

넓은 입력 범위를 가지는 LLC 공진형 컨버터의 공진 주파수 변경을 통한 효율 개선

연철오^[1], 박무현^[1], 박진식^[2], 문건우^[1]
 한국과학기술원 (KAIST)^[1], 솔루엠 (Solu-M)^[2]

Wide Input Range LLC Resonant Converter with Resonant Frequency Change for High Conversion Efficiency

Cheol-O Yeon^[1], Moo-Hyun Park^[1], Jin-Sik Park^[2], and Gun-Woo Moon^[1]
 KAIST^[1], Solu-M^[2]

ABSTRACT

수명이 짧은 전해 캐패시터 대신 필름 캐패시터를 링크 캐패시터로 가지는 컨버터의 경우, 매우 넓은 입력 전압 범위를 가질 수 밖에 없다. 일반적인 넓은 입력 범위를 가지는 LLC 공진형 컨버터의 경우, 변압기 인덕터(L_M) 값을 작게 하여 순환 전류가 커지도록 설계될 수 밖에 없고, 이는 LLC 공진형 컨버터의 더 큰 도통 손실 및 더 큰 turn-off 손실을 야기하여 LLC 공진형 컨버터의 변환 효율을 감소시키게 된다. 이를 개선하기 위하여 공진 인덕터에 보조 권선을 감고, 추가 스위치를 이용하여 입력 범위에 따라 공진 주파수(f_0)를 변경할 수 있는 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 L_M 값을 키워 정상 상태에서 도통 손실 및 turn-off 손실을 줄여 효율을 개선할 수 있으며, 낮은 입력 시 보조 스위치를 이용, f_0 변경을 통하여 추가적인 Gain을 얻으면서 공진 인덕터의 철손을 줄여 넓은 입력 범위를 커버하면서 높은 변환 효율을 얻을 수 있다. 또한 제안하는 컨버터는 간단한 제어 방법과 낮은 전류 스트레스를 가지는 작은 스위치를 사용할 수 있어 전력 밀도 증가를 최소화하면서 높은 효율을 가져갈 수 있다는 장점을 가진다.

1. 서론

발광 다이오드(LED)의 개발에 따라 최근 LED TV 및 LED 전구 등의 LED 적용분야들이 지속적으로 늘어나고 있다. 이에 따라 이에 알맞은 전력 변환 회로가 필요하게 되었지만, 현재 대부분의 전력 변환 회로에서는 링크 전압, 또는 DC 입력용 캐패시터를 전해 캐패시터로 사용하고 있다. 일반적으로 전해 캐패시터는 내구성에 존재하는 전해질로 인하여 수명이 존재하며, LED의 수명에 비하여 매우 짧은 수명을 가지고 있다. 이에 따라 수명이 중요한 적용 분야에서는, 전해 캐패시터를 필름 캐패시터로 대체하여 사용하는 방법이 최근 추세이다.^[1]

필름 캐패시터의 경우, 같은 전기용량을 가지기 위해서 그림 1과 같이 전해 캐패시터보다 훨씬 큰 부피를 가진다는 단점을 가지고 있다. 따라서 컨버터의 전력 밀도 상승을 피할 수 없으며, 이를 개선하기 위해서는 전기용량을 줄이는 방식이 불가피하다. 전기용량이 줄어들게 되면 전력 변환 회로에서 부담하는 입력 범위가 늘어나게 되고, 이는 컨버터 설계 시 최적 설계를 불가능하게 만든다. 따라서 넓은 입력 범위에서 높은 효율을 가지는 새로운 전력 변환 회로가 필요하게 되었다.

지속적인 전력 소자의 성능 개선에 따라 최근에는 고성능 소자의 수를 최소화하면서 전 부하에서 영전압 스위칭 가능, 고속 스위칭 동작에서도 높은 효율을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있는 LLC 공진형 컨버터의 사용이 DC-DC 컨버터 분야에서 점차 많아지고 있다. LLC 공진형 컨버터는 공진 캐패시터(C_r)와 공진 인덕터(L_r), 그리고 변압기

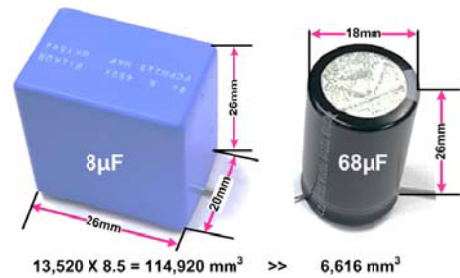


그림 1 필름 캐패시터와 전해 캐패시터 크기 비교(450V/68µF)

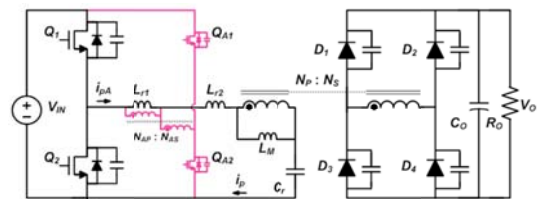


그림 2 공진 주파수가 변경되는 제안하는 LLC 공진형 컨버터

인덕터(L_M)의 공진을 이용하여 전력을 변환하는 컨버터이며, 주파수 동작 범위에 따라 공진 주파수(f_0)를 기준으로 하여 Buck 또는 Boost gain을 얻을 수 있다.^{[2],[3]}

이러한 넓은 입력 전압 범위를 커버하기 위해서 일반적인 LLC 공진형 컨버터는 L_M 값을 작게 하여 Gain curve의 기울기를 가파르게 하도록 설계된다. 하지만 이러한 설계로 인하여 1:1 즉 순환 전류가 상승하게 되고, 이는 도통 손실 및 스위치의 turn-off 손실을 증가시키게 되어 전반적인 효율의 감소를 야기한다. 따라서 넓은 입력 범위를 가지는 LLC의 효율을 개선시키기 위해서는 큰 L_M 값을 가져 정상 상태에서 효율을 높이면서 낮은 입력 시에는 보조 회로를 이용하여 부족한 Gain을 얻는 방법이 가장 일반적인 방법이다.^[4]

논문에서는 마찬가지로 L_M 값을 키워 LLC 공진형 컨버터의 정상 상태에서 효율을 개선하고, 낮은 입력 시 보조 스위치(Q_A , Q_{A1} and Q_{A2})를 이용, f_0 를 변경함으로써 부족한 Gain을 얻고자 한다. 제안하는 컨버터는 그림 2과 같으며, 작은 크기의 Q_A 를 사용하기 위하여 L_{r1} 에 보조 권선을 감아 Q_A 의 전류 스트레스를 줄인다. 또한 제안하는 컨버터는 낮은 입력 시 Q_A 를 통하여 L_{r1} 을 공진에서 제거하여 f_0 를 변경하기 때문에 L_{r1} 에서 발생하는 철손 또한 줄일 수 있다. 따라서 필름 캐패시터의 작은 전기용량으로 인한 낮은 입력에서도 고효율을 유지할 수 있으며, 작은 크기의 Q_A 로 인하여 전력 밀도 증가를 최소화할 수 있다는 장점을 가진다. 이를 검증하기 위하여 입력 전압 260~400V, 출력 75W(250V-0.3A)의 프로토타입 컨버터를 제작하였고, 실험을 통하여 그 효과를 입증하였다.

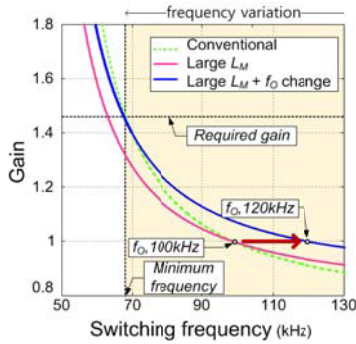


그림 3 동작 영역에 따른 Gain curve 변화

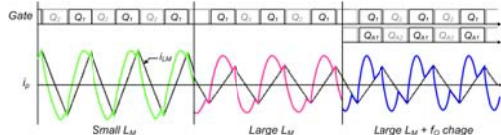


그림 4 L_M 값과 f_0 변경에 따른 1차 측 전류 파형

2. 동작 원리 및 회로 특징

제안하는 컨버터의 해석을 위하여 일반적으로 LLC 공진형 컨버터에서 가장 많이 사용되는 Fundamental Harmonic Approximation을 이용하여 해석하였으며, 동작 주파수 범위는 36kHz~150kHz로 설정하였다. 또한 L_r 값 변경을 통하여 공진 주파수를 변경하기 때문에 제안하는 컨버터는 기존에 1개의 공진 인덕터를 사용하는 것을 2개로 분할하여 사용하여야 한다.

2.1 정상 입력 상태에서의 동작 (320~400V_{IN})

정상 입력 상태에서는 Q_A 를 turn-off시켜 일반적인 LLC 공진형 컨버터와 동일한 동작을 하도록 한다. 이 때, 그림 3에서 알 수 있듯이 제안하는 LLC 공진형 컨버터는 큰 L_M 을 가져가기 때문에 Minimum 동작 주파수에서 요구되는 Gain을 얻을 수 없다. 하지만 그림 4에서 알 수 있듯이 L_M 값이 커짐에 따라 환 전류가 줄어들어 정상 상태에서 도통 손실 및 turn-off 손실을 줄일 수 있다.

2.2 낮은 입력 상태에서의 동작 (260~320V_{IN})

낮은 입력 상태에서는 그림 4와 같이 Q_A 를 turn-on시켜 보조 권선이 감긴 L_{r1} 을 공진탱크에서 제외시켜준다. 이 때 Q_{A1} 은 Q_1 과 동기화 시켜주며, Q_{A2} 는 Q_2 와 동기화 시킨다. 이에 따라 회로의 f 는 그림 3에서 알 수 있듯이 고주파 영역으로 이동하게 되며 이에 따라 Minimum 동작 주파수에서 큰 L_M 을 가지면서 Conventional LLC 컨버터와 동일한 Gain을 얻을 수 있다. 이 때, 보조 권선으로 인하여 Q_A 로 공진 종류와 같은 모양의 전류가 흐르지만, 보조 권선의 턴 비를 조절하면 그 크기는 매우 작아질 수 있다. 따라서 얇은 굵기를 지는 보조 권선과 작은 크기를 가지는 Q_A 를 사용할 수 있다.

3. 실험 결과

제안하는 컨버터의 검증을 위하여 프로토타입을 제작하였다. 이 때 사용한 소자는 표 1과 같으며, 그림 5은 Conventional LC 컨버터와 제안된 LLC 컨버터의 동작 파형이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 제안된 컨버터는 정상 상태에서 더 낮은 순환 전류를 가지는 것을 알 수 있으며, 낮은 입력 시 f_0 변경을 통하여 추가적인 Gain을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 6은 Conventional LLC 컨버터와 제안된 컨버터의 효율 비교 그래프이다. 그림 6(a)는 입력 400V 조건에서 부하 별 효율 그래프이며, 그림 6(b)는 입력 전압 변화에 따른 효율 그래프이다. 모든 조건에서 제안된 컨버터가 고효율을 보이는 것을 알 수 있으며, Q_A 가 커짐에 따라 L_{r1} 의 철손 또한 줄일 수 있어 낮은 입력에서도 높은 효율을 달성하는 것을 확인하였다.

표 1 Component : list

Topology	Conventional LLC	Proposed LLC
Auxiliary switch, Q_A	-	FQU1N60C
Resonant inductor, L_r	120 μ H CH172125	40 μ H + 80 μ H CH127125, CH172075
Magnetizing inductance, L_M	403 μ H	539 μ H
Primary switch, Q_1, Q_2	IRF830	
Transformer (Turns-ratio, $N_p:N_s$)	PQ2016 (8:10)	
Resonant capacitor, C_r	22nF	
Resonant frequency, f_0	100kHz (120kHz)	

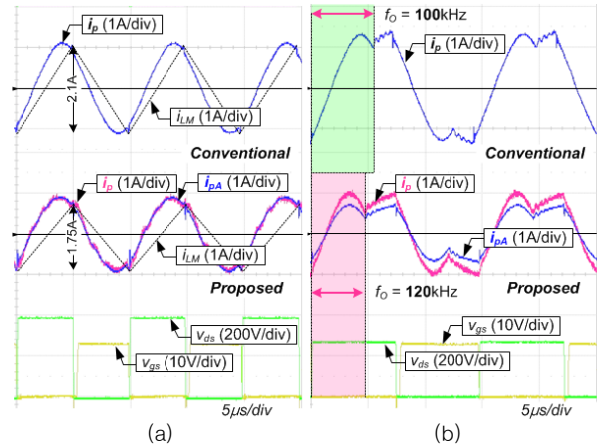


그림 5 동작 파형 (a) 정상 입력 상태 (b) 낮은 입력 상태

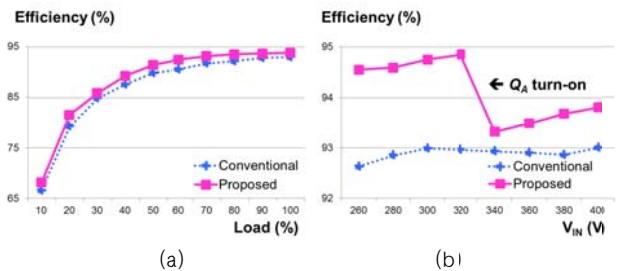


그림 6 효율 그래프 (a) 부하 별 @400V (b) 입력 별 @0.3A

4. 결론

본 논문에서는 넓은 입력 범위를 가지는 LLC 공진형 컨버터에서 보조 스위치를 이용, f_0 변경을 통하여 효율 개선한 컨버터를 제안하였다. 제안하는 컨버터에선 추가되는 소자의 크기가 매우 작기 때문에 전력 밀도 증가를 최소한으로 하면서 고효율을 얻을 수 있다. 따라서 전해 커패시터를 필름 커패시터로 대체하였을 시, 부족한 전기용량을 커버하기 위하여 넓은 입력 전압을 요구하는 분야에 제안하는 컨버터가 적합할 것이라 기대한다.

참고 문헌

- [1] Linlin Gu, Xinbo Ruan, Ming Xu, and Kai Yao, "Means of Eliminating Electrolytic Capacitor in AC/DC Power Supplies for LED Lightings," IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, no. 5, pp. 1399 - 1408, May. 2009.
- [2] Hang Seok Choi, "Design Consideration of Half-Bridge LLC Resonant Converter", in Journal of Power Electronics, vol. 1, No. 1, pp. 3-20, Jan. 2007.
- [3] Cheol-O Yeon, Jong-Woo Kim, Moo-Hyun Park, Yu-Jin Jang, Cheon-Yong Lim, and Gun-Woo Moon, "Bode Plot and Impedance Asymptotes for Light-Load Regulation of LLC Series Resonant Converter," in Proc. International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC'16 ECCE Asia, May. 2016.
- [4] In-Ho Cho, Young-Do Kim, and Jun-Woo Moon, "A Half-Bridge LLC Resonant Converter Adopting Boost PWM Control Scheme for Hold-Up State Operation," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 2, pp. 41 - 850, Feb. 2014.