

하이브리드 PWM/PFM 제어가 적용된 LLC 공진형 컨버터를 이용한 넓은 입력전압 범위를 갖는 철도차량용 보조 전원장치

김찬호¹, 김해인¹, 이형진¹, 백승우², 김학원⁺, 조관열¹

한국교통대학교¹, 테크로스²

Auxiliary Power Unit for Railway Vehicles with A Wide Input Voltage Range using LLC Resonant Converter with Hybrid PWM/PFM Control

Chan-Ho Kim¹, Hae-In Kim¹, Hyeong-Jin Lee¹, Seung-Woo Baek², Hag-Wone Kim⁺, Kwan-Yuhl Cho¹

Korea National University of Transportation¹, Techcross²

ABSTRACT

철도 차량용 보조 전원장치는 가선에 연결되어 차량내에 전원을 공급하는 장치로 절연이 필수적이다. 이러한 전기적 절연을 위해 고효율의 LLC 공진형 컨버터가 적용되어 있다. 그러나 주파수로 제어하는 기존의 공진형 컨버터는 Above 영역에서 동작할 때 스위칭 주파수 증가의 한계가 있어 일정한 전압을 출력하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터에서 넓은 입력전압 범위를 확대하고 제어 안정도를 확보하기 위해 하나의 제어기 안에 PFM, PWM 제어기를 혼합하는 방식을 제안한다. 제안하는 제어 방식의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

철도차량용 보조 전원장치(Auxiliary Power Unit)는 가선으로부터 전원을 공급받아 차량의 냉난방기, 제동장치 및 조명 등에 필요한 전원을 공급하는 핵심적인 장치이다. 또한 객차의 각종 전원을 공급하는 장치로 객실 내의 전원과의 절연이 필수적이다. 이러한 전기적 절연을 위해 절연형 DC/DC 컨버터 중 고효율의 특성을 가진 LLC 컨버터가 적용되어 있다. 하지만 철도차량용 보조 전원장치는 가선과 열차의 접촉 상태에 따라 전압이 900V부터 1900V까지의 큰 변동을 가진다. 따라서 스위칭 주파수 증가의 한계를 해결하기 위해 LLC 컨버터에 펄스 폭 변조 제어가 적용된 보조 전원장치가 제안되었다.^{[1][2]}

이에 따라 입력전압 변동에 대응하기 위해 기존의 공진형 컨버터의 펄스 주파수 변조 제어 방식에 펄스 폭 변조 제어 방식을 추가하며, 이로 인해 두 개의 제어기가 존재하게 된다. 두 개의 제어기가 서로 다른 방식으로 출력전압을 제어하기 때문에 제어기의 안정도가 하락하는 단점이 있다.

본 논문은 넓은 입력전압 범위를 대응할 수 있고 제어 안정도를 확보하기 위해 하나의 제어기 안에 펄스 주파수 변조, 펄스 폭 변조 제어기를 혼합하는 방식을 제안한다. 이를 통해, 제어기의 안정성을 높이면서도 전압 변동폭이 큰 운전 조건에서도 안정적으로 동작 할 수 있다.

2. 하이브리드 제어가 적용된 LLC 컨버터

2.1 제안하는 제어 방식에 적용된 LLC 컨버터 구조

그림 1은 제안하는 제어 방식에 적용된 3레벨 LLC 컨버터

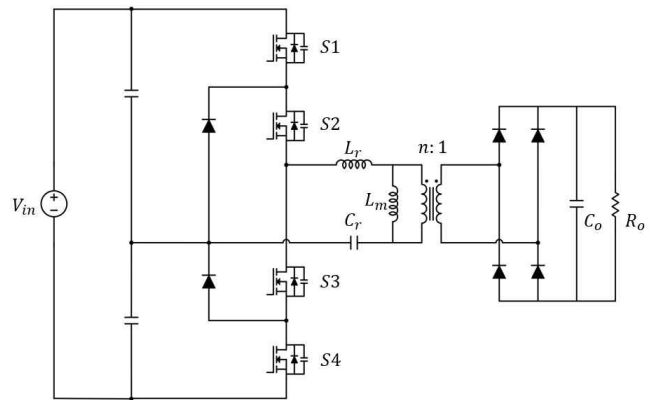


그림 1 3레벨 LLC 컨버터 회로도

Fig. 1 3-Level LLC Converter Topology

회로도이다. 본 논문에서 다루는 3레벨 LLC 컨버터는 Neutral Point Clamped 구조를 갖는 인버터단과 공진 인덕터, 자화 인덕터, 공진 커패시터로 이루어진 공진 탱크단을 가지며 절연을 위한 변압기 그리고 풀 브리지의 구조의 정류단을 갖는다.

2.2 제안하는 LLC 컨버터 전압 이득 그래프

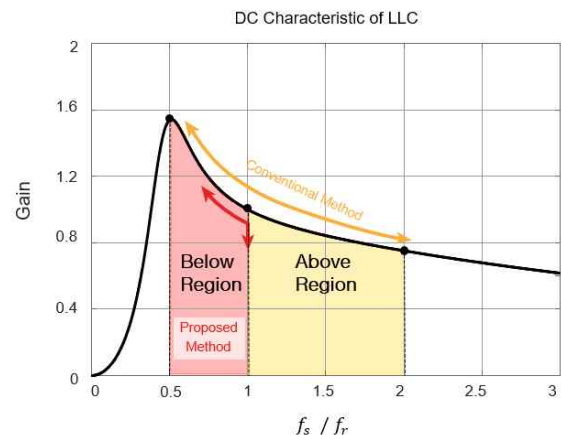


그림 2 LLC 컨버터의 전압 이득 그래프 및 주파수 변조 범위
Fig. 2 LLC Converter Voltage Gain Graph and Frequency Modulation Range

그림 2는 LLC 컨버터의 전압 이득 그래프이다. 전압 이득 그래프에서 스위칭 주파수와 공진 주파수가 같은 공진점을 기준으로 높은 전압 이득에서는 Below 영역, 낮은 전압 이득에서는 Above 영역에서 동작한다. 철도차량의 가선은 900V부터 1900V까지 입력전압이 변동되기 때문에, 이에 대응하기 위해 보조 전원장치는 Below 영역과 Above 영역에 걸쳐 넓은 범위에서 동작한다. 스위칭 주파수가 공진 주파수보다 커지는 동작점인 Above 영역에서는 스위칭 주파수가 높아지는 데에는 제어기 성능 및 필터 설계 관점에 있어 한계가 있다. 따라서, Above 영역에서는 주파수 상승을 최소화하기 위해 공진점에서 동작하고 펄스 폭 변조 제어로 주파수 변동의 한계를 해결한다.

2.3 제안하는 하이브리드 제어 방식

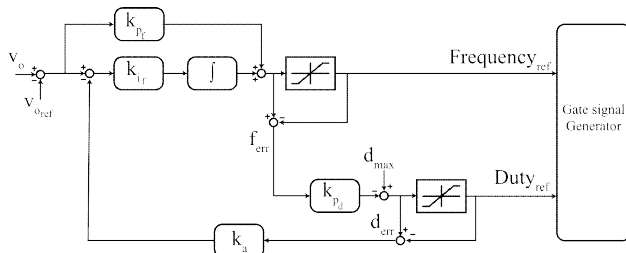


그림 3 제안된 하이브리드 제어기의 블록도
Fig. 3 Block Diagram of the Proposed Hybrid Controller

그림 3은 제안하는 하이브리드 제어 블록도이다. 주파수 제어기는 일반적인 PI 제어기와 같다. 하지만, 펄스 주파수 변조 제어기의 한계치는 LLC 컨버터의 공진 주파수로 설정되어 있으며, 공진 주파수를 넘는 성분은 펄스 폭 변조 제어기로 넘어가 시비율을 변동시키도록 구성되어있다. 또한, 시비율 한계를 넘는 성분을 통해 Anti-Windup을 수행하였다. 제안된 제어기는 입력전압이 높은 Above 영역에서는 기존의 펄스 주파수 변조 제어기와 동일하게 PI 제어기를 통한 주파수 지령을 통해 출력전압을 제어한다. 하지만, 주파수 지령이 공진 주파수를 넘어가면 넘어간 성분이 펄스 폭 변조 제어기를 통해 출력전압을 제어한다. 이때, 스위칭 주파수는 공진 주파수로 고정된다.

3. 모의해석

제안하는 제어 방식의 타당성을 검증하기 위해 전력변환 모의해석 프로그램인 PSIM을 사용하였다. 그림 4는 제안하는 제어 방식을 검증하기 위한 PSIM 모의해석 회로도이다. 공진 탱크의 공진 주파수 및 스위칭 주파수는 100kHz로 선정하였고 출력전압은 700V로 제어한다. 또한, 모의해석에서 입력전압 변동에 대응을 확인하기 위해 입력전압은 1500V를 기준으로 각 영역에서의 동작점을 확인하기 위해 1200V, 1800V인 조건에서 모의해석 하였다.

그림 5는 모의해석 결과를 나타낸다. 모의해석 1번 부분은 입력전압은 1500V로 인가하여 공진점에서 동작하며 펄스 폭 변조 제어를 통해 스위칭 주파수는 공진 주파수로 고정되고 시비율이 변조되어 출력전압을 제어한다. 2번 부분은 입력전압은 1800V로 인가하였고 펄스 폭 변조 제어로 유지되어 주파수는 고정되고 시비율은 변조하여 동작은 1번 부분과 같다. 3번 부분은 펄스 폭 변조 제어에서 펄스 주파수 변조 제어로 동작점

이 변환되는 구간으로 입력전압은 1200V로 인가하여 Below 영역에서 동작하며 펄스 주파수 변조 제어를 통해 시비율은 고정되고 주파수가 변조되어 출력전압을 제어한다. 따라서, 모의해석 1, 2, 3번 부분을 통해 입력전압 변동에 따라 동작점이 변경될 때 시비율 및 주파수 변동을 확인하였다.

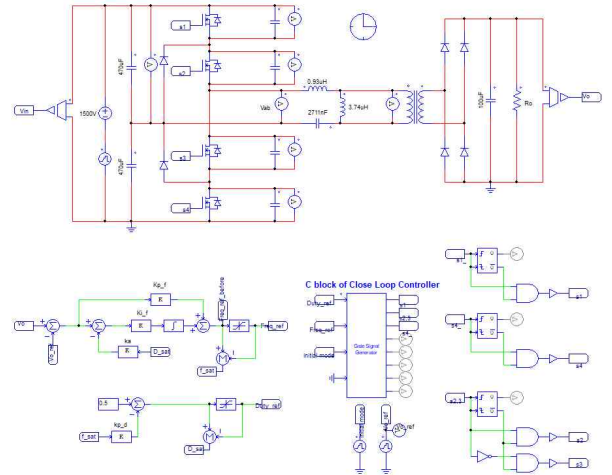


그림 4 모의해석 회로도
Fig. 4 Circuit diagram of the simulation

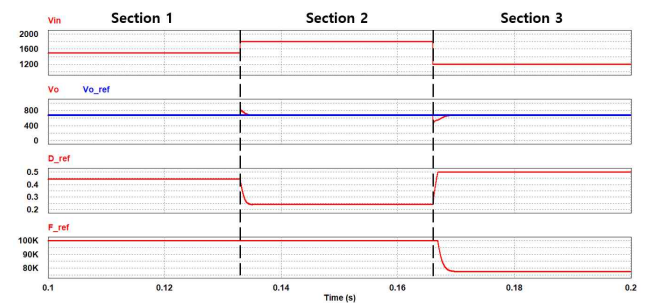


그림 5 모의해석 결과 파형
Fig. 5 Simulation result waveforms

4. 결 론

본 논문에서는 하이브리드 제어가 적용된 LLC 공진형 컨버터를 이용한 넓은 입력전압 범위를 갖는 철도차량용 보조 전원장치를 제안하였다. PSIM의 모의해석 결과 제안하는 제어 방식은 입력전압 변동에 대해 전압 이득 그래프에서의 영역별 동작점 및 항상 일정한 출력전압을 유지하는 것을 검증하였다.

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2021R111A3048301)

참 고 문 헌

- [1] 백승우, 김학원, 조관열, “펄스 폭 변조 제어가 적용된 3레벨 LLC컨버터를 이용한 철도차량용 보조전원장치” 전력전자 학술대회 논문집, pp. 260-262, Jul. 2019.
- [2] S. M. S Shakib and S. Mekhilef, “A frequency adaptive phase shift modulation control based LLC series resonant converter for wide input voltage application.” IEEE Trans. Power Electron, Vol. 32, No. 11, pp. 8360-8370, Nov. 2017.