

직렬 입력 병렬 출력 LLC 컨버터가 연결된 3레벨 정류기의 DC-Link 전압 불평형에 관한 연구

백승우¹, 김학원¹, 조천수²
 한국교통대학교¹, 동아일렉콤²

A Study on DC-Link Voltage Unbalance of Three-Level Rectifier Connected with Serial Input Parallel Output LLC Converter

Seung-Woo Baek¹, Hag-Wone Kim¹, Chun-Soo Cho²
 Korea National University of Transportation¹, Dong-Ah Elecomm²

ABSTRACT

본 논문은 3레벨 정류기와 직렬 입력, 병렬 출력 LLC 컨버터가 연결된 전원 장치의 DC-Link 전압 불평형 제어에 관해 분석한다. 일반적으로 380Vac 입력을 가지는 3레벨 부스트 기반 정류기는 출력 전압을 700Vdc 이상으로 제어한다. 또한, 3레벨 컨버터는 두 개의 직렬 출력 커패시터를 가지며, 불균형 해소를 위한 제어 또는 물리적 불평형 해소 소자가 요구된다. 스위칭 신호를 공유하는 두 개의 LLC 컨버터가 연결된 시스템에 DC-Link 불평형 전압 제어가 적용되면 전력의 쓸림 현상이 발생한다. 본 논문은 제시된 시스템에서 전력의 쓸림 현상에 대해 그 원인을 분석하고 실험으로 검증한다.

1. 연구의 배경

전기차 급속 충전, 통신, 서버용 전원 장치 등 전원 장치의 고용량 및 고효율화 추세에 따라 에너지 밀도와 효율을 향상할 수 있는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 정류기는 역률 개선 기능(Power Factor Correction)을 포함하는 부스트 기반 3레벨 비엔나 정류기는 입력 전류 및 출력 전압의 총 왜곡률(Total Harmonic Distortion)이 작을 뿐 아니라 낮은 내압의 전력 반도체를 사용하여 스위칭 손실이 작은 장점이 있다. 3레벨 정류기는 두 개의 출력 커패시터를 가지며 각 커패시터의 소자값과 병렬 임피던스의 불균형으로 인해 두 커패시터의 전압 불균형이 발생한다. 이를 해결하기 위해 DC-Link의 불균형 해소에 관한 연구가 진행되었다^[1].

한편, 정류기에서 출력되는 전압은 600Vdc 이상이 되며, 절연형 DC/DC 컨버터가 연결되어 최종 부하에 전력을 공급한다. 절연형 컨버터는 대표적으로 위상 천이 풀 브리지 컨버터와 직렬 공진 LLC 컨버터가 사용된다. 이 중 LLC 컨버터는 높은 효율과 적은 부품의 개수를 가지므로 체적을 줄일 수 있는 장점이 있으나, 제어가 복잡하고 소자의 편자에 의해 시스템 특성이 민감하게 변화하는 단점이 있다. 최근에는 DC/DC 컨버터의 입력을 3레벨로 구성하여 직렬 입력 병렬 출력(Input Serial Output Parallel, ISOP)로 구성하여 내압이 낮은 고속 스위칭 소자를 사용할 수 있는 토폴로지가 사용되고 있다.

본 논문에서는 3레벨 정류기의 출력에 직렬 입력 병렬 출력 LLC 컨버터가 연결된 시스템의 DC-Link 불균형 발생 원인을 분석하고 DC-Link 전압 균형제어를 적용하였을 때 나타나는 LLC 컨버터의 전력 불균형에 관한 결과를 도출한다.

2. DC-Link 전압 불평형 원인 분석

그림 1은 3레벨 비엔나 정류기와 ISOP LLC 컨버터가 연결된 통신용 전원 장치의 시스템 구성을 나타낸다. 비엔나 정류기는 PFC 기능을 수행함과 동시에 DC-Link가 일정한 직류 전압을 가지도록 제어한다. 두 개의 LLC 컨버터들은 각각 DC-Link의 상단/하단 전압을 입력으로 하고 출력은 병렬로 구성되며, 스위칭 신호는 상단/하단 모듈이 동일하게 제어된다. 두 LLC 컨버터의 회로 시정수가 동일한 경우 출력 임피던스의 차는 존재하지 않는다. 하지만 대표적인 자성 소자(공진 인덕터, 자화 인덕터) 재료인 페라이트 코어의 자속 오차는 통상 20% 내외를 가지며, LLC 컨버터의 시스템 특성을 변화시켜 전압 불평형 발생의 원인이 된다.

LLC 컨버터의 전압 이득은 First Harmonic Approximation을 이용하면 수식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$M = \frac{1}{2n} \frac{1}{(1 + \lambda - \lambda(\frac{f_s}{f_r})^2)^2 + ((\frac{f_r}{f_s} - \frac{f_s}{f_r})Q)^2} \quad (1)$$

여기서 n 은 변압기의 권선 비, $\lambda = L_r/L_m$, $Q = \sqrt{L_r/C_r}((8/\pi^2)n^2R_o)$, $f_r = 1/(2\pi\sqrt{L_rC_r})$ 그리고 f_s 는 스위칭 주파수를 나타낸다.

그림 2는 DC-Link 전압이 700V, 변압기의 권선비는 3.5:1, 부하 저항은 0.5Ω일 때 전압이득 곡선을 나타낸다. 붉은 점선과 이상적인 소자 값을 가지는 LLC 컨버터, 파란 점선은 자성 소자가 20% 큰 값을 가지는 모듈의 각 전압이득이다. 수

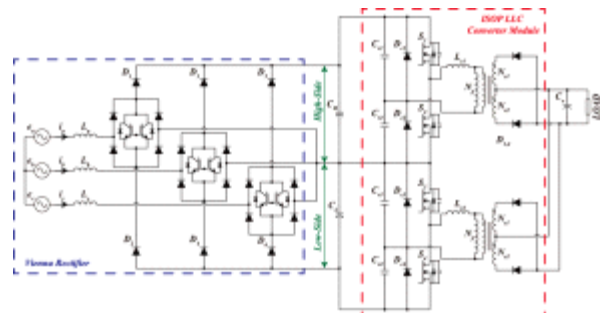


그림 1 통신용 전원 장치의 시스템 구성
 Fig. 1 System Diagram of Communication Power Unit

식 (1) 에서 보인 것처럼 각 컨버터의 전압이득은 입력 전압과 스위칭 주파수의 함수로 나타낼 수 있으며, 스위칭 주파수는 두 컨버터가 동일하게 제어되기 때문에 독립적으로 가변이 가능한 요소는 입력 전압이 유일하다. 두 컨버터에 일정한 스위칭 주파수를 인가하여 기동하게 되면 전압이득이 높은 모듈이 낮은 모듈에 비하여 큰 전류를 출력한다. 즉, 상대적으로 작은 출력 임피던스가 나타나게 되며 입력 커패시터 C_H 의 전압이 감소함과 동시에 출력 임피던스가 증가하게 된다. 반대로 C_L 은 전압이 상승하게 되며 출력 임피던스는 상승한다. 즉, 각 컨버터의 출력 전류에 따라 입력 전압이 자동으로 변경되어 전력 평형을 이룬다. 두 컨버터가 동일한 주파수로 운전되는 경우 최종 출력 전압은 다음 수식과 같다.

$$V_o = \frac{V_{dc}}{4n} (M_H + M_L) \quad (2)$$

여기서 M_H 및 M_L 은 각 컨버터의 전압이득이다. 식 (2) 가 의미하는 것은 두 전압이득의 평균값이 최종 출력 전압으로 나타난다는 점으로 그림 2의 검은색 실선이다. 초기 각 점선으로 그려진 컨버터의 전압이득은 출력 전류에 따라 입력 전압이 변동되어 동일한 색상 실선의 이득을 가지게 된다. 이때, 상단과 하단의 각 입력 전압 편차 V_{diff} 는 다음으로 유도된다.

$$V_o = \frac{M_H \times (V_s - V_{diff})}{2n} = \frac{M_L \times (V_s + V_{diff})}{2n} \quad (3)$$

$$V_{diff} = V_s \left(\frac{M_H - M_L}{M_H + M_L} \right) \quad (4)$$

3. 평형 제어 적용 시 발생하는 문제점

DC-Link의 불평형 전압은 정류기에서 간단하게 제어할 수 있다. 대표적으로 PWM에 전압 불평형 만큼 오프셋 전압을 인가하여 상단과 하단 커패시터에 각 공급 전류량을 제어하는 방법이 있다. 하지만 정류기의 출력이 ISOP LLC 컨버터가 연결된 경우 불평형 제어를 적용하면 컨버터 모듈의 출력 전력 불평형이 증가하는 문제가 있다. 정류기에서 두 LLC 컨버터의 전압을 동일하게 제어할 경우, 최초 출력 전류가 높은 모듈이 출력 임피던스가 감소하고, 낮은 모듈은 출력 임피던스가 증가하는 방향으로 정궤환이 발생하여 전력 쏠림 현상이 발생한다. 따라서 각 모듈의 전력에 따라 자동으로 균형이 이루어질 수 있도록 전압 편차 허용해야 한다. 그림 3과 4는 DC-Link 전압 평형 제어 적용 여부에 따른, 상단/하단 DC-Link 전압 및 LLC 모듈의 공진 전류를 나타낸다. 전압 평형 제어를 하지 않을 때는 DC-Link 전압에 차이가 있지만, 전류의 평형이 이루어진다. 전압 평형 제어를 적용하는 경우 공진 전류의 편차가 증가하는 것을 보여준다.

3. 결론

본 논문은 3레벨 정류기와 직렬 입력, 병렬 출력 LLC 컨버터가 연결된 전원 장치의 DC-Link 전압 불균형의 원인을 분석하고 불균형 제어가 적용되었을 때의 문제점에 대해 실험적으로 검증하였다.

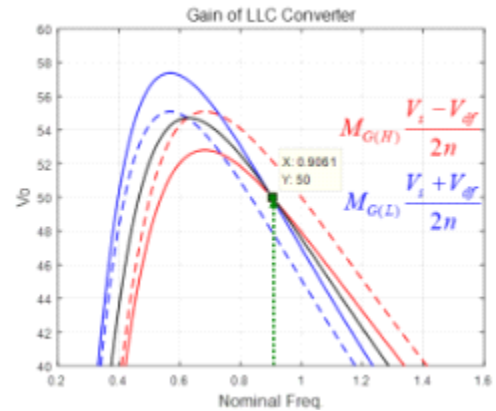


그림 2 LLC 컨버터의 전압 이득 곡선
Fig. 2 Voltage Gain Curve of LLC Converter

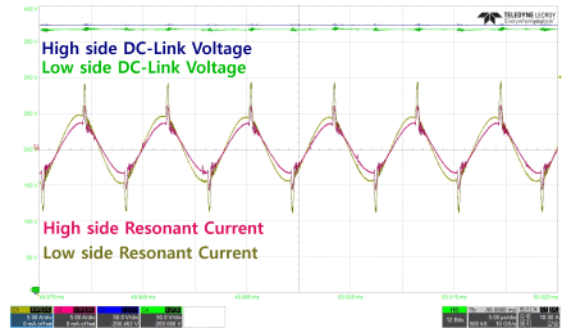


그림 3 DC-Link 커패시터 전압 불평형 제어가 적용되지 않은 실험 파형
Fig. 3 Experimental waveform without DC-Link voltage balance control

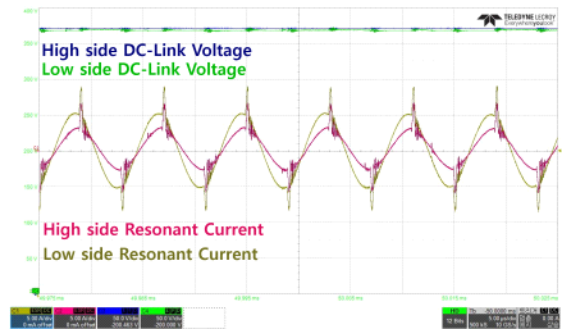


그림 4 DC-Link 커패시터 전압 불평형 제어가 적용된 실험 파형
Fig. 4 Experimental waveform with DC-Link voltage balance control

이 논문은 동아 일렉콤의 연구비 지원에 의하여 연구되었음. 본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 201601390005)

참고 문헌

[1] Lai, R.; Wang, F.; Burgos, R.; Boroyevich, D.; Jiang, D.; Zhang, D. Average Modeling and Control Design for VIENNA-Type Rectifiers Considering the DC-Link Voltage Balance. IEEE Trans. Power Electron. 2009, 24, 2509-2522.