

양방향 풀-브릿지 DC-DC 컨버터를 위한 새로운 소프트 스위칭 기법

(A New Soft Switching Technique for Bi-directional Power Flow, Full-bridge DC-DC Converter)

송유진, 박석인, 정학근, 한수빈, 정봉만
한국에너지기술연구원

Y.J. Song, S.I. Park, H.G. Jeong, S.B. Han, B.M. Jung
Korea Institute of Energy Research

ABSTRACT

This paper proposes a new soft switching technique for a phase-shift controlled bi-directional DC-DC converter. The described converter employs a low profile high frequency transformer and two active full-bridge converters for bidirectional power flow capability. A new soft switching technique is proposed, which guarantees soft switching over wide range (no load to full load) without any additional circuit components. In the proposed switching scheme, the switch pairs in the diagonal position of the converter each are turned on/off simultaneously by the switching signals with a variable duty ratio depending on the phase shift amount, and the converter is operated without freewheeling interval.

1. 서론

양방향 풀-브릿지 DC-DC 컨버터(그림 1)는 우주전력이나 전기자동차용 고주파 전력변환장치에 적합한 후보군중의 하나이다. 이러한 형태의 전력 변환장치는 고밀도전력, 고효율, 양방향 전력, 작은 크기의 필터등과 같은 장점을 가진다[1]. 위상천이 풀-브릿지 DC-DC 컨버터의 또 하나의 중요한 특징은 스위칭 손실을 제거해주는 영전압 스위칭(zero voltage switching)이다. 영전압 스위칭은 스위치 온/오프 직전 MOSFET의 기생 캐패시턴스(C_{ik})를 충/방전하는 변압기의 1차측 전류(I_p)에 의해 크게 좌우된다. 그림 1(b)에 나타난 것과 같이 우측 레그(right leg)에서의 스위칭 천이 시에는 변압기의 1차측 전류가 스위치의 기생 캐패시턴스를 방전하기에 충분한 반면, 경부하(light load)하에서 좌측 레그(left leg)에서의 스위칭 천이 동안에는 1차측 전류가 작아지고 방향이 바뀐다. 따라서 좌측 레그의 스위칭 천이 동안에는 스위치의 기생 캐패시턴스를 방전하기위해 변압기의 누설 인덕턴스(L_{lk})로부터 사용가능한 에너지가 감소하여 경부하에서는 영전압 스위칭을 하지 못하는 결과를 초래한다.

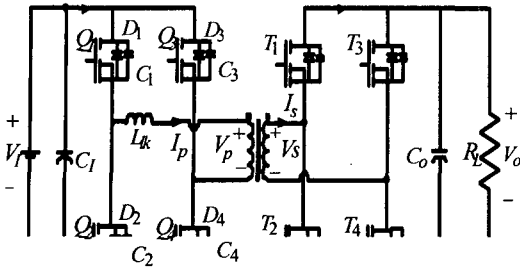
영전압 스위칭을 위한 부하범위를 확장하기위한

많은 기법들이 제안되었는데, 크게 두 가지로 분류된다. 첫 번째는 변압기의 1차측과 직렬로 연결되는 별도의 인덕터, 포화 인덕터(saturable inductor) 또는 스너버 회로등과 같은 부가적인 회로 소자를 사용하는 것이다[2-3]. 이 방법은 영전압 스위칭을 위한 부하범위를 확장시키지만, 도통손실(conduction losses)과 제작경비를 증가시킨다. 두 번째 기법은 부가적인 회로 소자를 사용하지 않고 좌측 레그에서는 영전류 스위칭(zero current switching) 그리고 우측 레그에서는 영전압 스위칭을 구현하는 것이다. 이 접근방법 또한 소프트 스위칭을 위한 부하범위를 확장시켜 주지만, 영전압 스위칭을 위한 최소부하와 영전류 스위칭을 위한 최대부하사이에 영전압 스위칭과 영전류 스위칭 모두 불가능한 구간이 존재한다[5].

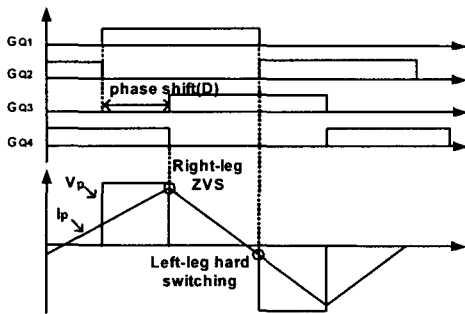
본 논문에서는 위상변이(phase shift) 양에 따라 가변 듀티비를 갖는 스위칭 신호를 이용한 새로운 소프트 스위칭 기법이 제안된다. 제안된 소프트 스위칭 기법의 장점은 다음과 같다.

- 부가적인 회로 소자가 필요 없다.
- 무부하에서 정격부하에 걸쳐 소프트 스위칭을 구현한다.
- 무 프리휠링 구간(no freewheeling interval)은 순환전류(circulating current)를 감소시켜 도통

손실을 줄인다.



(a) 토폴로지



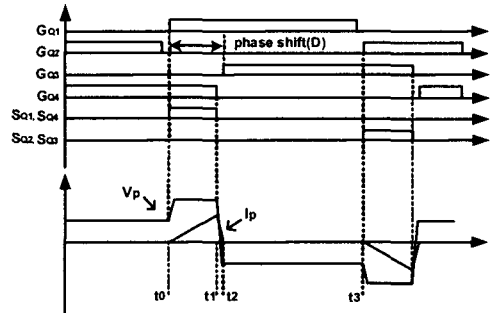
(b) 컨버터 스위칭 신호 파형

그림 1 양방향 컨버터와 스위칭 파형
Fig. 1 Bi-directional converter and its switching waveform

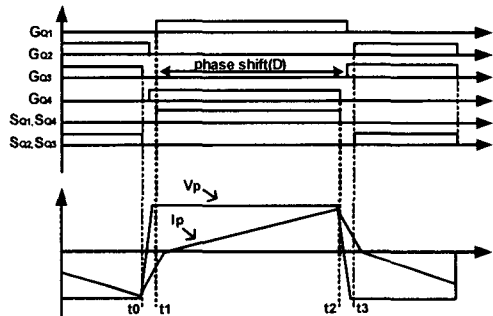
2. 소프트 스위칭 기법과 회로 동작원리

제안된 소프트 스위칭 기법과 회로 동작원리를 이상적인 스위칭 파형을 통해 설명한다. 그림 2는 제안된 소프트 스위칭 기법에 의해 경부하와 정격부하에서 동작하는 컨버터의 이상적인 스위칭 파형을 나타내는데, 스위치 $Q_{1,4}$ 에 대해서 $G_{Q1,4}$ 는 기존의 스위칭 기법에 의한 스위칭 신호이고 $S_{Q1,4}$ 는 제안된 스위칭 기법에 의한 스위칭 신호이다. 2차측의 스위치 $T_{Q1,4}$ 는 같은 스위칭 신호 $S_{Q1,4}$ 에 의해 스위치 $Q_{1,4}$ 에 각각 동기된다. 스위칭 신호 ($S_{Q1,4}$)의 듀티비는 50%로 고정되지 않고 위상변이 양에 따라 0%에서 50%까지 변한다. 대각선 위치에 있는 스위치 쌍, 즉 Q_1, Q_4 그리고 Q_2, Q_3 는 각각 동시에 온/오프 된다. 따라서 제안된 소프트 스위칭 기법에는 프리윙링 구간이 없으며, 이는 순환 전류를 감소시켜 도통손실을 저감시킨다. 스위칭

동작의 양의 반주기는 음의 반주기에 대해 전압과 전류의 부호만 다르고 대칭적이기 때문에 양의 반주기에 대해서만 경부하와 정격부하에서의 회로 동작을 그림 2(a), (b)를 기초로 설명한다.



(a) 경부하에서의 동작파형



(b) 정격부하에서의 동작파형

그림 2 제안된 소프트 스위칭 기법
Fig. 2 Proposed soft switching scheme

2.1 경부하에서의 회로 동작

모드 1($t_0 \leq t$): t_0 이전에는 모든 스위치가 오프상태이고 변압기의 1차측 전류, I_p ,는 0이다. t_0 에서 스위치 Q_1, Q_4 는 영전류 스위칭과 함께 온 되고, 2차측의 T_1, T_4 도 영전류 스위칭과 함께 온 된다. 입력전압 V_1 는 변압기에 가압된다 (그림 3(a)).

모드 2($t_0 < t < t_1$): 스위치 Q_1, Q_4 는 온 상태이고 I_p 는 증가하기 시작하여 변압기의 누설 인덕턴스 L_{lk} 를 충전한다. 이 모드에서 전력이 정 방향으로 전송된다 (그림 3(b)).

모드 3($t_1 \leq t < t_2$): 스위치 Q_1, Q_4 가 오프되고 Q_2, Q_3 는 오프상태로 남아있다. I_p 는 스위치 Q_2, Q_3 의 다이오드 D_2, D_3 을 통해 흐르고 감소하기 시작한다

(그림 3(c)).

모드 4($t_2 \leq t < t_3$): 모든 스위치가 오프상태이고, I_p 는 t_2 에서 0으로 감소한다. 출력전압 V_o 는 출력 캐패시터에 의해 일정하게 유지된다 (그림 3(d)).

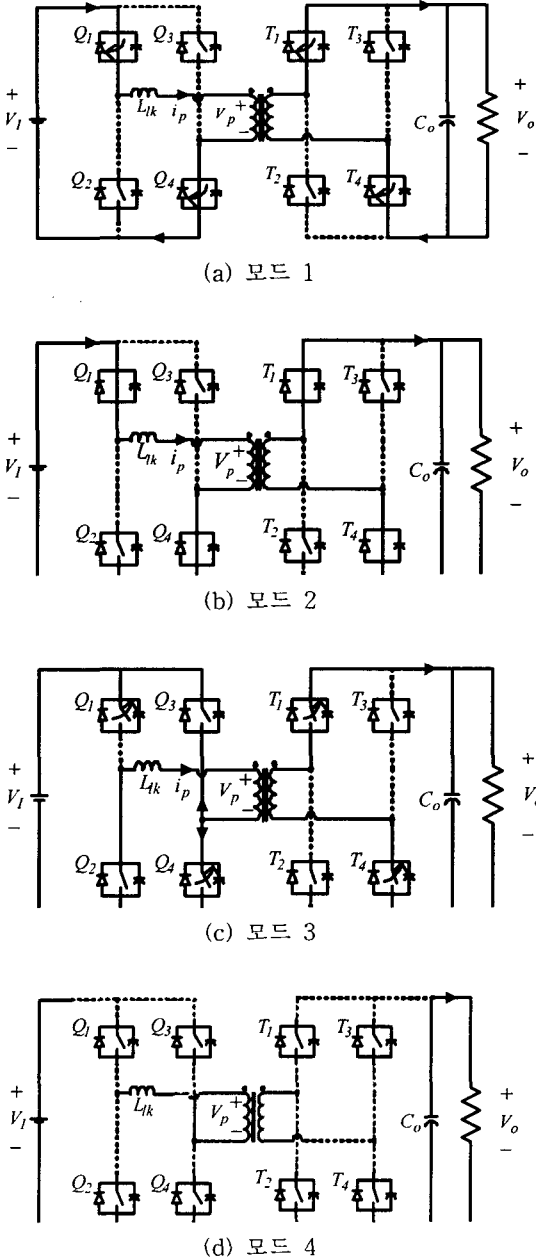


그림 3 경부하에서의 회로동작
Fig. 3 Circuit operation with light load

2.2 정격부하에서의 회로 동작

부하가 증가함에 따라 1차측 전류 I_p 도 증가하여 스위칭 시점에서 더 이상 0이 아니므로 영전류 스위칭을 잃게 된다 (그림 2(b)).

모드 1($t_0 \leq t$): t_0 직전에 스위치 Q_2, Q_3 이 온 상태이고, I_p 는 0이 아니므로 영전류 스위칭을 할 수 없다. 그러나 이때 I_p 는 반주기 중 최대 값을 가지기 때문에 캐패시턴스 C_1, C_4 와 C_2, C_3 을 각각 충/방전할 수 있을 만큼 충분히 크다. 스위치 Q_2, Q_3 은 t_0 에서 오프되고 I_p 는 C_1, C_4 를 방전하고 C_2, C_3 을 충전하기 시작한다 (그림 4(a)).

모드 2($t_0 < t < t_1$): C_1 과 C_4 의 각 전압이 0이 된 후 다이오드 D_1 과 D_4 가 도통되고 I_p 는 D_1 과 D_4 를 통해 흐른다. 이때 변압기의 누설인덕턴스에 저장된 에너지는 전원으로 들어간다 (그림 4(b)).

모드 3($t_1 \leq t < t_2$): 스위치 Q_1 과 Q_4 가 t_1 에서 영전압 스위칭과 함께 온된다. I_p 는 방향을 바꿔서 흐르고 양의 최대치까지 증가한다. 전력은 정방향으로 전송된다 (그림 4(c)).

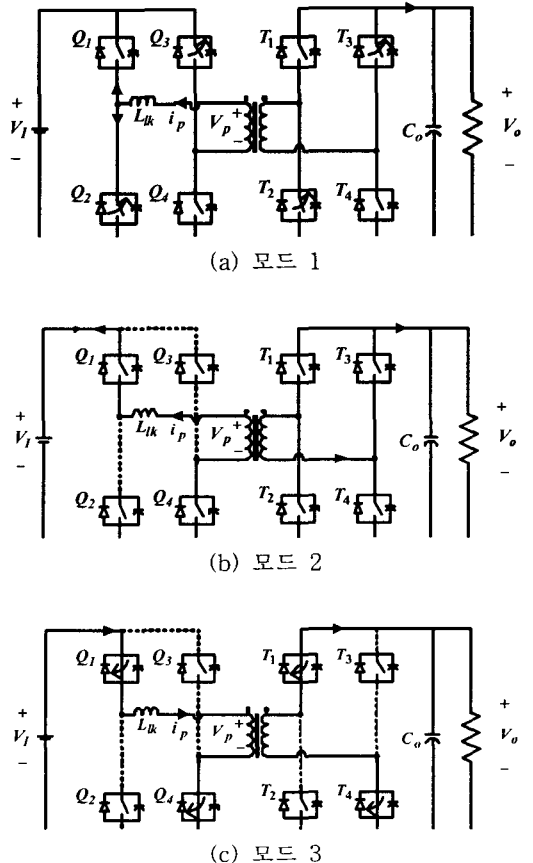
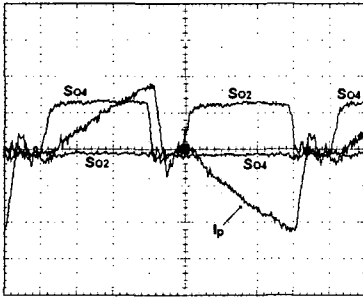


그림 4 정격부하에서의 회로동작
Fig. 4 Circuit operation with full load

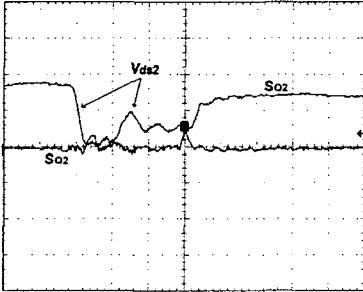
3. 실험결과

제작된 컨버터의 실험 사양은 다음과 같다.

V_i : 48V, V_o : 24V, f_s : 250kHz
 Q_{1-4} , T_{1-4} : MOSFET IRFP054N
 C_o : 15 μ F, C_f : 5 μ F, C_{1-4} : 3.2nF
 변압기 권선비 $n=N_1/N_2=3/2$, $L_{lk}=100$ nH



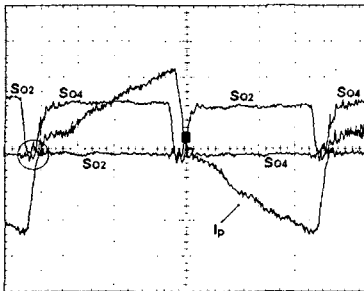
(a)



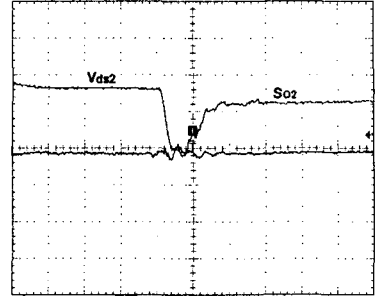
(b)

V_{ds2} : Q_2 의 드레인-소스 전압, 25V/div
 S_{Q2} , S_{Q4} : Q_2 , Q_4 의 스위칭 신호, 10V/div
 I_p : 변압기의 1차측 전류, 5A/div

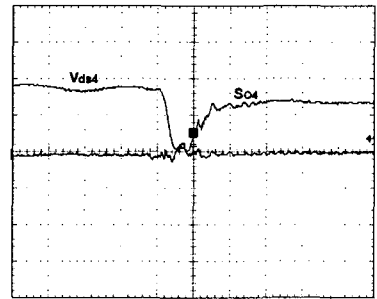
그림 5. 경부하(320W)에서이 스위칭 파형
 Fig. 5 Switching signals at the light load



(a)



(b)



(c)

V_{ds2} , V_{ds4} : Q_2 , Q_4 의 드레인-소스 전압, 25V/div
 S_{Q2} , S_{Q4} : Q_2 , Q_4 의 스위칭 신호, 10V/div
 I_p : 변압기의 1차측 전류, 5A/div

그림 6 증가된 부하(440W)에서이 스위칭 파형
 Fig. 6 Switching signals at the increased load

그림 5는 320W 경부하에서의 스위칭 파형을 나타낸다. 스위치 Q_2 , Q_4 가 영전류 스위칭과 함께 온되는 반면 (그림 5(a)), 이경부하에서는 I_p 가 C_2 를 방전할 만큼 충분히 크지 않기 때문에 좌측 레그의 스위치 Q_2 는 영전압 스위칭을 잃게된다. 좌측 레그의 두 스위치 모드 오프되어있는 동안 스위치 Q_2 의 드레인-소스 전압 V_{ds2} 는 $V_i/2$ 이어야 하나, Q_1 오프직후 스위치의 기생 캐패시턴스의 충전상태에도 영향을 받는다 (그림 5(b)). 부하가 증가함에 따라 스위치 Q_2 , Q_4 는 440W에서 영전류 스위칭을 잃게된다 (그림 6(a)). 그러나 스위치 Q_1 또는 Q_3 이 오프된 직후 I_p 는 C_2 또는 C_4 를 방전하기에 충분하기 크기 때문에 좌측 레그의 Q_2 와 우측 레그의 Q_4 는 영전압 스위칭으로 온된다 (그림 6 (b),(c)).

4. 결 론

본 논문에서는 양방향 풀-브릿지 DC-DC 컨버터를 위한 가변 듀티비를 이용한 새로운 소프트 스위칭 기법이 제안되었다. 제안된 소프트 스위칭 기법은 무부하에서부터 정격부하에 이르는 넓은 부하 범위에서 소프트 스위칭을 구현하였다. 또한, 제안된 소프트 스위칭 기법은 2차측이 다이오드 정류기와 출력필터로 구성되는 단방향 풀-브릿지 DC-DC 컨버터에도 적용 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] M.H. Kheraluwala, R.W. Gascoigne and D.M. Divan, "Performance characterization of a high-power dual active bridge", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol.28, No.6, 1992, pp1294-1301
- [2] G. Hua, F.C. Lee and M.M. Jovanovic, "An improved full-bridge zero-voltage-switched PWM converter using a saturable inductor", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 8, Oct. 1993, pp530-534
- [3] E.S.Kim, K.Y.Joe, M.H.Kye and B.D. Yoon, "An improved soft-switching PWM FB DC/DC converter for reducing conduction losses", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol.14, No.2, March 1999
- [4] H.L. Chan, K.W.E. Cheng, and D.Sutanto, "A novel square-wave converter with bi-directional power flow", Power Electronics and Drive Systems, 1999 PEDS'99. Proceedings of IEEE 1999 International Conference, Vol.2, pp966-971
- [5] H.L. Chan, K.W.E. Cheng, and D.Sutanto, "An extended load range ZCS_ZVS bi-directional phase-shifted DC-DC converter", Power Electronics and Variable Speed Drives, 2000. 8th International Conference, Vol.2, pp74-79
- [6] Ayyanar, R. and Mohan, N., "Novel Soft Switching DC-DC Converter with full ZVS-range and reduced filter requirement. I. Regulated output applications", Power Electronics, IEEE Transaction on, Vol.16, March 2001, pp184-192