

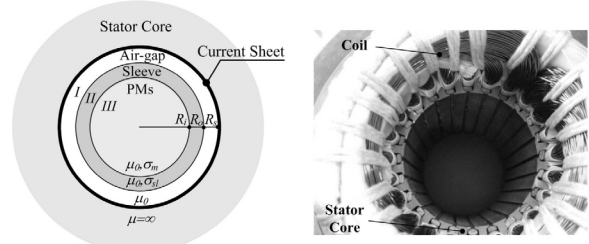
전압 구동 방법에 따른 터보 압축기용 초고속 영구자석 동기 전동기의 회전자 손실 해석

장석영*, 김현규*, 고경진*, 이성호**, 홍영희***
 충남대학교*, 한국생산기술연구원**, 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원***

Analysis on Eddy Current Losses of High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor for Turbo Compressor according to Voltage Source Driving

Seok-Myeong Jang*, Hyun-Kyu Kim*, Kyoung-Jin Ko*, Sung-Ho Lee**, Young-Hee Hong***
 Chungnam University*, Korea Institute of Industrial Technology**, KHNP Nuclear Engineering & Technology Institute***

Abstract - This paper deals with the analysis on eddy current losses of high speed permanent magnet synchronous motor (PMSM) for turbo compressor according to voltage source driving. This paper presents analytical procedures for calculation of the eddy current losses using Poynting theorem. On the basis of the magnetic vector potential and a two-dimensional (2-D) cylindrical coordinate system, this paper derived analytical solutions of the eddy current losses using phase current analysis. The eddy current losses of each harmonic obtained by fast Fourier transform (FFT) analysis of phase current are with results obtained from finite-element method (FEM).



〈그림 1〉 회전자 손실 예측을 위한 해석적 모델과 제작 모델

1. 서 론

최근 산업계에서는 베어링 기술의 향상과 효율 향상 및 유지보수의 편리성으로 수만 rpm 이상의 운전 범위를 가지는 초고속 전동기를 적용한 응용제품이 개발되어 상용화 되고 있다. 대표적인 예로 PMSM를 적용한 마이크로 터빈 발전기, 터보 블러워, 연료전지용 공기 압축기, 고속 가공기용 전동기 등이 있다.[1] 초고속 전동기는 동일 출력 용량의 범용 저속 전동기에 비해 자기회로의 체적이 속도에 반비례하여 작아지므로 초소형, 경량화가 가능하다는 장점을 갖고 있는 반면, 초고속 회전에 따른 회전자의 기계적인 스트레스나 초고주파 입력전원에 의한 절손이 크게 발생하는 단점을 가지고 있다. 그래서 현재 국내외에서도 손실 연구가 기계적인 스트레스와 더불어 매우 활발히 진행되고 있다.[2][3]

일반적으로 전기기에 발생한 열원은 전기적 손실에 의한 것으로 동손과 철손으로 나눌 수 있고 기계적 손실로는 마찰손과 풍손으로 분류할 수 있다. 전기기에 있어서 손실부분은 운전조건이나 효율 등을 결정하는 매우 중요한 요소이다. 따라서 손실을 정확하게 예측하고 초기 설계파라미터에 설계해야 한다.

특히 본 논문에서는 전압구동에 따른 터보 압축기용 영구자석 동기 전동기의 회전자 손실을 해석을 다루고자 한다. 회전자의 손실에 대한 연구는 Zhu, Irenji 등 많은 연구자들에 의해 회전자 손실 예측 기법을 개발하였고 본 논문에서는 Zhu의 해석기법을 이용하였다.[4] 그림 1의 PMSM 모델은 Zhu의 해석 기법을 통해 회전자 손실을 예측하였고 전압 구동 방법에 따른 손실 특성을 비교하였다.

2. 초고속 PMSM의 회전자 손실

2.1 회전자 손실의 해석 모델 및 가정

그림 1(a)는 그림 1(b)의 제작된 초고속 PMSM 구조에 대하여 full-ring 영구자석을 가지고 있으며 회전자 손실 예측을 위한 해석적 모델이다. 그림 2의 로마문자 I, II, III 는 공기 영역, 슬리브 영역, full-ring 영구자석 영역을 보여준다. 회전자인 full-ring 영구자석과 슬리브에서 유기한 회전자 손실을 계산하기 위해서는 그림 1에 제시된 2차원적인 극 좌표계 모델에 대하여 시변자계 자속밀도를 계산하기에 앞서 다음과 같은 가정을 한다.

- a) 고정자 권선은 $r = R_s$ 에서 분포되고 면전류 등가모델로 표현된다.
- b) 해석 모델에서 full-ring 영구자석과 슬리브의 비유전율은 1이다.
- c) 전기적 도전성을 가지고 있는 것은 full-ring 영구자석 영역과 슬리브 영역이고 각각의 도전율은 σ_m, σ_{sl} 이다.

2.2 시변자계분포 특성식

회전자 손실 예측을 위한 시변자계 분포 특성식을 구하기 위한 각 영역의 지배방정식을 유도할 때 영구자석과 슬리브영역의 투자율이 공기와 같은 투자율을 가졌다고 가정하기 때문에 슬리브와 영구자석영역을 포함한 공기영역에 대한 지배방정식만이 세워진다.

그러나 시변자계 해석을 할 때는 영구자석과 슬리브의 도전율에 의해 와전류가 발생하고 이 와전류에 의한 반작용 자계를 고려해야 하기 때문에, 각 영역에 대한 지배방정식을 세워야 한다. 그림 2에서 와전류와 투자율을 고려하여 각 영역의 지배방정식을 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I \text{ 영역} : & \frac{\partial^2}{\partial r^2} A_{zn}^I + \frac{\partial}{\partial r} A_{zn}^I - \frac{m^2}{r^2} A_{zn}^I = 0 \\
 II \text{ 영역} : & \frac{\partial^2}{\partial r^2} A_{zn}^{II} + \frac{\partial}{\partial r} A_{zn}^{II} - \left(\frac{m^2}{r^2} + \rho_{sl}^2 \right) A_{zn}^{II} = 0 \\
 III \text{ 영역} : & \frac{\partial^2}{\partial r^2} A_{zn}^{III} + \frac{\partial}{\partial r} A_{zn}^{III} - \left(\frac{m^2}{r^2} + \rho_m^2 \right) A_{zn}^{III} = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $\rho_{sl}^2 = j\omega p(n+m)\omega_r \sigma_{sl}$, $\rho_m^2 = j\omega p(n+m)\omega_r \sigma_m$ 이고 p, n, m, ω_r 은 극수, 시간고조파 차수, 공간고조파 차수, 회전속도를 나타낸다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 I 영역은 Cauchy-Euler 방정식의 형태이고 II, III 영역은 Bessel 방정식의 형태이다. 또한 자기 벡터 포텐셜 A는 회전자의 기하학 구조로 인해 z-방향성분만 가지고 있다고 가정한다.

자기 벡터 포텐셜의 정의 $\nabla \times A = B$ 에 식 (1)의 일반해를 대입하면 각 영역의 반경방향 성분 및 원주방향 성분의 자속 밀도를 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 B_{rn}^I &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{j m}{r} [A_n^I r^{np} + B_n^I r^{-np}] e^{(-j\omega[n+m]\omega_r t + n\theta)} \\
 B_{rn}^{II} &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} -m p [A_n^{II} r^{(np-1)} - B_n^{II} r^{-(np+1)}] e^{(-j\omega[n+m]\omega_r t + n\theta)} \\
 B_{rn}^{III} &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{j m p}{r} [A_n^{III} I_{np}(\rho_{sl} r) + B_n^{III} K_{np}(\rho_{sl} r)] e^{(-j\omega[n+m]\omega_r t + n\theta)} \\
 B_{\theta n}^{II} &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} [A_n^{II} \left(\frac{m p}{r} I_{np}(\rho_{sl} r) - \rho_{sl} I_{np-1}(\rho_{sl} r) \right) \\
 &+ B_n^{II} \left(\frac{m p}{r} K_{np}(\rho_{sl} r) + \rho_{sl} K_{np-1}(\rho_{sl} r) \right)] e^{(-j\omega[n+m]\omega_r t + n\theta)} \\
 B_{rn}^{III} &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{j m p}{r} [A_n^{III} I_{mp}(\rho_m r) + B_n^{III} K_{mp}(\rho_m r)] e^{(-j\omega[n+m]\omega_r t + n\theta)} \\
 B_{\theta n}^{III} &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} [A_n^{III} \left(\frac{m p}{r} I_{mp}(\rho_m r) - \rho_m I_{mp-1}(\rho_m r) \right) \\
 &+ B_n^{III} \left(\frac{m p}{r} K_{mp}(\rho_m r) + \rho_m K_{mp-1}(\rho_m r) \right)] e^{(-j\omega[n+m]\omega_r t + n\theta)}
 \end{aligned} \tag{2}$$

2.3 경계 조건

식 (3)의 경계조건을 각 영역의 자속 밀도에 대입하면 식 (2)의 일반해의 미정 계수 $A_n^I \sim B_n^{III}$ 을 구할 수 있다.

$$a) \ r = R_s \quad B_{rn}^{III} = B_{rn}^{II} \quad B_{\theta n}^{III} = B_{\theta n}^{II}$$

$$\begin{aligned}
 \text{b) } r = R_o & \quad B_{rn}^{II} = B_{rn}^I \quad B_{\theta n}^{II} = B_{\theta n}^I \\
 \text{c) } r = R_s & \quad B_{\theta n}^I = -\mu_0 J_a \\
 \text{d) } r \rightarrow 0 & \quad A_n^{IV} = 0
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

2.4 포인팅 정리를 이용한 회전자 손실 계산

영구자석과 슬리브에서 발생하는 와전류 손실은 식 (3)로 주어지는 포인팅정리에 의해 계산되어진다.

$$P_{loss} = \frac{1}{2} \oint_S \text{Re}(E \times H^*) dS = \frac{1}{2\sigma} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \text{Re}(J_z H_\theta^*) l_a r d\theta
 \tag{4}$$

여기서 표면 S는 도체 영역을 경계로 하고 l_a 는 전동기의 축방향 길이이며 J_z 는 축 방향으로 유도된 와전류 밀도를 나타내고 H_θ 는 반경 r 인 도체영역의 표면에서 자계의 수평 성분을 나타낸다. θ_1 과 θ_2 는 도체영역에 의해 구분되어지는 각을 정의 하는데 영구자석에서 손실과 슬리브에서 손실을 구할 때는 2π 가 된다. 한편 식 (4)에 의해 영구자석과 슬리브 영역에서의 손실 특성식은 식 (5)로 주어진다.

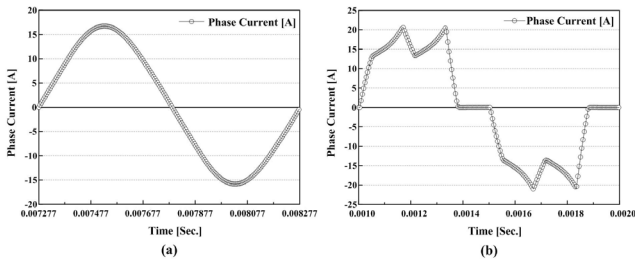
$$\begin{aligned}
 P_{II} &= \frac{2\pi l_a r_{sl}}{2(\sigma_{sl} + \sigma_m)} \text{Re}[J_{II} B_{\theta n}^{II*}] \\
 P_{III} &= \frac{2\pi l_a r_m}{2\sigma_m} \text{Re}[J_{III} B_{\theta n}^{III*}]
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

3. 전압 구동 방법에 따른 회전자 손실 해석 결과 비교

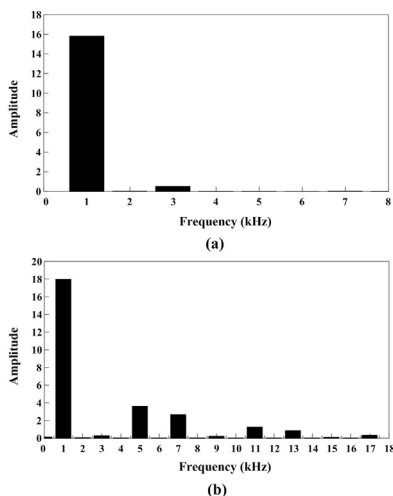
3.1 상전류 파형과 FFT분석

그림 2 (a)와 (b)는 정현과 전압구동과 구형과 전압구동에 따른 초고속 동기 전동기의 상전류 파형이다.

그림 3은 그림 2의 상전류 파형에 대한 FFT분석 결과를 보여준다. 그림 3 (a)는 정현과 전압구동으로 상전류 파형의 고조파 성분은 1,3고조파 성분을 가지고 있다. 주 고조파 성분은 1고조파 성분임을 보여준다. 그림 3 (b)는 구형과 전압구동으로 1,3,5,7,9,11,13,17 고조파 성분을 가지고 있고 주 고조파 성분은 1,5,7,11,13 고조파 성분임을 보여준다.



〈그림 2〉 (a) 정현과 전압구동과 (b) 구형과 전압구동의 상전류 파형

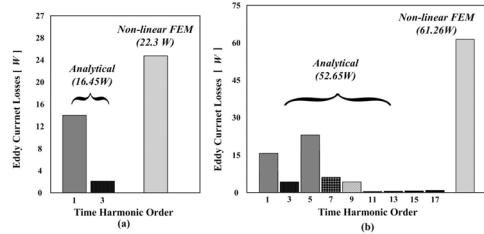


〈그림 3〉 (a) 그림 2 (a)와 (b) 그림 2 (b)의 상전류 파형에 대한 FFT 분석 결과

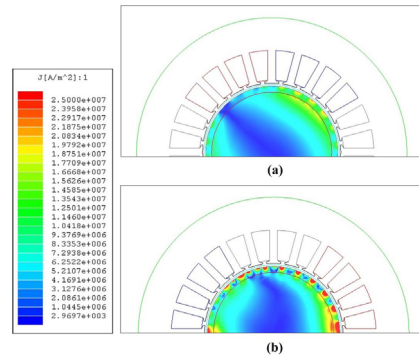
3.2 전압 구동에 따른 회전자 손실 비교와 와전류 분포

그림 4는 정현과 전압구동과 구형과 전압구동일 때의 고조파 성분에 따른 회전자 손실을 나타낸 것이다. 또한 본 논문의 해석적 기법과 유한요소 해석 결과를 비교하여 제시하였다. 그림 5 (b)에서 알 수 있듯이 5고조파 성분이 1고조파 성분보다 적지만 회전자 손실에서는 더 많은 손실을 내는 것을 볼 수 있다. 또한 정현과 전압구동 보다 구형과 전압구동이 더 많은 손실이 있다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 회전자 해석기법의 타당성을 검증하기 위한 유한요소 해석을 이용한 와전류 분포 특성을 보여준다. 그림 4의 결과와 마찬가지로 정현과 전압구동보다 구형과 전압구동일 때 초고속 전동기의 와전류 분포가 더 큰 것을 확인할 수 있다.



〈그림 4〉 (a)정현과 전압구동 (b) 구형과 전압구동일 때의 고조파 성분에 따른 회전자 손실 및 유한요소해석결과와의 비교



〈그림 5〉 (a)정현과 전압구동과 (b) 구형과 전압구동일 때의 와전류 분포 특성

4. 결 론

본 논문은 전압 구동 방법에 따른 터보압축기용 초고속 영구자석 동기전동기의 회전자 손실 해석을 다루었다. 해석은 2-D 극좌표계와 자기 벡터 포텐셜에 의해 도출된 슬리브와 영구자석내의 자속밀도로부터 시행되어졌다. 또한 본 논문은 전압 구동에 따른 회전자 손실 해석과 유한요소해석결과와 비교 제시하여 타당성을 검증하였다. 초고속기 및 고주파수에의 회전자 손실을 최소화하고 효율을 최대화하기 위한 시스템에 본 해석 기법을 적용할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김종무, 최정원, 이석규, “반복 적응 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 초고속 영구자석형 동기 전동기의 전영역 센서리스 제어”, 전기학회 논문지, 58권 1호, pp. 69-76, 2009.
- [2] 장석명, 조한욱, 최장영, 고경진, 최상규, “고속 영구자석형 동기전동기 설계 I : 정특성, 회로파라미터 기계적 특성 고찰”, 대한전기학회 제38회 하계 학술대회, pp.136-137, 2007.
- [3] Seok-Myeong Jang, Jang-Young Choi, Kyoung-Jin Ko, Il-Jung Kim, Ho-Kyung Sung, “Performance analysis of permanent magnet machines considering magnetic losses based on analytical parameter estimation”, 11th International Conference on Electrical Machines and Systems, pp.3152-3157, 2008.
- [4] Z. Q. Zhu, K.Ng, N.Schofield and D. Howe, “Analytical prediction of rotor eddy current loss in brushless machines equipped with surfaced-mounted permanent magnets, Part II : accounting for eddy current reaction field”, fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, vol.2, pp. 810-813, 2001.