

인버터 및 모터 인덕턴스를 이용한 PHEV 배터리 충전 기법

우동균*, 최규영*, 김종수*, 이병국*, 강구배**
 성균관대학교*, 현대기아자동차**

Battery Charging Strategies for PHEVs using Motor Inductance and Multi-Function Inverter

Dong-Gyun Woo*, Gyu-Yeong Choe*, Jong-Soo Kim*, Byoung-Kuk Lee*, Gu-Bae Kang**
 SungKyunKwan University*, HYUNDAI·KIA MOTORS**

ABSTRACT

본 논문에서는 Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs)의 배터리 충전을 위해 필요한 추가적인 충전기 없이, 구동모터의 인덕턴스와 구동 드라이버인 3상 인버터를 이용하는 배터리 충전 기법을 소개한다. 모터의 인덕턴스를 승압용 에너지 저장장치로 사용하고 인버터의 스위칭 제어를 통해 부스트 컨버터로 사용하여 별도의 충전기를 제거함으로써 충전장치의 크기 및 단가를 저감할 수 있다. 상세한 유형별 이론적 분석과 시뮬레이션 결과를 제시하여 제안된 충전기법의 타당성을 검증한다.

1. 서 론

Hybrid Electric Vehicles (HEVs)는 연비 개선에 크게 기여하였지만, 낮은 배터리 용량으로 인한 극히 낮은 All Electric Range (AER)의 단점을 가지고 있다. 이러한 HEVs의 단점을 보완하기 위해 더 높은 배터리 용량을 가지는 PHEVs가 개발되어 왔다. HEVs가 회생에너지만 사용하여 배터리를 충전하는 것과 달리, PHEVs는 높은 배터리 용량 때문에 추가적인 배터리 충전기가 필요하다.

수 년 동안 차량 탑재형 배터리 충전기가 개발되어 왔지만, 충전기를 차량에 실장하기 위한 공간 확보와 그로 인한 무게의 증가를 피할 수가 없었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 충전기법들이 제안되어 왔다. 모터의 중성점을 기계적 스위치를 거쳐 정류기로 연결하고, 구동모터용 인버터를 역방향으로 동작시켜 배터리 충전 및 역률보상을 위한 Boost Power Factor Correction (PFC)로 사용하는 방법이 제안되었다^[1-2]. 3상 모터를 두 개 사용하는 구조에서 두 모터의 중성점을 연결하는 방법도 연구되어 왔다^[3].

본 논문에서는 종래에 제안된 모터 인덕턴스와 인버터를 이용한 배터리 충전 방법들을 비교 분석하고, 불연속모드 (DCM)에서의 높은 전류 침투값으로 인해 발생하는 손실을 줄이기 위해 연속모드로 동작하는 최소의 모터 인덕턴스 값을 이론적으로 분석하였다. 각 유형별 분석과 시뮬레이션 결과 파형을 바탕으로 하여 각각의 장단점을 제시하였다.

2. 배터리 충전 기법 비교 분석

2.1 유형별 배터리 충전기의 구조

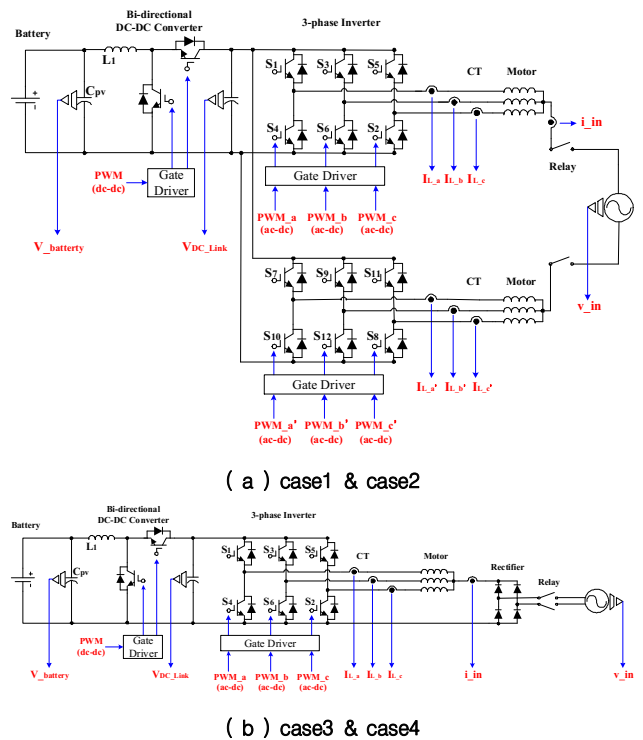


그림 1 다기능 인버터를 이용한 배터리 충전기의 시스템 구조도
 Fig. 1 System configurations of the battery charger using multi-function inverter

그림 1(a)에서는 두 개의 인버터들이 ac-dc 컨버터로 사용되고, 두 개의 3상 모터들은 인덕터로 사용된다. 그림 1(b)는 단 하나의 모터와 인버터로 구성된다. 제어측면에서 살펴보면, 그림 1과 그림 2 모두 공통적으로 인버터들의 위단 스위치들은 Off 상태로 유지시키고 인버터들의 아랫단 스위치들만 사용한다. 이 때 아랫단 스위치들로 전달되는 제어 신호를 발생시키는 방식의 차이에 따라 네 가지 유형으로 구분할 수 있다. Case1과 case3는 제로 벡터 제어 방식을 사용하여 각 인버터 세 폴의 제어신호가 모두 같고, 따라서 3상 권선들에 동일한 양의 영상 전류가 발생된다. Case2와 case4는 인터리빙 제어 방식을 사용하여 각 폴에 위상이 120°씩 차이나는 제어신호를 발생시킨다. 특히 case2의 경우, 입력전압의 제로 크로싱 지점을 감지하기위해 Phase Locked Loop (PLL) 제어가 필요하다.

2.2 인덕턴스 설계

표 1 다기능 인버터를 사용한 배터리 충전기의 설계 사양
Table 1 Specification of the battery charger using multi-function inverter

입력 전력	3.3 [kW]
입력 전압 (RMS)	220 [V]
3상 인버터의 최대 용량	39 [kW]
스위칭 주파수	20 [kHz]
DC링크 전압	400 [V]
DC링크 커패시터	1110 [μ F]
DC-DC 컨버터의 최대 용량	24 [kW]
배터리 공칭 전압	150 [V]

DCM에서의 전류 첨두치가 연속모드 (CCM)의 경우보다 더 크므로, 모터 내의 권선에서 발생하는 손실을 줄이기 위해 모터 내의 코일들을 통과하는 전류가 CCM으로 제어되도록 한다. Case3과 case4에서 CCM으로 동작시키기 위한 모터 인덕턴스의 최소값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{pk} = \frac{\sqrt{2} \times P_{in}}{V_m} = \frac{\sqrt{2} \times 3300}{220} = 21.2[A] \quad (1)$$

I_{pk} 는 입력전류 기본과 성분의 첨두치이다.

I_{pk} 는 모터 내 세 개 코일들에 같은 크기로 나뉘어져 흐르므로, 모터 내 한 개의 코일에 흐르는 I_{pk} 는 7.071A이다.

$$L_{min} = \frac{\sqrt{2} \times V_m \times D}{f_{sw} \times \Delta I} = \frac{\sqrt{2} \times 220 \times 0.2225}{20 \times 10^3 \times 14.142} = 244.7[\mu H] \quad (2)$$

L_{min} 은 모터 내 한 개 코일의 최소 인덕턴스 값이고, D 는 3상 인버터의 듀티 비이다. f_{sw} 는 3상 인버터의 스위칭 주파수이고, ΔI 는 연속모드로 동작시키기 위한 모터 내 한 코일을 통해 흐르는 전류의 최대 리플 크기이다.

Case1과 case2의 경우에는 배터리 충전 시 두 개의 모터가 직렬로 연결되므로 case3과 case4에서의 L_{min} 값의 절반 크기이다.

2.3 유형별 시뮬레이션

2.2의 데이터들을 적용하여 유형별 시뮬레이션을 실행한 결과는 다음과 같다.

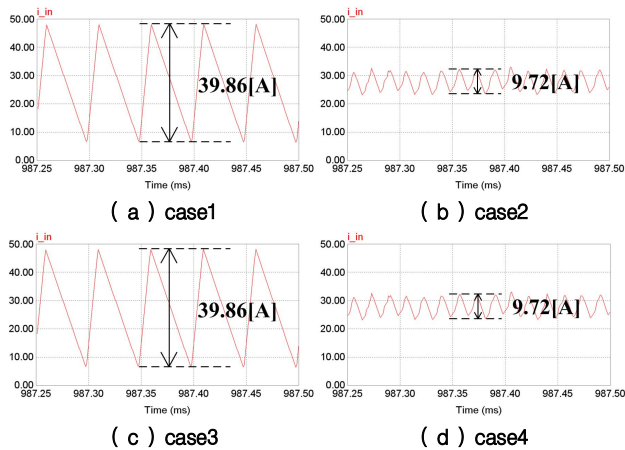


그림 2 유형별 입력전류 리플
Fig. 2 Input current ripple of four cases

Case1과 case3에 비해 case2와 case4의 입력전류 리플의 크기가 훨씬 작고 case3과 case4의 입력전류 리플이 case1과 case2에 비해 약간 더 작게 나타남을 확인할 수 있다.

표 2 유형별 특징

Table 2 Features of four cases

	case1	case2	case3	case4
제어	simple	complex	simple	simple
모터 인덕턴스	small	small	big	big
입력전류 리플	high	low	high	low
추가적인 H/W	none	none	Rectifier	Rectifier
적용 대상	PHEV	PHEV	EV / Electric Scooter	EV / Electric Scooter

표 2는 네 가지 유형들이 표 1의 사양을 만족하여 모두 같은 크기의 에너지를 출력한다는 가정 하에 비교한 결과를 나타낸 것이다.

3. 결론

본 논문에서는 기존에 제안되어 왔던 인버터와 모터 인덕턴스를 이용한 배터리 충전 방법들을 시스템 구성과 제어 방식에 따라 크게 네 가지 경우로 구분하여 비교 분석하였다. 시스템 구성에 따라 두 개의 모터와 인버터를 이용하는 충전 방법은 모터 인덕턴스가 작고 추가적인 하드웨어가 필요 없다는 장점을 가지고 있는 반면, 한 개의 모터와 인버터를 이용하는 충전 방법은 모터 인덕턴스가 크고 추가적인 정류기를 필요로 한다는 단점을 가지고 있다. 제어 방식에 따라 인터리빙 제어 방식이 제로 벡터 제어 방식보다 입력전류 리플을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 유형별 비교 분석의 결과, PHEV에 가장 적합한 충전 방법은 두 개의 모터와 인버터를 이용하고 인터리빙 제어 방식을 사용하는 case2로 고려된다.

참고 문헌

- [1] L. Solero, "Nonconventional on-board charger for electric vehicle propulsion batteries," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 144 - 149, Jan. 2001.
- [2] G. Pellegrino, E. Armando, and P. Guglielmi, "An integral battery charger with power factor correction for electric scooter," *IEEE Trans. Power electronics*, vol. 25, no. 3, pp. 751-759, Mar. 2010.
- [3] 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.