

추가 공진회로를 이용한 LLC 공진형 컨버터의 전압 이득 보상 기법

김동관, 문상철, 연철오, 문건우
한국과학기술원

A new LLC Resonant Converter with Auxiliary Resonant Circuit for High Voltage-Gain

Dongkwan. Kim, Sangcheol. Moon, Cheolo. Yeon, Gunwoo. Moon
Kore Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터에 공진 회로를 추가함으로써 높은 자화 인덕턴스를 가지고 전원장치의 hold up 동작 시 전압 이득 보상을 해주는 회로를 제안한다. 제안된 컨버터는 높은 자화 인덕턴스로 인해 1차측 도통 손실을 감소시킬 수 있으며, 공진회로를 통해 특정 주파수에서 높은 전압 이득을 얻을 수 있어 hold up 조건을 만족시킬 수 있다. 본 논문에서는 제안하는 회로의 동작을 이론적으로 해석하고 적절한 설계방법을 제시하여 실험결과를 통해 회로의 동작을 검증한다.

1. 서론

LLC 공진형 컨버터는 모든 부하조건에서 영전압 스위칭이 (ZVS) 가능하고 간단한 구조를 가진다는 장점을 가져 소용량에서 대용량까지 다양한 어플리케이션에서 사용되고 있는 매력적인 토폴로지이다. 하지만 전원장치의 hold up 요구 조건 등 넓은 입력 범위에서 동작 가능하게 설계할 경우 낮은 입력 전압에서 출력 전압을 유지시키기 위해서 자화 인덕턴스를 작게 설계할 수 밖에 없다. 보통의 경우, 높은 전압 이득 커브를 얻기 위한 조건의 때문에 1차측 순환 전류는 ZVS에 필요한 전류보다 더욱 상승하게 되고, 도통 손실의 증가를 야기해 효율 감소의 원인이 된다^[1].

본 논문에서는 기존의 LLC 공진형 컨버터에 공진회로를 추가한 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 영전압 스위칭 조건에 맞춰 높은 자화 인덕턴스를 갖도록 설계할 수 있으며 추가된 공진회로를 이용하여 특정 주파수에서 전압 이득을 크게 증가시킬 수 있어 hold up시 낮은 자화 인덕턴스라도 출력 전압을 유지시킬 수 있다. 이를 통해 정상 입력 전압에서 보다 낮은 1차측 순환 전류를 가져 경부하 시 효율을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 제안한 회로의 동작 원리와 특징을 설명하고 입력 전압 390V 출력 파워/전압 450W/56V의 프로토타입을 통해 검증하였다.

2. 동작원리 및 회로특징

2. 1 동작원리

그림 1에서는 기존의 LLC 공진형 컨버터에 공진회로를 추

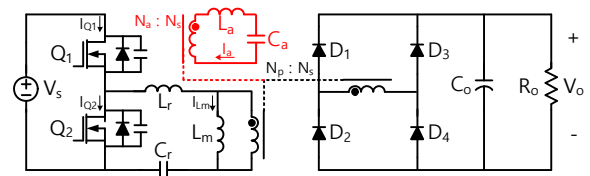


그림 1 제안된 컨버터의 회로도

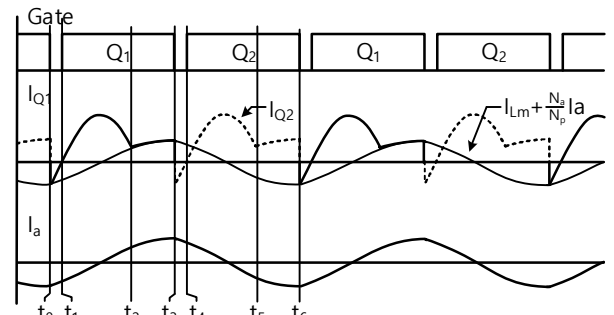


그림 2 제안된 회로의 동작 파형

가한 제안된 컨버터의 회로도를 나타내었고, 그림 2에서 제안된 회로의 동작 파형을 나타내었다. 제안된 컨버터는 기존의 LLC 공진형 컨버터와 마찬가지로 2차측 정류 다이오드 역 회복 특성과 스위치의 스위칭 손실을 고려해 1차측 스위치는 ZVS 2차측 정류 다이오드는 ZCS가 가능한 below 영역에서 동작을 한다. 제안된 회로의 동작을 3가지 모드로 구분하여 설명할 수 있으며 각각의 특징은 다음과 같다.

모드 1 ($t_0 \sim t_1$): 스위치에 흐르는 전류 중 순환 전류를 제외한 전류 즉, 1차측 공진 탱크의 (L_r, C_r) 공진으로 생성된 전류는 스위치 Q_1 을 ZVS시킨 후 body 다이오드를 통해 흐른다. L_m 양단에 걸리는 전압으로 인해 L_m 전류가 증가하고 추가 공진 회로 또한 공진하며 전류를 증가시켜 순환 전류를 발생 시킨다. 2차측 다이오드를 통해 출력으로 흐른다.

모드 2 ($t_1 \sim t_2$): 스위치 Q_1 이 도통되어 Q_1 의 바디 다이오드를 타고 흐르던 전류가 스위치 채널을 통해 흐르게 된다.

모드 3 ($t_2 \sim t_3$): 1차측 공진 탱크의 전류가 순환 전류와 만나서 끝나고, L_m 과 함께 공진하며 순환 전류를 증가시킨다. 2차측 정류 다이오드는 순환 전류만 1차측 스위치를 통해 흐르고 2차측 정류 다이오드 D_1, D_4 는 꺼져 출력으로 전류가 흐르지 않게 되고, D_2, D_3 가 ZCS 동작을 하며 켜진다.

$(t_3 \sim t_6)$ 구간에서는 모드 1~3의 대칭적인 동작을 하기 때문에 설명하지 않겠다.

2.2 전압이득

제안된 컨버터는 기존의 LLC 공진형 컨버터의 전압 이득 공식에 공진회로의 임피던스를 추가하여 (1)과 같이 전압 이득

을 (M) 얻을 수 있다.

제안된 컨버터는 1차측 공진탱크의 공진 주파수에서 1의 전압 이득을 갖고, 자화 인덕턴스의 크기에 상관없이 추가 공진회로의 공진 주파수 영역에서 180° 위상 천이로 인한 높은 전압 이득을 얻을 수 있다.

$$\frac{2nV_o}{V_i} = \frac{\frac{\omega^2(m-1)(1-\frac{\omega^2}{\omega_a^2})}{\omega_o^2(m-1)(1-\frac{\omega^2}{\omega_a^2})}}{(\frac{\omega^2}{\omega_p^2}-1)(1-\frac{\omega^2}{\omega_a^2})-\frac{\omega^2}{\omega_o^2}(m-1)(\frac{\omega^2}{\omega_o^2}-1)\frac{1}{n_2^2}+j\frac{\omega}{\omega_o}Q(m-1)(\frac{\omega^2}{\omega_o^2}-1)(1-\frac{\omega^2}{\omega_a^2})}$$

$$\omega_a = \frac{1}{\sqrt{L_a C_a}}, \omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}, \omega_a = \frac{1}{\sqrt{L_r C_a}}, n_2 = \frac{N_p}{N_s}, m = \frac{L_m + L_r}{L_r}, Q = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \frac{\pi^2}{8R_o} \quad (1)$$

2.3 제안된 컨버터의 설계 방법

제안된 컨버터는 기존의 LLC 공진형 컨버터와 마찬가지로 below 영역에서 동작한다. 이 때 추가 공진 회로의 인덕턴스, 커패시턴스, 턴비는 공칭 전압에서의 동작과 hold up 시의 동작 및 주파수를 고려하여 설계한다.

제안된 컨버터의 hold up 주파수는 Lm 양단에 걸리는 전압을 구하는 식을 (2) 이용해 유도할 수 있는데, 이를 통해 원하는 주파수에서 hold up 시에 필요한 전압 이득을 얻을 수 있다.

제안된 컨버터는 공칭 전압에서 1차측 순환전류 즉, Lm전류와 추가 공진회로에서 1차측으로 넘겨주는 전류의 합이 영전압 스위칭 조건을 만족하도록 설계할 경우 1차측 도통 손실을 감소시킬 수 있다 (3). hold up 시 추가 공진회로에 흐르는 전류를 고려해 추가 되는 인덕터 코어를 설계 하는데, 코어 크기가 증가하면 공칭 전압에서 코어 손실이 크게 발생할 수 있고, 전력 밀도가 감소할 수 있다. 본 논문에서는 LLC 공진 컨버터의 크기를 기존에 비해 작게 가져감으로써 자속 변화가 기존에 비해 증가하여 변압기 코어 손실이 증가하지만, 1차측 도통 손실을 크게 감소시켜 전체 효율을 증가시키는 방향으로 설계를 하였다. 이를 통해 기존의 컨버터와 비슷한 크기의 전력 밀도를 가지면서 높은 효율을 얻을 수 있다 (4).

$$V_{Lm} = V_{hold} \frac{Z_{Lm} \| Z_a}{Z_{Lm} \| Z_a + Z_r} \quad (2)$$

$$I_{pri} = \frac{V_s}{2} \left(\frac{N_p}{N_a} \frac{(\frac{N_p}{N_a} \omega)^2 La Ca - 1}{\omega C_a} + \omega Lm \right) \quad (3)$$

$$A_{p,La} = \frac{10^4 \sqrt{2} L_a \left(\frac{V_s N_p}{2 N_a} \frac{(\frac{N_p}{N_a} \omega_{hold})^2 La Ca - 1}{\omega_{hold} C_a} \right)^2}{JK_u B_{max}} \quad (4)$$

3. 실험 결과

표 1의 소자 값을 이용해 공칭 입력 전압 390V 출력 전력/전압 450W/56V의 프로토타입을 제작해 100kHz에서 동작하는 제안된 회로의 동작을 기존 LLC 공진형 컨버터와 비교·검증하였고, 10 20 50 100% 출력 전류에 대해 효율을 분석한 결과 경 부하로 갈 수록 1차측 도통 손실 감소로 인해 효율이 크게 상승함을 알 수 있었으며 최대 부하에서는 추가 공진 회로의 인덕터 코어 손실 및 도통 손실로 인하여 발생하는 손실로 인해 기존보다 효율이 약간 떨어지는 것을 확인할 수 있다

표 1 실험에 사용된 소자 값

		기존 LLC	제안된 컨버터
변압기	코어 종류	PQ2625	PQ2620
	턴비	34:10(Np:Ns)	34:23:10(Np:Na:Ns)
	Lm	240μH	1.5mH
	Llkg	9.4μH	6.28μH
1차측 공진 인덕턴스		16μH	20μH
1차측 공진 커패시턴스		100nF	100nF
추가 공진 인덕터	코어 종류	x	PQ2016
	인덕턴스		400μH
추가 공진 커패시턴스		x	20nF
스위치		SPP15N60CFD	SPP15N60CFD
정류 다이오드		MBR20L80CTG	MBR20L80CTG

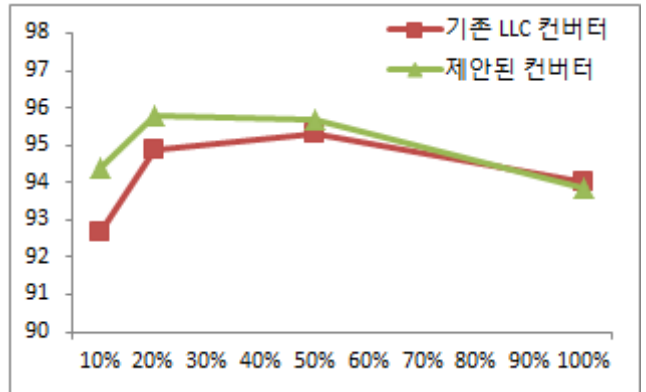


그림 7 기존 LLC 컨버터와 제안된 컨버터의 효율 비교

4. 결론

제안된 컨버터는 LLC 공진형 컨버터에 공진회로를 추가 한 것으로 자화 인덕턴스를 크게 하면서도 전원장치의 hold up 조건을 만족시킬 수 있다. 따라서 자화 인덕턴스를 크게 함으로써 1차측 도통 손실을 감소시킬 수 있어 전원 장치의 경부하 시 효율 향상을 시킬 수 있다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2010-0028680).

참고 문헌

- [1] Yang, Bo, et al. "LLC resonant converter for front end DC/DC conversion." Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE. Vol. 2. IEEE, 2002.