

리튬전지 충방전용 직류-직류 변환기의 효율에 관한 연구

김희선, 구도연, 이승용, 홍순찬
 단국대학교 전자전기공학과

A Study on the Efficiency of DC-DC Converter to Charge and Discharge Lithium Battery

Hee-Sun Kim, Do-Youn Koo, Seung-Yong Lee, and Soon-Chan Hong
 Dept. of Electronics and Electrical Eng., Dankook University

ABSTRACT

This paper presents a study on the efficiency of DC-DC converter to charge/discharge lithium battery. The losses of switching device, magnetic components, output capacitor, diode, and snubber circuit are analyzed by considering the charge/discharge characteristics of the converter. Based on the loss analyses, efficiency simulation in charging/discharging process are performed.

1. 서 론

본 논문에서는 충방전용 직류-직류 변환기의 효율에 대하여 연구한다. 변환기의 동작 특성에 따라 충전시와 방전시의 스위칭 소자, 자성소자, 출력커패시터, 다이오드 및 스너버회로에서 발생하는 손실을 해석한다. 손실 해석을 바탕으로 충전시와 방전시의 효율 시뮬레이션을 수행하고 분석한다.

2. 충방전용 직류-직류 변환기

2.1 변환기의 동작

그림 1은 충전과 방전을 하나의 장치로 수행할 수 있도록 포워드 변환기와 절연된 부스트 변환기를 기반으로 하여 구성된 리튬전지 충방전용 변환기이다^[1].

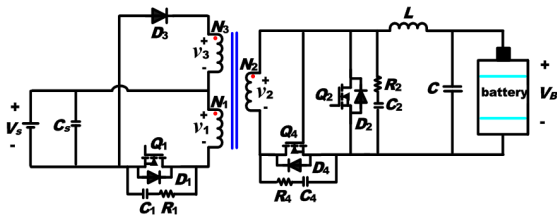


그림 1 리튬전지 충방전용 변환기
 Fig. 1 Converter to charge and discharge for lithium battery

충전시 Q_1 이 능동스위치가 되어 포워드 변환기로 동작한다. 이때 다이오드 D_2 와 D_3 가 동작하며 Q_2 는 동작하지 않는다. 또한 Q_4 는 자기구동 동기정류기로 동작하며 D_4 는 Q_4 가 도통되는 직전 및 직후에 아주 짧은 시간 동안 도통한다. 방전시에는 Q_2 가 능동스위치가 되어 절연된 부스트 변환기로 동작하며 Q_1 은 동작하지 않고 D_1 과 D_3 가 동작한다. 여기서 Q_4 는 자기구동 스위치로서 Q_2 와 상보동작을 한다. 또한 MOSFET 양단의 전압

스트레스를 줄이기 위하여 Q_1 , Q_2 , Q_4 양단에 RC 스너버회로를 설치하였다.

2.2 직류-직류 변환기의 손실 해석

변환기의 손실은 스위칭 소자, 자성소자 및 기타 소자들에서 발생되며 크게 세 부분으로 나누어 손실을 분석한다.

2.2.1 스위칭 소자 손실

스위칭 소자에서 발생하는 주된 손실은 도통손실, 스위칭 손실, 기생커패시터 손실, 게이트 드라이브 손실로 나눌 수 있다.

1) 도통손실

MOSFET이 도통상태일 때 저항 $R_{DS(on)}$ 을 통해 흐르는 드레인-소스 전류 I_{DS} 에 의해 발생하는 도통손실은 다음과 같다.

$$P_{con} = I_{DSrms}^2 \times R_{DS(on)} \quad (1)$$

2) 스위칭 손실

스위치의 온-오프 동작시 전이시간이 소요됨으로써 발생하는 스위칭 손실은 턴온 손실과 턴오프 손실의 합과 같다. 스위칭 손실은 턴온 시간 t_{on} 과 턴오프 시간 t_{off} 에 의해 결정되며 RC 스너버 회로를 설치하지 않았을 때의 스위칭 손실은 식 (2)와 같다^[2].

$$P_{sw} = 1/2 \times V_{DS} \times I_{DS} \times (t_{on} + t_{off}) \times f \quad (2)$$

여기서 V_{DS} 는 드레인-소스 전압이며 f 는 스위칭 주파수이다. 스위칭에 소요되는 시간 t_{on} 및 t_{off} 는 식 (3)으로부터 구한다.

$$\begin{aligned} t_{on} &= -T_g \times \ln(1 - I_{DS}/g(V_{drive} - V_{th})) + V_{DS} \times (R_G C_{GD} / (V_{drive} - V_{th} + I_{DS}/g)) \\ t_{off} &= V_{DS} \times C_{GD} \times R_G / (V_{th} + I_{DS}/g) + T_g \times \ln((I_{DS}/g + V_{th}) / V_{th}) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 T_g 는 게이트단의 시정수로서 게이트 저항 R_G 와 게이트 커패시턴스 C_G 의 곱과 같다. 또한 V_{drive} 는 게이트의 구동전압이고 V_{th} 는 게이트 문턱전압, C_{GD} 는 게이트-드레인 커패시턴스, g 는 상호컨덕턴스이다.

RC 스너버회로를 설치하면 스너버회로는 턴오프 손실을 저감시킨다. 따라서 스위치에서 발생하는 턴오프 손실은 식 (4)와 같다^[3,4]. t_{ij} 는 전류의 하강시간이며 C_n 은 스너버 커패시터이다.

$$P_{sw,off} = I_{DS}^2 \times t_{ij} \times f / (24C_n) \quad (4)$$

3) 기생커패시터 손실

MOSFET의 드레인-소스 커패시터인 C_{DS} 에 의해 발생하는 손실은 다음과 같다^[2].

$$P_{CDS} = 1/2 \times C_{DS} \times V_{DS}^2 \times f \quad (5)$$

4) 게이트 드라이브 손실

게이트 전하량 Q_G 에 의해 발생하는 손실로서 매 스위칭 동작시 기생커패시터의 충전방전에 의해 발생되며 식 (6)과 같다^[2].

$$P_{drive} = V_{drive} \times Q_G \times f \quad (6)$$

2.2.2 자성소자 손실

변압기 및 인덕터와 같은 자성소자의 손실은 동손과 철손으로 구분된다.

1) 동손

권선에 흐르는 전류 I_{cu} 에 의해 도체의 직류저항 R_{cu} 에서 발생하는 동손은 식 (7)과 같다^[5].

$$P_{cu} = I_{cu}^2 \times R_{cu} \quad (7)$$

2) 철손

철손은 코어의 재질에 따라 각각 다른 특성식으로 주어지며 자속밀도 B 와 f 에 비례한다. 철손은 식 (8)과 같다^[5].

$$P_{fe} = K_{fe} \times B^n \times f^m \times vol \quad (8)$$

여기서 K_{fe} 는 비례상수이고 n , m 은 특성계수이며 vol 은 코어의 부피를 의미한다.

2.2.3 기타 손실

출력커패시터 및 다이오드에서의 손실과 RC 스너버회로의 저항에서 발생하는 기타 손실은 다음과 같다.

1) 출력커패시터 손실

커패시터의 손실은 내부 등가직렬저항 ESR_c 에 의해 발생하며 식 (9)와 같다.

$$P_c = I_{rms}^2 \times ESR_c \quad (9)$$

2) 다이오드 손실

다이오드의 순방향 전압강하 V_F 와 다이오드 전류 I_D 에 의한 손실은 식 (10)과 같다.

$$P_D = V_F \times I_D \quad (10)$$

3) 스너버 손실

RC 스너버회로를 설치하였을 때 스너버 저항에서 발생하는 손실 P_{Rn} 은 식 (11)과 같다^[3,4].

$$P_{Rn} = C_n \times V_c^2 \times f \quad (11)$$

여기서 C_n 은 RC 스너버 회로에 있는 커패시터의 값이며 V_c 는 커패시터의 양단전압이다.

3. 효율 시뮬레이션

3.1 효율 산정

손실 해석을 바탕으로 15[W]급 리튬전지 충전용 직류-직류 변환기의 효율 시뮬레이션을 수행한다. 변압기의 코어는 EI28로서 PC40 재질을 사용하며 인덕터는 MPP C055345를 사용한다. 또한 D_3 는 UF4007을 사용한다. 시뮬레이션에 사용한 파라미터는 표 1과 같다. 이때, C_n , R_n 은 MOSFET 각각의 RC 스너버회로의 값이다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters

V_s	311[V]	V_B	5[V]	f	100[kHz]
$N_1 (=N_3)/N_2$	16.25	L	600[μH]	C_s	22[μF]
C	1,000[μF]	C_1	0.1[nF]	C_2	2.2[nF]
C_4	4.7[nF]	R_1	47[Ω]	R_2, R_4	10[Ω]

표 2는 사용한 MOSFET의 특성값이며 표 3은 효율 시뮬레이션 결과이다.

표 2 MOSFET의 사양
Table 2 Specifications of MOSFET

Parts	Model	V_{DS}	I_{DS}	$R_{DS(on)}$	Q_g	Q_{gs}	C_{oss}	C_{rss}
Q_1	SPA02N80C3	800[V]	2[A]	2.4[Ω]	12[nC]	1.5[nC]	13[pF]	3.2[pF]
Q_2, Q_4	FDP8447L	40[V]	50[A]	7.7[mΩ]	19[nC]	4.7[nC]	245[pF]	190[pF]

표 3 효율 시뮬레이션 결과
Table 3 Efficiency simulation results

구분	충전시			방전시				
	소자	손실[W]	비율[%]	소자	손실[W]	비율[%]		
스위칭 소자 손실	도통손실	0.0214	0.31	Q_2	0.0512	2.16		
	스위칭 손실	0.0140	0.20		0.0050	0.21		
	기생커패시터	0.1577	2.27		0.0014	0.06		
	게이트 드라이브	0.0120	0.17		0.0350	1.48		
	도통손실	0.0181	0.26	Q_4	0.0181	0.76		
	스위칭 손실	0	0		0.0050	0.21		
	기생커패시터	0.0057	0.08		0.0014	0.06		
게이트 드라이브	0.0350	0.50	0.0350		1.47			
소계	0.2639	3.80		0.1521	6.41			
자성소자 손실	동손	0.0320	0.46	T_r	0.00003	0.001		
	철손	1.1023	15.89		1.1023	46.45		
	동손	0.3622	5.22	L	0.3622	15.26		
	철손	0.2718	3.92		0.2718	11.46		
	소계	1.7683	25.49		1.7363	73.18		
기타 손실	출력커패시터 손실	C	0.0001	0.001	C_c	0.0497	2.09	
	다이오드 손실	D_2	1.2854	18.53	D_1	0.1546	6.52	
		D_3	0.0256	0.37		D_3	0.0273	1.15
		D_4	0.0032	0.05				
	스너버 손실	$P_{R,R4}$	3.5902	51.76	$P_{R,R4}$	0.2528	10.65	
	소계	4.9045	70.711		0.4844	20.41		
총 손실	6.9367	100		2.3728	100			
효율		68.38[%]		86.34[%]				

3.2 결과 검토

변환기의 효율은 충전시 68.38[%], 방전시 86.34[%]이다. 충전시 스위칭 소자의 손실은 3.80[%], 자성소자 손실은 25.49[%], 기타 손실은 70.71[%]로서 기타 손실이 가장 많이 발생함을 알 수 있다. 또한 방전시 스위칭 소자의 손실은 6.41[%], 자성소자 손실은 73.18[%], 기타 손실은 20.41[%]로서 자성소자에 의한 손실이 가장 큼을 알 수 있다. 이는 충전방전시 동작 특성에 적합한 스위칭 소자의 선정에 따른 결과이다. 충전시는 고전압, 저전류로 동작하는 변환기로서 고전압에 의한 영향을 고려하여 MOSFET의 기생커패시턴스 값이 작은 소자를 사용함으로써 스위칭 손실, 기생커패시터 손실, 게이트 드라이브 손실을 저감하였다. 방전시는 저전압, 대전류로 동작하는 변환기로서 대전류에 의한 영향을 고려하여 $R_{DS(on)}$ 이 7.7[mΩ]으로 매우 작은 소자를 사용하여 도통손실을 줄였다. 여기서 스위칭 소자의 손실은 RC 스너버회로에 의한 영향을 고려하여 산정하였다.

4. 결론

본 논문에서는 리튬전지 충전용 직류-직류 변환기의 효율에 관하여 연구하였다. 스위칭 소자, 자성소자 및 기타 소자에서 발생하는 손실을 분석하였으며 효율 시뮬레이션을 수행하여 리튬전지 충전용 직류-직류 변환기의 효율을 산정하였다.

참고 문헌

- [1] 원화영, 채수용, 홍순찬, "상대공간평균에 의한 리튬전지 충전방전 시스템의 해석", 전력전자학회 논문지, 2009. 10.
- [2] Sanjaya Maniktala, *Switching Power Supplies A to Z*, Elsevier, 2006.
- [3] 이완윤, 정교범, "스너버 회로를 위한 TVS 소자의 활용 연구", 전력전자학회 추계학술대회 논문집, 2002.
- [4] 홍순찬, 전희중, 백형래, 원준영, *PSpice를 활용한 전력전자공학*, 인티비전, 2005.
- [5] Robert W. Erickson, *Fundamentals of Power Electronics*, Kluwer Academic Publishers, 2000.