림 4. 시뮬레이션

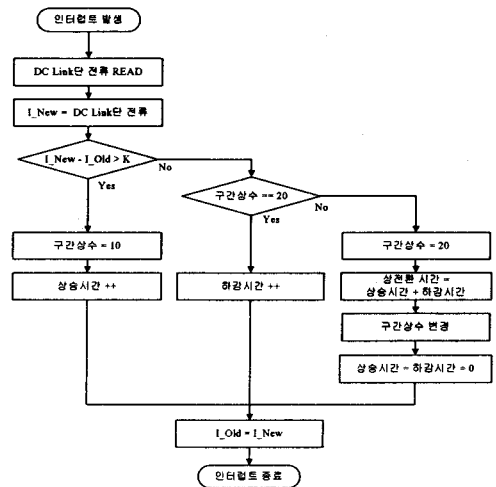
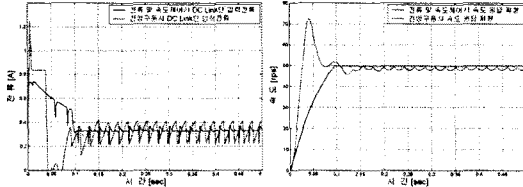


그림 5. 센서리스 신호 발생 알고리즘

성능 개선을 위해 DC Link단 입력전류를 PI 제어를 통해 전류제어 하였고, 속도 및 위치 추정기에서 발생한 속도 추정 신호를 PI 제어를 통해 속도제어 하였다. 그림 6은 전압구동시 전류 및 속도 제어에 따른 특성을 비교한 시뮬레이션 결과이다. 여기서 제어에 의해 전류의 피크치와 리플이 50[%] 이상 감소하였다는 것을 알 수 있다. 전압구동을 할 경우에 약 40[%]의 오버슈트와 3[%] 정도의 정상상태 오차가 있었다. 또한 토크 리플로 인한 속도의 리플이 있음을 알 수 있다.



(a) DC Link단 입력전류 비교 (b) 속도 응답 파형 비교

그림 6. 전압구동시와 전류 및 속도 제어시 특성 비교

### 5. 실험

그림 7은 본 논문에서 제안한 DC Link단 입력전류를 이용한 브러시리스 직류전동기 구동 시스템의 전체적인 개념도이다. DC Link단 입력전류는 CT에 의해 TMS 320F240의 내부 A/D로 입력되어 속도추정기를 거쳐 상 전환 시간이 계산되고 적절한 레퍼런스 전압이 발생되며 내장 PWM 발생기를 거쳐 인버터 스위칭이 발생되게 된다. 그림 8은 실험 장치에 대한 사진이다.

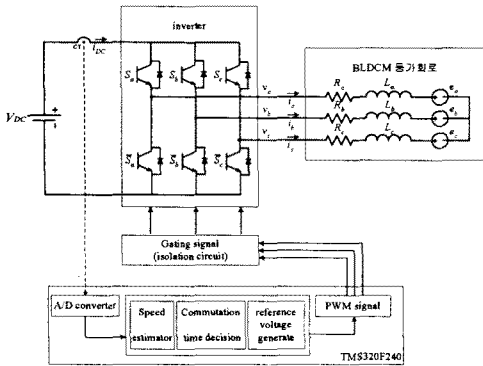


그림 7. 브러시리스 직류전동기 구동 시스템의 전체적인 개념도

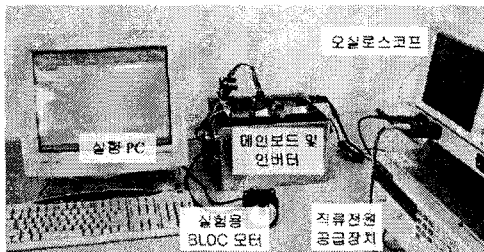
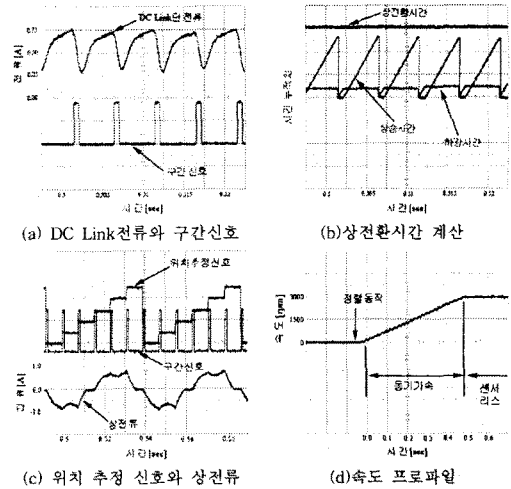


그림 8. 실험 장치

그림 9는 실험 결과 파형이다. 그림 9(a)는 DC Link단 입력전류로부터 구간신호가 발생하는 것을 나타내며, 그림 9(b)는 상 전환 시간 계산을 하는 부분으로, 상승시간과 하강시간 그리고 이를 더한 상 전환 시간을 나타낸다. 그림 9(c)는 상 전환 시간으로부터 발생하는 커뮤테이

션 신호와 이에 따른 상전류 파형을, 그림 9(d)는 가속과 정속 운전을 하는 속도 프로파일을 나타낸다.



(a) DC Link전류와 구간신호 (b)상전환시간 계산  
(c) 위치 추정 신호와 상전류 (d)속도 프로파일

그림 9. 실험결과

### 6. 결론

본 연구에서는 새로운 브러시리스 직류전동기의 센서리스 방법을 제안하였다.

전동기의 DC Link단 입력전류가 상전류 전환시마다 환류 다이오드로 회생하는 회생 전류로 인해 변화한다는 특성을 이용하여 상 전환 시간을 계산하고 이에 따라 현재의 속도를 추정하여 다음의 상 전환을 결정하는 방법으로 센서리스 구동을 수행하였다.

전류센서를 통한 센서리스 구동의 가능성을 MATLAB SIMULINK 와 s-function를 사용하여 시뮬레이션 하였으며 인버터와 전동기 그리고 제안한 알고리즘의 사용을 위한 DC Link 입력단을 모델링 하였다. 또한 간단한 실험을 통하여 제안한 알고리즘의 실용성을 보였다.

하지만, 전압구동만으로 인한 구동으로 인해 시뮬레이션과 마찬가지로 심한 토크리플이 발생되었다. 따라서 추후 시뮬레이션 된 부분인 전류 및 속도제어 부분을 추가하여 실험할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] P. C. Sen "Principles of Electric Machine and Power Electronics", Wiley, 1997.
- [2] Johnson, J.P. Ehsani, M. Guzelgunler, Y. "Review of Sensorless Methods for Brushless DC" in IEEE Industry Applications Conference, 1999.
- [3] Moreira, J.C, "Indirect sensing for rotor flux position of permanent magnet AC motors operating in a wide speed range" in IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1994.
- [4] Ogasawara S., Akagi H. "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless dc Motors" in IEEE Transactions on Industry applications, Vol. 27, No. 5, Sep 1991.
- [5] Math Works "Writing S-functions", 2000
- [6] Ion Boldea, S.A. Nasar "Electric Drives" 279-295, CRC Press, 1999.