

30kW급 LLC 공진형 컨버터에 관한 연구

문형승, 신덕식, 이상혁
한국전자기술연구원

Research on 30kW LLC resonant converter

Hyeong-Seung Moon, Duck-Shick Shin, Sang-Hyeok Lee
Korea Electronis Technology Institute

ABSTRACT

전기차 충전 파워모듈의 DC/DC 컨버터는 넓은 출력전압 뿐만 아니라 고효율/소형화를 위한 고주파 스위칭 동작과 모든 출력범위에서 소프트 스위칭(Soft Switching)이 가능해야한다. 따라서 본 논문에서 이러한 조건을 만족하기 위해 스위칭 손실 저감과 넓은 출력을 위한 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터 토폴로지를 제안하며 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였다.

1. 서론

최근 E-mobility 관련 다양한 종류의 배터리 팩을 충전할 수 있는 넓은 출력전압 제어 범위를 갖는 충전시스템이 요구되고 있다. 이와 같은 충전시스템의 경우 다양한 종류의 배터리에 대응할 수 있도록 출력전압 제어범위가 200~1000V로 넓은 출력전압 제어범위를 갖는 전력변환장치를 요구하고 있다. 또한 충전시스템의 전력변환장치는 넓은 출력전압 제어뿐만 아니라 고효율을 달성하기 위해 고주파 스위칭 동작 및 모든 출력전압에서 소프트 스위칭(Soft Switching)이 가능해야 하며, 이러한 조건을 만족하기 위해 LLC 공진형 컨버터가 적용되고 있다. 하지만 기존 LLC 컨버터는 공진 탱크 출력이 사인파이기 때문에 2차측에서 정류된 출력 전압에 스위칭 주파수의 교류 성분을 포함시켜 결과적으로 정류된 전류의 높은 교류 성분을 필터링하기 위해 상당히 큰 커패시터가 필요함에 따라 컨버터의 크기와 비용이 증가하는 문제점을 갖게 된다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터를 제안하며 주요 특징으로는 넓은 출력에서 2차측 풀 브리지 정류회로의 출력 리플은 더 높은 주파수로 낮은 교류 전류 성분을 갖음으로서 출력단 필터 설계를 간소화 할 수 있는 3상 인터리브드 LLC 컨버터를 제안한다.

2. 본론

2.1 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터 토폴로지

그림 1과 같이 넓은 출력 전압제어 범위를 갖는 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터는 메인 스위치(G1/G4, G2/G5, G3/G6)가 120도 위상 차이로 스위칭함으로써 1차 측은 하프-브리지 동작을 하며 2차측 정류부의 다중 출력을 릴레이를 통해 직/병렬 구조로 동작되어 입/출력전압이득을 결정하게 된다. 각 동작모드는 가변 스위칭주파수제어(Frequency Modulation, FM)을 통해 변화하며 그림 2와 같이 넓은 출력전압(V_{out} : 200~1000V)제어 범위를 가질 수 있다.^[1]

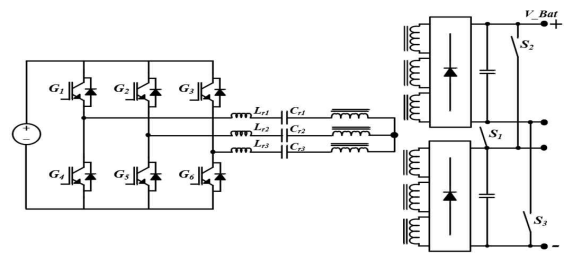


그림 1 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터 회로

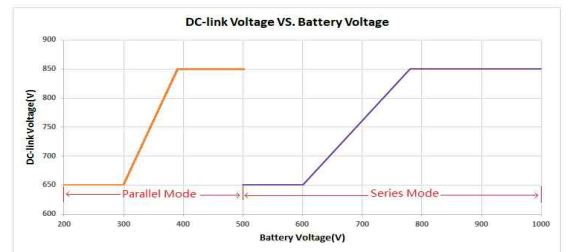


그림 2 동작 모드 간의 입/출력 전압 범위

2.2 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터 동작원리

3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터 세 개의 암(Arm)은 하프-브릿지 동작을 120도 위상차이로 동작한다. 그림 1과 같이 한 상 기준으로 한 주기 동안 Db1(body-diode)-G1-Db4(body-diode)-G4의 순서로 도통되며 스위치 G4가 턴-오프되면 V_{G4} (스위치G4의 전압)는 증가되고 V_{G1} (스위치G1의 전압)은 감소하게 된다. V_{G1} 이 감소되어 $-0.7V$ 에 도달되면 Db1이 도통되면서 전류는 G4에서 Db1으로 흐르게 된다. 이 조건에서 스위치 G1이 턴 온 되고 전류는 다시 반대방향으로 흐르게 된다. 높은 입력전압에 비해 내부 다이오드 양단에 걸리는 전압 약 $-1V$ 는 거의 무시되므로 영 전압상태에서 턴 온 된다고 볼 수 있다. 이를 통해 스위치 G1의 ZVS(Zero Voltage Switching) 조건을 달성하게 된다.^[2]

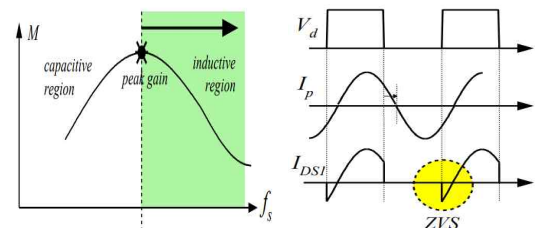


그림 3 커패시터,인덕터 동작 파형 및 ZVS 조건 파형

출력 단계에서 필요한 전압 범위와 높을 효율성 달성을 위해 3개의 스위치(S1,S2,S3)를 이용해 출력을 구성하는데 사용된다. 필요한 출력이 500V보다 높은 경우 그림 3과 같이 S1 ON, S2/S3 OFF로 직렬모드 동작을 하고, 출력이 500V 미만인 경우 S1 OFF, S2/S3 ON으로 병렬모드 동작한다.

구분	S1	S2	S3	출력 전압
직렬 모드	ON	OFF	OFF	500~1000V
병렬 모드	OFF	ON	ON	200~500V

표 1 3상 인터리브 LLC 컨버터 2차측 직/병렬모드 간의 스위치 동작

2.3 전압 이득 및 매개변수 설정

전압 이득 $M(K_f, K_L, Q)$ 를 구하기 위해서는 부하의 크기를 나타내는 등가 저항 R_{ac} 과 quality factor Q , 그리고 인덕턴스의 비율인 λ 를 고려해 식 (1), (2)와 같이 계산할 수 있다. 식 (1)에서 K_f 는 공진 주파수와 스위칭 주파수의 비율을 의미하고 이 두 값이 같다면 M 은 1이 된다. 본 논문에서 다루는 LLC 컨버터는 스위칭 주파수와 공진 주파수가 거의 근사한 인덕티브 모드이므로, $K_f = 1$ 을 식 (2)에 대입해 정리하면, 전압 전달비 M 이 거의 1에 근사함을 알 수 있다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}, R_{ac} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{1}{n^2}, Q = \frac{1}{R_{ac}} \cdot \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (1)$$

$$K_f = \frac{f_{sw}}{f_r}, \lambda = \frac{L_m}{L_r}$$

$$M(K_f, K_L, Q) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{K_f^2}\right)^2 + Q^2\left(K_f - \frac{1}{K_f}\right)^2}} \quad (2)$$

(3), (4) 식을 이용하여 MATLAB을 통해 표 2과 같이 매개변수를 선정하여 그림 5의 전압 이득 곡선을 얻었다. 이를 바탕으로 PSIM 시뮬레이션을 그림 6과 같이 구현하였다.

공진 주파수	180 kHz	공진 인덕터	11 uH
최소 스위칭 주파수	135 kHz	공진 커패시터	66 nF
최대 스위칭 주파수	250 kHz	자화 인덕턴스	40 uH

표 2 주요 설계 매개변수

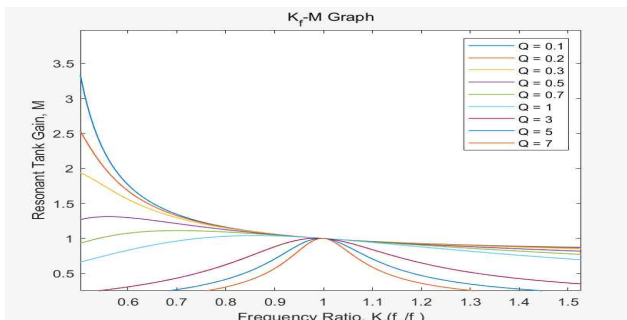


그림 5 전압 이득 곡선

표 2의 선정된 매개변수를 적용하여 PSIM을 통해 그림 7과 같이 출력전압 200~1000V 및 소프트 스위칭 ZVS 달성하여 제안된 토폴로지의 타당성을 검증하였다.

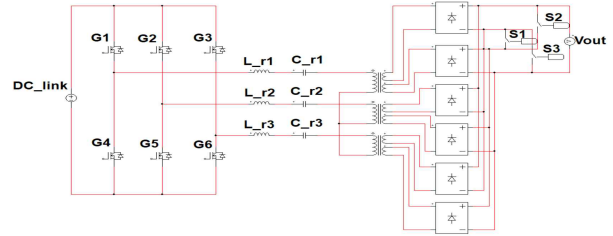


그림 6 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터 시뮬레이션 회로

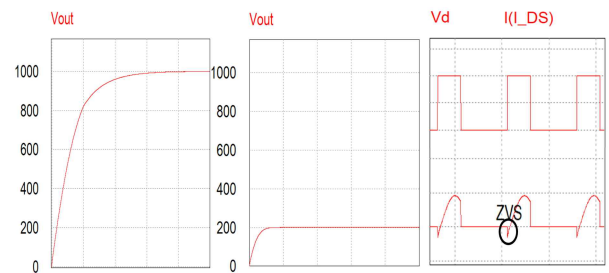


그림 7 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터 시뮬레이션 출력 파형

3. 결론

본 논문은 3상 인터리브 LLC 공진형 컨버터 동작원리와 풀브리지 정류회로 2차측 부분에 3개의 스위치를 적용해 넓은 출력 전압 제어를 연구하였다. 계산된 파라미터를 통해 전압 이득 곡선을 얻은 후 PSIM을 통해 OPEN LOOP로 구현하였다. 차후 3상 인터리브 LLC 공진형 컨버터의 제어기와 보드 제작 후 실험을 진행할 예정이다.

본 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구임. (No. 20222020900080, 운전자 맞춤형 스마트 충전서비스 및 고효율 충전시스템 개발 및 실증)

참고 문헌

- [1] G. Li, D. Yang, B. Zhou, Y. -F. Liu and H. Zhang, "Integration of Three-Phase LLC Resonant Converter and Full-Bridge Converter for Hybrid Modulated Multioutput Topology," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 10, no. 5, pp. 5844-5856, Oct. 2022.
- [2] L. Junkai, Y. Ge, M. Liu, Y. Yang, Q. Wu and Z. Cheng, "Research on a New Control Strategy for Reducing Hard-switching Work Range of the Three-phase Interleaved LLC Resonant Converter," 2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Turino, Italy, 2018