

창의 전기기술을 선도하는
대한전기학회



www.kiee.or.kr

KIEE Summer Conference 2015

2015년도 제46회 대한전기학회 하계학술대회

일시: 2015년 7월 15일(수) ~ 17일(금)

장소: 무주 덕유산 리조트(전북 무주군)

◆ 주 최 : 대한전기학회

◆ 후 원 : 미래창조과학부, 산업통상자원부, 한국전력공사, 한국전기공사협회,
한국과학기술단체총연합회

▶ 전기기기 (8)

7월 16일(목) / 발표시간 : 13:00-14:20 / 만선하우스

좌장 : 정상용(성균관대)

- BP 38 Halbach 배열 자화를 갖는 Tubular 타입 커플링의 힘 특성 해석
김창우*, 김정만, 최장영(충남대)
- BP 39 실험계획법을 이용한 열유동 결합된 자기차폐문제의 최적설계
백주용*, 이세희(경북대), 김태훈(기초전력연구원)
- BP 40 성능 모멘트 적분법을 이용한 설계 변수의 불확실성에 기인한 스피커 모델의 성능 변동 예측
강병수*, 이상균, 김동훈(경북대), 김동욱(국방과학연구소)
- BP 41 변압기 대전류에 의한 하우징영역 온도상승 연구
이종근*, 서상욱, 박성원(현대중공업)
- BP 42 저소음 변압기 설계를 위한 삼상 변압기의 자왜 특성 측정
엄두중*, 조현진, 임정혁, 고창섭(충북대)
- BP 43 이방성 자왜 모델을 기반으로 한 변압기 자왜력의 유한요소 해석
Lixun Zhu, 정길균, 고창섭(충북대)
- BP 44 전자계해석을 이용한 고효율 몰드변압기 손실 평가기술 연구
정상훈*, 이 곤, 최명준(현대중공업)
- BP 45 초고압 진공 인터럽터의 전자계 해석 및 설계
류재섭*, 배채윤, 박석원, 김영근(LS산전 전력연구소)
- BP 46 레줄버 회전자 형상의 변압비에 따른 각도 오차율 분석
이용복*, 박동진, 유석현, 김기찬(한밭대)
- BP 47 자속 장벽에 의한 IPMSM의 온도 상승 억제 효과
조을규*, 조광진, 김규탁(창원대)
- BP 48 주파수에 따른 철손을 고려한 인덕턴스 예측
김용범*, 박민로, 김해중, 홍정표(한양대)
- BP 49 고정자 권선 점적율을 극대화 하는 새로운 코일구조와 환형동선 코일구조간의 ACResistance(R_{ac}) 비교
이의천*, 김용훈, 이강원, 이수웅, 권순오(한국생산기술연구원)
- BP 50 아크 전압 방정식을 이용한 횡자계진공차단부의 3차원 아크특성해석
곽창섭*, 이세희(경북대), 김태훈(기초전력연구원), 정연하(한전 전력연구원)
- BP 51 순차적 근사화기법을 이용한 10 MeV AVF 사이클로트론 전자석 설계
김수현*, 곽창섭, 이세희(경북대)

▶ 전기기기 (9)

7월 16일(목) / 발표시간 : 13:00-14:20 / 만선하우스

좌장 : 황은식(재우기술)

- BP 52 Radial Flux Density를 고려한 매입형 영구자석 동기전동기 코깅토크 저감 방법
박경수*, 이진환, 한원석, 정상용(성균관대), 김용재(조선대)
- BP 53 슬롯팅 효과를 고려한 영구자석 기기의 자계 특성해석
신경훈*, 최장영, 조한욱(충남대), 이강수(선박해양플랜트연구소)
- BP 54 수직 및 활박자화를 갖는 영구자석 선형발전기의 역기전력 특성비교
서성원*, 구민모, 최장영(충남대), 김경환(선박해양플랜트연구소)
- BP 55 해석적 방법을 이용한 반경방향 영구자석을 갖는 Cycloid Gear의 토크 특성해석
민경철*, 조한욱, 장강현, 최장영(충남대)
- BP 56 영구자석 형상 변경을 통한 SPMSM 토크리플 저감 설계 및 특성해석
문정민*, 서상혁, 박동혁, 정상용(성균관대), 김용재(조선대)
- BP 57 반응표면법을 이용한 표면부착형 영구자석 동기발전기의 토크 리플 저감설계
손승완*, 신영진, 윤명환, 홍정표(한양대)
- BP 58 SPMSM의 고정자 Slot 수에 따른 토크 특성 분석에 관한 연구
이진석*, 박관수(부산대), 김광진(SK E&S)

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 모형인 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.

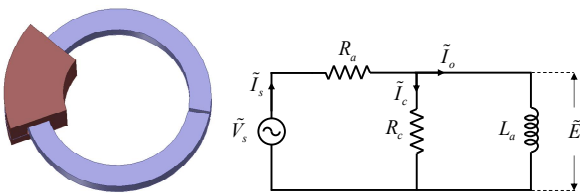
2. 본 론

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, \tilde{V}_s , \tilde{I}_s , \tilde{I}_o , \tilde{I}_c , \tilde{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 \tilde{Z}_t 를 구하면 다음과 같다.

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

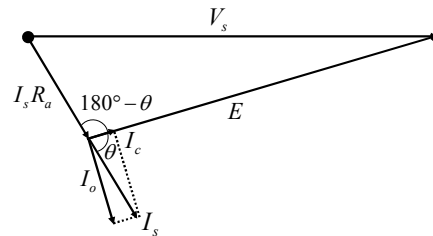
이 때 복소수 항 X 는 리액턴스 성분이며, 회로 전체의 인덕턴스 성분은 다음과 같다.

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

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

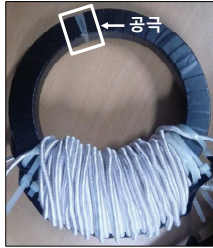
실험적으로 코어 외부에서 바라본 인덕턴스를 구하기 위해 원형 코어에 감긴 코일에 전압을 인가하고 전압, 전류, 역률각 등을 측정하였다.

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



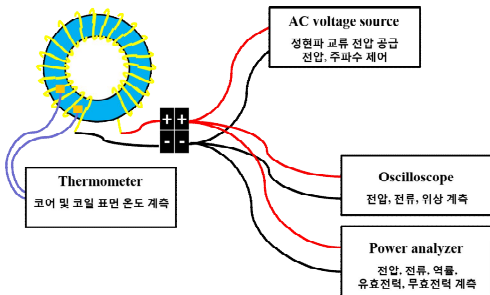
〈그림 3〉 원형 코어

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 계속되는 값들은 변화가 심하여 Power analyzer에서 측정된 값들을 이용하였으며, Oscilloscope는 Power analyzer의 신뢰성을 확보하기 위한 용도로만 사용하였다.

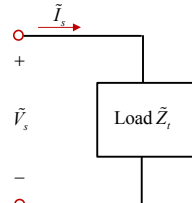
또한, Thermocouple로 권선과 코어 표면의 온도를 측정해 매 주파수마다 온도를 포화시켜가며 실험을 진행하였다.



〈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.

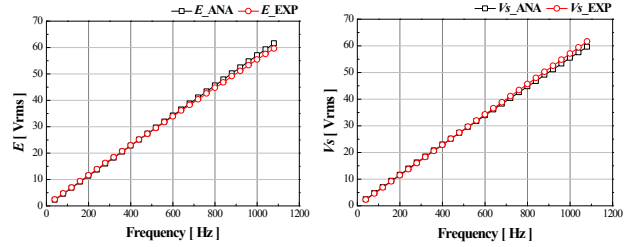
$$Q = \text{Im}(\tilde{S}) = I_s^2 X = I_s^2 (\omega L) \quad (3)$$

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 참값으

로 가정한다.

2.3 해석 및 실험값 비교

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

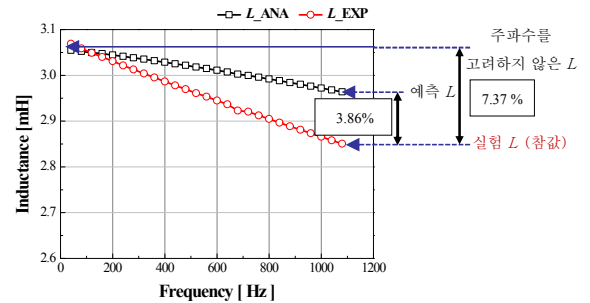


〈그림 6〉 주파수에 따른 E , V_s 해석, 실험 비교

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_o 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_c 값은 해석철손값과 실험철손값이 같다고 가정하여 실험에서 구한 R_c 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 제정을 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