

## 브러시리스 직류 전동기의 토크 맥동 저감을 위한 轉流 방법에 관한 연구

이광운, 장원익, 박정배, 여형기, 이인호, 유지윤  
고려대학교 전기공학과

### A Study on Commutation Strategy for Torque Ripple Reduotion of Brushless DC Motor

Kwang-Woon Lee, Won-Sik Jang, Jung-Bae Park, Hyoung-Gee Yeo, In-Ho Lee, Ji-Yoon Yoo  
Department of Electrical Engineering, Korea University

**Abstract** - The torque ripple is generated in brushless dc motors due to phase commutation and cause undesirable vibrations in servo application. This paper presents a new method reduce the torque ripple of brushless dc motor in commutation period.

#### 1. 서 론

브러시리스 직류 전동기는 영구자석 동기 전동기와 유사한 구조로서 회전자 관성에 비하여 토크가 크게 발생하고, 동적 응답이 우수하고, 넓은 속도 범위에 대하여 높은 효율을 유지하는 특성이 있다. 또한 회전자에 동기하여 고정자 권선에 전류를 흘려주면 직류 전동기처럼 전류에 비례하는 토크가 발생되기 때문에 유도기나 동기기에 비해 제어성이 뛰어나다. 이러한 특성으로 인하여 브러시리스 직류 전동기는 가정용, 사무용 기기, 그리고 공작 기기 등에 널리 이용되고 있으며, 그 응용 범위도 확대되고 있는 추세이다.[1][2]

브러시리스 직류 전동기에서 회전자를 일정 방향으로 회전시키기 위해서는 고정자 권선에 흐르는 전류를 회전자의 위치에 따라 轉流(commutation)시켜 주어야 한다. 轉流 구간에서 고정자 권선의 전류는 권선의 인덕턴스와 유기되는 역기전력으로 인해 전류 지령치를 바로 추종하지 못하며 이로 인해 전류 맥동과 토크 맥동이 발생된다.[3] 이러한 토크 맥동은 모터가 고속으로 회전할 때는 모터의 관성에 의해 상쇄가 되나 지속적으로 회전할 때는 상쇄되지 않으므로 잡음과 진동을 야기시킬 수 있으며, 속도 및 위치 제어시 오차를 발생시킬 수 있다.[4]

브러시리스 직류 전동기의 토크 맥동을 저감하기 위한 연구가 그동안 많이 진행되어 왔다. Berendsen은 轉流 구간에서 모터의 상 역기전력 값들로부터 모터 중성점과 인버터 중성점간의 전압 차이를 계산하여, 이를 전류 제어기에 전향 보상하여 전류 맥동을 줄이는 방법을 제안하였다.[5] 그러나 대부분의 서보용 브러시리스 직류 전동기에는 중성점이 별도로 제공되지 않기 때문에 상 역기전력 정보를 이용하는 방법은 실제로 적용하기 곤란하다.

본 연구에서는 전동기의 단자간의 역기전력을 추

정하고, 추정된 역기전력 정보를 이용하여 토크 맥동을 저감하는 방식을 제안하고자 한다. 본 연구에서 제안하는 방식은 추정된 역기전력 값으로부터 轉流 구간에서 전류 맥동을 최소화하기 위한 전류 지령치를 계산하고 이를 전류 제어기에 전향 보상하는 방식으로, 역기전력에 대한 정확한 정보 취득이 어려운 대부분의 브러시리스 직류 전동기에 적용이 가능하다.

#### 2. 브러시리스 직류 전동기의 모델링

브러시리스 직류 전동기의 고정자 권선 AB상에서 AC상으로 轉流될 때 고정자 권선에 흐르는 전류는 AC상으로 흐르는 상승 전류와 AB상으로 흐르는 하강 전류로 나뉘어진다. 그림 1,2,3은 轉流 구간에서 상승 전류와 하강 전류의 경로를 나타낸 것으로 실선은 인버터의 스위치가 턴-온되었을 때의 경로이고 점선은 스위치가 턴-오프되었을 때 전류가 환류되는 경로이다. 그림 2는 인버터에서 PWM을 非 轉流 상에 행할 때의 하강 전류 경로이고, 그림 3은 PWM을 轉流 상에 행할 때의 전류 경로이다.

인버터의 스위치를 이상적인 스위치로 가정했을 때, 轉流 구간에서 상승 전류와 하강 전류에 대한 상태 방정식을 이끌어 내면 다음과 같다.

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{R}{L} i_b - \frac{(e_a - e_c)}{2L} + \frac{S}{2L} V_s \quad (1)$$

$$\frac{di_r}{dt} = -\frac{R}{L} i_r - \frac{(e_a - e_b)}{2L} - \frac{1-S}{2L} V_s \quad (2)$$

$$\frac{di_l}{dt} = -\frac{R}{L} i_l - \frac{(e_a - e_b)}{2L} \quad (3)$$

식 (1),(2),(3)에서  $i_b$ 는 상승 전류,  $i_r$ 는 하강 전류, S는 인버터 스위치의 PWM 시비율,  $V_s$ 는 인버터의 입력 전압,  $e_a, e_b, e_c$ 는 상 역기전력, 그리고 R과 L은 고정자 권선의 상 저항과 상 인덕턴스이다.

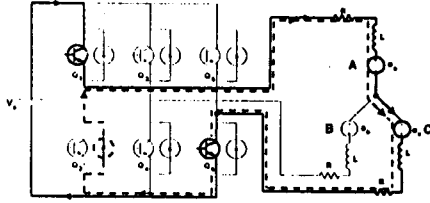


그림 1. 상승 전류의 경로  
Fig 1. Paths of Building Current

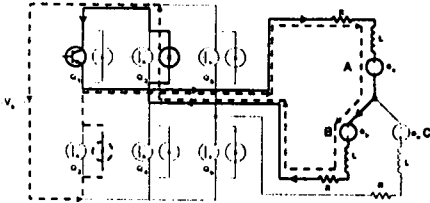


그림 2. 하강 전류의 경로(Q1 PWM)  
Fig 2. Paths of Decaying Current(Q1 PWM)

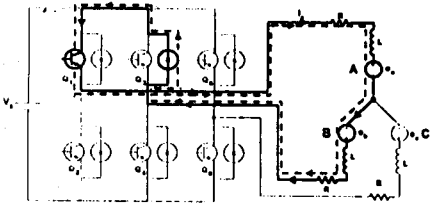


그림 3. 하강 전류의 경로(Q6 PWM)  
Fig 3. Paths of Decaying Current(Q6 PWM)

### 3. 轉流 구간에서의 토크리플 저감 대책

브러시리스 직류 전동기는 轉流 구간에서 상 권선의 인덕턴스와 권선에 유기되는 역기전력으로 인해 상 전류에 맥동이 발생되며, 이로 인해 토크 맥동이 발생된다.

그림 4는 AB상에서 AC상으로 轉流되는 구간에서의 전류 파형으로,  $i_a$ ,  $i_b$ , 그리고  $i_c$ 는 상 전류이다. 그림 4(a)는 전동기가 아주 저속으로 회전하는 경우로 역기전력의 크기가 작기 때문에 하강 전류가 0으로 떨어지기 전에 상승 전류가 전류 지령치에 도달하게 되며, 이때 C상에는 전류 지령치보다 더 많은 전류가 흐른다. 그림 4(b)는 전동기가 극저속 영역을 벗어나서 회전하는 경우로 역기전력의 값이 크기 때문에 상승 전류가 지령치에 도달하기 이전에 하강 전류는 0으로 감소하게 되며 C상 전류에는 맥동이 발생된다. 그림 4(c)는 상승 전류의 상승 비율과 하강 전류의 하강 비율이 같은 경우로 이때 상 전류의 맥동이 최소화된다.[3]

식 (1),(2),(3)으로부터 轉流 구간에서 상승 전류와 하강 전류의 기울기는 스위치의 시비율 S의 영향을 받음을 알 수 있다. 만약 轉流 구간에서 상승 전류

와 하강 전류의 기울기 절대치가 동일하도록 제어 입력이 인가된다면 轉流로 인한 토크 맥동을 최소화시킬 수 있으며, 이를 만족하기 위한 조건은 식 (4)와 같다.

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{di_f}{dt} \quad (4)$$

轉流 구간은 아주 짧으므로 구간내에서 단자간의 역기전력( $e_{LL}$ )을 일정하다고 가정하면 전류 맥동을 최소화하기 위한 제어입력 S는 다음과 같다.

$$S = \frac{V_s + 2R(i_b + i_f) + 2e_{LL}}{2V_s} \quad (5)$$

$$S = \frac{2R(i_b + i_f) + 2e_{LL}}{V_s} \quad (6)$$

식(5)는 非轉流 상에 PWM이 행해질 때의 제어입력이고 식(6)은 轉流 상에 PWM이 행해질 때의 제어입력으로 인버터의 PWM 방식에 따라 식(5) 또는 (6)을 선택한다. 영구자석이 회전자 표면에 부착된 브러시리스 직류 전동기의 경우 인덕턴스를 일정하다고 볼 수 있으므로 고정자 권선의 상 저항과 상 인덕턴스를 알면 단자간의 역기전력  $e_{LL}$ 을 식 (1),(2),(3)으로부터 추정할 수 있다.

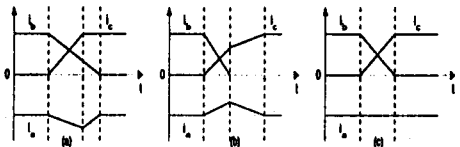


그림 4. 轉流 구간에서의 상 전류  
Fig 4. Phase Current in Commutation Period

본 연구에서 구성한 제어 시스템을 그림 5에 나타내었다. 역기전력 추정기는 고정자 권선의 단자간에 가해지는 평균 전압, 권선에 흐르는 전류, 그리고 모터의 회전 속도 정보로부터 역기전력을 추정한다. 非轉流 구간에서는 전류 제어기를 통하여 상 전류를 제어하고, 轉流 구간에서는 추정된 역기전력 정보를 사용하여 전류 맥동을 최소화하는 제어 입력을 구하고, 이 값을 전류 제어기에 전항 보상하도록 하였다. 전류 제어기는 비례-적분 제어기로 구성하였다.

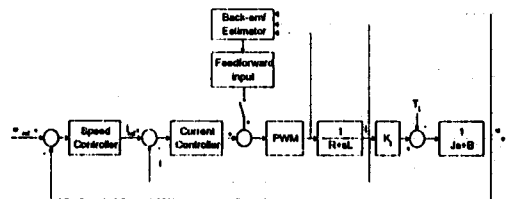


그림 5. 제어기 구성도  
Fig 5. Configuration of Controller

#### 4. 실험 결과

실험에 사용한 모터의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 모터의 사양

Table 1. Motor Specifications

모터	Trapezoidal형 3상 BLDCM
정격	300 W, 0.95 Nm, 3000 RPM
극수	6극
입력전압	100 V
저항 (R)	1.5Ω
인덕턴스 (L)	3.15 mH
토크 상수	0.29 Nm/A
역기전력 상수	0.29 V/rad/sec
관성 모멘트	0.000082614Kg · m <sup>2</sup>

본 연구에서 구성한 브러시리스 직류 전동기의 구동 시스템은 그림 6과 같다. IPM을 사용하여 인버터를 구성하였고, PWM이 轉流 상에 인가되도록 회로를 구성하였다. 회전자의 위치 정보를 전동기에 부착되어 있는 홀 센서와 광학식 증가형 엔코더로부터 입력받고, DSP(TMS320C31)에서 제어 알고리즘을 수행하도록 제어 시스템을 구성하였다.

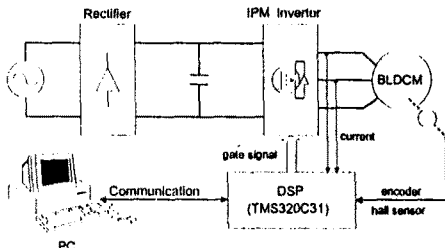


그림 6. 전동기 구동 시스템의 구성

Fig 6. Configuration of Motor Drive System

그림 7은 轉流 구간에서 별도의 보상 입력 없이 전류 제어기만을 통하여 전류 제어를 행한 경우로 전류 맥동이 발생하며, 속도 응답에도 맥동이 나타남을 알 수 있다. 그림 8은 轉流 구간에서 전향 보상을 한 경우로, 그림 7에 비해서 전류 맥동과 속도 맥동이 감소되었음을 확인할 수 있다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 브러시리스 직류 전동기의 轉流 구간에서 발생하는 토크 맥동을 저감하는 방법을 제안하였다. 대부분의 서보용 브러시리스 직류 전동기에 충성점이 별도로 제공되지 않으므로, 상 역기전력 정보를 사용하는 기존의 토크 맥동 저감 방식들은 실제로 적용하기에 어려움이 있다. 그러나 본 연구에서 제안된 방식은 고정자 권선의 전압 방정식으로부터 역기전력을 추정하고, 추정된 값을 이용하

여 轉流 구간에서 전류 맥동을 최소화하는 제어입력을 계산하여 전류 제어기에 전향 보상하는 방식으로 다양한 브러시리스 직류 전동기에 적용이 가능하다는 장점이 있다.

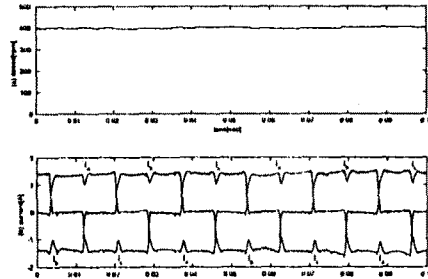


그림 7. 실험 결과(전향 보상을 하지 않음)

Fig 7. Experimental Result(without Feedforward Compensation)

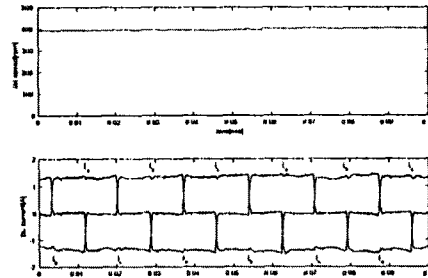


그림 8. 실험 결과(전향 보상)

Fig 8. Experimental Result(Feedforward Compensation)

#### 참 고 문 헌

- [1] P. Pillay and R. Krishnan, "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motors for Servo Drives", IEEE IAS Annual Meeting, 1987, pp. 380-390
- [2] 여형기, 이광윤, 박정배, 김태형, 황진, 유지윤, "브러시리스 직류 전동기용 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2095-2097, 1997.
- [3] R. Carlson, M. Lajoie-Mazenc, and J. Fagundes, "Analysis of Torque Ripple due to Phase Comutation in Brushless DC Machines", IEEE Trans. on Industry Applications. Vol. 28, No. 3, pp. 632-638, 1992.
- [4] J.Y. Hung, Z. Ding, "Design of Currents to Reduce Torque Ripple in Brushless Permanent Magnet Motors", IEE Proceedings-B, Vol. 140, No. 4, pp. 260-266, 1993.
- [5] C. S. Berendsen et al, "Commutation Strategies for Brushless DC Motors : Influence on Instant Torque", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 8, No. 2, pp. 231-236, 1993.