

LLC 컨버터의 경부하 효율 향상을 위한 PWM 제어의 연속 동작이 가능한 페루프 제어기 설계

장재혁, 윤동관, 한유, 이도홍, 김봉국, 조영훈
건국대학교 전력전자연구소

Design of a Closed Loop Controller with Continuous Operation of PWM Control for Efficiency Improvement of LLC Converter on Light Load

Jaehyeok Jang, Dongkwan Yoon, Yu Han, Dohong Lee, Bonggook Kim, Younghoon Cho
Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

ABSTRACT

LLC 컨버터는 자화 인덕터를 이용한 영 전압 스위칭으로 높은 효율을 갖는 DC-DC 컨버터의 토폴로지이며, 넓은 전압 범위 동작으로 많은 분야에서 널리 사용되고 있다. 하지만 경부하 동작 시 높은 스위칭 주파수 동작에 의해 스위칭 소자에서 발생하는 손실이 증가한다. 본 논문에서는 LLC 컨버터의 이러한 문제점을 개선하고자 LLC 컨버터의 스위칭 주파수 범위를 제한하고 가변 듀티 동작을 하는 듀티 제어와 0.5의 고정 듀티를 갖는 일반적인 주파수 제어와 연속적으로 동작하는 페루프 제어기의 구조를 제안한다.

1. 서 론

기후 변화 문제에 따라 전 세계적으로 탄소중립 시행에 있어 신재생 에너지의 중요성은 점점 커져가고 있다. 신재생 에너지 중 태양광 에너지는 에너지원이 무한하고 규칙적이며, 무인화가 가능하고 수명이 길다는 장점으로 신재생 에너지 중 가장 높은 비중을 갖고 있으며, 이에 따라 태양광 패널로부터 가정으로 전원을 공급하는 마이크로 인버터 어플리케이션도 활발히 연구되고 있다. 태양광 패널은 일조량에 따라 변동하는 DC전압을 출력하게 된다. 태양광 패널로부터 변동하는 DC전압을 공급받아 일정한 DC Link 전압을 출력하고, 220V_{rms}의 교류전원을 만들기 위해 마이크로 인버터에는 넓은 전압범위 동작이 가능한 LLC 컨버터가 주로 사용되고 있다.

일반적인 LLC 컨버터는 0.5의 고정 듀티와 스위칭 주파수 제어를 통하여 출력 전압을 제어한다. LLC 컨버터의 주파수 제어 특성상 낮은 전압 전달비가 필요한 경우 사인파 형태를 갖는 공진 전류의 공진 주기가 끝나기 전에 스위치를 턴 오프시켜 전력이 전달되는 양을 감소시켜야 한다. 그렇기 때문에 공진 주파수보다 스위칭 주파수가 높아지게 되므로 스위칭 소자에서 발생하는 손실이 증가하여 효율이 감소하게 된다는 한계점이 존재한다. 다양한 연구에서 이 한계점을 개선하고자 스위칭 주파수를 제한하고, 듀티 제어를 통한 스위칭 손실을 개선하는 제어 방법을 제시하였다.^{[1][2]} 그러나 LLC 컨버터에 듀티 제어를 추가하였지만 듀티 제어를 주파수 제어와 연속적으로 동작시키는 제어기 구조에 대해 상세히 분석되지 않았다. 본 논문에서는 0.5의 고정 듀티의 주파수 제어를 하는 LLC 컨버터에 낮은 전압 전달비를 갖는 특정 동작 조건에서 주파수 제어와 듀티 제어 기법이 연속적으로 동작하는 제어기 구조를 제안한다. 제안하는 제어기 구조의 유효성을 모의실험을 통하여 검증하였다.

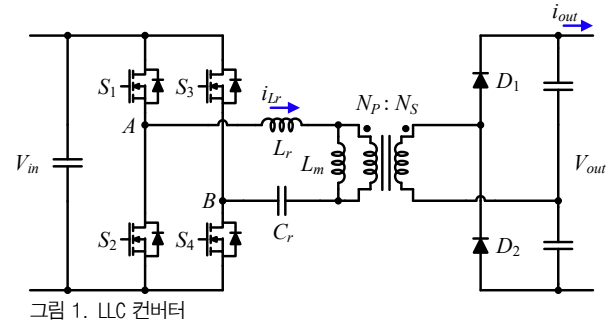


그림 1. LLC 컨버터

2. 본 론

2.1 LLC 컨버터의 한계점

그림 1은 LLC 컨버터 토폴로지를 보여준다. LLC 컨버터는 1차측 풀브릿지 스위치 $S_1 \sim S_4$ 와 2차측 정류다이오드 D_1, D_2 , 공진 커패시터 C_r , 공진 인덕터 L_r , 자화 인덕터 L_m , 1차측, 2차측 턴 수가 각각 N_p, N_s 인 변압기로 이루어져 있다. LLC 컨버터의 제어는 L_r, C_r 의 직렬 공진의 공진과 스위칭 주파수 변동을 통해 전압 전달비를 조절하여 전기에너지를 전달하는 컨버터이다. 전압 전달비와 스위칭 주파수는 반비례하는 관계를 갖는다. 즉 낮은 전압 전달비를 위해서는 높은 스위칭 주파수 동작을 해야 한다. 하지만 높은 스위칭 주파수는 DSP(Digital Signal Processor)의 System clock의 한계로 스위칭 주파수가 높아질수록 주파수를 변동하는 분해능이 낮아져, 출력 전압의 제어 성능을 저하시킨다. 또한 높은 주파수에서 개선된 분해능 구현을 위해 높은 System clock을 갖는 고성능 DSP가 요구된다.

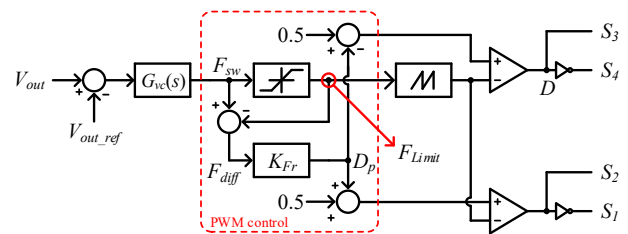


그림 2. LLC 컨버터의 연속 동작이 가능한 제어기 블록도

2.2 LLC 컨버터의 듀티 제어 및 페루프 제어기

LLC 컨버터의 듀티 제어는 S_1, S_3 의 듀티를 0.5에서 감소시키고, 감소된 듀티의 비율만큼 전달되는 전기에너지의 양을 감소시키므로 듀티 제어의 동작은 벡 컨버터의 전력 전달과 유사하게 동작한다. 그림 2는 주파수 제어와 듀티

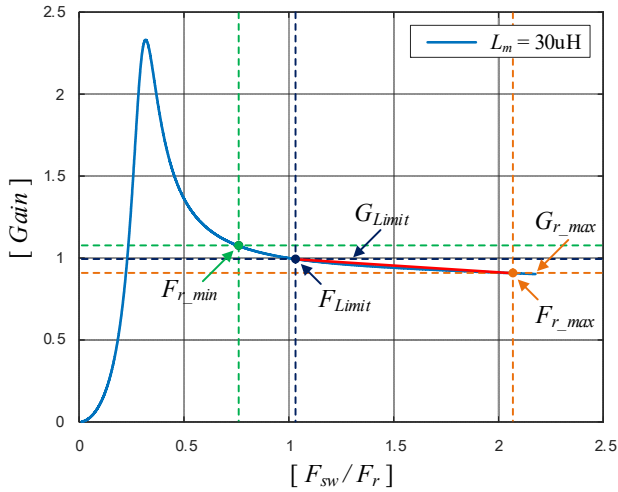


그림 3. LLC 컨버터의 전압 전달비 곡선

제어가 연속적으로 동작하는 LLC 컨버터의 페루프 제어기 블록도이다. 제어기 $G_{vc}(s)$ 는 비례적분제어를 적용한 전압 제어기의 전달함수이다.

제안하는 제어기의 구조는 주파수의 제한 값 F_{Limit} 를 초과할 경우 초과한 주파수 F_{diff} 에 비례 상수 K_{Fr} 를 곱하여 듀티로 환산한다. 환산된 듀티는 고정 듀티 0.5에 반영되어 제어기의 전환 없이 주파수 제어와 듀티 제어를 연속적으로 동작하며 출력 전압을 제어한다. F_{diff} 를 D_p 로 환산하는 방법은 다음과 같다. 그림 3과 같이 전압 전달비 곡선을 통해 경 부하 동작에 필요한 최대 스위칭 주파수 F_{r_max} 와 제한 주파수 F_{Limit} 를 결정하고, F_{r_max} 와 F_{Limit} 사이의 전압 전달비 곡선을 선형화 하여 기울기 K_{Fg} 를 구하고, 스위칭 주파수 F_{sw} 와 전압 전달비 $Gain$ 의 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{Fg} = \frac{G_{r_max} - G_{Limit}}{F_{r_max} - F_{Limit}} \quad (1)$$

$$F_{diff} = F_{sw} - F_{Limit} \quad (2)$$

$$Gain = K_{Fg} \cdot F_{diff} + G_{Limit} \quad (3)$$

스위칭 주파수와 전압 전달비의 관계식(3)에 따라 F_{diff} 에서 D_p 로 환산하는 상수 K_{Fr} 에 대한 식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$D_p = -\frac{1}{2} \cdot K_{Fg} \cdot F_{diff} \quad (4)$$

$$K_{Fr} = -\frac{1}{2} \cdot K_{Fg} \quad (5)$$

표 1 LLC 컨버터 모의실험 조건

Param.	Value	Param.	Value
V_{in}	38V	V_{out}	420V
L_m	30uH	L_r	3uH
C_r	1uF	$N_p : N_s$	4:22
F_r	91.88kHz	P_{out}	400W

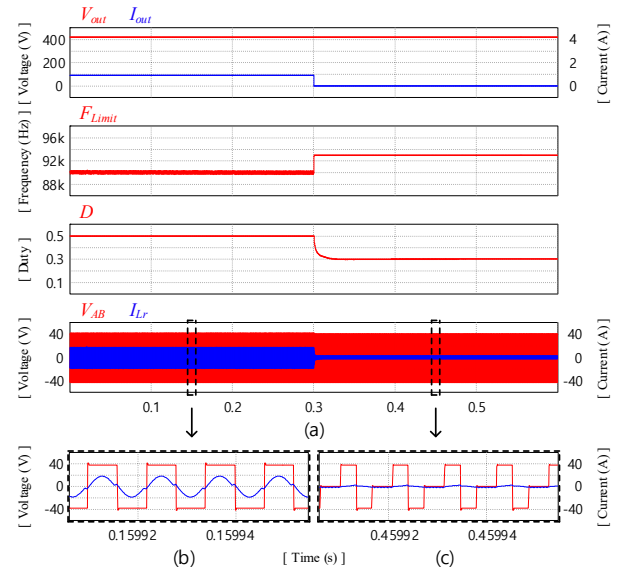


그림 4. LLC 컨버터의 주파수 제어 및 듀티 제어의 연속 동작 모의실험
(a) 연속 동작 파형, (b) $D = 0.5$, (c) $D = 0.3$

2.3 모의실험 결과

설계한 제어기 구조의 유효성 검증을 위해 PSIM을 이용하여 모의실험을 진행하였으며, 모의실험 조건은 표 1과 같다. 그림 4 (a)는 중부하에서 경부하로 부하 변동 시의 출력 전압 V_{out} , 출력 전류 I_{out} , 제한 주파수 F_{Limit} , 듀티 D , 1차측 풀브릿지 극 전압 V_{AB} , 공진 전류 I_{Lr} 의 파형이며, (b), (c)는 정상상태에서의 듀티에 따른 V_{AB} , I_{Lr} 파형이다. 스위칭 주파수는 제한 주파수인 93kHz에 고정되며 약 0.2의 듀티 변동을 통한 출력 전압 제어를 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 경부하 동작 조건에서 스위칭 주파수를 제한하고, 제어기를 통해 출력된 주파수와 제한 주파수의 차이를 이용하여 주파수 제어와 듀티 제어를 연속적으로 동작하는 제어기를 설계하고, 모의실험을 통해 제어기의 유효성을 검증하였다. 도통저항이 낮고 스위칭 손실이 큰 스위칭 소자를 사용하는 경우에 듀티 제어가 효과적인 것이며, 고성능의 DSP를 사용하지 않는 시스템의 경우에 제안하는 제어기가 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)

참 고 문 헌

- [1] Xu, Jingtao, et al. "PWM modulation and control strategy for LLC-DCX converter to achieve bidirectional power flow in facing with resonant parameters variation." IEEE Access 7 (2019): 54693-54704.
- [2] 김중우. "PWM 제어 방식을 도입한 하프-브릿지 LLC 컨버터." 전력전자학회 2016년도 하계학술대회. 전력전자학회, 2016.