

철도 차량용 공진형 보조전원장치 제어알고리즘 개발 및 공진 탱크 최적 설계

박승빈, 강성윤, 고안열, 엄정섭, 이창희
다원시스

Development of Resonant Auxiliary Power Supply Control Algorithm for Railway Vehicle and Optimal Design of Resonant Tank

Seungbin Park, Seong-Yun Kang, An-Yeol Ko, Jung-Sup Eom, Chang-Hee Lee
Dawonsys

ABSTRACT

철도차량 하부에 부착되는 전장품 무게는 차량의 바퀴 및 베어링 등 철도차량 수명에 큰 영향을 주기 때문에 경량화는 필수적이다. 본 논문에서는 철도 차량용 보조전원장치의 경량화를 위해 LLC 공진형 컨버터를 적용한 보조전원장치 시스템과 제어알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 고속스위칭을 위해 입력단 벡 컨버터를 이용하여 가선 전압을 감압시키고 이후 LLC 공진형 컨버터를 통해 인버터 입력단 전압을 제어한다. 또한, 공진형 컨버터 손실을 최소화하기 위해 ZVS(Zero Voltage Switching) 동작을 하며, 공진 탱크의 최적 설계도 제안한다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 시뮬레이션 및 실험으로 검증한다.

1. 서론

기존의 철도 차량용 보조전원장치는 전기적인 절연을 위해 크기가 크고 무거운 60Hz 저주파 변압기를 이용한 시스템으로 구성된다. 또한, 인버터 입력단이 가선 전압의 크기로 사용되어 인버터를 구성하는 각 소자의 대형화와 낮은 스위칭 주파수를 사용하는 단점이 있다 [1]. 본 논문에서는 철도차량의 고효율화 및 경량화를 위해 공진형 보조전원장치 시스템과 제어알고리즘을 제안한다. 제어알고리즘은 크게 벡 컨버터부, 공진 컨버터부, 인버터 부, 배터리 차저 부로 나누어 설명된다. 벡 컨버터부는 입력단 전압의 감압을 위해 722Vdc로 전압제어를 하고 공진 컨버터 부는 변압기 사이즈를 줄이기위해 고속스위칭 및 ZVS 동작을 한다. 또한, 인버터 부는 3상 AC 380V를 하부에 인가하기 위한 전압을 제어하며, 배터리 차저 부는 배터리 충전 전압을 위한 100Vdc 전압을 제어하는 알고리즘을 제안하며, 본 논문에서는 공진 컨버터 부의 공진 탱크를 구성하는 공진 리액터와 공진 커패시터의 최적 설계를 제안한다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 시뮬레이션 및 실험으로 검증한다.

2. 본론

2.1 공진형 보조전원장치의 구조

그림 1은 제안하는 철도 차량용 공진형 보조전원장치를 나타낸다. 공진형 보조전원장치는 입력단 벡 컨버터를 사용하여 가선 전압을 감압해 LLC 공진형 컨버터의 고속스위칭이 가능한 소자로 설계를 할 수 있다. 또한, 고주파 변압기 및 기존에 비해 소형화된 소자로 구성되기 때문에 크기와 무게 면에서 기존 보조전원장치에 비해 유리하다. 기존 보조전원장치와 실제 무게를 비교해보면 공진형 보조전원장치의 무게가 약 20% 소형화 가능하다.

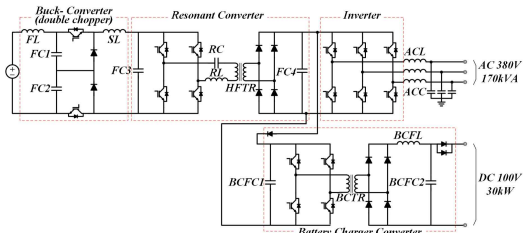


Fig. 1 Circuit schematic of the proposed resonant auxiliary power supply

2.2 공진형 보조전원장치의 공진 탱크 설계

LLC 공진형 컨버터의 공진 탱크는 공진 리액터와 공진 커패시터로 구성되어 있다. 공진 탱크를 구성하는 소자의 용량 선정은 스위칭 주파수에 따른 전압 이득 곡선 및 컨버터의 특성을 결정하기 때문에 LLC 공진형 컨버터 공진 탱크의 최적 설계는 필수적이다. 식 (1)은 LLC 공진형 컨버터의 전압 이득 식, 식 (2)는 각 변수에 대한 수식을 나타낸다 [2].

$$K(Q, m, F_x) = \frac{F_x^2(m-1)}{\sqrt{(mF_x^2-1)^2 + F_x^2(F_x^2-1)^2(m-1)^2 Q^2}} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\sqrt{RL}}{R_{ac}}, F_x = \frac{f_s}{f_r}, f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{RLRC}}, m = \frac{RL + L_m}{RL} \quad (2)$$

여기서, K 는 전압 이득, f_s 는 스위칭 주파수, f_r 은 공진 주파수, L_m 은 자화 인덕턴스, F_x 는 f_s/f_r 의 비율, RL 은 공진 인덕턴스, RC 는 공진 커패시턴스, R_{ac} 는 R 의 1차 측 등가 교류저항, m 은 L_m 과 RL 의 비율, Q 는 Quality factor를 나타낸다.

그림 2는 m 값에 따른 공진 탱크의 전압 이득 곡선을 나타낸다. 높은 m 의 전압 이득 곡선에서는 F_x 의 변화에 전압 이득이 크게 변화하지 않고, 전 부하 영역에서 1에 근사한 전압 이득을 얻는다. 본 논문의 LLC 공진형 컨버터는 고정주파수 제어를 하므로, F_x 의 변화에 민감하지 않으면서 전 부하 영역에서 1에 근사한 전압 이득을 가지는 높은 m 값의 설계가 요구된다. 따라서, 높은 m 값을 가지는 공진 탱크를 설계하기 위해 공진 커패시터 용량을 최대한 높게 설계했으며, 공진 리액터의 용량을 최소한의 값으로 설계하였다.

Table 1 LLC resonant converter design parameter

Parameter	Mark	Value	Unit
Resonant Inductance	RL	7.5	μH
Resonant Capacitance	RC	48	μF
Switching Frequency	f_s	7	kHz

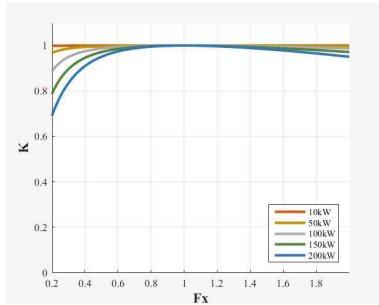


Fig. 2 Voltage gain graph of resonant tank about high value m

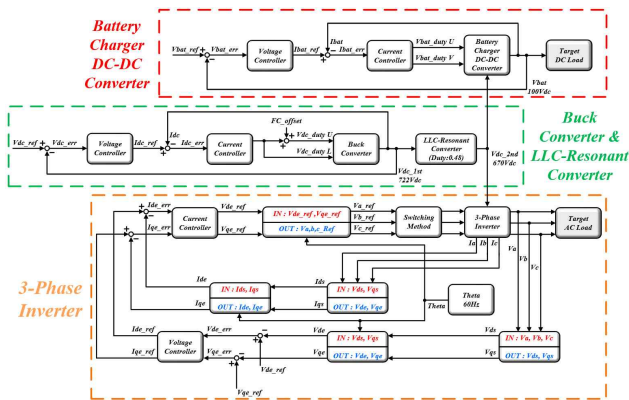


Fig. 3 Control block diagram of resonant auxiliary power supply for railway vehicles

표 1은 본 논문의 LLC 공진형 컨버터의 설계 파라미터를 나타낸다. 공진 커패시터 용량은 스위칭 주파수 7kHz 의 설계에서 높은 m 값을 가지고, F_x 가 1에 근사한 용량성 영역에서 동작할 수 있는 최댓값인 $48\mu\text{F}$ 로 선정하였다. 또한, 공진 리액터 용량은 F_x 가 1에 근사할 수 있도록 식 (2)의 공진 주파수 수식을 이용하여 계산한 $7.5\mu\text{H}$ 로 선정하였다.

2.3 공진형 보조전원장치의 제어알고리즘

그림 3은 철도 차량용 공진형 보조전원장치의 제어 블록도를 나타낸다. 벡 컨버터 부는 $900\text{Vdc} \sim 1800\text{Vdc}$ 로 변동하는 가선 전압을 입력받아 722Vdc 의 안정적인 직류 전압을 출력한다. 변압기 1차 측의 전압을 센싱 받아 722Vdc 전압제어를 수행하며, 전압제어의 안정성을 위해 전류제어를 수행한다. 공진 컨버터 부는 스위칭 주파수는 7kHz 및 고정 듀티로 전압을 제어한다. 벡 컨버터 출력 전압인 722Vdc 를 입력 전압으로 하여 고주파 스위칭을 통해 변압기 2차 측으로 670Vdc 전압을 전달한다. 인버터 부는 안정적인 670Vdc 의 전압을 입력받아 전압제어 및 전류제어를 통해 선간 3상 AC 380V , 60Hz 의 전압을 부하에 공급하도록 제어한다. 배터리 차저 부는 인버터 부와 입력단 670Vdc 를 공유하며 단상 풀브릿지로 구성되어 있다. 배터리 차저 출력 전압의 오차는 PI 제어기를 통과하여 출력 전류 지령을 생성하고 전류 제어기를 거쳐 출력 전압 100Vdc 로 제어된다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 4와 5의 파형은 가선 전압, 공진형 컨버터 출력 전압, AC 출력 전압, AC 출력 전류, 배터리 차저 컨버터 출력 전압을 나타낸다. 시뮬레이션 및 실험의 부하 조건은 $0\% \rightarrow 50\% \rightarrow 100\% \rightarrow 50\% \rightarrow 0\%$ 부하로 급변하는 조건에서 수행하였으

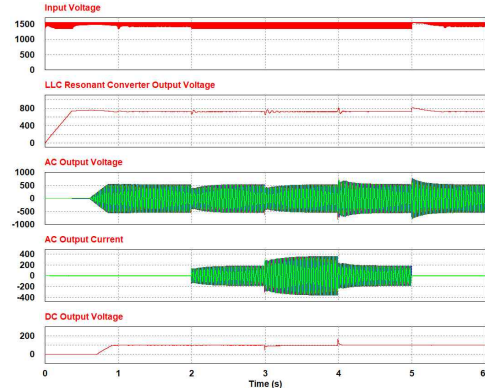


Fig. 4 Simulation results of the resonant auxiliary power supply

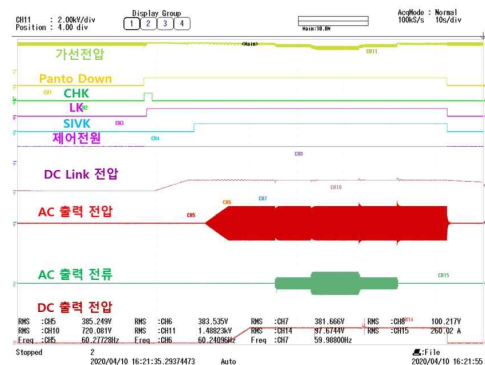


Fig. 5 Experimental results of the resonant auxiliary power supply

며, 해당 조건에서의 정상 동작하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 실험 결과로 100% 부하(200kVA)에서의 효율은 약 96% 로 고효율의 성능을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서 제안하는 공진형 보조전원장치는 고속스위칭을 위해 입력단 벡 컨버터를 이용하여 가선 전압을 감압시키고 이후 LLC 공진형 컨버터를 사용하여 인버터 입력단 전압을 형성한다. 제안하는 공진형 보조전원장치는 기존의 보조전원장치에 비해 약 20% 경량화가 되는 것을 확인할 수 있으며, 효율도 96% 로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 공진 커패시터 값을 최대화, 공진 인덕턴스 값을 최소화하여 m 값을 크게 설계해 공진 주파수의 변화에 민감하지 않고 전 부하 영역에서 1의 전압 이득을 가지는 설계를 제안하였다. 본 논문에서 제안하는 제어알고리즘 및 공진 탱크 설계 방법은 시뮬레이션 및 실험으로 검증하였다.

참고 문헌

- [1] I.H. Cho, S.M. Jung and B.H. Lee, "Research on High-Efficiency Power Conversion Structure for Railroad Auxiliary Power Supply(APS) System," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 19, No. 3, pp. 297-303, Jun. 2012.
- [2] R. Beiranvand, B. Rashidian, M. R. Zolghadri, and S. M. H. Alavi, "A design procedure for optimizing the LLC resonant converter as a wide output range voltage source," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 27, No. 8, pp. 3749 - 3763, Aug. 2012.