

PSIM 모델을 이용한 변압기 회로상수 추출 방법

최희수, 박준영, 최성진
울산대학교 전기공학부

A Simple Parameter Extraction Method for Magnetic Transformers using PSIM

Hee Su Choi, Jun Young Park, Sung Jin Choi
School of Electrical Engineering, University of Ulsan

ABSTRACT

고밀도 고효율의 전원회로에서는 변압기의 정확한 모델링이 중요하다. 기존의 FEM(Finite Element Method) 등 전자기장 해석 방식은 계산시간이 길고 모델링이 불편하다는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 PSIM이 제공하는 Magnetic Element 블록을 이용한 시뮬레이션으로 변압기의 회로상수를 빠르게 추출하는 방법을 제시한다. 성능을 검증하기 위해 LLC 변압기에 제안방법을 적용하여 회로상수를 추출하고, 이를 실험결과와 비교 분석한 결과 약 누설 인덕턴스는 약 9% 자화 인덕턴스는 약 16% 오차가 나왔다.

1. 서 론

대부분의 컨버터 회로 모델은 변압기를 사용하는데, 변압기 설계에서 가장 중요한 것은 정확한 모델링이다. 기존의 변압기 누설 및 자화 인덕턴스 추출방법으로는 유한요소 해석 방식과 FEM(Finite Element Method) 프로그램을 이용하는 것인데, 이는 모델링이 불편하다는 점과 회로상수 추출을 위해 오랜 시간이 걸린다는 단점이 있다.

본 논문에서는 먼저 트랜스포머를 이용한 자기회로 모델링과 전기적 등가회로 APR모델에 대해 설명한 후 이를 PSIM의 라이브러리를 이용, 자기회로를 모델링을 한다. 제안방법을 검증하기 위해 누설 인덕턴스의 효과를 이용한 변압기인 LLC 변압기 사양을 정해 제작, PSIM을 통해 실제 측정 시 나온 회로상수와 시뮬레이션을 통해 나온 누설 및 자화 인덕턴스의 오차를 비교 분석하여 최종 결론을 내렸다.

2. PSIM 변압기 모델링 개요

2.1 자기회로 모델링 방법

본 논문에서는 캐패시터와 자이레이터를 이용해서 변압기를 모델링한다. 모델링 할 변압기 코어는 그림 4의 (a)와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 각 코어의 부분을 퍼미언스로 나누어 보고 누설 인덕턴스 및 공극 부분도 퍼미언스로 본다. 그리고 변압기의 1차측, 2차측 부분은 자이레이터 모델로 본다. 그림 4의 (b)는 변압기를 자기 등가회로 형태로 나타낸 것이다. 여기서 $P_1=P_4=P_5=P_8$, $P_2=P_3=P_6=P_7$, $P_9=P_{10}$ 이다. 그림에서 각 퍼미언스가 캐패시터 형태로 되어 있는걸 볼 수 있는데, 이는 쌍대성

$$P = \frac{\mu_o \mu_r A}{L} \quad (1)$$

$$C = \frac{\epsilon_o \epsilon_r A}{d} \quad (2)$$

원리를 이용한 것이다. 그 결과 식 (1)의 퍼미언스 식은 식 (2)의 커패시터 식과 유사함을 볼 수 있다.

2.2 전기적 등가회로 APR 모델

변압기를 해석할 때 전기적 등가회로인 APR(All Primary Referenced)방법을 이용하면 조금 더 수월하게 변압기의 회로상수를 구할 수 있다.[3] 여기서 APR 모델의 등가회로는 그림 1와 같다.

변압기를 APR모델로 변환할 때 두 가지 경우가 있는데 하나는 몇 가지 변수만 아는 경우와 다른 하나는 모든 변수를 아는 경우이다. 먼저 변압기의 1차측에서 바라본 인덕턴스 (L_1)와 2차측에서 바라본 인덕턴스 (L_2), 1차측과 2차측을 직렬로 연결해 얻은 인덕턴스 (L_{tot})를 안다면 상호 인덕턴스 (M)는 식 (3)을 이용해서 구하고 턴비는 식 (4)를 이용해 구한다. 이후 이 값들을 이용해 커플링 계수 (k)를 구한다. 1차측과 2차측의 커플링 계수는 각각 다른데 식 (5),(6)을 이용하여 구한다. 각 커플링계수는 식 (7)을 이용해 각 커플링 계수의 기하 평균값을 구한 후 식 (8),(9)을 이용하여 변압기 회로상수를 구한다. 만약 L_1 과 L_2 그리고 M 값과 각 턴비, 커플링 계수까지 모두 안다면 이러한 과정 없이 바로 식 (8),(9)을 이용하여 변압기 회로상수를 구한다.

$$L \quad (3)$$

$$N = \frac{M}{L_2} \quad (4)$$

$$k_1 = \frac{M}{L_1} \times \frac{N_1}{N_2} \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{M}{L_2} \times \frac{N_2}{N_1} \quad (6)$$

$$k = \sqrt{k_1 k_2} \quad (7)$$

$$L_r = L_1 (1 - k^2) \quad (8)$$

$$L_m = k^2 L_1 \quad (9)$$

여기서 누설 인덕턴스는 L_r , 자화 인덕턴스는 L_m 이다.

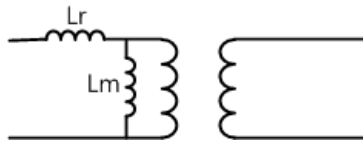


그림 1. APR모델 등가회로

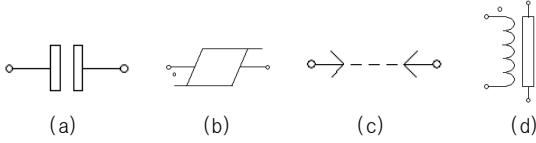


그림 2. PSIM Magnetic Element

(a) Air Gap (b) Linear Core (c) Leakage Path (d) Winding

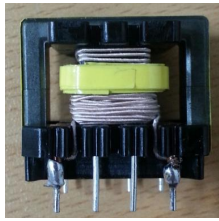


그림 3. LLC 변압기 제작 사진

2.3 PSIM의 Magnetic Element 라이브러리

PSIM의 Magnetic Element 라이브러리는 그림 2과 같다. 여기서 Air Gap 블럭의 A_L 은 인덕턴스 계수이고, Linear Core 블럭과 Leakage Path 블럭의 A_L 은 코어 각각의 누설경로의 인덕턴스 계수이다. 모든 블럭의 A_L 은 식 (10)로 정의된다.

$$A_L = \frac{\mu_o A_c}{l_g} \quad (10)$$

자이레이터란 1948년 Tellegen에 의해 처음으로 소개되었으며 일반적으로 한 포트의 전압을 다른 포트의 전류로 바꾸며 두 개의 포트를 가진 PSIM 자이레이터 모델은 그림 2의 (d)와 같다.

3. 제안하는 PSIM기반 추출법 및 검증

본 논문에서 제안하는 PSIM기반 회로상수 추출법을 검증하기 위해 먼저 LLC 변압기의 사양을 표 1과 같이 하였고, 하드웨어는 그림 3과 같이 제작하였다.

PSIM 모델을 이용하여 변압기 자기회로를 구현하면 그림 5과 같다. APR 모델을 보면 2차측을 Short하면 누설 인덕턴스가 보이고 Open하면 자화+누설 인덕턴스가 보이는데 여기서 우측 아래 저항을 사용해서 2차측을 Short 또는 Open시켜 자

표 1. LLC 변압기 사양

Core	EE2516
Turn ratio	5.8:1
Turn 수 (1차측)	23
Turn 수 (2차측)	4
Gap	3.3mm
Wire Size	0.06/20 Litz

표 2. PSIM 블럭의 각 변수 값

항목	실측 값	시뮬레이션 값	오차
누설 인덕턴스	23.57uH	26.14uH	9.83%
자화 인덕턴스	1.044mH	1.25mH	16.48%

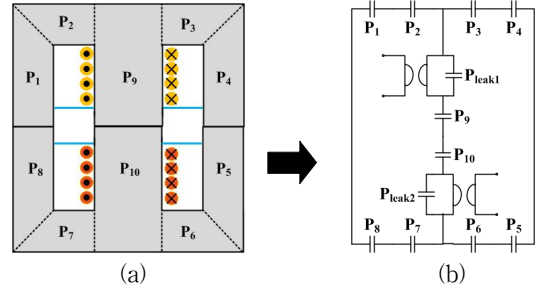


그림 4. 변압기 자기회로 모델링

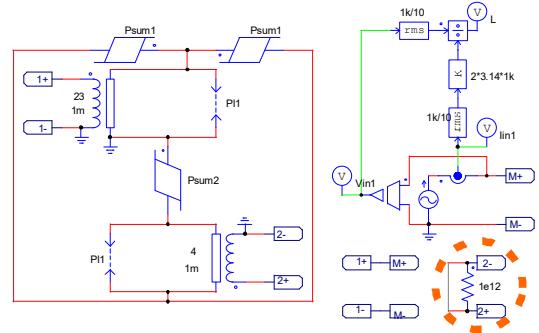


그림 5. PSIM을 이용한 변압기 자기회로 모델링화 및 누설 인덕턴스를 구해낸다. 이 때 Linear Core (Psum1),(Psum2)의 각 변수 값은 1.923×10^6 , 6.38×10^6 이고 Leakage Path (P1)의 변수값은 2.428×10^8 이다.

실제 구현한 LLC 변압기와 PSIM 시뮬레이션을 통한 누설 및 자화 인덕턴스 차이를 표 2를 통해 나타내었다. 표를 보면 실제 측정값과 제안방법으로 시뮬레이션 한 값의 오차가 약 17% 내외로 나옴을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 변압기 사양만을 이용해서 회로상수를 추출하였고 PSIM Magnetic Circuit 라이브러리를 사용해 등가회로 모델을 제안하였다. 제안모델은 기본 변압기 사양만을 알고 있으면 기존 방식보다 간단하고 빠르게 회로상수를 추출할 수 있으며 실제 변압기 설계시 나오는 값과 시뮬레이션에서 나오는 값의 오차율이 약 17% 정도 나왔다. 향후 Parameter Sweep 기능과 결합하여 변압기 설계도구로 발전시킬 예정이다.

참고 문헌

- [1] Lloyd Dixon, "Deriving the Equivalent Electrical Circuit form the Magnetic Device Physical Properties," Oct. 1994
- [2] David C. Hamill, "Lumped Equivalent Circuits of Magnetic Components: The Gyrator Capacitor Approach," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 8, no.2, pp. 97 103, Apr. 1993
- [3] De Simone, C. Adragna, C. Spini, "Design guideline for magnetic integration in LLC resonant converters," International Symposium on Power Electronics, pp. 950 957, 2008