

레독스 흐름 전지용 양극성 전압을 갖는 DC-DC 컨버터의 최적 PWM 스위칭 기법

정현주, 최세완
서울과학기술대학교

Optimized PWM switching method of DC-DC converter with the bipolar voltages for Redox Flow Battery

Hyeon Ju Jeong, Se Wan Choi
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문은 레독스 흐름 전지(Redox Flow Battery : RFB)용 양극성을 갖는 DC DC 컨버터의 기본 동작 원리 및 최적 스위칭 기법에 관한 것이다. 양극성을 갖는 DC DC 컨버터는 매우 낮은 배터리 전압에서도 완전 방전을 위해 고승압이 필요하고, 완전 방전 후 극성 반전이 되어 매우 낮은 전압에서도 충전이 가능하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 동작이 요구되는 RFB용 DC DC 컨버터의 스위칭 손실을 최소화하기 위한 스위칭 방법을 제안한다. 최종 발표 시 실험 결과를 제시하고자 한다.

1. 서론

대용량 에너지 저장장치에 적합하며 2차 전지로서 재활용이 가능하고, 대용량화가 용이한 RFB는 전해액 내 이온들의 산화, 환원 반응에 의한 충·방전을 반복함으로써, 화학 에너지를 전기 에너지 형태로 저장하여 사용할 수 있는 배터리이다. 하지만 RFB는 많은 충·방전 사이클을 반복할 경우 성능 저하가 나타날 수 있기 때문에 이를 방지하기 위하여 Stripping 즉, 주기적으로 배터리를 완전히 방전하여 극성을 반전한 후 충전해 사용하여야 한다.^[1] 따라서 매우 낮은 배터리 전압에서도 완전 방전을 위해 고승압이 필요하고, 완전 방전 후 극성 반전이 되어 매우 낮은 전압에서도 충전이 가능한 DC DC 컨버터가 요구된다. 기본적으로 배터리 충·방전에 많이 사용되는 DC DC 컨버터는 구조가 간단하고 스위치의 개수가 적어 제어 용이한 양방향 하프브리지 컨버터이다. 하지만 스위치의 도통손실, 인덕터의 기생성분 등의 영향으로 낮은 배터리 전압에서 높은 전압으로 승압 한계가 있으며 완전히 방전한 후에 배터리 극성 반전이 불가능하다.

본 논문에서는 양극성을 갖는 DC DC 컨버터의 최적 스위칭 기법을 제안한다. 제안하는 최적 스위칭 기법은 충·방전 동작 시 1 개의 스위치 소자만을 스위칭 함으로써 스위칭 손실을 최소화 할 수 있으며 낮은 배터리 전압에서도 높은 전압으로 방전이 가능하여 완전히 방전한 후에 배터리 극성을 반전하여 충전이 가능하다.

2. 제안하는 최적 스위칭 기법

그림 1은 양극성을 갖는 DC DC 컨버터의 회로도이다. 배터리를 기준으로 비절연 양방향 하프브리지 컨버터가 대칭적으로

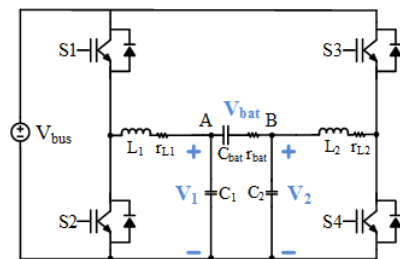


그림 1 양극성을 갖는 DC-DC 컨버터

표 1 각 Mode에 따른 제안하는 스위칭 기법

	$V_{Bat} > 0$		$V_{Bat} < 0$	
	$V_{ref} > V_{Bat}$	$V_{ref} < V_{Bat}$	$V_{ref} < V_{Bat}$	$V_{ref} > V_{Bat}$
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
S ₁	On	Off	Off	Switching
S ₂	Off	Off	Switching	Off
S ₃	Off	Switching	On	Off
S ₄	Switching	Off	Off	Off
	충전	방전	충전	방전

구성되었으며 배터리 전압이 0보다 클 때 V_1 을 일정전압으로 제어하면서 L_2 전류를 제어하여 배터리를 충·방전시키며, 배터리 전압이 0보다 작을 때는 V_2 를 일정전압으로 제어하고 L_1 전류를 제어하여 배터리를 충·방전시킨다. 그러나 이러한 기본적인 스위칭 방식은 2개의 스위치가 스위칭을 하여 스위칭 손실이 크다.

본 논문에서는 스위칭 손실을 최소화하는 최적 PWM 스위칭 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 표 1과같이 스위칭을 하여 모든 동작에서 1개의 스위치만 스위칭 동작을 하여 효율 향상을 기대할 수 있다. 또한, 매우 낮은 배터리 전압에서도 방전이 가능하고 완전 방전 후 극성을 반전하여 매우 낮은 배터리 전압에서도 충전이 가능하다. 표1에 각 Mode에 따른 제안하는 스위칭 방법을 나타내었다.^[2]

3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 사양은 다음과 같으며 각 모드 동작에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

- $P = 7\text{kW}$
- $V_{\text{Bus}} = 400\text{V}$
- $V_{\text{Bat}} = 200\sim 200\text{V}$
- $f_s = 15\text{kHz}$
- $C_{\text{Bat}} = 10\text{F}$
- $r_{\text{Bat}} = 1\text{m}\Omega$
- $L_1 \& L_2 = 475\mu\text{H}$
- $C_1 \& C_2 = 1\text{mF}$
- $r_{L1} \& r_{L2} = 1\text{m}\Omega$

그림2는 각 동작 모드에 대한 시뮬레이션 파형이다. 그림 2 (a)와(b)는 매우 낮은 양의 배터리 전압($V_{\text{Bat}}=10\text{V}$)에 대한 Mode 1,2의 동작을 나타내며 강압할 때 큰 듀티로도 매우 높은 전압($V_{\text{bus}}=400$)으로부터 충전(강압)이 가능하여 효율이 높은 장점이 있다(a). 또한, 승압할 때 작은 듀티로도 매우 높은 전압으로 방전(승압)이 가능하여 효율이 높은 장점이 있다(b). 그림2 (c)와(d)는 매우 낮은 음의 배터리 전압($V_{\text{Bat}}= -10\text{V}$)에 대한 Mode 3,4의 동작을 나타내며 각각 위 (a)와(b)의 경우와 동일한 방식으로 충·방전(승·강압)이 가능하고 효율이 높은 장점이 있는 것을 알 수 있다.

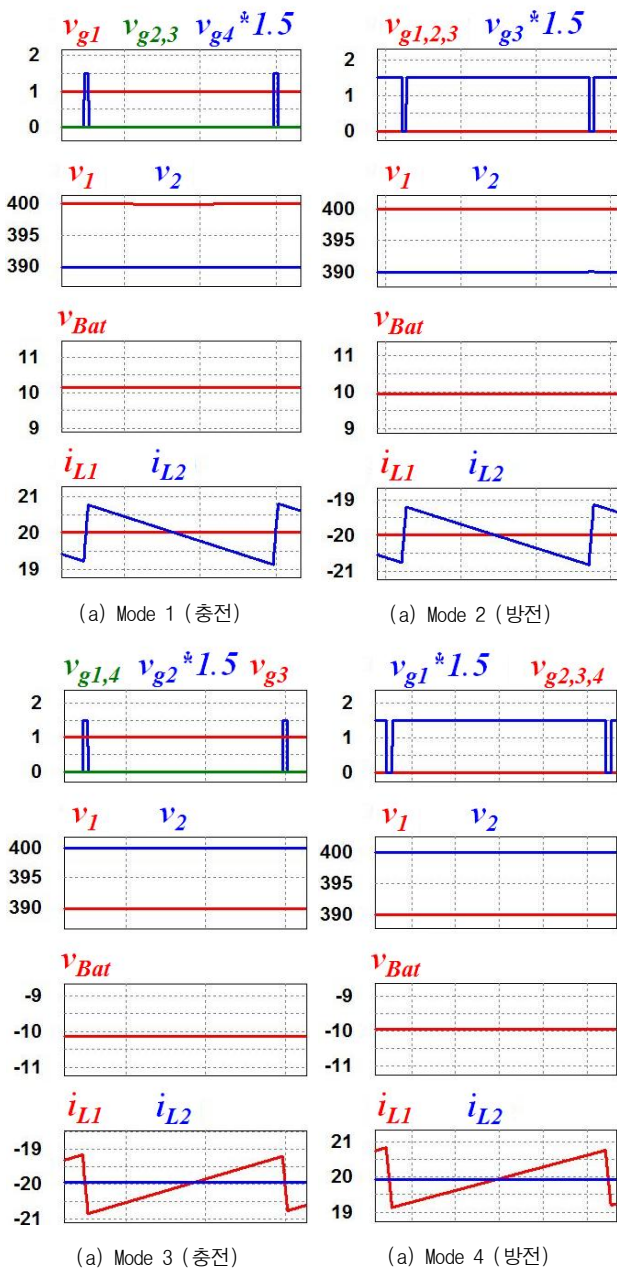


그림 2 각 동작모드에 따른 시뮬레이션 파형

표2와 표3은 위 사양에서의 각각 충·방전 시뮬레이션을 통한 손실 및 효율분석 표이다. IGBT의 도통 및 스위칭 손실은 PSIM의 Thermal Module을 이용하여 계산하였으며 제안하는 스위칭 방법이 2개의 IGBT를 스위칭 하는 방법과 비교하여 스위칭 손실이 적어 효율이 약 0.5% 이상 향상 되었다.

표 2 충전 시 스위칭 방법에 따른 손실 및 효율

		제안하는 방법	2개 스위칭
		$V_1=397 V_2=204$	$V_1=301 V_2=102$
		$D_{g1} = 1$	$D_{g1} = 0.76$
P_{Bus}		7242 W	7241 W
P_{Loss}	IGBT	Cond	86 W
		Sw	37 W
		r_L	136 W
$P_{\text{Bat}} (P_{\text{Bus}} P_{\text{Loss}})$		6984 W	6942 W
η		96.4%	95.9%

표 3 방전 시 스위칭 방법에 따른 손실 및 효율

		제안하는 방법	2개 스위칭
		$V_1=403 V_2=204$	$V_1=301 V_2=102$
		$D_{g2} = 0$	$D_{g2} = 0.26$
P_{Bat}		7265 W	7263 W
P_{Loss}	IGBT	Cond	90 W
		Sw	40 W
		r_L	147 W
$P_{\text{Bus}} (P_{\text{Bus}} P_{\text{Loss}})$		6988 W	6943 W
η		96.2%	95.6%

4. 결론

본 논문에서는 RFB용 양극성을 갖는 DC DC 컨버터의 최적 스위칭 기법을 제안하였다. 제안하는 스위칭 방법은 어느 모드에서나 1 개의 IGBT만을 스위칭시킴으로써 스위칭 손실을 감소시킬 수 있다. 또한, 매우 낮은 배터리 전압에서도 완전 방전을 위해 고승압이 가능하고, 완전 방전 후 극성을 반전하여 매우 낮은 전압에서도 충전이 가능하다. 게이트드라이브 손실 등을 고려하면 2개의 IGBT를 스위칭 하는 방법에 비해 충·방전 동작 시 최소 0.7~1%의 효율 향상이 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] K. Dennis, N. Coad, P. Lex, J. A. Reichard, "Reversible polarity operation and switching method for znbr flow battery when connected to common DC bus" U.S. Patent 20120326672 A1, Dec 27, 2012.
- [2] S. Choi, "DC/DC converter for battery and control method using the same" Korean Patent pending 10 2014 0116892, Sep. 3. 2014.