전력전자학술대회 논문집 2001. 7. 4 ~ 7. 7

단일전력단으로 구성된 역률 보상 AC/DC Full-Bridge Converter의 소프트 스위칭 기법에 대한 비교 연구

이성룡, 전칠환, 정채규
군산대학교 전자정보공학부

A Comparative Study on Soft Switching Method of Single Stage AC/DC Full-Bridge Converter

S. R. Lee, C. H. Jeon , C. G. Jeong
Kunsan Nat'l Univ. School of Electronic and Information Engineering

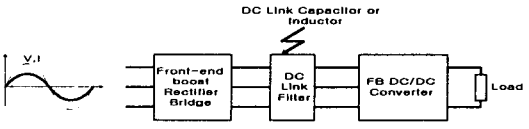
ABSTRACT

A optimal soft switching technique for A/DC full bridge converter is proposed. variable soft switching single stage AC/DC full bridge converter with unit power factor are presented in this paper. Using soft switching, we can reduce a switching losses. As a result, achieving good power factor and achieving a good efficiency. We search a optimal soft switching technique in this paper and to verify the theoretical analysis of the presented AC/DC full bridge converter, a design example is given with its Pspice and Psim simulation and experimental results.

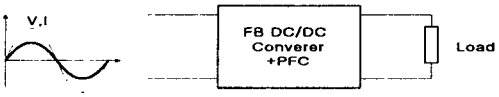
1. 서 론

SMPS(Switch-Mode Power Supply : SMPS)는 컴퓨터, 전자계산기, 전자교환기, 음향영상기기, FA용 산업기기 등의 안정한 전원으로 폭넓게 이용되고 있다. 종래의 전자기용 전원의 정류회로에는 구성이 간단하고 가격이 저렴한 콘덴서 입력형 방식을 적용한 DC전원 장치를 일반적으로 널리 사용되고 있다. 하지만 이 정류방식은 상용교류입력전압의 첨두치 부근에서만 전류가 흐르기 때문에 입력전류 파형이 되어 역률과 고조파 문제 등을 야기 시킨다. 이런 문제를 해결하기 위해서 최근에 PFC 회로가 제안되고 연구되고 있다. PFC 회로는 크게 single-stage형과 two-stage형으로 구분될 수 있다. two-stage형은 고역률 컨버터 후단에 절연된 DC/DC 컨버터가 적용되어야 함으로 주회로 및 제어회로가 다단으로 구성되는 복잡화되는 단점이 있고 효율이 single-stage형보다 낮다는 단점이 있어 single-stage형이 전반적으로 많이 연구되고 있다. 대표적으로 고전력에 적합한 single stage AC/DC full bridge 컨버터가 많이 연구되고 있는데 이러한 PFC 회로를 소형, 경량화, 고품질화하기 위해 스위칭주파수를 고주파수로 운전하는 방법을 택하게 되는데 이 경우 PFC 회로의 하드-스위칭 동작에 의한 스위칭 손실이 크고 전압 또는 전류의 스트레스가 크기 때문에 전체 시스템의 효율이 저하되는 문제가 발생한다. 이런 문제를 해결하기 위해서 소프트-스위칭 기법이 많이 연구되고 있는 추세이다.

본 논문에서는 제안된 AC/DC full bridge converter의 소프트-스위칭 기법에 대해서 동작원리를 비교 분석하여 최적의 소프트-스위칭 기법을 찾자 그 유용성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 입증하고자 한다.



(a) conventional two-stage scheme



(b) single-stage scheme

그림 1 the single and two stage PFC 회로

2. Soft Switching of AC/DC full bridge converter

서론에서도 언급했듯이 PFC 회로는 고주파수로 운전하게 되어 하드-스위칭 동작에 의한 스위칭 손실이 크게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 소프트-스위칭을 적용하게 된다. 일반적으로 소프트-스위칭이란 스위치 온시 스위치에 인가되는 전압과 전류 또는 둘 중 하나를 영이 되게 함으로써 스위치에서의 전력 손실이 영이 되게 하는 것을 말한다. 본 논문에서는 세 개의 토폴로지를 비교 분석하도록 한다.

2.1 Parallel Resonant Converter with Capacitive Output Filter(PRC-CF)

그림 2는 PFC-CF 컨버터를 나타내고 있다. 이 토폴

로지는 Current Source 부분과 공진회로, Output Filer로 구성되어 진다.[1]

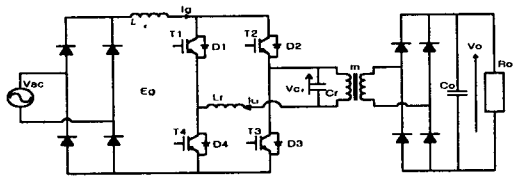


그림 2 PFC-CF 컨버터

이 회로의 동작 원리를 모드별로 살펴보면 다음과 같고 그림 3은 모드 별 동작 파형을 보여 주고 있다.

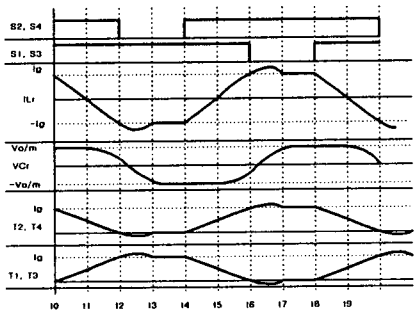


그림 3 각 모드 동작 파형

(1) 초기 모드 (~t0)

초기 모드는 T2와 T4 턴-온 되어 있는 상태이고 인덕터 전류 Lr은 입력 전류 I_g와 같게 된다. 그리고 공진 캐패시터 전압 Vcr은 출력 전압 Vo가 1차측으로 환산된 전압 Vo/m과 같다. 여기서, m은 변압기 권선 비를 나타낸다.

(2) Mode I [t0 ~ t1]

t0에서 T1과 T3 가 턴-온 되어 이 모드 동안 모든 스위치가 턴-온 된 상태가 되어 T2와 T4에 흐르는 스위치 전류는 감소하는 반면에 T1과 T4에 흐르는 스위치전류가 증가하게 된다.

(3) Mode II[t1 ~ t2]

이 모드 동안 변압기 2차측 정류 다이오드는 오프 상태가 되어 공진 캐패시터는 변압기 1차측으로 환산된 출력 캐패시터와 더 이상 병렬회로가 성립이 되지 않는다. t2에서 T2와 T4가 턴-오프 된다. 이때 공진 인덕터 전류 I_{Lr}은 입력전류 $-I_g$까지 도달하게 된다.

(4) Mode III[t2 ~ t3]

t2에서 T2와 T4는 턴-오프 되고 이때 역병렬 다이오드 D2와 D4가 도통된다. t3에서 공진 인덕터 전류 I_{Lr}은 다시 입력전류 $-I_g$에 도달한다.

(5) Mode IV[t3 ~ t4]

t3에서 역병렬 다이오드 D2와 D4가 턴-오프 되어 입력전류 I_g가 스위치 T1과 T3을 통해서 흐르게 된다. 공진 캐패시터 C_r은 입력전류 I_g에 의해서 다시 에너지를 충전하게 된다. 공진 캐패시터 전압과 인덕터 전류를 식으로 나타내면 아래 식처럼 표현된다.

(6) Mode V

공진 캐패시터 전압이 출력 전압을 변압기 1차측으로 환산한 값 Vo/m에 도달하면 변압기 2차측 정류다이오드는 턴-온 된다.

2.2 무손실 스너버 회로를 적용한 토폴로지

그림 4는 무손실 스너버 회로를 적용한 AC/DC full bridge converter 토폴로지를 나타내고 있다.[2] 이 토폴로지는 1개의 스너버 캐패시터 Cs, 2개의 스너버 다이오드 Dp와 1개의 스너버 인덕터 Lr로 구성된 무손실 스너버 회로를 적용함으로써 주 스위칭 소자는 영전압 스위칭이 가능하다.

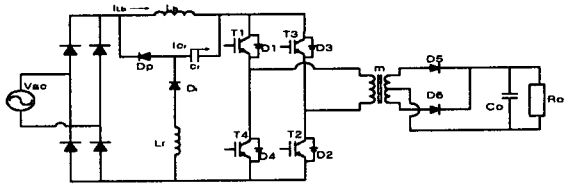


그림 4 무손실 스너버적용 주회로구성

이 회로의 동작 원리를 모드별로 살펴보면 다음과 같고 그림 5는 모드 별 동작 파형을 나타내고 있다.

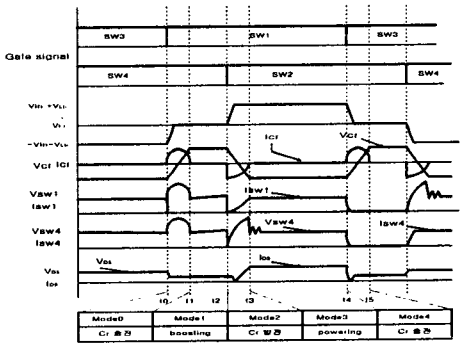


그림 5 각 모드 동작 파형

(1) Mode I [t0 ~ t1]

t0에서 T1이 턴-온 되면 승압인덕터 L_b와 T1, T4를 통해 단락회로를 형성하면서 승압인덕터 L_b에 에너지를 축적한다. 이때, 승압인덕터전류 I_{Lb}와 스너버캐패시터 C_r의 방전전류 I_{cr}의 합전류가 T1과 T4를 통해 흐르기 시작한다. 고주파변압기 T_r의 누설인덕턴스에 축적되어 있던 에너지는 T4와 T2의 역병렬 다이오드 D_2의 경로로 순환한다. 이 Mode동안 스너버캐패시터 C_r의 충전전압 V_{cr}은 $-V_{Lb}$에서 $+V_{Lb}$ 까지 역충전되고 방전전류 I_{cr}가 0이 되면 이 Mode는 끝난다.

(2) Mode II[t1 ~ t2]

t1에서 스너버캐패시터 C_r의 공진 전류 I_{cr}이 0이 되면 T1과 T4에는 승압인덕터 L_b로부터 공급되는 전류 I_{Lb}만이 흐르면서 에너지를 저장한다. 고주파변압기

T_r의 누설인덕턴스 에너지에 의한 순환전류는 Mode I의 흐름경로와 같다. 이 Mode 고주파 변압기 1차 전압이 0이 되어 고주파 변압기 2차측 출력부에 에너지가 전달되지 못한다.

(3) Mode Ⅲ[t2 ~ t3]

t2에서 T4가 턴-오프 되고, 동시에 T2가 턴-온 되면, 입력 승압인덕터 L_b에 저장되어 있던 에너지는 스너버캐패시터 C_r 및 전류다이오드 D_p의 Low-Impedance의 경로를 통하여 스너버캐패시터 C_r의 충전전압 V_{cr}이 $+V_{Lb}$에서 방전하기 시작한다. 이때, T4와 T2는 영전압(ZVS)상태에서 턴-오프 및 턴-온 된다. 스너버캐패시터 C_r의 충전전압이 0에서 $-V_{Lb}$으로 완전히 재충전되면 이 모드는 끝난다.

(4) Mode Ⅳ[t3 ~ t4]

스너버캐패시터 C_r의 방전전류 I_{cr}이 0이 되는 t3에서 스너버캐패시터 충전전압 V_{cr}은 $-V_{Lb}$으로 재충전되고 입력전압 V_{in}과 승압인덕터 L_b에 유기된 전압 V_{Lb}의 합 전압(V_{in} + V_{Lb})이 고주파변압기에 인가되어 고주파변압기 2차측과 출력콘덴서 C_o를 통해 평활되어 부하에 에너지를 공급하게 된다.

(5) Mode Ⅴ[t4 ~ t5]

t4에서 T1이 턴-오프 되고 T3이 동시에 턴-온 되면 Mode I 에서와 같이 T3과 T2를 통해 단락회로를 형성하면서 승압인덕터 L_b에 에너지를 축적함과 동시에 T3과 T2를 거쳐 스너버인덕터 L_r, 스너버다이오드 D_r, 스너버캐패시터 C_r 경로로 방전전류 I_{cr}가 흐르고 이 방전전류 I_{cr}에 의해 축적된 스너버인덕터 L_r의 에너지는 스너버캐패시터 C_r의 충전전압 V_{cr}을 $-V_{Lb}$에서 $+V_{Lb}$까지 역충전되고 방전전류 I_{cr}가 0이 되면 이 Mode는 끝난다.

2.3 반주기동안 고정된 게이트 신호를 적용한 토폴로지

제안된 토폴로지는 스위치의 게이트 신호는 기존의 PWM full-bridge converter와 다르다. 회로에서 위에 위치한 두 개의 스위치는 약 반주기의 스위칭 기간이 고정되어 있고, 서로 180도 위상차 발생한다. 그림 6은 반주기동안 고정된 게이트 신호를 적용한 토폴로지를 나타내고 있다.

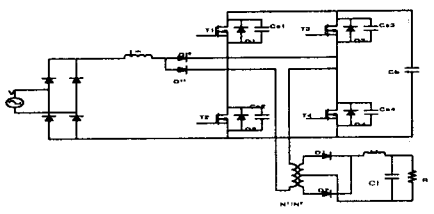


그림 6 PWM full-bridge converter

이 회로의 동작 원리를 모드별로 살펴보면 다음과 같고 그림 7은 이 토폴로지의 모드 별 동작 파형을 나타내고 있다.

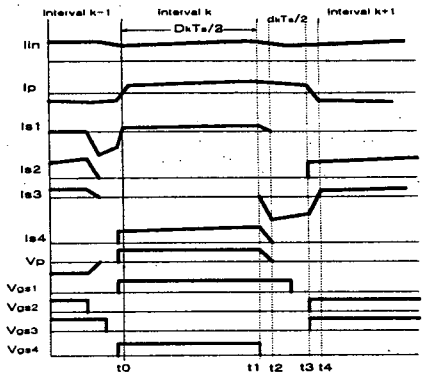


그림 7 각 모드 동작 파형

(1) Mode Ⅰ[t0 ~ t1]

T1과 T4가 턴-온 되면 변압기 1차측 전압은 캐패시터 C_b에 걸리는 전압 Vcb와 같다. 이 모드에서는 전력이 부하에 전달된다.

(2) Mode Ⅱ[t1 ~ t2]

T4가 턴-오프 되고 캐패시터 Cs3은 에너지를 방전하고 캐패시터 Cs4는 Vcb로 충전한다.

(3) Mode Ⅲ[t2 ~ t3]

이 모드는 변압기 1차측 전압이 0이 되고 컨버터는 freewheeling mode로 동작한다. 입력전류는 T3의 역병렬 다이오드로 흐르게 되고, T3은 이 모드 동안에 ZVT로 동작하게 된다.

(4) Mode Ⅳ[t3 ~ t4]

T2와 T3이 턴-온 되고 D_{x2}를 통해서 흐르던 전류는 T2를 통해서 흐르고 T3의 역병렬 다이오드를 통해서 흐르는 전류는 점점 감소한다.

(5) Mode Ⅴ[t > t4]

스위치 T1과 T4 대신에 스위치 T2와 T3가 턴-온 되는 것을 제외하고 t4이후 동작 모드는 Mode I 동작 모드부터 다시 반복한다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서 논의한 AC/DC full bridge converter에 적용한 세 가지 형태의 소프트 스위칭 기법에 대해서 PSIM과 PSPICE을 이용하여 시뮬레이션하고 구현하였다. 아래 그림 8, 9, 10은 각각 시뮬레이션 결과 파형을 보여 주고 있다.

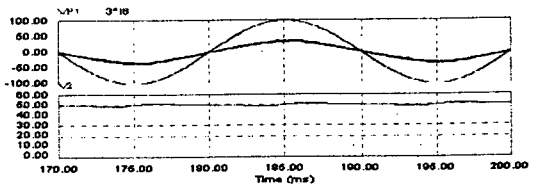


그림 8 입력전압과 전류 파형, 출력전압 파형 PRC-CF AC/DC full bridge converter

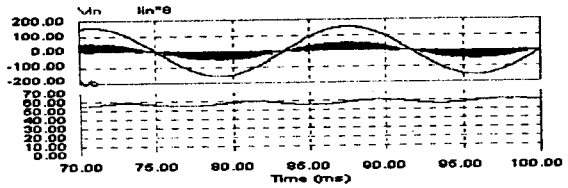


그림 9 입력전압과 전류 파형, 출력전압 파형
무손실 스너버 회로 적용 컨버터

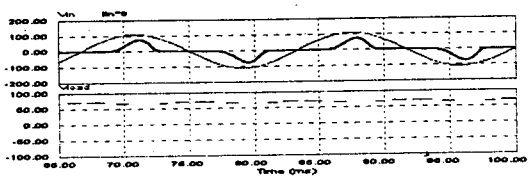


그림 10 입력전압과 입력전류 파형, 출력전압 파형
반주기 동안 고정된 게이트 신호 적용한 컨버터

세 개의 토롤로지 모두 피드백이 없는 오픈-루프로 일정 출력과 역률을 제어한 시스템이다. 그림 10에서 알 수 있듯이 무손실 스너버 회로를 적용한 컨버터는 DCM 모드로 동작하므로 다른 토롤로지보다 효율이 낮으며 그림 11은 DCM 모드와 CCM 모드로 동작하므로 공진을 적용한 토롤로지보다 효율이 낮음을 알 수 있다. 따라서, 양호한 역률과 높은 효율을 얻을 수 있는 토롤로지는 LC 병렬공진을 적용한 토롤로지임을 입증 할 수 있다. 그리고 그림 11, 12, 13는 각 토롤로지의 주 스위치 스위칭 동작시 스위칭 손실과 스트레스를 감소시키기 위한 LC 병렬공진, 무손실 스너버 회로의 동작 파형과 주 스위치에 흐르는 전류의 파형들을 보여 주고 있다.

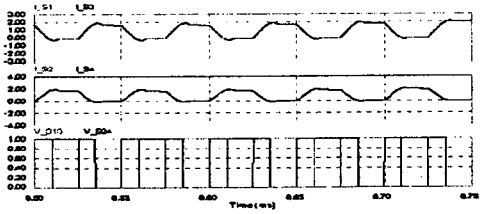


그림 11 각 스위치 전류 파형
PRC-CF AC/DC full bridge converter

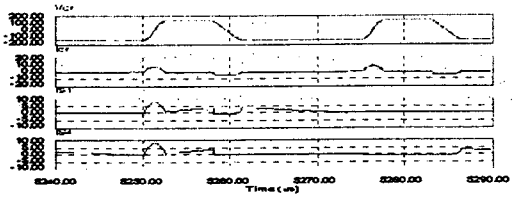
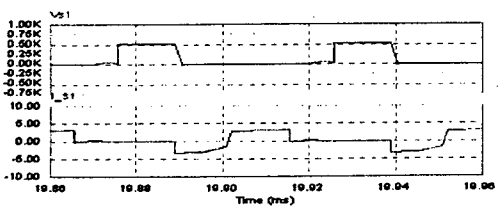
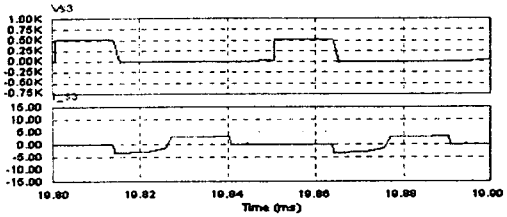


그림 12 스너버 캐패시터 전압과 전류 파형 스위치 전류 파형
무손실 스너버 회로 적용 컨버터



(a) 스위치 T1의 전압과 전류 파형



(b) 스위치 T3의 전압과 전류 파형

그림 13 반주기 동안 고정된 게이트 신호를 적용한 컨버터

그림 11, 12, 13 모두 본론에서 동작 모드별로 설명한 동작 파형 그림 3, 5, 7과 같이 동작함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 소개한 소프트-스위칭 기법의 유용함을 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 AC/DC full bridge converter의 소프트 스위칭 기법들을 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 확인하였고 오픈-루프로 일정전압과 양호한 역률을 얻을 수 있는 AC/DC full bridge converter에 적용할 소프트 스위칭 기법은 LC 병렬공진이 다른 소프트 스위칭 기법보다 회로가 단순하다는 장점을 가지고 있으며 시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 입증하였다. 그 결과 양호한 역률 개선효과를 확인하였고, 입력전류의 고조파도 획기적으로 감소시킬 수 있음을 보였다. 또한 PFC의 성능 향상을 위해 고주파수 운전으로 야기되었던 스위칭 손실 및 스트레스를 제거 또는 감소시킬 수 있음을 보였다.

본 연구는 시스템 제작 중이며, 제작이 완료되는 데로 실험을 통하여 시스템의 유용성 즉, 역률 및 효율 개선 효과를 확인하는 실험을 진행할 예정이다.

이 논문은 군산대학교의 BK21 연구비 지원에 의하여 연구되었슴.

참 고 문 헌

[1] H. Benqassmi, J.-P. Feeeieux, and J. Barbatoux, "Current-source resonant converter in power factor correction. " in Proc. *IEEE PESC'97, St. Louis, MO, June 22-77, 1997, pp. 378~384.*

[2] 김은수, 김태진, 조기연, 김윤호, "무손실 스너버 적용 소프트 스위칭 Single Stage AC-DC Full Bridge Boost 컨버터". 대한전기학회 하계학술대회 논문집 F권, pp. 1989~1992, 1997.

[3] J.-G. Cho, J.-W. Back, D. I. Song, and G.-H. Rim, "A single stage zero-voltage switched PWM full-bridge converter with power factor correction," IEEE APEC Conf. Rec., 1997, pp. 457~463.