

동작 영역 감지 회로를 이용한 LLC 컨버터의 홀드-업 시간 연장 기법

박무현, 최동민, 문건우
KAIST

Hold-up Time Extension Method for LLC Converter by Using Operating Region Detection Circuit

Moo-Hyun Park, Dongmin Choi, Gun-Woo Moon
KAIST

ABSTRACT

본 논문에서는 동작 영역 감지 회로를 이용한 LLC 컨버터의 홀드-업 시간 연장 기법을 제안한다. LLC 컨버터는 주로 소프트 스위칭이 가능한 인덕티브 영역에서 동작하며, 커패시티브 영역에서의 동작을 방지하기 위해서 최대 전압 이득을 가지는 스위칭 주파수보다 충분히 높은 주파수까지만 동작시킨다. 그 결과, LLC 컨버터가 가지는 최대 전압 이득을 활용하지 못하기 때문에, 입력 전압 범위가 좁아져 홀드-업 시간이 줄어들게 된다. 본 논문에서는 LLC 컨버터의 동작 영역을 감지하여, 최대 전압 이득을 가지는 스위칭 주파수까지 동작시킴으로써 홀드-업 시간을 최대로 가지게 한다. 제안된 기법을 통해 홀드-업 시간이 증가하고, 링크 커패시터의 부피를 감소시킬 수 있다.

1. 서 론

일반적인 전원 장치는 역률 보상단(PFC)과 DC/DC단으로 이루어지는 2단 구조를 가지고 있다. PFC는 AC 입력을 DC로 바꾸어 링크 커패시터에 전압을 공급하며, 높은 역률을 가지도록 전류를 제어한다. 링크 커패시터의 전압은 DC/DC 단의 전력 변환을 통해 최종 출력 전압으로 전달된다.

TV용 전원 장치, 컴퓨터용 전원 장치, 서버용 전원 장치를 비롯한 다양한 어플리케이션용 전원 장치에서는, AC 입력의 공급이 중단되는 상황에서도 수십ms의 시간동안 최종 출력 전압을 유지할 수 있어야 하며, 이 시간을 홀드-업 시간이라 한다. 홀드-업 시간 동안 DC/DC 단은 링크 커패시터에 저장된 에너지를 사용하여 최종 출력 전압을 유지하며, 충분한 홀드-업 시간을 위해서는 DC/DC 단의 넓은 입력 전압 범위 혹은 큰 링크 커패시터가 필요하다. 그러나 일반적으로 DC/DC 단의 입력 전압 범위를 넓게 설계하면, 노미널 상태에서의 효율이 저하될 수 있다.

LLC 컨버터는 스위치의 낮은 전압 스트레스와 소프트 스위칭이 가능하여 DC/DC 단에 많이 사용되는 토폴로지이다. LLC 컨버터는 PFM 방식의 컨버터로, 그림 1과 같은 전압 이득 곡선을 갖는다. LLC 컨버터의 동작 영역은 커패시티브 영역과 인덕티브 영역으로 나뉘며, 그 경계 지점에서 최대 전압 이득을 갖는다. 일반적으로 LLC 컨버터는 소프트 스위칭이 가능한 인덕티브 영역에서 동작하며, 전압 이득 곡선의 기울기가 부호가 반대가 되고 하드 스위칭을 하는 커패시티브 영역으로 진입하

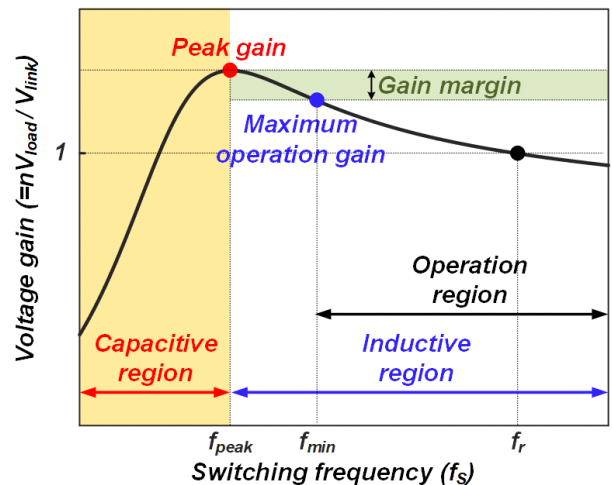


그림 1 LLC 컨버터의 게인 곡선

지 않게 한다.

LLC 컨버터의 전압 이득은 정확한 분석이 어렵기 때문에 분석 과정에서 가정이 필요하며, 최대 전압 이득을 가지는 스위칭 주파수(f_{min})를 정확히 계산할 수 없다.^{(1),(2)} 따라서, 커패시티브 영역으로 넘어가지 않도록 전압 이득에 충분한 여유를 두어 최소 스위칭 주파수(f_{min})를 설정한다. 이로 인해 사용할 수 있는 전압 이득은 LLC 컨버터가 가지는 최대 전압 이득보다 낮아진다. 그 결과, 충분한 홀드-업 시간을 확보하기 위해서는 큰 용량의 링크 커패시터가 사용되어야 하며, 이는 전원 장치의 전력 밀도를 저하시킨다.

홀드-업 시간을 연장하기 위해서, 외부에 홀드-업 시간 연장 회로를 추가하거나, LLC 컨버터에 스위치나 공진 소자를 추가하여 게인을 증가시키는 연구가 있었으나, 추가 소자들로 인해 전력밀도가 저하된다는 한계가 있었다.^{(3),(4),(5)}

본 연구에서는 작은 부피의 간단한 소자들을 추가하여, 전압 이득의 여유를 두지 않고 최대 전압 이득을 사용해 홀드-업 시간을 최대로 확보할 수 있는 기법을 제안하였다. 그 결과 링크 커패시터의 용량을 줄여도 동일한 홀드-업 시간을 가질 수 있는 것을 그 성능을 확인하였다.

2. 제안된 회로 및 동작

그림 2는 제안된 보조 회로가 추가된 LLC 컨버터를 나타낸다. 보조 회로는 LLC 컨버터의 동작 영역을 감지하여, 인덕티브

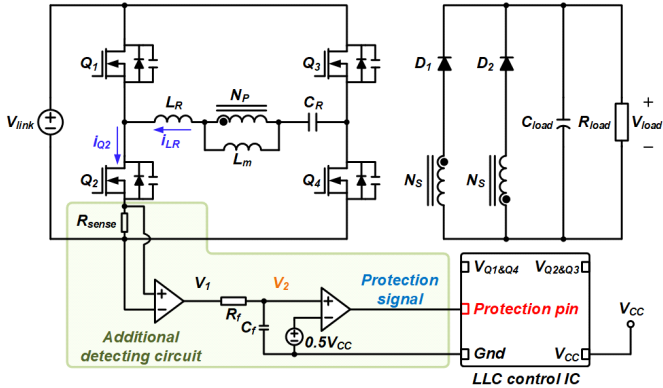


그림 2 동작 영역 감지 회로가 추가된 LLC 컨버터

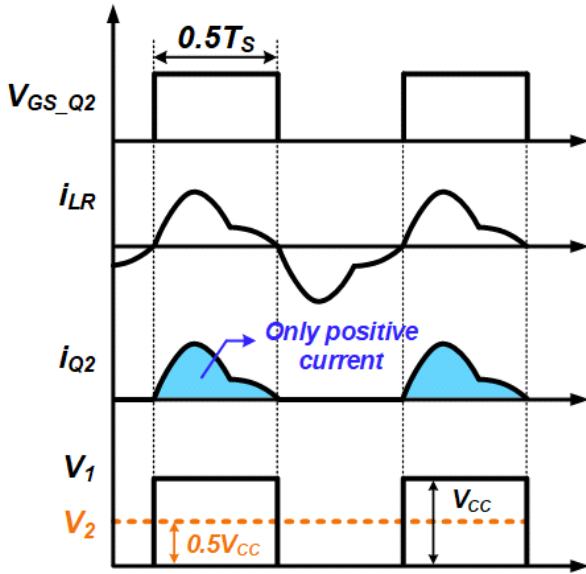


그림 3 영역 경계 지점에서의 스위치 전류

브 영역과 커패시티브 영역의 경계 지점에 도달하였는지를 판단할 수 있다. 경계 지점에 도달할 때까지 LLC 컨버터를 동작 시킴으로써, LLC 컨버터 고유의 최대 전압 이득을 활용할 수 있다.

동작 영역 감지 방법은 스위치 Q_2 의 전류를 센싱하는 것을 기반으로 하며, 그림 3과 같이 경계 지점에서 스위치 Q_2 의 전류가 모두 양의 값을 가지는 것에 착안하여 진행된다. 첫 번째 OP-AMP로 Q_2 에 양전류가 흐르는지를 판단하며, 양전류가 흐를 경우, OP-AMP의 출력 V_1 은 바이어스 전압인 V_{CC} 가 된다. RC 필터로 그 값을 정류하면 양전류가 흐르는 구간의 길이가 얼마나 되는지 알 수 있으며, 모두 양전류가 흐를 경우 V_2 의 값은 $0.5V_{CC}$ 가 된다. 따라서 경계 지점에 도달하면 두 번째 OP-AMP의 출력이 나오면서, 컨버터의 동작을 멈춘다. 그 결과 커패시티브 영역에서의 동작이 방지될 수 있다.

그림 4는 홀드-업 시간에서의 동작을 나타낸다. AC 입력이 중단되고 링크 커패시터의 전압이 떨어지면, LLC 컨버터의 스위칭 주파수가 감소되면서 V_2 의 전압이 점점 상승하게 된다. V_2 의 전압이 $0.5V_{CC}$ 에 도달하면 회로 보호 신호가 생성되며, LLC 컨버터의 동작이 멈추게 된다.

제안된 방법의 장점은, 기존에 설계된 회로 및 컨트롤러 소자를 유지하며 적용될 수 있다는 것이며, 추가된 소자들의 부피가 매우 작아 전력 밀도의 저하가 거의 없다고 볼 수 있다.

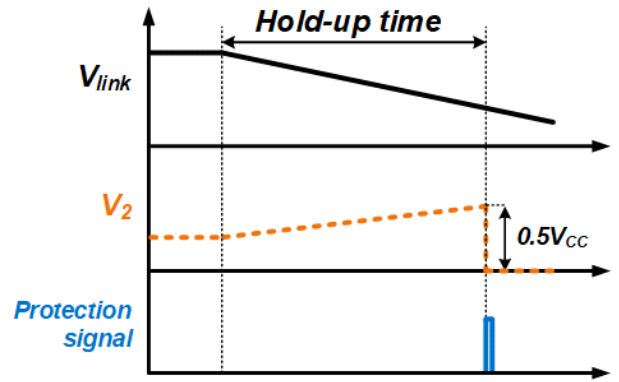


그림 4 홀드-업 동작 시 주요 신호

표 1 프로토타입 회로의 사양과 설계 결과

Nominal input voltage	400 V _{DC}
Output voltage / power	48 V _{DC} / 500 W
Transformer (L_m)	924 μ H PQ3220 (Turns ratio : 32:4:4)
Resonant inductor (L_R)	134 μ H PQ2016 (30 turns)
Resonant capacitor (C_R)	20 nF
Switch (Q_1 - Q_4)	IPP60R190C6 (650V, 190 m Ω , 56 pF)
Diode (D_1 , D_2)	APT30S20BG (200 V, V_F :0.7 V)
Link capacitor (C_{link})	220 μ F
LLC controller	UCC25600 (TI corporation)
Comparator	LM2903 (Dual comparator)
RC filter	R : 10 k Ω , C : 100 nF
Sensing resistor (R_{sense})	20 m Ω

3. 실험 결과

표 1은 프로토타입 회로의 입출력 사양과 설계된 소자 값을 나타낸다. 공진 탱크의 최대 전압 이득은 47 kHz에서 1.62를 가지며, 기존 회로에서는 약 10%의 전압 이득 여유를 두어 52 kHz에서 1.41의 전압 이득을 가지도록 하였다. 그림 5와 같이 16.48 ms의 홀드-업 시간을 가지는 것을 확인하였으며, 동작 가능한 링크 커패시터의 최저 전압은 273 V였다. 그림 6은 회로가 동작을 중지하기 직전으로, 스위치에 흐르는 음전류가 있음을 확인할 수 있다.

그림 7은 제안된 회로가 적용된 파형으로, LLC 컨버터가 가지는 전압 이득을 모두 활용하여, 19.63 ms의 홀드-업 시간을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 그림 8에서는 동작 가능한 링크 커패시터의 최저 전압은 237 V였으며, 47.26 kHz의 스위칭 주파수에서 스위치에는 양전류만 흐르는 것을 확인할 수 있다. 홀드-업 시간 계산 수식은 아래와 같다.

$$\frac{1}{2} \eta C_{link} (V_{linknom}^2 - V_{linkmin}^2) = P_o t_H \quad (1)$$

η 는 컨버터의 효율, C_{link} 는 링크 커패시터의 용량, $V_{linknom}$ 은 링크 커패시터의 노미널 전압, $V_{linkmin}$ 은 링크 커패시터의 최저 전압, P_o 는 출력 전력, t_H 는 홀드-업 시간을 나타낸다. 위 수식에 따르면, 제안된 동작 영역 감지 회로를 사용했을 경우, C_{link} 의 용량을 84%만 사용해도 같은 결과를 얻을 수 있다. 실제 상용 소자로, Rubycon社의 MXK 시리즈를 고려할 경우

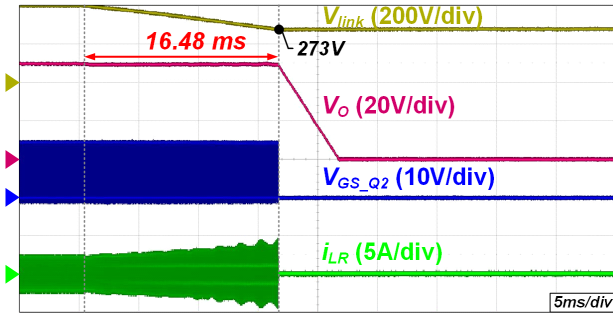


그림 5 기존 회로의 홀드-업 동작 파형

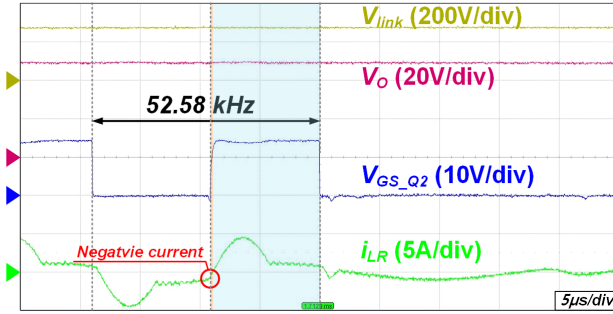


그림 6 기존 회로의 홀드-업 동작 확대 파형

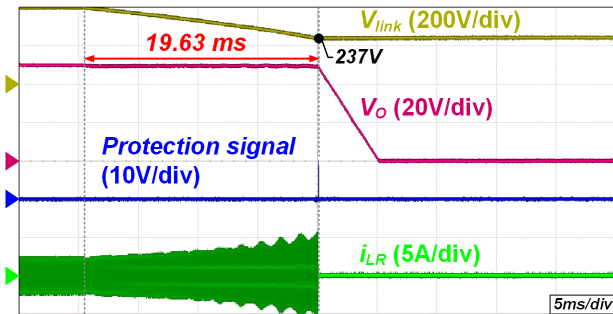


그림 7 제안된 회로의 홀드-업 동작 파형

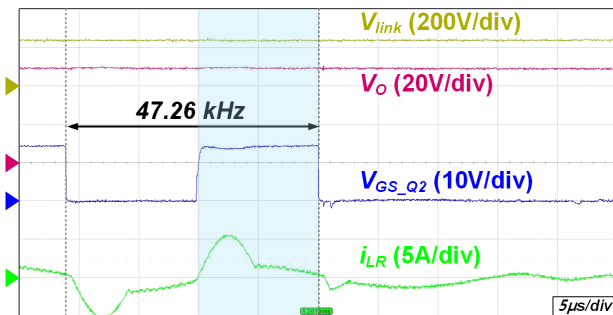


그림 8 제안된 회로의 홀드-업 동작 확대 파형

220 μF 의 링크 커패시터가 180 μF 으로 감소되며, 부피는 13305 mm^3 에서 11404 mm^3 로 85.71%의 부피를 가질 수 있다. 그 결과 높은 전력 밀도를 달성할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 LLC 컨버터의 최대 전압 이득을 활용할 수 있는 동작 영역 감지 회로가 제안되었다. 제안된 동작 영역 감지 회로는 스위치의 전류로부터 최대 전압 이득을 가지는 지점을 감지할 수 있으며, 그 결과 홀드-업 시간을 연장할 수 있

었다. 이를 기반으로 기존 대비 84%의 용량과 85.71%부피를 가지는 링크 커패시터를 사용할 수 있어, 높은 전력 밀도를 달성할 수 있었다. 제안하는 회로와 기법은 적용하기 쉽고, 작은 부피를 차지하여, LLC 컨버터가 사용되는 다양한 어플리케이션에 널리 이용될 수 있을 것이다.

이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2019R1A2B5B02070509)

참고 문헌

- [1] R. L. Steigerwald, "A comparison of half-bridge resonant converter topologies," IEEE Trans. Power Electron., vol. 3, no. 2, pp. 174-182, Apr. 1988.
- [2] X. Fang, H. Hu, Z. J. Shen, and I. Batarseh, "Operation mode analysis and peak gain approximation of the LLC resonant converter", IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 4, pp. 1985-1995, Apr. 2012.
- [3] Y. Jang, M. M. Jovanovic, and D. L. Dillman, "Hold-up time extension circuit with integrated magnetics," IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 2, pp. 394-400, Mar. 2006.
- [4] J. B. Lee, J. K. Kim, J. I. Baek, J. H. Kim, and G. W. Moon, "Resonant capacitor on/off control of half-bridge LLC converter for high-efficiency server power supply," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 9, pp. 5410-5415, Sep. 2016.
- [5] D. K. Kim, S. C. Moon, C. O. Yeon, and G. W. Moon, "High-efficiency LLC resonant converter with high voltage gain using an auxiliary LC resonant circuit," IEEE Trans. Power Electron., vol. 31, no. 10, pp. 6901-6909, Oct. 2016.