

# 전기자동차 급속 충전기를 위한 커플드 인덕터를 적용한 고효율 2상 인터리브드 벅 컨버터 설계

강현지, 조영훈  
건국대학교

## High efficiency two-phase interleaved buck converter with coupled inductor design for EV rapid charger applications

Hyunji Kang, Younghoon Cho  
Konkuk University

### ABSTRACT

본 논문은 전기 자동차 급속 충전기 구현을 위한 커플드 인덕터 기반 18 kW급 2상 인터리브드 벅 컨버터 설계에 관하여 설명한다. 전류 리플 및 물리적인 크기 감소를 위한 2상 커플드 인덕터와 고효율 달성을 위한 Silicon Carbide(SiC) MOSFET 기반 2상 인터리브드 벅 컨버터의 설계에 관하여 상세히 기술한다. 제안하는 2상 인터리브드 벅 컨버터의 동작을 위하여 모의 실험과 실험을 진행하였고 이론적인 설계 방법과 실제 실험 결과가 일치하는 것을 확인하였다.

### 1. 서론

최근 환경과 신재생 에너지에 대한 관심이 높아짐에 따라 전기 자동차에 대한 연구와 시장이 늘어가고 있는 추세이다. 이에 따라 배터리와 충전기 기술이 중요하게 여겨지고 있다. 전기 자동차의 경우 연료 대신 배터리를 사용하기 때문에 중요성이 더욱 부각된다. 하지만 배터리의 용량이 커질수록 인덕터의 물리적인 크기가 이에 비례하여 증가하는 문제가 발생한다. 따라서 배터리의 용량을 키우면서 인덕터의 물리적인 크기를 감소시키는 것이 중요하다.

본 논문에서는 커플드 인덕터를 적용하여 물리적인 크기 및 전류 리플을 감소시켰으며, Silicon Carbide(SiC) MOSFET을 사용하여 2상 인터리브드 벅 컨버터의 고효율 동작을 확인할 수 있다.<sup>[1]</sup>

### 2. 시스템 설계

#### 2.1절 2상 인터리브드 벅 컨버터 설계

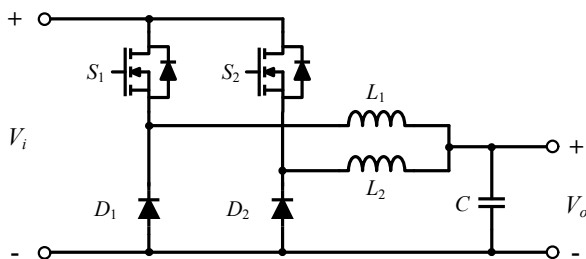


그림 1 일반적인 2상 인터리브드 벅 컨버터

Fig. 1 Two-phase interleaved buck converter

그림 1은 일반적인 2상 인터리브드 벅 컨버터이다. 비동기식 벅 컨버터 회로이며 스위치  $S_1, S_2$ 의 duty 값의 변화에 따라 출력 전압의 값을 조절한다. 출력 전압은 입력 전압의 duty 비의 곱과 동일하며, 아래 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$V_o = D \cdot V_i \quad (1)$$

각 필터 인덕터  $L_1, L_2$ 에 흐르는 전류 리플의 peak to peak 값을 고려하여 인덕턴스를 선정할 수 있다.

$$I_{pp} = \frac{(1-D) \cdot V_o}{L \cdot f_s} \quad (2)$$

식 (2)를 통해 인덕턴스  $L$ 이 클수록, 스위칭 주파수  $f_s$ 가 높을수록 전류 리플이 감소함을 알 수 있다. 인덕턴스 값이 작을수록 과도응답 특성이 향상되지만 정상 상태에서의 전류 리플이 증가한다는 문제점이 발생한다. 또한 전류 리플이 클수록 출력 커패시터에 큰 스트레스를 유발하며 출력 전압의 리플에도 문제가 생길 수 있다. 이러한 문제점들은 인터리빙을 통해 전류 리플을 상쇄함으로써 해결할 수 있다. 그러나 단일 인덕터를 사용하는 것보다 커플드 인덕터를 사용할 때 물리적인 크기뿐만 아니라 전류 리플 또한 감소시킬 수 있기 때문에 본 논문에서는 그림 2와 같이 커플드 인덕터를 적용한 2상 인터리브드 벅 컨버터를 제안한다.<sup>[2]</sup>

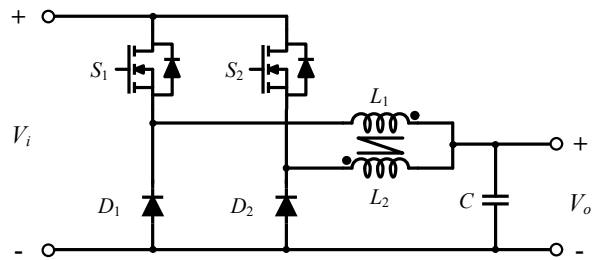


그림 2 커플드 인덕터를 적용한 2상 인터리브드 벅 컨버터  
Fig. 2 Two-phase interleaved buck converter with coupled inductor

#### 2.2절 커플드 인덕터 설계

커플드 인덕터를 설계하기에 앞서, 커플드 인덕터를 적용할 시스템의 사양을 확인하고 인덕턴스를 선정한다. 표 1은 설계하고자 하는 커플드 인덕터의 제정수와 커플드 인덕터 설계값을 나타내었다. 본 논문에서는 그림 3과 같이 EE 코어를 사용

하여 커플드 인덕터를 설계하였다. 커플링 계수는 코어의 형태와 와인딩의 방식에 따라 커플링 계수가 결정된다. 따라서 그림 3과 같이 제작할 경우, 코어의 추가적인 가공이 필요하지 않으며 제작이 매우 용이해진다. 이와 같은 코어 구조와 와인딩 방식의 경우 커플링 계수는 약 0.33이며, 본 논문에서 제안하는 시스템 사양에 적합하다고 판단하였다.<sup>[2]</sup>

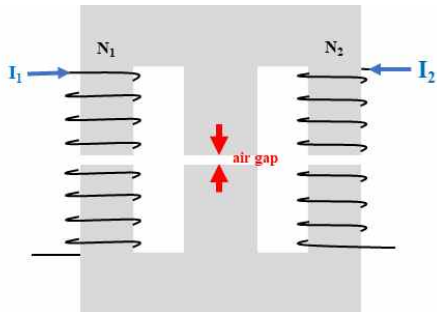


그림 3 커플드 인덕터 구조  
Fig. 3 Coupled inductor structure

표 1 커플드 인덕터 설계 사양  
Table 1 Coupled inductor design conditions

Parameter	Value
자기 인덕턴스	400 $\mu\text{H}$
상호 인덕턴스	120 $\mu\text{H}$
인덕터 한 당 평균 전류	18 A
커플링 계수	0.33
스위칭 주파수	30 kHz
턴 수(설계값)	28

그림 4는 커플드 인덕터 제작을 위한 설계 과정 순서도이다. 인덕터 한 당 흐르는 전류 값을 고려하여 와이어를 선정하였다. AWG 규격을 확인하여 와이어에 흐를 수 있는 허용 전류를 파악한 후 실제 인덕터 전류의 peak 값보다 약 70 - 80 % 여유를 두고 선정하였다.

코어는 커플드 인덕터를 적용할 시스템의 전류 정격을 확인한 후 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 선정하였다. 식 (3)을 이용하여 코어 크기에 따라 정해지는  $A_p$  값을 계산할 수 있으며, 식 (4)는 설계하는 인덕터의 정격전류  $I_{pk}$ 와 최대자속밀도  $B_{max}$ 를 통해  $A_p$ 를 계산할 수 있다. 여기서  $A_c$ 는 코어 단면적,  $W_a$ 는 코어 창면적, 그리고  $K$ 는 winding factor를 나타낸다. 따라서 식 (3)의 값보다 50 - 60 % 여유를 주고 코어 및 코어 스택 수를 결정할 수 있다.

$$A_p = A_c W_a \quad (3)$$

$$A_p = \left( \frac{L I_{pk} I_{dc} 10^4}{420 K B_{max}} \right)^{1.31} \quad (4)$$

인덕터의 포화를 고려하여 공극을 넣어야 하므로 공극 값을 미리 선정한 후 식 (5)를 이용하여 턴 수를 계산한다. 여기서  $l_g$ 는 공극의 길이,  $L$ 은 자기 인덕턴스 그리고  $\mu_0$ 는 초기 투자율을 나타낸다. 각 상의 인덕턴스는 동일하므로 턴 수는 1차측과 2차측 모두 동일하게 설정하였다.

$$N = \sqrt{\frac{L l_g}{\mu_0 A_c}} \quad (5)$$

$$B_{max} = \frac{L I_{pk}}{N A_c} \quad (6)$$

앞서 계산한 값을 대입하여 식 (6)을 통해 자속 포화 여부를

확인할 수 있다. 실제 실험시 자속이 포화할 경우 코어 재선정 및 공극 길이의 조정을 통해 포화를 방지할 수 있다. 코어의 투자율과 크기의 오차, 그리고 코어 열 등의 외적인 요인으로 인해 예상  $B_{max}$  값이 실제 값과 다를 수 있다.

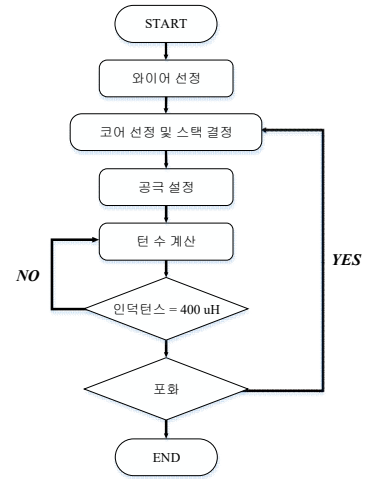


그림 4 커플드 인덕터 설계 과정 순서도  
Fig. 4 Coupled inductor design process diagram

표 2 시스템 사양 및 제작한 커플드 인덕터 사양  
Table 2 Experiment system condition and coupled inductor parameters

Parameter	Value
코어 (재질)	EE 7091C (Ferrite)
스택 수	2
1차측 자기 인덕턴스	426.2 $\mu\text{H}$
2차측 자기 인덕턴스	421.1 $\mu\text{H}$
상호 인덕턴스	133.5 $\mu\text{H}$
커플링 계수	0.315
공극	1.5 mm
턴 수 (1, 2차측 동일)	28
입력 전압 $V_i$	600 V
출력 전압 $V_o$	360 V
용량	14.4 kW
스위칭 주파수	30 kHz

### 3. 실험 결과

#### 2.3절 모의실험 및 실험 결과

커플드 인덕터를 적용한 2상 인터리브드 벡 컨버터에 대해 모의실험과 실험을 진행하였다. 시스템 사양과 제작한 인덕터의 사양은 표 2와 같다. 실험을 진행하기 전 설계하고자 하는 커플드 인덕터의 값과 시스템 사양을 적용하여 모의실험을 진행하였으며 그 결과는 그림 5와 같다. 정격 부하조건 전류 파형을 그림 5에 나타냈으며 이를 실제 실험 결과와 비교할 것이다.

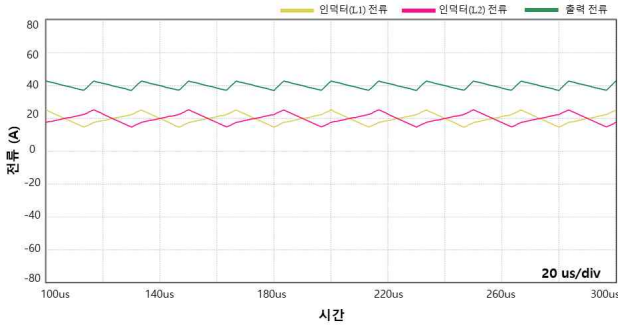


그림 5 14.4 kW 커플드 인덕터 상전류와 출력 전류 모의실험 결과

Fig. 5 Coupled inductor phase current and output current simulation results at 14.4 kW

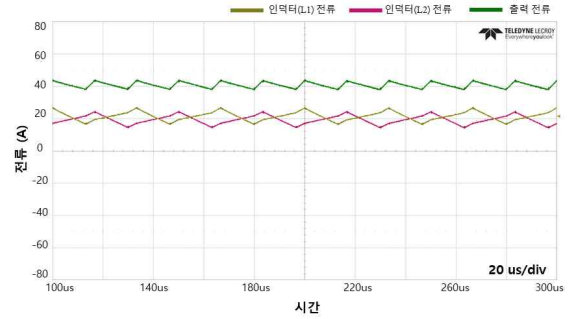


그림 7 14.4 kW에서 설계한 인덕터를 적용하였을 때 인덕터 상전류와 출력 전류 파형

Fig. 7 Coupled inductor phase current and output current waveform with a coupled inductor designed at 14.4 kW

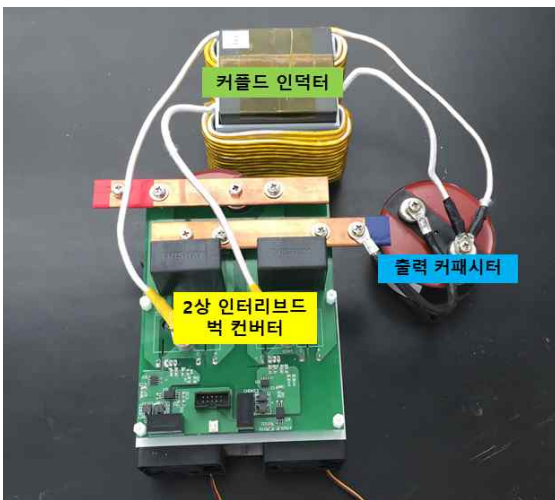


그림 6 실험 구성

Fig. 6 Experimental setup

실험을 위한 시스템은 그림 6과 같이 구성하여 진행하였다. 정격 부하 조건에서의 커플드 인덕터 전류 파형은 그림 7과 같다.

표 1과 2을 비교하여 커플드 인덕터의 설계값과 실제값이 일치함을 확인할 수 있었다. 또한 1.8 kW부터 14.4 kW까지 커플드 인덕터의 동작을 검증하였다. 인덕터 상당 평균 전류가 최대 20 A, 인덕터 peak 전류가 최대 27 A 까지 흘렀으나, 포화가 일어나지 않았다. 이후 정격 부하 조건에서 1시간의 열 포화실험을 추가로 진행하였으나 비이상적인 열 문제와 포화 없이 정상 동작함을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 커플드 인덕터 설계 방법을 실험을 통해 검증하였다.

1.8 kW에서 14.4 kW까지 약 0.9 kW마다 효율을 측정하였다. 2상 인터리브드 벅 컨버터의 입력단과 출력단에 각각 shunt 저항을 추가한 후, 저항의 전압 강하 값으로 흐르는 전류를 계산하여 효율을 측정하였으며 이를 그림 8에 나타내었다. 저항의 전압 강하는 Fluke 289 멀티미터를 이용하여 측정하였으며 이는 DC 전압 측정 오차가 약 0.025 %이므로 효율 측정 결과에 대한 신뢰도는 높다. 그림 8을 통해 약 1.8 kW 이상부터 효율이 99 %를 넘는 것을 확인할 수 있다.

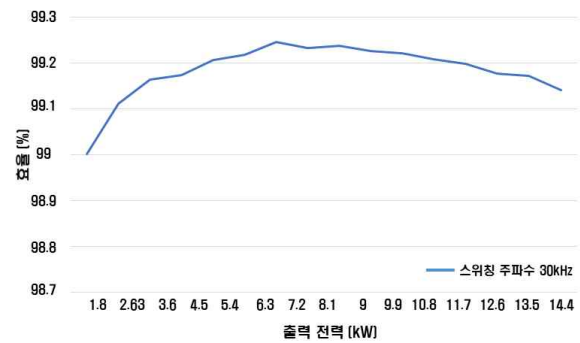


그림 8 스위칭 주파수 30 kHz일 때 출력 전력별 효율

Fig. 8 Efficiency per output power at a switching frequency of 30 kHz

#### 4. 결론

본 논문에서는 커플드 인덕터를 적용한 SiC MOSFET 기반 2상 인터리브드 벅 컨버터를 제안하였다. 설계 과정을 따라 제작한 커플드 인덕터가 정격 부하 조건인 14.4 kW 에서도 정상 동작함을 확인하였다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 커플드 인덕터의 설계 방법에 대해 검증하였다. 또한 SiC MOSFET을 사용하여 2상 인터리브드 벅 컨버터의 효율이 약 1.8 kW 조건부터 99 % 이상을 유지함을 확인하였다.

본 연구는 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20194030202370)

#### 참고 문헌

- [1] Taewon Kang and Yongsug Suh, "Optimized coupling factor design of multiple-phase coupled inductor for minimum inductor current ripple operation in EV charger systems," 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia), Kaohsiung, 2017, pp. 1178-1183.
- [2] Pit-Leong Wong, Peng Xu, P. Yang and F. C. Lee, "Performance improvements of interleaving VRMs with coupling inductors," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 16, no. 4, pp. 499-507, July 2001.