

# 인덕터 및 모터 인덕턴스를 이용한 PHEV 배터리 충전 기법 비교 분석

禹東均\*, 崔奎英\*\*, 金鍾秀\*\*, 李秉國†, 姜求培\*\*\*

## Comparison of Battery Charging Strategies for PHEVs using Propulsion Motor Inductance and Multi-Function Inverter

Dong-Gyun Woo, Gyu-Yeong Choe, Jong-Soo Kim, Byoung-Kuk Lee, and Gu-Bae Kang

### 요 약

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 기법들을 소개한다. 모터의 코일을 승압용 에너지 저장장치로 사용하고 인버터 스위치 제어를 통해 부스트 컨버터로 동작되도록 하여 추가적인 충전기를 제거함으로써, 충전장치가 차지하는 부피, 무게 및 단가를 저감할 수 있다. PHEVs의 시스템 구조와 제어기 구성에 따라 분류된 다양한 배터리 충전 기법들을 비교분석하고 시뮬레이션 결과를 통해 검증한다.

### ABSTRACT

This paper studies battery charging methods using existing motor inductance and 3-phase inverters without an additional charger to charge the battery of Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs). As inverter switch control and motor coil used as the energy storage device for boosting make the system the boost converter, the additional charger is eliminated and volume, weight, and cost for the charger are reduced. Various charging methods according to topologies of the system and configurations of the controller are analyzed and verified by PSIM simulation.

**Key Words** : Integrated battery charger, PHEVs, EVs, Multifunction inverter, Motor inductance

## 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.

차량용 배터리 충전기들은 그 구성요소인 인덕터, 커패시터, 냉각 시스템, 절연 트랜스포머 등의 부피, 무게로 인해 차량 외부에 스탠드 형태로 설치되기도 한다. 이러한 고용량, 고전력 정격의 외장형 배터리 충전기들은 급속충전이 가능하고, 실제로 약 30분이면 충전이 완료되는 급속충전기들이 이미 보급되고 있다. 하지만 일반 가정용 전원을 이용하여 편리하게 배터리

†교신저자 : 정회원, 성균관대 정보통신공학부 부교수  
E-mail : bkleeskk@skku.edu

\*학생회원, 성균관대 정보통신공학부 석사과정

\*\*정회원, 성균관대 정보통신공학부 박사과정

\*\*\*정회원, 현대자동차 하이브리드시스템시험팀 책임연구원

접수일자 : 2011. 2. 28 1차 심사 : 2011. 4. 14

심사완료 : 2011. 5. 2

를 충전하기 위해서는 차량 탑재형 배터리 충전기가 필수적으로 요구된다.

수 년 동안 차량 탑재형 배터리 충전기가 개발되어 왔지만, 충전기를 차량에 실장하기 위한 공간 확보와 그로 인한 무게의 증가는 피할 수가 없었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 모터 구동용 인버터를 이용하는 다양한 충전 기법들이 제안되어 왔다<sup>[1-6]</sup>. 2개의 AC 모터 드라이브를 사용하는 PHEVs의 경우, 두 모터를 리액터로 사용하기 위해 중성점을 연결할 수 있다<sup>[2],[3]</sup>. 이 방법에 기반하여 1개의 AC 모터 드라이브를 사용할 때에는, 모터 인덕턴스 및 인버터를 ac-dc 승압용 컨버터로 사용하기 위해 모터의 중성점을 기계적 스위치를 거쳐 다이오드 정류기에 연결한다<sup>[4]</sup>. 이러한 방식으로 배터리를 충전하는 동안 인버터 제어기는 Power Factor Correction (PFC)까지 만족시켜줄 수 있다<sup>[5]</sup>.

본 논문에서는 앞서 제안된 모터 인덕턴스와 인버터를 이용한 배터리 충전 방법들을 비교 분석하고, 불연속모드 (DCM)에서의 큰 전류 리플을 줄이기 위해 연속모드로 동작시키기 위한 최소의 모터 인덕턴스 값을 이론적으로 분석한다. 그리고 모터 인덕턴스 크기에 대한 각 유형별 시뮬레이션 결과를 바탕으로 PHEVs에 적합한 제어 방법을 제시한다.

## 2. 다기능 인버터를 이용한 배터리 충전기의 구조 및 제어 방법

HEV의 전력변환시스템 구조는 크게 그림 1(a)의 직렬형과 그림 1(b)의 병렬형으로 구분될 수 있다<sup>[8],[9]</sup>. 직렬형 HEV는 엔진출력이 실제 차축 구동력에 직접 전달되지 않고 발전기를 통하여 배터리를 충전 또는 구동모터에 전달되게 된다. 이에 따라 엔진의 운전점을 차속과 무관하게 선정할 수 있어, 보다 많은 시간 동안 엔진 효율이 좋은 영역에서 운전할 수 있는 장점

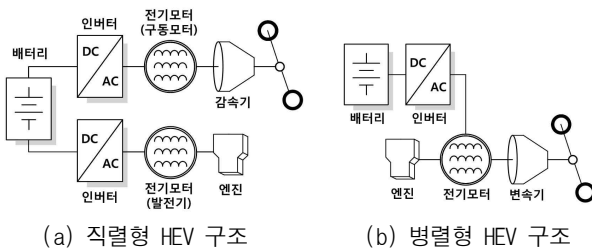


그림 1 하이브리드 전기자동차의 파워트레인  
Fig. 1 Powertrain of HEVs

표 1 다기능 인버터를 사용한 배터리 충전기의 구분  
Table 1 Classification of the battery charger using multi-function inverter

	H/W 구조	제어방식
제어기법 1	2 모터 & 2 인버터	제로백터 컨트롤
제어기법 2	2 모터 & 2 인버터	인터리빙 컨트롤
제어기법 3	1 모터 & 1 인버터	제로백터 컨트롤
제어기법 4	1 모터 & 1 인버터	인터리빙 컨트롤

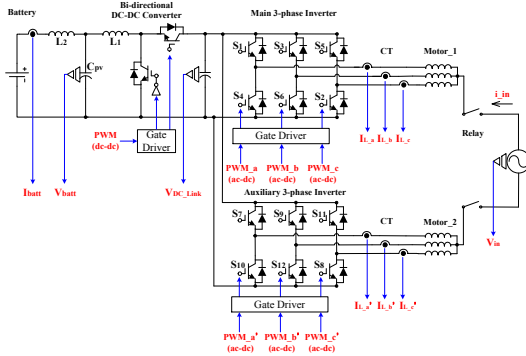
을 가진다. 자동차의 구동력은 EV와 동일하게 전기모터에 의해 공급되므로 배터리와 전기모터의 에너지, 출력 밀도에 따라 차량의 성능이 민감하게 결정된다. 따라서 병렬형 HEV 대비 대용량의 전기모터와 배터리가 요구된다. 병렬형 HEV는 엔진과 전기모터의 구동력이 합성되어 차축으로 전달되므로 전기모터의 용량이 직렬형 대비 작아질 수 있고, 이에 따라 배터리 용량 또한 작아질 수 있다. 하지만 순수 EV모드로 동작하기 위해서, 전기모터가 엔진부하를 이기고 차량 구동력을 발생시켜야 함으로 매우 비효율적인 운전모드가 된다. 즉, EV모드가 불가능한 구조이므로 PHEV로의 확대가 불가능한 구조이다. 그러므로 일반적인 PHEV의 파워트레인 구조는 직렬형 HEV 구조를 따르게 된다.

다기능 인버터와 모터 인덕턴스를 이용한 배터리 충전 방법들은 표 1과 같이, 구조적 측면에서 두 개의 모터와 인버터를 모두 사용하는 경우와 구동모터와 하나의 인버터만 사용하는 경우로 구분될 수 있고, 제어적 측면에서는 제로 백터 제어방식과 인터리빙 제어방식으로 나뉘어질 수 있다.

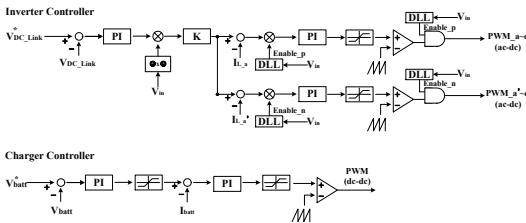
### 2.1 두 개의 인버터를 이용하는 시스템

그림 2(a)와 같이, 제어기법 1과 2는 두 개의 인버터, 두 개의 3상 모터, 양방향 dc-dc 컨버터로 구성된다. 차량 구동 모드 시, Motor\_1은 구동모터로서 차량 구동력을 보조하면서 제동에너지를 배터리로 전달하는 역할을 하고 Motor\_2는 발전기로서 엔진 시동 또는 엔진의 구동력으로 고전압 배터리를 충전하는 역할을 한다. 충전 모드 시, Motor\_1과 Motor\_2는 리액터로 작용하여 인버터와 함께 승압용 ac-dc 컨버터로 동작한다. 승압된 전압을 양방향 dc-dc 컨버터를 이용하여 배터리 공칭전압 레벨로 강압시켜준다.

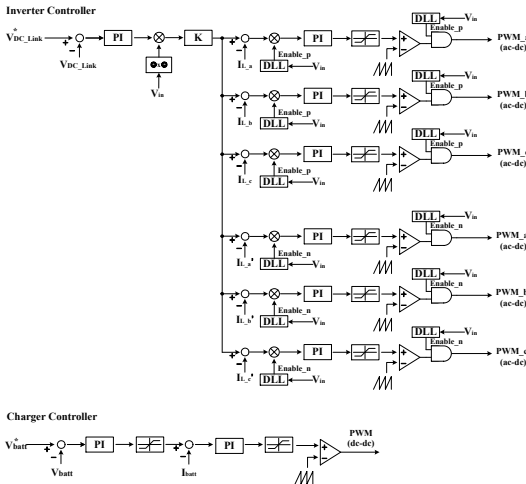
그림 2(b)와 그림 2(c)는 각각 그림 2(a) 구조의 제어블록도이다. 제어기법 1과 2 모두 공통적으로 각 인버터의 스위치들 중 윗단 스위치들(S1, S3, S5, S7,



(a) 시스템 구조도 (제어기법 1 & 제어기법 2)



(b) 제어블록도 - 제어기법 1

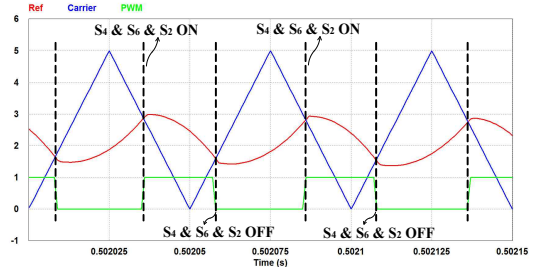


(c) 제어블록도 - 제어기법 2

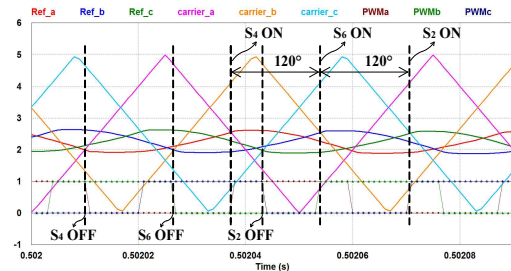
그림 2 두 개의 인버터를 이용한 배터리 충전기의 시스템 구조도와 제어블록도

Fig. 2 System configuration and control block diagram of the battery charger using two inverters

S9, S11)은 모두 Off 상태로 유지시키고 아랫단 스위치들(S2, S4, S6, S8, S10, S12)만 사용하여 전류를 제어한다. 또한 Phase Locked Loop (PLL) 제어를 통해



(a) 제로 벡터 제어방식 - 제어기법 1



(b) 인터리빙 제어방식 - 제어기법 2

그림 3 제어방식별 PWM 온/오프 신호

Fig. 3 PWM on/off signal according to switching control

입력전압의 제로 크로싱 지점을 감지하여, 입력전압의 양의 반주기 동안은 메인 인버터의 아랫단 스위치들을 제어하고, 음의 반주기 동안은 보조 인버터의 아랫단 스위치들을 제어한다.

그림 3(a)와 3(b)는 입력전압의 양의 반주기동안 S2, S4, S6 스위치들을 제어할 때, 제어방식의 차이에 따라 스위치의 온, 오프 시점이 다르게 나타남을 보여준다. 제어기법 1은 제로 벡터 제어방식을 사용하므로, 입력전압의 양의 반주기 구간에서 그림 3(a)와 같이 S2, S4, S6 스위치들의 제어신호가 동일하고, 입력전압의 음의 반주기 구간 동안은 S8, S10, S12 스위치들의 제어신호가 동일하다. 따라서 모터의 3상 권선에 크기와 위상이 동일한 영상분 전류가 흐르게 된다. 반면에 제어기법 2는 인터리빙 제어방식을 사용하여, 그림 3(b)와 같이 인버터 아랫단 스위치들에 a, b, c 상순으로 120°씩 차이 나는 제어신호가 전달된다. 그러므로 모터의 3상 권선에 흐르는 전류의 파형 또한 120°씩 이동되어 나타난다. 일반적으로 인터리빙 제어방식을 사용하게 되면 회로 구성 소자 수가 증가한다는 단점이 발생하게 되지만, 기존의 하드웨어를 그대로 사용하여 배터리를 충전하므로 문제가 되지 않는다.

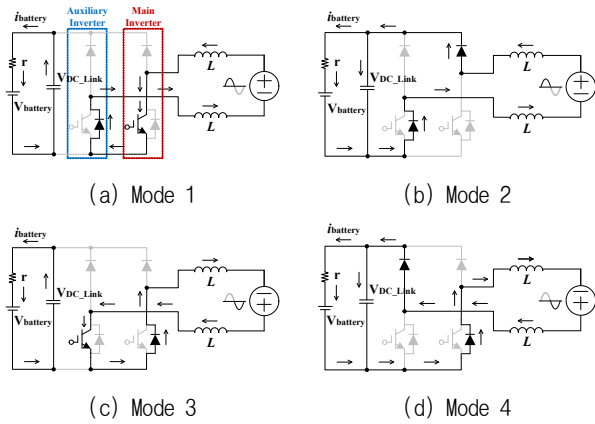


그림 4 제어기법 1의 모드별 동작  
Fig. 4 Operating modes of control method 1

그림 4는 그림 2(a)의 구조를 간략화 시킨 등가회로를 이용하여 제어기법 1의 모드별 동작을 보여준다. 제어기법 1은 제로 벡터 제어 방식을 사용하므로 인버터와 모터를 한 개의 상으로 등가화 시킬 수 있다. 각 모드별 입력전압 조건은 다음과 같다.

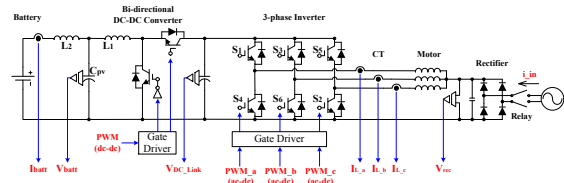
- (입력전압) > 0 : Mode 1 & Mode 2
- (입력전압) < 0 : Mode 3 & Mode 4

Mode 1과 Mode 3에서는 입력단의 에너지가 출력단으로 전달되지 않고 모터 내의 리액터에 자기에너지 형태로 축적되게 된다. 반면에 Mode 2와 Mode 4에서는 입력단의 에너지와 모터 내의 리액터에 저장되어 있던 에너지가 함께 출력단으로 전달되므로 부스트 컨버터로 동작하게 된다.

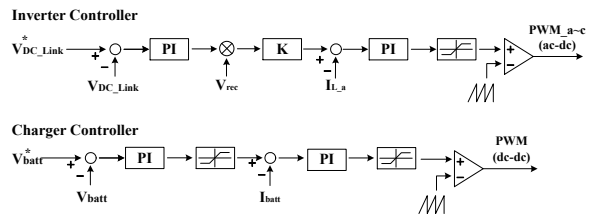
제어기법 2는 모터 내 각 상의 리액터에 에너지를 저장하고, 이를 출력단으로 전달하는 동작이 a, b, c 상순으로 120°씩 차이 나는 점 외에는 동작 원리가 제어기법 1과 동일하다.

### 2.2 한 개의 인버터를 이용하는 시스템

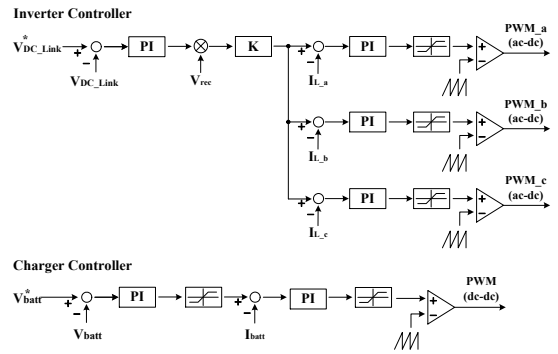
그림 5(a)와 같이, 제어기법 3과 4는 다이오드 정류기, 하나의 인버터, 하나의 3상 모터, 양방향 dc-dc 컨버터로 구성된다. 그림 1(a)의 구조에서, 충전 모드 시 두 개의 전기모터 중 구동모터만을 이용하여 충전하는 경우로써, 한 개의 전기모터만 사용하는 EV 또는 전기스쿠터에도 적용 가능하다. 제어기법 1, 제어기법 2와 마찬가지로 모터가 인버터와 함께 승압용 ac-dc 컨버터로 동작하고, 양방향 dc-dc 컨버터가 배터리 공칭 전압 레벨로 강압시켜준다.



(a) 시스템 구조도 (제어기법 3 & 제어기법 4)



(b) 제어블록도 - 제어기법 3



(c) 제어블록도 - 제어기법 4

그림 5 한 개의 인버터를 이용한 배터리 충전기의 시스템 구조도와 제어블록도

Fig. 5 System configuration and control block diagram of the battery charger using one inverter

그리고 인버터의 윗단 스위치들(S1, S3, S5)은 off시키고 아랫단 스위치들(S2, S4, S6)만 사용하여 전류를 제어한다. 다이오드 정류기를 추가로 설치해주어야 한다는 단점이 있지만, 입력전압의 제로 크로싱 지점을 감지하기 위한 제어가 필요 없으므로 제어 구성이 좀 더 간편해진다.

그림 5(b)와 그림 5(c)는 각각 그림 5(a) 구조의 제어블록도이다. 제어기법 3은 제어기법 1과 같이 제로 벡터 제어방식을 사용하여 S2, S4, S6 스위치의 제어 신호가 동일하므로 모터의 3상 권선에 크기와 위상이 동일한 영상분 전류가 흐르게 된다. 반면에 제어기법 4는 제어기법 2와 같이 인터리빙 제어방식을 사용하여

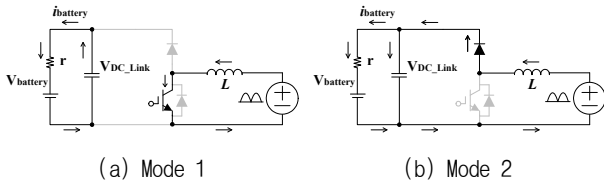


그림 6 제어기법 3의 모드별 동작  
Fig. 6 Operating modes of control method 3

인버터 아랫단 스위치들에 a, b, c 상순으로 120°씩 차이가 나는 제어신호를 전달하므로 모터의 3상 권선에 흐르는 전류 파형들이 120°씩 이동되어 나타난다.

그림 6은 그림 5(a)의 구조를 간략화 시킨 등가회로를 이용하여 제어기법 3의 모드별 동작을 보여준다. 제어기법 3은 제어기법 1과 같이 제로 벡터 제어 방식을 사용하므로 인버터와 모터를 한 개의 상으로 등가화시킬 수 있다. 계통으로부터의 입력이 정류기를 거쳐 모터에 연결되므로 모드를 두 가지로 간략화시킬 수 있다. Mode 1에서는 입력단의 에너지가 출력단으로 전달되지 않고 모터 내의 리액터에 자기에너지 형태로 축적되게 된다. 반면에 Mode 2에서는 입력단의 에너지와 모터 내의 리액터에 저장되어 있던 에너지가 함께 출력단으로 전달되므로 부스트 컨버터로 동작하게 된다.

제어기법 4는 제어기법 2와 같이 모터 내 각 상의 리액터에 에너지를 저장하고, 이를 출력단으로 전달하는 동작이 a, b, c 상순으로 120°씩 차이 나는 점 외에는 동작 원리가 제어기법 3과 동일하다.

### 3. 모터 인덕턴스 boundary 설정

모터 인덕턴스가 일정 값 이하이면, 모터 내의 리액터에 흐르는 전류가 DCM으로 동작하게 된다. 이러한 DCM에서는 CCM인 경우보다 첨두값이 더 크게 나타나게 된다. 이는 리액터에서 발생하는 손실 증가의 원인이 되고, 또한 발열이 심해져 리액터의 크기를 증대시켜야 되는 결과를 가져온다. 그러므로 표 2의 설계 사양에 맞추어, 제어기법 3과 4의 리액터 전류를 CCM으로 동작시키기 위한 모터 인덕턴스의 최소값을 구해보면 다음과 같다.

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

표 2 다기능 인버터를 사용한 배터리 충전기의 설계 사양

Table 2 Specification of the battery charger using multi-function inverter

정격 전력	3.3 [kW]
입력 전압	220 [V <sub>rms</sub> ]
3상 인버터의 최대 용량	39 [kW]
스위칭 주파수	20 [kHz]
DC링크 전압	400 [V]
DC링크 커패시터	1200 [μF]
DC-DC 컨버터의 최대 용량	24 [kW]
배터리 공칭 전압	150 [V]

$I_{pk}$ 는 입력전류 기본파 성분의 첨두치이다.  $I_{pk}$ 는 모터 내의 각 상 코일들에 같은 크기로 나뉘어져 흐르므로, 모터 내의 코일 하나에 흐르는 전류첨두치는 7.071[A]이다.

$$400 = \frac{1}{1 - D_{min}} 311 \quad (2)$$

입력전압이 정류된 파형의 순시값이 가장 클 때, 듀티비는 가장 작다. 이 시점에서의 듀티비를  $D_{min}$ 이라고 하고, 주어진 조건에서  $D_{min}$ 은 0.2225이다.

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

$L_{min}$ 은 모터 내 한 상 코일의 최소 인덕턴스 값이고,  $f_{sw}$ 는 3상 인버터의 스위칭 주파수이다.  $\Delta I$ 는 CCM으로 동작시키기 위한, 모터 내 한 상의 코일을 통해 흐르는 전류의 최대 리플 크기이다. 식 (3)에서 구한 것과 같이 모터 내 한 상의 코일에 흐르는 전류가 CCM으로 동작하기 위한 최소 인덕턴스 값은 244.7[μH]이다.

### 4. 시뮬레이션

식 (3)에서 구한 최소 인덕턴스 값은 제어기법 3, 제어기법 4의 경우를 바탕으로 도출한 값이다. 시뮬레이션에서는 모터 내 한 상의 인덕턴스 값을 실제 Hybrid Starter & Generator (HSG)의 인덕턴스 값과 비슷하게 하기 위해 500[μH]로 설정하였다. 제어기법 1, 제어기법 2는 두 개의 모터로 구성되는 구조이므로 각

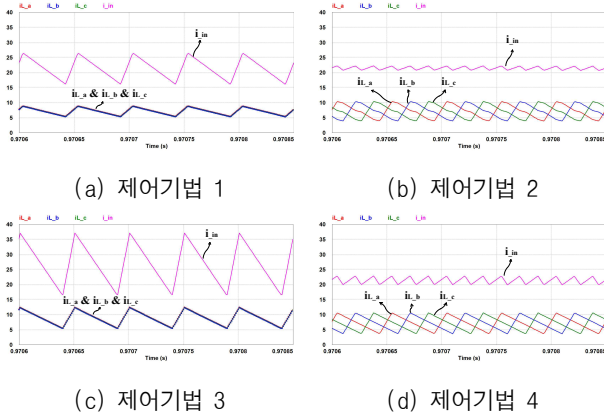


그림 7 유형별 입력전류 및 모터 내 각 상의 코일에 흐르는 전류  
 Fig. 7 Input current and each coil current in the motor according to four cases

모터의 파라미터 값을 제어기법 3, 제어기법 4의 모터와 동일하게 설정하고 시뮬레이션을 진행하였다.

#### 4.1 입력전류 리플

그림 7은 입력전압이 최대값인 시점의 입력전류와 각 상에 흐르는 전류 파형을 나타낸다.

시스템 구조적인 측면에서 살펴보면, 모터 두 개로 구성된 제어기법 1과 2의 전류 리플이 모터 한 개로 구성된 제어기법 3과 4의 전류 리플보다 상대적으로 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 두 개의 모터를 사용하는 경우, 메인 모터의 a상 코일과 보조 모터의 a상 코일이 직렬로 연결된 것과 같으므로 인덕턴스 값은 두 배가 된다. 따라서 입력전압이 동일하므로 코일에 흐르는 전류의 기울기는 1/2배가 된다.

모터의 각 상에 흐르는 전류의 합은 입력전류와 같으므로, 각 상의 코일에 크기와 위상이 동일한 영상 전류가 흐르는 제어기법 1과 3의 경우, 그림 7(a), 그림 7(c)와 같이 입력전류 리플이 코일에 흐르는 전류 리플의 세 배가 된다. 반면에 제어기법 2와 4의 경우, 모터의 각 상에 흐르는 전류가 a, b, c 상순으로 위상이 120°씩 이동되어 흐르므로 그림 7(b), 그림 7(d)와 같이 입력전류 리플이 코일에 흐르는 전류 리플보다 작아진다.

각 상의 인덕터가 같을 때, 듀티비가 0.2225 ( $D_{min}$ )인 경우, 단상에서의 입력전류 리플 크기는 3상 인터리빙 제어방식을 사용할 때의 입력전류 리플보다 약 2.4배 크다<sup>[10]</sup>. 그러므로 3상 제로 벡터 제어방식을 사용할 때의 입력전류 리플 크기는 3상 인터리빙 제어방

표 3 유형별 입력전류 리플

Table 3 Input current ripple according to four cases

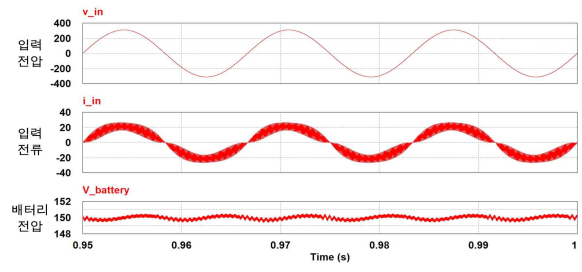
	제어기법1	제어기법2	제어기법3	제어기법4
입력전류 리플[A]	10.228	1.421	20.389	2.840

표 4 유형별 역률

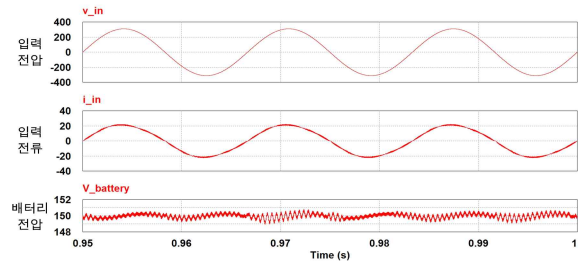
Table 4 Power factor according to four cases

	제어기법1	제어기법2	제어기법3	제어기법4
역률	0.974	0.999	0.911	0.999

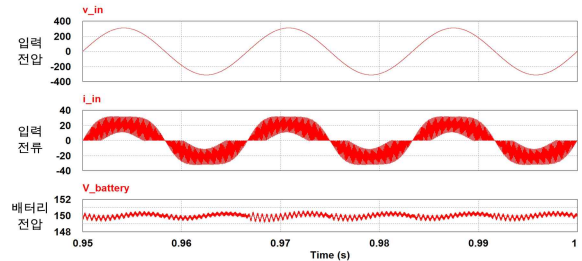
식을 사용하는 경우보다 약 7.2배 크게 나타난다. 표 3의 시뮬레이션 결과파형 분석 값을 살펴보면, 제어기법 1의 입력전류 리플 크기가 제어기법 2의 입력전류 리플의 약 7.20배, 제어기법 3의 입력전류 리플 크기는 제어기법 4의 입력전류 리플의 약 7.23배이다.



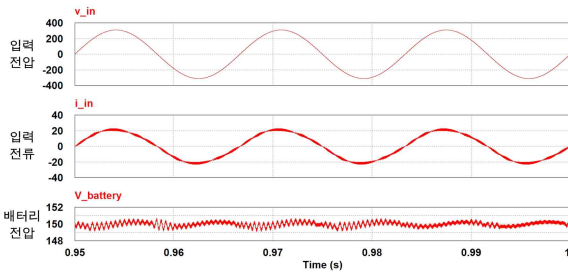
(a) 제어기법 1



(b) 제어기법 2



(c) 제어기법 3



(d) 제어기법 4

그림 8 유형별 입력전압, 입력전류, 배터리전압  
Fig. 8 Input voltage, input current, and battery voltage according to four cases

### 4.2 역률

그림 8에서 각 유형별 입력전압, 입력전류, 배터리전압 파형을 살펴보면, 입력전류의 위상제어가 잘 이루어지고 있고 배터리전압 또한 150[V]로 제어되고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 입력전류의 고조파 성분 포함 정도에 따라 역률 (PF)은 차이가 난다. 입력전류의 고조파 성분이 곧 리플로 나타나게 되므로 입력전류 리플이 가장 큰 제어기법 3의 역률이 0.911로 가장 낮음을 표 4을 통해 확인할 수 있다.

### 4.3 모터 인덕턴스 변화에 따른 특성 비교

표 5는 모터 한 상의 인덕턴스 크기에 따라 제어기법별로 나타나는 입출력 특성들을 보여준다. 모든 제어기법들에서 인덕턴스 값이 커질수록 입력전류 리플과 역률이 개선된다. 모터 한 상의 인덕턴스 크기가 동일한 경우, 인터리빙 제어방식을 적용하는 제어기법 2가 제로 벡터 제어방식을 사용하는 제어기법 1보다, 제어기법 4가 제어기법 3보다 성능이 우수하게 나타남을 확인할 수 있다. 하지만 국제규격에 따라, 입력전류의 전고조파왜율 (THD)은 5[%] 이내로 제한되어야 한다. 표 5를 살펴보면, 제어기법 2만이 모터 한 상의 인덕턴스가 300[ $\mu H$ ] 이상인 조건에서 THD 규격을 만족하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 제로 벡터 제어방식을 적용하는 제어기법 1과 제어기법 3은 입력전류의 THD가 각각 20[%] 이상, 40[%] 이상이므로 실제 시스템에 적용하기가 어렵다. 즉, 실용화 관점에서 살펴보면, 인터리빙 제어방식의 적용이 필수적으로 요구된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 기존에 제안되었던 인버터와 모터 인덕턴스를 이용한 배터리 충전 방법들을 시스템 구성과

표 5 모터 인덕턴스 변화에 따른 입출력 특성  
Table 5 Characteristic according to motor inductance

제어기법 1 2인버터 + 2모터 제로벡터 제어방식	모터 한 상의 인덕턴스 [ $\mu H$ ]	50	100	200	300	400	500
	입력전류 전고조파왜율 (THD)	1.231	0.748	0.571	0.381	0.290	0.232
	입력전류 리플 [A]	66.320	46.565	26.089	17.100	12.994	10.228
	역률 (PF)	0.632	0.823	0.868	0.934	0.960	0.974
제어기법 2 2인버터 + 2모터 인터리빙 제어방식	모터 한 상의 인덕턴스 [ $\mu H$ ]	50	100	200	300	400	500
	입력전류 전고조파왜율 (THD)	0.360	0.170	0.070	<b>0.049</b>	<b>0.042</b>	<b>0.040</b>
	입력전류 리플 [A]	14.159	8.630	2.985	2.035	1.780	1.421
	역률 (PF)	0.939	0.985	0.997	0.998	0.998	0.999
제어기법 3 1인버터 + 1모터 제로벡터 제어방식	모터 한 상의 인덕턴스 [ $\mu H$ ]	50	100	200	300	400	500
	입력전류 전고조파왜율 (THD)	1.598	1.230	0.879	0.679	0.572	0.450
	입력전류 리플 [A]	91.718	65.579	47.260	33.876	25.372	20.389
	역률 (PF)	0.531	0.629	0.744	0.827	0.868	0.911
제어기법 4 1인버터 + 1모터 인터리빙 제어방식	모터 한 상의 인덕턴스 [ $\mu H$ ]	50	100	200	300	400	500
	입력전류 전고조파왜율 (THD)	0.478	0.253	0.178	0.073	0.062	0.054
	입력전류 리플 [A]	22.828	16.174	6.918	4.818	3.369	2.840
	역률 (PF)	0.895	0.969	0.984	0.996	0.997	0.999

제어방식에 따라 크게 네 가지 경우로 구분하여 비교 분석하였다. 구조적으로, 두 개의 모터와 인버터로 구성된 시스템은 하나의 모터와 인버터로 구성된 시스템보다 인덕턴스 값이 커져서 입력전류 리플이 절반이고 역률이 개선된다. 또한 추가적인 하드웨어 (다이오드 정류기)가 필요 없다는 장점을 가지고 있다. 제어방식 중, 인터리빙 제어방식은 제로 벡터 제어방식에 비해 입력전류 리플을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 입력전류 THD 규격을 만족시키기 위해 반드시 적용되어야 한다. 그러므로 인버터 및 모터 인덕턴스를 이용한 PHEV 배터리 충전 방법들 중, 인터리빙 제어방식을 적용하고 두 개의 모터와 인버터를 모두 사용하는 제어기법 2가 최적의 충전기법이다.

## 참 고 문 헌

- [1] D. Thimmesch, "An scr inverter with an integral battery charger for electric vehicles", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-21, No. 4, pp. 1023 - 1029, 1985, July.
- [2] W. E. Rippel and A. G. Cocconi, "Integrated motor drive and recharge system", *US Patent* US 5099186, 1992, Mar.
- [3] S.-K. Sul and S.-J. Lee, "An integral battery charger for four-wheel drive electric vehicle", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 31, No. 5, pp. 1096 - 1099, 1995, Sep./Oct.
- [4] L. Solero, "Nonconventional on-board charger for electric vehicle propulsion batteries", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 50, No. 1, pp. 144 - 149, 2001, Jan.
- [5] 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, 2010, Mar.
- [6] L. Tang and G.-J. Su, "A low-cost, digitally-controlled charger for plug-in hybrid electric vehicles", *IEEE ECCE, Conf.*, pp. 3923-3929, 2009, Sept.
- [7] M. Nakamura, H. Oyobe, and T. Yano, "Power supply device for vehicle and method of controlling the same", *US Patent* US 2009/0160247 A1, 2009, Jun.
- [8] A. Emadi, K. Rajashekara, S. S. Williamson, and S. M. Lukic, "Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 54, No. 3, pp. 763-770, 2005, May.
- [9] A. Emadi, K. Rajashekara, and Y.J. Lee, "Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles", *IEEE Trans. ind. electr.*, Vol. 55, No. 6, pp. 2237, 2008, June.
- [10] G.Y. Choe, J.S. Kim, H.S. Kang, and B.K. Lee, "An optimal design methodology of an interleaved boost converter for fuel cell applications", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 5, No. 2, pp. 319-328, 2010.
- [11] 우동균, 최규영, 이병국, "IPM모터를 이용한 PHEV 충전기법 문제점 분석", *대한전기학회 춘계학술대회*, pp. 283-285, 2011.

## 저 자 소 개



### 우동균(禹東均)

1984년 7월 29일생. 2009년 성균관대 전자전기공학과 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석사과정.



### 최규영(崔奎英)

1980년 4월 11일생. 2008년 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2008년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정.



### 김중수(金鍾秀)

1975년 3월 5일생. 2008년 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2008년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정. 2000년~2005년 SEMIKRON Korea Application Engineer.



### 이병국(李秉國)

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(공학). 2001년~2003년 미국 Texas A&M University Postdoctoral Research Associate. 2003년~2005년 한국전기연구원 전력전자그룹 선임연구원. 2005년~2006년 성균관대 연구조교수. 2006년~현재 성균관대 정보통신공학부 부교수. IEEE Senior Member. 당 학회 재무이사.



### 강구배(姜求培)

1973년 12월 18일생. 1996년 경북대 공대 전자공학과 졸업. 1998년 포항공과대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전자전기공학과(공학). 2003년~현재 현대자동차(주) 하이브리드시스템시험팀

책임연구원