

# 위상 천이 폴 브릿지 컨버터를 위한 전압 진동 제거 기술

박기범, 김정은, 문건우, 윤명중  
한국과학기술원

## Voltage Oscillation Reduction Technique for Phase Shift Full Bridge Converter

Ki-Bum Park, Chong-Eun Kim, Gun-Woo Moon, Myung-Joong Youn  
KAIST

### ABSTRACT

Conventional phase shift full bridge (PSFB) converter has serious voltage oscillation problem across the secondary rectifier diodes, which would require the dissipate snubber circuit, thus degrades the overall efficiency. To overcome this problem, a new voltage oscillation reduction technique (VORT) which effectively reduce the voltage oscillation of the secondary rectifier diodes for phase shift full bridge converter is proposed. Therefore, no dissipate snubber for rectifier diodes is needed. In addition, since it has wide zero voltage switching (ZVS) range, high efficiency can be achieved. Operational principle, analysis of voltage oscillation, and design consideration are presented compare with that of the conventional PSFB converter. To confirm the validity of the proposed VORT, experimental results from a 420W, 385Vdc/210Vdc prototype are presented.

### 1. 서론

최근 수많은 고효율, 고전력 밀도를 가지는 dc/dc 컨버터들이 제안되어 왔다. 이중 부가적인 회로 없이 영전압 스위칭이 가능한 위상 천이 폴-브릿지 컨버터는 중급 이상 용량에서 낮은 소자 스트레스와 높은 효율을 자랑하며 가장 널리 사용되어지고 있다. 그림 1에는 위상 천이 폴-브릿지 컨버터의 주요 동작 파형을 2차측 정류단 다이오드의 접합 캐패시턴스의 영향을 고려하여 나타내었으며, 이는 다음과 같은 문제점들을 유발한다.

- 1) 진상 레그(leading leg) 변이 시,  $I_{Lkg}$ 를 감소시켜 지상 레그(lagging leg) 영전압 스위칭 에너지가 감소된다.
  - 2) 정류단 다이오드의 전류(commutation) 종료 이후 변압기 누설 인덕터와 접합 캐패시터 간의 공진에 의해 과도한 전압 진동을 발생시킨다.
- 특히 2)의 경우는 정류단의 전압 스트레스를 크게 증가시키는데, 이를 방지하기 위하여 RCD-스너버가 가장 널리 사용되어 왔지만 효율 측면에서 만족스럽지 못하며, 능동 클램프 스너버의 경우는 부가적인 스위치의 사용으로 인하여 시스템의 복잡도를 증가시킨다는 단점이 있다. 본 논문에서는 기존의 위상 천이 폴-브릿지 컨버터가 가지는 정류단의 전압 진동 문제를 간단히 변압기

2차측에 직렬 캐패시터를 삽입하고 작은 자화 인덕턴스를 사용함으로써 효과적으로 해결할 수 있는 새로운 동작 방식을 제안한다.

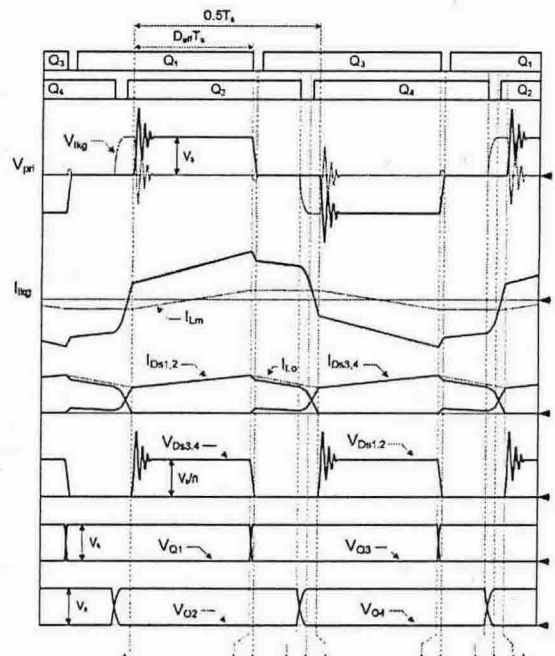


그림 1 정류단 다이오드의 접합 캐패시턴스 영향을 고려한 기존의 위상 천이 폴-브릿지 컨버터의 주요 동작 파형

### 2. 본론

#### 2.1 기존 동작 방식의 전압 진동

기존의 위상 천이 폴-브릿지 컨버터는 그림 1의  $t_4 \sim t_5$ 에서와 같이 전류 시  $I_{Lkg}$ 에  $V_S$ 의 큰 전압이 인가되므로,  $t_5$ 에서 전류 종료 이후 그림 3 (a)의 등가회로처럼  $V_S$  기준 전압의  $L_{lkq}$ 와  $C_1$ 의 공진에 의해서 다이오드에  $V_S/n$  진폭의 큰 전압 진동이 생기게 된다.

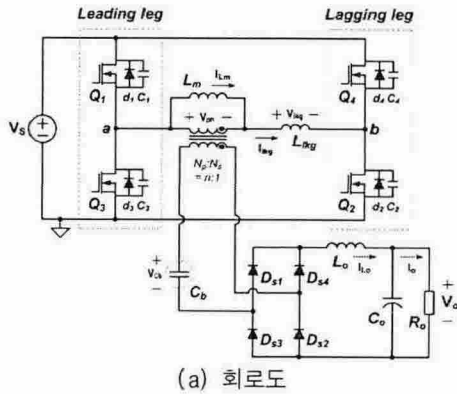
$$V_{Ds3,4}(t) = \frac{1}{n} V_{O1}(t) = \frac{1}{n} [V_S - V_S \cos(\omega_1(t-t_5))] \quad (1)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{lkq} C_1}} \quad (2)$$

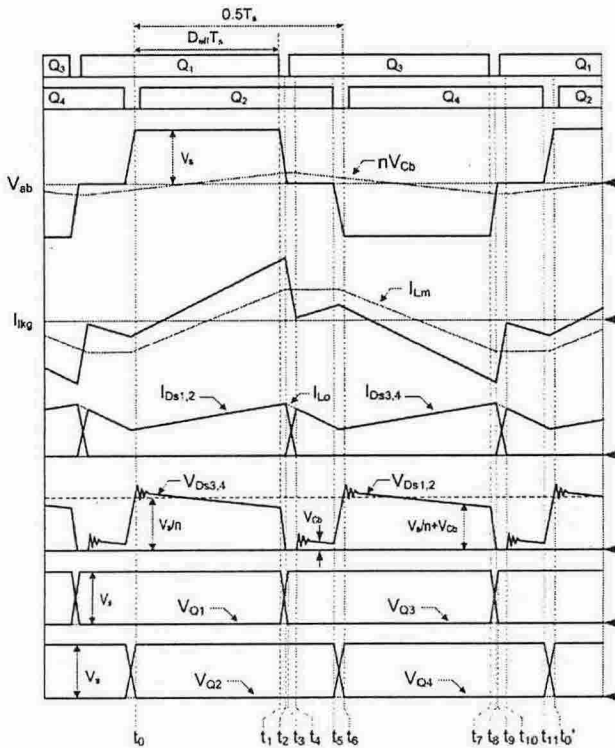
( $C_1$ : 1차측으로 투영된 접합 캐패시터들의 등가 캐패시터)

## 2.2 전압 진동 제거 기술

제안된 전압 진동 제거 동작은  $L_{lkg}$ 에 큰 전압이 걸리는 현상을 방지하기 위하여, 진상 레그 변이 시  $nV_{Cb}$ 의 작은 전압을  $L_{lkg}$ 에 인가하여 전류를 수행하며, 지상 레그 변이 시 출력 인덕터의 에너지를 이용한 영전압 스위칭을 통하여  $L_{lkg}$ 에 큰 전압이 인가되는 현상을 방지한다. 제안된 동작 방식의 경우, 큰 자화 전류로 인하여 변압기 1차측의 전류와 2차측의 전류형태가 다르기 때문에 진상 레그 변이 시의 전류를 위한 변압기 직렬 캐패시터  $C_b$ 는 2차측에 삽입하는 것이 경부하에서도 안정적인 전류 동작을 보장한다. 자세한 동작은 다음과 같다.



(a) 회로도



(b) 주요 동작 파형

그림 2 제안된 전압 진동 제거 기술

### 1) 진상 레그 변이

$t_1$ 에서  $Q_1$ 이 턴-오프 되면, 출력 인덕터의 에너지에 의해  $V_{Q1}$ 이 충전 된다.  $t_2$ 에서  $V_{ab}$ 가  $nV_{Cb}$ 와 같아지면 2

차측 정류단 다이오드가 모두 도통되며,  $t_3$ 에서  $V_{Q1}$ 이  $V_S$ 로 클램프 된 이후에는  $nV_{Cb}$ 의 전압이  $L_{lkg}$ 에 인가되어 전류가 수행된다.  $t_4$ 에 정류단의 전류가 종료되면 그림 3(b)의 등가회로에서와 같이  $V_{Cb}$  진폭의 작은 전압 진동이 2차측 다이오드에 생기게 된다.

$$V_{Dsl,2}(t) = \frac{1}{n} V_{C1}(t) = V_{Cb}(t) - V_{Cb}(t) \cos(\omega_1(t-t_4)) \quad (3)$$

### 2) 지상 레그 변이

$t_5$ 에서  $Q_2$ 가 턴-오프 되면, 출력 인덕터의 에너지에 의해 영전압 스위칭이 수행된다. 등가회로는 3(c)에 나타내었으며, 스위치와 다이오드의 전압은 다음과 같다.

$$V_{Q2}(t) = \left( I_{Lm}(t) - \frac{I_{Lo}(t)}{n} \right) \frac{1}{C_1 + 2C_{oss}} t + \left( I_{Lm}(t) - \frac{I_{Lo}(t)}{n} \right) \frac{1}{(C_1 + 2C_{oss})\omega_2} \left( \frac{C_1}{2C_{oss}} \right) \sin(\omega_2(t-t_5)) \quad (4)$$

$$V_{Dsl,2}(t) = \frac{1}{n} V_{C1}(t) = V_{Cb}(t) + \frac{1}{n} \left[ \left( I_{Lm}(t) - \frac{I_{Lo}(t)}{n} \right) \frac{1}{C_1 + 2C_{oss}} t - \left( I_{Lm}(t) - \frac{I_{Lo}(t)}{n} \right) \frac{1}{(C_1 + 2C_{oss})\omega_2} \sin(\omega_2(t-t_5)) \right] \quad (5)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{C_1 + 2C_{oss}}{2C_1 C_{oss} L_{kg}}} \quad (6)$$

$$t_{S6} = t_6 - t_5 = \frac{2C_{oss} V_S}{I_{kg}(t_5)} \quad (7)$$

$t_6$ 에서  $V_{Q2}$ 가  $V_S$ 로 클램프 된 이후의 등가회로는 그림 3(d)에 나타내었으며, 다이오드의 전압은 다음과 같다.

$$V_{Dsl,2}(t) = \frac{1}{n} V_{C1}(t) = V_{Cb}(t) + \frac{1}{n} \left[ V_S - (V_S + nV_{Cb}(t) - V_{C1}(t_6)) \cos(\omega_1(t-t_6)) - \left\{ I_{kg}(t_6) - \left( I_{Lm}(t) - \frac{I_{Lo}(t)}{n} \right) \right\} \sqrt{\frac{L_{kg}}{C_1}} \sin(\omega_1(t-t_6)) \right] \quad (8)$$

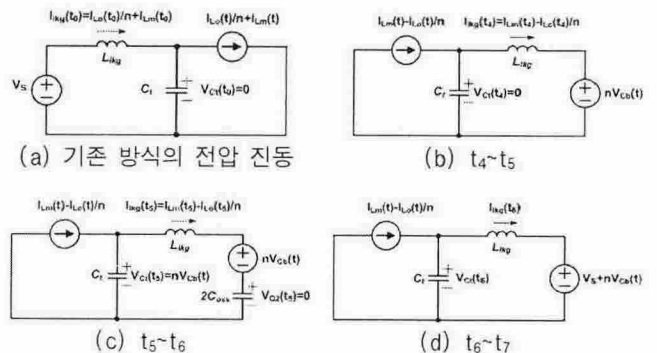
(8)에서 다이오드의 전압 진동에 관여하는 부분은

$$\frac{1}{n} (V_S + nV_{Cb}(t) - V_{C1}(t_6)) \cos(\omega_1(t-t_6)) \quad (9)$$

$$\frac{1}{n} \left\{ I_{kg}(t_6) - \left( I_{Lm}(t) - \frac{I_{Lo}(t)}{n} \right) \right\} \sqrt{\frac{L_{kg}}{C_1}} \sin(\omega_1(t-t_6)) \quad (10)$$

이며,  $V_S/n + V_{Cb}$ 에 비하여 상당히 작은 값이다.

위에서 살펴본 바와 같이 제안된 동작 방식은 진상 레그 변이 이후와 지상 레그 변이 이후에서 항상 작은 전압 진동만을 발생하게 되며, 작은 자화 인덕턴스를 사용하여 출력 인덕터 에너지로 지상 레그의 영전압 스위칭을 수행하므로 넓은 영전압 스위칭 영역을 보장한다.



(a) 기존 방식의 전압 진동

(b)  $t_4 \sim t_5$

(c)  $t_5 \sim t_6$

(d)  $t_6 \sim t_7$

그림 3 등가 회로

### 2.3 설계 방법

먼저,  $I_{L0}=I_o$ ,  $V_s \gg V_{Cb}$  라고 가정한다.

1)  $L_m$  설계: 지상 레그 변이 시, 영전압 스위칭을 위해서는  $I_{lk}(t_s) > 0$  을 만족해야 한다.

$$I_{Lm}(t_s) \frac{I_o}{n} = \frac{V_s T_s}{2L_m} \frac{I_o}{n} > 0, L_m < \frac{nV_s T_s}{2I_o} \quad (11)$$

2)  $C_b$  설계:  $V_{Cb}$ 의 최대값,  $V_{Cb}$ 는 다음과 같으며,

$$\frac{I_o T_s}{2} = 2C_b V_{Cb}, V_{Cb} = \frac{I_o T_s}{4C_b} \quad (12)$$

진상 레그 변이 시,  $nV_{Cb}$ 의 전압을  $L_{lk}$ 에 인가하여 지상 레그 변이 이전에 전류를 종료시켜야 한다.

$$\frac{nV_{Cb}}{L_{lk}} (0.5-D_{eff}) T_s > \frac{2I_o}{n} \quad (13)$$

따라서, (12), (13)에서  $C_b$ 의 범위는 다음과 같다.

$$C_b < \frac{n^2 T_s^2}{8L_{lk}} (0.5-D_{eff}) \quad (14)$$

3)  $L_{lk}$  설계 :  $L_{lk}$ 가 작을수록 전류를 위한  $V_{Cb}$ 값이 작아지므로 다이오드의 전압 스트레스가 줄어든다.

### 3. 실험 결과

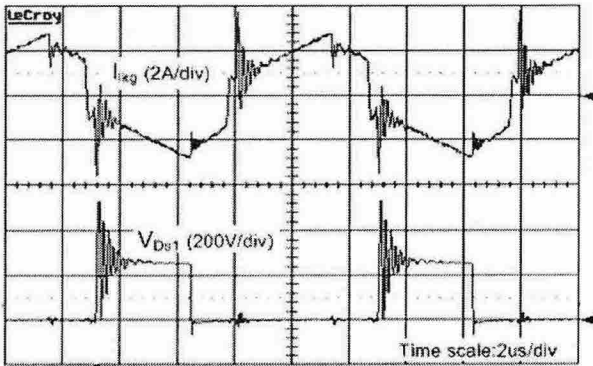


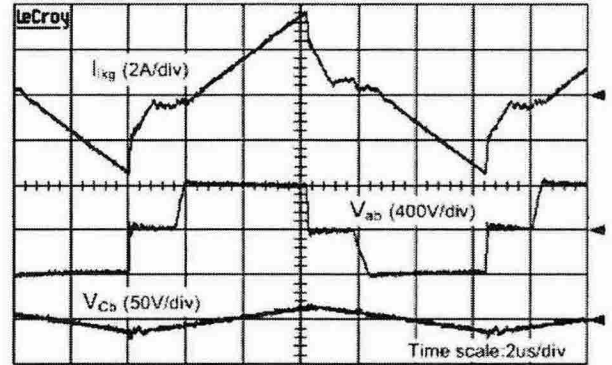
그림 4 기존의 위상 천이 폴-브릿지 컨버터의 실험 파형

제안된 회로의 타당성을 검증하기 위하여 420W,  $V_s=385Vdc$ ,  $V_o=210Vdc$ ,  $N_p:N_s=23:14$ ,  $L_m=420\mu H$ ,  $L_{lk}=7.5\mu H$ ,  $L_o=700\mu H$ ,  $C_b=470nF$ ,  $f_s=80kHz$ ,  $Q_1 \sim Q_4=FQA16N50$ ,  $D_{s1} \sim D_{s4}=15ETH03$  사양의 시험모델을 제작하였다. 그림 4는 기존 동작 방식의 실험 파형으로 전류 이후 2차측 다이오드의 전압진동이 상당히 심각하지만, 그림 5의 제안된 전압 진동 제거 동작의 실험 파형에서는 2차측 다이오드의 전압 진동이 효과적으로 제거되었음을 확인할 수 있다.

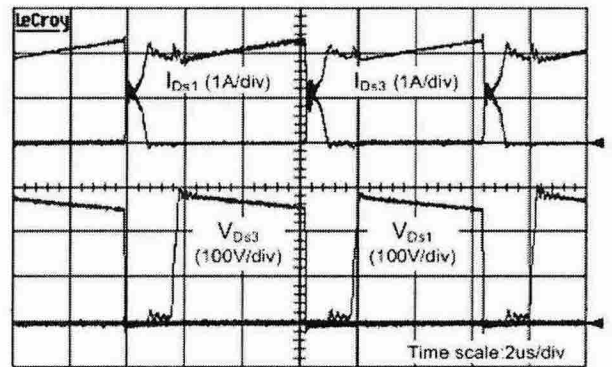
### 4. 결론

기존의 위상 천이 폴-브릿지 컨버터가 가지고 있는 2차측 정류단 다이오드의 전압 진동 문제를 해결하기 위하여 변압기 2차측에 직렬 캐패시터를 삽입하고, 작은 자화 인덕턴스를 사용하는 간단하고 효과적인 전압 진동 제거 기술을 제안하였다. 제안된 동작 방식은 전압 진동 제거 효과와 함께 출력 인덕터 에너지를 이용한 지상 레그 영전압 스위칭을 통하여 넓은 영전압 스위칭 영역을 보장한다. 420W, 385Vdc/210Vdc 사양의 실험을 통하여

기존의 동작과 제안된 전압 진동 제거 동작의 다이오드 전압 진동을 비교하였으며, 제안된 동작 방법이 효과적으로 2차측 다이오드의 전압 진동을 제거함을 확인함으로써 그 타당성을 입증하였다.



(a)  $I_{lk}$ ,  $V_{ab}$ ,  $V_{Cb}$



(b)  $I_{Ds1}$ ,  $I_{Ds3}$ ,  $V_{Ds1}$ ,  $V_{Ds3}$

그림 5 제안된 전압 진동 제거 동작의 실험 파형

이 논문은 한국과학기술원 인간친화복지로봇센터(HWRS-ERC)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### 참고 문헌

- [1] J. A. Sabate, V. Vlatkovic, R.B. Ridley, F. C. Lee, and B. H. Cho, "Design consideration for high voltage high power full-bridge zero voltage switched PWM converter." IEEE APEC Rec. 1990, pp. 275-284
- [2] J. G. Cho, J. A. Sabate, G. C. Hua, and F. C. Lee, "Zero-voltage and zero-current switching full-bridge PWM converter for high power application," IEEE PESC'94, 1994, pp. 102-108.
- [3] Chao Yan, Hongyang Wu, Jianjong Zeng, Ying Jianping, Jingtao Tan, "A precise ZVS range calculation method for full bridge converter," IEEE PESC'03. 2003, pp 1843-1836 Vol. 4.
- [4] Xinbo Ruan, JIANGANG WANG, " Calculation of the Resonant Capacitor of the Improved Current-Doubler Rectifier ZVS PWM Full-Bridge Converter", in IEEE Transactions of Industrial Electronics, Vol. 51, No. 2, pp 518-520, April 2004