

친환경 자동차용 통합형 전력변환장치의 개발 및 배터리 HILS를 이용한 LDC 검증에 관한 연구

Development of the Integrated Power Converter for the Environmentally Friendly Vehicle and Validation of the LDC using Battery HILS

김 태 훈* · 송 현 식* · 이 백 행[†] · 이 찬 송** · 권 철 순** · 정 도 양**
 (Tae-Hoon Kim · Hyun-Sik Song · Baek-Haeng Lee ·
 Chan-Song Lee · Cheol-Soon Kwon · Do-Yang Jung)

Abstract - For OBC (On-Board Charger) and LDC (Low DC-DC Converter) used as essential power conversion systems of PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle), system performance is required as well as reliability, which is need to protect the vehicle and driver from various faults. While current development processor is sufficient for embodying functions and verifying performance in normal state during development of prototypes for OBC and LDC, there is no clear method of verification for various fault situations that occur in abnormal state and for securing stability of vehicle base, unless verification is performed by mounting on an actual vehicle. In this paper, a CCM (Charger Converter Module) was developed as an integrated structure of OBC and LDC. In addition, diverse fault situations that can occur in vehicles are simulated by a simulator to artificially inject into power conversion system and to test whether it operates properly. Also, HILS (Hardware-in-the-Loop Simulation) is carried out to verify whether LDC is operated properly under power environment of an actual vehicle.

Key Words : CCM(Charger Converter Module), OBC(On-Board Charger), LDC(Low DC-DC Converter), PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle), HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation), Fault insertion

1. 서 론

자동차 개발 패러다임의 변화에 따라 최근 다양한 그린카 기술개발이 활발히 진행되고 있으며, 이 중 전기차의 구동 모터와 액체연료를 사용하는 엔진을 장착한 PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle)를 주축으로 한 기술개발이 가속화되고 있다. PHEV에는 고전압으로 이루어진 대용량 배터리 팩 탑재가 필수적으로 요구되며, 구동용 시스템에 필요한 전원을 공급하는 역할을 담당한다. 따라서 계통으로부터 전기 에너지를 공급받아 고전압 배터리를 충전해 줄 수 있는 OBC(On-Board Charger)가 필요하다. 또한 차량에 탑재되어 있는 조명장치 등 대부분의 전장부품이 고전압이 아닌 12V로 동작하기 때문에 고전압을 저전압으로 변환하는 LDC(Low DC-DC Converter) 또한 필수적으로 요구된다. 이러한 전력변환장치의 시제품 개발에 있어 정상상태에서의 기능 구현 및 성능 검증을 하는 것은 일반적인 개발 프로세

서만으로 충분하지만 비정상적인 상태에서 발생할 수 있는 다양한 오류 및 차량 기반에 대한 안전성 확보는 실차에 탑재하여 검증하지 않고서는 뚜렷한 검증법이 없는 실정이다.

본 연구에서는 PHEV의 필수 전력변환장치인 OBC와 LDC의 통합형 구조인 CCM(Charger Converter Module)을 개발하였으며, 이를 대상으로 실차에 탑재하지 않고 운용 안전성을 검증할 수 있는 방법에 대해 기술하였다. 차량에서 발생될 수 있는 다양한 경고(warning) 및 오류(fault) 상황들을 시뮬레이터로 모사하였으며, 그림 1과 같이 controller, power level로 구분지어 전력변환장치에 인위적으로 주입시킨 뒤 설정된 보호동작에 따라 정상 동작하는지 확인하였다. 특히 CCM의 LDC를 대상으로는 PHEV 차량 모델이 적용된 배터리 HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation)를 통

[†] Corresponding Author : Automotive Convergence Parts Technology R&D Division, Korea Automotive Technology Institute, Korea.

E-mail: leebh@katech.re.kr

* Electronic System R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, Korea.

** Power Electrics R&D Center, PNE SOLUTION Co., LTD, Korea.

Received : April 03, 2014; Accepted : August 18, 2014

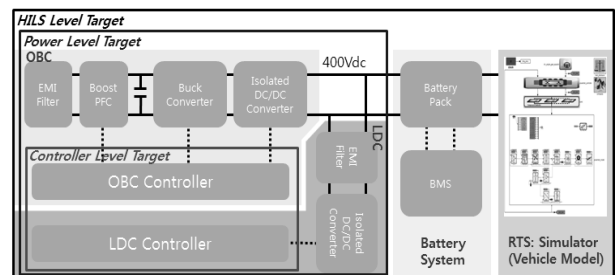


그림 1 전력변환장치의 동작 시퀀스 검증 방안

Fig. 1 Method of operation sequence validation for the power converter

해 실차 전력 환경을 모사하여 특정 주행 패턴에서도 정상적으로 운용되는지 검증하였다.

2. PHEV용 CCM 개발

기존에 개발된 일반적인 OBC와 LDC는 각각 개별적으로 공급되어 장착되는 분리형이었다. OBC의 경우 대부분 공랭식 방식이 사용되며, 고전압 배터리가 있는 차량의 밀폐된 부분에 장착되기 때문에 방열 및 환기부분에 단점을 갖는다. LDC의 경우에는 차량 내에 별도로 설치되거나 인버터 모듈에 장착되는 구조이다. 이와 같은 경우 LDC가 인버터의 입력부를 같이 공유하기 때문에 인버터에서 발생하는 노이즈에 의한 입력 서지보호기의 소손 및 출력에 영향을 미칠 우려가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 개별적으로 설치되던 OBC와 LDC를 하나의 기구물로 통합 제작한 CCM을 개발하였다. 이러한 통합형 전력변환장치의 장점으로는 하우징을 축소할 수 있기 때문에 PHEV의 공간적인 제약을 극복할 수 있으며, 기존 제품들 간 커넥터로 연결되는 부분을 내부 버스바(bus-bar)나 전선으로 접속시킬 수 있어 부피 및 원가를 절감할 수 있다. 또한 통합형 전력변환장치의 방열부를 공용화시킴으로써 개별 방열부가 차지하던 공간들을 줄여 제품을 소형화시킬 수 있다. 하지만 한개 이상의 요소부품이 고장 시 제품 전체를 수리하거나 교체해야 하는 불편함도 가지고 있다[1]-[3]. OBC와 LDC의 통합형 전력변환장치로 여러 형태의 회로가 고려될 수 있으며, 본 논문에서는 그림 1과 같이 고전압배터리와 연결되는 OBC의 출력과 LDC의 입력이 공통으로 쓰이는 직렬연결 구조를 적용하였다. 이러한 구조는 기존 OBC 및 LDC의 구성과 동일하기 때문에 토폴로지 변동 없이 그대로 사용할 수 있다.

2.1 OBC 설계

OBC의 정격 출력은 3kW로 입력은 완속 충전기의 출력 범위에 맞는 1 ϕ AC 220V(110V)이며, 출력은 고전압 배터리의 충전 범위인 DC 240~400V이고 최대 전류는 7.5A이다. 충전은 충전기와 SAE J1772 규격에 근거하여 통신하며, 충전기의 수전 용량을 확인하여 정전류-정전압(CC-CV) 제어를 통해 고전압 배터리를 완속 충전한다. 또한, 차량 내부에 있는 배터리 관리장치(BMS: Battery Management System), 차량 제어모듈(VCM: Vehicle Control Module) 등과 CAN(Controller Area Network)을 통하여 OBC 내부 정보를 차량에 전달한다.

그림 2는 본 연구에서 설계한 OBC의 구성도이다. EMC 필터와 전과정류기를 거쳐 총 3 단계의 전력변환 회로로 구성된다. 첫 단계로 입력 측의 역률 보상 및 출력인 DC-link의 일정 전압 유지를 위해 Boost PFC를 사용하였다[4]. 제어를 위해 전용 IC인 TI사의 UC2854를 이용하여 아날로그 제어하였으며, 주 제어를 통해 동작 여부를 결정한다.

Boost PFC 다음 단계에서는 배터리의 요구 전류 및 전압에 맞게 충전해 줄 수 있는 전력변환이 필요하다. 이를 위해 하나의 전력변환 회로만으로도 구현이 가능하지만 고정된 입력 전압에 비해 출력 전압의 가변 범위가 넓기 때문에 하나의 전력변환 회로만으로 이를 구현할 경우 넓은 출력 범

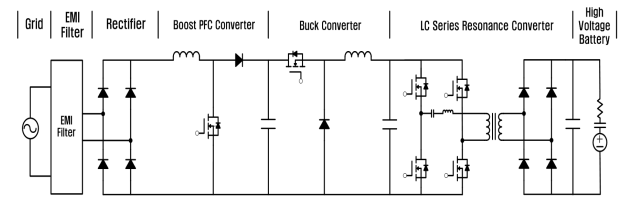


그림 2 OBC 시스템 구성도

Fig. 2 System block diagram of the on-board charger

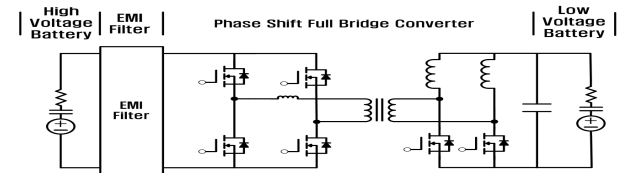


그림 3 LDC 시스템 구성도

Fig. 3 System block diagram of the low dc-dc converter

위에서 효율 편차가 심해지거나 스위칭소자의 스트레스가 증대 될 우려가 높다. 따라서 본 연구에서는 이를 두 단계로 나누어 Buck 컨버터에서 배터리 충전에 필요한 CC-CV 제어를 수행하였으며, LC 직렬 공진형 컨버터에서는 최적의 효율점에서 고정 주파수로 동작시켜 이러한 문제를 보완하였다. 이들의 제어를 위해서는 Freescale사의 MPC5553를 이용하여 디지털 제어하였다.

2.2 LDC 설계

LDC의 입력은 OBC의 출력과 공통으로 연결되어 있는 구조이기 때문에 입력 사양은 고전압 배터리의 충전 범위인 DC 240~400V와 동일하며, 출력은 저전압 배터리의 충전 전압인 DC 14.2V이고 최대 전류는 85A, 정격 출력은 1.2kW이다. 충전 동작은 차량의 ignition 신호가 들어왔을 경우, ignition 신호는 들어오지 않았지만 보조배터리의 전압이 특정 전압(12.2V) 이하로 떨어졌을 경우, 고전압 배터리 충전을 위해 OBC가 동작하는 경우 중 하나의 조건이라도 충족할 경우 정전압(CV) 제어를 통해 저전압 배터리를 충전한다. 또한 OBC와 마찬가지로 CAN을 통해 상위 제어기인 BMS, VCM 등과 LDC 내부 정보를 공유한다.

LDC는 그림 3과 같이 EMI 필터와 하나의 DC-DC 컨버터로 구성되며, DC-DC 컨버터는 두 개의 인덕터 정류회로를 이용한 current doubler 타입의 위상전이 풀브리지 토폴로지를 사용하였다[5]-[7]. 위상전이 풀 브리지 컨버터는 별도의 추가 회로 없이 스위치들의 게이트 신호에 시간 지연을 두는 방식을 통해 소프트 스위칭을 성취할 수 있으므로, 스위칭 손실을 줄여 효율을 높일 수 있으며, 고주파 스위칭을 통해 컨버터의 부피 및 무게를 감소시킬 수 있다. 또한 2차 측에는 current doubler 방식과 동기정류방식을 적용하였다. 이러한 회로의 장점은 변압기 2차 측 전류 정격을 감소시킬 수 있어 전류에 의한 손실을 저감시킬 수 있으며, 다이오드의 높은 도통 손실을 MOSFET의 내부 Rds 저항에 대한 손실로 감소시킬 수 있다. 따라서 이러한 토폴로지는 LDC와 같은 저전압, 대전류 응용 분야에서 유용하게 사용

될 수 있다. 컨버터의 제어는 전용 IC인 TI사의 UCC 28950을 이용하여 아날로그 제어하였으며, 상위제어 및 보호동작은 DSP를 통해 수행된다.

2.3 CCM 기구부 설계

CCM은 차량의 엔진룸에 장착되기 때문에 그에 따른 진동 및 방수/방진에 대한 영향을 고려한 설계가 필요하다. 그림 4(a), (b)는 각각 CCM의 내부 단면도와 제품사진을 나타낸다. 기구부의 설계는 OBC와 LDC가 통합된 수냉식 구조로 두 전력변환기가 동시에 방열될 수 있게 냉각 플레이트를 기준으로 상측에는 OBC, 하측에는 LDC를 배치하였으며, 엔진룸에 장착되기 때문에 기존 OBC에 비해 냉각 면에 있어 이점을 갖는다. 또한, 진동 및 절연내압을 개선하기 위해 MOSFET과 다이오드와 같은 전력 소자를 metal PCB에 실장하고 그 위에 상대적으로 무게가 나가는 EMC 필터와 필터 커패시터를 구성하였다. 추가적으로 EMC 필터와 전력부를 분리하여 전자파 내성을 향상 시킬 수 있게 설계하였다.

3. 오류 주입법을 통한 전력변환장치의 동작 시퀀스 검증

본 절에서는 오류 주입법(fault insertion)을 통한 CCM의 동작 시퀀스 검증에 관해 기술한다. 동작 시퀀스 검증을 위해서는 그림 1과 같이 전력변환장치에서 전력부를 제외하고 순수 제어기만을 대상으로 오류 주입 및 그에 따른 동작을 검증할 수 있는 controller level(단품), 전력부와 제어부가 결합된 실제 전력변환기의 입력 및 출력에 각각 에너지원 및 부하를 연결하여 전력을 인가 후 오류를 주입시켜 동작 시퀀스를 검증할 수 있는 power level(완품)로 구분 지을 수 있다. 이때 각 시험은 OBC 및 LDC를 분리시켜 진행하였다. 그림 5 (a)와 (b)는 각각 OBC와 LDC의 보호 알고리즘 순서도이며, 표 1, 2는 오류 발생 및 해지 조건을 나타낸다. OBC 보호 알고리즘을 살펴보면 제어 주기마다 보호동작 파라미터를 관측하며 현재 OBC가 정상(normal)/경고(warning)/오류(fault) 모드 중 어떠한 상태인지 판단한다. 경고 상태에 진입할 경우에는 상위 제어기와의 통신을 통해 현재 상황은 알려주지만 OBC 자체적으로 별도의 보호 동작은 취하지 않는다. 하지만 이와 같은 경고 상황이 0.5초 이상 지속 될 경우 오류 모드에 진입하게 되며, 상위 제어기에 이를 알려주는 동시에 출력되는 게이트 시그널을 차단하여 자체적으로 shut-down 시킨다. 이러한 오류 상황은 OBC의

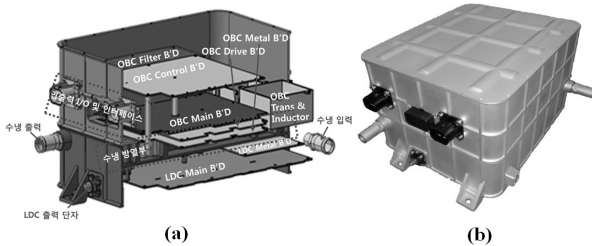


그림 4 개발된 CCM 하드웨어 (a) 3D 내부단면 (b) 사진
Fig. 4 Implemented hardware of the CCM (a) 3D internal cross section diagram (b) Photograph

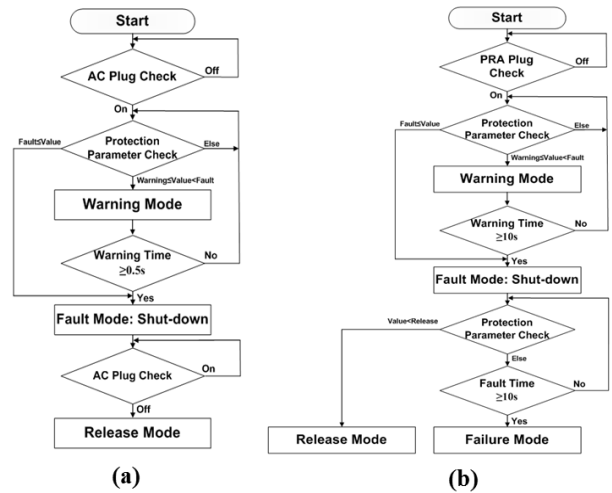


그림 5 보호 알고리즘 순서도 (a) OBC (b) LDC
Fig. 5 Flowchart for protection algorithm (a) OBC (b) LDC

입력으로 사용되는 AC 플러그 탈착 시에만 해지된다. LDC의 보호 알고리즘 또한 OBC와 유사하게 보호동작 파라미터를 관측하여 현재 모드를 판별하지만, 경고 상황이 10초 이상 지속 될 경우에만 오류 모드에 진입하게 된다. LDC의 운용특성 상 항시 입, 출력 측에 배터리가 접속되어 있기 때문에 오류 발생 후에도 다시 해지조건에 진입할 수 있다면 오류 모드는 해지 된다. 하지만 오류 모드에 진입한 10초 이후에도 오류가 지속된다면 이는 고장으로 판단하여 고장

표 1 OBC의 오류 발생 및 해지 조건

Table 1 Conditions for fault/release mode of the OBC

번호	항목	오류발생 조건	오류해지 조건
1	Input OVP(220V)	> 252V	AC Plug Off
2	Input UVP(220V)	< 188V	
3	Input OVP(110V)	> 138V	
4	Input UVP(110V)	< 102V	
5	Input OCP	> 20A	
6	DC-link OVP	> 420V	
7	DC-link UVP	< 350V	
8	Output OVP	> 420V	
9	Output OCP	> 10A	
10	OBC OTP	> 80°C	

표 2 LDC의 오류 발생 및 해지 조건

Table 2 Conditions for fault/release mode of the LDC

번호	항목	오류발생 조건	오류해지 조건
1	Input OVP	> 420V	< 400V
2	Input UVP	< 200V	> 240V
3	Input OCP	> 10A	< 9.5A
4	Output OVP	> 18V	> 14.5V
5	Output OCP	> 100A	< 90A
6	OTP 1	> 75°C	< 65°C
7	OTP 2	> 75°C	< 65°C

모드(failure mode)로 빠져 메인 CPU의 전원을 제거 후 다시 인가해야만 이를 해결할 수 있다.

3.1 Controller level(단품)에서의 동작 시퀀스 검증

오류 주입법을 통한 전력변환장치의 동작 시퀀스를 검증하는 첫 번째 방안인 controller level 시험의 구성도를 그림 6에 나타내었다. 구성도에 보이듯이 시뮬레이터에 의해 제어기로 오류 조건을 주입하기 위해서는 제어기의 입력으로 들어오는 ADC driver단의 출력을 끊고 시뮬레이터의 DAC와 연결한다. ADC driver단에서 출력되는 전압 범위로 DAC의 출력을 가변하여 오류 상황을 모사하며, 그에 따른 출력, 즉 게이트 시그널이 정상적으로 출력되는지 시뮬레이터의 PWM_IN 채널을 통해 확인한다. 또한, OBC 및 LDC의 각종 파라미터들을 CAN을 통해 실시간으로 시뮬레이터에서 모니터링하며, 동작 시퀀스를 검증한다. 이와 같은 방식의 장점으로는 사용자가 확인하고 싶은 오류 상황을 단순히 시뮬레이터의 DAC 제어만으로 손쉽게 만들어 내어 시험해 볼 수 있으며, 실제 상황에서는 발생하기 어렵거나 직접 시험하기 위험한 오류 상황들도 시험해 볼 수 있다. 시험의 진행은 시뮬레이터에서 초기 모든 변수들을 정격 범위 내로 설정하여 정상 동작시키며, 이후 시험하려는 변수의 값만 변화시킨다. 이때 설정된 보호조건 지점에서 보호 되는지, 또한 보호조건이 발동됨과 동시에 상위 제어기에 이러한 정보를 알려주는지, 게이트 시그널들이 차단되어 동작이 종료하는지를 확인하였다.

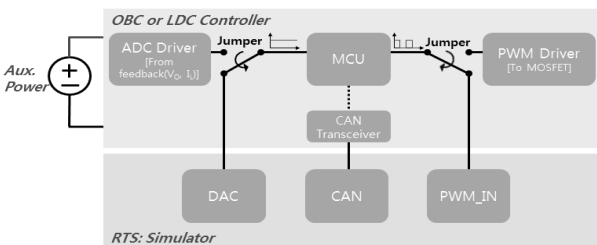


그림 6 단품에서의 동작 시퀀스 검증 방안
Fig. 6 Block diagram of the controller level test

3.2 Power level(완품)에서의 동작 시퀀스 검증

두 번째 검증 방안인 power level(단품) 시험의 구성도를 그림 7에 나타내었다. Power level 시험에서는 OBC 및 LDC의 완품에 대한 신뢰성을 검증하는 단계로 입력 측에는 계통(OBC) 혹은 고전압 배터리(LDC)를 모사할 수 있는 프로그래머블 파워 서플라이를, 출력 측에는 부하 저항을 사용한다. 시뮬레이터에서는 특정 경고/오류 상황을 모사하여 CAN을 통해 입력 파워 서플라이 및 출력 부하를 변동시키며, 전력변환장치의 각종 파라미터들도 이 CAN을 통해 피드백 받아 전력변환장치의 동작 시퀀스를 검증한다. Power level 검증의 장점으로는 시뮬레이터에서 임의로 만든 과형을 피드백 받는 것이 아니기 때문에, 게이트 시그널의 듀티 변화와 같은 실제 과형에 대한 보호조건을 검증할 수 있다. 하지만 이러한 power level에서의 검증 방법은 실제 구현해

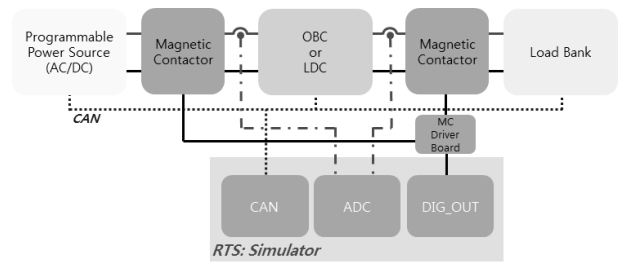


그림 7 완품에서의 동작 시퀀스 검증 방안
Fig. 7 Block diagram of the power level test

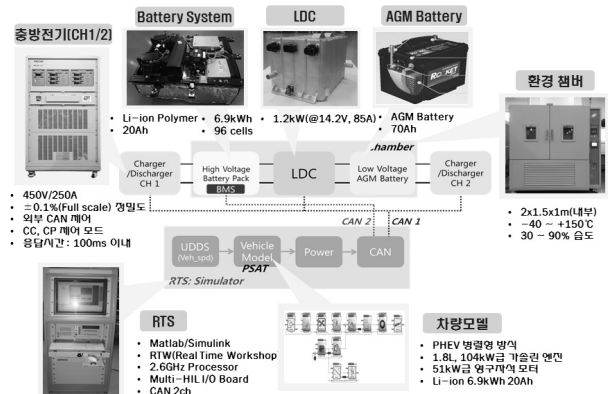


그림 8 HILS를 이용한 운용 검증 방안
Fig. 8 Block diagram of the HILS level test

내기 어려운 오류들에 대한 상황들을 임의로 만들어 낼 수 없는 한계가 있기 때문에 앞 절의 controller level 시험을 고려한 적절한 항목을 선정하여 서로를 보완하는 형태로 시험이 진행돼야 한다. 시험은 controller level에서 한계가 있었던 보호 기능들에 대해서 진행되며, 설정된 조건에 따라 보호조건이 동작되는지, 또한 보호조건이 동작됨과 동시에 정확히 상위 제어기에 이러한 정보를 알려주는지, power de-rating 및 hiccup 동작들이 정상적으로 운용되는지를 확인하였다.

4. HILS를 통한 LDC의 운용 검증

HILS는 제어와 제어대상이 이루고 있는 제어 루프에서 특정 부분을 실제 제품으로 대체하고 나머지 부분은 수학적 모델로 표현되는 식과 알고리즘을 사용하여 시뮬레이션하는 시스템이다[8]. 본 논문에서는 그림 8과 같이 전력변환장치와 이들의 입/출력으로 사용되는 고전압 배터리, 저전압 배터리를 실제 제품으로 대체하고 나머지 차량의 파워트레인 모델은 시뮬레이션으로 대체하는 차량용 battery HILS를 사용하였다. 이때 그림 8과 같이 각각의 배터리들은 충/방전기와 병렬로 연결되며, 시뮬레이터에서는 차량 모델이 실시간으로 시뮬레이션 되면서 차량 운행상태 그대로 재현하여 CAN을 통해 이들을 제어한다. 또한 고전압 배터리의 BMS 및 LDC와도 CAN을 통해 통신하며, 배터리의 SOC, 전압, 전류, 현재 상태 등의 정보들을 모니터링 및 저장한다.

앞 절에서는 전력변환기 자체의 제어기 및 완품을 대상으

로 오류 주입법을 통해 보호동작 알고리즘을 검증한다면 HILS level에서는 실제 차량과 동일한 전력 환경을 모사한 뒤 차량 주행 패턴에서도 전력변환장치가 정상적으로 운용되는지 확인해 볼 수 있다. 이때 OBC의 경우에는 동작 특성 상 차량이 정차되어 있는 상황에서 상용전원으로부터 고전압배터리를 충전하는 용도이기 때문에 차량이 운행되고 있는 상황을 모사해주는 HILS에서 별도의 검증은 필요치 않다. 따라서 본 연구에서는 HILS를 통한 검증은 LDC로 한정지어 진행하였다.

4.1 Battery HILS 장비 환경 구성

Battery HILS의 구성은 크게 시뮬레이터, 충방전기, 배터리와 같은 하드웨어 장치들과 차량 모델, 제어 프로그램과 같은 소프트웨어로 나뉜다.

4.1.1 RTS 장비

파워트레인 차량 모델을 실시간으로 처리하기 위한 장치를 RTS(Real Time System)라 하며, 실시간으로 처리가 가능한 모든 임베디드 제어기가 이에 해당한다. 친환경 차량의 복잡한 파워트레인 모델을 실시간으로 처리하기 위해서는 고성능의 프로세서를 사용하는 것이 일반적이며, 본 논문에서는 dSPACE사의 DS1006보드와 DS2202 보드를 이용하여 이를 구현하였다.

4.1.2 충/방전기

전력변환장치의 에너지원 및 부하에 해당하는 배터리를 실제 차량의 주행 사이클에 맞게 충전, 방전하는 장비가 충/방전기이다. 충/방전기는 PHEV 배터리 팩에 요구되는 최대 정격을 모사할 수 있게 채널당 450V/250A(병렬연결 시 500A)의 정격을 가지고 있으며, 외부 CAN에 의한 전압/전류/전력(CC/CV/CP) 제어 및 상태 모니터링이 가능하다.

4.1.3 고전압 배터리

Battery HILS에 사용된 고전압 배터리는 PHEV용 리튬계열 배터리 팩으로 8개의 셀이 직렬 연결되어 하나의 모듈을 구성하며, 이러한 모듈 12개가 다시 직렬로 연결되어 총 96셀로 이루어진 6.9kW급 배터리이다. 이 배터리 팩은 각 모듈을 연결하는 버스바, BMS, 프리차징 릴레이와 서비스 플러그가 통합된 PRA(Power Relay Assembly), 냉각 블로워 및 덕트 등으로 구성된다. 용량은 20Ah이며, 정격전압은 360V이다.

4.1.4 저전압 배터리

저전압 배터리는 차량의 전장부품에 전원을 공급하는 12V 배터리로 기존의 내연기관 차량에서 주로 사용되는 납축전지이다. 본 연구에서는 70Ah AGM(Absorbent Glass Material) 배터리를 사용하였다.

4.1.5 PHEV 차량 모델

본 연구에서는 PHEV 차량의 파워 트레인 모델을 위해 ANL사의 PSAT(Powertrain System Analysis Toolkit)을 사용하였다. 사용된 모델은 PSAT에서 제공하는 병렬형 타입의 중형차 기본 모델을 본 연구의 LDC 입력 정격에 맞게 수정하였다. 차량 모델은 Honda사의 Accord 바디 플랫폼을 기반으로 약 2톤의 공차 중량을 갖는 차시 모델을 사용하였으며, Toyota사의 Corolla 1.8리터 기반의 104kW 가솔린 엔진과 2004년식 Toyota사의 Prius 기반 최대 51kW 영구자석 모터 및 6.9kW급 Li-ion 배터리가 장착된 PHEV이다.

4.2 Battery HILS를 이용한 LDC 운용 검증

최종적으로 Battery HILS를 이용한 LDC를 운용 검증하기 위해 PHEV 모델을 대상으로 드라이빙 사이클 시험을 수행하였으며, 이를 위해 본 연구에서는 UDSS(Urban Dynamometer Driving Schedule)를 사용하였다. UDSS는 미국 환경보호국에서 규정된 다이내모미터 사이클로 경량차량의 도심 주행 연비 성능을 검증하는데 주로 사용된다. 그림 9는 HILS Level에서의 시험 환경 구성 사진을 나타낸다.

그림 10은 PHEV 모델에서의 UDSS 사이클에 대한 시험 결과이다. 좌상측 그림은 차량의 속도 및 배터리의 SOC에 대한 결과이다. PHEV 모델에서는 차량의 동력원이 고전압 배터리뿐만 아니라 엔진 또한 존재하기 때문에 배터리의 SOC는 약 25% 수준으로 일정하게 유지된다. 즉, 주행 중 상위 알고리즘에 따라 엔진의 발전 에너지를 이용하여 배터

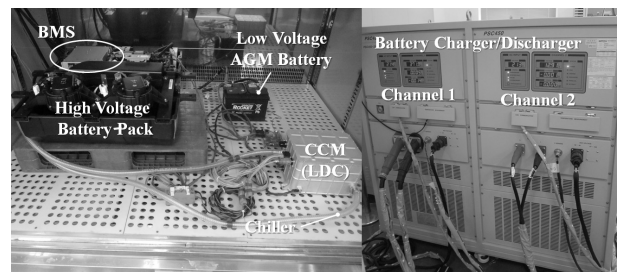


그림 9 HILS 시험 환경 구성

Fig. 9 Composition of the test environment for HILS

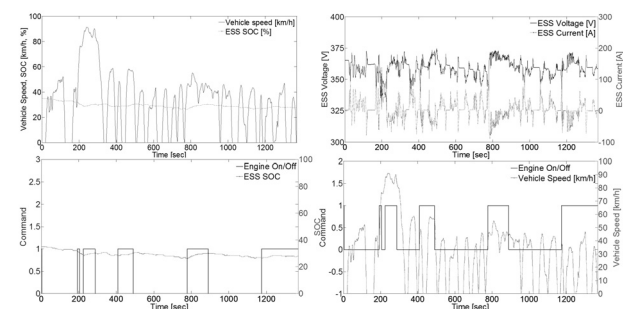


그림 10 UDSS 사이클에 따른 PHEV 차량 모델 및 배터리 팩의 시험 결과

Fig. 10 Test result according to UDSS cycle of the PHEV model and battery pack

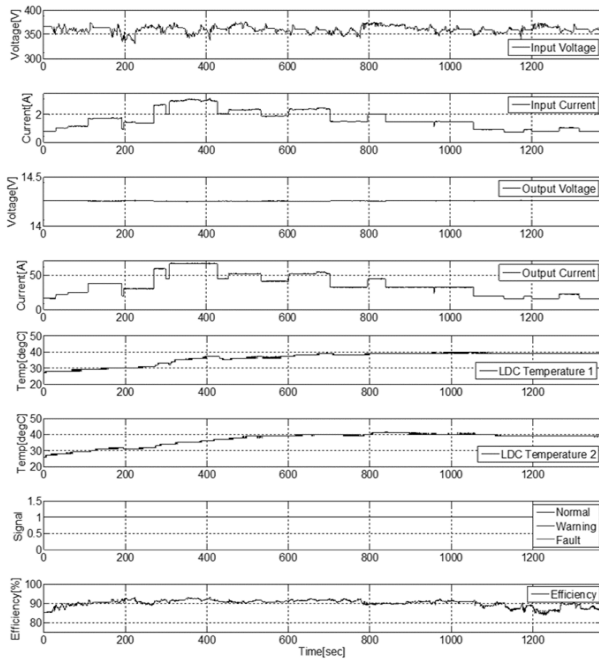


그림 11 UDDS 사이클에 따른 LDC 시험 결과
 Fig. 11 Test result according to UDDS cycle of the LDC

리를 충전해 줄 수 있다. 위상측 그림은 차량 주행 중 고전압 배터리의 전압 및 전류의 변화를 나타낸다. 배터리의 전류는 차량 및 LDC 구동에 필요한 전력공급 및 엔진의 발전 에너지에 의해 최대 -90A에서부터 100A까지 충/방전이 일어나고 있으며, 이에 따라 전압 역시 순시 적으로 변동은 있지만 SOC가 일정하게 유지되기 때문에 전압의 평균값 역시 일정 수준을 유지하고 있다. 좌하측 그림은 배터리의 SOC 및 엔진 기동여부(1:On, 0:Off)를 나타내고 있으며, 우하측 그림은 차량 속도에 따른 엔진 기동여부를 나타낸다. 엔진이 기동될 때 SOC가 상승하기 때문에 평균적으로 일정 SOC가 유지되고 있으며, 이는 엔진의 발전 에너지가 차량의 구동 및 고전압 배터리의 충전을 감당한다는 의미가 된다. 또한, 엔진은 일정 SOC 이하로 감소하였을 때뿐만 아니라 차량의 속도가 급증하여 배터리의 에너지만으로 차량의 구동이 어려울 때에도 기동되는 것을 알 수 있다. 이러한 시험 결과를 통해 PHEV 모델을 이용한 배터리HILS가 정상적으로 구동됨을 확인할 수 있으며, 실제 차량과 동일한 전력 환경에서 LDC가 운용 검증됨을 알 수 있다.

그림 11은 UDDS 사이클에 대한 LDC 시험 결과를 나타낸다. LDC의 입력전압은 PHEV의 고전압 배터리의 출력전압과 동일하기 때문에 앞선 결과와 같이 일정 수준의 전압을 유지하고 있다. 입력전압의 순시적인 변동 폭에도 LDC의 출력 전압은 저전압 배터리를 충전하는 알고리즘인 CV 제어에 의해 일정 전압(14.2V)으로 잘 유지되고 있다. 출력 전류는 저전압 배터리의 충전을 위한 전류 및 전장부하에서 요구되는 전류의 합이 되며, 이 중 전장부하의 요구 전류 즉, 충방전기 채널 2의 전류를 RTS에서 특정 패턴으로 변경하였기 때문에 시험 결과에서와 같이 시간에 따른 변동폭이 상당히 크다. 하지만 이와 같은 부하 변동에서도 LDC의 제어가 안정적으로 이루어지고 있다. LDC의 내부 온도

는 변압기(LDC Temp. 1)와 스위칭 소자인 FET(LDC Temp. 2) 두 곳에서 측정된 데이터이며, 시험 환경 온도인 25°C에서부터 시작하여 사이클이 진행됨에 따라 상승하기 시작하여 약 40°C에서 포화되어 유지되었다. 이를 통해 LDC의 냉각 성능 역시 문제없음을 검증하였다. 상위 제어기와의 통신 방법인 CAN 역시 warning이나 fault없이 normal 상태를 전송하며 정상적으로 수행되었으며, UDDS 사이클에 대한 효율을 측정해본 결과 입력 전압 및 출력 전류에 따라 최소 83.78%에서 최대 93.31%까지 변동은 있었으며, 평균 90.10%의 효율을 달성하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 OBC와 LDC의 통합형 구조인 CCM을 개발하였으며, 이를 대상으로 실차에 탑재하지 않고 운용 안전성을 확인할 수 있는 방법에 대해 기술하였다. Controller, power level로 구분 지어 오류 주입법을 통해 차량에서 발생할 수 있는 다양한 warning/fault 상황들을 시뮬레이터로 모사하여 보호동작에 따라 정상 동작하는지 확인하였다. 또한 최종적으로 PHEV 차량 모델이 적용된 배터리 HILS를 통해 실차 전력 환경을 모사하여 도심 주행 패턴에서도 LDC가 정상적으로 운용되는지 검증하였다.

감사의 글

본 논문은 2013년도 미래창조과학부(구 교육과학기술부)의 재원으로 과학벨트기능지구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2013K00502)

References

- [1] G.-M. Kim et al., "Development of Integrated Power Converter Device for the NEV", in Proceedings of the Korean Institute of Power Electronics 2011 Autumn Conference, pp. 239-240, Nov. 2011.
- [2] G.-M. Kim, T.-K. Kim and C.-H. Kang, "Development of On Board Charger for NEV's Integrated Power Converter", in Proceedings of the Korean Institute of Power Electronics 2012 Conference, pp. 1-2, July. 2012.
- [3] Y.-J. Lee, Alireza Khaligh and Ali Emadi, "Advanced Integrated Bidirectional AC/DC and DC/DC Converter for Plug-In Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 8, pp. 3970-3980, Oct. 2009.
- [4] J.-G. Cho, C.-Y. Jeong, H.-S. Lee and G.-H. Rim, "Novel Zero-Voltage-Transition Current-Fed Full-Bridge PWM Converter for Single-Stage Power Factor Correction", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 13, No. 6, pp. 1005-1012, Nov. 1998.
- [5] Niu Liyong, Jiang Jiuchun and Zhang Weige, "Study on Optimum Design Procedure of Charger Based on

Full-Bridge Phase-Shifted ZVZCS Converter”, in Proceedings of IEEE VPPC 2008 Conference, Harbin, China, Sep. 2008.

- [6] Kutkut, N.H. and Luckjiff, G., "Current mode control of a full bridge dc to dc converter with a two inductor rectifier", in Proceedings of IEEE PESC 1997 Conference, St. Louis, USA, Jun. 1997.
- [7] T.-H. Kim, S.-J. Lee and W. Choi, "Design and Control of the Phase Shift Full Bridge Converter for the On-board Battery Charger of Electric Forklifts", Journal of Power Electronics, Vol. 12, Iss. 1, pp. 113-119, Jan. 2012.
- [8] H.-S. Song et al., "Verification of Battery System Model for Environmentally Friendly Vehicles Using a Battery Hardware-in-the-loop Simulation", IET Power Electronics, Vol. 6, Iss. 2, pp. 417-424, 2013.

저 자 소 개



김 태 훈 (金 允 勳)

2009년 숭실대 전기공학부 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 자동차부품연구원 전장시스템연구센터 연구원



송 현 식 (한문 저자명)

2001년 한국해양대 제어계측공학과 졸업. 2003년 광주과학기술원 기전공학과 졸업(석사). 2013년 고려대학교 제어계측공학과 졸업(박사). 현재 자동차부품연구원 전장시스템연구센터 선임연구원



이 백 행 (李 栢 行)

1992년 중앙대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 한양대 전자전기제어계측공학과 졸업(박사). 현재 자동차부품연구원 자동차융합기술연구본부 본부장



이 찬 송 (李 贊 松)

2010년 울산대 전기전자정보시스템 공학부 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)PNE SOLUTION 기업부설연구소 주임연구원



권 철 순 (權 哲 淳)

2010년 한밭대 제어계측공학과 졸업. 2012년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 (주)PNE SOLUTION 기업부설연구소 주임연구원



정 도 양 (鄭 道 陽)

1988년 한양대 재료공학과 졸업. 1990년 동 대학원 재료공학과 졸업(석사). 2003년 아주대 시스템공학과 졸업(박사). 2003년~2009년 LG화학 기술연구원 배터리 연구소 부장. 현재 스마트그리드 자문위원, 전기동력이륜차 워킹그룹 위원, 한국자동차공학회 표준화 위원회 자문위원, 성균관대학교 정보통신공학부 겸임교수, (주)PNE SOLUTION 부사장(연구소장)