

## The Characteristic Analysis and the Measuring Method of Parameter Considering the Brush Contact Resistance for PMDC Motor

Su-Chul Kim, Kyu-Sik Kim, Kyu-Seob Kim, Bong-Hyun Lee, and Byeong-Hwa Lee\*

Division of Daegu-Gyeongbuk, Korea Automotive Technology Institute, Daegu 43011, Korea

(Received 9 September 2018, Received in final form 24 October 2018, Accepted 25 October 2018)

Permanent magnet direct current motor (PMDC) has been widely used in industrial, automotive, and home applications because of simple structures, advantage of price and easy controllability. However, brush contact resistance is difficult to measure if the DC motor is not disassembled. In this paper, Characteristics analysis and measurement of motor parameters are treated about PMDC motors. For analyzing this method, the parameter model is conducted to measure the brush contact resistance. Finally, analysis values are compared to test result to verify the method.

**Keywords :** PMDC motor, characteristic analysis, brush contact resistance, elastic force, friction coefficient

### PMDC 전동기의 접촉저항을 고려한 특성해석 및 파라미터 계측방법

김수철 · 김규식 · 김규섭 · 이봉현 · 이병화\*

자동차부품연구원 대구경북본부, 대구시 달성군 구지면 국가산단서로 201, 43011

(2018년 9월 9일 받음, 2018년 10월 24일 최종수정본 받음, 2018년 10월 25일 게재확정)

본 논문은 PMDC 전동기의 특성해석 및 파라미터 계측방법에 대하여 설명하였다. 특히, PMDC 전동기에서 브러시 접촉저항은 전동기를 분리하지 않은 상태에서 정확한 측정이 어렵고 까다로우므로, 본 논문에서는 수식적인 모델링을 통해 브러시 접촉저항 산정방법을 제시하였다. 수학적 모델링을 통한 결과를 실험결과와 비교하여, 브러시 접촉저항의 수식적 모델링의 타당성을 입증하였고, 브러시 접촉저항 산정에 따른 PMDC 전동기의 특성해석 및 파라미터 계측방법의 결과를 나타내었다.

**주제어 :** PMDC 전동기, 특성해석, 브러시 접촉저항, 탄성력, 마찰계수

#### I. 서 론

최근 전력 에너지의 소비량이 매년 증가하면서 에너지 자원의 고갈과 환경오염이 큰 문제로 대두되고 있어 그 대책이 시급한 실정이다. 특히, 총 전력 생산량의 50% 이상을 전동기가 소비하는 가운데 소형전동기의 생산 사용량도 매년 증가하고 있어 전동기의 효율 향상에 의한 소형화를 추구하는 경향이 한층 높아지고 있다[1-3].

특히, DC 전동기는 구조와 작동원리가 비교적 간단하며, 회전자제어가 쉬워 제어용 전동기로서 아주 우수한 특성을 가지고 있다. 가격도 저렴하여 여러 방면에서 널리 사용되고 있다.

영구자석형 계자 직류(Permanent Magnet Direct Current,

PMDC) 전동기는 자극이 영구자석으로 된 직류전동기로, 권선계자형 직류전동기와 비교해서 적용에 따라 많은 장점을 가지고 있다. 먼저 이 전동기는 외부 자계회로가 불필요하므로 자계회로에서의 동손을 걱정할 필요가 없다. 또 계자권선이 없으므로 공간과 무게를 줄일 수 있다. PMDC 전동기는 특히 경비와 공간이 필요한 타여자 회로가 없으므로 1마력 이하 또는 아주 작은 크기의 전동기에서 일반적으로 쓰인다[3,4].

전동기 설계의 신뢰성과 경쟁력을 확보하기 위해서는 실제 전동기 운전을 정확히 예측할 수 있는 전동기 설계를 하여야 한다. 특히, PMDC 전동기의 경우에는 브러시와 정류자 사이의 접촉저항이나 마찰, 풍손 등과 같은 손실이 발생하게 되며, 이러한 파라미터들을 수식을 통하여 정확히 구하는 것이 거의 불가능하여 전동기 실험시 오차를 보인다. 결과적으로, 특성해석 분석 결과는 실제 제작된 모델의 실험치와 많은 차이를 가지게 되고, 재설계 시 사양을 만족하기 위한 모델의

결정을 쉽게 이를 수가 없다.

따라서, 이 논문에서는 PMDC 전동기의 특성해석과 파라미터 계측방법에 대해서 알아보는데 그 목적이 있다. 또한 특성해석의 오차를 줄이고, 설계의 신뢰성을 높이기 위하여 실험적으로 구하기 힘든 브러시와 정류자 사이의 접촉저항을 수식적으로 접근하여, 이 파라미터를 반영한 특성해석 결과를 실험치와 비교 검증함으로써 본 논문의 타당성을 확인하였다.

## II. 이 론

### 1. 직류전동기의 기본이론

자계 내에서 움직이는 도체에는 자속의 크기와 속도에 비례하는 전압이 유도되며 이것을 유기기전력 또는 역기기전력이라 하며 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[5,6].

$$E = \frac{P}{a} Z \phi \frac{n}{60} = k_e \omega_r \quad (1)$$

$$k_e = \frac{P \phi Z}{2 \pi a} \quad (2)$$

$P$ 는 극수,  $a$ 는 병렬회로수,  $Z$ 는 전기자 도체수,  $\phi$ 는 한국당 자속량,  $n$ 은 회전속도,  $k_e$ 는 역기기전력 상수,  $\omega_r$ 은 전기자의 회전각속도를 나타낸다.

한편, 기계적인 유효분 토크와 손실분 토크를 합한 발생토크  $T$ 는 식(3)과 같다.

$$T = \frac{Z P}{2 \pi a} \phi I_a = k_t I_a \quad (3)$$

$$k_t = \frac{P \phi Z}{2 \pi a} = k_e \quad (4)$$

$I_a$ 는 전기자 전류,  $k_t$ 는 토크상수를 나타낸다. 전기자회로에서 단자전압과 역기기전력의 관계는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다[7,8].

$$V_a = E + I_a(R_a + R_b) \quad (5)$$

여기서,  $V_a$ 는 입력전압,  $R_a$ 는 권선저항,  $R_b$ 는 브러시 접촉저항을 나타낸다.

이 양변에  $I_a$ 를 곱하면 식(6)이 성립한다.

$$V_a I_a = E I_a + I_a^2 (R_a + R_b) \quad (6)$$

여기서,

$$V_a I_a = P_{in} \quad (7)$$

$$E I_a = k_e \omega_r I_a = \omega_r T = P_{out} \quad (8)$$

$$I_a^2 (R_a + R_b) = P_{loss} \quad (9)$$

이므로  $P_{in}$ ,  $P_{out}$ ,  $P_{loss}$ 를 구할 수 있다. 여기서,  $P_{in}$ 은 전기적 입력,  $P_{out}$ 은 기계적 출력,  $P_{loss}$ 는 권선, 브러시 접촉저항에 의한 손실이다. 즉, 전기자회로에 공급되는 전기에너지는 기계에너지와 권선저항, 브러시 접촉저항에 의한 열에너지로 변환된다.

### 2. 브러시 접촉저항 산정을 위한 수학적 모델

권선저항은 전동기의 회전속도에 상관없이 일정하고 브러시 접촉저항은 속도에 따라 변한다. 회전속도가 증가하면 브러시 접촉저항도 증가하고, 속도가 감소하면 브러시 접촉저항은 감소한다. 즉, 브러시 접촉저항은 전동기의 회전속도에 비례하고 그 접촉저항은 브러시와 정류자 간의 마찰에 의해 발생한다. 따라서 브러시 접촉저항에 의해 손실되는 에너지는 브러시와 정류자 사이의 마찰에 의한 에너지 손실과 같다고 모델링하였다. Fig. 1과 같이 한 개의 정류자에 두 개의 브러시가 접촉되어 회전하므로 이를 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_a^2 R_b = 2 F_f \nu \quad (10)$$

여기서,  $F_f$ 는 브러시와 정류자간 마찰력,  $\nu$ 는 정류자 속도를 나타낸다. 수직항력은 브러시를 미는 용수철의 탄성력과 같으므로,

$$N = F_k = kx \quad (11)$$

$$F_f = \mu N = \mu(kx) \quad (12)$$

즉,

$$P_{contact} = 2 F_f \nu = 2 \mu k x (r \omega_r) = I_a^2 R_b \quad (13)$$

여기서,  $N$ 은 수직항력,  $F_k$ 는 탄성력,  $k$ 는 용수철 탄성계수,  $\mu$ 는 브러시와 정류자간 마찰 계수,  $x$ 는 용수철 수축길이이다.

식(13)을 식(6)에 대입한 후,  $I_a$ 에 대해 정리하면,

$$R_a I_a^2 + (E - V_a) I_a + 2 \mu k x (r \omega_r) = 0 \quad (14)$$

여기서  $r$ 은 정류자 반지름이다.

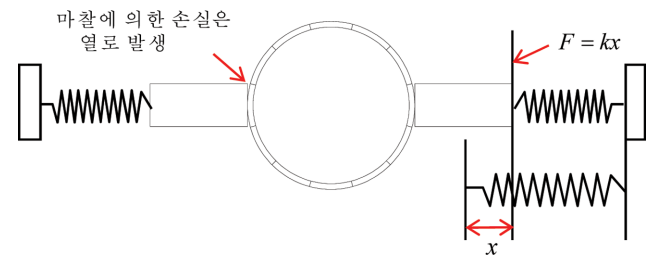


Fig. 1. (Color online) Modeling of brush.

또한 식(5)에서 브러시 접촉저항은 다음과 식(15)와 같이 유도하여 구할 수 있다.

$$R_b = \frac{V_a - E}{I_a} - R_a \quad (15)$$

여기서,  $I_a$ 는 식(14)의  $I_a$  관한 근의 공식을 통해 얻은 해를 대입하여 구할 수 있다.

### III. 실험

#### 1. 실험방법

PC를 이용하여 각 전압에 따라 부하를 가변시켜 가며 전동기의 회전속도, 역기전력, 전류 등을 측정하였다. 오차를 줄이기 위해서 3회 반복 실험하였으며, 상온에서 실험하였다. 측정장비는 Fig. 2와 같이 꾸몄다. 번호 순서대로 Power Analyzer, DC Power Source, Oscilloscope, Dynamometer, PC 등이 있다. DC Power Source로 동일 전압을 가하고



Fig. 2. (Color online) Experimental equipments.

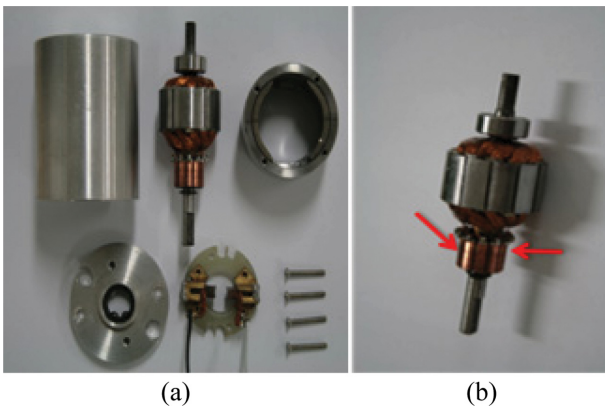


Fig. 3. (Color online) The main components of PMDC motor. (a) Shape of disassembled motor. (b) Commutator without brush.

Dynamometer로 부하를 바꾸어 가면서, Power Analyzer를 통해 부하에 따른 속도, 토크, 전류 및 효율 등의 전동기 특성을 확인하였다. Oscilloscope로는 정확한 전류와 전압이 인가되는지를 확인하였다.

브러시 접촉저항을 제외한 권선저항을 측정하기 위해서 Fig. 3(b)와 같이 전동기에서 브러시를 제거한 후 옴미터를 통해 전기자 권선저항만을 측정하였다.

한편, 전동기를 일정한 속도로 회전시켰을 때, 역기전력 값을 측정하면 식(16)을 통해 역기전력 상수를 얻을 수 있다.

$$k_e = \frac{E}{\omega_r} \quad (16)$$

토크 상수는 실험을 통해 측정된 전류와 토크값을 식(17)을 이용해 구한 후, 그 평균값을 사용하였다.

$$k_t = \frac{T}{I_a} \quad (17)$$

#### 2. 브러시 접촉저항 산정을 위한 계수 측정

해석 모델의 사양과 파라미터는 Table I과 같다. 용수철의 탄성계수는 실험을 통해 측정하였고, 브러시와 정류자 사이의 마찰계수는 박형규 등의 연구결과를 참고하였다[8]. 구리, 흑연, 수지로 제작된 브러시의 흑연 함량에 따른 마찰 계수는 Table II와 같은데, 전동기 브러시에 포함된 흑연 함량을 정확히 알 수 없으므로 각 마찰 계수의 평균값을 사용하였다.

### IV. 결과

#### 1. 브러시 접촉저항

Fig. 4는 토크에 따른 브러시 접촉저항을 실험결과와 해

Table I. Specifications of PMDC motor.

Input voltage	21 [V]
Coil diameter	0.2 [mm]
Coil resistance	10.15 [ $\Omega$ ]
Back emf constant	0.051 [V · s/rad]
Torque constant	0.046 [kgf · cm/A]

Table II. Friction coefficient according to graphite content.

Graphite content [%]	Friction coefficient
0	0.31
15	0.29
35	0.25
55	0.24
75	0.23
Average	0.264

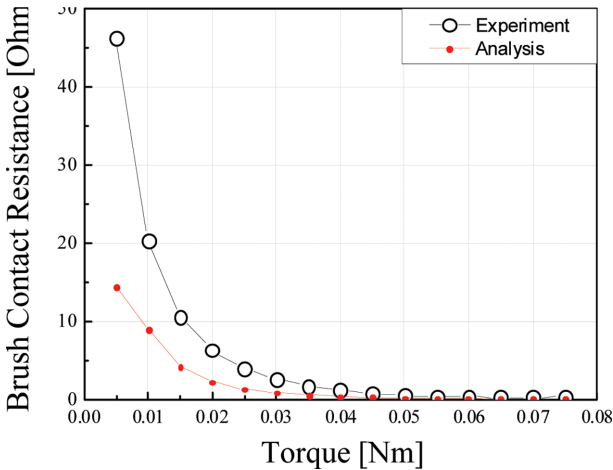


Fig. 4. (Color online) Brush contact resistance of PMDC motor.

석결과로 나뉘어서 나타난 것이다. 브러시 접촉저항은 토크가 증가함에 따라 비선형적으로 감소한다. 토크는 전동기 회전 속도에 반비례하므로 속도가 빠를수록 브러시 접촉저항도 증가한다고 볼 수 있다. 이것은 속도가 증가할수록 단위 시간당 마찰력을 받는 거리가 길어져 손실이 커졌기 때문이다.

해석적인 방법에서도 속도가 증가함에 따라 브러시 접촉저항이 커지는 함수 형태로 산정하였으므로 실험치와 비슷한 양상을 나타내고 있다.

2. PMDC 전동기의 운전 특성

Fig. 5, 6은 PMDC 전동기의 운전 특성을 알아보기 위해 토크에 대한 속도, 효율 곡선을 실험결과와 접촉저항을 제외한 해석결과, 접촉 저항을 고려한 해석결과 2가지로 나눠 비교한 것이다. 접촉저항을 고려한 해석결과가 실험결과와 가깝게 나타남을 확인할 수 있다.

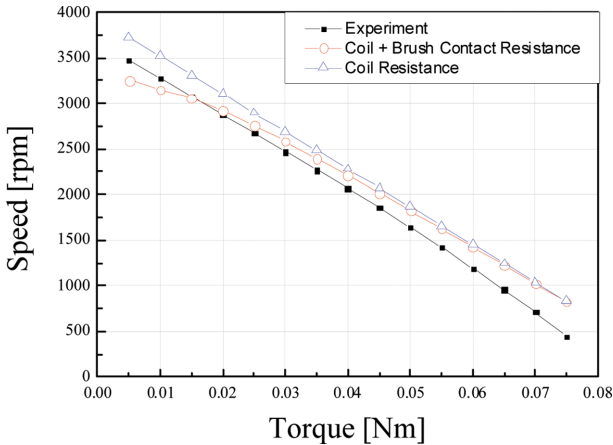


Fig. 5. (Color online) Speed according to torque.

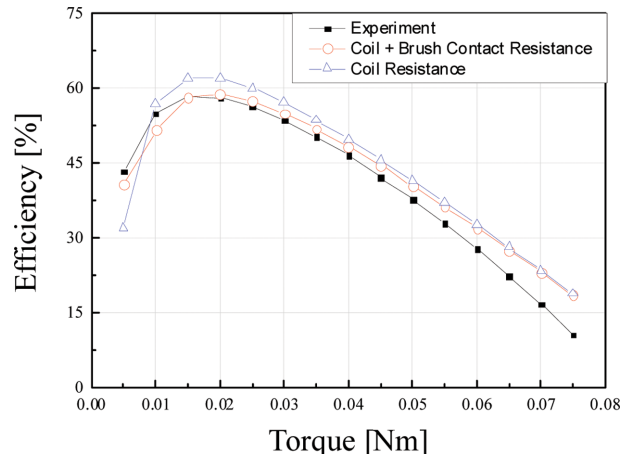


Fig. 6. (Color online) Efficiency according to torque.

2-1. N - T curve

식(1), (3), (5)를 연립하면 식(18)를 얻을 수 있다.

$$\omega_r = -\frac{R_a}{k_e k_t} T - \frac{R_b}{k_e k_t} T + \frac{V_a}{k_e} \tag{18}$$

브러시 접촉저항을 고려한 경우, 식(18)에서 우변의 두 번째 항이 존재하므로 브러시 접촉저항을 고려하지 않았을 때 보다 속도가 더 작은 값을 가지게 된다. 따라서, 동일 토크 상에서 브러시 접촉저항을 고려할 때가 손실에 의해 더 저속으로 회전함을 알 수 있다. Fig. 5에서는 식(18)에 따른 동일 토크에 대한 속도의 변화를 보여준다. 이는 실험치와 더 비슷한 양상을 보였다.

2-2. Efficiency - T curve

전동기의 효율은 전기적 입력에 대한 기계적인 출력의 비를 의미하는데, 이를 식으로 나타내면, 식(19)과 같다.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{loss}}{P_{in}} \tag{19}$$

$$= 1 - \frac{I_a^2(R_a + R_b)}{V_a I_a} = 1 - \frac{I_a(R_a + R_b)}{V_a}$$

Fig. 6에서 토크가 0.02 Nm보다 작은 구간에서는 토크가 증가함에 따라, 전류의 증가에 비해 브러시 접촉저항의 감소 폭이 크므로 효율이 좋아지고 그 이후에는 브러시 접촉저항의 감소에 비해 전류의 증가폭이 더 크기 때문에 효율이 감소한다고 볼 수 있다.

V. 결 론

본 연구는 PMDC 전동기의 역기전력 상수와 토크 상수,

브러시 접촉저항 등의 파라미터들을 기본이론 및 수학적 모델링을 통해서 산정한 후, 그 특성해석 결과를 실험 결과와 비교 검증하였다.

전동기의 속도, 효율 등의 브러시 접촉저항을 고려한 해석 결과가 실험치와 비교했을 때 권선저항만을 고려한 해석결과보다 더 유사한 양상을 보였다. 따라서, 브러시 접촉저항의 수학적 모델링의 타당성을 입증하였다.

실제로는 전동기가 작동함에 따라 온도가 변화하고 그에 따라 저항의 변동이 발생하는데 이것을 반영하지 않았고 역기전력 상수와 토크 상수도 작동 조건에 따라 변화가 발생하기 때문에 실험치와 이론치 간에 오차가 발생한 것으로 판단된다.

본 연구에서와 같이 역기전력 상수와 토크 상수뿐만 아니라, 브러시 접촉 저항도 수식화하여 부하에 따른 정확한 브러시 접촉 저항값을 산정할 수 있다면 전동기의 설계시 원하는 특성을 지닌 전동기를 간편하고 정확하게 설계할 수 있을 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 경제협력권산업육성사업(A020600189)으로 수행된 연구결과입니다.

### References

- [1] J. Hur and B. W. Kim, *Jeet.* **5**, 462 (2010).
- [2] B. K. Lee, G. H. Kang, and J. Hur, *I. Applicat.* **2**, 1068 (2004).
- [3] M. R. Park, H. J. Kim, Y. Y. Choi, J. J. Lee, and J. P. Hong, *J. Magn.* **52** (2016).
- [4] B. H. Lee, K. S. Kim, J. W. Jung, J. P. Hong, and Y. K. Kim, *J. Magn.* **48**, 2949 (2012).
- [5] M. S. Lim, S. H. Chai, J. S. Yang, and J. P. Hong, *Ind. Electron.* **62**, 7827 (2015).
- [6] Lee, J. H., *Basic and Applications of Electrical Machinery*, Gil-Dong, Dae Jeon (2006) pp. 309~324.
- [7] Stephen J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, McGraw-Hill, New York (2004) pp. 511~539.
- [8] H. K. Park and H. Jang, *Proceedings of the Korean Tribology Societies 32nd conference*, 318 (2000).