

LLC 컨버터의 경 부하 효율 개선을 위한 새로운 제어 기법

이유진, 김종우
 건국대학교 전기전자공학부

A New Control Method for Improving Light-Load Efficiency of LLC Converter

Yu-Jin Lee and Jong-Woo Kim
 Department of Electrical and Electronic Engineering, Konkuk University

ABSTRACT

기존 LLC 컨버터의 경 부하 동작 시 사용되는 burst mode control은 동적 특성이 좋지 않다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 half bridge LLC 컨버터의 경부하 동작 시 연속적으로 동작하는 새로운 제어 기법을 제안한다. 제안된 제어 기법은 스위칭 주기 내에 LLC 컨버터의 저주파 공진 주기를 freewheeling 주기로 삽입하여 유효 부하 조건을 증가시킨다. 이러한 방법은 freewheeling 주기의 시작과 끝에서 동일한 상태 변수를 가져 인가시와 해제 시 출력 전압이 일정하다. 이에 따라, 기존 burst mode 제어와 달리 동적 성능이 우수하다. 제안된 제어 방식의 효과는 400-300V 입력 및 50V/5A 출력을 갖는 프로토타입을 통해 검증되었다.

1. 서론

데이터 센터는 시간에 따라 사용자 트래픽이 변동하기 때문에 경 부하 조건에서도 효율적으로 동작해야 한다. 그림1은 데이터 센터용 전원 장치의 DC/DC단에 많이 사용되는 LLC 공진형 컨버터를 나타낸다. 데이터 센터 어플리케이션은 상대적으로 출력 전압이 낮고 출력 전류는 크기 때문에, center tapped 변압기를 사용하여 전도 손실을 낮추며, 소자 사용을 최소화하여 비용을 절감할 수 있다.^[1]

데이터 센터용 전원 장치는 정상 동작 시 역률 보상 회로가 LLC 컨버터에 고정된 입력 전압을 제공한다. LLC 컨버터는 변압기의 턴 비를 출력전압에 대한 입력전압의 비로 설계한다($n=V_o/V_{in}$). 이에 따라, LLC 컨버터는 부하와 상관없이 스위칭 주파수가 공진 주파수로 일정하여 최대 효율을 낼 수 있다. 하지만, 일정한 동작 주파수는 전 부하 조건에서 일정한 자성체 손실을 의미하며, 경 부하 조건에서 자성체 손실이 입출력 전력에 비해 우세해지므로 효율이 저하되는 문제가 발생한다.

LLC 컨버터의 경 부하 조건에서 효율을 높이기 위한 방법으로 burst mode control이 많이 사용되고 있다.^[2] Burst mode control은 경 부하 상태에서 장기간에 걸쳐 LLC 컨버터를 켜고 끄는 방식으로 유효 부하를 증가시킨다. 그러나 이 방식은 경부하에서 전부하로 전환 시 동적 응답이 떨어진다는 단점이 있다. 기존 문헌^[3]에서는 이러한 점을 해결하기 위해 trajectory control을 제안했지만 이로 인해 분석 및 제어의 복잡성이 증가한다.

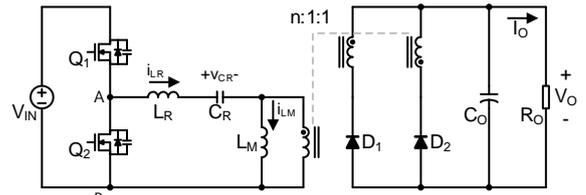


그림1 center tapped 변압기를 적용한 하프브릿지 LLC 컨버터
 Fig.1 Half bridge LLC converter with center-tapped transformer controlled shunt compensator

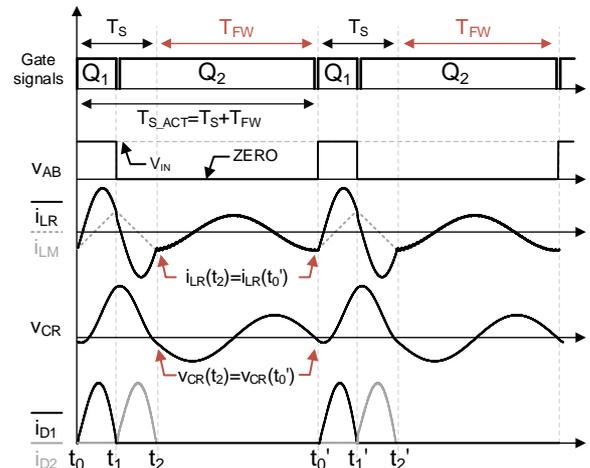


그림2 제안한 제어 기법을 적용한 하프브릿지 LLC 컨버터 동작 파형
 Fig.2 Key waveforms of half bridge LLC resonant converter with proposed control method

본 논문에서는 burst mode control의 좋지 않은 동적 응답을 개선하기 위해 경 부하 동작 시 자성체 손실을 줄일 수 있는 새로운 제어 기법을 제안한다.

2. LLC 컨버터의 경부하 동작 시 효율 향상을 위한 제안하는 제어 기법

2.1 제안한 제어 기법을 적용한 LLC 컨버터의 동작

그림2는 경 부하 조건에서 제안된 제어 기법을 적용한 LLC 공진형 컨버터의 동작 파형을 나타낸다.

$t_0 \sim t_2$ 동안, 컨버터는 하프브릿지 LLC 컨버터의 공진점

표 1 프로토타입 컨버터에 사용된 소자의 세부사항

Table 1 Components details of the prototype converter

Item	Details	
Specification	V_{IN} : 400V(nominal)-300V, V_O :50V, I_O :5A	
Main transformer	PQ3230 N95 n:1:1=48:12:1 2	pri:0.1Φx50 litz wire sec:0.1Φx50 litz wire $L_M=200 \mu\text{H}$
C_R	44nF (630V 22nF MLCC 2EA)	
L_R	47μH, PQ2016 N95 core 0.1Φx50 litz wire 17 turns	
C_O	1.32mF(100V 330μF electrolytic cap. 4EA)	
Controller	TMS320F280049 from Texas Instruments	

동작과 동일하므로, Q_1 과 Q_2 는 L_R 과 C_R 의 공진 반주기씩 켜진다. 따라서 스위칭 주기 T_S 는 다음과 같이 표현된다:

$$T_S = 2\pi\sqrt{L_R C_R}. \quad (1)$$

t_2 이후에, Q_1 은 여전히 꺼져있고, Q_2 는 켜진 채로 유지되어 공진 전류 i_{LR} 의 freewheeling 구간을 제공한다. $t_2 \sim t_0'$ 동안, 직렬 연결된 자화 인덕터 L_M 과 공진 인덕터 L_R 이 C_R 과 공진하며 i_{LR} 은 freewheeling 한다. freewheeling 주기 T_{FW} 는 다음과 같이 구할 수 있다:

$$T_{FW} = 2\pi\sqrt{(L_R + L_M)C_R}. \quad (2)$$

i_{LR} 은 L_R+L_M 과 C_R 의 공진 한주기 동안만 freewheeling하기 때문에, 모든 상태변수들(i_{LR} , i_{LM} , V_{CR})의 값은 freewheeling의 시작 시간인 t_2 와 끝나는 시간인 t_0' 에서 동일하다.

2.2 제안한 제어 기법을 적용한 LLC 컨버터 유효 출력 전류

식(1)과 식(2)에 의해, 제안하는 제어 기법을 적용한 LLC 컨버터의 실제 스위칭 주기 $T_{S,ACT}$ 는 다음과 같이 표현된다:

$$T_{S,ACT} = T_S + T_{FW}. \quad (3)$$

제안한 기법을 적용한 유효 출력 전류($I_{O,EFF}$)와 실제 출력 전류(I_O)의 관계는 다음과 같이 표현된다:

$$I_{O,EFF} T_S = I_O T_{S,ACT}. \quad (4)$$

식(1), (2), (4)를 이용하여 제안한 기법을 적용했을 때의 유효 출력 전류와 실제 출력 전류의 비를 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\frac{I_{O,EFF}}{I_O} = \frac{T_{S,ACT}}{T_S} = 1 + \sqrt{1 + \frac{L_M}{L_R}} = \frac{R_O}{R_{O,EFF}}. \quad (5)$$

이 때, $R_{O,EFF}$ 는 제안하는 제어 기법 적용 시 유효 출력 저항, R_O 는 실제 출력 저항을 나타낸다.

3. 실험 결과

제안한 제어 기법은 400V 입력, 50V/5A 출력의 LLC 컨버터 프로토타입으로 확인되었다. 표1은 프로토타입 컨버터의 소자 정보를 나타낸 것이다.

그림3은 30% 부하 조건에서 제안하는 제어 기법을 적용한 프로토타입 컨버터의 결과 파형을 나타낸 것이다. L_R 과 C_R 의 공진주파수는 약 110kHz이므로 T_S 는 약 9.1us 이다. T_S 동안 기존 LLC 컨버터의 공진점 동작과 동일한 방식으로 동작한다. 그 후에 L_R+L_M 과 C_R 의 공진주기인 약 0.7us 동안 공진전류가 freewheeling 한다. 이 주기의 시작과 끝에서의

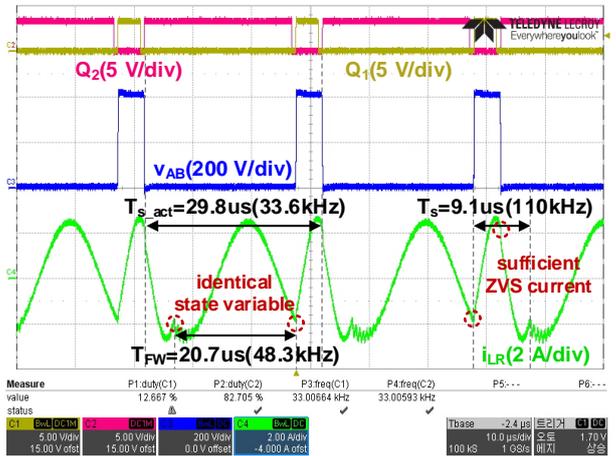


그림3 30% 부하 조건에서 제안하는 제어 기법을 적용한 프로토타입 LLC 컨버터의 실험 결과 파형

Fig.3 Prototype LLC converter operating waveforms with proposed control method applied under 30% load condition.

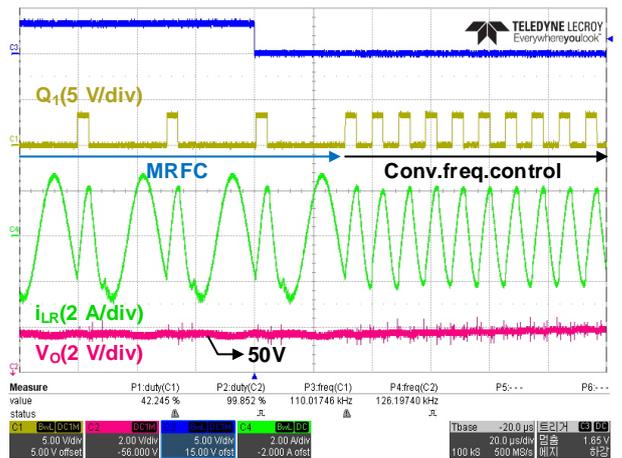


그림4 제안하는 제어 기법에서 기존 주파수 제어로의 전환 시 실험 결과 파형

Fig.4 Experimental waveforms under load transition form proposed control method to conventional frequency control

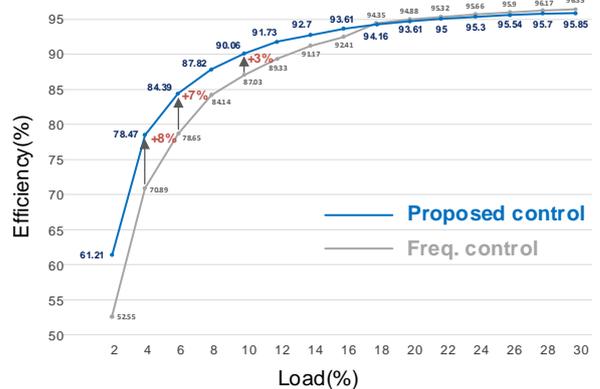


그림5 제안하는 제어 방식과 기존의 주파수 제어 방식을 적용한 프로토타입 컨버터의 효율 비교

Fig.5 Efficiency comparison of the prototype converter applying proposed control method and traditional frequency control

i_{LR} 이 동일하므로, 이 구간은 전압 변환 비에 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있다. 이로써 실제 동작 주파수는 약 33.6kHz가 되며, 기존 PFM 제어보다 약 3배 감소하였고, 유효 출력 전류는 3배 이상 증가하여 높은 효율을 얻을 수 있다.

그림4는 제안하는 제어 기법에서 기존 주파수 제어로 전환 시 실험 결과 파형을 나타낸다. 1차측 스위치의 스위칭 순간에 제안하는 제어 기법은 상태 변수들에 변화가 없기 때문에 출력 전압에 영향을 주지 않고 동작 방식 전환이 가능하다. 그림5는 제안하는 제어 기법과 기존의 주파수 제어를 적용했을 때 프로토타입 컨버터의 효율을 비교한 것이다. 제안된 제어 기법을 적용했을 때 기존 PFM 제어 방식에 비해 효율이 10% 부하에서 3%, 6% 부하에서 7%, 4% 부하에서 11% 증가하였다.

3. 결론

제안하는 제어 기법을 적용한 하프브릿지 LLC 공진형 컨버터의 제어 기법은, 낮은 동작 주파수로 자성체 손실을 줄일 수 있으며 ZVS가 가능하여 스위칭 손실이 매우 작다. 또한 유효 부하의 증가로 인해 경부하 동작 시에도 공진 전류의 왜곡을 최소화하여 게이트 구동 손실을 줄일 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M. Su, Q. Ouyang, G. Deng, G. Xu, Y. Sun and W. Xiong, "Modified Topology and PWM Modulation for Bidirectional LLC-DCX Converter With Center-Tapped Transformer," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 3, pp. 3907-3920, Sept. 2022.
- [2] ON Semiconductor, Phoenix, AZ. (2008, Sep.). NCP1395 A/B: High performance resonate mode controller [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ucc25600.pdf>
- [3] W. Feng, F. C. Lee and P. Mattavelli, "Optimal Trajectory Control of Burst Mode for LLC Resonant Converter," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 1, pp. 457-466, Jan. 2013.