

# Core Coefficient 기반의 투자율 다변화 시뮬레이션을 이용한 공진형 컨버터 효율분석법

성원용, 오창열, 조남진, 김윤성, 이병국\*  
성균관대학교 정보통신대학

## Development of a Simulation Platform for Efficiency Analysis of Resonant Converters Based on Core Coefficient

Won Yong Sung, Chang Yeol Oh, Nam Jin Cho, Yun Sung Kim, Byoung Kuk Lee\*  
College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 자성체의 직류중첩 (DC Bias) 특성이 영향을 미치는 공진형 컨버터의 효율을 계산하기 위한 시뮬레이션을 구성한다. 이를 위해 PSIM의 saturable core를 이용하여 core coefficient를 실제 설계 사양과 동일하게 적용 및 모델링한다. 시뮬레이션 결과를 통해, 자성체에 흐르는 전류의 크기에 따라 변화하는 투자율이 공진형 컨버터의 동작 및 효율에 미치는 영향을 분석한다.

### 1. 서론

화석연료의 단가 상승, 에너지 고갈 등이 사회적인 이슈가 되면서 전력변환 효율 및 전력 밀도의 향상을 위해 다양한 측면에서 연구가 진행되고 있다. 이 같은 연구과정에서 시간 및 비용절감, 결과예측을 위해 다양한 시뮬레이션 프로그램들이 사용되고 있다. PC를 이용한 시뮬레이션은 빠른 구동을 위해 많은 소자들을 이상적이고, 단순화된 모델로 구성하는 것이 일반적이다. 이러한 방식으로 시뮬레이션을 수행할 경우, 시뮬레이션을 빠르게 수행할 수 있다는 장점이 있지만 실제 회로에서는 다양한 변수들이 존재하기 때문에 시뮬레이션 결과와 실험 결과 사이에 차이가 발생하여 정확한 검증, 예측을 하는 것이 어렵다. 이러한 문제점들은 대전류 어플리케이션에서 더 뚜렷하게 나타나게 된다.<sup>[1,2]</sup>

따라서 본 논문에서는 전력전자 시뮬레이션 툴인 PSIM의 자성체 모델링 툴을 이용하여 실제 인덕터의 특성들을 시뮬레이션에 적용한다. 또한 이를 DC Bias 특성이 나타나기 쉬운 저전압 대전류 위상천이 풀브릿지 컨버터 (Phase shift Full Bridge Converter, PSFB)와 같은 공진형 토폴로지에 적용하고, 제안된 모델과 이상적인 모델의 효율 비교를 통해 그 타당성을 검증한다.

### 2. 투자율의 변화를 고려한 시뮬레이션

#### 2.1 인덕터의 DC-Bias 특성

자성체의 DC Bias 특성은 인덕터를 통해 흐르는 전류의 평균값이 큰 경우, 매우 강한 자화력으로 인해 그림 1과 같이 포화 자속밀도와 근접하여 히스테리시스 곡선이 발생하는 경우에 인덕턴스가 크게 저하된다. 일반적으로 시뮬레이션에 사용되는

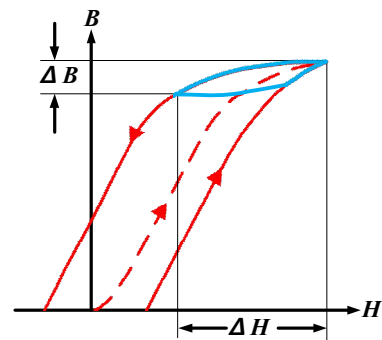


그림 1. DC-Bias 특성.

Fig. 1. Characteristic of DC-Bias.

인덕터는 이상적으로 동작하여 포화 및 DC Bias 특성이 나타나지 않기 때문에 실제 회로에서 발생하는 현상을 확인하고, 그로 인한 성능의 변화를 확인하기에는 적합하지 않다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 PSIM의 magnetic elements를 이용하여 인덕터를 구성하고 이를 토대로 시뮬레이션을 수행하였다. saturable core를 이용하여 인덕터의 코어를 모델링 하였고, winding block을 이용하여 권선 수 및 copper loss를 모델링 하였다.

Saturable core를 이용하여 인덕터의 코어를 모델링 하기 위해서는 Inductance factor ( $A_L$ ), Resistance for Losses, Coefficient phi saturation ( $\phi_{sat}$ ),  $K1$ ,  $Kexp1$ ,  $K2$ ,  $Kexp2$  등 7개의 변수를 넣어야 한다. 먼저  $A_L$ 은 턴당 발생하는 인덕턴스의 크기를 정하는 상수로, 코어의 비투자율( $\mu_r$ )과 진공상태에서의 투자율( $\mu_0$ ), 코어의 유효 단면적( $A_c$ )과 자로길이 (MPL)을 이용하여 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$A_L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A_c}{MPL} \quad (1)$$

$$\phi_{sat} = B_{sat} \cdot A_c \quad (2)$$

또한 Resistance for Losses는 코어의 히스테리시스 루프의 넓이를 결정하며, 식 (2)에 나타난  $\phi_{sat}$ 은 코어에 저장할 수 있는 최대 자속을 나타낸다.  $K1$ ,  $Kexp1$ ,  $K2$ ,  $Kexp2$ 는 인덕터의 B H 곡선의 변곡점을 결정하기 때문에 코어의 제조사에서 제공하는 Permeability와 DC Bias 사이의 관계 그래프를 통해 설정해야 한다.

표 1 시스템 사양

Table 1 System specifications

Parameter	Value
Input Voltage	270 400 [V]
Output Voltage	14 [V]
Output Current	30 120 [A]
Switching Frequency	100 [kHz]
Turn Ratio ( $N_p : N_s$ )	18 : 1

## 2.2 시뮬레이션 설계

인덕터의 DC Bias 특성이 뚜렷하게 나타나며, 그로 인해 동작 및 설계에 많은 영향을 받는 저전압 대전류 PSFB에 구성된 모델링을 적용한다. 표 1과 같은 전기적 사양을 가진 PSFB의 손실 분석을 위한 시뮬레이션을 구성하고 출력 인덕터의 DC Bias 특성에 의한 투자율 변화에 초점을 맞춰 손실분석을 수행한다. 또한 입출력 전압을 고려하여 턴 비를 설정하였다. 시뮬레이션에 사용된 전력반도체 소자 및 자성체의 사양은 표 2와 같고, 반도체 소자는 PSIM에서 제공하는 Thermal Module로, 인덕터는 Magnetic elements로 구성하였다. 그림 2는 표 1과 표 2를 이용하여 설계한 시뮬레이션 플랫폼을 나타낸다.

표 2 구성 부품 사양

Table 2 Device specifications

Device	Parameter	Value
MOSFET (IPW60R070)	$R_{ds(on)}$	0.06 [ $\Omega$ ]
	$t_{off}$	88 [ns]
Diode (DSEI 2x61)	$V_F$	0.88 [V]
	$t_{tr}$	35 [ns]
Inductor (CH270125)	turns	4 [turns]
	$A_L$	157 [ $nH/N^2$ ]

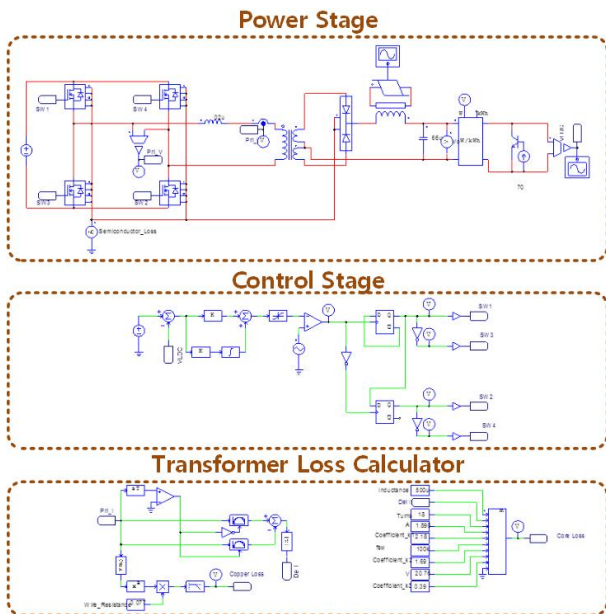


그림 2. 시뮬레이션 회로도.

Fig. 2. Schematic diagram of proposed simulation platform.

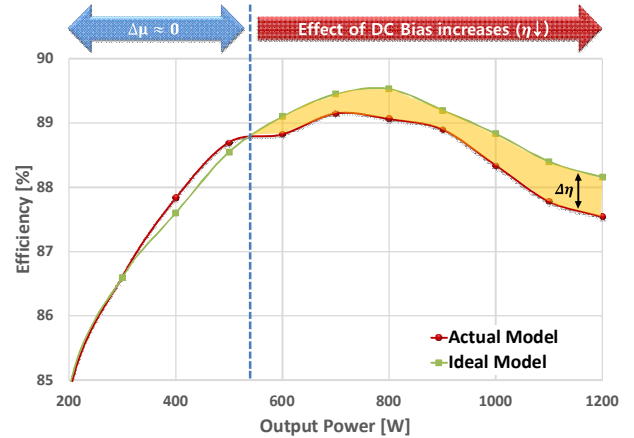


그림 3. 시스템 효율 곡선 ( $V_{in}=350V$ ,  $V_{out}=14V$ ).

Fig. 3. System efficiency curve ( $V_{in}=350V$ ,  $V_{out}=14V$ ).

그림 3은 시뮬레이션의 결과를 통해 DC Bias 특성이 고려된 인덕터와 이상적인 인덕터가 각각 적용된 경우의 효율 변화를 나타낸다. 그래프에서 알 수 있듯이, 이상적인 경우와 DC Bias 특성을 고려했을 때의 효율이, 최대 0.6%까지 차이가 난다. 이는 부하가 커질수록 인덕터의 DC Bias 특성으로 인해 투자율이 저하되어 인덕턴스의 크기가 작아지면서 전류의 최대치가 더 커지게 되어 효율이 저하되는 것이라고 볼 수 있다.

## 3. 결론

본 논문에서는 인덕터의 DC Bias 특성을 반영한 컨버터의 손실을 PSIM을 이용하여 시뮬레이션 하였다. Saturable core의 coefficient 설정을 통해 DC Bias 특성을 가지는 인덕터를 모델링 하였고, 이를 손실 시뮬레이션에 적용하였다. 또한 DC Bias 특성이 적용된 결과와 이상적인 인덕터가 적용된 결과를 비교하여 제안된 모델의 타당성을 검증하였다. 이는 시스템 설계 시, 전력밀도와 효율의 trade off 지점을 찾는 데 유효할 것이며, 추후 시뮬레이션과 실험의 비교분석을 통해 시뮬레이션의 정확성을 향상시킬 수 있을 것이다.

본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No.10038825)입니다.

## 참고 문헌

- [1] Bong Gi You, Jong Soo Kim, Byoung Kuk Lee, Gwang Bo Choi and Dong Wook Yoo, "Optimization of Powder Core Inductors of Buck Boost Converters for Hybrid Electric Vehicles", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 527-534, 2011.
- [2] 이종필, 이경준, 신동철, 김태진, 유동욱, 유지윤, "DC중첩 특성 분석이 가능한 PWM 컨버터용 인덕터 시험장치", *전력전자학회 2012년도 전력전자학술대회 논문집*, 2012.7, 95-96.