

22kW급 OBC를 위한 3상 공진형 듀얼 액티브 브리지 컨버터

배창규
HL 만도

A three phase resonant dual active bridge converter for 22kW OBC

Changkyu Bai
HL Mando

ABSTRACT

본 논문에서는 800V/22kW급 차량 탑재형 충전기 (OBC) 를 위한 3상 공진형 듀얼 액티브 브리지 (3p-RDAB) 컨버터를 제안한다. OBC 용량의 증대로 인해 고밀도 및 비용 경쟁력이 있는 토폴로지의 선정이 중요해졌고, 이러한 요구사항에 대한 해결책으로 3상 CLLC (3p-CLLC) 가 제안되었다. 하지만 기존의 3p-CLLC의 경우 승압 범위에서의 주파수 감소가 일어나 자성체 설계 시 단점으로 작용한다. 제안하는 3p-RDAB는 단일 위상 전이 (SPS) 를 통하여 승/강압을 달성하며, 특히 승압 범위에서 주파수가 상승하여 기존 3상 CLLC보다 작은 자성체 설계가 가능하다. 또한, 영 전압 스위칭 (ZVS) 전류를 기반으로 주파수에 따른 위상 전이 각도를 계산하여 넓은 부하 범위에서 ZVS 달성을 가능하게 했다. 제안한 3p-RDAB 컨버터의 22kW급 시작품을 구현하였고, 실험을 통해 제안 방법의 효율성을 검증하였다.

1. 서론

세계 각국 정부들은 내연기관 차량에서 전기차 (EV) 로의 전환을 촉진하기 위해 다양한 계획과 정책을 적극적으로 마련하고 있다. 그러나 내연기관 차량에 비해 긴 충전 시간과 주행거리의 한계는 전기차 시대 도래에 장애물이 되고 있다. 이에 따라 제조사들은 더 높은 전력 밀도를 갖춘 대용량 전기차 충전 솔루션을 요구하고 있으며, 차량 탑재형 충전기 (OBC) 는 기존의 11kW 및 2kW/L 요구사항을 넘어 22kW 및 4kW/L 이상의 통합형 충전 모듈로의 전환을 목표로 하고 있다.

기존에는 22kW OBC를 위해 주로 모듈형 기반의 솔루션이 제안되었다^[1-2]. 이러한 모듈형 OBC는 단상 7.4kW 컨버터를 각각의 3상에 연결하여 독립적으로 제어한다. 그러나 모듈 수가 증가하면 제어 IC 및 스위칭 소자의 수도 늘어나 전력 밀도에 부정적인 영향을 미치고, 비용도 증가하게 된다. 이를 해결하기 위해 3상 AC-DC 인버터와 풀 브리지 기반의 11kW DC-DC 컨버터 2개를 사용하는 직/병렬 연결형 컨버터가 제안되었다. 이 구조의 경우 22kW 구현 시 DC-DC 측에 총 16개의 소자가 필요하다^[3-4].

전력 밀도를 높이고 비용을 절감하기 위해, 본 논문에서는 추가적인 소자 수 저감이 가능한 3상 공진형 듀얼 액티브 브리지 (3p-RDAB) 토폴로지를 제안한다. 3p-RDAB는 3-Leg 기반 토폴로지, 입출력 스위치 개수가 총 12개이며 3상 인버터 측

의 3-Leg 모듈을 공용화하여 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한, 단일 위상 전이 (SPS) 기반의 3p-RDAB는 기존 3상 CLLC (3p-CLLC) 에 비해 주파수 가변 범위가 작아 최소 주파수를 더 높게 설계할 수 있다^[5].

본 논문에서는 최소 주파수 120kHz 이상의 3p-RDAB를 제안한다. 시제품 제작 및 시험을 통해 제안된 3p-RDAB 컨버터는 입력 전압 650 - 750V, 출력 전압 550 - 840V 환경에서 19kW 동작 기준 최대 효율 98.8%를 달성하였다.

2. 제안하는 22kW급 3p-RDAB

2.1 제안하는 22kW급 OBC 시스템 구성도

제안하는 22kW급 OBC 시스템은 기존의 7.4kW급 단위 모듈이 들어가는 모듈형 OBC에 비해 스위칭 소자의 수가 적다. 또한, 절연형 DC-DC 측의 경우 기존에는 풀 브리지 기반의 컨버터를 직/병렬 연결하여 사용하였으나, 제안하는 구조에서는 3-Leg 기반의 단일 컨버터를 통해 22kW급 구현이 가능하다. 3상 인버터 측과 동일한 3-Leg 구조의 단위 전력 모듈을 사용하여 모듈 공용화도 가능하다.

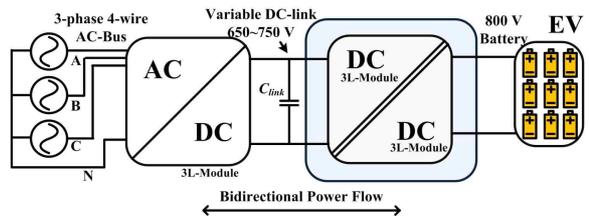


그림 1 제안하는 22kW급 OBC 시스템 구성도
Fig. 1 Proposed 22kW OBC system configuration

표 1 22kW급 OBC 시스템 비교

Table 1 Comparison of 22kW OBC system

	모듈형 OBC [2]	3상 인버터 + 풀 브리지 DC-DC × 2 [3-4]	3상 인버터 + 3상 DC-DC (Proposed)
AC/DC 용량	7.4 kW	22 kW	22 kW
스위칭 소자 개수	6 ea	6 ea	6 ea
DC/DC 용량	7.4 kW	11 kW	22 kW
소자 개수	8 ea	8 ea	12 ea
총 스위칭 소자 개수	42 ea	22 ea	18 ea

2.2 3p-RDAB의 동작 분석

2.2.1 3p-RDAB의 동작 원리

제안하는 3p-RDAB의 회로도도 그림 2와 같다. 3p-RDAB는 입출력에 3-Leg 브리지 회로를 사용한다. 변압기의 경우 Y-Y 타입의 3상 변압기 $T_{3,Y,Y}$ 를 사용한다. S_1-S_6 는 1차측의 스위치이며, S_7-S_{12} 는 2차측의 스위치이다. 1차측 및 2차측의 각 Leg끼리는 120도의 위상차로 동작하며 각 Leg는 상보 동작한다. 1차측과 2차측의 위상차는 ϕ_{SPS} 이다. 그림 3은 동작 파형을 나타낸다.

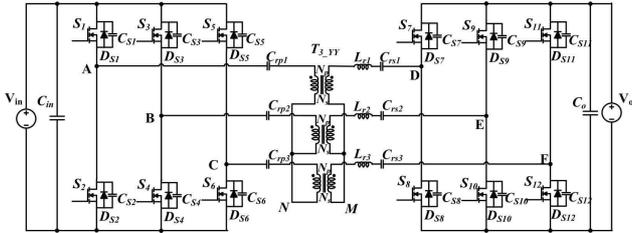


그림 2 제안하는 3p-RDAB 컨버터의 회로도

Fig. 2 Circuit diagram of proposed 3p-RDAB converter

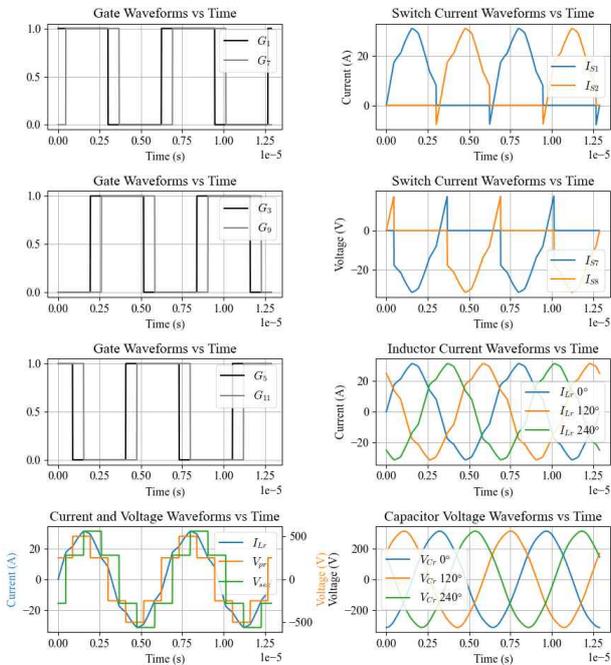


그림 3 3p-RDAB의 시뮬레이션 동작 파형

Fig. 3 Simulation waveforms of 3p-RDAB

2.2.2 정상 상태 분석

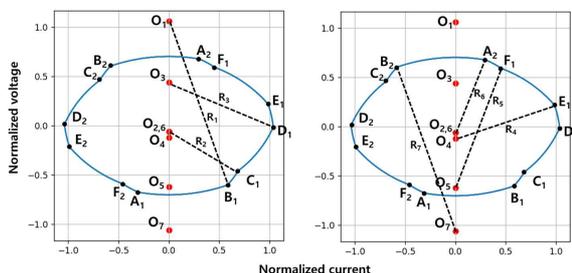
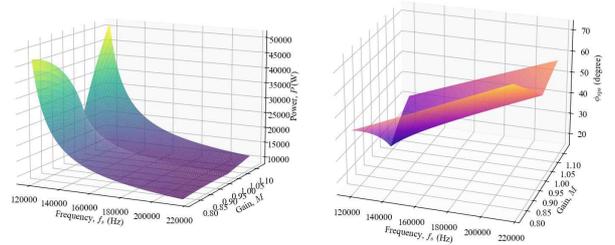


그림 4 제안하는 3p-RDAB의 상태-평면 궤적

Fig. 4 State-plane trajectory of proposed 3p-RDAB

그림 4는 제안하는 3p-RDAB의 상태-평면 궤적이다. 상태-평면 궤적으로부터 궤적의 반지름 및 회전각도의 관계식을 얻어낼 수 있고, 이를 통해 영전압 스위칭 (ZVS) 턴오프 전류 조건을 만족하기 위한 위상각 ϕ_{SPS} 를 주파수에 대해서 얻어낼 수 있다. 그림 5에는 주파수에 따른 전력과 위상각을 나타냈다.



(a) f_s, M vs P

(b) f_s, M vs ϕ_{SPS}

그림 5 제안하는 컨버터의 정상상태 분석

Fig. 5 Steady state analysis of proposed converter

2.3 시작품 제작 및 실험 결과

표 2 3p-RDAB 실험 및 설계 값

Table 2 Test and design parameters of 3p-RDAB

	Parameters	Values	비고
입력전압	V_{in}	650~750 V	입력 가변 전압 제어
출력전압	V_o	550~840 V	
실험 전력	Test Power	19 kW	*장비 Spec 한계
공진 인덕턴스	L_r	22 uH	
공진 커패시터	C_{rp} / C_{rs}	198 nF	
자화 인덕턴스	L_m	305 uH	
턴비	n	1	
	Component	Spec	비고
스위칭 소자	$S_1 \sim S_{12}$ (SiC Mosfet)	PCZ120N21M1 (1200V 21 mOhm)	Powermaster Semiconductor
변압기	$T_{3,Y,Y}$ (Transformer)	PQ5040+PQ5020 (Half core) $\times 3$	Stacked Integrated Core Design

그림 6과 같이 시작품을 구성했다. 표 2에는 상세 실험 및 설계 값을 나타냈다. 그림 7은 3p-RDAB의 실험 환경이다. 그림 8은 각 모드별 실험 파형이며, 19kW 구동 기준, 승압 모드 시 98.3%, 1:1 모드 시 98.8%, 강압 모드 시 98.3%를 달성했다. 그림 9는 1:1 모드 시의 측정 효율이다.

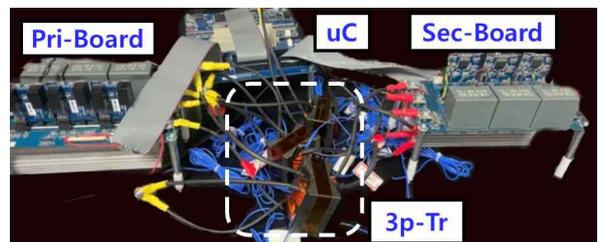


그림 6 3p-RDAB 컨버터 시작품

Fig. 6 Prototype of 3p-RDAB converter

3. 결론

본 논문에서는 22kW급 OBC를 위한 3p-RDAB의 시작품을 제작하였으며, 입력전압 750V, 출력전압 750V 환경에서 19kW 기준 최대효율 98.8%를 달성했다. 제안하는 시작품의 자성체 부피는 0.45L이며 추후 3상 통상 자성체 제작을 통해 추가적인 자성체의 부피를 저감 시킬 예정이다.

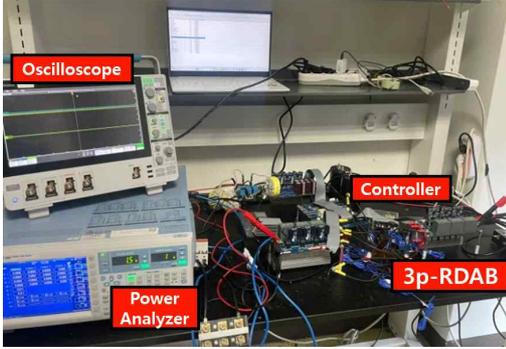
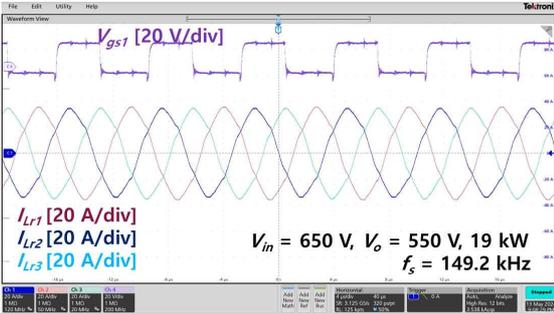
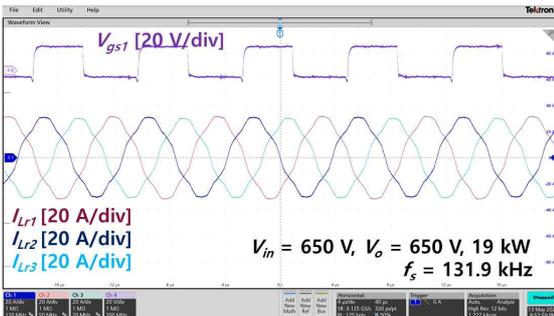


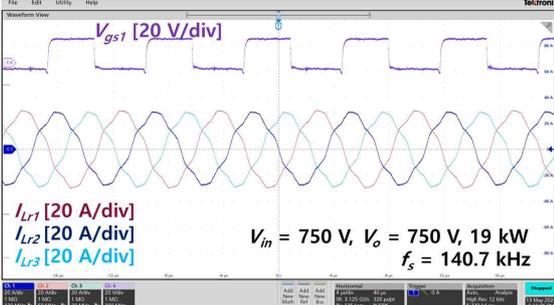
그림 7 3p-RDAB 컨버터 테스트 환경
Fig. 7 Test Environment of Proposed 3p-RDAB



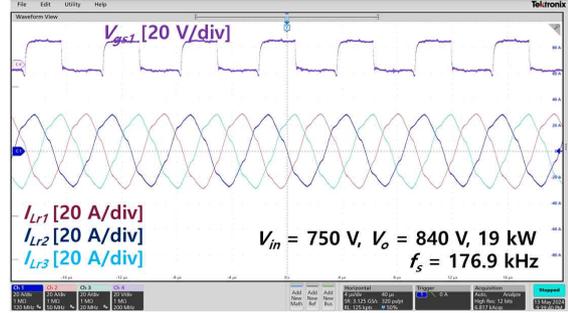
(a) $V_{in} = 650 \text{ V}$, 강압 모드



(b) $V_{in} = 650 \text{ V}$, 1:1 모드



(c) $V_{in} = 750 \text{ V}$, 1:1 모드



(d) $V_{in} = 750 \text{ V}$, 승압 모드

그림 8 3p-RDAB의 모드별 실험 파형

Fig. 8 Experimental waveforms of 3p-RDAB at each mode

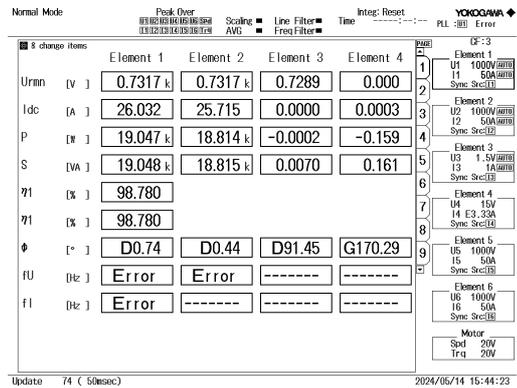


그림 9 3p-RDAB의 측정 효율

Fig. 9 Measured efficiency of 3p-RDAB

참고 문헌

- [1] H. Kim, J. Park, S. Kim, R. M. Hakim, H. Belkamel, and S. Choi, "A single-stage electrolytic capacitor-less EV charger with single- and three-phase compatibility," IEEE Trans. Power Electron., vol. 37, no. 6, pp. 6780 - 6791, Jun. 2022.
- [2] M. Jia, and H. Sun, "GaN-based High-Frequency, High-Power-Density, 2-in-1 Bi-directional OBC Design for EV Applications," in PCIM Eur.; Int. Exhibit. Conf. Power Electron., Intell. Motion, Renewable Energy Energy Manage., 2023, pp. 1 - 10.
- [3] K. Stengert, "On-board 22 kW fast charger 'NLG6,'" in Proc. World Elect. Veh. Symp. Exhib., 2013, pp. 1 - 11.
- [4] T. Yuan, F. Jin, and Q. Li, "A 22-kW On-Board Charger (OBC) with an Integrated Planar Inductor and Transformer," 2024 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Los Angeles, CA, USA, 2024.
- [5] F. Jin, A. Nabih, T. Yuan, and Q. Li, "A High-Efficiency High-Density Three-Phase CLLC Resonant Converter With a Universally Derived Three-Phase Integrated Transformer for On-Board-Charger Application," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 39, no. 4, pp. 4350 - 4366, Apr. 2024