

고조파 분석을 통한 유도 전동기의 철손해석

이재건, 이정종, 하경호, 홍정표, 이종호*
 창원대학교 전기공학과, 한밭대학교 전기공학과*

Iron Loss Analysis of Induction Motor
 Considering Harmonics of the Flux Density

Jae-Gun Lee, Jeong-Jong Lee, Kyoung-Ho Ha, Jung-Pyo Hong, Jung-Ho Lee*
 Changwon Nat'l University, Hanbat Nat'l University*

Abstract - This paper presents a calculation method of iron loss in Induction Motor, which is based on 2D Transient Finite Element Method. Iron loss is evaluated by the frequency analysis of flux density waveforms using Discrete Fourier Transforms (DFT) and iron loss curves data. Then, the distribution of loss and the total loss are obtained. The validity of this method is verified by the comparison of the estimated values with measured ones.

표 1 유도전동기 해석 사양

사 양	값	사 양	값
출 력	50 HP	적층길이	160 mm
극 수	4 극	공 극	0.95 mm
주 파 수	60 Hz	결 선	DELTA
선간전압	380 V	권선방식	중권(2층권)

1. 서 론

최근 전동기의 경향은 에너지 절약 차원에서 고효율을 요구하는 경우가 많다. 고효율 전동기 설계를 위해서는 전동기 손실에 대한 정확한 평가가 요구된다. 전동기의 손실은 동손, 철손, 기계손, 표류 부하손 등이 알려져 있고, 이러한 손실에 의한 열 발생으로 전동기 온도 상승 등의 문제를 일으킨다. 전동기의 여러가지 손실 중에서 철손을 산정하기 위한 여러 가지 방법들이 제시되었고, 기존의 철손 산정 방법 중 가장 일반적으로 사용되었던 방법은 철손을 이루는 두 가지 성분인 히스테리시스손(hysteresis loss) 계수와 와전류손(eddy current loss)계수를 이용하는 방법이다. 이는 철손이 주파수, 자속밀도, 철심의 두께 등에 비례하는 관계를 이용한 실험적이고 경험적인 방법이었다. 하지만 이 방법의 경우 고조파 성분에 의한 철손의 영향을 평가하기 어렵기 때문에 최근 들어서는 고조파 성분에 의한 철손의 영향을 보다 정확히 평가하기 위한 연구들이 활발하게 이루어지고 있다[1][2].

본 논문에서는 3상 유도 전동기의 철손 해석 방법을 다음과 같이 제시하였다. 먼저 전동기를 2D FEM 해석을 통해서 각 요소의 시간에 따른 자속밀도를 구한 후, 자속밀도를 고조파 분석을 통하여 각 주파수 성분별로 그 크기를 분리하였다. 각 주파수 성분별로 분리된 자속밀도의 크기를 바탕으로 철심 손실 데이터 베이스를 이용하여 각 요소의 철손을 구한 후, 각 요소의 철손을 합하여 전동기의 전체 철손을 구하였다. 이 방법을 사용하는 경우 별도의 경험적이고 실험적인 수식을 사용하지 않고 고조파 성분을 고려한 철손을 해석 할 수 있는 장점이 있다[3].

2. 해석 모델 및 해석 방법

2.1 해석 모델

해석 대상의 유도전동기는 출력 50HP(35kW) 3상 농형 유도 전동기로 극수는 4극, 정격회전속도는 1770 RPM이다. 전동기의 해석 사양은 표1에 나타내었다.

해석모델을 1/4 모델로 설정하였고, 권선 분포 및 재질은 그림 1에 나타내었다. 권선은 2층으로 이루어져 있으며 극수는 4극으로 배치되었다.

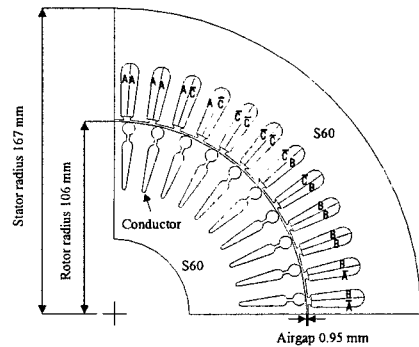


그림 1 해석모델의 권선 및 재질 분포

2.2 해석 방법

2.2.1 기존의 철손 산정 방법

철손은 와전류손과 히스테리시스손으로 이루어져 있다. 와전류손은 철판의 두께 d 의 제곱, 주파수 f 의 제곱 및 자속밀도 B 의 제곱에 비례한다. 히스테리시스손은 철판의 두께와는 무관하며, f 에 비례하고 B 의 1.6~2.0승에 비례한다고 되어 있으나, 철심내의 B 가 1(T) 이상의 높은 값에서는 히스테리시스손도 B 의 제곱에 비례한다고 보는 것이 실제적이다. 따라서 철심 1(kg)당의 손실 ω_i 는 식 (1)과 같다.

$$\omega_i = B^2 \left\{ \sigma_h \left(\frac{f}{100} \right) + \sigma_e d^2 \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right\} \text{ [W/kg]} \quad (1)$$

여기서, σ_h 는 히스테리시스손 계수를, σ_e 는 와전류손 계

수를 각각 나타낸다. 회전기 철심에서는 계철부분과 치부분에서 자속이 지나가는 모양이 크게 달라지므로 철손의 증가하는 정도를 분리하여 고려해야 된다. 이 때 히스테리시스 손 계수와 와전류 손 계수는 계철부분과 치부분에서 다른 값을 가진다. 하지만 이 수식의 경우 경험적이고 실험적인 수식으로 자속밀도의 고조파 성분에 대한 평가가 명확하게 평가되고 있지 않다. 따라서, 자속밀도에 대한 고조파 분석을 통한 철손 평가 방법이 필요하다.

2.2.2 유한 요소 해석

고조파 분석을 고려한 철손 평가를 위해서는 먼저 3상 유도 전동기의 유한요소해석을 통해서 시간에 따른 자속밀도를 산정해야한다. 다음과 같은 가정들을 두어 식(2)와 같은 유도 전동기의 유한요소해석을 위한 2차원 지배방정식을 유도할 수 있다.

가. 재질은 등방성이다.

나. 전류 밀도 \vec{J}_0 와 자기벡터 포텐셜 \vec{A} 는 z축 방향의 성분만을 가진다.

다. 변위 전류는 무시할 수 있다.

라. $\nabla\phi=0$ (ϕ : 전기 스칼라 포텐셜)

$$-\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2}\right) + \sigma \frac{dA}{dt} - J_0 = 0 \quad (2)$$

여기서, μ 는 투자율, σ 는 도전율, \vec{J}_0 는 외부의 입력 전류밀도를 각각 나타낸다. 식(2)는 미지수의 개수가 방정식의 수보다 많으므로, 해를 독립적으로 결정 할 수 없고, 방정식을 풀어 자기벡터 포텐셜과 전류 값을 결정하기 위해서는 여자 전원의 전압방정식이 보조적으로 필요하다. 키르히호프 제 2법칙을 이용하여, 권선의 한 상에 대한 회로 방정식은 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$V = R_m I_m + L_m \frac{dI_m}{dt} + E_m \quad (3)$$

여기서, R_m 은 유한요소 해석 영역의 내부저항과 외부저항의 합성저항, L_m 은 권선에서 코일 단부의 누설인덕턴스,

E_m 은 권선에 유기된 유기기전력을 각각 나타낸다. 식(2)와 식(3)을 결합하여 정리하면, 시간 미분항이 포함된 선형 연립 방정식을 얻을 수 있다.

2.2.3 고조파 분석을 통한 철손해석

본 논문에서 사용한 철손 산정 순서를 그림 2와 같이 도식화 하였다. 2.2.2절에서 설명한 유한요소법을 통해서 각 요소의 자속밀도를 구한다. 이 때 요소의 개수는 7684개로 각 부분의 자속밀도를 충분히 표현할 수 있는 개수이다. 각 요소에서의 자속밀도 분포를 구한 다음 각 요소별 자속밀도를 DFT(Discret Fourier Transform, 이상 푸리에 변환) 분석을 통해서 각 고조파 성분에 따른 자속밀도의 크기를 구한다. DFT를 통해서 구한 각 고조파에 따른 자속밀도의 크기는 식(4)와 같다.

$$B_{pk} = \sum_{n=0}^N B_p(n) e^{j \frac{2\pi n k t}{N}} \quad (4)$$

여기서, B_{pk} 는 k번째 고조파에 대한 자속밀도의 최대값, k는 고조파 차수, B_p 는 요소에서의 자속밀도 값을 각각 나타낸다.

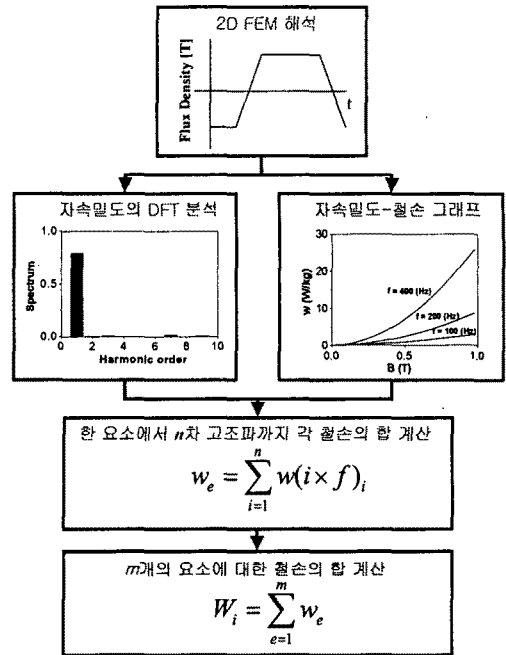


그림 2 철손 산정 순서

각 고조파에 따른 자속밀도의 크기를 구한 후 주파수에 따른 자속밀도-철손 데이터 베이스로부터 각 고조파 성분에 따른 철손을 구한다. 이 때의 자속밀도-철손 데이터 베이스는 기존의 제철회사에서 제공한 철손 데이터 복을 참고 하였다. 그리고 철손 데이터 복에 나타나 있지 않은 주파수 대역은 선형 데이터 보간을 수행하여 값을 추정하였다.

각 고조파 성분에 대한 철손을 구하여 값을 합하면 한 요소에 대한 철손이 구해진다. 각 요소에 대해서 이러한 작업을 반복하면 전동기의 전체 철손을 구할 수 있다. 한 요소에서의 각 고조파 성분을 고려한 철손과 전동기 전체 철손은 식(5),(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_e = \sum_{i=1}^n w(i \times f)_i, \quad i: \text{고조파차수} \quad (5)$$

$$W_i = \sum_{e=1}^m w_e, \quad e: \text{각 요소의 번호} \quad (6)$$

여기서, w_e 는 한 요소에서의 철손, W_i 은 전동기의 전체 손실, f 는 전동기의 주파수를 나타낸다.

3. 해석 및 실험 결과

3.1 전동기 각 위치별 고조파 분석 결과

3상 유도 전동기의 자속밀도 해석 결과를 아래의 그림 3, 4에 각각 나타내었다. 그림 3은 전동기의 요크 부분과 회전자 브리지 부분의 시간에 따른 자속밀도를 나타낸다. 그림에서와 같이 고정자 요크의 자속밀도는 정현파에 가까운 양상을 나타내지만, 회전자 브리지의 경우 많은 슬롯 고조파를 포함됨을 알 수 있다. 그림 4에는 각 고조파 성분에서의 자속밀도 크기를 나타낸 것으로 치-슬롯 형상에 의해서 고정자의 요크 부분보다 회전자 브리지 부분에서 고조파에 의한 영향이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

3.2 전동기의 각 위치별 단위 질량당 철손 해석

그림 5에서는 전동기의 각 위치별 단위 질량당 철손을 나타내었다. 그림에서와 같이 치 부분이 요크 부분에 비해 철손이 크게 나타나고, 회전자 브리지에서 가장 큰 값이 나타남을 알 수 있다. 이는 요크 부분에 비해서 치 부분이 나 회전자 브리지 부분에서는 치-슬롯 구조에 따른 고조파 성분이 더 포함되어있기 때문이다. 비록 회전자 브리지에서 단위 질량당 철손의 값은 높지만 전체적인 전동기 측면에서는 회전자 브리지 부분의 영역이 작기 때문에 실질적인 철손 값은 크지는 않다. 하지만 국부적인 온도 상승의 원인이 될 것으로 사료된다. 회전자 요크의 경우에는 DC 바이어스가 걸려 있기 때문에 정상 상태에서는 철손이 거의 나타나지 않는다.

3.3 실험 및 해석 결과 비교

철손은 무부하 시험을 통한 전동기의 기계손을 구한 후, 무부하 손실과 기계손, 무부하 동손에 의한 식 (7)로부터 구하였다.

$$W_i = P_{NL} - W_m - W_{\omega} \quad (7)$$

여기서, P_{NL} 는 무부하 손실, W_m 는 기계손, W_{ω} 는 무부하 동손을 각각 나타낸다. 실험과 해석결과 비교를 표 2에 나타내었다. 실험값과 해석값의 차이는 실험값의 경우 전동기 실험치에서는 해석속도가 1775(rpm)이었고, 해석치에서는 정격회전속도 1770(rpm)으로 회전속도의 차이에 의한 것으로 사료된다.

표 2 실험 및 해석 결과 비교

	실험 결과	해석 결과
정격속도 (rpm)	1775	1770
무부하 손실 [W]	1386	-
기계 손 [W]	390	-
무부하 동손 [W]	220	-
철 손 [W]	776	660

4. 결 론

본 논문에서는 3상 유도 전동기의 철손 산정에 대하여 알아보았다. 2차원 유한 요소법으로부터 매 시간 스텝에 따른 자속밀도를 DFT 분석을 한 후, 각 고조파 성분을 고려한 철손 산정을 하였다. 기존의 수식적인 방법과는 달리 철손 해석을 위해서 주파수에 따른 자속밀도-철손 데이터 베이스를 기존의 제철 회사에서 제공한 자료를 이용하여 구성하였다. 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 제안한 방법에 의한 철손해석 결과와 실험 결과를 비교 검토하였다. 실험 및 해석시 정격속도를 같게 해주면 만족할 만한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 본 논문에서 제시한 해석 방법은 유도전동기의 설계에 있어서 철손을 고려한 효율 개선에 유용하게 사용되어질 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 홍정표, 하경호, "자성재료를 이용한 전자에너지변환기기의 설계 및 특성", 한국전기전자재료학회 순계학술대회, pp. 1-4, 2002
- [2] Hyuk Nam et. al, "A Study on Iron Loss Analysis Method Considering the Harmonics of the Flux Density Waveform Using Iron Loss Curves of Epstein Samples", CFCE, 107, 2002
- [3] Shingo Inamura et. al, "A Simple Estimation Method of Iron Loss in Switched Reluctance Motor", Com pumag, Vol. 4, 62-63, 2001

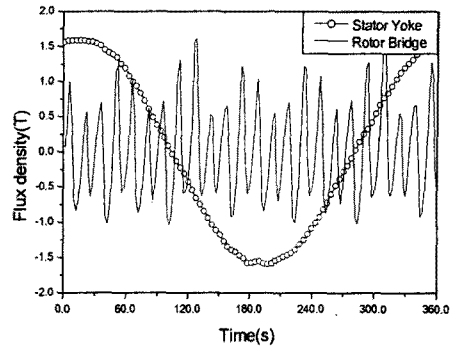
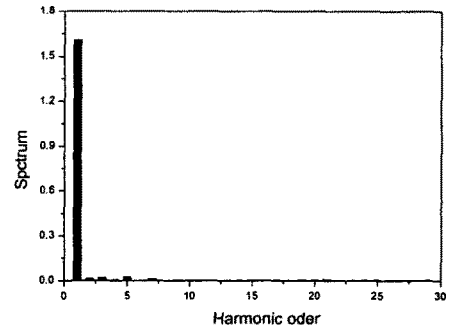
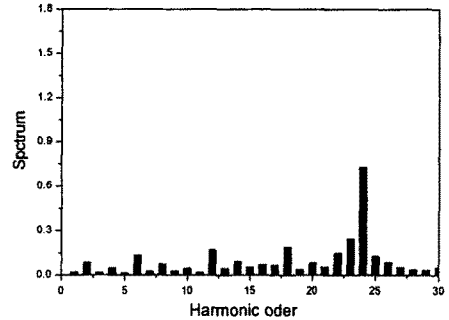


그림 3 전동기의 자속밀도 분포



(a) 고정자 요크 자속밀도 고조파 분석 결과



(b) 회전자 브리지 자속밀도 고조파 분석 결과
그림 4 자속밀도 고조파 분석 결과

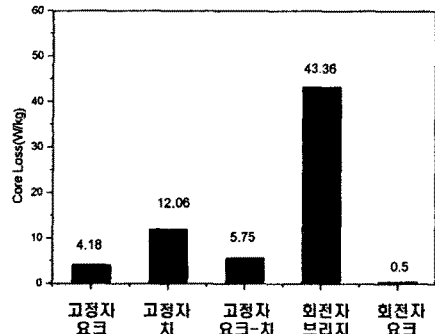


그림 5 각 위치에 따른 단위 질량당 철손