

ESS용 전류원 DAB 컨버터의 하이브리드 스위칭 알고리즘에 관한 연구

허경욱, 최현준, 정지훈
울산과학기술대학원

A Hybrid Switching Modulation of Current-Fed Dual-Active-Bridge Converter for Energy Storage System

Kyoung-Wook Heo, Hyun-Jun Choi, Jee-Hoon Jung
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

ABSTRACT

본 논문에서는 ESS용 전류원 Dual-Active-Bridge 컨버터의 저 부하 및 고 부하에서의 효율 향상을 위한 하이브리드 스위칭 알고리즘을 제안하고자 한다. 전류원 DAB 컨버터는 인터리브 구조를 이용하여 배터리 단의 입력 전류 리플을 저감할 수 있고, 전력 변환 효율 개선을 위한 다양한 제어 변수를 도입할 수 있는 등의 장점으로 인해 DC 마이크로그리드에서 ESS용 절연형 양방향 DC/DC 컨버터로 주목받고 있다. 그러나 전류원 DAB에서 종래의 전력 제어 방법인 펄스폭 변조 방식과 위상천이가 결합된 방법(PWM plus Phase Shift, PPS)의 경우 저 부하 조건에서 높은 피크 전류로 인해 도통 손실이 크며, 펄스폭 변조 방식과 이중 위상천이가 결합된 방법(PWM plus Dual Phase Shift, PPDPS)의 경우 고 부하 조건에서 영전압 스위치 영역이 좁아져 효과적이지 않다. 따라서 본 논문에서는 2차 측의 펄스폭과 위상천이를 독립적으로 제어하는 하이브리드 스위칭 알고리즘을 통해 순환전류를 감소시키고 영전압 스위치 영역을 확장시켜 저 부하 및 고 부하 모두에서 효율을 향상시키고자 한다. 1-kW급 전류원 DAB 컨버터 시작품을 통해 제안된 하이브리드 스위칭 알고리즘의 효율성과 타당성을 검증한다.

1. 서론

최근 신재생 에너지원의 계통 연계 시 에너지 효율이 중요시되면서 DC 마이크로그리드에 대한 관심이 증가하고 있다. 그러나 신재생 에너지원의 불규칙한 발전 특성으로 인해 신재생 에너지원의 연계 시 ESS가 필수적으로 요구된다. ESS의 효율적인 사용을 위해 충·방전이 이루어져야 하며 이를 위해 양방향 DC-DC 컨버터가 필요하다. ESS는 충전된 전하에 따라 정격전압의 변동이 생기므로 넓은 입력전압 범위와 높은 효율의 토폴로지가 적용되어야 한다. 전압원 Dual-Active-Bridge 컨버터의 경우 1차 측과 2차 측의 전압 이득이 1에서 멀어짐에 따라 ZVS 영역이 좁아져 손실이 크고 무효전력이 커지며 입력단의 큰 전류 리플로 인해 배터리 수명에 영향을 줄 수 있어 적합하지 못하다.

ESS에 적합한 DC-DC 컨버터로 그림 1의 전류원 DAB 컨버터가 있다. 전류원 DAB는 넓은 입력전압 범위와 낮은 입력 전압 리플로 ESS와 DC 버스 간 전력전달에 적합하다. 전압원 DAB 컨버터와 달리 ESS 단의 인터리브 구조의 입력 인덕터

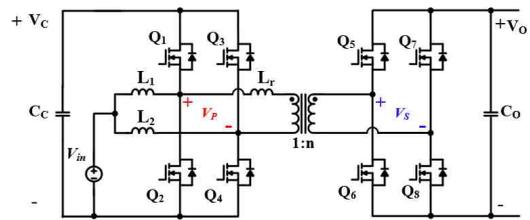


그림 1 전류원 DAB 컨버터
Fig. 1 Current-Fed DAB Converter

필터로 인해 전류 리플을 감쇄시켜 ESS 수명을 단축시키는 문제를 해결할 수 있다. 또한 1차 측의 벅, 부스트 구조를 펄스폭 변조 제어(PWM)를 통해 전압 이득을 1로 달성할 수 있다. 따라서 넓은 ESS의 정격전압 변동에도 ZVS를 달성할 수 있어 전력 변환 효율을 향상시킬 수 있다.

전류원 DAB 컨버터를 제어하는 방법으로는 펄스폭 변조 방식과 위상천이가 결합된 방법(PWM plus Phase Shift, PPS)이 있다. 1차 측 스위치의 펄스폭 변조 제어에 의해 클램핑 전압(V_C)을 만들어 단위 전압 이득을 달성함과 동시에 위상천이에 의해 전력이 제어된다. 그러나 저 부하에서 높은 피크 전류로 인해 효율이 저하될 수 있다. 이를 극복하기 위해 펄스폭 변조 방식과 이중 위상천이가 결합된 방법(PWM plus Dual Phase Shift, PPDPS)이 제안되었다^[1]. 2차 측 스위치의 펄스폭이 50%로 고정되는 PPS와 달리 펄스폭 제어를 통해 저 부하에서 도통손실을 감소시킬 수 있다. 그러나 고 부하에서 2차 측 상전압의 영백터로 인해 순환전류를 증가시킬 수 있다.

본 논문에서는 종래 제어 방법의 한계를 극복하기 위해 하이브리드 스위칭 알고리즘이 제안된다. 동작 모드 별 분석을 통해 저 부하 및 고 부하에서 높은 효율을 달성할 수 있음을 제시한다. 최종적으로 1-kW급 전류원 DAB 컨버터 시작품을 통해 제안하는 하이브리드 스위칭 알고리즘의 효율성과 타당성을 검증하고자 한다.

2. 전류원 DAB 컨버터 구조 및 동작 원리

그림 1의 전류원 DAB 컨버터의 1차 측은 인터리브 구조의 동일한 값을 가지는 인덕터 L_1 , L_2 로 구성되며 부스트 컨버터의 구조를 가진다. L_r 은 직렬 인덕터이며 변압기의 누설 인덕턴스와 외부 인덕턴스의 합을 나타낸다. V_p 와 V_s 는 각각 1차

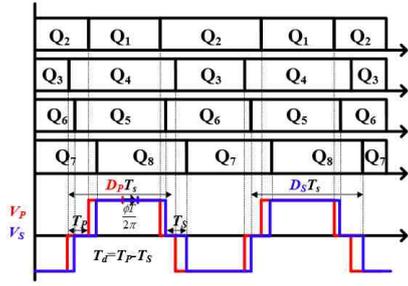


그림 2 하이브리드 스위칭 패턴
Fig. 2 Hybrid Switching Pattern

측, 2차 측 상전압을 의미하며 두 전압의 위상차 $\phi_{PS}(=\phi/\pi)$ 에 의해 전력이 전달된다.

그림 2는 전류원 DAB의 정상상태 스위칭 패턴을 보여준다. 1차 측 하단 스위치(Q_2, Q_4)의 D_P 에 의해 V_C 의 전압이 V_S 에 일치하도록 제어하여 ESS의 정격전압이 변함에도 불구하고 일정하게 V_C 전압을 유지할 수 있다. 따라서 빨간색 선과 같이 3단계의 전압 레벨을 가진다. 2차 측의 경우 내부 위상전이 D_S 에 의해 영벡터가 제어되며 파란색 선과 같이 3단계의 전압 레벨을 가진다. 본 논문에서는 V_P, V_S 의 영벡터를 각각 T_P, T_S 로 정의하며 두 값의 차이는 T_d 로 식(1)과 같이 표현된다. T 는 스위칭 주기를 의미한다.

$$\begin{cases} T_P = (D_P - \frac{1}{2})T, T_S = (D_S - \frac{1}{2})T \\ T_D = (D_P - D_S)T \end{cases} \quad (1)$$

3. 하이브리드 스위칭 제어 전략

전력이 1차 측(ESS)에서 2차 측(부하)으로 전달되는 것을 순방향, 2차 측(부하)에서 1차 측(ESS)로 전력전달 되는 것을 역방향으로 정의된다. 역방향 전력전달은 순방향 전력전달에 대해 대칭이므로 논문에서는 순방향 전력전달에 대해서만 분석한다. 제한하는 하이브리드 스위칭 알고리즘은 그림 3과 같이 출력 전력에 따라 4가지 모드로 나눌 수 있으며 각 모드 별 전력과 피크 전류는 표 1과 같이 요약된다.

저부하 모드 1 : 그림 3-(a)는 극 저부하에서의 제한하는 알고리즘의 정상상태 파형을 보여준다. 저부하 모드 1에서 바이어스 전류를 만들기 위해 T_d 가 설계되며 이 값은 고정된다. 이를 통해 2차 측 스위치가 ZVS 영역에서 동작할 수 있게 한다. 출력 전력은 표 1과 같이 D_P, ϕ_{PS} 에 의해서만 나타나며 T_d 값을 유지하기 위해 D_P 가 ESS 전압에 의해 제어 될 때, D_S 가

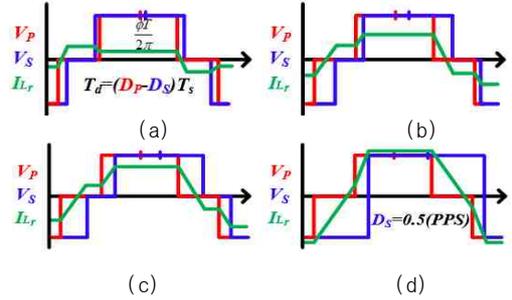


그림 3 하이브리드 스위칭 모드 제어 전략 : (a) 저부하 모드 1, (b) 저부하 모드 2, (c) 중부하 모드, (d) 고부하 모드
Fig. 3 Hybrid Switching Mode Control Strategy

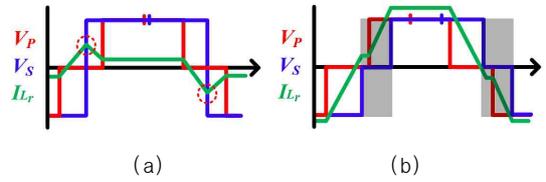


그림 4 종래의 전력 제어 기법 : (a) PPS, (b) PPDPs
Fig. 4 Conventional Power Control Technique

같이 제어된다.

저부하 모드 2 : ϕ_{PS} 가 $(D_P - D_S)$ 에 도달하면 그림 3-(b)와 같이 저부하 모드 2로 전환되며 저부하 영역에서 동작하게 된다. 그림 3-(b)와 같이 PPDPs와 동일하지만 T_d, D_P 값에 따라 D_S 가 제어 된다. 따라서 저부하 모드 1과 같이 전력이 D_P, ϕ_{PS} 에 의한 식으로 표현된다. 저부하 모드 1, 저부하 모드 2 모두 PPDPs 제어를 적용하여, 그림 4-(a)와 같이 저부하에서 높은 피크전류를 가지는 PPS 제어의 한계를 극복하고자 하였다.

중부하 모드 : ϕ_{PS} 가 $(D_P - 1/2)$ 에 도달하면 저부하 모드 2에서 그림 3-(c)와 같이 중부하 모드로 전환된다. 중부하 모드는 저부하 모드 2와 고부하 모드 사이를 원활하게 연결한다. 중부하 모드에서 ϕ_{PS} 는 $(D_P - 1/2)$ 로 고정되며 1차, 2차 측 스위치의 D_P, D_S 제어를 통해 출력 전력을 공급하게 된다. 중부하 모드 이전에는 D_P 와 T_d 에 따라 D_S 가 제어되지만, 중부하 모드에서는 전력공급을 위해 D_S 가 능동적으로 제어된다. D_S 가 0.5 되는 시점에서 최대전력을 출력하며 고부하 모드로 전환된다.

고부하 모드 : 고부하에서 그림 3-(d)와 같이 고부하 모드로 동작한다. D_S 가 0.5로 제어되어 2차측 상전압 V_S 가 구형파로 나타난다. ϕ_{PS} 에 의해 전력이 제어되며 종래의 PPS제어와 동일하다. 따라서 2차 측 상전압의 영 벡터가 제거된다. 이를 통

표 1 하이브리드 스위칭 알고리즘의 전력과 피크 전류
Table 1 Power and Peak Current of Hybrid Switching Algorithm

	저부하 모드 1	저부하 모드 2	중부하 모드	고부하 모드
전력	$\frac{V_C^2}{4L_r f_s} (1 - D_P) \phi_{PS}$	$\frac{V_C^2}{4L_r f_s} [-\phi_{PS}^2 + 2(2 - 2D_P + \frac{T_d}{T})\phi_{PS} - (\frac{T_d}{T})^2]$	$\frac{V_C^2}{4L_r f_s} [-D_S^2 + D_S - 4D_P^2 + 6D_P - \frac{9}{4}]$	$\frac{V_C^2}{4L_r f_s} [-4\phi_{PS}^2 + 2\phi_{PS}]$
범위	$0 \leq \phi_{PS} \leq (D_P - D_S)$	$(D_P - D_S) \leq \phi_{PS} < D_P - \frac{1}{2}$	$\phi_{PS} = D_P - \frac{1}{2}$	$(D_P - \frac{1}{2}) \leq \phi_{PS} < \frac{1}{4}$
피크 전류	$\frac{V_C}{2L_r} T_d$	$\frac{V_C}{2L_r f_s} \phi_{PS}$	$\frac{V_C(2D_P - 1)}{4L_r f_s}$	$\frac{V_C}{2L_r f_s} \phi_{PS}$

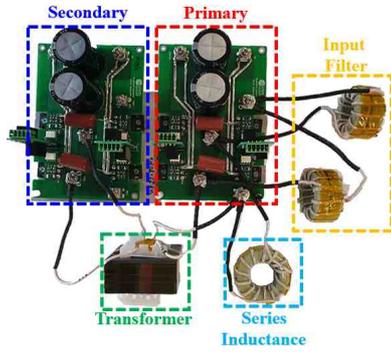


그림 5 1-kW 전류원 DAB 컨버터 시작품
Fig. 5 1-kW Prototype of CF-DAB Converter

표 2 전류원 DAB 컨버터의 설계 사양
Table 2 Design Specifications of CF-DAB Converter

	Parameter	Value
P_O	Output Power	1-kW
V_{ESS}	ESS Voltage	40V-50V
V_C	Clamping Voltage	127V
V_O	Output Voltage	380V
D_p	Range of Lower Switches in Primary	0.606-0.622
n	Turn Ratio	1:3
f_s	Switching Frequency	50kHz
L_r	Series Inductance	20uH
L_1, L_2	DC Filter Inductance	35uH

해 그림 4-(b)의 검정 음영과 같이 종래의 PPDPS가 가지는 순환전류를 최소화 할 수 있다.

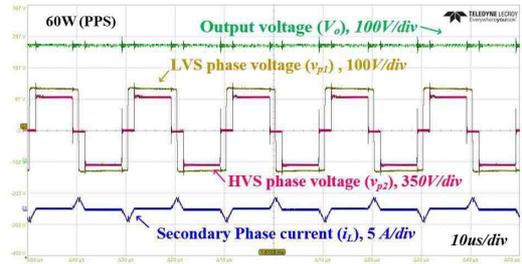
4. 실험 결과

하이브리드 스위칭 알고리즘의 실효성을 검증하기 위해 그림 5와 같이 1-kW 전류원 DAB 컨버터 시작품을 구성하여 실험하였다. 표 2는 전류원 DAB 컨버터의 설계 사양을 보여준다.

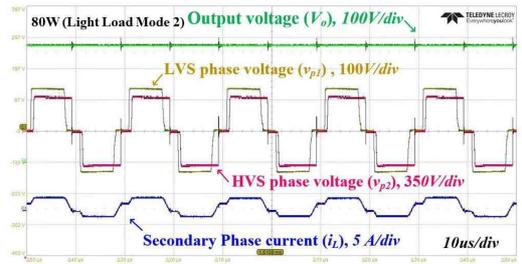
그림 8-(a)는 저부하에서 PPS 기법을 적용한 정상상태 파형이다. 직렬 인덕터에 흐르는 상전류가 RMS 1.7A 및 피크 4.7A로 측정된다. 그러나 8-(b)의 저부하 모드 2에서는 T_d 가 고정되고 ϕ_{PS} 에 의해 출력 전력을 제어하여 직렬 인덕터에 흐르는 상전류가 RMS 1.67A, 피크 2.1A로 PPS 기법에 비해 RMS 및 피크 전류가 저감됨을 알 수 있다. 그림 9의 경우 ESS 전압이 40V 일 때의 PPS 기법과 제안하는 하이브리드 스위칭 알고리즘의 효율을 보여준다. 저부하에서 하이브리드 스위칭 알고리즘을 통해 피크 전류를 저감하여 PPS보다 높은 효율을 가지며 100W 기준 최대 약 4% 향상됨을 알 수 있다. 고부하에서는 PPS기법을 적용하여 하이브리드 스위칭 알고리즘과 PPS기법의 효율이 같으며 그림의 고부하 효율은 측정 오차로 인해 미세한 차이를 보인다.

5. 결론

본 논문에서는 종래의 제어 기법인 PPS와 PPDPS가 가진



(a)



(b)

그림 8 전류원 DAB 컨버터 정상상태 파형 : (a) PPS (b) 저부하 모드 2

Fig. 8 CF-DAB Converter Steady State Waveform



그림 9 전류원 DAB 컨버터 효율 그래프 ($V_{ESS}=40V$)
Fig. 8 CF-DAB Converter Efficiency Curve

한계를 극복하기 위해 하이브리드 스위칭 알고리즘을 제안하였다. 최종적으로 하이브리드 스위칭 알고리즘을 적용한 1-kW급 전류원 DAB 컨버터 시작품을 통해 실효성을 검증하고 효율을 비교하였다. 저부하에서 2차 측 영벡터 제어로 인해 피크 전류가 저감되고, 고부하에서 2차 측 영벡터를 제거하여 효율이 향상됨을 확인하였다.

이 논문은 2019년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업임(NRF-2019R1A2B5B01069665)

참고 문헌

- [1] D. Sha, X. Wang and D. Chen, "High-Efficiency Current-Fed Dual Active Bridge DC-DC Converter With ZVS Achievement Throughout Full Range of Load Using Optimized Switching Patterns," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 2, pp. 1347-1357, Feb. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2675945.