

구동방식을 고려한 브러시리스 전동기의 특성해석

이재건, 박창수, 이정중, 조한익, 홍정표, 이근호\*  
 창원대학교 전기공학과, 남해전문대학 전기과\*

Characteristic Analysis of Brushless Motor Considering Drive Type

Jae-Gun Lee, Chang-Soo Park, Jung-Jong Lee, Geun-Ho Lee, Han-Ik Cho, Jung-Pyo Hong  
 Dept. of Electrical Eng. Changwon Nat'l University, Dept. of Electricity Namhae College\*

**Abstract** - This paper deals characteristic analysis of brushless motor considering drive type. It is to divide operation with 120° and 180° conduction and to predict the current waveform and the instantaneous torque of each type using analysis method. The results of the simulation are compared the experiment.

를 통해서 환류(free wheeling)작용이 발생하고, 3상이 동시에 통전하는 구간이 발생한다. 따라서 120도 도통형의 경우에는 2상이 통전되는 경우와 3상이 통전되는 경우의 회로동작을 각각 고려해야한다.

1. 서 론

최근 에너지 밀도가 높은 영구자석을 이용한 브러시리스 전동기의 수요가 증가하고 있다. 기존의 직류전동기가 기계적인 스위칭을 하는 것에 비해서 브러시리스 전동기는 반도체 소자를 이용하여 전동기를 구동한다. 이러한 브러시리스 전동기의 전류 및 토크 특성은 구동회로에 의해서 영향을 많이 받으므로 구동방식에 따른 특성해석이 요구된다.

브러시리스 전동기의 구동방식은 도통방법에 따라 크게 3상 바이폴라 120도 도통형 구동방식(이하 120도 도통형) 및 180도 도통형 구동방식(이하 180도 도통형)으로 나눌 수 있다. 각 구동방식에 따라 브러시리스 전동기의 토크 및 출력특성은 많은 차이를 보이며, 각 구동방식과 구동회로의 회로동작을 고려한 특성해석이 필요하다. 본 논문에서는 도통방식을 고려한 전압방정식을 유도하고, 수치해석 기법인 Runge-Kutta 법을 이용하여 각 구동방식에 따른 미분방정식의 해를 구하였다. 브러시리스 전동기의 무부하, 부하 실험을 통해서 전류파형과 순시토크의 해석 결과의 타당성을 검증하고, 구동방식에 따른 브러시리스 전동기의 특성해석을 비교하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

브러시리스 전동기의 특성해석에 사용된 전동기는 그림 1과 같은 공극이 전동기 축과 수평한 평면형(Axial-gap type)이다. 평면형은 공극이 크고 공심형 코일을 가지고 있으므로 브러시리스 전동기의 가장 큰 해결과제인 코깅토크가 없으며 저속도에서 일정한 속도 운전이 가능하다. 그리고 축방향 길이를 작게 할 수 있는 특징이 있다. 그러나 코일에서 발생하는 열을 전달 할 경로가 차단되어 열전도가 불량하여 방열에 문제가 있다. 토크 특성 해석을 위하여 실험에 사용된 브러시리스 전동기는 평면형으로 전동기 파라미터는 표 1과 같다. [1]

2.2 해석 방법

브러시리스 전동기의 특성해석을 위한 회로도는 그림 2와 같다. 이상적인 경우에 브러시리스 전동기의 120도 도통형은 상전류가 60° 간격으로 2상이 통전되고, 180도 도통형 구동방식은 3상이 통전된다. 그러나 전류(commutation) 순간에 120도 도통형은 권선 인덕턴스의 영향으로 상전류가 전동기 드라이브단의 다이오드

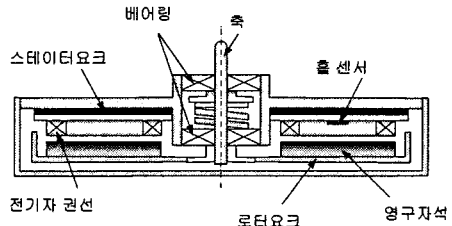


그림 1 평면형 브러시리스 전동기

표 1 평면형 브러시리스 전동기 파라미터

항 목	인가전압 [V]	저항 [Ω]	인덕턴스 [mH]	회전속도 [rpm]
수 치	24	0.7	0.3	2600

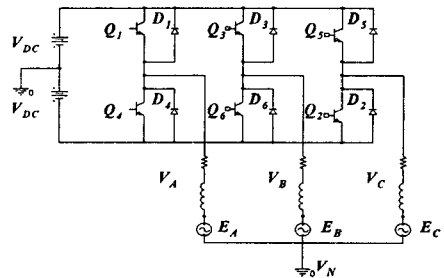


그림 2 브러시리스 전동기 회로

전동기 회로 해석은 전압방정식을 사용하였으며, 해석을 하기 위한 가정을 다음과 같이 하였다. [2]

- 정상상태에서 회전수는 일정하다.
- 변위에 따른 인덕턴스의 변화는 없다.
- 스위칭 소자에서의 전압강하는 무시한다.
- 역기전력은 정현파이다.

일반적으로 전동기의 동작특성을 결정하는 상 전압방정식은 식 (1)과 같고, 각 상의 역기전력은 역기전력 상수와 각속도를 고려하여 식 (2)와 같이 산정하였다.

$$V = R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + E_A \tag{1}$$

$$E_A = k_A \omega \tag{2}$$

여기서,  $V$ 는 상전압[V],  $R_A$ 는 상당 권선 저항[Ω],  $L_A$ 는 상당 권선 인덕턴스[mH],  $E_A$ 는 상당 역기전력 [V],  $k_E$ 는 역기전력 상수,  $w$ 는 각속도[rpm]이다.

브러시리스 전동기에서 순시토크는 전동기 출력과 각 속도로 부터 구할 수 있으며, 아래의 식과 같다.[3]

$$P_{out} = Ei = wT, \quad T = \frac{Ei}{w} \quad (3)$$

여기서,  $P_{out}$ 는 출력[W],  $T$ 는 순시토크[Nm]이다.

### 2.2 120도 도통형 구동방식의 특성해석

이상적인 120도 도통형에서의 전류 파형을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 60° 간격으로 스위칭이 되는 경우 소자 상태에 따른 전류의 경로를 그림 4에 나타내었다.

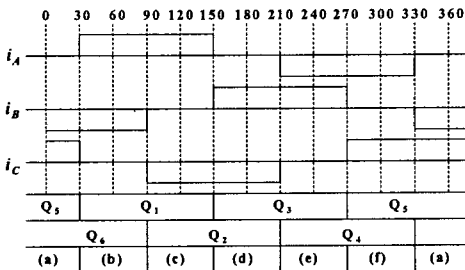


그림 3 120도 도통형 구동방식의 전류파형

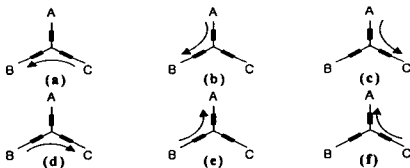


그림 4 120도 도통형의 권선 전류 방향

120도 도통형의 특성해석을 위해서는 2상이 통전되는 구간과 스위칭이 On/Off 되는 시점에서 3상이 통전되는 구간을 각각 고려해야한다. 본 논문에서는 각 도통 상태를 고려하여 한 상에 대한 전압방정식을 구성하였다.

여기서, 상전압 ( $V_{pi}$ )는 단자전압 ( $V_{DC}$ )과 중성점 전압 ( $V_N$ )의 차로 나타내며, 식 (4)와 같다. 그림 2에서  $V_A, V_B, V_C$ 는 각 상에서의 단자전압을 나타낸다. 중성점 전압은 2상 또는 3상 통전시 중성점에 걸리는 단자전압과 역기전력의 평균값으로 나타낸다.

$$V_{pi} = V_i - V_N \quad (i = A, B, C) \quad (4)$$

#### 2.2.1 2상이 통전되는 경우

그림 3과 4는 2상 통전 구간을 나타내고 있다. 그림 4(b)의 경우는 A상과 B상이 통전되어 있는 상태이며, 전류가 A상에서 B상으로 흐르고 있다. 이 때의 중성점 전압, 각 상의 단자 전압과 A상의 상전압은 식 (5)와 같다.

$$V_N = \frac{V_A + V_B - (E_A + E_B)}{2} \quad (5)$$

$$V_A = V_{DC}, \quad V_B = -V_{DC}$$

$$V_{\mu A} = V_A - V_N$$

여기서,  $E_A, E_B$ 는 각각 A, B 상의 역기전력이다.

#### 2.2.2 3상이 통전되는 경우

120도 도통형에서 3상이 통전되는 구간은 한 상을 기준으로 보았을 때 크게 세 부분으로 나누어진다. 한 상의 전류가 상승하는 구간과 소호되는 구간, 그리고 다른 상이 스위칭 On/Off되는 구간이다. A상을 기준으로 볼 때 그림 3에서 각각 30°, 90°, 150° 구간이다. 3상 통전시 중성점 전압과 상전압은 식 (6)과 같다.

$$V_N = \frac{V_A + V_B + V_C}{3}, \quad V_{\mu A} = V_A - V_N \quad (6)$$

여기서, 전류가 3상 평형이면 역기전력의 합은 항상 0이 되므로 중성점 전압에서 역기전력 항을 무시하였다.

### 2.3 180도 도통형 구동방식 특성해석

180도 도통형의 전류파형을 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 60° 간격으로 스위칭이 되는 경우 소자 상태에 따른 전류의 경로를 그림 6에 나타내었다. 이 방식의 경우 항상 3상 도통 상태이기 때문에 120도 도통형에서 3상 통전 상태만을 고려하여 전압방정식을 구성하였다.

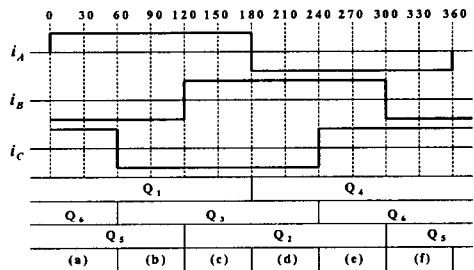


그림 5 180도 도통형 구동방식의 전류파형

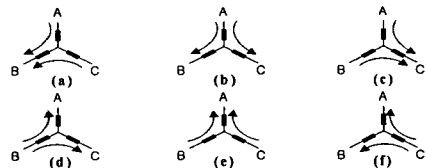


그림 6 180도 도통형의 권선 전류 방향

## 3. 해석 결과

### 3.1 120도 도통형 구동방식 해석 결과

120도 도통형의 상전류의 해석 결과와 실험값을 비교하여 그림 7에 나타내었다. 이 방식의 경우 전류의 상승 및 소호시간이 빠르고, 전류가 감소했다가 다시 증가하는 구간이 발생한다. 이러한 전류파형은 3상이 동시에 통전되는 것에 의한 영향이다.

그림 8에서는 120도 도통형과 180도 도통형의 순시토크 해석결과를 비교하여 나타내었다. 역기전력이 정현파인 경우에 두 방식의 상전류 파형의 맥동이 그림과 같은 순시토크의 리플로 나타남을 알 수 있다.

위의 해석 결과들로부터 토크, 속도, 전류 특성 곡선 (T-N-I 곡선)을 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 특성 해석 결과와 실험결과 사이의 오차는 드라이브단의 손실을 고려해주지 못했고, 실험 과정에서 홀센서 신호차이

정확하지 못하여 약간의 오차를 포함했기 때문에 분석된다.

### 3.2 180도 도통형 구동방식 해석 결과

그림 10과 11에 각각 상전류 파형과 특성곡선을 나타내었다. 180도 도통형의 경우에는 도통구간이 큰 영향으로 전류가 많이 흐르고, 순시토크는 크게 발생함을 알 수 있다. 하지만 높은 전류의 영향으로 드라이브단과 전동기에서 발생하는 손실이 크게 발생하는 것으로 고려되어진다. 실험값과 해석값과의 오차는 120도 도통형과 마찬가지로 드라이브단의 손실에 의한 영향과 홀센서 신호차에 대한 영향으로 분석된다.

표 2에는 각 구동방식의 실험값을 비교하여 나타내었다. 동일 대상의 전동기에서 120도와 180도 도통형에 따라서 출력특성 값에 차이가 나타남을 알 수 있다.

표 2 각 구동방식의 실험값 비교 (2600rpm)

	120도 도통형	180도 도통형
전류[A]	5.61	9.38
순시토크[Nm]	0.281	0.35

## 4. 결 론

본 논문에서는 평면형 브러시리스 전동기를 대상으로 하여 각 도통 방식에 따라서 특성 해석을 수행하였다. 각 도통 방식에 맞는 전압방정식을 구현하였으며, 부하시험을 통해서 그 결과를 검증하였다. 동일한 대상의 전동기에 대해서 120도 및 180도 도통 방식에 따라서 전류 및 순시토크가 달라짐을 알 수 있었다. 180도 도통형의 경우에 순시토크가 크지만 상전류 또한 크기 때문에 높은 전류에 의한 열 손실이 발생하므로, 120도 도통형이 순시토크는 떨어지지만 타당한 구동방식인 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 박창수, 하경호, 이정중, 진영우, 이근호, 홍정표, "전용칩을 이용한 브러시리스 전동기의 구동 특성", 2002년도 대한전기학회 경남지구 춘계학술대회 논문집, 2002.
- [2] 이선권, 김용철, 강규홍, 홍정표, 김규탁, 장기찬, "브러시리스 전동기의 토크특성 해석", 2001년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 783-785, 2001.
- [3] J.R. Hendershot Jr., TJE Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1994.

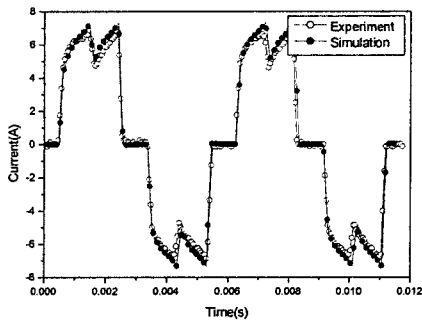


그림 7 120도 도통형의 상전류 파형 (회전속도 2600rpm)

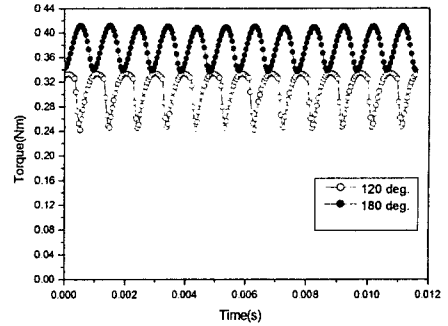


그림 8 순시토크 해석결과 (회전속도 2600rpm)

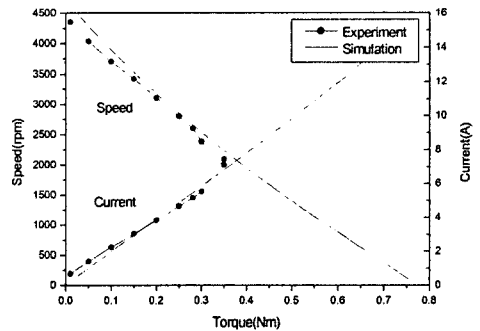


그림 9 120도 도통형 특성 곡선

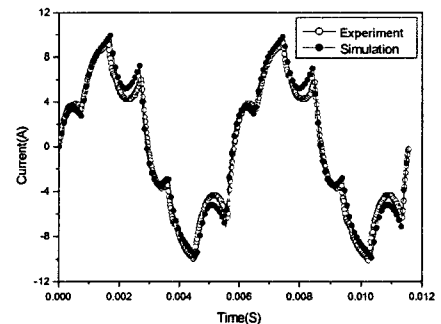


그림 10 180도 도통형 상전류 파형 (회전속도 2600rpm)

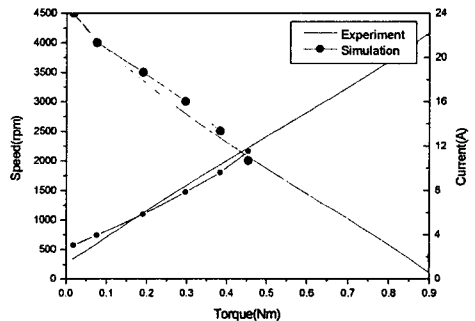


그림 11 180도 도통형 특성 곡선