

모터 인덕턴스를 이용한 PHEV용 배터리 충전기법 손실분석

성원용, 우동균, 김윤성, 이병국
성균관대학교 정보통신공학부

Loss Analysis of Battery Charging Strategies for PHEVs using Motor Inductance

Won Yong Sung, Dong Gyun Woo, Yun Sung Kim, Byoung Kuk Lee
School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 플러그인 하이브리드 자동차(Plug in Hybrid Electric Vehicles, PHEVs)에 모터 인덕턴스를 이용한 배터리 충전 기법을 적용하는 경우, 발생하는 손실을 PHEV의 실제 소자 파라미터를 고려하여 수식적으로 분석한다.

1. 서론

최근 환경문제가 대두되고 화석연료가 고갈되어감에 따라 세계 주요 국가들은 EV, PHEV를 중심으로 친환경 차량의 보급을 활성화시키기 위한 다양한 정책을 펴고 있다. 이러한 전기자동차의 핵심 기술은 배터리를 충전하기 위한 고효율 충전 기술이기 때문에 배터리의 고효율 충전기법에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다.

차량 탑재형 배터리 충전기는 고효율 전력변환이 가능하지만 차량에 실장하기 위한 공간 확보가 필요하고 그에 따른 중량의 증가와 추가 비용이 발생한다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 모터 인덕턴스와 모터구동용 인버터를 역방향으로 활용하는 PFC Boost 컨버터와 양방향 DC DC컨버터를 활용하여 배터리를 충전하는 기법이 제안되었다[1].

본 논문에서는 차량 탑재형 배터리 충전기에 비해 효율이 낮을 것으로 예상되는 모터 인덕턴스를 이용한 충전기의 손실을 실제 시스템 용량과 유사한 소자의 데이터 시트에 기반을 두고 수식적으로 분석한다.

2. 배터리 충전기법의 손실 분석

2.1 충전기법 소개

2.1.1 모터 인덕턴스를 이용한 충전기

그림 1은 두 개의 인버터들이 역방향으로 AC DC 컨버터로 사용되고, 두 개의 3상 모터들은 인덕터로 사용된다. 두 인버터의 윗단 스위치들은 오프상태를 유지하고 인버터의 아랫단 스위치들은 동일한 PWM 신호를 인가하는 제로 벡터 제어 방식을 사용하기 때문에 3상 권선들에 동일한 크기의 영상 전류가 발생된다. 또한 모터 구동 시, Boost 컨버터로 동작하던 양방향 DC DC 컨버터가 충전모드에서는 Buck 컨버터로 동작한다[2].

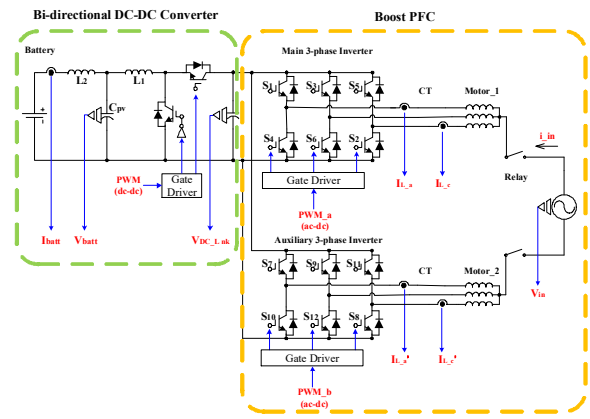


그림 1 다기능 인버터를 이용한 배터리 충전기

Fig. 1 The Integrated battery charger using multi function Inverter

2.2 손실 계산

2.2.1 스위치 손실

모터 인덕턴스를 이용한 PFC Boost 컨버터에 사용되는 스위칭 소자는 IGBT이다. IGBT의 손실은 크게 스위칭 손실(P_{sw})과 도통 손실(P_{con}) 및 차단 손실(P_b)로 나눌 수 있다. 스위칭 손실(P_{sw})은 스위치의 온, 오프시에 Collector와 Emitter간의 전압과 전류의 크기에 의해 발생하는 손실이며, 스위칭 주파수에 비례하여 손실이 증가한다. 스위칭 손실은 식 (1)과 같다. 도통 손실 (P_{con})은 스위치가 온 되었을 때 IGBT 온 상태의 영전류, Collector emitter간 전압강하와 온 상태 저항(r_c)에 의해 발생하는 전력이다. 도통 손실은 식 (2)와 같다. 차단 손실(P_b)은 매우 작기 때문에 일반적으로 고려하지 않는다. 따라서 전체 손실은 식 (3)과 같다.

$$P_{sw} = (E_{on} + E_{off}) \cdot f_{sw} \quad (1)$$

$$P_{con} = (v_{CE0} \cdot I_{c,avg} + r_c \cdot I_{c,rms}^2) \cdot D_{on} \quad (2)$$

$$P_{IGBT} = P_{sw} + P_{con} + P_b \approx P_{sw} + P_{con} \quad (3)$$

2.2.2 다이오드 손실

다이오드 손실은 스위치 손실과 마찬가지로 스위칭 손실($P_{sw,D}$)과 도통 손실($P_{con,D}$)로 구분된다. 다이오드의 스위

칭 손실($P_{sw,D}$)은 다이오드 오프시의 역회복 전류에 의해 발생되며 스위칭 주파수에 비례하여 손실이 증가한다. 스위칭 손실은 식 (4)와 같다. 다이오드의 도통 손실($P_{con,D}$)은 스위치와 마찬가지로 온 상태 전압 강하와 온 상태 저항(r_D)에 의해 발생되며 식 (5)와 같다. 전체 손실은 식 (6)과 같다.

$$P_{sw,D} = E_{rr} \cdot f_{sw} \quad (4)$$

$$P_{con,D} = (v_{D0} \cdot I_{D,avg} + r_D \cdot I_{D,s}^2) \cdot D_{on,D} \quad (5)$$

$$P_{Diode} = P_{sw,D} + P_{con,D} \quad (6)$$

2.2.3 인덕터 손실

인덕터의 동손은 권선의 길이와 단면적 등을 이용하여 구할 수 있지만, 모터의 동손은 모터의 등가저항을 측정하여 구할 수 있다. 본 논문에서는 실제 모터의 등가저항을 측정하여 동손을 구한다. 인덕터와 모터의 동손은 식 (7)과 같이 구한다. 인덕터의 철손은 전류변화량, 인덕턴스, 턴수 및 코어의 단면적에 의해 결정되는 코어 내부에서의 자기장의 변화에 의해 발생한다. 이러한 관계를 이용하여 인덕터의 손실을 그림 2에 나타내었다. 하지만 모터의 철손은 모터의 전체손실을 측정하여 등가저항에 의한 동손을 빼는 방법으로밖에 구할 수가 없기 때문에 고려하지 않는다[3].

$$P_c = RI^2 \quad (7)$$

2.2.4 DC-link 커패시터 손실

리플 전류에 의한 커패시터 내부의 온도 상승을 유발하는 전력 손실은 리플 전류의 실효값과 커패시터 내부의 등가직렬 저항(ESR)에 의해 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{DC-link} = I_{r,rms}^2 \cdot ESR \quad (8)$$

여기서 $I_{r,rms}$ 는 리플 전류 AC성분의 실효값이다. 하지만 DC link 커패시터에 의한 손실은 1W 미만으로 매우 작기 때문에 고려하지 않는다.

2.2.5 시스템 사양

표 1은 모터 인덕턴스를 이용한 PFC Boost 컨버터와 양방향 DC DC컨버터의 전체적인 사양으로써, 손실계산에 사용된 소자이다.

표 1 모터 인덕턴스를 이용한 충전기의 사양
Table 1 Specification of Charger using motor inductance

Parameter	모터 인덕턴스를 이용한 PFC Boost	양방향 DC DC 컨버터
정격 용량	3.3[kW]	3.3[kW]
입력 전압	220[V _{rms}]	400[V]
출력 전압	400[V]	150[V]
스위칭 주파수	20[kHz]	20[kHz]
스위치	Mitsubishi PM300CL1A060	Mitsubishi CM300DX 12A

2.3 손실 분석

표 1을 참고하여 모터 인덕턴스를 이용한 배터리 충전기의 손실을 계산한 결과는 그림 2와 같다.

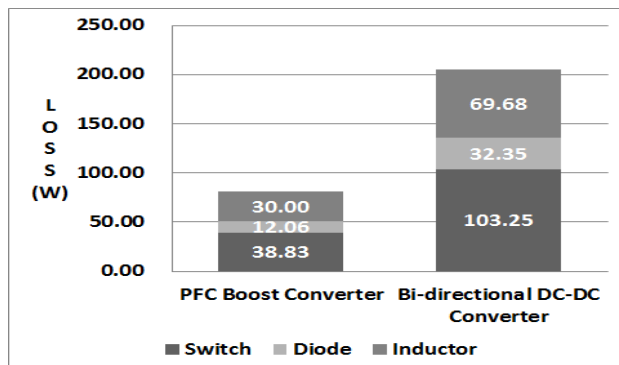


그림 2 모터 인덕턴스를 이용한 배터리 충전기의 손실
Fig. 2 Losses of Battery Charger using Motor Inductance

모터 인덕턴스를 이용한 배터리 충전기의 전체 손실은 286.16W, 전체 효율은 91.3%로 분석되었다. PFC Boost 컨버터의 손실을 기존의 차량 탑재형 배터리 충전기의 PFC Boost 컨버터의 손실과 비교했을 때 3상으로 구동하여 도통되는 전류의 크기가 작기 때문에 스위치 손실과 다이오드 손실은 더 작지만 모터 내부의 인덕턴스는 배터리의 충전을 위한 Boost 인덕터 보다는 모터를 구동하는데 최적화되어 설계되므로 PFC Boost로 구동할 경우에 큰 동손으로 인해 PFC Boost 전체의 손실은 일반적인 탑재형 충전기의 손실보다 낮을 것으로 예상된다. 하지만 Buck 컨버터로 동작하는 양방향 DC DC 컨버터의 스위칭 소자가 고용량의 Boost Mode에 최적화 되어 있기 때문에 손실이 일반적인 Buck 컨버터에 비해 많이 발생하고, 인덕터 또한 단상으로 동작시키기 때문에 동손과 철손이 많이 발생하여 시스템 전체의 효율이 저하되었다.

3. 결론

본 논문에서는 체로 벡터 제어 방식을 사용하는 모터 인덕턴스를 이용한 배터리 충전기의 손실을 스위치 손실, 다이오드 손실, 모터 인덕턴스 손실, DC link 커패시터 손실로 구분하고, 실제 소자의 데이터 시트를 기반을 두어 분석하였다. 그 결과 PFC Boost에서 80.89W의 손실이 발생하고, 양방향 DC DC컨버터에서 286.16W의 손실이 발생하여 전체 효율은 91.3%로 분석되었다.

참고 문헌

- [1] L. Tang and G. J. Su, "A low cost, digitally controlled charger for plug in hybrid electric vehicles," *IEEE ECCE, Conf.*, pp. 3923-3929, Sept. 2009.
- [2] 우동균, 최규영, 김종수, 이병국, 강구배, "인버터 및 모터 인덕턴스를 이용한 PHEV 배터리 충전 기법," *전력전자학회 학술대회논문집*, pp. 335-336, 2010.
- [3] 강현수, "영구자석 전동기의 속도 제어를 위한 전압 가변형 인버터 시스템", *성균관대학교 박사학위 논문*, 2008.