

풀 브릿지 LLC 컨버터의 MOSFET 개방회로 고장을 고려한 주요 파라미터 설계 기법

강수진, 채수용
포항공과대학교

A Parameter Design Method for Full-bridge LLC Converters Considering Open-Circuit Faults in MOSFETs

Sujin Kang, Suyong Chae
Pohang University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문은 풀 브릿지 LLC 컨버터의 MOSFET 개방회로 (Open Circuit)고장을 고려한 토폴로지 전환 기법을 제안한다. 기존 풀 브릿지 LLC 컨버터 고장 대응 기법과 달리, 별도의 추가 회로가 필요하지 않고 1차측 브릿지 회로의 전환과 설계를 통해 동작 지속성을 보장할 수 있다. 제안된 설계 기법은 4kW급 LLC 풀 브릿지 컨버터를 대상으로 LTspice 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서 론

LLC 컨버터에서 신뢰성 확보 및 효율성 향상은 중요한 요소이다. 고주파 스위칭 기술을 적용한 LLC 공진 컨버터는 소프트 스위칭을 통해 스위칭 손실을 줄이고 전력 밀도를 높여, 전반적인 시스템 효율을 향상시킬 수 있다. 이러한 LLC 공진 컨버터는 고전압과 대전류 환경에서 동작하므로 스위칭 소자에 과부하가 발생할 가능성이 있으며, 스위칭 소자의 열화나 손상은 컨버터 성능을 저하시킬 수 있다. 1차 측 MOSFET의 개방회로 고장은 전체 LLC 컨버터 고장의 약 절반 정도를 차지한다.^[1] 따라서 개방회로 고장 진단 및 대응 방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 내구성을 보장하기 위한 대책으로 중복 스위치나 서브모듈을 구축하여 고장 발생 시 결합되는 방법이 제안되고 있다. 이는 고장 발생 시, 시스템을 신속하게 복구하고, 추가적인 고장을 방지할 수 있지만 추가된 회로와 부품의 사용으로 시스템 비용 및 부피가 증가한다.

본 논문에서는 LLC 컨버터의 1차 측 MOSFET 개방 회로 고장(OCF)에 대응할 수 있는 설계 방법을 제안한다. 제안된 설계는 풀 브릿지 구성의 LLC 컨버터의 1차 측 MOSFET의 고장 상황에서, 하프 브릿지 모드로 전환하여 제한된 전력조건 내에서 지속적 동작을 유지할 수 있도록 한다. 이를 통해 추가적인 보호 회로를 사용하지 않고도 시스템의 복잡성을 최소화하면서 안정적인 동작을 보장할 수 있다. 제안하는 설계 방법은 4kW급 LLC 풀 브릿지 컨버터를 대상으로 LTspice 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 본 론

2.1 LLC 컨버터 모델링

LLC 컨버터는 1차 측에서 풀 브릿지 혹은 하프 브릿지 회로를 통해 전력을 전달한다. 공진 회로는 공진 인덕터, 공진

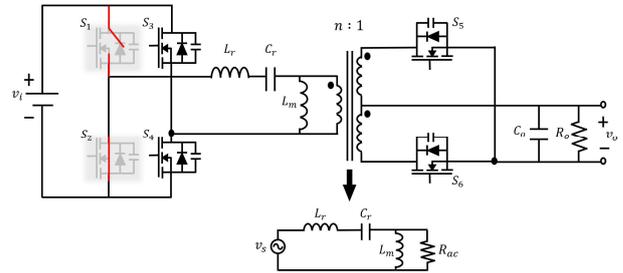


그림 1 MOSFET 개방회로 고장 시 LLC 공진 컨버터
Fig. 1 LLC Resonant Converter in MOSFET OCF

커패시터, 그리고 자화 인덕터로 구성되며, 에너지 저장 및 전달을 통해 출력전압을 조정한다. 1차 측에서 생성된 고주파 교류 전력은 변압기를 통해 2차 측으로 전달되며, 2차 측에서 동기 정류기나 다이오드를 통해 직류 전력으로 변환된다. 스위칭 주파수를 조절하여 입력전압 및 출력 부하 변동에도 출력 전압을 일정하게 유지할 수 있다.

공진 회로의 특성을 고려한 파라미터 설계를 통해 동작 주파수 범위에서 출력 안정성을 보장할 수 있다. LLC 컨버터는 고조파 성분을 포함한 비선형 회로이므로, 일반적으로 FHA (First Harmonic Approximation)를 통해 기본 주파수 성분으로 회로를 단순화하여 설계를 진행한다.

2.2 토폴로지 전환을 고려한 파라미터 설계

그림 2와 같이 MOSFET 고장 상황에서 1차 측 브릿지가 풀 브릿지에서 하프 브릿지 구조로 전환 시, 공진 회로에 전달되는 전압의 크기가 절반으로 감소하므로, 이를 고려하여 FHA 등가 회로를 이용한 파라미터 설계가 필요하다.

$$\frac{V_o \times N}{V_i \times 1.1} \leq M \leq \frac{V_o \times N}{\frac{V_i}{2} \times 0.9}, \quad (N = \frac{V_i}{V_o}) \quad (1)$$

식 (1)은 공진 회로의 이득 값인 M 에 대한 범위를 나타낸다. V_o 는 출력전압, V_i 는 입력전압, N 은 턴수비이며, 입력전압은 $\pm 10\%$ 의 변동을 고려하였다. ZVS동작을 보장하는 영역은 스위칭 주파수가 증가함에 따라 이득이 감소하므로, 이득 범위에 따른 스위칭 주파수의 동작 범위를 고려해야 한다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation Parameters

1차 측 MOSFET	C3M0025065D (650V, 97A)
2차 측 MOSFET	AON6290 (100V, 85A)
입력 전압	380V(±10%)
출력 전압	48V(최대4kW)
공진 회로 파라미터	L_r : 6.34μH, L_m : 25.36μH, C_r : 177.57nF
공진 주파수	f_o : 150kHz
풀 브릿지 모드	f_{sw} : 148.5kHz (4kW), f_{sw} : 152.7kHz(400W)
하프 브릿지 모드	f_{sw} : 121.0kHz (4kW), f_{sw} : 121.9kHz(400W)

FHA 등가 회로에서 스위칭 주파수에 따른 공진회로의 이득은 다음의 수식을 통해 구할 수 있다.

$$M = \frac{1}{\sqrt{(1+m-\frac{m}{f_n^2})^2 + Q^2(f_n - \frac{1}{f_n})^2}} \quad (2)$$

$$m = \frac{(L_r + L_m)}{L_r}, Q = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{R_{ac}}, f_n = \frac{f_{sw}}{f_o} \quad (3)$$

m 비율은 자화 인덕턴스와 공진 인덕턴스의 비율이며, Q 인자는 공진 회로의 품질 인자를 나타낸다. 식(2)를 이용하여 스위칭 주파수에 따른 이득 곡선을 얻을 수 있다. 이득 범위가 넓은 상황에서는 Q 인자와 m 비율을 작게 선정하여 이득 범위를 보장하도록 한다.

수식 (2)에서 선정된 m과 Q 인자의 값을 통해 공진 회로의 주요 파라미터는 다음의 수식으로 결정한다.

$$L_r = \frac{R_{ac}^{min} Q_{max}}{2\pi f_o}, L_m = (m-1)L_r, C_r = \frac{1}{(2\pi f_o)^2 L_r} \quad (4)$$

L_r 은 공진 인덕터, L_m 은 자화 인덕터, C_r 은 공진 커패시터의 파라미터 값이며, R_{ac}^{min} 은 최대 출력 부하에 대한 등가 회로 값, f_o 는 공진 주파수이다.

FHA 방법은 스위칭 주파수가 공진 주파수와 유사한 범위에서 유효하다. 스위칭 주파수가 공진 주파수에서 멀어질수록, 고조파 성분의 영향으로 인해 FHA의 정확도는 감소한다. 이를 보완하기 위해 시간 영역 모델링을 통해 peak gain을 분석하고, 선정된 m 비율과 Q 인자의 적절성을 평가할 수 있다.^[2]

3. 시뮬레이션 결과

제안한 토폴로지 전환 기법의 성능을 검증하기 위해 LTspice 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 2, 3은 다른 조건의 부하 상황에 대해 브릿지 LLC 컨버터의 S1 MOSFET가 3ms에서 개방회로 고장이 발생하는 상황을 가정하였다. 3.1ms에서, 같은 레그에 위치한 S2 MOSFET이 켜지고, S3와 S4의 스위칭 주파수를 조정하였다. 시뮬레이션 결과, S1의 개방회로 고장 이후인 3.2ms부터 출력전압이 회복되어 3.5ms에는 안정적으로 출력이 유지되었다. 경부하 상황에서도 출력이 회복되며, 고장 상황에도 낮은 전압 변동성을 보였다. 또한 모드 전환 시 ZVS 영역에서 동작함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 MOSFET 개방회로 고장발생 시, 토폴로지

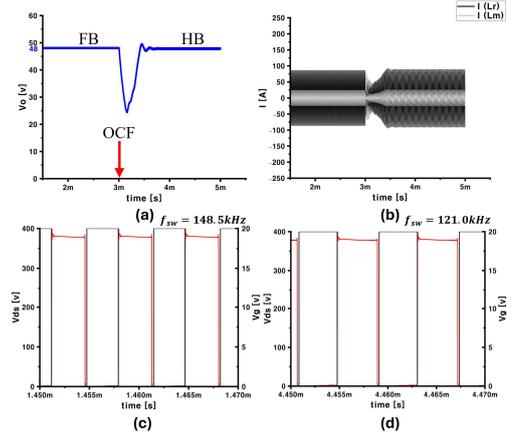


그림 2 100% 부하 (a) 출력전압 (b) 인덕터 전류
(c) FB시 ZVS 동작 (d) HB시 ZVS 동작

Fig. 2 100% Load (a) Output Voltage (b) Inductor Current
(c) ZVS - FB (d) ZVS - HB

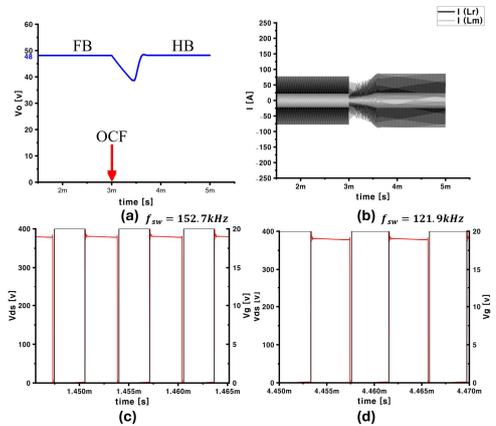


그림 3 10% 부하 (a) 출력전압 (b) 인덕터 전류
(c) FB시 ZVS 동작 (d) HB시 ZVS 동작

Fig. 3 10% Load (a) Output Voltage (b) Inductor Current
(c) ZVS - FB (d) ZVS - HB

전환과 스위칭 주파수 제어만으로 출력 안정성을 보장할 수 있는 설계 방법을 제안하였다. 해당 방법은 Q 인자가 작을수록 고조파 성분에 의한 손실이 증가하나, 시스템의 복잡성을 최소화 하면서도 MOSFET 개방회로 고장 상황에서 효과적으로 대응할 수 있는 방법임을 확인하였다.

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.RS-2024-00457571)

참고 문헌

[1] W. Wang, Y. Li, Q. Wang, C. Fang, Y. Peng and Z. Shuai, "Switch Open-Circuit Fault Diagnosis Method Using Bridge Arm Midpoint Voltage Integral for LLC Resonant Converter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 39, no. 10, pp. 13795-13807, Oct. 2024.
[2] S.-S. Hong, S.-H. Cho, C.-W. Roh, and S.-K. Han, "Precise Analytical Solution for the Peak Gain of LLC Resonant Converters," Journal of Power Electronics, vol. 10, no. 6. The Korean Institute of Power Electronics, pp. 680–685, 20-Nov-2010.