

저자 (Authors)	최성진
출처 (Source)	전력전자학회지 21(2) , 2016.4, 23-28 (6 pages) KIPE MAGAZINE 21(2) , 2016.4, 23-28 (6 pages)
발행처 (Publisher)	전력전자학회 THE KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS
URL	http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE06665103
APA Style	최성진 (2016). LTSPICE와 변압기 등가회로모델. 전력전자학회지, 21(2), 23-28.
이용정보 (Accessed)	203.250.84.*** 2017/08/01 16:15 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

특집 : 전력전자 시뮬레이션 툴: 마그네틱소자의 설계 및 해석

LTSPICE와 변압기 등가회로모델

최 성 진

(울산대 전기공학부 교수)

회로 시뮬레이션 툴을 이용한 변압기 모델링은 가장 많이 사용되는 방법이 될 것이다. 본고에서는 자기저항 기반으로 주어진 변압기를 집중정수등가모델로 구성하고, 이를 회로 시뮬레이션 하는 절차를 정리해본다.

1. 서 론

절연형 컨버터 회로를 해석하기 위해서 변압기의 모델링은 필수적이다. 본 원고의 목적은 변압기를 자기저항과 변압기 모델을 사용하여 모델링 하는 방법에 대해 말하고 이를 LTSPICE라는 시뮬레이션 툴을 이용하여 어떻게 회로도로 구성하고 시뮬레이션 하는지에 대해 소개하는 것이다. 일반적으로 모델링이란 시스템의 상태를 해석하기 위해 그 시스템을 수학적 방정식으로 표현하는 것을 말한다. 이상적인 변압기는 커플링계수 k 를 1로 보고 단순히 1차측 전압은 턴비 비례, 전류는 턴비 반비례해서 2차측으로 내보낸다. 그러나 실제 시스템의 경우에는 코어의 물성이나 형상 및 권선구조에 따라 누설 및 자화 성분이 존재하므로 이를 고려하도록 변압기를 모델링 한다.

변압기를 모델링 하는 방법은 여러 가지가 있는데 통상 자기등가모델을 이용해서 변압기를 전기 등가회로로 변환한다. 2장에서는 다양한 전기적 등가회로 형태로 변환하는 방법을 기술한다. 한편, 도출된 등가회로 모델은 회로시뮬레이션 프로그램을 통해 구현함으로써 그 의미를 가진다. 여기서는 시

표 1 전기와 자기변수간 유사성

electrical	magnetic
voltage (v[V])	(magnetomotive) force (F[A])
current (i[A])	flux (Φ [Wb])
resistance ($R[\Omega]$)	reluctance (\mathcal{R} [H ⁻¹])
conductivity (σ [S/m])	permeability (μ [H/m])

뮬레이션 프로그램 중 가장 최신의 SPICE엔진을 채용하고 있는 Linear Technology사의 LTSPICE를 사용하여 모델을 구현해 본다. 따라서 3장에서는 LTSPICE의 간단한 개요와 LTSPICE로 이상적인 변압기 블록 구현법에 대해 설명하고 변압기 시뮬레이션에 대해 서술한다. 또한, 4장에서는 실제 변압기의 사례를 하나 예로 들어 상기 언급한 모델링 방법을 적용해 보도록 하자.

2. 변압기 모델링

2.1 전기-자기 유사성(Analogy)

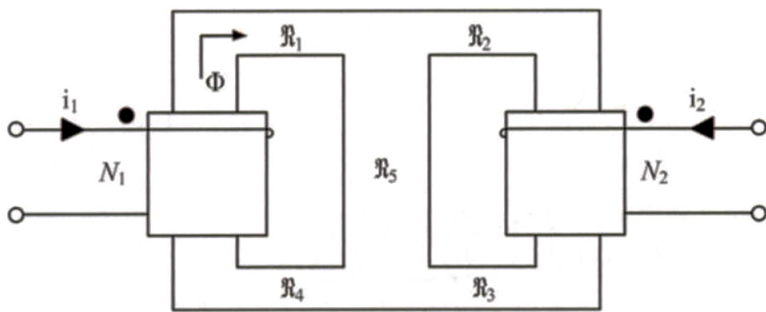
유사성이란, 둘 사이에 서로 비슷한 성질을 나타내는 것으로 전기와 자기 측면에서 보면 서로 다른 물리량간에 수식 표현이 유사함이 있음을 확인할 수 있다.⁽¹⁾ 표 1에 전기회로와 자기회로의 대표적인 유사성 관계가 나타내 있다. 주요변수로는 전압은 기자력으로 전류는 자속으로 유사성이 있음을 확인할 수 있다.

2.2 쌍대성(Duality) 원리

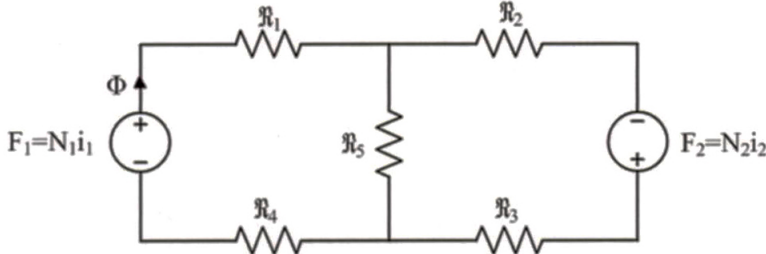
일반적인 회로관계의 쌍대성은 1949년 E. Colin Cherry에 의해 연구되었다.⁽²⁾ 쌍대성이란 두 개의 다른 변수가 같은 수학적 관계를 취하는 것을 의미하는 것으로 한 공식에서 성립하는 모든 결과가 쌍대 공식인 수식에서도 여전히 성립하는 것을 말한다. 표 2에는 회로관계의 쌍대성 관계가 나타나 있다. 대표적으로 노드는 망으로 망은 노드로 변환하는 걸 확인할 수 있다.

표 2 전기, 자기회로에서의 쌍대성 변환

node ↔ loop
current (i[A]) ↔ voltage (v[V])
flux (Φ [Wb]) ↔ force (F[A])

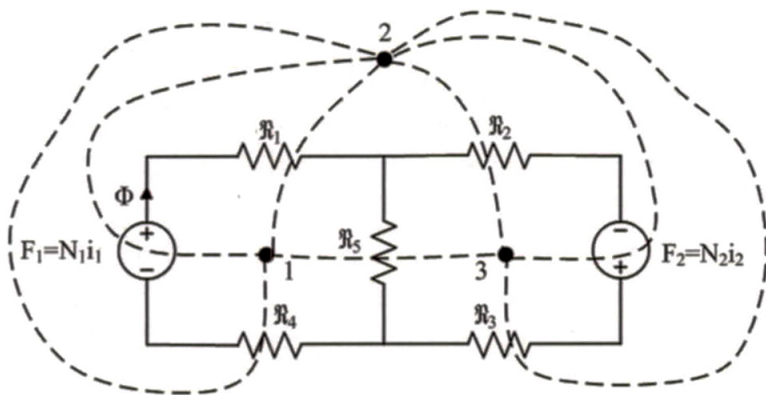


(a) 변압기 구조

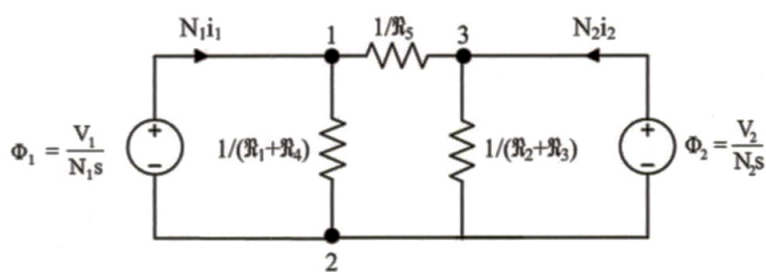


(b) 자기저항 모델

그림 1 변압기 모델링



(a) 이전



(b) 이후

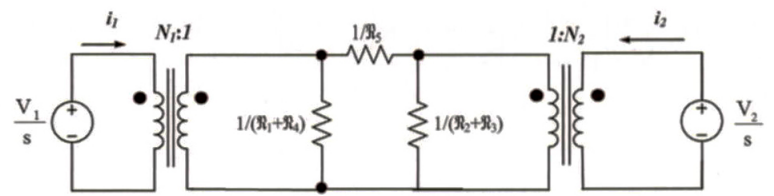
그림 2 쌍대성 원리 적용

2.3 자기 등가모델링 절차

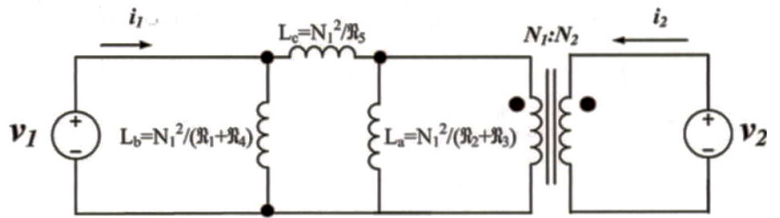
먼저 그림 1 (a)와 같은 일반적인 변압기 형태를 가정하자. 모델링을 위해 먼저 코어의 각 부분을 자기저항(\mathcal{R})으로 설정하고 권선이 감겨있는 부분은 기자력(F)으로 지정한다. 그림 1 (b)를 보면 자기저항과 기자력으로 변압기가 모델링 되어있는 것을 볼 수 있다. 자기저항 \mathcal{R} 은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (1)$$

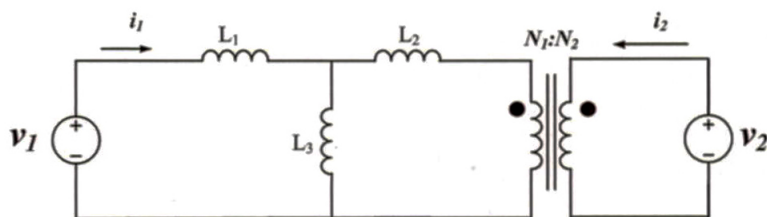
여기서 l 은 자속방향의 코어의 길이, A 는 자속방향에 직교하



(a)



(b)



(c)

그림 3 전기 등가모델 도출 절차

는 코어의 면적을 의미한다.

이렇게 변환된 모델은 그림 2 (a)와 같이 마디는 망으로 망은 마디로 바꾸는 쌍대성 원리를 이용해서 한번 더 변환 하는데 이는 회로영역에서 단자 전류 및 전압 관계식을 편리하게 도출하기 위함이다. 그림 2 (b)를 보면 변환과정에서 기자력(F)은 전류 형태로 변환되고 자속(Φ)은 전압의 적분형태로 변환되는 걸 확인할 수 있다. 여기서 s 는 라플라스 변환의 복소변수를 나타낸다. 자속을 각 변압기 모델로 변환하면 그림 3 (a)와 같이 나타내어진다.⁽³⁾ 1차측과 2차측 각 턴 수 N_1 과 N_2 를 하나의 이상적인 변압기로 만들고 각 자기저항을 인덕터로 식(2)를 이용하여 바꾸면 그림 3(b)와 같이 나타난다. 이를 델타-와이 변환을 적용하여 그림 3(c)와 같이 바꾼다. 인덕터의 델타-와이 변환식은 식(3)-(5)를 이용한다.

$$L = \frac{N^2}{R} \quad (2)$$

$$L_1 = \frac{L_b L_c}{L_a + L_b + L_c} \quad (3)$$

$$L_2 = \frac{L_c L_a}{L_a + L_b + L_c} \quad (4)$$

$$L_3 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b + L_c} \quad (5)$$

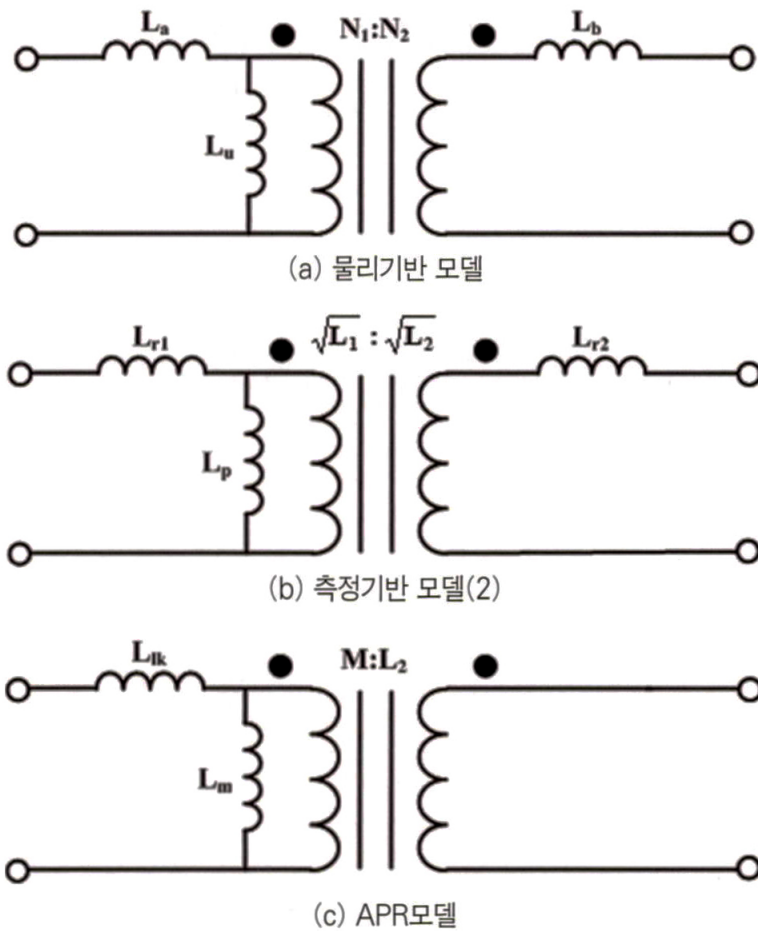


그림 4 변압기 전기적 모델링 형태

2.4 다양한 전기적 등가회로 형태

그림 3(c)와 같이 델타-와이 변환을 한 등가회로에서 L_2 를 2차측으로 넘기면 그림 4(a)와 같이 변환할 수 있다.⁽⁴⁾ 여기서 L_a 는 L_1 과 같고 L_u 는 L_3 와 같고 L_b 는 아래 식과 같다.

$$L_b = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 L_2 \quad (6)$$

L_a 는 1차측의 누설인덕턴스(leakage), L_b 는 2차측의 누설인덕턴스, L_u 는 자화인덕턴스(magnetizing)를 의미한다. 여기서 L_a , L_b , L_u 는 모두 자기저항과 권선비로 계산이 가능하므로 이 모델을 변압기의 물리기반모델이라고 하며 따라서 코어물질과 구조 및 권선비를 알 때 유용하다.

그러나 일반적으로 변압기가 함침되어 있어서 변압기 실제 권선비를 알기 어렵고 1차측과 2차측 자기인덕턴스(self inductance) 그리고 상호인덕턴스(mutual inductance) M 의 측정치만 알 수 있다. 이런 경우에는 그림 4(b)와 같은 등가회로를 사용한다. 이는 이상변압기가 물리적인 권선비로 구성되어 있지 않고 각 1차 및 2차측의 자기인덕턴스에 루트를 씌운 형태로 구성되어 있다. 그림 4(b)에서 L_{r1} 과 L_{r2} 그리고 L_p 는 식(7)-(9)와 같다.

$$L_{r1} = (1-k)L_1 \quad (7)$$

$$L_{r2} = (1-k)L_2 \quad (8)$$

$$L_p = kL_1 \quad (9)$$

위 식에서 k 는 커플링계수로 아래와 같이 M 과 L_1, L_2 의 기하 평균 비로 정의 된다.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (10)$$

이 경우 L_{r1} , L_{r2} , L_p 는 측정치를 포함하고 있으므로 이를 측정기반모델이라고 할 수 있으며 변압기 내부구조를 모를때도 모델링이 가능한 장점이 있다. 만일 1-2차 권선이 대칭이라면 위의 두 모델은 정확히 일치한다.⁽³⁾

한편, 그림 4(c)와 같은 변압기 등가회로가 있는데 이는 APR(All-Primary Referenced)모델로 변압기의 모든 성분을 1차측에 두고 누설 및 자화 인덕턴스를 보는 해석방법이다. 여기서 이상변압기의 턴비는 M 과 L_2 임에 유의한다. 그림에서 L_{lk} 은 누설 인덕턴스 L_m 은 자화 인덕턴스를 말하며 식 (11), (12)과 같이 계산해서 구하며 소자수가 적으므로 회로 해석에 좀 더 유리하다.

$$L_{lk} = (1-k^2)L_1 \quad (11)$$

$$L_m = k^2 L_1 \quad (12)$$

3. LTSPICE 시뮬레이션 방법

3.1 LTSPICE 개요

LTSPICE는 Linear Technology사에서 배포하는 시뮬레이션 툴로 원래 SwitcherCAD라 불렀다. 일반적으로 많이 사용하는 PSPICE는 SPICE 2G6버전 엔진을 사용하는 반면 LTSPICE는 가장 최신의 SPICE 3E버전 엔진 기반으로 그 성능이 더욱 우수하다. 한편, 기존 SPICE에서는 소자의 모델을 변경한 후 라이브러리 속성이 회로도에 드러나지 않았지만, LTSPICE에서는 넷리스트(Netlist)가 외부로 드러나 어떤 소자가 어떻게 모델링이 되어있는지 한눈에 확인할 수 있다. 무엇보다 LTSPICE는 기능제한이 전혀 없이 무료로 다운로드 사용할 수 있다는 큰 장점이 있다. 따라서 누구나 쉽게 접근하고 이용할 수 있는 LTSPICE 시뮬레이션 툴을 선정하여 변압기를 구현 해보도록 하자. 본 원고에서 사용한 버전은 LTSPICE IV이다.

3.2 이상적인 변압기 블록 구현법

LTSPICE의 이상적인 변압기 블록 구현은 두 가지로 가능

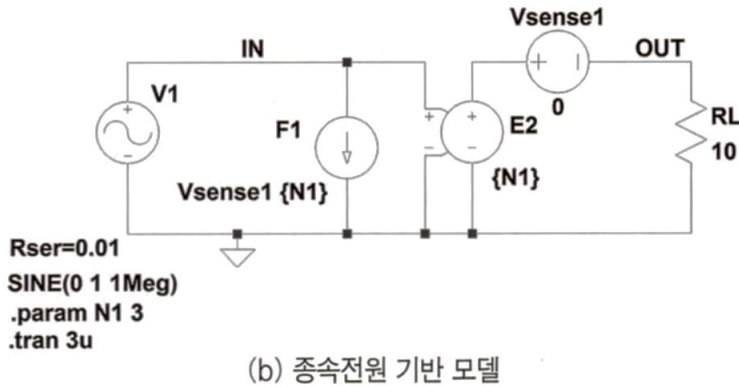
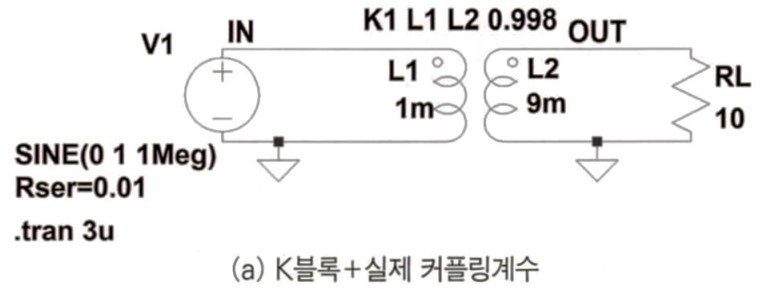
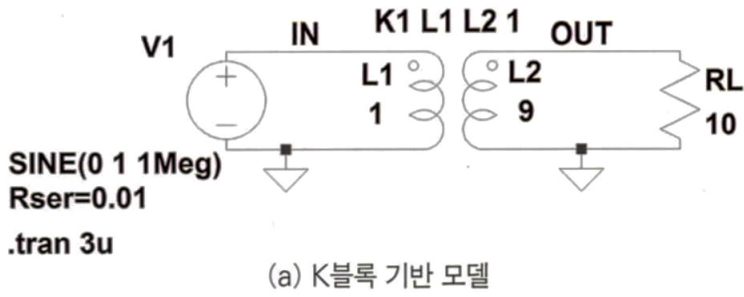


그림 5 이상적인 변압기 블록

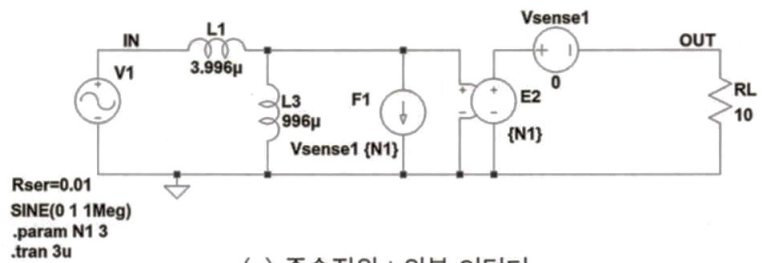


그림 6 실제 변압기 블록 구현방법

표 3 샘플 변압기 사양 (ETD34)

parameter	value
effective magnetic cross section(A_e)	1cm ²
effective magnetic path length(l_e)	10cm
magnetic field constant(μ_0)	$4\pi \times 10^{-7}$
relative permeability(μ_r)	3000(ferrite) 1(air)
breadth(b_w)	2.5cm
height(h_w)	0.8cm
Mean Length Turn(MLT)	6cm
num. of turns primary(N_1)	20
num. of turns secondary(N_2)	2

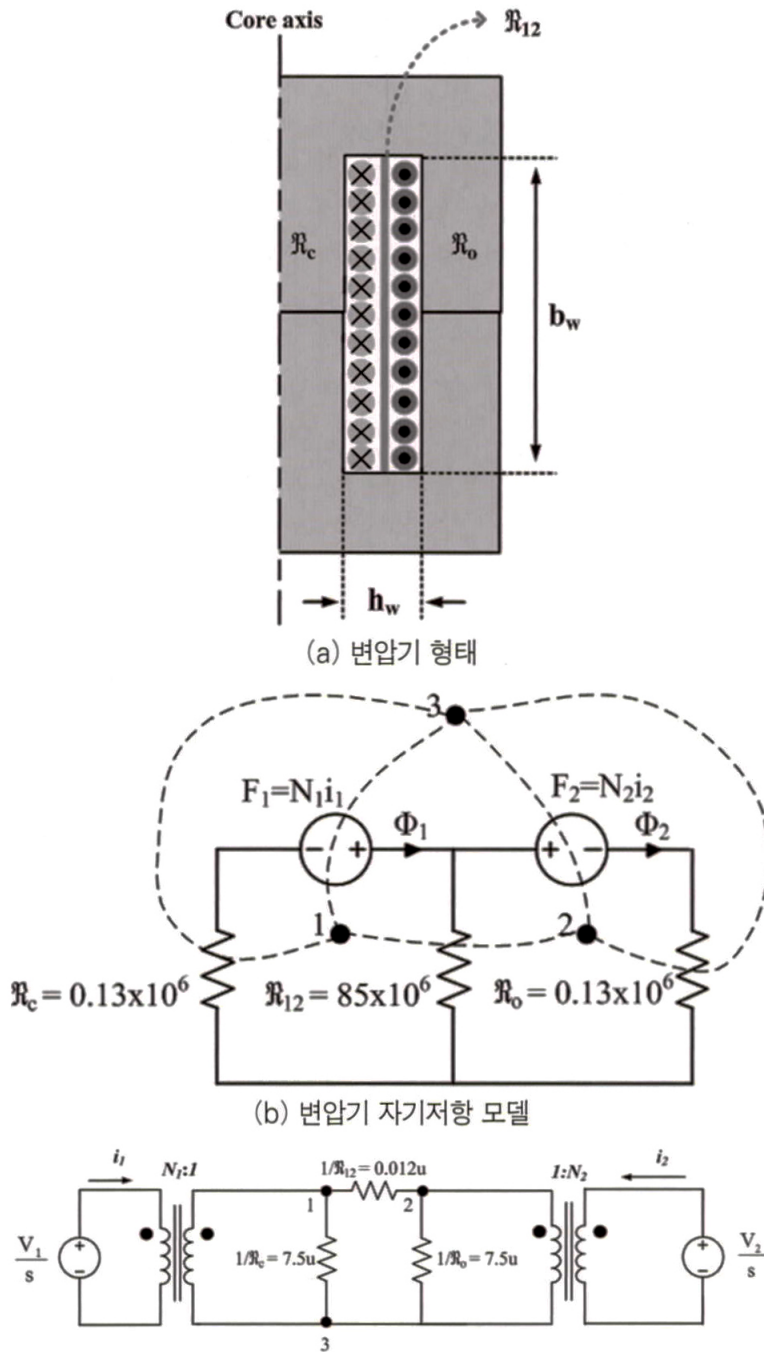
하다.^[4] 이때, 그림 5(a)처럼 커플링계수 K를 1로 두고 1차측과 2차측 자기 인덕턴스를 아주 크게 해서 턴비만 맞추는 방법과, 그림 5(b)처럼 가변전압원(Voltage-controlled Voltage Source, VCVS) 및 가변전류원(Current-controlled Current Source, CCCS)을 함께 사용하는 방법이 있다. 각 변압기는 이상적인 1:3 변압기 형태이다. 그림 5(b)의 동작 원리는 2차측에 있는 Vsence1과 F1의 전류원이 하나의 CCCS로 동작한다. E2는 VCVS로 1차측의 전압을 턴비를 곱해 2차측으로 넘겨주는 역할을 한다.

앞에서 말한대로 LTSPICE 툴을 사용하면 각 소자 및 시물레이션 조건이 모델파라미터 및 명령어의 조합으로 나타나게 됨을 그림 5에서 확인할 수 있다. 여기서 마그네틱소자의 결합을 표현하는 K블록을 써서 K1 L1 L2 1라고 나타내는데, L1 L2는 1차측 2차측의 자기인덕턴스를 말하고 마지막 1은 커플링계수가 1이라는 의미이다. 커플링계수는 -1에서 1 범위 내에서 설정 가능하다. 그리고 sine(0 1 1Meg)는 입력 전원의 최대전압이 1V이고 주파수는 1MHz라는 의미이다. LTSPICE 특성상 DC전압원 형태의 소자라도 교류(sine)설정을 하면 교류 전압원처럼 사용 가능하다. 그리고 Rser은 전압원의 내부저항을 나타내고 tran은 시물레이션 시간을 설정하는 명령어이다.

3.3 변압기 시물레이션

따라서, 변압기 시물레이션 방법으로는 세가지 가능하다. 하나는 그림 6(a)에 나타나 있는 형태로 그림 5(a)와 형태가 동일하지만 K블록만 사용하여 L1과 L2에 각 인덕턴스를 값을 넣고 커플링계수를 변경시키는 방법이다. 나머지는 그림

6(b),(c)로 3.2장에 나와있는 이상적인 변압기 형태에서 외부 인덕터를 추가한 시물레이션 방법이다. 먼저 그림 6(a)를 보면 커플링계수가 0.998로 되어 있다. 이렇게 설정 후 시물레이션 하면 누설인덕턴스 및 자화인덕턴스가 식(11),(12)와 같이 반영되어 시물레이션 된다. 그리고 그림 6(b),(c)를 보면 변압기의 많은 전기적 등가회로 중 가장 간단한 APR모델을 LTSPICE 시물레이션 한 것을 알 수 있다. 이때 각 인덕터의 값은 2.4장에서 언급한 APR모델의 각 소자의 계산 방법을 고려하여 설정한다.

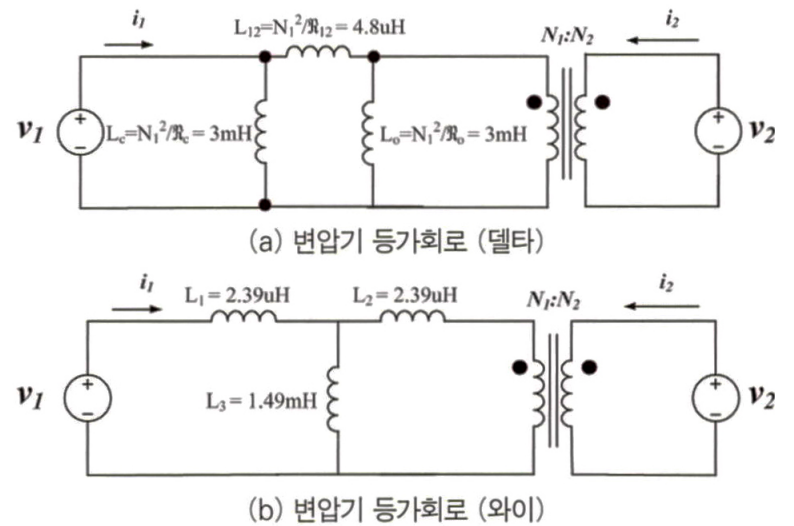


(a) 변압기 형태
(b) 변압기 자기저항 모델
(c) 변압기 모델+등가회로
그림 7 ETD34 변압기 모델링

4. 실제 적용사례

변압기 모델링이 실제의 경우에서 어떻게 적용되는지 보여 주기 위해 그림 7(a)과 같은 변압기를 사례로 선정하였다. 그림에서 나타난 변압기의 감긴 형태는 포갠권선방식(one above another)이고 코어는 ETD34를 사용하였고 그 외 자세한 변압기 사양은 표 3에 제시하였다. 먼저 변압기를 자기저항을 이용하여 그림 7(b)와 같이 등가회로로 변환한다. 여기서 R_c 와 R_o 의 값은 같고 식(13)과 같이 계산하고 1차측과 2차측 사이에 있는 R_{12} 는 식(14)와 같이 계산해서 구한다.

$$R_c = R_o = \frac{l}{\mu A} = \frac{0.5l_e}{\mu_0 \mu_r A_e} \quad (13)$$



(a) 변압기 등가회로 (델타)
(b) 변압기 등가회로 (와이)
그림 8 ETD34 변압기 전기적 등가모델 도출

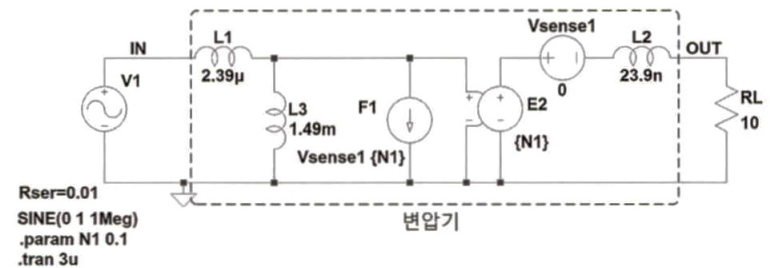


그림 9 ETD34 변압기 최종 LTSPICE 등가회로

$$R_{12} = \frac{l}{\mu A} = \frac{b_w}{\mu_0 \mu_r (MLT \times 0.5h_w)} \quad (14)$$

여기서 각 단위는 미터(m)로 변환해서 계산한다. 변환한 회로는 변압기 모델을 사용하기 위해 쌍대성 원리를 이용해서 그림 7(c)와 같이 변경한다. 이를 다시 식(2)를 이용해 그림 8(a)와 같이 인덕터로 변환 후 델타-와이 변환식 식(3)-(5)를 이용하여 바꾸면 그림 8(b)와 같이 된다. 그림 8(b)를 그림 4(a)처럼 변경해서 LTSPICE 소자를 이용해 만들면 최종적으로 그림 9와 같이 된다.

5. 결론

본 원고에서는 자기저항 모델에서 출발하여 쌍대성 원리를 이용하여 최종적으로 전기적 등가회로 모델을 도출하는 변환하는 과정을 상세하게 기술하였고 이를 LTSPICE로 시뮬레이션 하는 방법을 연계하여 소개하였다. 이러한 회로시뮬레이션 기반 변압기 모델링 방법은 간단히 변압기의 동작을 비교적 정확히 표현할 수 있어 해석시간이 짧고 비용이 저렴하다는 장점이 있는 반면에 모델링 과정에서 볼 수 있듯이 쌍대성 원리를 적용해서 모델링해야 하기 때문에 단순한 변압기 구조가 아닌 복잡한 형상에서는 모델링하기가 다소 까다롭다는 단점도 있음을 고려해야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] Lloyd Dixon, "Deriving the Equivalent Electrical Circuit form the Magnetic Device Physical Properties," Oct. 1994.
- [2] E. C. Cherry, "The Duality Between Electric and Magnetic Circuits and the Formation of Transformer Equivalent Circuits," Proc. Physical Soc. London, Vol 62B, pp. 101-111, Feb, 1949.
- [3] James W. Nilsson and Susan A. Riedel, "Electric Circuits : Appendix C," Pearson, 9th edition, 2012.
- [4] Mike Engelhardt, "Using transformers in LTspice/sw-itcherCAD |||," Linear Technology Magazine, pp. 23-24. Sep, 2006.

〈 필 자 소 개 〉



최성진(崔城振)

1996년 서울대 전기공학부 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박). 2008년~2011년 삼성전자 영상디스플레이 사업부 책임 및 수석연구원. 2011년~현재 울산대 전기공학부 조교수. 당 학회 편집위원.