

주파수에 따른 철손을 고려한 인덕턴스 예측

김용범, 박민로, 김해중, 홍정표
한양대학교

Prediction of Inductance Considering Core Loss According to Frequency Variation

Yong-Beom Kim, Min-Ro Park, Hae-Joong Kim, Jung-Pyo Hong
Hanyang University

Abstract - 인버터를 드라이브 할 때 기존에 모터 설계자들은 전류, 전류 위상각별 인덕턴스 정보만을 제공하였다. 하지만 실제 모터에서는 철손의 영향으로 인해 기기 외부에서 바라본 인덕턴스가 주파수에 따라서 변하게 된다. 그러므로 모터 제어를 용이하게 하기 위해서는 주파수 변화에 따른 인덕턴스도 추가로 고려되어야 한다.

본 논문에서는 철손이 존재할 때 인덕턴스가 주파수에 따라서 변하는 파라미터임을 보이고, 주파수에 따른 인덕턴스를 예측하여 실제 실험에서 얻은 인덕턴스와 비교 후 예측의 타당성을 밝힌다.

1. 서 론

모터 설계자는 인버터를 드라이브 할 때 필요한 인덕턴스 정보를 제공해야 한다. 인덕턴스는 일반적으로 코일에 흐르는 전류 i 와 총 쇠교자속 λ 의 비 (λ/i)로 정의되며 주파수에 무관한 파라미터이다. 그러므로 기존에 모터 설계자들은 전류, 전류 위상각별 인덕턴스 정보만을 제공하였다.

하지만 실제 모터 구동 시에는 철손이 발생하고, 철손이 존재함으로써 기기 외부에서 바라본 인덕턴스는 주파수에 따라서 변하는 파라미터가 된다. 즉, 모터 제어를 용이하게 하기 위해서 모터 설계자는 전류, 전류 위상각 외에 주파수까지도 고려된 인덕턴스 정보를 제공해야 한다.

본 논문에서는 모터보다 간단한 모델인 원형 코어에서 철손이 존재할 때 코어 외부에서 바라본 인덕턴스가 주파수에 따라서 변하는 파라미터임을 밝힌다. 그리고 주파수에 따른 인덕턴스를 예측하여 실험에서 얻은 인덕턴스와 비교해 예측의 타당성을 검증한다.

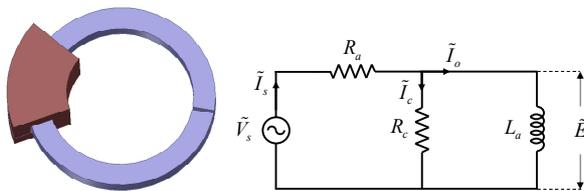
2. 본 론

2.1 파라미터 산정 및 인덕턴스 예측

원형 코어의 등가회로를 이용해 실험값과 비교하기 위한 파라미터 값들을 산정하고, 해석적으로 인덕턴스를 예측하는 방법을 고안한다.

2.1.1 원형 코어의 해석모델 및 등가회로

원형 코어의 해석모델은 <그림 1>과 같으며 이는 1차 측만 존재하는 변압기로 간주할 수 있으므로 철손이 고려된 원형 코어의 등가회로는 아래와 같다.



<그림 1> 원형 코어의 해석모델과 등가회로

여기서, \bar{V}_s , \bar{I}_s , \bar{I}_o , \bar{I}_c , \bar{E} , R_a , R_c , L_a 는 각각 인가전압, 인가전류, 자화전류, 철손분전류, 유도기전력, 권선저항, 철손저항, 철손이 고려되지 않은 인덕턴스를 의미한다.

위 등가회로를 이용해 코어 외부에서 바라본 전체 임피던스 \bar{Z}_t 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{Z}_t &= R_a + \frac{j\omega L_a R_c}{R_c + j\omega L_a} \\ &= R_a + \frac{\omega^2 L_a^2 R_c}{R_c^2 + (\omega L_a)^2} + j \frac{\omega L_a R_c^2}{R_c^2 + (\omega L_a)^2} \\ &= R + jX = R + j(\omega L) \end{aligned} \quad (1)$$

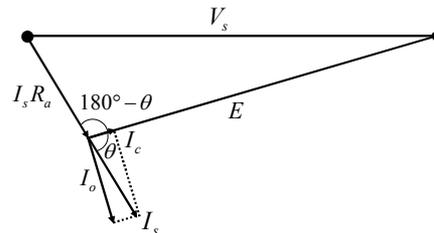
이 때 복소수 항 X 는 리액턴스 성분이며, 회로 전체의 인덕턴스 성분은 다음과 같다.

$$L = \frac{L_a R_c^2}{R_c^2 + (\omega L_a)^2} \quad (2)$$

식 (2)에서도 알 수 있듯이 철손이 존재하는 경우 주파수에 따라 철손 저항이 변하므로 코어 외부에서 바라본 인덕턴스는 주파수에 따라서 변하는 파라미터이다. 하지만 철손이 존재하지 않는 공심 코일의 경우라면 $R_c = \infty$ 이므로, $L = L_a$ 가 되어 인덕턴스는 주파수에 무관한 파라미터가 된다.

2.1.2 파라미터 산정

원형 코어에는 인덕턴스 성분인 L_a 가 존재하므로 전류 지연 현상이 발생해 전류간의 위상차가 존재하게 된다. 그러므로 실험값과 비교하기 위한 파라미터 값들을 구하기 위해 다음과 같이 Phasor Diagram을 이용해야 한다.



<그림 2> Phasor Diagram

이 때, 유도기전력 E 와 철손분 전류 I_c 는 유한요소법(Finite Element Method: FEM)을 이용해 구한 값이며, 자화전류 I_o 는 전류원 해석시 사용자가 인가해주는 입력값이다.

위의 Phasor Diagram을 통해 주파수에 따른 V_s , I_o , I_s , I_c , E 를 구할 수 있으며, 후에 실험에서 V_s , f 를 제어하여 해석적으로 산정된 I_s 가 실험적으로 인가 되는지를 확인해 등가회로의 타당성을 검증한다.

2.1.3 인덕턴스의 예측

앞서 등가회로를 통해 얻은바와 같이 코어 외부에서 바라본 인덕턴스는 식 (2)와 같으며, 본 논문에서는 식 (2)를 사용해 주파수에 따른 인덕턴스를 예측한다. 이 때 L_a 와 R_c 는 FEM을 통해 구하며, L_a 는 주파수에 따라서 변하지 않는 값이다.

2.2 실험을 통한 인덕턴스 산정

실험적으로 코어 외부에서 바라본 인덕턴스를 구하기 위해 원형 코어에 감긴 코일에 전압을 인가하고 전압, 전류, 역률각 등을 측정하였다.

2.2.1 실험 모델

실험에서 사용된 원형 코어의 사양은 <표 1>과 같다. <그림 3>은 실험에서 사용된 코어의 형상이다.

〈표 1〉 원형 코어의 형상 치수

	단위	값
내경	mm	100
외경	mm	130
적층 길이	mm	14
공극 길이	mm	2
턴수	turn	80
철심 재질	-	50PN470



〈그림 3〉 원형 코어

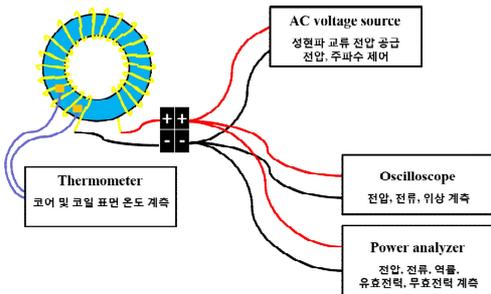
이 때, 원형 코어를 감은 코일은 교류저항에 의해 저항값이 변하는 것을 피하기 위해 500개의 소선으로 구성된 Litz Wire를 사용하였다.

2.2.2 실험 구성

아래 〈그림 4〉와 같이 실험을 구성하였다. AC voltage source로 원형 코어에 감겨있는 코일에 전압, 주파수를 인가한 후, Power analyzer와 Oscilloscope로 코일에 흐르는 전압, 전류, 역률각 등을 측정하였다.

결과 분석 시에는 Oscilloscope에서 계측되는 값들은 변화가 심하여 Power analyzer에서 측정된 값들을 이용하였으며, Oscilloscope는 Power analyzer의 신뢰성을 확보하기 위한 용도로만 사용하였다.

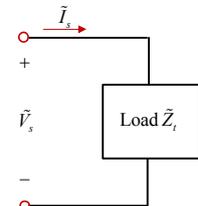
또한, Thermocouple로 권선과 코어 표면의 온도를 측정해 매 주파수마다 온도를 포화시켜가며 실험을 진행하였다.



〈그림 4〉 실험 구성

2.2.3 실험을 통한 인덕턴스의 산정

아래 〈그림 5〉는 임의의 부하 \tilde{Z}_L 에 전압을 인가했을 때 전류가 흐르는 것을 보여준다. 임의의 부하가 용량성 또는 유도성일 경우 전압, 전류 사이에 위상차가 존재하므로 파라미터들은 Phasor로 표기하였다.



〈그림 5〉 Phasor로 나타낸 부하에 인가되는 전압, 전류

이 때, 무효전력 Q , 인가전류 I_s , 각주파수 ω , 회로 전체의 인덕턴스 L 의 관계는 식 (3)과 같으며, 이 식을 이용해 실험에서 주파수에 따른 인덕턴스 값을 구한다.

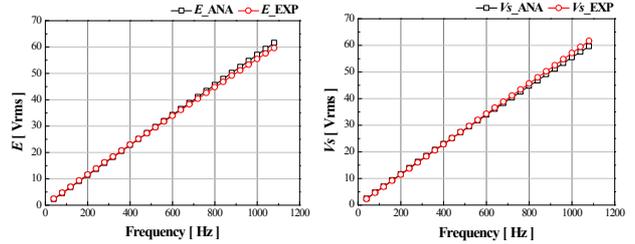
$$Q = \text{Im}(\tilde{S}) = I_s^2 X = I_s^2 (\omega L) \quad (3)$$

Q , I_s , ω 는 Power analyzer에서 측정되고, L 은 위 식에 따라 Q 를 ω , I_s^2 으로 나눔으로써 얻을 수 있다. 이렇게 구한 인덕턴스 L 값을 참값으로

가정한다.

2.3 해석 및 실험값 비교

자화전류 I_0 를 일정하게 3Arms로 유지했을 때, 해석 및 실험에서 구한 유도기전력 E , 인가전압 V_s 를 비교한 결과 아래와 같았다.

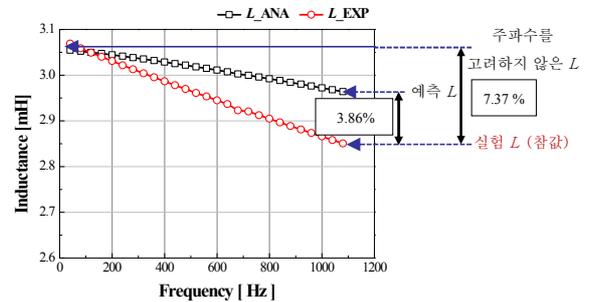


〈그림 6〉 주파수에 따른 E , V_s 해석, 실험 비교

그 결과 실험 주파수구간 내에서 경향성이 일치하는 것을 알 수 있었다.

2.4 인덕턴스 예측의 타당성 검토

등가회로를 통해 구한 인덕턴스 L 은 예측값이며, 실험에서 구한 인덕턴스 L 은 참값이다. 자화전류 I_0 가 3Arms 일 때 예측한 L 값과 실험에서 구한 L 값을 비교하였다.



〈그림 7〉 주파수에 따른 인덕턴스 예측 및 비교

인덕턴스 L 을 예측할 때 사용한 R_0 값은 해석철손값과 실험철손값이 같다고 가정하여 실험에서 구한 R_0 값을 사용하였다.

비교 결과, 실험에서 구한 인덕턴스 L 값을 기준으로 했을 때 예측한 인덕턴스 L 값의 오차는 3.86%이고, 인덕턴스가 주파수에 따라서 변하지 않는다고 가정했을 때의 오차는 7.37%이다. 즉, 철손을 고려하여 주파수에 따른 인덕턴스를 예측했을 때가 더 정확함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 철손이 존재할 때 인덕턴스가 주파수에 따라서 변하는 파라미터임을 밝혔다. 또한 등가회로를 이용해 주파수에 따른 인덕턴스를 예측하여 실제 실험에서 얻은 인덕턴스 값과 비교하였다. 그 결과 철손을 고려하여 인덕턴스를 예측한 경우, 인덕턴스가 주파수에 따라서 변하지 않는다고 가정했을 때보다 더 정확히 예측할 수 있음을 보였다.

차후 원형 코어가 아닌 모터에 적용하여 주파수에 따른 인덕턴스를 예측한다면 인버터를 드라이브 할 때 필요한 인덕턴스를 전류, 전류 위상각, 주파수를 고려해 제공할 수 있게 되므로 모터 제어가 더 용이해질 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이지영, 강도현, 홍정표, “영구자석 전동기에서 인덕턴스 제정의를 통한 인덕턴스 산정과 측정에 대한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 855 - 856, 2006
- [2] Toshiro Sato and Yo Sakaki, “Physical Meaning of Equivalent Loss Resistance of Magnetic Cores”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 26, No. 5, pp. 2894 - 2897, 1990
- [3] Ji-Young Lee, Sang-Ho Lee, Geun-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, and Jin Hur, “Determination of Parameters Considering Magnetic Nonlinearity in an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 4, pp. 1303 - 1306, 2006
- [4] Charles K. Alexander and Matthew N. O. Sadiku, Fundamentals of Electric Circuits, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2007