

온도에 따라 변화하는 Q-factor를 고려한 PFM제어기법

이정, 엄태호, 김준모, 신민호, 원충연
성균관대학교

PFM control method considering the Q-factor according to change the temperature

Jeong Lee, Tae-Ho Eom, Jun-Mo Kim, Min-Ho Shin, Chung-Yuen Won
Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문은 LLC 공진형 풀-브릿지 컨버터의 온도에 따른 Q-factor의 변화를 고려한 PFM(Pulse Frequency Modulation) 제어기법에 대해 제안한다. 온도에 따라 L, C의 용량변화로 Q-factor는 변화하고 얻고자 하는 전압이득 값을 스위칭 주파수가 달라지는 제어로 원하는 출력 전압을 얻을 수 있다. 원하는 출력전압을 제어하기 위해서는 온도에 따라 변화하는 Q-factor를 통해 스위칭 주파수를 제어하여 원하는 전압이득 값을 얻는다.

1. 서론

전원공급장치의 소형화와 경량화를 위해 LLC 공진형 컨버터의 연구가 활발히 진행되고 있다. LLC 공진형 컨버터는 고속 스위칭이 요구되어 스위칭 손실이 크게 발생된다. 컨버터의 전력손실은 스위치의 턴 온 시간과 턴 오프 시간이 길수록 증가하며, 스위칭 주파수에도 비례하여 증가한다. LLC 공진형 컨버터는 모든 부하조건에서 영진압 스위칭(ZVS)이 가능하므로 스위칭 손실을 줄일 수 있으며, 간단한 구조를 가진다는 장점을 가져 소용량에서 대용량까지 다양한 어플리케이션에서 사용되고 있다.^[1] LLC 공진형 컨버터 설계 시 Cs 값은 온도에 따라 달라지고 그에 따른 임피던스와 Q-factor는 변화하게 된다. 온도를 고려하지 않고 설계할 경우 전압이득의 스위칭 주파수 값이 달라져 원하는 출력 전압을 얻을 수 없다. 본 논문에서는 온도에 따른 Q-factor의 변화를 구하고 Q-factor에 따른 스위칭 주파수를 제어하여 원하는 출력 전압을 얻는 PFM제어기법을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 본문

2.1 LLC 공진형 풀-브릿지 컨버터

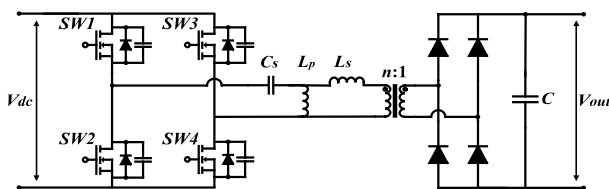


그림 1 LLC 공진형 풀-브릿지 컨버터
Fig. 1 LLC resonant full-bridge converter

그림 1은 LLC 공진형 풀-브릿지 컨버터의 회로도를 나타내었다. 풀-브릿지 인버터와 공진탱크, 변압기, 정류단으로 구성하였고 영진압 스위칭을 위하여 공진탱크의 공진 커패시터(Cs), 자화 인덕터(Lp), 누설 인덕턴스(Ls)로 구성하였다. 공진형 컨버터의 커패시터(Cs)는 직렬 공진 발생 시키는 역할을 하는 소자로 변압기 입력단에 흐르는 전류에 따라 충전전압이 상승되어 출력 전압을 상승 시키는 작용을 한다. 하지만 출력 전압을 상승시키는 만큼 스위치의 전류의 위상을 당겨 부하가 낮은 영역과 고 전압 영역에서 하드스위칭이 발생된다. Ls는 변압기의 기생 인덕턴스 성분으로 Cs와 직렬 공진이 발생 한다. 또한 변압기의 전류의 상승에 대하여 전압강하를 발생시키고 부하의 응답특성을 빠르게 하지만 기생 인덕턴스 성분이 큰 경우 과도한 전압강하로 인하여 출력 전압을 만족시키지 못하게 된다. Lp는 풀 부하 시 출력 전압을 상승하는 역할을 하지만 값이 작으면 포화되기 때문에 인버터단의 암쇼트가 발생될 수 있다. LLC 공진형 풀-브릿지 컨버터의 이러한 특성들 때문에 소자 값의 선정이 매우 중요하다.

$$M = \frac{n \cdot V_{out}}{V_{dc}} \quad (1)$$

$$V_{out} = \frac{n \cdot V_{dc}}{\sqrt{(Q(k-1)k)^2 + (1+1/h-1/(hk^2))^2}} \quad (2)$$

전압이득(M), 컨버터의 입력 전압에 대한 출력의 비율은 스위칭 주파수의 함수로써 식 (1)로 계산되며, 전압이득(M)으로부터 출력 전압은 식 (2)을 통하여 계산된다.^[2]

$$R_{ac} = \frac{8 \cdot n^2 \cdot RL}{\pi^2} \quad (3) \quad f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (4)$$

$$k = \frac{f_s}{f_r} \quad (5) \quad h = \frac{L_p}{L_s}, L_p = L_m + L_r \quad (5)$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} \quad (6) \quad Q = \frac{Z_o}{R_{ac}} \quad (7)$$

Rac는 2차측 부하를 1차측으로 환산한 등가 부하저항을 나타낸다. 스위칭 주파수(fs)는 파라미터(k)에 의해 상대적으로 더 높은 공진탱크의 공진주파수(fr)를 기준으로 정의된다.^[2]

2.2 온도에 따른 Cs값의 변화

Metallized polypropylene의 재질의 커패시터를 사용하여 온도에 따른 Cs의 변화를 확인해 보았다. Cs의 용량은 0.5 μ F, 동작온도가 -55 $^{\circ}$ C~105 $^{\circ}$ C인 커패시터를 사용했다. 표 1은 온도에 따른 커패시터의 파라미터 값을 나타낸다.

표 1 온도에 따른 커패시터 값

Table 1 Capacitor value according to the temperature

온도	Cs
-55 $^{\circ}$ C	0.54 μ F
25 $^{\circ}$ C	0.5 μ F
105 $^{\circ}$ C	0.46 μ F

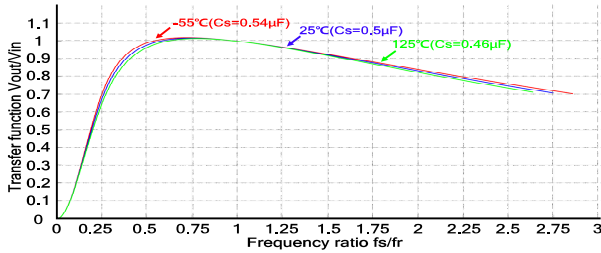


그림 2 온도에 따른 Q-factor

Fig. 2 Q-factor according to the temperature

그림 2는 Matlab을 통하여 Cs값의 온도에 따른 Q-factor의 변화를 나타낸다. 온도상승에 따른 Cs값의 변화로 전압이득 값의 변화를 확인 했다.

3. 시뮬레이션

11kW급 LLC 공진형 풀-브릿지 컨버터를 그림 3과 같이 시뮬링크를 통하여 구현하였다. 컨버터의 파라미터 값은 표 2와 같으며 Q-factor의 변화에 따라 변동된 전압이득 값을 스위칭 주파수 제어로 지령된 출력 전압 값을 얻을 수 있다.

표 2 시뮬레이션 파라미터

Table 2 Simulation parameters

Vdc	300[V]
Idc	36[A]
Vout	320[V]
Iout	34[A]
Cs	0.54 μ F, 0.5 μ F, 0.46 μ F
Ls	17 μ H
Lp	300 μ H
S/W Frequency	90~180[kHz]

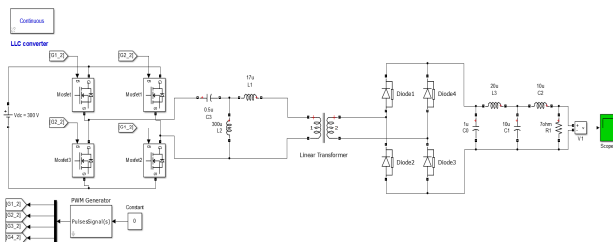


그림 3 LLC 공진형 풀-브릿지 컨버터의 시뮬레이션 회로도

Fig. 3 Simulation circuit diagram of LLC resonant full-bridge converter

그림 3은 시뮬레이션 회로도를 나타내며 Q-factor의 변동에 따른 전압이득 값의 스위칭 주파수를 식 (1)~(7)을 이용하여 계산하고 PWM Generator에 넣어 스위칭을 한다. 얻고자하는 전압인 320[V]으로 출력되는 것을 확인한다.

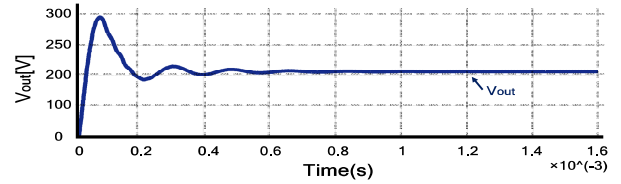


그림 4 Q-factor의 변동에 따른 PFM제어가 적용 안된 출력 전압 파형
Fig. 4 Output voltage waveform in accordance with variation of Q-factor without PFMcontrol

그림 4는 Cs의 온도에 따른 Q-factor의 변화를 고려하지 않고 PFM제어를 하지 않았을 때 출력 전압 파형으로 원하는 출력 전압이 나오지 않는 것을 확인하였다.

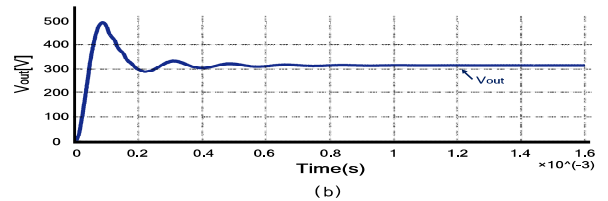
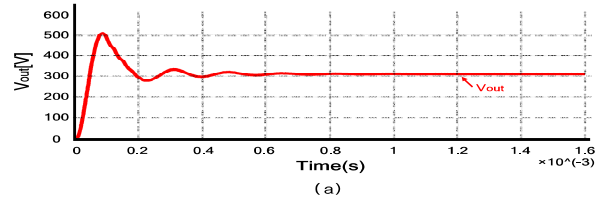


그림 5 Q-factor의 변동에 따른 PFM제어가 적용된 출력 전압파형
(a)-55 $^{\circ}$ C, (b)25 $^{\circ}$ C, (c)105 $^{\circ}$ C

Fig. 5 Output voltage waveform in accordance with variation of Q-factor with PFMcontrol

그림 5를 통해 온도에 따라 변하는 전압이득의 PFM제어로 원하는 출력 전압을 얻는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문은 LLC 공진형 풀-브릿지 컨버터의 공진 Cs값의 온도에 따른 커패시터의 변화를 계산하고 Cs에 의해 변동된 Q-factor를 고려한 PFM제어를 시뮬레이션으로 검증하였다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2014R1A2A2A05006744)

참고 문헌

- [1] 김동관, 문상철, 연철오, 문건우, "추가 공진회로를 이용한 LLC 공진형 컨버터의 전압 이득 보상 기법", 전력전자학술대회논문지, Vol. 2014, No.7, 2014
- [2] Hillers, A, Christen, D, Biela, J, "Design of a Highly efficient bidirectional isolated LLC resonant converter", Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC). 2012 15th International, DS2b.13-1-DS2b.13-8, 2012