

영구자석 기기의 철손 예측을 위한 자계 거동 해석

장석명¹, 고경진¹, 최장영¹, 박지훈¹, 이성호²
 충남대학교¹, 한국생산기술연구원²

Magnetic Field Distribution Analysis for Core Loss Estimation of Permanent Magnet Machine

Seok-Myeong Jang¹, Kyoung-Jin Ko¹, Jang-Young Choi¹, Ji-Hoon Park¹, Sung-Ho Lee²
 Chungnam National University¹, Korea Institute of Industrial Technology²

Abstract - Nowadays more attention is paid to the developing high efficiency electrical machines for energy saving and protection of natural resources. In general, the electromagnetic losses appearing in electrical machines are widely classified into copper loss, core loss and rotor loss. Particularly, in permanent magnet (PM) machines, core loss forms a larger portion of the total losses than in another machine. So, satisfactory prediction of core loss at the design or analysis stage of PM machines is essential to active high efficiency and high performance. This paper deals with analysis of magnetic field distribution due to geometry of stator core for magnetic core loss calculation of multi-pole PM synchronous machine.

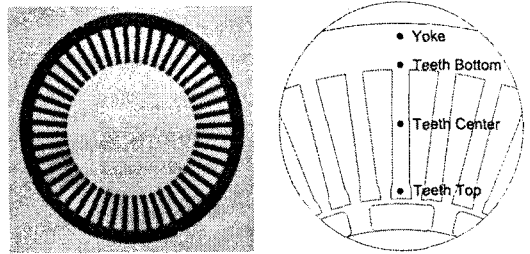


그림 1. 실제 고정자 적층 모델과 해석 모델

1. 서 론

영구자석 기기에서의 손실은 대부분 동손, 철손, 회전 자손으로 구분되어지며 이 중 동손과 철손이 손실의 대부분을 차지한다. 동손의 경우 직류 및 교류 저항의 정확한 계산이 가능하여 기기의 설계 시에 이를 고려한 설계가 가능하나 철손은 [1]-[6]에서와 같이 그 연구가 지속적으로 진행되고 있음에도 불구하고 아직도 그 정확한 예측이 힘든 실정이다. 대부분 Steinmetz 방정식을 이용하여 curve fitting method (CFM) 나 직접 실험에 의해 얻어진 철손 측정 결과로부터 철손을 예측하며, 하경호 외는 [2]에서 자계의 거동, 즉, 회전자계 영역과 교번자계 영역을 구분하여 좀 더 향상된 철손 예측을 수행하였다. 본 논문에서도 마찬가지로 제작자에 의해 제공되는 교번자계에 의한 철손데이터를 Steinmetz 방정식으로 CFM을 이용하여 각각의 주파수 영역에서의 철손 계수를 도출하였고 회전자계 영역과 교번자계 영역을 구분하여 철손을 예측하고자 한다. 그러나 Steinmetz 방정식에서 보이는 바와 같이 철손은 주파수와 자속밀도의 합으로써 주파수에 따라 그 값은 자속에 비례하여 증가하게 된다. 이로부터 본 논문에서는 유한요소해석법을 이용하여 고정자의 영역을 세분화하고, 원주방향 및 반경방향 자속밀도를 도출하였으며 FFT를 이용하여 각각의 고조파에서의 자속밀도를 계산하여 이를 철손 예측에 적용하고자 한다.

2. 자계 특성 해석

2.1 해석모델

그림 1은 실제 적층 날장의 사진과 해석모델이며 그림 2는 해석영역을 세분화한 유한요소해석모델이다. 그

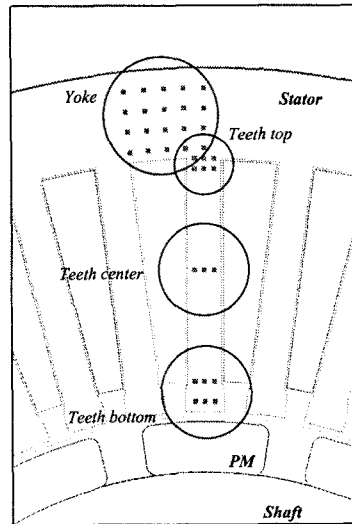


그림 2. 유한요소 해석 모델

림 2에서 보이는 바와 같이 정확한 자계분포를 계산하기 위해 고정자 슈에서 3포인트, 치에서 12포인트, 요크에서 15포인트에서 데이터를 취득하였다.

2.2 유한요소해석에 의한 자계 특성 해석

본 절에서는 유한요소 해석을 이용하여 고정자의 영역을 그림 1에서와 같이 치 상단, 치 중간, 치 하단(슈), 요크 부분으로 크게 네 개의 영역으로 구분하였으며 그림 2의 각각의 포인트에 해당하는 영역을 그림 3과 같이 구분하였고 각각의 영역에서의 자계분포 즉, 반경방향 자속밀도와 원주방향 자속밀도의 시간변화를 해석하였다. 그림 4는 각 영역에서의 자속밀도 파형을 도시한 것으로 데이터양이 방대하여 일부 영역의 해석결과만 나

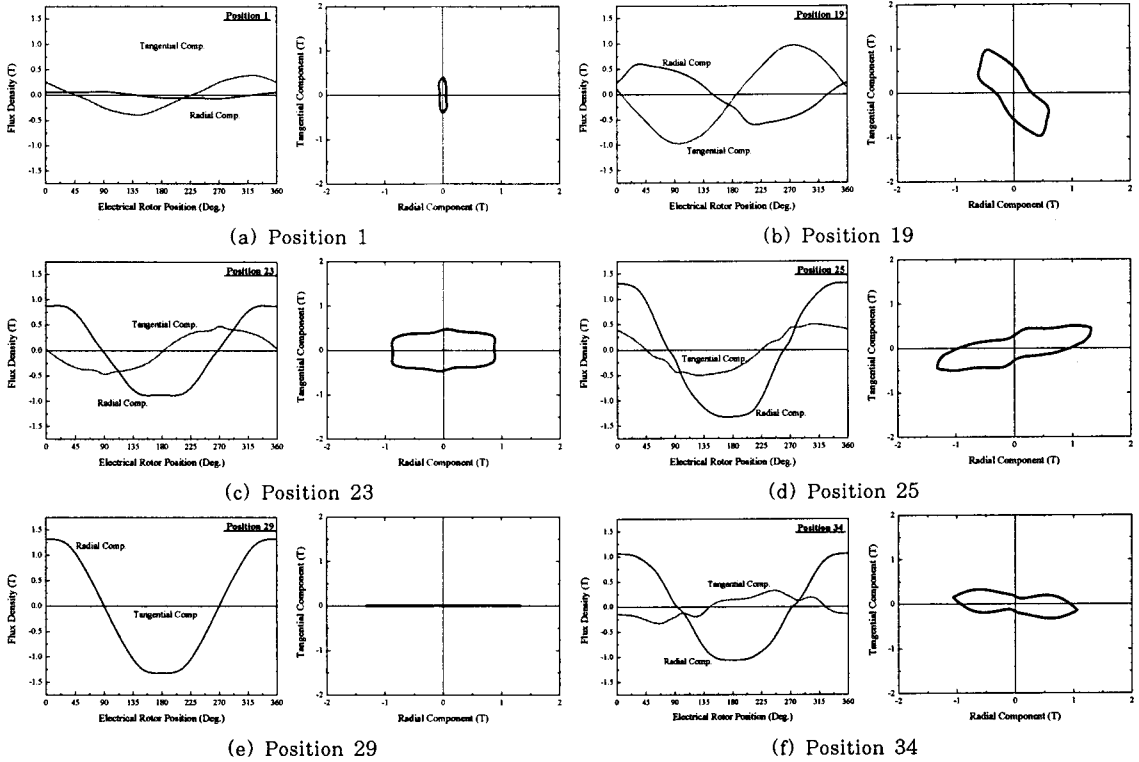


그림 4. 영역별 반경방향 및 원주방향 자속밀도 파형과 궤적 커브

3. FFT를 이용한 자계 해석

식 (1)은 철손 예측을 위한 개선된 Steinmetz 방정식이다.

$$P_c = P_h + P_e + P_a$$

$$= k_h f B^n + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \quad (1)$$

여기서, f 는 발전기의 회전속도에 따른 자계의 주파수, B 는 영구자석에 의한 철심의 자속밀도, k_h , k_e , k_a 는 각각 히스테리시스 손실 계수와 와전류 손실 계수, 이상 와전류 손실 계수이며, n 은 Steinmetz 상수이다. 식에서 보이는 바와 같이 철손은 히스테리시스손실, 와전류 손실, 이상 와전류 손실로 구분되어지며, 각각은 회전자의 전기적 주파수에 비례하거나 자승에 비례한다.

따라서 본 논문에서는 앞서 얻어진 각 영역에서의 반경방향과 원주방향 자속밀도를 FFT 분석하여 각각의 고조파에 따른 자속밀도를 계산하였다. 그 해석결과는 그림 5와 같으며 그 해석결과가 매우 방대하여 이 역시 Position 25 영역에서의 해석결과만을 도시하였다.

얻어진 해석결과는 무부하시의 자속밀도의 결과로 각각의 고조파에서의 자속밀도 값이 기본파에 대해 매우 적은 값으로 보이나 철손 식에서 보이는 것처럼 주파수에 따라 그 값이 매우 크게 변하기 때문에 THD (total harmonic distance) 값이 10% 정도만 된다하더라도 철손 해석결과는 대략 30%이상의 변화를 보이게 된다. 또한 실제 부하 시에 전류에 의해 발생하는 고조파를 고려하게 되면 THD 값이 대략 20% 이상 발생할 것으로 사료되며 이는 실제 철손을 50% 이상 증가시킬 것이다. 따라서 기존의 Steinmetz 방정식을 이용한 CFM에 의해 얻어진 철손 해석 값과 비교하여 그 차이가 매우 크게 나타나게 될 것으로 생각된다.

Pos.28 3.2635	Pos.29 23.2344	Pos.30 23.2635	Pos.31 2.3928	Pos.32 2.2668	Pos.33 2.3928
			Pos.34 2.8681	Pos.35 2.2668	Pos.36 2.8681

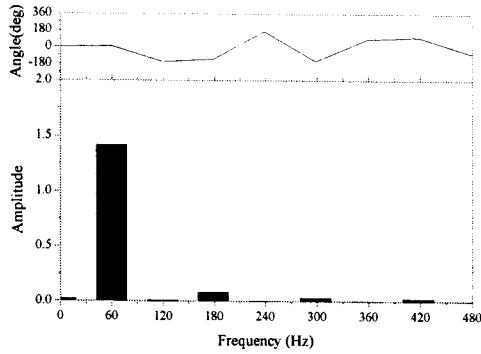
(a) 치영역

Pos.1 4.1471	Pos.2 6.1647	Pos.3 6.1647	Pos.4 6.1647	Pos.5 6.1647	Pos.6 2.0178
Pos.7 2.5684	Pos.8 3.9789	Pos.9 3.9789	Pos.10 3.9789	Pos.11 3.9789	Pos.12 1.4.53
Pos.13 2.4113	Pos.14 3.8742	Pos.15 3.8742	Pos.16 3.8742	Pos.17 3.8742	Pos.18 1.4677
Pos.19 2.2543	Pos.20 3.7695	Pos.21 3.7695	Pos.22 3.3802	Pos.23 2.8519	Pos.24 1.1317
			Pos.25 1.1335	Pos.26 1.1334	Pos.27 1.1335

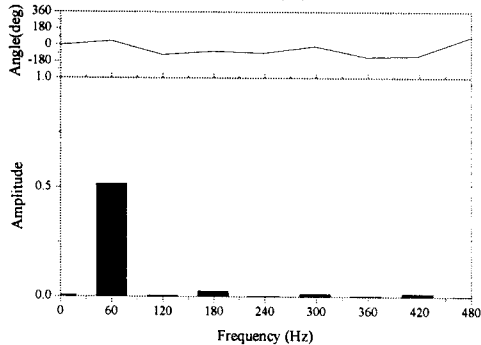
(b) 요크영역

그림 3. 영역별로 구분된 해석모델

타내었다. 그림에서 보이는 것처럼 각각의 영역에 따라 그 크기는 물론 궤적 즉, 원주방향과 반경방향의 자속밀도 크기 비율도 영역마다 차이를 가지며 파형의 왜곡으로부터 자속밀도가 갖는 고조파 역시 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.



(a) 반경방향 자속밀도



(b) 원주방향 자속밀도

그림 5. 자속밀도의 FFT 해석결과

4. 자계 거동 해석

그림 6은 앞서 얻어진 고조파 분석 결과로부터 각각의 고조파에 따른 원주방향 및 반경방향 자속밀도의 궤적을 도시한 것이다. 이는 철손예측을 위한 사용한 CFM이 제작자에 의해서 제공되는 교번자계에 의한 철손데이터를 사용하기 때문에 그 해석이 필수적이다. [4]에서 손대락 외-는 회전자계의 영역의 철손 발생이 교번자계 영역에서 철손 발생의 100% 이상 증가함을 실험을 통해 규명하였다. 회전자계와 교번자계의 구분은 그림 6과 같은 주기 동안의 자속밀도 궤적에서 최대치 자속밀도와 최소치의 비율인 축비가 0.1보다 크면 회전자계 영역으로 정의하고 있다 [2]. 또한 표 1에 보이는 것처럼 기본 파 궤적의 축비가 0.1 보다 작은 경우에도 즉, 교번자계 영역으로 구분되어 저도 같은 영역에서의 3고조파 이상에서 회전자계 발생이 가능하다. 이 역시 영역 1,2,3에서의 결과 값만을 나타내었다.

표 1. 영역별 고조파에 따른 축비 해석 결과

영역	구분	고조파(차수)
Pos. 1	교번자계	1
	회전자계	3,5,7
Pos. 2	교번자계	1,7
	회전자계	3,5
Pos. 3	교번자계	1,7
	회전자계	3,5

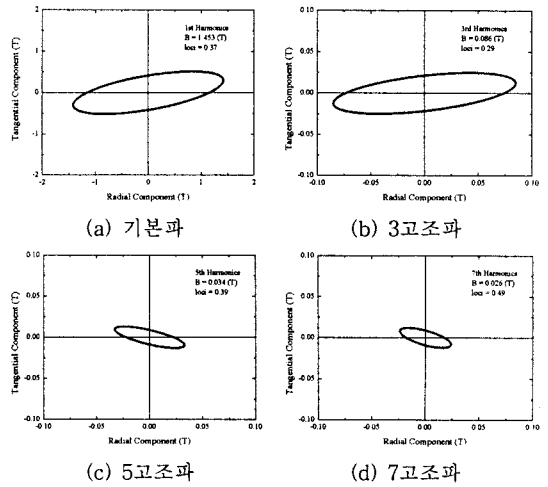


그림 6. 고조파별 궤적 곡선

5. 결 론

본 논문에서는 정확한 철손 예측을 위한 고조파 분석을 통한 자계 거동 해석 방법을 제시하였다. 유한요소해석법을 이용한 자계분포해석을 통해 세분화된 고정자 영역에서의 자계특성결과를 도출하였고 도출된 결과, 즉 반경방향 자속밀도와 원주방향 자속밀도를 FFT 해석함으로써 각각의 고조파에서의 자속밀도 값을 계산하였다. 이로부터 각 고조파에서의 loc를 계산함으로써 회전자계와 교번자계를 구분하였다. 도출된 최종 해석 결과 값은 기존의 Steinmetz 방정식을 이용한 결과보다 정확한 해를 제시할 것으로 사료되며 향후 본 논문에서 제시한 자계 거동 해석 방법을 사용하여 철손을 해석하고 부하시의 철손 역시 동일한 방법을 이용하여 해석하고 실험을 통해 비교·검증할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Y.Chen, and P.Pillay, "An Improved formula for lamination core loss calculations in machines operating with high frequency and high flux density excitation," Ind. Appl. Conf., Vol. 2, pp. 13-18, 2002.
- [2] 하경호, 차상윤, 김재관, 홍정표, "영구자석형 모터의 고정자 철심에서 자계의 거동 및 철손 분석," 대한전기학회 논문지, vol. 55B, no. 2, pp. 76-82, 2006.
- [3] N.Stanges, R.D.Findlay, "Importance of rotational iron loss data for accurate prediction of rotating machine core losses," Proceeding of IEEE-IAS, vol. 1, pp.123-127, 1994
- [4] 철손 해석 및 측정 기술 개발에 관한 최종보고서, 통상산업부, 1997.
- [5] C. Mi, G. R Slemmon, R. Bonert, "Modeling of iron losses of permanent magnet synchronous motors," IEEE, Trns. Ind. Applicat., Vol. 39, May/June 2003.
- [6] C.A. Hernandez-Aramburo, T. C. Green, A.C. Simth, "Estimating Rotational iron losses in an induction machine," IEEE Trans. Magn., Vol. 39, November 2003.