

영구자석계자형 직류전동기의 특성해석 기법에 관한 연구

진영우, 하경호, 홍정표, 김규탁
 창원대학교 전기공학과

A Study on the Characteristic Analysis Method of Permanent Magnet DC Motor

Young-Woo Jin, Kyung-Ho Ha, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l Univ.

Abstract - This paper introduces the improved analysis method for PMDC(Permanent Magnet DC) motors. The effect of field yoke is considered by equivalent area. Overhang effect, caused by different axial length of magnet and armature, is analyzed by 3D EMCN(Equivalent Magnet Circuit Network) method. Then brush contact resistance and mechanical loss extracted by experimental data are used in characteristic analysis. The validity of the proposed method is verified by the comparison of analysis results and experimental ones.

1. 서 론

기존의 브러쉬 취부형 직류전동기의 계자권선을 영구자석으로 대체하여 사용함으로써 구조가 간단하고 단위 체적당 출력을 증대시켜 소형 경량화가 가능하므로 산업 응용기기들의 구동원으로 오랜 동안 사용되어져 왔다.

그러나, 영구자석을 계자로하는 브러쉬 취부형 직류전동기는 영구자석의 오버행영향과 파이프를 사용한 계자요크에서의 포화, 브러쉬와 정류자 사이의 접촉저항이나 마찰, 풍손 등과 같은 파라미터들을 수식을 통하여 정확히 구하는 것이 거의 불가능하여 특성해석 분석 결과는 실제 제작된 모델의 실험치와 많은 상이한 차이를 가지게 된다. 따라서, 신뢰성 있는 전동기를 설계하거나 특성을 예측하기 위해서는 이러한 특성을 고려한 해석기술이 필요하다 [1-5].

본 논문에서는 영구자석계자 직류전동기를 대상으로 2차원 유한요소해석으로도 해석의 정확성을 높이기 위한 해석기법을 제시하였다. 즉, 이론적 해석결과의 신뢰성을 높이기 위하여 이 전동기의 구조적 특성을 반영한 간이적 해석기법을 연구하였으며, 또한, 브러쉬 접촉저항 및 기계적인 손실을 추출함으로써 이론적 특성해석 결과에 반영하였다.

1. 계자요크는 영구자석의 길이보다 훨씬 긴 파이프를 사용하여 포화를 방지한다. 따라서, 본 해석에서도 요크의 포화를 고려한 등가 단면적으로 2차원 유한요소해석에 반영하였다.

2. 영구자석의 길이와 전기자 축방향의 길이가 다르므로 나타나는 오버행 효과(Overhang effect)의 정확한 고려를 위하여 3차원 등가자기회로망법(3D Equivalent Magnetic Circuit Network : 3D EMCN)으로 오버행 계수를 산정하여 2차원 유한요소해석을 보정하였다 [6].

3. 브러쉬 취부형 직류전동기의 수식을 통하여 산정하기 어려운 브러쉬 접촉저항 및 기계적인 손실을 해석 대상의 전동기로부터 추출하여 이 파라미터를 특성해석에 반영하였다.

본 해석 기법을 이용한 특성해석 결과를 실험치와 비교 분석함으로써 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

해석 모델 전동기의 주요 사양과 치수는 표 1과 같으며, 해석 모델 전동기의 전기자 턴수는 9턴이다. 그림 1은 사슬롯을 고려한 해석모델로서 해석시 전기자와 계자의 자극 중심을 나타내었다. 전기자 권선에 전류가 흐를 때 계자자극의 중심과 전기자 자극의 중심이 전기각으로 90도로 정렬되었을 때를 나타낸 것이다.

표 1. 전동기 사양 및 주요 치수

회전수[rpm]	3512	전류[A]	20
토크 [kg.cm]	4.5	효율[%]	66
전기자 축방향 길이[mm]	28	전기자 외경 [mm]	55
영구자석의 축 방향길이[mm]	43	영구자석의 잔류 자속 밀도 [T]	0.405
계자 요크의 축 방향길이[mm]	78	계자요크의 두께 [mm]	2.6

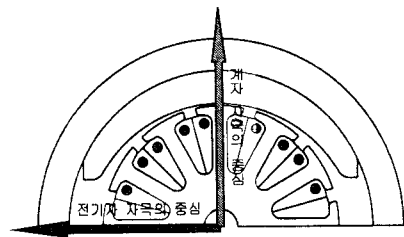


그림 1. 해석 모델

2.2 해석 과정

영구자석계자형 직류전동기의 특성해석과정은 다음의 과정으로 나누어진다.

- 2차원 해석시 요크 두께의 보정 : 고정자의 요크의 자기포화현상을 고려하기 위함
- 2차원 해석시 오버행 효과의 적용 : 자석의 축방향 길이와 전기자의 축방향 길이 차이를 보정
- 영구자석, 전기자권선의 온도 보정 : 온도에 따른 영구자석의 감자, 전기자권선의 저항 증가를 고려
- 브러쉬 접촉저항 및 손실토크 산정 : 실험 결과를 이용하여 브러쉬 접촉저항과 기계적인 손실을 고려

2.3 해석 방법

2.3.1 요크 두께의 보정

(1)식은 퍼미언스를 구하는 일반화된 식이다. 여기서

S_y 는 자로의 단면적이고, l_y 는 자로의 길이이다.

$$P = \mu S_y / l_y \quad (1)$$

단면적을 통과하는 자속밀도의 분포가 일정하다고 가정하고 요크 두께의 변화에 따른 자로의 길이변화를 무시하면, 요크부분의 퍼미언스는 자로의 단면적에 의해 결정된다. 실제 모델과 등가 모델의 퍼미언스를 같게 두면 변화된 요크의 두께를 쉽게 계산할 수 있다.

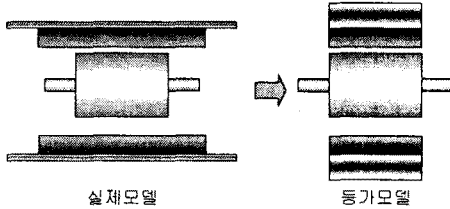


그림 2. 요크두께의 보정

2.3.2 오버행 계수 산정

영구자석의 축방향 길이가 전기자 축방향 길이보다 길게 제작 될 경우 이를 축방향으로 일정하게 보는 2차원 해석으로 해석 할 경우에는 오차가 발생한다. 본 논문에서는 2차원 해석시 발생하는 이러한 오차를 보정하기 위하여 3차원 등가자기회로방법에 의해 산정한 오버행 효과를 적용하였다.

등가자기회로방법으로 편심형 영구자석의 오버행계수를 계산하기 위하여 해석의 편의상 그림 3과 같이 동심형 영구자석으로 등가화하였으며 호의 각도는 수식 (2)와 같이 나타낸다

$$\theta = \frac{Area \times 4 \times 360}{\pi \times ((D_{pm-out})^2 - (D_{pm-in})^2)} \quad [^\circ] \quad (2)$$

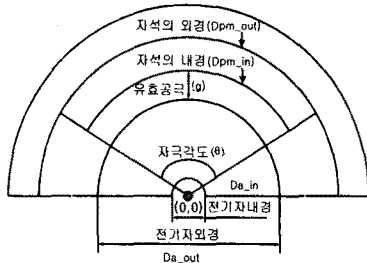


그림 3. 오버행 등가모형도

해석영역을 그림 3과 같이 퍼미언스와, 기자력으로부터 3차원 등가자기회로망을 구성하였다. 해석영역의 임의의 절점에 자속밀도의 윗출입량이 불변이라는 자속의 연속조건을 적용하면 다음의 식 (3)과 같이 된다.

$$\Phi_{x_{i-1,j,k}} + \Phi_{x_{i+1,j,k}} + \Phi_{y_{i,j-1,k}} + \Phi_{y_{i,j+1,k}} + \Phi_{z_{i,j,k-1}} + \Phi_{z_{i,j,k+1}} = 0 \quad (3)$$

모든 절점에 대해 절점 방정식을 구성하여 식 (4)과 같은 시스템 행렬 형태로 표현 할 수 있다[3].

$$[P]_{n \times n} (U)_{n \times 1} = (F)_{n \times 1} \quad (4)$$

여기서, $[P]$ 는 퍼미언스 계수행렬 (U 는 절점자위 행렬, (F) 는 구동벡터이다.

위와 같이 구성된 식 (4)의 계수행렬에 경계조건을 부여한 뒤 미지절점의 자기 스칼라 포텐셜값을 구하여 기본 절점방정식으로부터 해석영역 각 부분의 자속과 자속밀도를 계산한다.

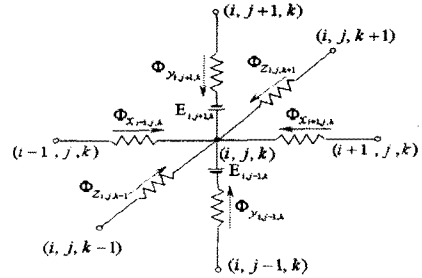


그림 4. 한 절점에서 자속의 흐름도

2.3.3 영구자석, 전기자권선의 온도 보정

본 논문에서는 영구자석 전동기의 특성 해석시 영구자석 잔류자속밀도와 전기자 권선의 온도를 보정하였다.

온도에 따른 페라이트 영구자석 잔류자속밀도 온도 보정 수식은 다음과 같다.

$$B_r = B_r(1 + a(T_0 - T)) \quad [T] \quad (5)$$

여기서, B_r : 잔류 자속밀도 a : 보정 계수 T_0 : 측정시 상온 온도 T : 운전중의 온도이다.

2.3.4 브러시 접촉저항 및 손실토크 추출

실험치에서 토크 상수는 정격 부분에서 토크와 전류에 의한 대략적인 산정 방법이 있는데 본 논문에서는 아래와 같은 제약 조건에 의해서 전동기의 운전구간에서의 토크 상수를 계산하였다.

- i) 구속시의 손실 토크는 0으로 설정한다.
 - ii) 토크에 따른 손실 토크는 항상 0보다 크다.
 - iii) 토크 상수는 정격 부분에서 토크와 전류에 의해 산정한 대략적인 토크 상수보다 크다.
 - iv) 토크 상수에 의해 계산한 역기전력 상수와 실험치의 회전수에 의해 계산된 역기전력은 입력전압보다 적다.
 - v) 토크에 따른 전체 저항 값은 전기자 저항 값보다 크다.
 - vi) 이상의 i, ii, iii, iv의 설정에 의해 토크 상수를 결정하여 손실 토크와 브러시접촉 저항을 전압 방정식 및 기계적인 운동 방정식에 의해 계산한다.
- 저항은 브러시 접촉 저항, 정류자권의 저항 및 전기자 권선의 저항으로 구성되며 전체 저항은 다음의 식(6)으로 구할 수 있다.

$$R_T = (V - E) / I \quad (6)$$

브러시 접촉저항 (R_b) 및 정류자권저항 (R_c)은 전체 저항에 권선의 저항 R_a 를 빼서 구한다.

$$R_b + R_c = R_T - R_a \quad (7)$$

회전형 전동기의 기계적인 운동 방정식은 식(8)과 같으며, 정상상태에서는 회전자의 회전속도가 일정하다고 볼 수 있으므로 식 (8)식의 우변 첫 번째 항은 "0"이 된다. 따라서, 기계적인 운동방정식의 양변에 각속도를 곱하여 식 (9)과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$T = J \frac{dw_r}{dt} + w_r D + T_{eff} \quad (8)$$

$$w_r T = w_r^2 D + w_r T_{eff} \quad (9)$$

여기서, J 는 회전자의 관성모멘트, D 는 회전자의 댐핑 T 는 전동기의 순수 발생토크, w_r 는 전동기의 각속도, T_{eff} 는 다이내모미터로 측정된 유효 발생 토크, D 는 댐핑 계수이다.

여기서 전동기의 순수 발생 토크는 위의 제약조건에 의해 산정된 토크 상수와 전류의 곱에 의해 계산할 수 있고, 댐핑 계수는 순수 발생토크에 다이내모미터로 측정된 유효 토크성분을 뺀 손실 토크를 각속도로 나누어

주어서 계산한다.

2. 4 해석 결과 및 검토

위에서 제시된 방법에 의한 수정된 계자요크의 두께는 2.6[mm]에서 7.24[mm]로 변경되었으며 3차원 등가 회로망법으로 구한 오버행 계수는 1.26이다. 또한 영구 자석과 전기자 코일저항은 50(°C)로 온도 보정을 하였다.

표 2는 실험치에서 산정한 토크 상수와 보정된 요크 두께와 오버행 계수로 산정된 유한요소 해석으로부터 구한 토크 상수를 비교한 것으로 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다. 표 3은 정격에서의 제반 파라미터를 추출한 값이다.

그림 5는 부하에 따른 댐핑계수와 손실 토크를 도시하였다. 그림 6은 부하에 따른 브러시 접촉저항과 동손 및 저항에 기인한 전압강하의 변화를 나타낸 그림이다. 이 두 결과에서 부하의 변화에 따라 기계적 손실이나 브러시 접촉저항이 비선형적으로 변화함을 알 수 있다.

그림 7(a)은 무부하 손실 토크 및 브러시 접촉 저항이 모든 부하에서 같다고 가정하여 해석한 결과를 실험치와 비교한 것이며, 그림 7(b)는 부하에 따른 손실 토크 및 브러시 접촉 저항을 산정한 값을 이용한 특성해석을 실험치와 비교한 그래프이다. 따라서, 부하의 변화에 따라 손실의 변화를 반영한 결과가 실험치와 잘 부합됨을 알 수 있다.

표 2. 실험치와 이론치의 토크상수 비교

실험치의 토크 상수 [N.m/A]	0.02280
해석치의 토크 상수 [N.m/A]	0.022778

표 3. 정격에서의 제반 파라미터

회전수[rpm]	3495	토크 상수[N.m/A]	0.0228
토크 [kg.cm]	4.49	역기전력상수[V/rpm]	0.0024
전류[A]	20	무부하 전류[A]	3.0
효율[%]	66	무부하손신토크[kg.cm]	0.628
전압[V]	12.18	브러시 접촉 저항[Ω]	0.101

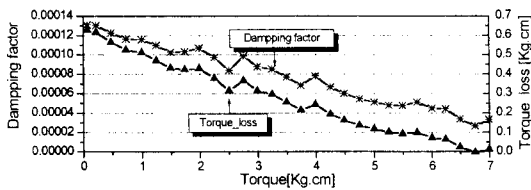


그림 5. 부하에 따른 댐핑 계수 및 손실 토크

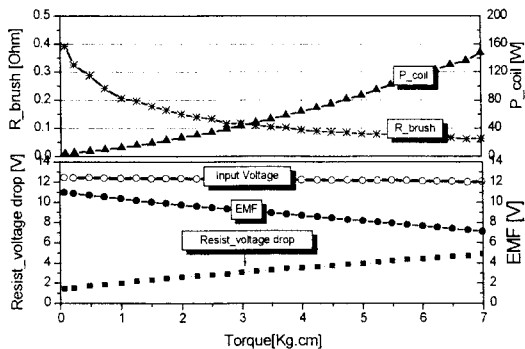
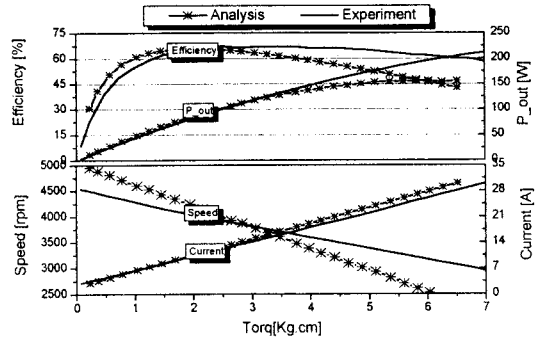
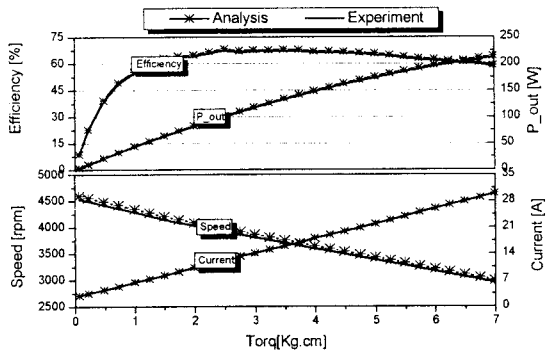


그림 6. 부하에 따른 브러시 접촉 저항 및 저항 손실



(a) 모든 부하에서의 손실과 브러시 접촉저항이 정격에서의 값과 동일한 경우



(b) 부하에 따른 토크 손실 및 브러시 접촉 저항이 다른 경우
그림 7. 실험치와 이론치의 비교

3. 결 론

본 논문에서는 영구자석형 계자 직류전동기를 대상으로 2차원 해석시 신뢰성을 높이기 위한 해석 기법과 실험에 의한 측정자료를 근거로 부하에 따른 토크 상수와 브러시 접촉저항 및 기계적인 손실을 산정하였다. 3차원적인 자기회로의 현상을 보정하기 위하여 계자요크를 등가 단면적으로 보정하였으며 3차원 등가자기회로망을 이용하여 오버행계수를 산정하였다. 또한, 전동기의 동작중 온도를 고려하여 영구자석과 코일의 온도를 보정하였다. 본 해석 기법으로 계산된 특성해석 결과를 실험치와 비교하여 타당성을 검증하였다.

본 논문에서 제안한 해석 기법은 영구자석여자 직류전동기의 설계 및 특성해석에 유용하리라 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 홍정표 외 4인, "설계 파라메타 추출에 의한 직류 직권전동기의 설계," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 738-740, 2000.
- [2] J. Hur, I. S. Jung and D. S. Hyun, "Lateral Characteristic Analysis of PMLSM Considering Overhang Effect by 3 Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network Method," IEEE Trans. on Magn., Vol. 34, No. 5, pp. 3528-3531, 1998.
- [3] 이윤종 저, 신련 전기기기, 동명사, 1996
- [4] 大川光吉 저, 원중수 독, 페라이트 자석회전기의 설계, 동일출판사, 1999
- [5] 이승원, 이윤종 공저, 개정신관 전기기기, 문운당, 1998
- [6] 홍정표, 임달호, "3차원 등가자기회로망법에 의한 영구자석 모터의 자계 해석에 관한 연구," 대한전기학회 논문지, Vol. 43, No. 9, pp. 1432-1439, 1994.