

ISOP 구조의 LLC 컨버터 간 전력 평형 제어 알고리즘

이형진, 황재하, 김학원†, 조관열
한국교통대학교

Power Balancing Control Algorithm for ISOP Structure LLC Converter

Hyeong-Jin Lee, Jae-Ha Hwang, Hag-Wone Kim†, Kwan-Yuhl Cho
Korea National University of Transportation

ABSTRACT

최근 전력변환장치는 용량 증가와 신뢰성 향상을 위해 모듈형 전력변환장치가 연구되었다. 하지만 모듈형 전력변환장치는 전력 불균형이 생기는 단점이 있다. 특히, LLC 컨버터는 공진 탱크의 파라미터에 의해 전압 전달비가 정해지는 만큼 모듈형 LLC 컨버터는 파라미터 오차에 따라 컨버터 간 전력 불균형이 발생하여 이를 해결해야만 한다. 본 논문에서는 시비를 제어가 적용된 ISOP 구조의 LLC 컨버터 간 전력 평형 제어 알고리즘을 제안한다. 제안한 제어기는 모의 해석 프로그램인 PLECS와 HILS를 통한 실험으로 검증되었다.

1. 서론

최근 전력 사용량 증가에 따라 전력변환장치의 용량 증가와 신뢰성 향상은 중요한 문제이다. 이러한 용량 증가와 신뢰성 향상을 위해 최근 모듈형 컨버터에 관한 연구가 진행되었다. 하지만 모듈형 컨버터의 경우 전력 불균형이 발생할 수 있어 전력 평형 제어 알고리즘에 관한 연구가 필요하다. 철도 차량 보조전원장치(Auxiliary Power Unit, APU)의 경우 객차의 냉난방기, 조명등과 같은 승객과 밀접한 연관을 가지는 전력변환장치로 높은 효율과 전기적인 절연이 요구된다. 따라서 현재 보조전원장치는 그림 1과 같이 고효율 절연형 DC/DC 컨버터인 LLC 컨버터가 사용된다.^[1] 하지만 단일 모듈의 LLC 컨버터는 보조전원장치의 큰 용량을 책임져야 하는 단점을 가져 높은 내압의 반도체 소자를 사용해야 하며 고장 시 출력단으로 전력을 전달하지 못하는 신뢰성 저하와 같은 문제를 가진다. 따라서 큰 입력 전압과 출력 전류를 가지는 보조전원장치의 특성을 고려하여 입력 직렬 출력 병렬(Input Series Output Parallel, ISOP)구조의 LLC 컨버터 모듈의 적용이 검토되고 있다. 하지만 LLC 컨버터는 공진 탱크의 공진 인덕턴스, 공진 커패시턴스, 변압기 자화 인덕턴스, 변압기 턴 비와 같은 파라미터 따라 전압 전달비가 결정되는 만큼 정확한 파라미터 설계와 제작이 중요하다. 하지만 제작 과정 중 파라미터 오차가 발생하면 컨버터 모듈 간 전압 전달비가 달라져 입력 전압과 출력 전류의 평균값이 달라져 컨버터 간 전력 불균형이 발생한다.

이러한 전력 불균형을 해소하기 위해 현재 Input Voltage Sharing(IVS) 혹은 Output Current Sharing(OCS)와 같은 제어 방법에 관한 연구가 진행되었다.^[2] 하지만 스위칭 주파수에 따라

제어되는 LLC 컨버터의 경우 기존의 IVS와 OCS 기법을 적용하면 보상 성분으로 인해 각 컨버터가 다른 스위칭 주파수로 동작하게 된다. 이는 총 출력 전류와 출력 전압의 진동을 발생하게 되어 전력 품질이 저하되기 때문에 다른 제어 방식이 필요하다.

본 논문에서는 ISOP 구조의 LLC 컨버터에서 컨버터 간 파라미터 오차를 가질 때 발생하는 전력 불균형 문제를 해소하기 위해 시비를 제어가 적용된 전력 평형 제어 알고리즘을 제안한다.

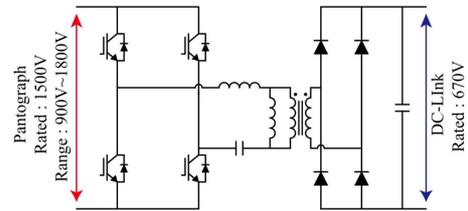


그림 1 단일 LLC 컨버터가 적용된 보조전원장치 회로도

2. ISOP 구조의 LLC 컨버터

그림2는 ISOP 구조의 LLC 컨버터를 적용한 보조전원장치의 구성이다. 이는 LLC 컨버터 1,2번 모듈의 입력단이 직렬로 연결되어 입력 전압을 분배하고 출력단은 병렬로 연결되어 있어 출력 전류를 분배한다. 보조전원장치의 출력단은 3상 인버터와 연결되어 객차에 220V의 AC 전압을 공급하지만 3상 인버터는 본 논문에서 다루지 않기에 일정한 부하로 모사한다.

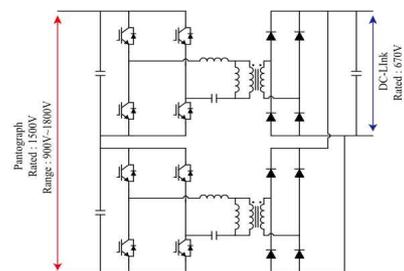


그림 2 ISOP LLC 컨버터가 적용된 보조전원장치 회로도

식(1)은 LLC 컨버터를 해석하는 기법인 First Harmonic Approximation으로 구해진 전압 이득 수식이며 각 값은 식 (2)와 같다. f_s 는 스위칭 주파수, f_r 은 공진 탱크의 공진 주파수

그리고 R_{ac} 는 AC 등가 저항이다. LLC 컨버터의 전압 전달비는 공진 탱크의 공진 인덕턴스, 공진 커패시턴스, 변압기의 자화 인덕턴스, 턴 비와 모사한 부하 저항의 AC 등가 저항으로 그림 3의 파란색 그래프와 같이 그려지며 스위칭 주파수에 따라 전압 전달비가 결정된다. 하지만 파라미터 오차가 있을 때 그림 3의 빨간색 그래프와 같이 그려져 두 컨버터의 전압 전달비가 달라진다. 따라서 ISOP 구조의 LLC 컨버터의 경우 두 컨버터를 같은 스위칭 주파수로 동작시키면 각 컨버터의 전압 전달비가 달라 각각의 입력 전압이 달라 전력 불균형이 발생한다.

$$G_v = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\lambda}{\sqrt{\left(1 + \lambda - \frac{1}{f_n^2}\right)^2 + Q^2 \lambda^2 \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)^2}} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{L_m}{L_r}, R_{ac} = \frac{8}{\pi^2} R_L, Q = \frac{1}{R_{ac}} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}, f_n = \frac{f_r}{f_s} \quad (2)$$

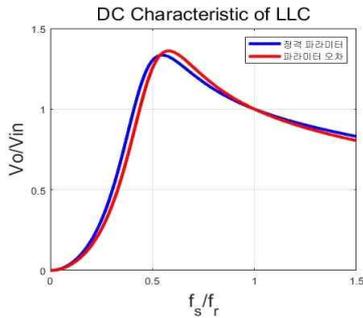


그림 3 LLC 컨버터의 전압 이득 그래프

3. 전력 평형 제어 알고리즘

3.1 IVS & OCS 제어

IVS, OCS 제어는 모듈형 전력변환장치에서 사용되는 전력 평형 제어 기법이다. IVS는 각 컨버터의 입력 전압을 같도록 제어하여 전력 평형을 달성하고 OCS는 각 컨버터의 출력 전류를 같도록 제어하여 전력 평형을 달성한다. 이때, ISOP 구조에서 IVS와 OCS는 식(3)~(7)에 따라 상호 만족하는 관계를 가진다. 이때 출력 필터 인덕터가 없는 LLC 컨버터 특성상 본 논문에서는 IVS 제어 기법을 활용한다.

$$V_{in1} \cdot I_{in1} = V_o \cdot I_{o1} \quad (3)$$

$$V_{in2} \cdot I_{in2} = V_o \cdot I_{o2} \quad (4)$$

$$V_o : constant, I_{in1} = I_{in2} \quad (5)$$

$$OCS : I_{o1} = I_{o2} \rightarrow V_{in1} = V_{in2} \quad (6)$$

$$IVS : V_{in1} = V_{in2} \rightarrow I_{o1} = I_{o2} \quad (7)$$

3.2 기존의 IVS 제어 방식

기존의 IVS 제어 방식은 그림 4와 같이 출력 전압 제어 성분 에 입력 전압에 대한 값을 보상하여 전압 전달비를 같게 하는 제어 방식이다. LLC 컨버터는 주로 스위칭 주파수를 변조하여 출력 전압을 제어하는 Pulse Frequency Modulation(PFM) 방식을 적용

한다. 이때, IVS 제어를 적용하지 않고 두 컨버터를 같은 주파수로 동작시키면 그림 5와 같이 입력 전압의 차이가 생겨 전력 불균형이 발생한다. 이때, IVS 제어를 적용하면 각 LLC 컨버터는 다른 스위칭 주파수로 동작해 그림 6과 같이 입력 전압이 같게 되어 전력 평형을 달성하게 된다. 하지만 각 컨버터가 서로 다른 주파수로 동작하면 그림 7번과 같이 각 컨버터의 출력 전류의 주파수에 따라 총 출력 전류가 일정한 주기로 진동하게 된다. 이는 전력 품질을 감소시키기 때문에 반드시 해결해야 할 문제이다.

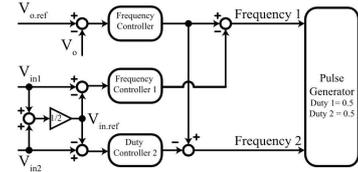


그림 4 주파수 보상 IVS 적용 제어기

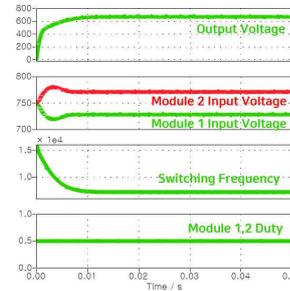


그림 5 IVS 미적용 시 파형

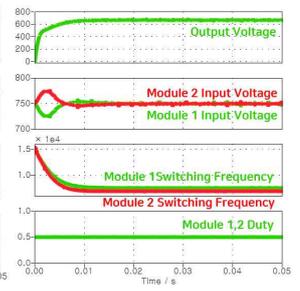


그림 6 주파수 보상 IVS 적용 시 파형

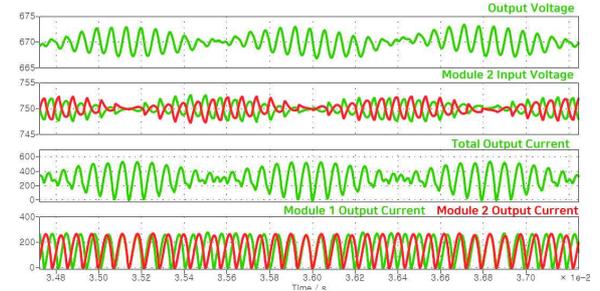


그림 7 주파수 보상 IVS 적용 시 정상상태 파형

3.3 제안하는 전력 평형 제어 알고리즘

본 논문에서는 앞서 언급한 ISOP 구조의 LLC 컨버터에서 주파수 보상을 통한 전력 평형 제어의 문제점을 해결하기 위해 시비율 제어가 적용된 전력 평형 제어 알고리즘을 제안한다. 제안하는 제어기의 구조는 그림 8번과 같다. 제안하는 제어기는 출력 전압을 이용해 모듈의 공통 스위칭 주파수를 결정하고 각 컨버터의 입력 전압을 이용해 각 컨버터의 시비율을 결정한다.

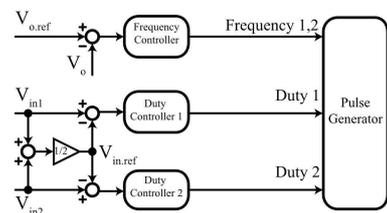


그림 8 제안하는 전력 평형 제어기

제안하는 제어 방식을 적용한 ISOP 구조의 LLC 컨버터는 각 컨버터 모듈이 같은 주파수로 동작하여 출력 전압을 제어하고 각 시비율을 변조시켜 각 모듈의 전압 전달비를 같게 하여 전력 평형을 달성한다. 제안하는 제어기를 적용했을 시 파형은 그림 9번에 나타내었다. 이때, 출력 전압과 입력 전압에 대한 제어 효과는 주파수 보상을 통한 전력 평형 제어와 유사한 결과를 띄지만 그림 10번과 같이 각 컨버터의 출력 전류의 주파수가 같아 진동이 없는 일정한 출력 전류와 전압을 가진다.

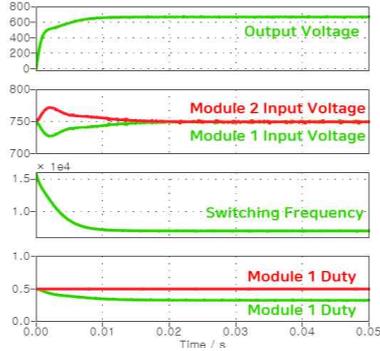


그림 9 제안하는 전력 평형 제어기 적용 시 파형

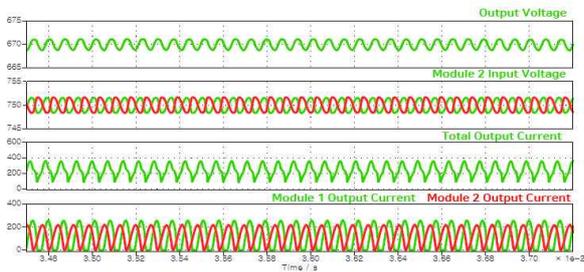


그림 10 제안하는 전력 평형 제어기 적용 시 파형 (정상상태)

4. HILS를 통한 검증

제안하는 시비율 제어가 적용된 전력 평형을 검증하기 위해 Hardware In the Loop System(HILS)으로 실험을 진행하였다. 제어기의 형태는 전력 평형 제어가 적용되지 않은 경우, 주파수 보상을 통해 전력 평형 제어를 달성하는 경우 그리고 제안하는 시비율 제어를 적용한 전력 평형 제어기를 비교한다. 그림 11, 12, 13번은 각 제어기의 과도상태를 나타낸 그래프이며 그림 14, 15번은 주파수 보상과 시비율 제어를 적용할 경우의 정상상태 그래프이다.



그림 11 IVS 미적용 시 파형 (실험)



그림 12 주파수 보상 IVS 적용 시 파형 (실험)

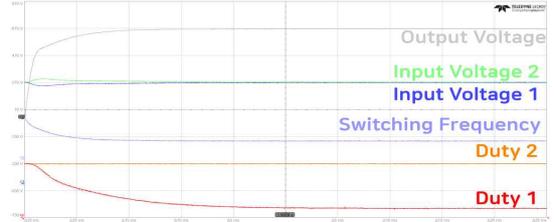


그림 13 제안하는 전력 평형 제어기 적용 시 파형(실험)

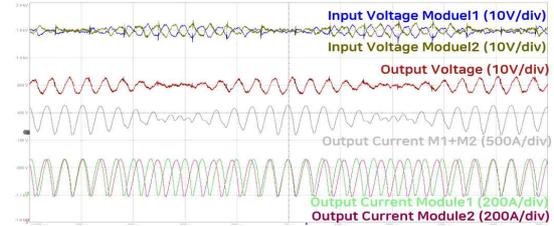


그림 14 주파수 보상 IVS 적용 정상상태 파형 (실험)

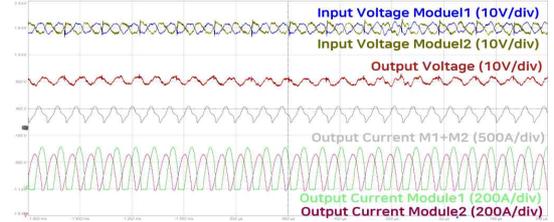


그림 15 제안하는 전력 평형 제어기 적용 시 파형(실험)

5. 결론

본 논문에서는 ISOP 구조의 LLC 컨버터에서 발생하는 파라미터 오차에 의한 전력 불균형을 해소하고 기존 IVS 제어기 사용 시 발생하는 문제점을 해소하기 위해 시비율 제어가 적용된 전력 평형 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안한 제어기는 모의 해석과 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

이 논문은 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2024R111A3048301)

참고 문헌

- [1] Baek, S. W., Kim, H. W., & Kang, J. W. (2019, October). Auxiliary power unit for railway vehicles using three-level LLC converter with pulse width modulation control. International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE), IEEE pp. 232-236, 2019
- [2] Ruan, Xinbo, et al. "Control strategy for input-series - output-parallel converters." IEEE Transactions on Industrial Electronics 56.4, pp. 1174-1185, 2008.