

위상-듀티 제어된 듀얼 액티브 브릿지 컨버터의 운용 특성 연구

최우인, 조보형
서울대학교 공과대학 전기공학부

Operational Characterization of the Dual Active Bridge Converter under Phase-Duty Control

Woojin Choi, and Bo-Hyung Cho

Department of Electrical and Computer Science, Seoul National University

ABSTRACT

듀얼 액티브 브릿지 컨버터는 고전력 전달에 유용한 절연형 양방향 컨버터이다. 듀얼 액티브 브릿지 (DAB) 컨버터의 가장 간단한 제어 방식은 고주파 변압기의 일차단과 이차단의 위상 차이를 통해 전달 전력을 제어하는 위상천이변조 (PSM) 방식이다. 그러나 위상 변동 방식을 이용하면 경부하 상황에서 소프트 스위칭이 이루어지지 않으며 순환 전류 또한 크게 발생하여 변환 효율이 낮아지게 된다. 본 논문에서는 위상 및 듀티가 변동된 컨버터의 최적 동작점을 파악하기 위한 DAB 컨버터의 운용 특성 연구를 수행하였다. 컨버터의 위상과 듀티에 따른 동작 파형, 경계 조건, RMS 전류, 소프트스위칭의 여부 등이 분석되었다.

1. 서론

고효율 양방향 컨버터에 대한 수요가 증가함에 따라 그림 1의 듀얼 액티브 브릿지 (DAB) 컨버터에 대한 관심이 증가했다.^[1] 고주파 변압기를 중심으로 하여 1차단과 2차단의 풀브릿지가 연결되어 있는 구조를 가지고 있다. DAB 컨버터의 장점은 영전압스위칭 (ZVS)가 가능하며 적은 수의 수동 소자가 요구된다는 것이다. 이를 통해 높은 효율과 낮은 전력 밀도를 달성할 수 있다.

DAB 컨버터의 가장 기본적이며 간단한 변조 방법은 변압기의 양 풀브릿지 간의 위상을 조절하여 전달 전력을 제어하는 것이다. 이러한 변조 방법을 위상천이변조 (phase-shift modulation, PSM)이라고 하며 전달 전력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_o = \frac{T_s}{L} \cdot v_i \cdot v_o \cdot \phi(1-2\phi) \quad (1)$$

이 때, P_o 는 전달 전력, T_s 는 스위칭 주기, L 은 변압기의 누설 인덕턴스 값, v_i 와 v_o 는 각각 입출력 전압, ϕ 는 위상 차이를 나타낸다. 양 측의 듀티는 50%로 고정되며 1차단과 2차단의 위상 차이만을 제어 변수로 동작시킨다는 점에서 제어가 간단하다는 것이 가장 큰 장점이다. 하지만, PSM의 단점은 소프트스위칭 범위가 한정되며, 경부하에서 높은 순환 전류가 발생해 효율이 감소한다는 점이다.

PSM의 단점을 극복하기 위해 다양한 변조 방식이 제안되었다.^{[2]-[3]} 중부하에서는 기존의 PSM 방식을 이용하는 동시에 경부하에서는 삼각변조 (TRM), 제형변조 (TZM) 방식을 이용하여 순환전력의 크기와 전류의 RMS 값을

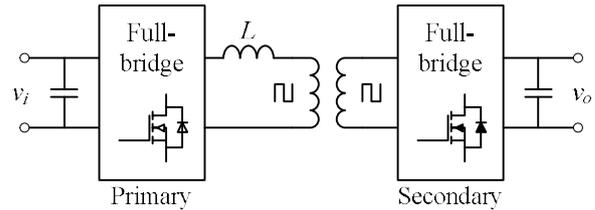


그림 1 DAB 컨버터

감소하는 방법이 제안되었다. 또한 이 방법을 프로그램 가능 로직 소자를 이용하여 각 동작점에서 구현토록 했다.^[2] 듀얼 위상천이 (DPS) 방식은 1차단의 진상레그와 지상레그 간의 위상 차이를 발생시켜 순환전력의 발생을 근본적으로 제거했다.^[3] 그러나 DPS 방식은 양 측의 전압 차이가 클 경우와 경부하에서만 높은 효율을 보인다는 단점이 있다.

제안된 방법들은 모두 특정 부하 혹은 전압 조건에서 이용할 변조 방법을 미리 계산한 후에 선택한다. 이러한 방식을 이용할 경우 동작 모드 간의 불연속적인 변동이 발생하게 되며 컨버터의 제어가 복잡하게 된다. 본 저자는 DAB 컨버터의 위상과 듀티를 연속적으로 제어하는 변조 방법인 위상-듀티 제어 (phase-duty control, PDC) 방식을 이용하고자 한다. 이를 위해 본 논문에서는 PDC 방식을 이용한 DAB 컨버터의 최적동작점을 파악하기 위한 운용 특성에 대한 연구를 수행한다.

2. PDC 방식을 이용한 DAB의 운용 특성

2.1 PDC 방식

PDC 방식은 PSM 방식과 같이 1차단과 2차단의 위상 차이인 ϕ 를 적용하여 제어하되 양 단에 동일한 크기의 듀티 D 를 적용한다. 위상의 범위는 $-25% < \phi < 25%$ 이며, 듀티의 범위는 $0.1 < D < 0.5$ 이다. 그림 2는 일반적인 PDC 방식의

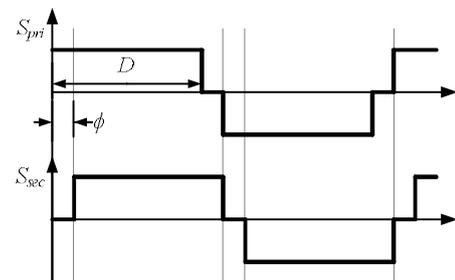


그림 2 PDC 방식의 스위칭 파형

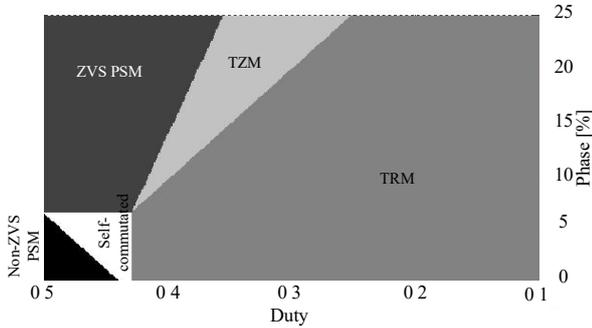


그림 3 PDC 방식의 동작모드 구분

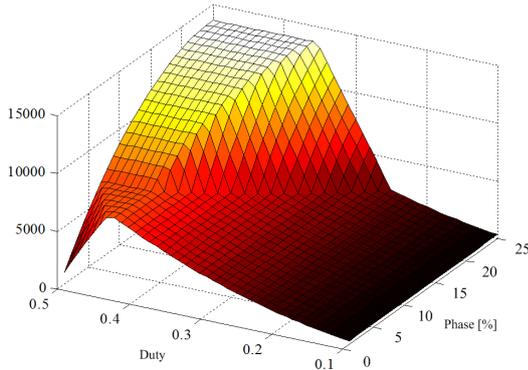


그림 4 위상과 듀티에 따른 전달 전력

스위칭 파형을 나타내며, S_{pri} 와 S_{sec} 는 각각 1차단과 2차단의 스위칭 파형이다. 이어지는 분석은 입출력 전압이 일정하며 1차단 전압이 2차단 전압보다 크다는 가정하에 수행되었다.

2.2 운용 모드 정의

PDC 방식을 이용할 경우 위상과 듀티에 따라서 다양한 파형의 동작모드가 발생한다. 그림 3은 위상과 듀티에 따른 컨버터의 동작모드를 나타내며 총 다섯 가지의 파형의 동작모드가 발생한다: (1) ZVS PSM - 일반적인 PSM 방식; (2) non-ZVS PSM - ZVS가 일어나지 않는 PSM 동작 구간; (3) 삼각변조 (TRM); (4) 직사각형변조 (TZM); (5) 자력식 동작 구간. 한정된 지면 관계 상 각 동작 모드 간의 경계 조건 및 동작 파형은 생략한다.

2.3 운용 특성

각 동작 모드에서의 전달 전력을 나타내는 식은 표 1에 나타내었고, 이를 이용하여 위상과 듀티에 따른 전달 전력의 크기를 그림 4에 나타냈다. 듀티가 0.5일 경우는 일반적인 PSM 변조 방식이다. 위상이 증가할수록 전달 전력이 커지며 위상이 작아질수록 전달전력이 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 동일한 위상에서 듀티가 감소할 경우 경부하 지역으로 진입하는 것을 볼 수 있다. 따라서 경부하를 만족하기 위한 동작점은 일정 등고선을 따라 형성되는 것을 알 수 있다. 한편, DAB 변조 방법의 성능을 나타내는 가장 중요한 지표 중 하나인 RMS 전류의 크기는 순환 전류의 크기를 나타내기도 한다. RMS 전류의 크기를 이용하여 도통 손실의 크기를 계산할 수 있으며, 그림 5는 위상과 듀티에 따른 RMS 전류의 제곱과 전달전력의 비를 나타내며 값이 클수록 도통 손실의 크기가 커다는 것을 의미한다.

3. 결론

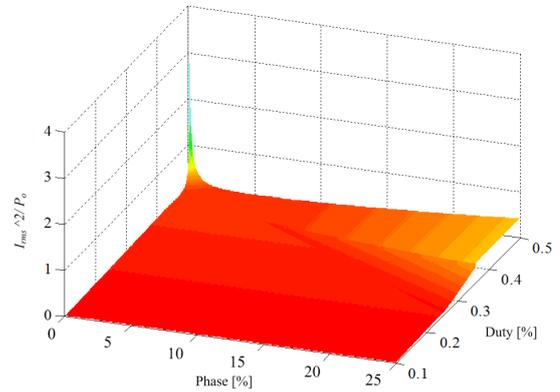


그림 5 위상과 듀티에 따른 I_{rms}^2/P_o 의 크기

표 1 동작모드에 따른 전달 전력 식

모드	전달 전력
ZVS PSM	$P_o = \frac{T_s}{L} \cdot v_i \cdot v_o \cdot \phi (1 - 2\phi)$
Non-ZVS PSM	$P_o = \frac{T_s}{L} \cdot v_i v_o \cdot (d - \phi) \{2(d - \phi) - 1\}$
TRM	$P_o = \frac{2T_s}{L} \cdot \frac{v_i v_o (v_i - v_o)}{v_i + v_o} \cdot d^2$
TZM	$P_o = \frac{T_s}{L} \cdot \frac{v_i v_o (1 - 2\phi)}{v_i + v_o} \left\{ 2d(v_i + v_o) - \frac{1}{2}(1 - 2\phi)(v_i + 3v_o) \right\}$
자력식	$P_o = \frac{T_s}{8L} \cdot \frac{v_o}{v_i} (v_i^2 - v_o^2)$

본 논문에서는 PDC 방식을 이용한 DAB 컨버터의 운용 특성에 대해서 연구했다. 위상과 듀티를 변동하여 DAB 컨버터를 구동할 경우 다양한 동작 모드가 발생한다. 기존의 PSM 방식에서 발생하는 ZVS PSM과 non-ZVS PSM의 모드를 포함하여 총 다섯 가지의 동작 모드로 구분하였다. 각 모드에 대해서 전달 전력의 크기를 계산했으며 DAB 컨버터 특성의 가장 중요한 지표 중 하나인 전류 RMS의 값을 계산하였다. 본 논문에 수록하지는 않았으나 각 모드에서의 ZVS 특성 또한 연구되었으며 이러한 값들을 이용하여 컨버터의 동작 효율을 추정할 수 있다. 본 논문에서의 연구 결과를 바탕으로 PDC 방식을 이용한 DAB 최적 구동 방식을 마련할 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)과 산업평가관리원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2011T100100025)

참고 문헌

- [1] Rik De Doncker, Divan, D., and Kheraluwala, M., "A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications," IEEE Trans. Ind. Appl., vol.27, no.1, pp.63,73, Jan/Feb, 1991.
- [2] Krismer, F., Round, S., and Kolar, J.W., "Performance Optimization of a High Current Dual Active Bridge with a Wide Operating Voltage Range," IEEE 37th PESC '06, pp.1.7, 18-22, June, 2006.
- [3] Hua Bai, and Mi, C., "Eliminate Reactive Power and Increase System Efficiency of Isolated Bidirectional DAM DC-DC Converters Using Novel DPS Control", IEEE Trans Power Electron., vol.23, no.6, pp.2905,2914, Nov., 2008.