

영구자석 고속모터의 고조파 분석을 통한 회전자 손실해석

장석명, 조한욱, 이성호, 양현섭\*, 정연호\*  
 충남대학교, (주)삼성테크윈, 한국전기연구원\*

Calculation of Rotor Loss according to analysis of Harmonics for Permanent Magnet High Speed Motor

S. M. Jang, H. W. Cho, S. H. Lee, H. S. Yang\*, Y. H. Jeong\*  
 Chungnam Nat'l Univ., Samsung Techwin, KERI\*

**Abstract** - High speed PM machines are being developed as motor/generators for gas-turbine generator sets in smaller power sizes, and as motors for number of applications including gas compressors, machine tools and turbo molecular pumps. Due to the high peripheral speed of the rotor and the relatively high conductivity of the magnets used, rotor eddy current loss can be substantial. This paper deals with the calculation of rotor eddy-current losses in permanent magnet(PM) high speed motor using the analysis of harmonics.

1. 서 론

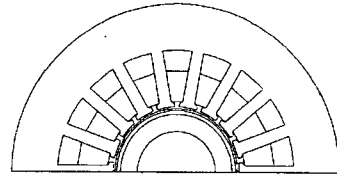
고속용 브러시리스 영구자석 모터는 고효율, 고출력 밀도, 그리고 소형 경량이기 때문에 항공기, 잠수함, 선박, 자동차, 인공위성과 같은 우주항공분야등에 이용되고 있으며, 또한 가스터빈 엔진, 터보기기와 같은 고속 시스템과 결합하여 분산형 발전시스템, 터보 압축기 등에 적용되고 있다. 따라서, 현재 국내외적으로 고속모터에 대한 연구, 개발이 활발히 이루어지고 있다[1]. 일반적으로 고속모터는 초고속 운전에 따른 기계적 스트레스에 강인하도록 회전자의 구조와 베어링의 성능이 초고속에 적합하도록 자기회로가 간단하고, 기계적으로 단단해야 하고, 고속 운전시의 진동을 고려하여 토코리플이 작게 설계되어야 한다. 또한, 고속용 전동기의 설계에 있어서 고려되어야 하는 중요한 요소는 초고속 운전에 따른 발생손실에 의한 온도상승의 최소화이다. 온도상승은 일반적으로 철손, 동손, 기계손에 의해 존재하게 되는데, 특히, 도전을 가진 철심이나 영구자석 구속용 슬리브에서는 공극 퍼미언스 변화에 따른 자속 리플이 발생하여 각각 주파수와 주파수의 제곱에 비례하는 히스테리시스손과 와전류 손이 발생하여 초고주파로 구동되는 고속 기기의 성능을 저하시키는 주원인이 된다[2][3].

본 논문에서는 설계된 5kW 40,000 rpm의 영구자석형 고속모터에서 회전자에서 발생하는 고조파에 의한 와전류 손실에 대하여 다룬다. 유한요소해석과 다중층법에 의해 구해진 자속밀도에 대하여 고정자 슬롯팅에 의한 고조파를 분석하고, 영구자석에 의한 회전자 무부하 손실과 고정자 기자력에 의한 회전자 손실을 각각 구하였다.

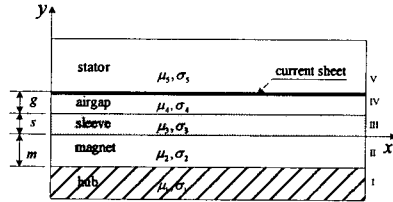
2. 고조파 분석 및 손실 계산

2.1 해석모델과 지배방정식

원통형태를 갖는 그림1(a)에 제시된 영구자석형 고속모터에 대하여 각 영역에 대한 자계 및 손실을 해석하기 위하여 그림1(b)와 같은 5 영역(고정자, 공극, 슬리브, 영구자석, 허브) 다중층 해석모델을 제시하였다. 이때 영구



(a) 영구자석형 고속모터 단면



(b) 5영역 다중층 모델

그림 1. 영구자석형 고속 모터의 해석 모델

자석과 허브는 선형재료이며 고정자는 적층되어 도전을 이 영(零)이라 가정한다.

해석하고자 하는 계의 지배방정식은 식(1)의 포아송 방정식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 A = j\omega\mu\sigma A \tag{1}$$

식(1)과 같은 미분방정식을 각 영역에 대하여 자속밀도의 수평성분과 수직성분을 각각 풀어 나타내면 식(2), (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y} = \gamma (Le^{-\gamma y} - Me^{-\gamma y}) e^{j(\omega t + \frac{2\pi}{q} x)} \tag{2}$$

$$B_y = -\frac{\partial A}{\partial x} = -j \frac{2\pi}{q} (Le^{-\gamma y} + Me^{-\gamma y}) e^{j(\omega t + \frac{2\pi}{q} x)} \tag{3}$$

여기서  $\gamma$ 는 식(4)로 정의된다.

$$\gamma^2 = \left(\frac{2\pi}{q}\right)^2 + j\omega\mu\sigma \tag{4}$$

식(2), 식(3)으로 표현되는 자속밀도에서 계수들을 찾기 위해 다중층법을 이용한 해석법을 적용하면 각 영역에 대한 계수들은 식(5)와 같은 Matrix 방정식에 의해 구해질 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{Ax} &= \mathbf{U} \\ \mathbf{x} &= [M_1, L_2, M_2, L_3, M_3, L_4, M_4, L_5]^T \\ \mathbf{U} &= [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, K_m]^T \end{aligned} \tag{5}$$

식(5)의 행렬식을 이용하여 각 영역에 대한 계수 Matrix 인  $x$ 를 구할 수 있다. 여기서,  $A$ 는  $8 \times 8$  Matrix이고, 공간과 시간적 분포를 갖는 등가 면전류 밀도는 식(6)으로 표현된다.

$$K = K_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{q} x) = \text{Real}(K_m e^{j\frac{2\pi}{q} x} e^{j\omega t}) \quad (6)$$

여기서,  $\omega$ 는 각속도로  $2\pi kf$ 로 다시 쓰여질 수 있으며,  $q$ 는 전류밀도의 1과장의 길이,  $K$ 는 면전류 밀도 ( $A/m$ )이다.

## 2.2 고조파 분석

### 2.2.1 영구자석 자계에 의한 고조파

자속밀도의 고조파 분석은 정자계 유한요소 해석법에 의해 수집된 데이터를 2-D FFT 분석을 통해 계산하였으며 데이터는 1 슬롯피치(20 deg.)를 30등분한 각각의 경우를 해석을 구하였다. 영구자석의 표면에서 측정된 자속밀도의 수직성분의 해와 2차원 배열을 갖는 데이터 Matrix는 이산 푸리에 변환을 이용하여 각 고조파에 대한 자속밀도의 크기로 재구성 할 수 있으며 2 변수를 갖는 이산 푸리에 변환은 식(7)과 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(xu/M + vy/N)} \quad (7)$$

( $u=0, 1, 2, \dots, M-1, \nu=0, 2, \dots, N-1$ )

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi(xu/M + vy/N)} \quad (8)$$

( $x=0, 1, 2, \dots, M-1, y=0, 2, \dots, N-1$ )

그림 2는 임의의 시간  $t=0$ 일 때 영구자석에 의한 자속밀도를 나타내며, 그림 3은 30개 회전자 위치에 대한 자속밀도 파형을 동시에 나타낸 그림이다. 그림 1에서 제시된 바와 같이 해석모델은 매극당 슬롯수가 9이다. 그러므로 슬롯팅에 의한 퍼미언스 고조파는 18고조파를 기본으로 갖고 18, 36, 54, ...으로 증가하며, 공간고조파는 17, 19 그리고, 35, 37 차로 증가한다. 이러한 고조파들은 회전자 기본파 성분과 공극 퍼미언스 고조파 성분과의 상호작용에 의해 발생한다. 표 1은 무부하시 자속밀도의 고조파 분석 결과를 나타낸다. 고조파의 크게 나타나는 영역은 시간차수 18차에서는 17차와 19차, 그리고 시간차수 36차에서는 35차와 37차가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

### 2.2.2 고정자 기자력에 의한 고조파

해석모델은 3상 2층 분포권으로 권선이 시행되었고, 정현파 입력전류를 고려하여 해석하였다. 그림 4는 3상 입력전류를 인가하였을 때, 임의의 시간  $t=0$ 에서의 자속밀도를 나타내며, 그림 5는 영구자석에 의한 고조파 분석과 동일한 방법으로 시행한 회전자 위치에 따른 자속밀도를 나타낸다. 표 2는 전기자 기자력에 의한 고조파 분석 결과를 나타낸다. 고조파의 고조파의 크기는 시간고조파 18차에서는 공간고조파 17차와 19차, 그리고 시간차수 36차에서는 공간고조파 35차와 37차가 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 그 밖의 고조파도 발생하여 회전자 손실에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

## 2.3 손실의 계산

각 영역에서 정현적 특성을 갖는 자계에 대한 손실의 분포는 각 영역의 표면에서 전력전달을 관계짓는 포인팅 벡터  $P$ 에 의해 계산될 수 있으며 식(9)로 나타내어 진다.

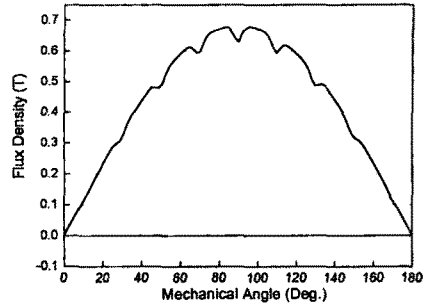


그림 2. 영구자석에 의한 자속밀도

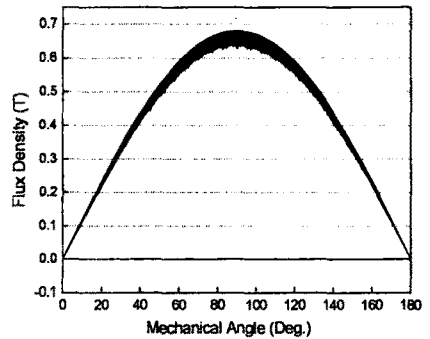


그림 3. 영구자석에 의한 자속밀도

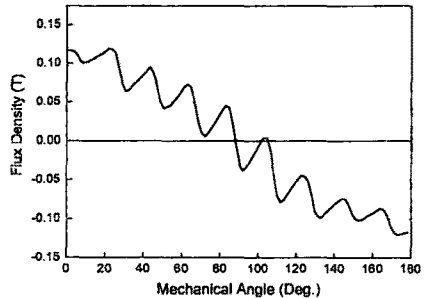


그림 4. 고정자 기자력에 의한 자속밀도

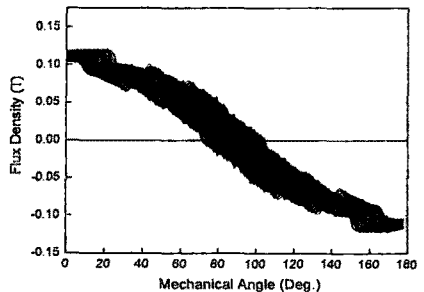


그림 5. 고정자 기자력에 의한 자속밀도

표 1. 영구자석에 의한 고조파 분석 결과

Space	Time order		
	0차	18차	36차
1차	0.669589	0.000011-	0.000013-
		0.000010+	0.000005+
5차	0.000071	0.000017-	0.000011-
		0.000011+	0.000003+
13차	0.000028	0.000150-	0.000035-
		0.000005+	0.000033+
17차	0.000007	0.009952-	0.000014-
		0.000017+	0.000006+
19차	0.000011	0.010751-	0.000014-
		0.000004+	0.000299+
35차	0.000003	0.000009-	0.005710-
		0.000170+	0.000004+
37차	0.000021	0.000005-	0.005447-
		0.000148+	0.000008+

표 2. 전기자 기자력에 의한 고조파 분석 결과

Space	Time order		
	0차	18차	36차
1차	0.107793		
3차			
5차	0.004570	0.002381-	
7차	0.001898	0.001093-	
9차			
13차	0.001276	0.002456-	
17차		0.019159-	
19차		0.010715-	
35차		0.000002-	0.005134-
37차		0.000034-	0.001559-

※ 빈칸은 0.005보다 작은 값이다.

$$P = E \times H$$

$$P = \frac{1}{2} \text{Real}(E \times H^*) \quad (9)$$

여기서,  $E$ 는  $z$ -방향(축방향) 전계의 세기를 나타내고,  $H^*$ 는 자계의 세기의 수평성분이다. 공극에서 슬리브, 슬리브에서 영구자석, 영구자석에서 허브로 전달되는 손실을 각각  $P_{III}$ ,  $P_{II}$  그리고,  $P_I$  라 가정하면 슬리브, 영구자석, 허브에서 발생하는 손실은 각각 식(10)과 같다[1].

$$P_{sleeve} = P_{III} - P_{II}$$

$$P_{magnet} = P_{II} - P_I \quad (10)$$

$$P_{hub} = P_I$$

표 3과 표 4는 식(7)과 식(8)에 의해 계산된 각 고조파 항에 대한 영구자석과 전기자 기자력에 의한 손실을 각각 나타낸다. 표 3에서는 영구자석에 의한 손실이 회전자 전체 무부하 손실의 약 95%를 차지하고 있으며, 시간고조파 18차의 공간고조파 17차와 19차 고조파가 회전자 전체 무부하 손실의 약 82%를 차지하고있는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 영구자석에 의한 무부하 손실은 정격출력(5kW)에서 약 1.22%정도의 손실을 차지한다. 그리고 표 2에서는 전기자 기자력에 의한 손실을 나타낸다. 여기서 회전자 손실은 영구자석에 의한 손실이 약 96%를 차지하고 있고, 시간차수 18차의 공간고조파 17차와 19차 고조파가 전기자 기자력에 의한 손실의 약 98%를 차지하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 전기자 기자력에 의한 손실은 정격출력에서 약 0.96% 정도의 손실을 차지한다.

표 3. 영구자석에 의한 손실

Space	Time order		
	0차	18차	36차
1차	1		
5차			
13차			
17차		32	
19차		18	
35차			6
37차			4
합계	61W = 57W(영구자석) + 4W(허브)		

표 4. 전기자 기자력에 의한 손실

Space	Time order		
	0차	18차	36차
1차			
3차			
5차			
7차			
9차			
13차			
17차		31	
19차		15	
35차			1
37차			1
합계	48W = 46W(영구자석) + 2W(허브)		

※ 빈칸은 0.5W 보다 작은 값이다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 고속용 영구자석 모터에서 회전자의 무부하 손실과 고정자 기자력에 의한 손실을 유한요소해석법과 다중중해석법에 의한 자속밀도의 고조파의 분석을 통해 계산하였다. 본 연구를 통해 각 시간고조파 및 공간고조파 차수에 따른 영구자석과 허브에서의 손실을 직접 확인할 수 있었으며, 향후 유한요소해석에 의한 검증 작업과 부하 손실특성 및 인버터를 고려한 회전자 손실의 계산으로 그 범위를 확장하고자 한다.

### [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, A권 pp.64-66.