

영구자석형 고속모터의 자화패턴에 따른 회전자 손실 해석

장 석 명, 조 한 욱, 최 장 영, 양 현 섭*, 류 동 완**

충남대학교 전기공학과, 삼성 테크윈*, 효성중공업**

The Influence of Magnetization Pattern on the Rotor Losses of Permanent Magnet High-Speed Machines

Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, Jang-Young Choi, Hyun-Sup Yang*, Dong-Wan Ryu**

Chungnam National University, Samsung Techwin Co.*, Hyosung Co.**

Abstract - This paper deals with the comparison of rotor eddy current losses in two types of permanent magnet high-speed machines. The analytical method and two-dimensional finite element analysis have been used to evaluate the rotor eddy current loss with the rotor magnetization pattern. It is shown that the Halbach array produce rotor loss less than parallel magnetization.

1. 서 론

초고속 전동발전기 시스템은 고속 운전 특성을 이용하여 발전 시스템을 간단히 할 수 있기 때문에 소형·경량화, 고효율화, 무보수화 할 수 있는 장점을 지니고 있다. 게다가 최근 고속운전을 필요로 하는 부하사용의 증가와 구동원 및 이에 부속되는 장치에 대한 소형·경량화를 요구하는 사례가 증가되어 고속 전동기의 설계·해석 및 구동시스템에 대한 연구와 관심이 높아져 가고 있다.

고속운전 시스템은 가정용 전기제품, 정보 관련 장비, 항공기, 잠수함, 미사일, 인공위성 등에 탑재되는 구동 시스템 등에 적용되는 사례가 많다. 또한, 소형화와 성능 향상을 목적으로 기술개발이 진행되고 있으며, 특히 공작기계, 진공펌프나 원심분리기, 그리고 전자동차용 기기 등 산업 전반에서 전동기의 고속화 설계 및 구동 기술이 주목받고 있다. 이러한 초고속 회전기 및 전력변환 장치를 실현하기 위해서는 전기·전자·제어 공학은 물론, 기계공학 및 재료공학에 이르는 광범위한 기술을 결집하지 않고서는 불가능하다[1][2].

고속 시스템에 적용되는 영구자석형 동기 모터는 주로 영구자석 구속용 슬리브와 영구자석을 갖는다. 그리고 이러한 재질들은 도전성을 띠므로 회전자의 와전류 손실을 유발한다. 와전류 손실은 고속용 기기에서 발생하는 회전자의 온도상승의 주원인이 되고 특히 고속 회전자의 냉각이 까다로운 점을 고려할 때 회전자 손실을 정확히 계산해 내는 것은 매우 중요하다[3].

따라서, 본 논문에서는 회전자의 와전류 손실을 시간 고조파와 공간고조파로 나누어 각각의 차수에 따른 회전자 손실의 특성을 다룬다. 해석기법은 유한요소법과 전자장 해석법을 적용하였고, 포인팅 벡터를 이용하여 각 고조파 차수 및 영역에 따른 손실의 분포를 계산하였다. 특히, Halbach 배열의 영구자석 회전자를 갖는 기기와 수평방향 자화된 영구자석 회전자를 갖는 기기의 와전류 손실을 비교하여 Halbach 배열의 회전자가 손실 발생의 관점에서 수평방향으로 자화된 회전자보다 더 우수한 특성을 갖고 있음을 입증하고자 한다.

2. 회전자 손실특성 해석방안

전기기기의 특성해석에서 전자장 해석법을 적용하는 경우에 설계 파라미터의 변화에 따라 특성의 민감도를 쉽게 파악 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 해석모델이

복잡한 형상인 경우에는 경제조건의 설정 등이 복잡하여 형상을 정밀하게 고려하여 해석하기는 어렵다. 특히, 치·슬롯 형상이 갖는 공극 퍼미언스의 공간적 변화에 따른 비정현적인 자속밀도 변화에 의한 도전성 슬리브나 영구자석에서 발생하는 와전류의 모델링에 해석적 방법을 적용하기가 매우 어렵다.

따라서, 본 논문에서는 유한요소법과 전자장 해석법을 함께 적용하여 회전자 손실을 계산하는 방안을 제안하고자 한다. 그림 1은 손실 계산을 위해 적용된 해석방안을 나타낸 순서도이다.

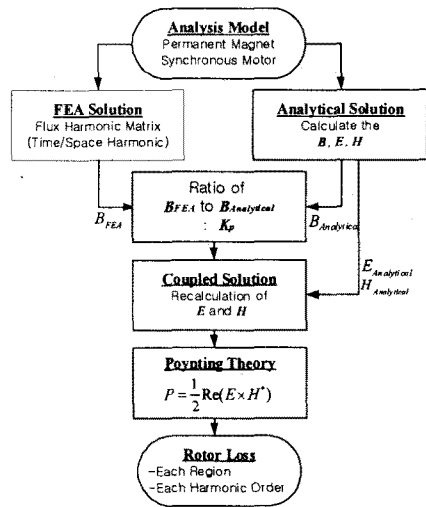


그림 1. 손실계산을 위한 순서도

3. 자계 특성 해석

3.1 해석모델

그림 2는 Halbach 회전자와 평행방향 자화 배열 회전자를 갖는 3상 4극 영구자석형 고속모터를 나타낸다. 설계된 모델은 5 kW, 40 000 r/min의 정격을 갖는 전동/발전기 모델이다. 그림 3은 회전형 설계모델을 5영역 직교 좌표축으로 나타낸 해석 모델이다. x 축은 회전자의 접선성분을 나타내고, y 축은 수직 성분, 그리고, z 축은 축방향을 나타낸다. 해석 영역은 축 영역에서부터 I 영역으로 하여 고정자 요크 영역을 V 영역으로 하였다. 고정자 표면에 위치하는 전류밀도는 회전자의 표면에서 고조파를 고려한 자속밀도와 동일한 자계를 만드는 크기를 갖는다.

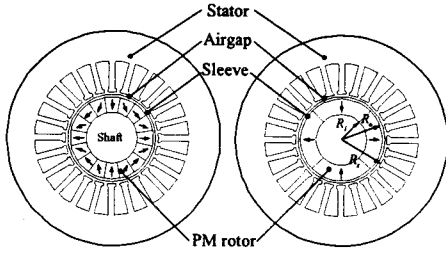


그림 2. 영구자석형 고속모터

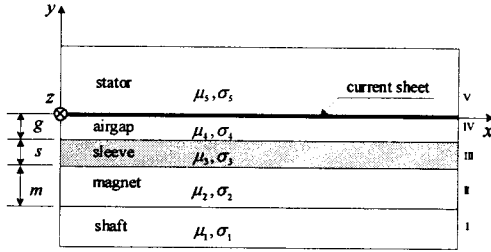


그림 3. 직교 좌표축 해석모델

3.2 유한요소법에 의한 자계 고조파 산출

유한요소법에 의한 해석에서는 회전자 표면에서의 자속밀도를 통하여 자계고조파를 산출하고자 한다. 먼저 해석모델에서 1슬롯피치를 15개의 회전자 위치로 나누어 각 위치에 대하여 정자계 해석을 수행한다. 이때의 자속밀도데이터는 회전자의 슬리브 표면에서 계산되며 공간 고조파 정보와 시간고조파 정보를 동시에 갖는 2차원 행렬형태를 갖는다. 그림 4와 그림 5는 Halbach 배열을 갖는 기기와 수평방향 배열된 회전자를 갖는 기기에서 공간 고조파와 시간 고조파의 산출을 위해 계산된 슬리브 표면 자속밀도의 수직성분을 나타낸다. 그림 4와 그림 5는 각각 15개의 회전자 위치를 동시에 표현하므로 확대되어 표현된 그림에서와 같이 15개의 그래프가 겹쳐진 형태로 나타내진다. 그리고, 이 데이터는 MATLAB이 지원하는 2차원 푸리에 변환을 이용하여 자계의 공간 고조파와 시간 고조파 스펙트럼 형태로 나타낼 수 있다. 표 1과 표 2는 각 해석 모델에 대한 자속밀도의 스펙트럼을 수치화하여 나타낸다.

3.3 자계 특성식

투자를 μ , 도전을 σ 를 갖는 모든 영역에 대해 만족하는 일반화된 지배방정식은 식(1)로 정리된다.

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = j\omega\mu\sigma A_z \quad (1)$$

여기서, A_z 는 자기 벡터퍼텐셜이고, 식(1)로 표현되는 미분방정식의 일반해는 식(2)으로 표현될 수 있다.

$$A_{zi} = (C_i e^{\gamma y} + D_i e^{-\gamma y}) e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (2)$$

따라서, 각 영역에서의 자속밀도 특성식은 식(3), 식(4)와 같다.

$$B_{zi} = \frac{\partial A_{zi}}{\partial y} = \gamma(C_i e^{\gamma y} - D_i e^{-\gamma y}) e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (3)$$

$$B_{yi} = -\frac{\partial A_{zi}}{\partial x} = -j\beta(C_i e^{\gamma y} + D_i e^{-\gamma y}) e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (4)$$

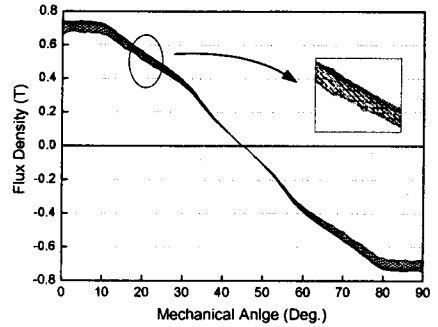


그림 4. Halbach 배열 기기의 자속분포

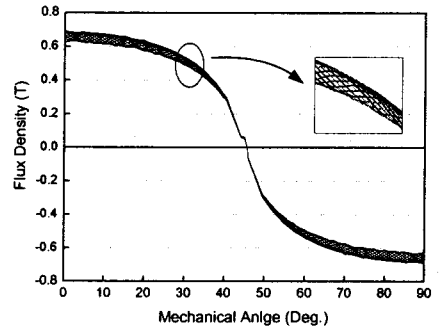


그림 5. 수평방향배열 기기의 자속분포

표 1. Halbach 배열을 갖는 기기의 자계 고조파

| 공간 고조파 | 시간 고조파 | | |
|--------|----------|----------|----------|
| | 0 | 12 | 24 |
| 1 | 0.727939 | 0.000058 | 0.000144 |
| 3 | 0.001209 | 0.000154 | 0.000151 |
| 11 | 0.000259 | 0.016731 | 0.000070 |
| 13 | 0.000304 | 0.016040 | 0.000078 |
| 23 | 0.000050 | 0.000245 | 0.004791 |
| 25 | 0.001155 | 0.000208 | 0.003922 |

표 2. Parallel 자화된 영구자석 기기의 자계 고조파

| 공간 고조파 | 시간 고조파 | | |
|--------|----------|----------|----------|
| | 0 | 12 | 24 |
| 1 | 0.762456 | 0.000073 | 0.000117 |
| 3 | 0.133681 | 0.000207 | 0.000126 |
| 5 | 0.050400 | 0.000505 | 0.000039 |
| 7 | 0.023075 | 0.001208 | 0.000082 |
| 9 | 0.011434 | 0.003730 | 0.000039 |
| 11 | 0.005485 | 0.016166 | 0.000110 |
| 13 | 0.002422 | 0.018064 | 0.000141 |
| 23 | 0.002471 | 0.000103 | 0.004178 |
| 25 | 0.002430 | 0.000327 | 0.004916 |

여기서, $\gamma = \sqrt{\beta^2 + j\omega\mu\sigma}$ 로 정의되고, β 는 π/τ 로 정의된다. 그리고, C_i 와 D_i 는 각 영역에서의 경계조건에 의하여 계산되어 진다.

표 3. Halbach 배열을 갖는 기기의 회전자 손실밀도

| 공간 고조파 | 시간 고조파 | | |
|-----------------------|---|----------|--------|
| | 0 | 12 | 24 |
| 1 | | 0.1513 | 1.3157 |
| 3 | | 0.6465 | 1.6576 |
| 11 | | 152.3144 | 0.0098 |
| 13 | | 84.0196 | 0.0073 |
| 23 | | 0.0035 | 4.9367 |
| 25 | | 0.0020 | 2.6677 |
| Total Loss Density | 237.5(12th)+10.8(24th) = 248.3 W/m ² | | |

표 4. 수평방향 자화 영구자석 기기의 회전자 손실밀도

| Space Harmonic | Time Harmonic | | |
|-------------------|---------------|----------|--------|
| | 0 | 12 | 24 |
| 1 | | 0.2412 | 0.8686 |
| 3 | | 1.1681 | 1.1542 |
| 5 | | 1.5834 | 0.0332 |
| 7 | | 3.1989 | 0.0539 |
| 9 | | 14.0281 | 0.0057 |
| 11 | | 142.2009 | 0.0243 |
| 13 | | 106.5613 | 0.0240 |
| 23 | | 0.0041 | 3.7544 |
| 25 | | 0.0048 | 4.0456 |

4. 회전자 손실의 계산

손실을 계산하는데 있어 포인팅 벡터를 이용하게 되면 각 영역에 유입되는 총에너지와 유출되는 총에너지를 쉽게 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 직접적으로 회전자 손실의 분포를 알아낼 수는 없으므로 각 영역 표면에서의 에너지 유출입을 계산하여 산술적으로 각 영역이 갖는 손실의 양을 계산할 수 있다.

포인팅 벡터 P 는 구하고자하는 영역표면에서의 전계의 세기 성분과 자계의 세기 성분으로 구할 수 있으며, 정상상태 정회과 자계에서의 포인팅 벡터는 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} \text{Rea}(E_z \times H_r^*) \quad (5)$$

여기서, E_z 는 축방향 성분을 갖는 전계의 세기, H_r^* 는 자계의 접선성분 세기의 공액복소수이다. E_z 와 H_r^* 는 자속밀도 특성식 B_1, B_2 에 의해 계산이 가능하다. 그리고, 공극에서 슬리브, 슬리브에서 영구자석, 영구자석에서 허브로 전달되는 손실을 각각 P_{III}, P_{II} 그리고, P_I 라 가정하면 슬리브, 영구자석, 축에서 발생하는 손실은 각각 식(6)에 의하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{sleeve} &= P_{III} - P_{II} \\ P_{magnet} &= P_{II} - P_I \\ P_{shaft} &= P_I \end{aligned} \quad (6)$$

표 3과 표 4는 Halbach 배열의 회전자를 갖는 기기와 수평방향 자화된 영구자석 기기의 무부하 상태에서 회전자 와전류 손실 밀도를 고조파의 차수에 따라 수치적으로 보여준다. 표를 통해 회전자 손실의 주 원인이 되는

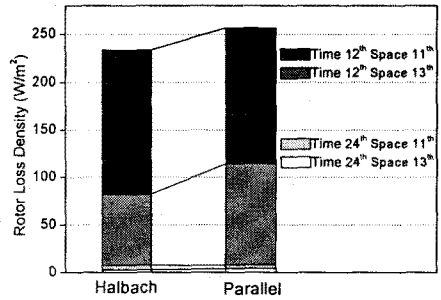


그림 6. Halbach 배열과 평행방향 자화배열을 갖는 기기의 회전자 손실의 비교

고조파 차수는 시간고조파 12차에서 공간고조파 11차와 13차가 됨을 알 수 있고, 가장 손실이 많이 발생하는 부분은 도전성 슬리브 영역과 영구자석 영역이 됨을 예측할 수 있다.

그림 6은 각 고조파 차수에 따른 회전자 와전류 손실 밀도를 각 해석모델에 대하여 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 Halbach 배열을 갖는 기기에서 회전자 손실은 수평방향 자화된 영구자석 기기의 약 88.4% 정도 낮게 발생함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 전자장 해석법과 유한요소법의 상호보완된 기법을 이용하여 Halbach 배열 영구자석 및 평행방향 자화된 영구자석 회전자를 갖는 영구자석 동기 전동기의 회전자 손실을 계산하였다. 해석 결과에 의해 Halbach 배열 회전자를 갖는 기기가 평행방향 자화된 회전자를 갖는 영구자석 기기에 비해 손실특성이 우수한 것을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Mabu Sharkh, S, Harris, M.R., Irenji, N.T., " Calculation of rotor eddy-current loss in high-speed PM alternators", *Electrical Machines and Drives*, 1997 Eighth International Conference on(Conf. Publ. No. 444) ,1-3 Sep 1997 pp: 170 -174
- [2] N. Boules, "Impact of slot harmonics on losses of high-speed permanent magnet machines with a magnet retaining ring", *Electric Machines and Electromechanics*, 6, 527-539, 1981
- [3] K.Ng, Z.Q.Zhu, D.Howe, "Open-Circuit Field Distribution in a Brushless Motor with Diametrically Magnetised PM Rotor, Accounting for Slotting and Eddy Current Effects", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.32, No.5, September 1996
- [4] K. Atallah, D. Howe, P.H. Melloor and D.A. Stone "Rotor Loss in Permanent Magnet Brushless AC Machines" *IEEE Trans. on Industry Application.* vol.31, no.6, pp.60-62, 1999
- [5] 장석명, 양현섭, 정상섭, 류동완, 최상규, 함상용, "고속용 영구자석 모터의 손실 특성" 대한전기학회 추계학술대회 1999, A 권 pp.64-66.