

# 브러쉬의 전기적, 기계적 손실을 고려한 차량 Throttle Valve 용 PMDC 전동기 성능 예측

이 정 민\* · 박 진 철 · 정 영 훈 · 홍 정 표

한양대학교 미래자동차공학과

## Prediction of PMDC Motor Performance for Automotive Throttle Valve Considering Electrical and Mechanical Loss of Brush

Jeong-Min Lee · Jin-Cheol Park · Young-Hoon Jung · Jung-Pyo Hong

*Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222 Wangshimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea*

**Abstract** : When the PMDC motor rotates, the friction between the brush and the commutator causes electrical and mechanical losses. Therefore, to accurately predict the characteristics of a PMDC motor, the influence of the brush have to be reflected. However, it is difficult to predict the contact resistance and the friction coefficient by the brush because of the large nonlinearity. Therefore, in this paper, PMDC motor is experimentally measured and friction coefficient and brush resistance are calculated through mathematical modeling. Based on this, PMDC characteristics are predicted and compared with experimental data.

**Key words** : Brush(브러쉬), Commutator(정류자), Electrical loss(전기적 손실), Mechanical loss(기계적 손실), PMDC(영구자석형 계자 직류전동기), TNI curve(토크, 속도, 전류 특성곡선)

### Nomenclature

B : damping factor,  $\text{Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$   
E : Back EMF, V  
J : moment of inertia,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$   
k : coefficient  
R : resistance,  $\Omega$   
T : torque, Nm  
V : voltage, V  
 $\omega$  : angular velocity, rad/s

### Subscripts

a : armature  
e : back EMF

L : load  
m : motor  
t : torque

## 1. 서 론

PMDC 전동기는 제어가 쉬워 자동차용 Throttle valve, Chassis 등 다양한 자동차 application에 사용되고 있다. 영구자석형 직류 전동기 (Permanent Magnet Direct Current, PMDC)는 구동을 위해 전기자에 직류 전압만 인가하면 되므로 영구자석형 교류 전동기 (Permanent Magnet Alternating Current,

---

\* 이정민, E-mail: [jmlee0228@hanyang.ac.kr](mailto:jmlee0228@hanyang.ac.kr)

PMAC) 보다 제어가 쉬운 장점을 가지고 있다.

하지만 PMDC 전동기는 구동 시에, 브러쉬와 정류자 접촉 및 마찰로 인한 손실이 발생하게 된다. 이로 인한 브러쉬 손실은 브러쉬와 정류자 접촉 저항에 의한 전기적 손실, 회전에 의한 마찰로 발생하는 기계적 손실이 있다. PMDC 전동기의 성능예측에 신뢰성을 높이기 위해서 브러쉬의 전기적, 기계적 손실을 고려하여 특성을 예측해야 한다.

본 논문은 대상 PMDC 전동기 실험하여 측정된 파라미터를 토대로 수식적 모델링을 하고, 실험값과 수식으로 구한 값을 비교한다. 전압 방정식을 통하여 브러쉬 접촉저항을 산정하고, 운동 방정식을 통해 브러쉬 마찰을 포함한 기계적 손실을 산정한다.

## 2. 전기적 손실

본 논문에서 대상 PMDC 전동기는 전기자 권선을 중권으로 권선하였다.

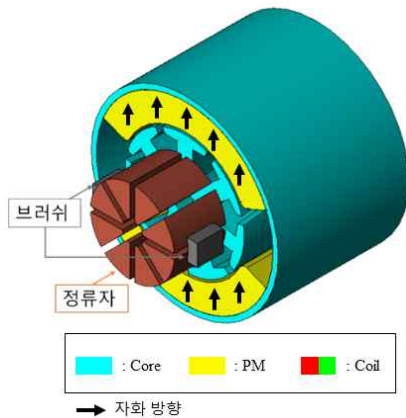


Fig. 1 PMDC motor

권선에 의한 전기자 저항은 전동기의 회전속도에 상관 없이 일정하지만, 브러쉬에 의한 마찰 저항은 회전속도와 인가전류량에 따라 변화한다. 부하에 따라 변화하는 브러쉬 저항은 비선형성이 크므로 예측하기가 어렵다. 하지만 실험을 통한 파라미터를 이용하여 PMDC 브러쉬 저항을 산정한다면 PMDC 전동기 특성예측에 신뢰성을 높일 수 있다.

## 2.1 역기전력/토크 상수

PMDC모터의 역기전력 상수를 산정하기 위해서 무부하 실험 통한 속도에 따른 역기전력을 측정한다. PMDC 모터의 속도에 따른 무부하 역기전력은 Fig. 2과 같으며, 역기전력의 크기는 식 (1)과 같이 속도에 비례하는 것을 알 수 있다.

$$E_a = k_e \omega_m \rightarrow k_e = \frac{E_a}{\omega_m} \quad (1)$$

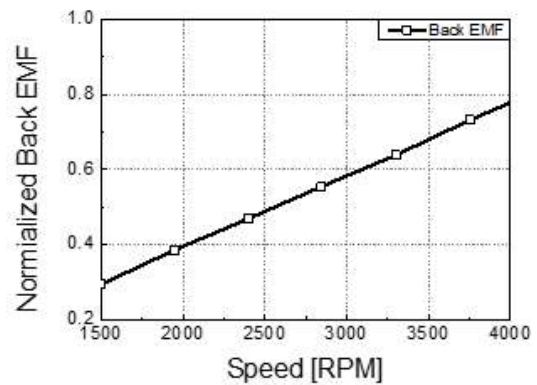


Fig. 2 Back EMF curve

또한 PMDC 전동기는 역기전력 상수와 토크 상수가 동일하므로 식 (2)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$k_e = k_t \quad (2)$$

## 2.2 브러쉬 저항

브러쉬 저항은 Ohm meter를 사용하여 전기자 저항을 측정하고, 전압방정식을 통하여 산정할 수 있다.

### 2.2.1 전기자 저항 산정

PMDC 전동기의 전기자 권선은 중권으로 감겨져 있으므로 인접한 정류자편 segment 양단을 Ohm meter로 측정할 수 있다.

이 때 측정된 저항은 식 (3)과 같이 (총 정류자 수 -1)개의 정류자편 코일 저항과 1개의 코일 저항의 병렬로 나타 낼 수 있다.

Fig. 3은 브러쉬 위치에 따라 정류자 편이 접촉하는 경우를 보여주며 다음과 같이 두가지 경우를 가진다. 두 가지 경우의 평균 저항을 이용하여 전기자 저항을 산정 할 수 있다.

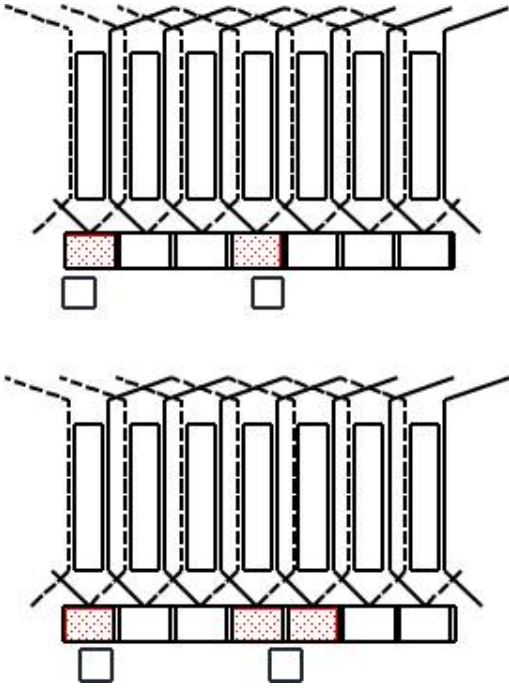


Fig. 3 Average armature resistance

### 2.2.2 브러쉬 저항 산정

브러쉬 저항은 식 (4) 전압방정식을 이용하여 구할 수 있다. 전압방정식은 속도에 따른 유기 전압과 저항에 의한 손실의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{6R_c} + \frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_o} \quad (3)$$

$$V_a = I_a R + k_e \omega_m \rightarrow R = \frac{V_a - k_e \omega_m}{I_a} \quad (4)$$

식 (4)의 저항은 식 (5)와 같이 전기자 저항과 브러쉬 저항의 합이므로, 전기자 저항을 제외하면 브러쉬 저항을 산정할 수 있다.

$$R = R_a + R_b \rightarrow R_b = R - R_a \quad (5)$$

Fig.4 는 부하에 따른 브러쉬 저항을 보여준다. 전기자 저항은 속도변화에 상관없이 일정하나 브러쉬 저항은 비선형적으로 변화하는 것을 알 수 있다.

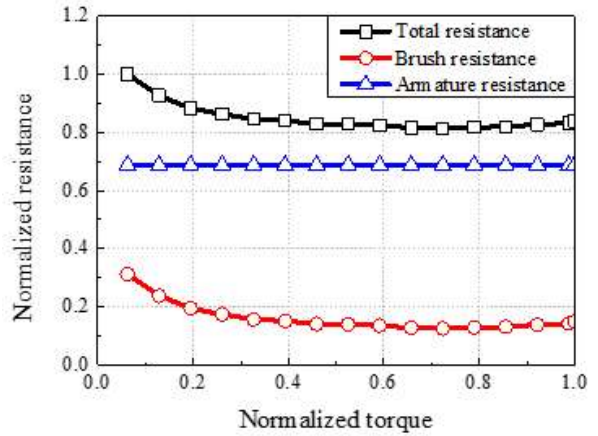


Fig. 4 Brush resistance according to speed

### 3. 기계적 손실

PMDC 전동기가 회전할 때, 풍손, 베어링손 등의 기계손과 브러쉬와 정류자 마찰로 인한 기계손이 발생하게 된다.

$$T = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (6)$$

$$T = B\omega_m + T_L \rightarrow B = \frac{k_t I_a - T_L}{\omega_m} \quad (7)$$

$$T = k_t I_a \quad (8)$$

전동기 운전방정식은 식 (6)과 같으나 등속 운동 시에는 관성모멘트는 무시할 수 있으므로 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

PMDC 전동기의 마찰계수를 측정하기 위해서 부하실험을 진행하였다. 부하실험을 통하여 속도에 따른 부하토크와 입력전류를 측정한다. 부하실험으로 측정한 파라미터를 토대로 마찰계수를 산정할 수 있다.  $T$ 는 전동기에서 발생하는 토크로 식 (8)과 같이 토크상수와 전류의 곱으로 나타낼 수 있으며,  $T_L$ 은 부하실험을 통하여 측정한 토크이다.

수식을 이용하여 산정된 마찰 계수는 브러쉬와 정류자 마찰로 인한 기계손 뿐 만아니라 풍손, 베어링손 등 모든 기계손을 모두 포함한 마찰 계수이다. 산정된 속도에 따른 마찰 계수는 Fig. 5와 같다.

Fig. 6은 실험으로 측정한 TNI curve와 브러쉬 저항과 마찰계수를 반영하여 수식적으로 산정한 TNI curve를 보여주고 있다. 두 그래프의 전류 최대 오차 3.36%, 속도 최대 오차 4.45%를 가진다.

## References

- 1) Baik-kee Song, Byeong-Wha Lee, Soon-O Kwon, Jung-Pyo Hong, "A new method for calculating resistance of brush in PMDC motors", The transactions of the KIEE, 832-833, 2010
- 2) Young-Woo Jin, Kyung-Ho Ha, Gyu-Tak Kim, Jung-Pyo Hong, "A Study on the Characteristic Analysis Method of Permanent Magnet DC Motor", The transactions of the KIEE, 81-83, 2001
- 3) Jimmie J. Cathey, "Electricmachines", 232-239, McGraw-Hill Companies, 2011

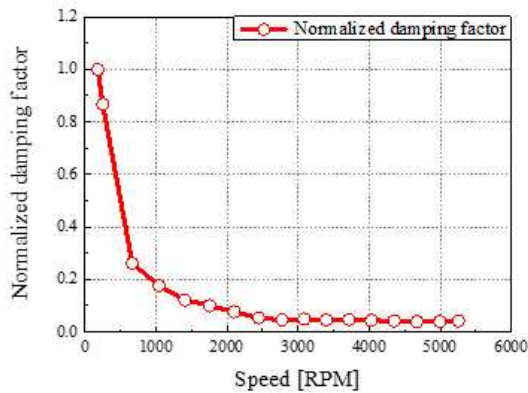


Fig. 5 Damping factor according to speed

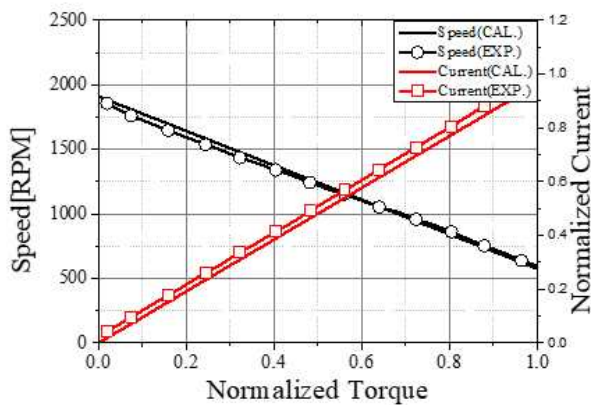


Fig. 6 TNI curve considering brush loss

## 4. 결론

PMDC 전동기가 동작할 때, 브러쉬와 정류자 사이에 전기적 및 기계적 손실이 발생하므로 전동기 특성에 영향을 준다. 하지만 브러쉬에 의한 손실은 비선형성이 크므로 수식적 모델링이 어렵다. 본 논문은 PMDC 전동기의 실험을 통하여 측정한 파라미터를 토대로 특성을 예측하기 위한 수식적 모델링을 하였고, TNI curve를 그려 실제 실험 값과 비교하였다. 그 결과 최대 오차 4.45% 이내의 신뢰성을 보였고, 이를 근거로 PMDC 전동기 특성 예측을 위해서는 브러쉬에 의한 손실이 반드시 반영되어야 함을 알 수 있다.

- 1) 브러쉬 저항을 산정하여 부하에 따른 속도의 오차 범위를 줄임.
- 2) 마찰 계수를 산정하여 부하에 따른 토크의 오차 범위를 줄임