

설계 파라메터 추출에 의한 직류 직권전동기의 설계

하경호, 염상부, 홍정표, 김규탁, 조재옥*
 창원대학교 전기공학과, *(주) 동성전기

Design of DC Motor by Using Experimental Data of Tested Motor

Kyeong-Ho Ha, Sang-Bu Yeom, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, Jae-Ok Jo*
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won Nat'l Univ., *Dong Sung Electric Machine Co.LTD.

Abstract - This paper presents the design process for series wound DC motor with the brush by using the experimental data of a tested motor. The design parameters calculated from the experimental data are friction loss, windage loss and contact resistance of brushes. The characteristic analysis of the designed motor is performed and then the proposed method is verified by comparing with experimental result.

1. 서론

직류전동기는 계자권선의 연결 방법에 따라 정출력, 정속도, 고 토오크, 고속운전 등의 특성을 갖고 있기 때문에 다양한 부하조건에 이용할 수 있다. 또한 넓은 속도제어 범위와 가감속 응답이 빠르고 기동, 정지, 제동, 정·역전, 저속운전 등이 용이하다.

브러쉬 취부형 직류직권전동기는 토오크가 증가하면 속도가 낮아지므로 회전수와 토오크의 곱에 비례하는 출력은 거의 일정하므로 정출력이 요구되어지는 곳에 많이 사용된다. 이러한 직류 직권 전동기를 설계하는데 있어서는 브러쉬 접촉 저항 및 기계적인 손실을 산정하여야 하는데 수식을 통하여 정확히 산정하기는 어렵다.[1][2]

본 논문에서는 브러쉬 취부형 직류직권 전동기의 수식을 통하여 산정하기 어려운 브러쉬 접촉저항, 마찰, 풍손등과 같은 파라메터를 기존 전동기의 특성 측정 결과로부터 구한 다음, 이 파라메터를 재 설계에 반영하였다. 설계과정은 기존 전동기의 치수를 가급적 바꾸지 않고 계자권선, 전기자권선, 브러쉬, 정류자, 슬롯, 전동기의 축방향 길이 등을 변경하여 요구 사양을 만족하는 전동기를 설계하였다. 본 설계 기법의 타당성을 실험치와 비교 검증하였다[1][2].

2. 직류 직권 전동기의 설계 이론

2.1 직류 직권 전동기의 기본 설계 과정

정격에서 9.5[kW]를 만족하는 전동기의 설계를 위하여 기존에 사용하고 있는 6.5[kW]급 전동기의 특성실험으로부터 브러쉬 접촉저항, 손실등 설계에 필요한 파라메터를 추출하였다. 정격에서 6.5[kW]인 기존 전동기에 대한 특성 측정 곡선은 그림 1과 같으며, 새로운 요구사양의 전동기를 설계하기 위한 설계 과정을 그림 2에 나타내었다. 설계에 필요한 전동기의 파라메터를 추출하기 위하여 아래와 같은 가정을 두었다.

- ① 권선의 저항은 75[°C]의 값으로 환산한다.
- ② 자속의 누설성분은 수정 전·후 같다.
- ③ 재 설계 후 기계적인 손실은 동일한 속도에서는 같다고 본다.

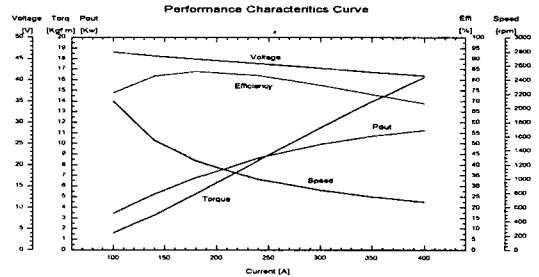


그림 1. 6.5[kW]급 전동기의 특성시험 결과

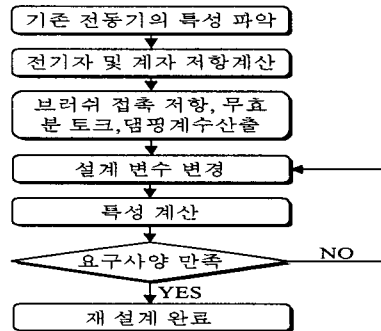


그림 2. 설계 과정

2.2 전기자 및 계자권선의 저항 산정

기존 제품은 파권의 권선 방식을 채용하며 4극기이다. 기존 제품의 동손을 알기 위해 전기자 저항과 계자 저항을 알아야한다. 이때의 저항은 전동기의 치수로부터 구할수 있다. 계자권선은 4극이 모두 직렬로 연결되어 있으며 1극의 평균 길이는 자극형상이 그림 3과 같을 때 식 (1)로부터 계산할수 있으며, 식 (1)의 둘째항은 모서리 부분의 평균 원호 길이를 계산한 것이다[1].

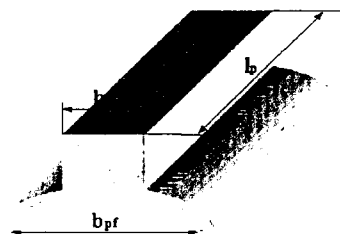


그림 3. 계자 pole 형상

$$R_f = P \times \rho \times \frac{N_f l_f}{q_f} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 표준 연동의 저항률이고, N_f 는 턴수 l_f 는 코일권수 1회의 평균 길이 q_f 는 코일의 단면적을 나타낸다. 엔드코일의 길이를 고려한 전기자에 감겨있는 1턴의 평균 길이 및 전기자 권선 1턴의 평균 길이, τ 는 pole pitch이고, d_s 는 슬롯 깊이이다.

$$\begin{aligned} l_a &= 2l + 2.3\tau + 5d_s \\ \tau &= \frac{\pi D}{P} \\ R_a &= \frac{Z}{2a^2} \cdot \frac{\rho l_a}{q_a} \end{aligned} \quad (2)$$

2.3 브러쉬 접촉저항 및 뎀핑계수 산출

전기적 입력은 기계적 유효 출력분(P_{out}), 철손과 기계적 손실(P_{loss}) 및 전기적 손실(P_{coil})로 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{in} = P_{out} + P_{loss} + P_{coil} \quad (3)$$

회전형 전동기의 기계 운동방정식은 정상상태에서 회전자의 회전각속도가 일정하다고 설정할 때 식 (4)와 같고 출력과 손실로 표현하면 식 (5)와 같다. 이 식에서 발생토크 T 는 다이내모미터 등을 통하여 실측되는 유효분 토크 T_{eff} 와 손실분 토크를 합한 값이다.

$$T = \omega_r D + T_{eff} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \omega_r T &= \omega_r^2 D + \omega_r T_{eff} \\ &= \omega_r^2 D + P_{out} \end{aligned} \quad (5)$$

따라서, 식 (3)과 식 (5)에 의하여 입력과 출력의 차이는 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{in} - P_{out} &= P_{loss} + P_{coil} \\ &= \Delta P = \omega_r^2 D + I^2 R \end{aligned} \quad (6)$$

따라서 특성측정결과와 식 (6)을 이용하여 뎀핑계수 D 와 전체 저항 R 을 구할 수 있다.

즉, 브러쉬 마찰저항, 회전자의 풍손 및 웬의 풍손 등을 포함하는 손실과 브러쉬 접촉저항을 포함하는 권선저항을 구할 수 있다.

2.4 유기기전력과 극당 자속량 및 무효분 토크

유기 기전력 E 는 실험치를 이용하여 식 (8)으로부터 구하였다.

$$E = \frac{P_{out} + P_{loss}}{I} \quad (8)$$

전류의 증가에 따른 자속량이 선형적으로 증가하지 않으므로 특성 데이터로부터 전류의 변화에 따른 자속 변화비를 구하여 전동기의 설계에 반영한다. 극당 자속은 식 (9)로부터 계산한다.

$$\phi = E \cdot \frac{a}{P} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{60}{N} \quad (9)$$

기존 전동기 특성 실험 결과의 토크 값은 유효성분인 기계적 출력만의 값이다. 식 (4)의 토크 값은 무효분과 유효분 토크를 합한 것이므로 무효분 토크는 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$T_{loss} = \frac{Z}{2\pi} \frac{P}{a} \phi I_a - T_{eff} \quad (10)$$

식 (10)을 이용하여 전류의 변화에 따른 토크 손실을 구할 수 있다.

3. 파라미터 추출

기존전동기의 파라미터의 값들에 의해 전류의 변화에 따른 손실 및 자속 밀도의 변화를 나타내면 그림 4,5와 같다. 그림 1의 실험치를 근거로 식 (6)을 이용하여 산출한 뎀핑계수는 0.0188이고, 권선 저항은 0.0311[Ω], 브러쉬 접촉 저항은 0.0090[Ω]이다. 그림 4에서 무효분 토크 T_{loss} 와 손실 P_{loss} 은 속도가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 철심이 포화하지 않으면 단위전류당 극당 자속은 일정하지만 그림 5에서 보는 바와 같이 전류가 증가함에 따라 감소하는 포화특성을 나타내고 있다. 즉, 전류가 250[A] 이상에서는 철심이 포화되어 계자 요크는 1.6[T], 자극 pole은 1.4[T]의 자속밀도를 갖는다.

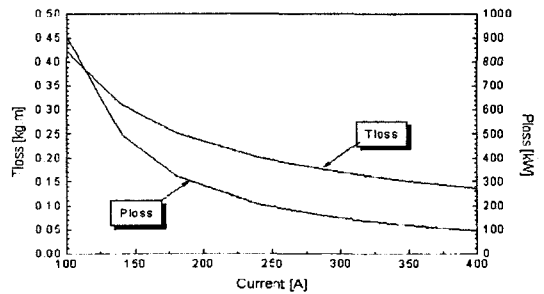


그림 4. 전류변화에 따른 손실

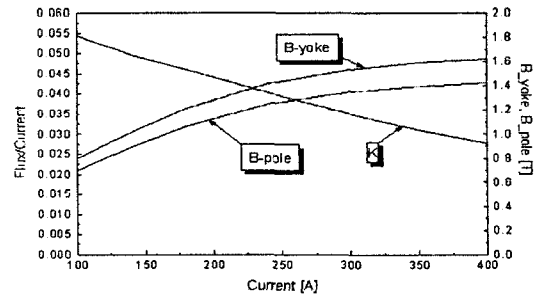


그림 5. 전류변화에 따른 자속밀도 변화

4. 수정 설계

4.1 도체수의 결정

기계적 치수가 기존 전동기와 비슷하고 새로운 사양을 요구하는 전동기의 특성을 만족하는 전기자 사양을 얻기 위해 아래의 가정을 전제로 도체수 변화에 따른 코일의 면적을 계산한다.

- ① 계자권선은 그대로 이용한다.
- ② 기존 전동기와 동일한 브러쉬접촉저항 R_{bc} 을 갖는다.
- ③ 수정 후 전동기 특성은 기존 제품 전동기에서 계산된 R_{bc} , D , P_{loss} 을 적용한다.

가정으로부터 특성을 만족하기 위하여 도체수와 코일 단면적과의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$N = \frac{60a}{Pz} \frac{V - I(R_a + R_f + R_{bc})}{\phi} \quad (11)$$

$$R_a = \frac{Z}{2a^2} \cdot \frac{\rho l_a}{q_a} \quad (12)$$

위의 식 (12)로부터 전자기권선의 도체단면적은 식(13)으로 나타낼 수 있다. 여기서, N 은 전자기 전체 도체수이다.

$$q_a = \frac{\frac{Z\rho l_a}{2a^2}}{\left(V - \frac{\Phi N_r}{60a} PZ\right) \frac{1}{I} - R_{bc} - R_f} \quad (13)$$

식 (13)으로 부터 도체수에 따른 도체단면적의 변화를 나타내면 그림 6과 같다. 이때, 회전속도 N_r 은 요구사양의 정격회전속도이다.

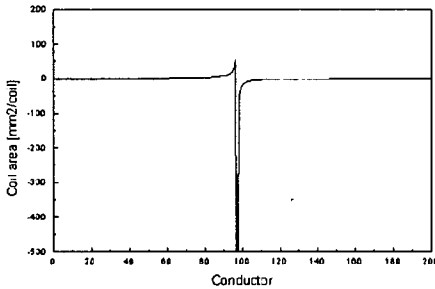


그림 6. 도체수에 따른 코일의 단면적

그림 6에서와 같이 도체수에 따른 코일 단면적을 분석한 결과 도체수가 97이상일 때 코일 단면적이 음수이므로 사용이 불가능함을 알 수 있고, 91이하일때는 기존의 전동기에 비교하여 코일 단면적이 너무 작으므로 과도한 온도 상승의 문제가 있음을 알 수 있다. 코일의 단면적을 확보할 수 있는 도체수 91초과 96미만일 때 설계대상 전동기의 권선분포가 이층권으로 감기 때문에 도체수는 짝수가 되어야하므로 도체수가 91, 93일때는 사용이 불가능함을 알 수 있고, 또한 설계 대상 전동기의 권선방식이 파권이기 때문에 슬롯수를 홀수로 하는 것이 바람직하므로 도체수가 96일 때 슬롯수가 짝수이므로 부적합함을 알 수 있다. 따라서, 도체수가 94일 때 전동기 특성을 만족하는 것으로 설정하였다.

5. 설계 전동기의 제원 및 특성 검토

위에서 설정된 도체수와 코일의 단면적으로 전동기의 특성계산을 하여 요구되어지는 사양을 만족하는지 판단하여야 한다. 직류 직권전동기의 특성식을 이용하여 기존 전동기에서 추출된 손실을 고려한 특성계산 결과 수정 후 요구되어지는 사양과 잘 부합됨을 알 수 있다. 그림 7에서 실선으로 표시한 값들이 요구되어지는 특성치이며, 재 설계된 전동기의 시험치를 점선으로 나타낸 것이다. 재 설계된 전동기의 이론치와 시험치는 그림 8에 나타내었다.

기존 전동기와 새로 설계된 전동기의 사양을 비교하면 축방향 길이, 전자기 슬롯수 및 전자기권선의 코일 단면적이 변경되었다. 즉, 도체수는 114에서 94개로 줄어 슬롯수는 기존 제품에 비교하여 10개가 줄었다. 코일의 단면적은 조금 늘어났으나 기존 제품의 슬롯 깊이를 그대로 사용하기 위하여 코일의 높이는 6.3 [mm]로 기존과 동일 하 다

표 1. 설계 전동기의 재원

	기존 전동기	설계 대상 전동기
전자자 도체수	114	94
슬롯수	57	47
코일단면적 [mm ²]	15.12	17.093
코일 치수	2.4*6.3	2.71*6.3
계자축방향길이 [mm]	118	122
전자자 축방향길이 [mm]	120	124
계자 저항 [Ω]	0.00950	0.00968
전자자 저항 [Ω]	0.01263	0.00935
공극 [mm]	2.6	2.6
전자자 외경 [mm]	175	175

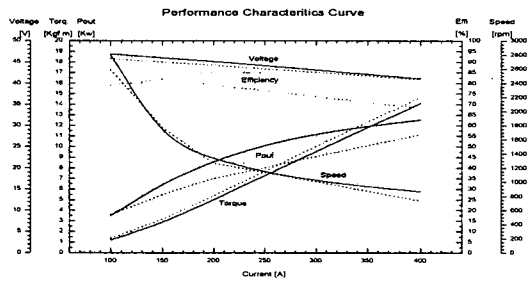


그림 7. 요구특성과 9.5Kw모델의 시험치 특성비교

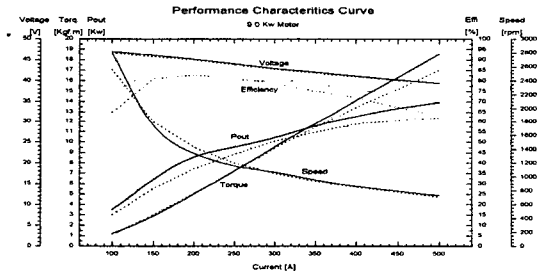


그림 8. 이론치와 시험치 특성비교

6. 결 론

본 연구는 브러쉬 컷부형 직류 직권전동기를 대상으로 기존의 전동기 특성 자료를 근거로 한 새로운 사양의 전동기 특성으로 설계하는 과정을 구체적으로 기술하였다. 기존전동기의 모델에서 제반 파라메타와 손실을 계산하였으며 이 데이터를 새로운 특성 전동기 적용하여 설계한 결과 요구 특성 곡선과 거의 일치하는 결과를 얻었다. 기존 전동기의 전반적 치수는 바꾸지 않고 코일의 치수 등의 변경만으로 새로운 사양의 전동기가 설계 가능함을 보였다.

본 논문에서 제안한 설계 방법을 활용하면 연구 개발 비용이 감소할 뿐만 아니라, 제작 기간을 단축하여, 신뢰성 있는 직류 직권 전동기를 설계할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 李承阮과 李允鍾, 전기기기, 1998
- [2] 元鍾洙 譯, 電機設計學, 1996