

효율 개선점 도출을 위한 탑재형 배터리 충전기 손실 분석

김민국¹, 우동균¹, 안정훈¹, 김종수², 이병국[†]
^{1†}성균관대학교 정보통신대학, ²대진대학교 전기공학부

Loss Analysis of On-Board Battery Charger for Point Efficiency Improvement

Min Kook Kim¹, Dong Gyun Woo¹, Jung Hoon Ahn¹, Jong Soo Kim², Byoung Kuk Lee[†]
^{1†}College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University
² Department of Electrical Engineering, Daejin University

ABSTRACT

본 논문은 전기자동차용 탑재형 배터리 충전기의 효율 개선점 도출을 위해 요구되는 손실 분석 과정을 다룬다. 평균전류 모드 부스트 PFC 컨버터와 직렬공진형 DC DC 컨버터로 구성된 3.3kW급 탑재형 배터리 충전기의 각 부 손실들을 이론적으로 분석하고, 이를 PSIM Simulator의 Thermal Module을 이용한 손실 측정 결과와 비교하여 타당성을 검증한다.

1. 서론

전 지구적인 환경오염 문제 해결을 위하여 내연 기관 자동차를 대신한 전기자동차에 대한 연구개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 전기자동차는 전기 동력만으로 동작하기 때문에 차량 내 대용량 배터리가 필수적이며 배터리 충전 효율 개선은 시스템 전체 효율에 영향을 미친다.^[1]

본 논문에서는 전기 자동차 배터리 충전기의 효율 개선점 도출을 위하여 탑재형 배터리 충전기 시스템의 손실 분석을 수행하였다. 이를 위하여 탑재형 배터리 충전기의 전력 반도체 소자 및 수동 소자의 손실 계산을 위한 수식을 전개하고, 이를 PSIM Thermal Module을 이용한 손실 결과 값과 비교하였다.

2. 탑재형 배터리 충전기 구성

전기 자동차용 배터리 충전기의 1st stage는 다이오드 정류 회로와 역률 보정을 위한 Boost PFC 컨버터 회로로 구성되어 있다. 2nd stage는 ZVS 동작이 가능한 부하 직렬 공진형 컨버터 (Series Loaded Resonant DC DC Converter, SRC)와 고주파 스위칭 트랜스포머 (HFTR)와 다이오드 정류회로로 구성되어 있다. 탑재형 배터리 충전기의 회로도에는 그림 1과 같다.

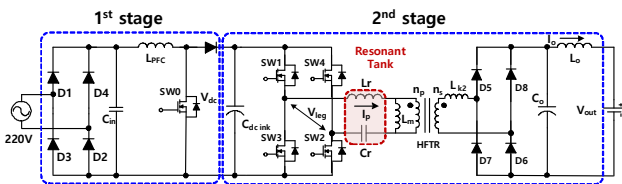


그림 1 탑재형 배터리 충전기 회로도.
 Fig. 1. Schematic diagram of on-board battery charger.

표 1 탑재형 배터리 충전기 시스템 파라미터

Table 1 System parameters of on-board battery charger

Parameter	Value	Parameter	Value
V _{in}	220[V _{ac}]	L _{PFC}	280[uH]
V _{out}	400[V]	L _r	75[uH]
V _{dclink}	380[V]	C _r	66[nF]
P _{out}	3.3[kW]	n _p :n _s	19:26

3. 탑재형 배터리 충전기 손실 분석

본 절에서는 전력 반도체 소자 및 수동 소자들의 손실 계산 방법을 이론적으로 전개하고, 수식에 파라미터 값을 대입하여 손실 값을 계산한다. 그리고 그 결과 값을 PSIM Thermal Module로부터 도출된 손실 값과 비교한다. 표 1은 탑재형 배터리 충전기 시스템의 파라미터를 나타낸다.

3.1. 1st stage 손실 분석

3.1.1. 다이오드 정류 회로

다이오드(Shindengen社, LL25XB60)의 도통 손실과 역회복 손실을 구하기 위한 수식은 식(1), (2)와 같다^[2].

$$P_{Diode,cond} = V_F \times I_{F,avg} + R_d \times I_{F,rms}^2 \quad (1)$$

$$P_{Diode,rev} = \frac{V_R \times I_{RRM} \times t_B}{6} \times f_{sw} \quad (2)$$

V_F는 순방향 전압 강하, I_F는 순방향 전류, R_d는 다이오드 등가 저항, I_{RRM}은 최대 역회복 전류, t_B는 다이오드 양단의 전압이 V_F에서 최대 역회복 전압에 도달하는 데에 걸리는 시간을 의미한다. 다이오드 정류 회로의 손실은 아래 식과 같이 구할 수 있다. 다이오드 정류회로는 다이오드 4개로 구성되어 있으므로 계산한 손실분에 다이오드의 숫자를 곱해 주었다.

$$P_{Diode,cond} = [(0.89 \times 6.75) + (9.333 \times 10^{-3} \times 10.933^2)] \times 4 = 28.49 [W]$$

3.1.2. Boost PFC 컨버터

인덕터 (창성社, CH358060) 손실을 구하기 위한 식은 (3)과 같고, 파라미터 값들을 대입하여 손실을 계산하였다.

$$P_L = P_{L,core} + P_{L,copper} = k_1 \times B^{k_2} \times f_{sw}^{k_3} \times V_L + R_{dc} \times I_{L,rms}^2 \quad (3)$$

$$= [(1.46 \times (\frac{2.7377}{2})^{2.27} \times 40^{1.32} \times 6.0884/1000) + (0.004149 \times 15^2)] \times 2 = 6.59 [W]$$

k_1, k_2, k_3 은 연산을 위한 계수이며, 제조사에서 제공한다. B 는 $\Delta B/2[kGauss]$, $V_L[cm^3]$ 은 코어의 부피, $R_{dc}[cm]$ 은 권선 전체 길이의 등가 저항을 의미한다. MOSFET (IXYS社, IXFL82N60P) 손실을 구하기 위한 식은 식 (4)와 같다^[3].

$$\begin{aligned}
 P_{MOSFET} &= P_{cond} + P_{SW} + P_{C_{oss}} \quad (4) \\
 &= (R_{DS(on)} \times I_{SW(rms)}^2) + [(V_{DD} \times I_{SW(on)} \times \frac{tri+tfv}{2} \\
 &\quad + Q_{rr} \times V_{DD} + V_{DD} \times I_{SW(off)} \times \frac{trv+tfi}{2} \\
 &\quad + \frac{Q_{rr} \times V_{DD}}{4} + (\frac{C_{oss} \times V_{in}^2}{2})] \times f_{sw} \\
 &= (78 \times 10^{-3}) \times 8.28^2 + [(380 \times 20.6 \times \frac{51 \times 10^{-9}}{2} \\
 &\quad + (380 \times 25 \times \frac{8 \times 10^{-9}}{2}) + (0.6 \times 10^{-6} \times 1.5) \\
 &\quad + (\frac{1.49 \times 10^{-9} \times 380^2}{2} \times 23 \times 10^{-9})] \times 40000 = 42.04 [W]
 \end{aligned}$$

V_{DD} 는 MOSFET 양단 전압, I_{SW} 는 MOSFET 전류, $tri/trv, tfi/tfv$ 는 전압, 전류의 상승 및 하강 시간, Q_{rr} 는 역회복 전하, V_{D_r} 은 역회복시 다이오드 양단 전압, C_{oss} 는 출력 커패시턴스를 나타낸다. 다이오드 (IXYS社, DSEI30 06A)의 발생 손실은 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{Diode} &= (1.3 \times 8.68) + (13.73 \times 10^{-3} \times 12.5^2) \\
 &\quad + \frac{380 \times 14 \times 52.5 \times 10^{-9}}{6} \times 40000 = 14.98 [W]
 \end{aligned}$$

3.2. 2nd stage 손실 분석

3.2.1. 풀브리지 인버터

풀브리지 인버터의 MOSFET (Infineon社, SPW47N60C3) 손실은 식 (4)를 이용하여 구할 수 있다. 이 때 풀브리지 인버터는 ZVS 동작하므로 턴온 스위칭 손실은 없다고 가정한다.

$$\begin{aligned}
 P_{MOSFET} &= (0.07 \times 8.68^2) \times 4 + [(380 \times 8.68 \times \frac{8 \times 10^{-9}}{2}) \\
 &\quad + (\frac{2200 \times 10^{-12} \times 380^2}{2} \times 27 \times 10^{-9})] \\
 &\quad \times 87800 \times 4 + 0.469 \times 0.8 \times 4 = 27.3 [W]
 \end{aligned}$$

3.2.2. 공진 탱크

공진 인덕터 (TODAISU社, PM 7) 손실은 식 (5)을 이용하여 구할 수 있다.

$$P_{L_r} = P_{L_r,core} + P_{L_r,copper} = 2.968 + 0.023 \times 12.52^2 = 6.66 [W] \quad (5)$$

코어 손실은 연산을 통해 구한 ΔB 값을 제조사에서 제공하는 $\Delta B - P_{core}$ 그래프에 적용하여 구하였다. 공진 커패시터 (WIMA社, FKP 4) 손실을 구하기 위한 식은 식 (6)와 같다.

$$P_c = ESR \times I_{C,rms}^2 = 0.549 \times (\frac{17.72}{20\sqrt{2}})^2 \times 20 = 4.31 [W] \quad (6)$$

여기서 ESR은 커패시터의 등가 저항을 나타내며, 커패시터를 병렬로 20개 연결하였기에 커패시터의 숫자를 곱해주었다.

3.2.3. 다이오드 정류회로

2nd stage 2차 측의 다이오드 (IXYS社, DSEI60 06A) 정류회로의 손실은 식 (1)과 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{Diode} &= (1.3 \times 4.125) \times 4 \\
 &\quad + \frac{400 \times 14 \times 50 \times 10^{-9}}{6} \times 87800 \times 4 = 37.84 [W]
 \end{aligned}$$

표 2 손실 계산 이론 수치와 Thermal Module 값과의 비교

Table 2 Comparison of theoretical loss and calculated loss by PSIM Thermal Module

stage	Component	Theoretical Loss [W]	Thermal Module[W]
1 st	Bridge Diode	28.49	28.15
	MOSFET	42.03	27.70
	Diode	14.98	13.31
	Inductor	6.59	
2 nd	MOSFET	27.3	27.3
	Diode	37.84	23.6
	Inductor	6.66	
	Capacitor	4.31	

3.3. PSIM Thermal Module

PSIM Simulator를 이용하여 탑재형 배터리 충전기의 1st stage와 2nd stage를 각각 구성하고, 다이오드와 MOSFET의 손실 분석 결과를 살펴보았다. Boost PFC 인덕터 손실은 자체적으로 제작한 블록을 이용하였으며, 커패시터 손실은 수식적으로 계산하였다. PSIM의 Thermal Module은 Diode의 경우에는 스위칭 손실이, MOSFET의 경우에는 역회복 특성과 Coss로 인한 손실이 반영되지 않아 다소 오차가 발생함을 감안하였을 때 이론에 기반한 손실 추정이 타당함을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 전기자동차용 탑재형 배터리 충전기의 손실 분석을 수행하였다. 이를 위하여 다이오드, MOSFET, 인덕터, 커패시터 손실 계산을 위한 수식들을 이용하여 직접 손실 계산한 수치와 PSIM Simulator의 Thermal Module로부터 도출된 손실 수치를 비교하였다.

1st stage의 경우, 기존 Boost PFC 방식이 아닌, Bridgeless, Semi Bridgeless PFC 방식을 사용하면 다이오드 도통 손실을 줄일 수 있어 효율 개선이 가능하고, 2nd stage의 경우에는 DC DC 컨버터 2차 측 정류회로 부분에 center tapped 방식이나 동기정류 방식을 적용하면 도통 손실 및 역회복 손실이 줄어들어 효율 개선이 가능하다.

이 논문은 지식경제부 지원 하에 수행된 산업원천 기술 개발사업 (No. 10035276)의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] 김중수, "전기자동차용 탑재형 충전기의 공진 Network 최적 설계에 관한 연구", 성균관대학교 박사학위논문, 2011
- [2] STMicroelectronics, "Calculation of conduction losses in a power rectifier", AN604 Application note, 2011
- [3] Dusan Graovac, Marco Purschel, Andreas Kiep, "MOSFET Power Losses Calculation Using the Data Sheet Parameters", Infineon Application Note, 2006.7