

## 시비율 제어에 의한 브러시리스 직류 전동기의 3여자 운전

강용진, 장재훈, 신은철, 공병구, 유지윤, 이광운\*, 김태덕\*  
고려대학교 전기공학과, \*삼성전자

### Three Excitation Operation Using Duty Control for Brushless DC Motor

Y.J. Kang, J.H. Jang, E.C. Shin, B.G. Kong, J.Y. Yoo, K.W. Lee\*, T.D Kim\*  
Korea Univ., \*Samsung Electronics Co.

#### ABSTRACT

실제의 브러시리스 직류 전동기의 역기전력 파형은 고가의 정밀 서보 전동기를 제외했을 때, 이상적인 사다리꼴이나 정현파의 형태가 아닌 그 형태에 근접한 모양을 갖는다. 하지만 브러시리스 직류 전동기의 운전은 역기전력 파형을 이상적이라고 가정하여 사다리꼴인 경우는 3상 2여자 직류 제어를 하고, 정현파인 경우에는 3상 3여자 교류 제어를 하는 것이 일반적이다. 일반적인 3상 3여자 운전은 3상 2여자 운전에 비해 공간 자계의 높은 분해능을 제공하고, 3상 2여자 운전에서 구조적으로 나타날 수 밖에 없는 정류 시의 토크 리플도 발생하지 않는 장점을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 위의 두 측면을 고려하여, 즉 이상적인 형태의 역기전력 형태를 갖지 않는 실제 전동기의 특성과 3상 3여자 운전의 특성을 적용하여, 역기전력의 형태에 상관없이 적용할 수 있는 3상 3여자 직류 제어 방법을 제안하고 이에 대한 센서리스 운전을 제안한다.

#### 1. 서 론

브러시리스 직류 전동기는 직류 전동기의 브러시와 정류자편의 기계적인 정류 과정을 반도체 소자에 의한 전기적 정류 과정으로 대체한 전동기이다. 따라서 전동기 회전시의 기계적 마찰이 적으므로 직류 전동기의 토크 제어가 쉬운 수하특성을 그대로 유지한 채로 전동기의 수명을 늘리고, 유지·보수의 비용을 줄인다는 장점을 갖는다. 그리고 계자로 전자석이 아닌 영구 자석을 쓸 경우, 소형 경량화가 가능하고, 회전자의 동손을 없앨 수 있다. 계자가 영구 자석으로 이루어진 브러시리스 전동기는 영구 자석 동기 전동기와 같은 구조이고, 착자된 자석의 형태만 다르다.<sup>[1-3]</sup>

일반적으로 브러시리스 직류 전동기는 역기전력

파형에 따라 분류된다. 역기전력 파형이 정현파 형태인 브러시리스 직류 전동기는 입력이 3상 3여자 정현파 전류이며 입력 전류의 주파수 변환 위주의 교류 제어를 하여 연속적인 회전 자계를 만들어 주기 때문에 정밀 제어가 가능하다. 그러나 계자의 자속 분포가 공간적 정현파 구조이어야 하고, 계자와 전기자의 자속이 전기적으로 직각이 되게 하기 위해서는 해상도가 높은 위치 센서가 필요하다는 비용 상의 단점이 있다. 또한 3상 3여자 방식으로 인한 데드 타임을 고려해야만 한다. 반면에 역기전력 파형이 사다리꼴 형태인 브러시리스 전동기는 역기전력이 평탄한 구간에 전류를 흘려주는 3상 2여자 구동을 주로 한다. 전류의 크기는 입력 전압의 시비율로 제어를 한다. 그러나 3상 2여자 운전은 공간에 연속적인 회전 자계를 만들 수 없기 때문에 정밀 제어가 힘들며 전동기의 인덕턴스 성분으로 인해 완전한 구형파 전류를 흘리기 어렵고, 상전류 전환 시의 전류 맥동으로 인한 토크 맥동이 발생한다는 단점이 있다. 하지만 역기전력이 평탄한 구간만을 검출하는 홀센서만으로도 위치 검출이 가능하고 토크 제어가 비교적 간단하다.<sup>[4][6][7][10]</sup>

브러시리스 직류 전동기는 브러시와 정류자편을 대신 할 회전자 위치 검출 센서가 필수적으로 필요하다. 위치 센서는 시스템의 가격 상승, 부피 증가 등의 문제를 유발하기 때문에 부하가 급변하는 시스템이나 고정밀 제어를 요하는 시스템이 아니면 센서리스 운전을 적용하려는 경향이 뚜렷하다. 그 결과로 3상 2여자 센서리스 운전은 입력이 없는 60도의 빈 구간을 이용하여 비교적 간단히 적용할 수 있고, 3상 3여자 센서리스 운전의 경우는 빈 구간이 없는 180도 운전이므로 보통 수학적으로 알고리즘을 적용한 관측기를 사용하는 것이 일반적이다.<sup>[5][9]</sup>

본 논문에서는 새로운 3상 3여자 운전 방법을 제안하고 새로운 운전 방법에 간단하게 적용할 수 있는 센서리스 운전을 제안한다. 또한 이 운전 방법

을 역기전력의 형태에 상관없이 적용할 수 있음을 보이고, 시뮬레이션과 실험을 통해 그 타당성을 입증한다.

## 2. 새로운 3상 3여자 운전

### 2.1 스위칭 패턴

본 논문에서는 3상 3여자의 장점과 간단하게 센서리스 운전을 할 수 있는 3상 2여자 운전의 장점을 동시에 얻을 수 있는 새로운 브러시리스 직류 전동기의 운전 방법을 제안한다. 3상 2여자 운전은 60도의 비여자 구간 때문에 쉬운 센서리스 운전이 가능하지만 연속적인 자계의 회전을 얻을 수가 없다. 반면에 3상 3여자 운전은 180도 구간 전체를 여자시키기 때문에 연속적인 자계를 얻을 수는 있지만, 3상 2여자 운전과 같은 간단한 센서리스 운전을 적용하지 못한다.

그러나 본 논문에서 새로 제안하는 운전은 180도 구간 중에 짧은 2상 구간을 넣어서 그 구간에서 전동기 회전자의 위치를 간접 검출하는 방법이다. 다시 말하면, 3상 3여자 운전 시에 생기는 데드 타임 구간을 조금 확장하여 짧은 2상 구간을 만든 후에 그 구간에서 회전자의 위치를 검출하는 것이다. 그림 1은 확장각을 10도라고 했을 때의 본 논문에서 설정한 입력 스위칭 패턴이다.  $M_n, M_n'(n=1\sim6)$ 의 3여자, 2여자 구간이 반복적으로 나타남을 알 수 있다. 빗금친 영역이 PWM을 인가하는 부분이다.

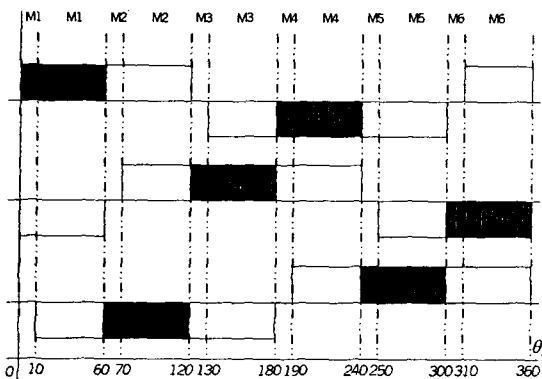


그림 1 새로운 3상 3여자 운전의 스위칭 패턴

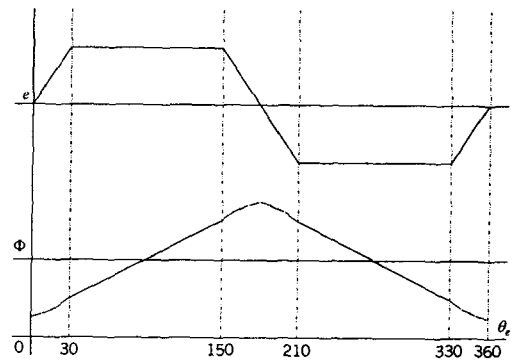
### 2.2 실제 브러시리스 전동기의 역기전력 분석

브러시리스 직류 전동기는 역기전력의 형태에 따라 두 가지 형태로 나뉜다. 역기전력의 형태를 보면 이 두 전동기는 완전히 다른 특성의 전동기로 보일 수 있다. 그러나 전동기 계자에 착자된 자석의 형태를 보면 거의 비슷한 형태의 전동기임을 알

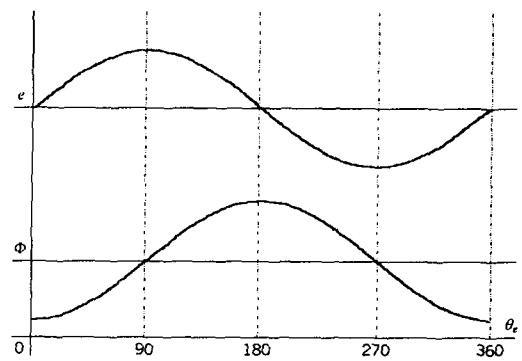
수 있다. Faraday의 법칙을 통해 역기전력을 적분하면 전동기에 착자된 자석의 모양을 알 수 있다.

$$\phi = \frac{1}{\omega_m} \int e d\theta \quad (1)$$

이상적인 경우의 역기전력과 착자된 자석에 의한 공간 자속 분포의 모양은 그림 2와 같다. 하지만 실제의 전동기 제작에서 그림 2와 완벽히 같은 형태로 계자에 자석을 착자시키는 것은 쉽지 않다. 따라서 일반적인 브러시리스 직류 전동기의 역기전력의 형태는 정현파 혹은 사다리꼴 형태와 정확히 일치하지 않으며 저가의 전동기일수록 그 정도가 심해진다.



(a)



(b)

그림 2 계자에 착자된 자석의 모양(이상적인 경우) 역기전력이 사다리꼴(a), 정현파(b) 형태인 경우

서론에서 언급한 바와 같이 일반적인 브러시리스 직류 전동기의 운전 방법의 선택은 역기전력의 형태에 의존적인 경우가 대부분이다. 하지만 실제의 브러시리스 직류 전동기의 역기전력 파형은 정확히 정현파나 사다리꼴 형태가 아닌 비슷한 형태를 갖는다. 따라서 제작된 전동기의 특성과 시스템 설계자의 의도나 목표에 따라 운전 방법을 혼용하는 경우도 있을 수 있다.

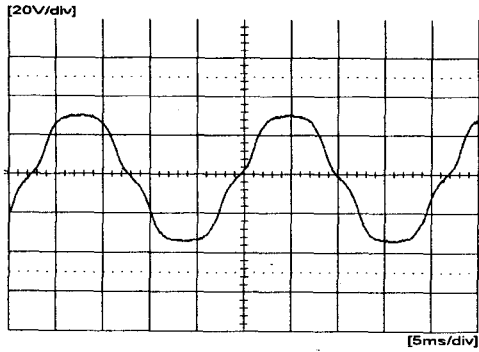


그림 3 실제 브러시리스 전동기의 역기전력 파형

본 연구에서 사용한 브러시리스 직류 전동기 역기전력 파형은 그림 3과 같다

### 2.3 새로운 운전 방법 적용시의 전동기 특성

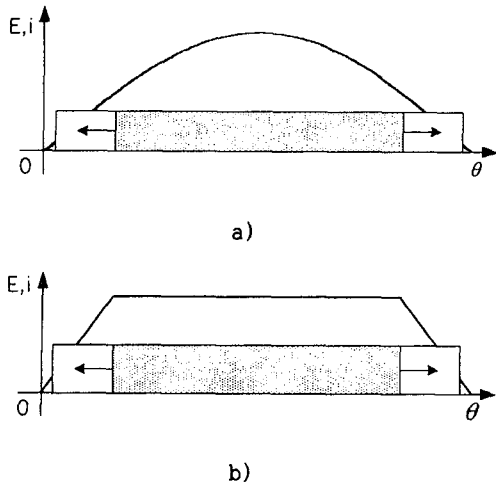


그림 4 제안된 운전시의 역기전력과 전류의 파형  
역기전력이 사다리꼴(a), 정현파(b) 형태인 경우

2.1에서 제안한 스위칭 패턴을 역기전력과 함께 나타낸 것이 그림 4이다. 그림 4를 보면 180도 중에서 잠시 나타나는 2상 구간의 위치가 각 상의 역기전력의 ZCP임을 알 수 있다. 이 구간에서의 전동기의 전압방정식은 식 (2), (3)과 같다. c상이 오픈된 경우라고 가정한다.

$$V_a = RI_a + pLI_a + e_a + V_n \quad (2)$$

$$V_b = RI_b + pLI_b + e_b + V_n \quad (3)$$

$$V_n = \frac{1}{2}(V_a + V_b) + \frac{1}{2}(e_a + e_b) \quad (4)$$

식 (2), (3)을 더하고 식을 정리하면 식 (4)를 얻는다. 식 (4)는 전동기의 운전에 큰 영향을 미치는 중성점 전압으로 브러시리스 직류 전동기의 특성

분석에 중요한 값이다. 이 값은 a, b 상의 입력 전압과 역기전력의 합으로 이루어져 있다. 입력 전압은 설계자가 입력한 스위칭 패턴에 의존하는 값으로 본 논문에서는 그림 1의 패턴 형태에 의해 변한다. 그리고 역기전력은 회전자의 위치와 역기전력에 착자된 자석의 형태에 의존한다. 역기전력이 사다리꼴 형태인 경우는 간단히  $e_a + e_b$ 가 0임을 알 수 있고, 역기전력이 정현파 형태인 경우는 그림 5에 의해 2상 구간이 작을 경우는 0에 가깝다는 것을 알 수 있다. 따라서 2상 구간의 길이를 짧게 해준다면 역기전력의 형태에 관계없이 입력 전압에 의해서만 전동기 전압방정식이 새워짐을 예측할 수 있다. 식 (5)는 그림 5에 대한 식이다.

$$e_a + e_b = \sin \theta + \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \approx 0 \quad (5)$$

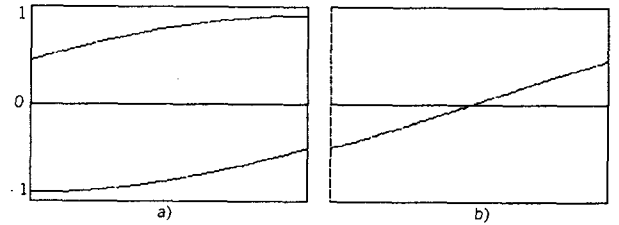


그림 5 2상 구간에서의 정현파 역기전력 파형  
a) a상과 b상 b) a상과 b상의 합

### 3. 회전자 위치 간접 검출 방법

앞에서 언급한대로 본 논문에서 회전자 위치를 간접적으로 검출하는 시기는 2상 여자 구간이다. 그림 4를 보면 2상 구간은 역기전력 형태에 상관없이 ZCP를 포함한다. 2상 여자 구간에서 비여자상의 단자 전압을 통하여 이를 검출할 수 있다. 그림 6의 저항 네트워크를 이용하면 3상 단자 전압의 합을 얻을 수 있다.

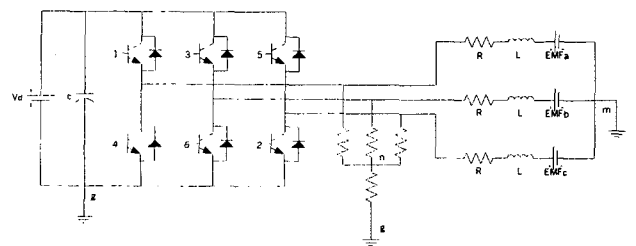


그림 6 단자 전압 검출용 저항 네트워크 회로

그림 1의 스위칭 패턴을 인가하였을 때의 단자전압과 이때의 3상 단자 전압의 합이 그림 7의 a), b)이다. 그림 7-c)는 그림 7-b)의  $V_{d1}$ ,  $V_{d2}$  사이를 연산 증폭기를 사용한 윈도 검출기<sup>[11]</sup>로 얻은

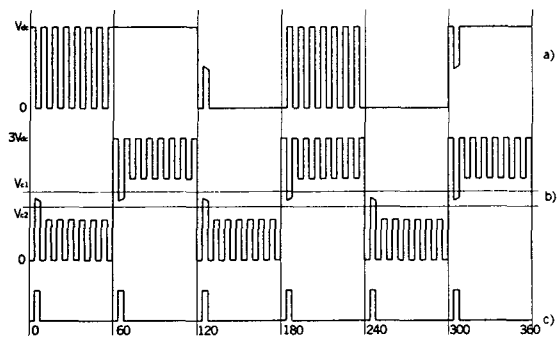


그림 7 a) 단상 단자전압, b) 3상 단자전압의 합  
c) 센서리스 신호

신호이다. 이 신호는 ZCP의 위치를 나타낸다. 이 신호를 제어기에 입력으로 넣고, 연산을 통하여 다음 구간을 구한다.

#### 4. 시뮬레이션 및 실험

본 논문에서 제안한 브러시리스 직류 전동기 운전 방법을 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 표 1은 본 논문에서 사용한 브러시리스 직류 전동기의 파라미터이다. 제어루프는 속도 제어만 행하였다.

표 1 브러시리스 직류 전동기의 사양

정격	250[W], 4[A], 3000[rpm]
극수	4극
상저항	0.75[ohm]
상인덕턴스	3.05[mH]
토크상수	0.21[Nm/A]
역기전력상수	0.21[V/(rad/sec)]
관성모멘트	$0.5e-4$ [Kg·m <sup>2</sup> ]

#### 4.1 시뮬레이션

미분 방정식의 연산은 Runge-Kutta 방식에 의해 수행되었고 Borland C++로 프로그래밍 하였다.

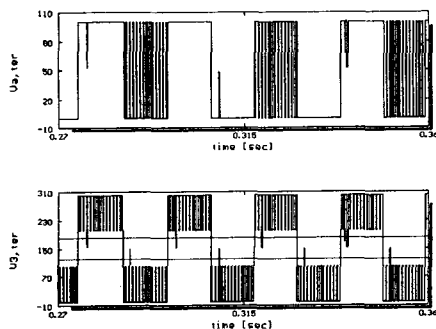


그림 8 제안된 운전 시의 단상 단자 전압과 3상 단자 전압의 합

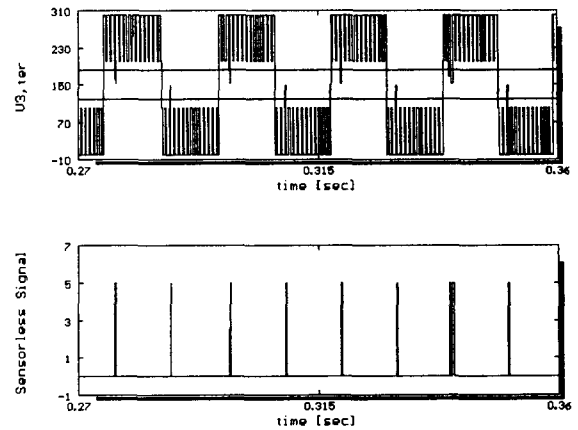


그림 9 제안된 운전 시의 3상 단자 전압의 합과 센서리스 신호

#### 4.2 실험

본 논문의 시스템 제어기로 TMS320F240을 사용하였다. 그리고 인버터로는 고신뢰성이 요구되는 IPM을 사용하였다.

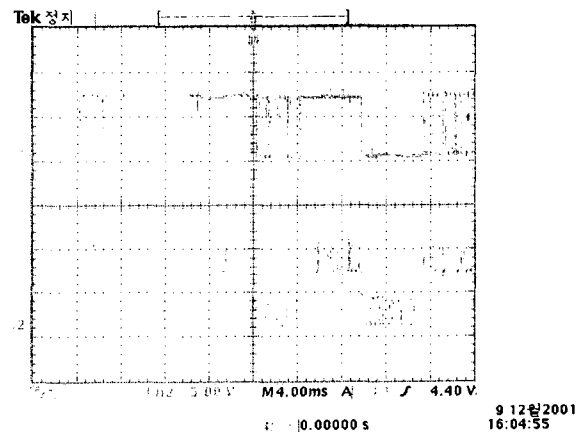


그림 10. 제안된 운전 시의 단상 단자 전압과 3상 단자 전압의 합

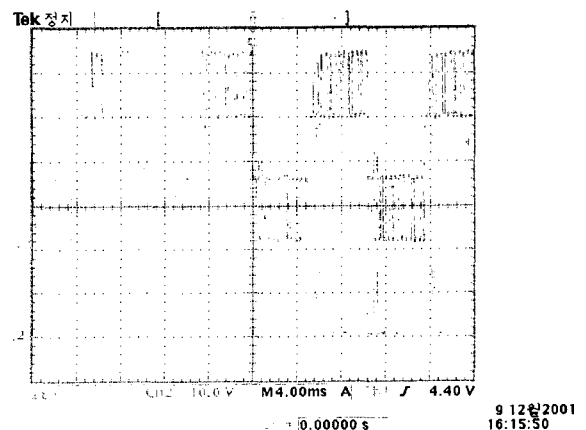


그림 11 제안된 운전 시의 3상 단자 전압의 합과 센서리스 신호

## 5. 결 론

본 논문에서는 시비율 제어에 의한 3상 3여자 운전을 제안하고 그 타당성을 검증하였다. 이러한 방법의 운전은 브러시리스 직류 전동기를 3상 3여자 운전을 하면서도 직류 전동기의 수하 특성을 그대로 유지할 수 있는 장점이 있다. 또한 관측기 같은 복잡한 수학적 알고리즘을 쓰지 않더라도 센서리스 운전을 할 수 있다는 장점도 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] J.R. Hendershot Jr., TJE Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*, Oxford, 1994.
- [2] Duane C. Hanselman, *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*, McGraw- Hill
- [3] T. Kenjo and S. Nagamori, *Permanent- Magnet and Brushless DC Motors*, Sogo Electronics Publishing Company. Tokyo, 1984.
- [4] Pragasen Pillay and Pamu Krishnan, "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless dc Motors for Servo Drives", IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 27, No. 5, pp 984-996, 1991, September/October.
- [5] Kaushik Rajashekara and Atsuo Kawamura, "Sensorless Control of Permanent Magnet AC Motors", IEEE, 1994.
- [6] R. Krishnan and R. Ghosh, "Starting Algorithm and Performance of a pm dc Brushless Motor Drive System with no Position Sensor", IEEE, 1989.
- [7] Nobuyuki Matsui and Takaharu Takeshita, "Novel Starting Method of Sensorless Salient- Pole Brushless Motor", IEEE, 1994.
- [8] P.D Evans and D.Brown, "Simulation of brushless DC drives", IEE, 1990.
- [9] 여형기, "브러시리스 직류 전동기용 센서리스 드라이브 시스템 개발에 관한 연구", 고려대학교 대학원 전기공학과 공학박사 학위논문, 1998년 7월.
- [10] 이광운, "구형과 전류 여자 브러시리스 직류 전동기의 토크맥동 저감에 관한 연구", 고려대학교 대학원 전기공학과 공학박사 학위논문, 1999년 7월.
- [11] Robert F. Coughlin and Frederick F. Driscoll, *Operational Amplifiers & Linear Integrated Circuits*, International Edition, Prentice Hall, 1998.