

단상/3상 겸용 22kW OBC용 일체형 변압기 최적 설계

김진학¹, 김기훈¹, 이창섭¹, 나하늘¹, 안찬영¹, 최세완[†], 김현빈²
 서울과학기술대학교¹, LG 마그나²

Optimal Design of Integrated Transformer for Single-Phase/Three-Phase Compatible 22kW OBC

Jinhak Kim¹, Kihoon Kim¹, Changseob Lee¹, Haneul Na¹, Chanyoung Ahn¹,
 and Sewan Choi[†], Hyunbin Kim²

Seoul National University of Science and Technology, LG Magna Co., Ltd.²

ABSTRACT

본 논문에서는 양방향 OBC의 CLLC 공진형 컨버터 고밀도화 달성을 위해 일체형 변압기 최적 설계를 제안한다. 제안하는 일체형 변압기는 기존의 변압기와 공진형 인덕터가 분리된 분리형 방식에서 변압기와 공진형 인덕터를 통합한 일체형 방식을 통해 분리형 변압기 대비 부피를 38.4% 저감하였다. 제안하는 일체형 변압기를 적용한 시작품의 성능 검증을 위해 7.4kW CLLC를 3병렬 구조로 설계하였고, 7.4kW 1모듈을 제작 및 검증하였다. 시험결과 CLLC 컨버터 최대 충전 효율 97.6%를 달성하였다.

1. 서론

자동차 구동용 배터리는 기존 인프라를 고려하여 단상 또는 3상의 계통 전력으로부터 에너지를 공급 받아 차량 내부에 실장되어 있는 OBC를 통해 충전된다. OBC는 접근성을 고려하여 자동차에 상시 탑재되어 있으므로 차량의 연비에 큰 영향을 끼치므로 고효율, 고전력밀도, 경량화 등이 요구된다. OBC에 많이 사용되는 토폴로지로는 양방향 동작 및 넓은 배터리 전압 범위 만족을 위해 DAB 컨버터와 CLLC 공진형 컨버터가 주로 적용된다.^{[1],[2]} DAB 컨버터의 경우 CLLC와 달리 고정주파수로 제어되기 때문에 CLLC에 비해 큰 스위칭 주파수로 설계되어 자기 소자 사이즈를 작게 설계할 수 있다. 그러나 CLLC의 경우 가변 주파수 제어에 따라 작은 주파수 기준에서 설계해야하므로 자기 소자의 사이즈가 비교적 커지는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 CLLC의 고밀도, 경량화를 위한 일체형 변압기 최적 설계를 제안한다.

2. 제안하는 일체형 변압기

그림 1은 제안하는 단상/3상 겸용 OBC의 DC/DC단이며 7.4kW급 CLLC를 3병렬 구조로 설계하였다. 자기 소자 부피 저감을 위해 그림 2 (a), (b)의 각각의 공진탱크를 KCL을 통해 (a) CLLC 공진탱크는 (1), (2)의 식으로 (b) CLLC 공진탱크는 (3), (4)의 식으로 유도하였다. 앞에서 유도된 (1)~(4)의 식으로부터 (5), (6)의 식을 도출한 결과 CLLC의 L_{p1} , L_m , L_{s1} 을 CLLC의 L_r 과 M 으로 치환하여 2차측 공진 인덕터를 설계할 필요 없이 제작하여 자기소자 사이즈 저감이 가능하다.^[3]

3 Parallel CLLC Converter

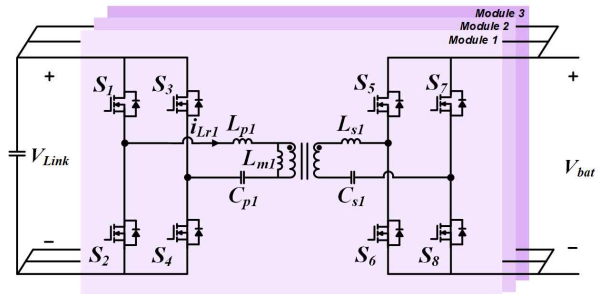
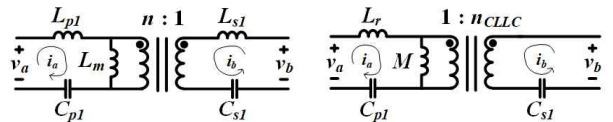


그림 1. 22kW CLLC 컨버터 회로



(a) CLLC 공진 탱크 (b) CLLC 공진 탱크

그림 2. 공진 탱크 등가 회로

$$v_a = (L_{p1} + L_m) \frac{di_A}{dt} + \frac{1}{n} L_m \frac{di_B}{dt} \quad (1)$$

$$v_b = \frac{1}{n} L_m \frac{di_A}{dt} + (L_{s1} + \frac{1}{n^2} L_m) \frac{di_B}{dt} \quad (2)$$

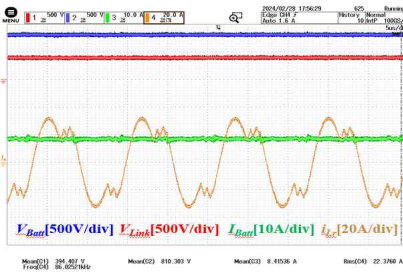
$$v_a = (L_r + M) \frac{di_A}{dt} + n_{CLLC} M \frac{di_B}{dt} \quad (3)$$

$$v_b = n_{CLLC} M \frac{di_A}{dt} + n_{CLLC}^2 M \frac{di_B}{dt} \quad (4)$$

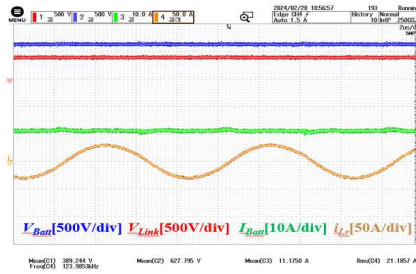
$$n_{CLLC} = \frac{nL_{s1} + \frac{1}{n}L_m}{L_m}, M = \frac{L_m^2}{n^2L_{s1} + L_m} \quad (5)$$

$$L_r = L_{p1} + L_m - M \quad (6)$$

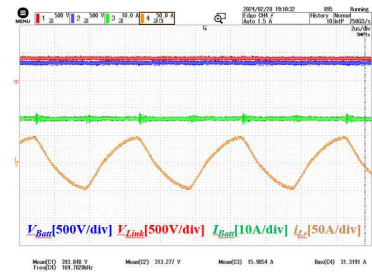
그러나 1, 2차측 공진 인덕턴스를 변압기 1, 2차측 누설 인덕턴스로 대체하여 일체형 변압기를 제작하면 훨씬 사이즈 저감이 가능하게 된다. 따라서 사이즈 최적화를 위해 1, 2차측 공진 인덕터를 변압기 누설 인덕터로 대체하여 그림 6의 (b)와 같이 일체형 변압기로 제작하여 부피를 38.4% 저감하였다.



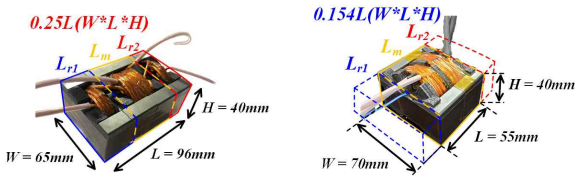
(a) Below 영역 동작
P=7.4kW, Vlink= 400V, Vbat=830V



(b) 공진점 동작
P=7.4kW, Vlink= 400V, Vbat=630V
그림 3. 충전 실험 파형



(c) Above 영역 동작
P=5.5kW, Vlink= 400V, Vbat=320V



(a) 분리형 변압기 (b) 일체형 변압기
그림 4. 7.4kW급 변압기 부피 비교

3. 실험 결과

본 논문에서는 22kW급을 7.4kW CLLC 3병렬 구조로 설계하였고, 7.4kW 1모듈에 제한하는 일체형 변압기를 적용하여 아래 사양에 따라 실험을 진행하였다.

• $V_{link} = 400V \sim 420V$ • $V_{bat} = 320V \sim 830V$

• $P_o = 7.4kW$ • $I_{bat(max)} = 16.7A$ • $f_s = 120kHz$

그림 4는 분리형 변압기와 제안하는 일체형 변압기 부피 비교 결과이다. (a)의 분리형 변압기는 1, 2차측 공진 인덕터를 추가로 제작하였지만 변압기와 공진 인덕터가 맞닿는 코어면 공유를 통해 사이즈를 저감하여 부피 0.25L를 달성하였고, (b)의 제안하는 일체형 변압기는 1, 2차측 공진 인덕터를 변압기 내부 누설 인덕터로 대체한 결과 부피 0.154L를 달성하여 분리형 변압기 대비 38.4% 부피를 저감하였다. 그림 3은 충전 동작 실험 파형으로 (a)는 Below 영역 (b)는 공진점 (c)는 Above 영역에서의 정격 동작 확인 결과이다. 실험 결과 320~830V의 넓은 배터리 전압 범위에서 원활한 정격 동작을 만족하였다. 그림 5는 충전 온도 포화 파형으로 7.4kW에서 50분간 에이징 테스트를 진행한 결과. ΔT 가 2차측 와이어 최대 58도, 코어 55도로 안정적인 발열 수준을 달성하였다. 그림 6과 같이 최대 충전 효율은 97.6%를 달성하였다.

3. 결론

본 논문에서는 양방향 OBC에 많이 사용되는 토폴로지로서 DAB와 CLLC 컨버터를 제시하였고, 고정 주파수로 제어되는 DAB와 달리 가변 주파수로 제어됨에 따라 DAB에 비해 작은 스위칭 주파수로 설계되어 자기 소자 사이즈가 큰 CLLC 공진형 컨버터의 고밀도화 달성을 위해 일체형 변압기 설계를 제안하였다. 제작 결과 분리형 변압기 대비 38.4%의 부피를 저감하였고, 최대 충전 효율은 97.6%를 달성하였다. 추 후 일체형 변압기의 최적화를 위해 여러 형태의 변압기를 고안하여 발열 최소화를 통해 고전력밀도 및 고효율화를 달성시킬 예정이다.



그림 5. 온도 실험 결과

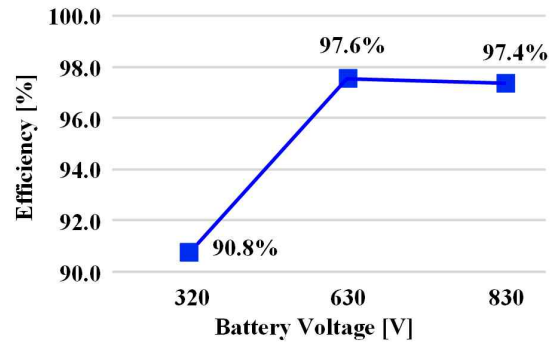


그림 6. 정격 충전 효율 측정 결과(Yokogawa WT3000)

이 논문은 LG MAGNA의 연구비 지원에 의하여 연구되었음. 본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학연협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구입니다.

참고 문헌

[1] B. S. Pandey, T.-T. LE, J. Jang, S. Choi.(2022). 11kW/200kHz DAB converter for OBC with wide output voltage range. 전력전자학회 학술 대회 논문집,(),507-508.
 [2] 이창섭, 김기훈, 김재훈, 김유빈, 최세완.(2023). V2G/V2L 기능을 갖는 단상/3상 겸용 OBC 개발. 전력전자학회 학술 대회 논문집,(),457-458
 [3] Z. U. Zahid, Z. M. Dalala, R. Chen, B. Chen and J. -S. Lai, "Design of Bidirectional DC - DC Resonant Converter for Vehicle-to-Grid (V2G) Applications," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 1, no. 3, pp. 232-244, Oct. 2015