

스너버 커패시터를 이용한 CCPS용 FB-PS-ZVS DC-DC 컨버터의 IGBT Turn-off 손실에 관한 연구

이용덕, 김상현, 김태형, 인동석, 김주훈
포스코 ICT 기술연구소

Abstract

본 논문은 30kW급 CCPS(Capacitor Charging Power Supply)용 FB(Full Bridge)-PS(Phase Shift)- Zero Voltage Switching(ZVS) DC/DC Converter의 스위칭 손실저감을 위한 스너버 커패시터의 설계에 대해 논하였다. FB-PS-ZVS DC-DC 컨버터의 하드스위칭 손실과 스너버 커패시터에 의한 스위칭 손실 저감 효과를 비교했다. 침두 전류를 이용하여 스너버 커패시터를 설계하였으며, 부하 실험을 통해 설계의 타당성을 실험적으로 검증했다.

1. 서론

반도체 전력소자의 기술이 발전함에 따라 스위칭 주파수가 높은 대용량 전력변환 시스템 개발이 활발히 이루어지고 있다. 고주파수 스위칭은 수동소자를 경량화할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 스위칭 소자의 경우 소자에 가해지는 스트레스는 더 커지게 된다[1]. 이러한 문제점은 FB-PS-ZVS DC-DC 컨버터의 경우 위상천이(Phase shift)방식의 PWM과 스위칭 소자 출력단의 인덕턴스 성분을 이용해 자연스럽게 Turn-on ZVS를 발생시켜 소자의 스트레스를 줄이는 방향으로 해결할 수 있었다[1]. 그러나 Turn-off의 경우는 소프트 스위칭이 아닌 하드 스위칭을 하는 것이 일반적이었다.

본 논문은 스위치의 양단에 스너버 커패시터를 병렬로 연결하여 Turn-off 시 소자의 스트레스를 줄이기 위한 설계를 했고, 설계된 자료를 바탕으로 실험 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 손실계산 및 스너버 커패시터 설계

2.1 시스템 구성

그림 1은 CCPS용 FB-PS-ZVS DC-DC 컨버터를 보여준다.

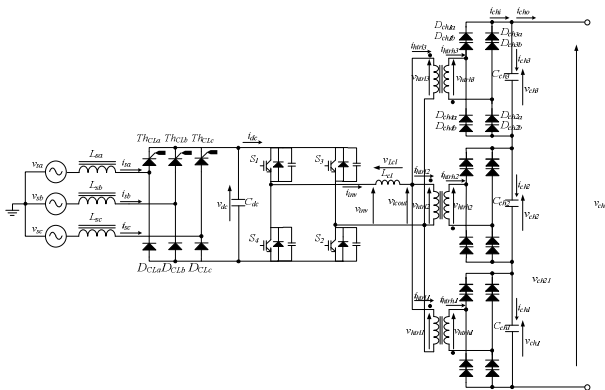


Fig. 1 CCPS용 FB-PS-ZVS DC-DC 컨버터

2.2 모드 분석 및 운전방법

위상천이 PWM의 경우 스위칭 동작에 의해 Leading-Leg와 Lagging-Leg로 나누어지며, 각각의 경우에 따라 손실이 달라지게 된다[2].

본 논문의 CCPS의 동작특성은 충전구간 (charging) 과, 방전구간(discharging)으로 나뉘어진다. 이러한 점을 이용해 FB-PS-ZVS DC-DC 컨버터의 각상 소자의 손실을 평형으로 유지하기 위해 Leading-leg와 Lagging-leg를 한 주기씩 교차하도록 제어하였다[2].

2.3 손실분석

그림 2는 제안된 컨버터의 스위칭에 따른 각 부 동작과형을 보여준다.

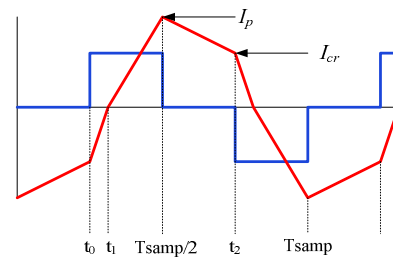


Fig.2 FB-PS DC-DC 컨버터의 고주파 변압기 1차측 전류 동작과형

각 구간 별 손실 계산은 다음과 같다.

<t0~t1 구간>

환류 다이오드를 통해 전원단으로 회생되는 구간으로 손실계산은 다음과 같다.

$$E_{d_con} = V_{f_D} \times I_{c_rms} \times (t_1 - t_0) \quad (1)$$

$$P_{d_con} = E_{d_con} \times f_s \quad (2)$$

<t0 구간>

ZVS 상태 이므로 손실이 발생하지 않는다.

<t1~Tsamp/2 구간>

전원단과 출력단의 전력전달 구간이다. 스위치를 통해 전력이 전달되고, 손실은 도통 손실만 발생한다. 스위치의 도통 손실 계산은 다음과 같다.

$$E_{s_con} = V_{ce(sat)} \times I_{c_rms} \times \left(\frac{T_{samp}}{2} - t_1\right) \quad (3)$$

$$P_{s_con} = E_{s_con} \times f_s \quad (4)$$

<Tsamp/2 구간>

Leading leg에 Turn-off 손실이 발생하는 구간으로 손실이 가장 크다. 스위치의 Turn-off 손실계산은 다음과 같다.

$$E_{s_off} = \frac{1}{2} \times I_p \times V_{ce} \times t_{off} \quad (5)$$

$$P_{s_off} = E_{s_off} \times f_s \quad (6)$$

<Tsamp/2 ~ t2 구간>

다이오드와 스위치와의 환류 구간이다. 스위치와 다이오드로 도통 손실이 발생한다.

$$E_{d_con} = V_{f_D} \times I_{c_rms} \times (t_2 - \frac{T_{smp}}{2}) \quad (7)$$

$$P_{d_con} = E_{d_con} \times f_s \quad (8)$$

$$E_{s_con} = V_{ce(sat)} \times I_{c_rms} \times (t_2 - \frac{T_{smp}}{2}) \quad (9)$$

$$P_{s_con} = E_{s_con} \times f_s \quad (10)$$

<t2 구간>

Lagging leg 스위치에 Turn off 손실이 발생하는 구간이다.

$$E_{s_off} = \frac{1}{2} \times I_{cr} \times V_{ce} \times t_{off} \quad (11)$$

$$P_{s_off} = E_{s_off} \times f_s \quad (12)$$

FB-PS DC-DC 컨버터의 손실계산을 위한 파라미터는 다음과 같다.

Table. 1 스위치 손실계산 파라미터

Parameter	Value	Unit	비고
f_s	20	kHz	
V_{ce}	1.8	V	
V_F	1.8	V	
V_{dc}	620	Vdc	
T_{off}	270	ns	
i_{inv_peak}	450	Apeak	
IGBT 병렬 수	2	EA	

2.4 손실저감을 위한 스너버 커패시터 설계

스너버 커패시터의 설계는 Dead time, Critical 전류, 주변 기생 성분등, 여러가지 요인이 복합적으로 고려 되어야 한다. 커패시턴스 값이 크면 클수록 전압 상승시간(t_{rv})이 느려져 Turn-off 손실이 저감 될 것 같지만, L_{cl} 이 가지고 있는 에너지와 Deadtime을 고려 했을 경우 스너버 커패시턴스가 커질수록 큰 저감 효과를 얻을 수 없다. 또한 L_{cl} 의 에너지를 이용하기 때문에 Turn-on ZVS를 위한 Critical 전류에도 영향을 주기 때문이다.

손실저감목표는 Turn-off때의 손실을 40~50% 정도 저감할 수 있도록 설계했다. 기존의 기생 커패시턴스 값은 60nF의 값을 가지고 있었고, 그 값에 설계된 44nF의 스너버 커패시턴스 값을 추가해 스위치 양단에 총 104nF의 커패시턴스를 가질 수 있도록 설계했다. 이 값을 이용 Turn-off 할 때 스위치 양단 전압 상승 시간은 다음과 같다.

$$t_{rv} = \frac{2 \times V_{dc} \times C_{snubber}}{i_{inv}} \quad (15)$$

위 값들을 이용해서 하드 스위칭시와 스너버 커패시터시의 소프트 스위칭때의 손실을 비교한 결과 47% 정도의 Turn-off 손실이 저감된 것을 알 수 있다. 이 값을 전체 효율에 반영하면 CCPS 효율은 3%정도 상승될 것으로 계산 되었다.

Table.2 계산된 값에 의한 효율 비교

Parameter	Value	Unit	비고
하드 스위칭	Losses	718	W
	효율	87	%
소프트 스위칭	Losses	381	W
	효율	90	%
효율 상승폭	3	%	

3. 실험결과

실험은 PZ4000 Power Analyzer를 이용하여 입력측 Power를 측정했고, 고압측은 Lecroy 6100A 오실로스코프를 이용하여 Power를 측정했다. 측정결과 효율은 계산값과 같은 3%대의 상승효과를 보였다. 그림은 부하별 손실과 효율을 설계값과 측정값 별로 비교한 그래프이다.

Table.3. 실제 측정 결과

Parameter	Value	Unit	비고
하드 스위칭	입력	34.5	kW
	출력	30.1	kW
	효율	87	%
소프트 스위칭	입력	32.6	kW
	출력	29.5	kW
	효율	90	%
효율 상승폭	3	%	

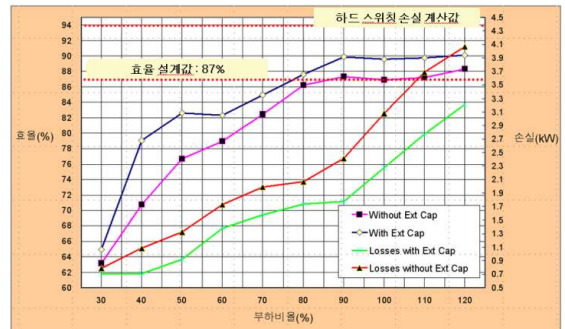


Fig.3 부하 별 손실 및 효율

4. 결론

본 논문에서는 30kW급 FB-PS-ZVS DC-DC 컨버터의 위칭 스위칭 손실저감을 위한 스너버 커패시터 대해 논하였다. 계산된 손실용량과 실험을 통해 분석된 내용을 비교한 결과 설계값과 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 향후 커패시턴스 값을 조정하여 설계값의 타당성을 확인할 계획이다.

Reference

[1] Eun-Soo Kim; Kee-Yeon Joe; Moon-Hoo Kye; Heon-Hoi Koo " A 13 kW high frequency FB ZVS DC-DC converter with additional capacitors ", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996., APEC '96. Conference Proceedings 1996., Eleventh Annual Volume: 1, pp. 487 - 492, 1996.

[2] Mihalache, L.; " A modified PWM control technique for full bridge ZVS DC-DC Converter with equal losses for all devices ", Industry Applications Conference, 2004., 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE Volume: 3, pp. 1776 - 1781, 2004.