특집 : 하이브리드차량의 기술동향

하이브리드차량에 적용된 전력전자 기술

이 현 동
(현대자동차 연구개발총괄본부 선행개발센터 선임연구원)

현대자동차는 연료 절약 및 차량 안전성 향상을 위하여 자동차 전력전자기술 개발에 매진해 왔다. 현대자동차의 자동차 전력전자기술은 고성능/고효율의 전기기기, 전력반도체, 제어기 S/W 등과 같이 크게 세 부분으로 구분할 수 있다. 이 세 가지 분야의 공통적인 주요 컨셉은 전력전자 부품의 원가 절감 및 하이브리드/연료전지 차량의 선행기술 확보를 동시에 실현하는 것이다. 현대자동차의 하이브리드 자동차에 적용된 전력전자기술 개발 현황과 원천기술 확보를 위한 많은 노력들을 소개하고자 한다.

1. 서 론

공기 오염, 지구 온난화, 화석연료 부족 등과 같은 이슈가 대두됨에 따라 친환경 차량의 필요성이 증가하고 있다. 북미/유럽의 배기가스와 탄소산화물 규제 강화가 그 예로 볼 수 있으며, 자동차 메이커들은 배기가스를 배출하지 않는 신개념의 파워트레인 개발을 강화하고 있다. 이러한 신개념 파워트레인으로서 가장 활발히 연구되고 있는 분야는 기계적 출력과 전기적 출력을 동시에 사용하는 하이브리드 파워트레인 분야임은 두말할 필요도 없다. 현대자동차 역시 하이브리드 파워트레인을 비롯한 새로운 친환경 파워트레인 개발에 적극 참여하고 있으며, 모든 자동차 메이커와 마찬가지로 미래에 있어서 지금이 가장 중요한 시기임에 틀림없다.

자동차가 친환경적으로 진화함에 따라 내연기관의 출력 증가와 더불어 사용되는 전기적 출력이 더욱 증가하게 되었다. 이는 전기에너지의 기계에너지로 변환할 때 효율이 높고 유해한 배기가스를 배출하지 않기 때문이다. 또한 내연기관을 사용하는 차량을 제동시킬 때 일반차량에서는 기계적 에너지를 흡수하지 못하고 열로 방출하는데 비해 전기적인 동력원은 높은 효율로써 에너지를 흡수하고 저장하며 회수할 수 있다. 많은 연구와 조사[1],[2]에 따르면 하이브리드 차량은 20년 내에 가장 많이 팔리는 차종이 될 것이며 연료전지차가 그 뒤를 이을 것으로 보고되고 있다. 결과적으로 향후 전력전자기술은 차량을 구동하는데 있어서 가장 중요한 역할을 하게 될 것이다. 자동차 전력전자기술은 부품의 출력밀도 향상과 와 안정성 확보 차원에서 중요한 요구사항을 직면하고 있으며, 이러한 요구사항을 만족시키기 위하여 기존 산업계에 적용되고 있는 전력전자기술에 더하여 새로운 시각에서의 기술적 접근이 필요하다.

2. 현대자동차 하이브리드

현대자동차는 1990년대 중반부터 하이브리드 자동차의 개발을 시작하여 2004년 클릭 하이브리드 50대를 환경부에 공급하였으며, 클릭 하이브리드를 기반으로 성능이 개선된 하이브리드 시스템을 현대 엑센트 및 기아 프라이드에 적용하였으며, 2005년 350대의 하이브리드 자동차를 정부에 공급하였다. 또한 기존의 엑센트 하이브리드와 비교하여 연비 성능이

향상되고 배기가스 특성이 개선된 차세대 엑센트 하이브리드를 2007년 개발 완료하였다. 본 장에서는 하이브리드 자동차 양산단계에 일보 접근한 개선 엑센트 하이브리드를 소개하고자 한다.

2.1 하이브리드 시스템 구성

엑센트 하이브리드는 병렬형으로 가솔린 엔진, 무단변속기, 전기모터, DC/DC 컨버터, 배터리 등로 구성되어 있으며(그림 1), 가솔린 엔진과 전기모터가 동력전달에 있어 통합되어 있다.

엔진, 무단변속기, 전기모터 등과 같은 부품은 엔진 룸에 위치하고 있으며, 전기에너지 저장 시스템으로써의 니켈수소 배터리는 차량의 트렁크에 장착된다. 인버터는 배터리 및 DC/DC 컨버터와 통합 패키지 형태로 장착되어 있으며, DC/DC 컨버터는 차량의 12V 전원으로서 기존의 얼터네이터를 대체한다.

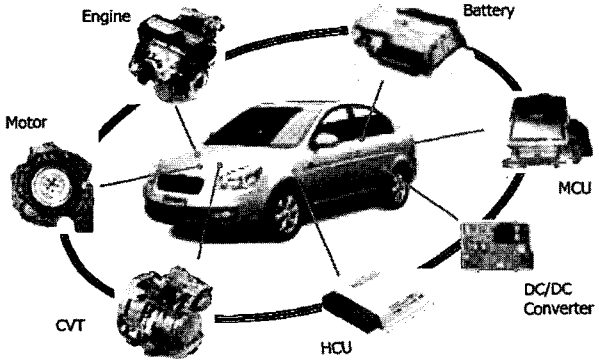


그림 1 하이브리드 시스템 구성도

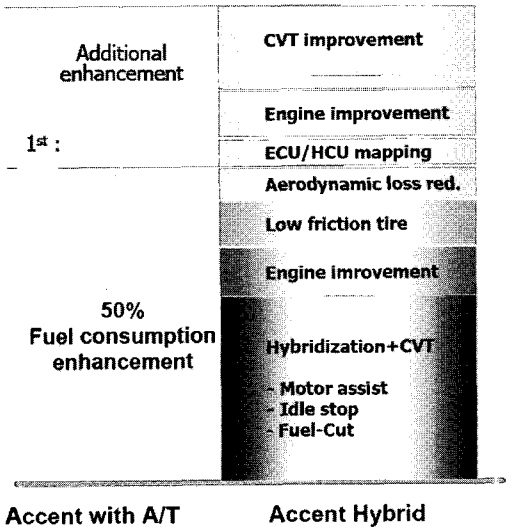


그림 2 엑센트 하이브리드 연비 증가

2.2 연비

엑센트 하이브리드 자동차의 연비 성능은 그림 2에서 보는 바와 같이 1.4리터 가솔린 엔진과 자동변속기를 장착한 기존의 엑센트 차량과 비교하여 약 50% 정도 향상되었다. 공기역학적 개선과 저마찰 타이어, 하이브리드 자동차에 적합한 엔진 출력 튜닝, 전기모터의 동력 보조 및 회생 기능, 아이들 스톱 및 연료 차단(fuel-cut) 기능등에 의해 달성되었다. DC/DC 컨버터를 포함한 모터구동 시스템 자체적인 효율 향상과 무단변속기 제어, 엔진 및 하이브리드 시스템 제어 알고리즘이 하이브리드 차량의 최종 목표 달성에 큰 역할을 차지하고 있다. 연비는 파워트레인 뿐만 아니라 차량중량 및 운전저항 등과 같은 차량측면의 요소에 대해서도 영향 받으므로 차량 중량 저감을 위해 차체, 샤시, 의장부품, 후드, 트렁크 리드, 도어, 휠, 시트 등의 제작시 알루미늄과 같은 경량 소재를 적용하였다. 그 결과로 전체적인 중량 감소가 실현되었고 전력전자 부품들의 추가에 기인한 중량 증가를 상쇄시켰다.

2.3 하이브리드 제어

연비 향상과 연비와 배기가스 저감을 위해 수많은 제어 알고리즘이 하이브리드 제어기(Hybrid Control Unit, HCU)에 탑재되었다. HCU는 차량, 운전자, 엔진, 배터리 등으로부터 신호를 입력받아 차량 전체를 제어한다. 그리고 하이브리드 파워트레인의 동작모드를 결정하고 3개의 제어기-엔진제어기(ECU), 변속기 제어기(TCU), 모터제어기(MCU)로 각각의 제어 지령을 전달한다. HCU의 중앙연산장치는 16비트 마이크로프로세서이며 모델 기반 소프트웨어인 ASCET-SD를 바탕으로 개발되었다(그림 3). 그림 4는 하이브리드 시스템의 제어 로직을 생성하는 모델을 보이고 있다. 본 모델은 엔진과 무단변속기 그리고 차량, 타이어 등의 타부품의 특성을 포함하고 있으며, 제어 알고리즘의 최종 목적은 공인운전모드 상에서 연료 소비를 최소화하는 것이다. 운전조건에 따른 엔진 토크, 속도, 모터 출력을 입력받고 엔진과 무단변속기 효율 맵을 이용하여 연료소비량을 계산한다. 운전점을 결정하는 방식에 있어서 몇가지 제약사항이 존재하는데, 주어진 차량 속도에 있어서 엔진속도는 무단변속기 비율의 최소값과 최대값에 의하여 제한된다. 또 다른 제약 사항은 엔진과 모터, 무단변속기의 토크 특성에 따라 운전의 개시 및 종료시의 배터리 입출력 에너지를 동일하게 유지시키는 배터리 SOC(State of Charge) 보존 조건이다.

엑센트 하이브리드에는 anti-backward slip control 기능이 적용되었으며, 이는 아이들 스톱후 엔진 재가동하는 순간에 경사면에서의 후방향 슬립을 방지하는데 효율적이다. 브레이크 시스템에 적용된 크립(creep) 보조시스템은 엔진 시

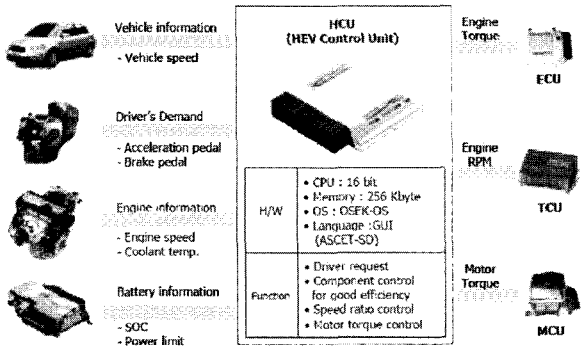


그림 3 하이브리드 제어시스템 구조

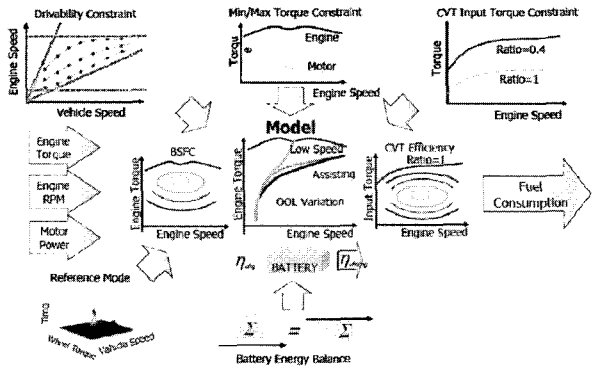


그림 4 하이브리드 제어 알고리즘의 기본 원리

동시 브레이크 페달을 놓은 이후 브레이크 오일 압력을 제한함으로써 충분한 크립 토크를 생성시킨다. 노면 기울기 측정을 위하여 측정 오차 회피 및 신호처리에 있어서 복잡한 알고리즘이 적용된 경사계가 함께 사용된다.

3. 하이브리드자동차 전력전자 기술

3.1 고성능/고효율 전기기기

3.1.1 하이브리드용 전기기기 설계 조건

하이브리드 자동차에서는 제한된 공간에서 높은 출력을 요구하기 때문에 고성능/고효율 전기가 필수적이다. 따라서 유도모터, BLDC 모터 또는 릴럭턴스 모터보다 더 높은 출력밀도와 효율 특성을 보이는 영구자석 동기모터가 차량 구동모터로 적극 고려된다. 특히 추가적인 릴럭턴스 토크를 활용할 수 있는 매입형 영구자석 동기모터(IPMSM)가 출력밀도 측면에서 유리하다. IPMSM은 높은 기동토크, 긴 정출력 구간, 높은 운전속도 등의 특성으로 인하여 현대자동차 하이브리드 자동차의 요구조건을 충족시킬 수 있도록 설계되었다. 또한 영구자석이 로터 코어에 매입되어 있기 때문에 영구자석의

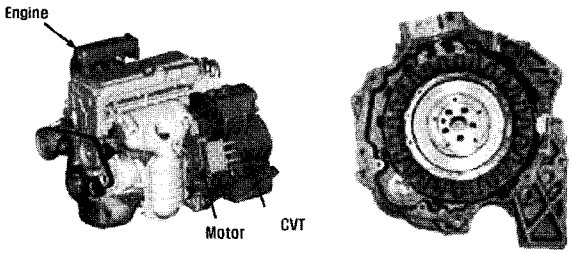


그림 5 하이브리드 파워트레인과 IPMSM

비산 가능성을 최소화시킬 수 있다. 그림 5는 엑센트 하이브리드에 적용된 IPMSM을 보이고 있다.

정격/최대 출력시 고정자 권선온도 상승(80℃미만)과 사이클 운전이 전기기기의 주요 설계 이슈이기 때문에 구동모터 성능에 미치는 온도 효과가 평가 항목에 포함되어야 한다. 큰 입력전류가 제한된 공간에 흐르는 하이브리드 적용에 있어서는 절연 파괴와 같은 열적 효과가 최악일 경우의 온도 안정성을 보장하기 위해서 정확한 열 해석이 반드시 필요하다.

IPMSM이 고속으로 운전될 경우 IPMSM 회전자 내부의 영구자석이 회전자의 원심력이나 전자기적으로 유기된 힘에 의해 스트레스를 받아 파괴될 가능성이 있다. 예를 들어 최고 운전속도에서(엑센트 하이브리드의 경우 6,000rpm)에서 전자기력보다 원심력이 훨씬 크기 때문에 구조 해석에서는 회전자의 파손을 방지하고 고토크밀도를 위하여 돌극성을 최대화하여야 한다.

3.1.2 하이브리드 구동모터용 자성 재료

최근 JFE steel이 우수한 자성 특성을 보이는 전기강판이 새롭게 개발되었다. 실리콘 구조이며 모든 Fe-Si 합금중에서 높은 자기적 특성을 보여준다. 자기변형이 최소화되는 특성을 보이기 때문에 전기모터의 동작시 정숙성의 최대화가 가능하다.

이러한 특성으로 인하여 하이브리드 전기모터로 철손을 최적화할 수 있어 일본과 유럽, 미국에서도 하이브리드 자동차용 전기모터의 전기강판 재료로서 널리 사용되고 있다.

영구자석은 출력특성을 결정짓는 중요한 요소로서 고성능 전기기기에 있어 필수적이다. 하이브리드 자동차용 전기기기에서는 엔진 룸의 고온 환경으로 인하여 영구자석의 감자 또는 출력/토크 측면의 성능 악화를 유발할 수 있다. NEOMAX, Shinetsu 등의 주요 자석 메이커들은 12kOe 이상의 고보자력 특성을 보이는 고성능 자석 개발에 박차를 가하고 있다.

전기모터에 있어 동작전압과 온도와 마찬가지로 고정자 권선과 절연 재료는 전기모터의 정격을 결정하는 매우 중요한

요소이다. 특히 하이브리드차용 전기모터의 경우 모터에 인가되는 전압이 매우 큰 범위로 가변적이고 흐르는 전류 역시 운전조건에 따라 빈번하게 변동하기 때문에 절연재 내량에 대한 설계와 열싸이클에 대한 수명에 대한 주의깊은 설계가 필요하다.

3.2 인버터

3.2.1 구성 및 특징

인버터는 크게 제어부와 전력부로 구성되어 있으며, 전력부는 파워모듈과 직류 캐패시터, 전류 센서, 방전 저항, 방열 시스템 등으로 구성되어 있다. 그림 6은 인버터의 구성도를 나타내고 있다. 파워모듈은 고전압 배터리로부터의 직류 전압을 PWM 기술을 이용하여 펄스 형태의 교류 전압으로 변환시키고 직류 캐패시터는 인버터단의 전류 리플을 저감시켜 배터리 전압을 일정하게 유지시키는 역할을 한다. 인버터 냉각시스템은 강제 공냉식으로 배터리와 직류전력변환장치와 공유하고 있다. 모터 구동 알고리즘과 차량 인터페이스를 포함하는 제어 로직이 제어보드에 구현되어 있으며 파워모듈로서 적용된 IGBT를 턴 온/오프하기 위한 게이트 구동보드에 PWM 신호를 전달한다.

구동모터의 최대속도는 시스템 구성에 의해 결정되는데 하이브리드 자동차의 엔진 크랭크축과 구동모터가 직결되므로 영구자석 동기모터의 최대속도는 6,500rpm이며, 모터의 역행 및 회생을 위하여 2상한 운전제어가 필요하다. 출력 토크의 정밀 순시제어를 위하여 회전자 속도를 감지해야 하며, 속도 센싱을 위하여 고신뢰성과 강인성을 갖춘 홀센서 또는 리졸버가 사용된다. 파워 모듈의 보호를 위하여 파워 모듈 및 인버터 냉각수의 온도를 실시간으로 감시하여 구동모터의 출력제한 제어에 반영해야 한다. 또한 자동차 전장 및 고전압 부품의 보호를 위하여 직류 전압 (+) 및 (-)단과 차체 사이의 전위차를 하드웨어적으로 감지하고 유사시 시스템의 차단을 보장하는 회로를 설계하여 장착해야 한다. 그림 6과 표 1에 엑센트 하이브리드 자동차에 적용된 인버터에 대한 간략한 사양이 표시되어 있다.

3.2.2 파워 모듈

자동차용 파워 모듈의 요구 사양은 산업용 파워 모듈의 사양보다 더욱 높다고 할 수 있다. 표 2에 자동차용과 산업용 파워 모듈을 비교하였다. 신뢰성 시험의 경우 자동차용 요구사양은 산업용 그것에 비하여 2배에서 10배까지 높다. 진동 사양은 자동차용 사양이 산업용보다 2~3배 높다. 일반적으로 내연기관을 장착한 차량의 엔진 룸 온도는 위치에 따라 다르겠지만 80~105℃ 범위에 있으므로 이를 고려한 냉각설계가 이루어져야 한다.

현대자동차의 차세대 하이브리드 자동차에 적용될 예정인

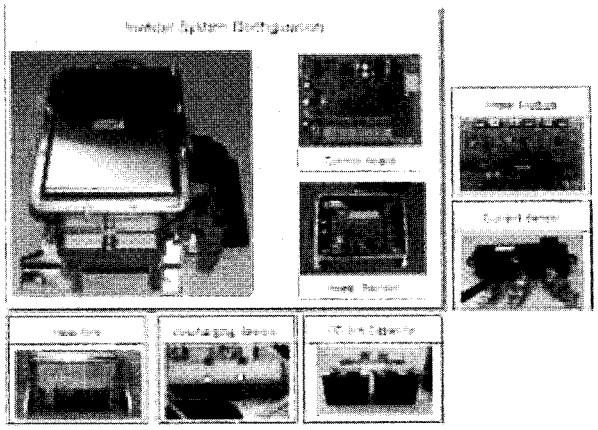


그림 6 하이브리드 인버터 시스템

표 1 인버터 사양

Type	Voltage source inverter
Max. Power	12kW @1200rpm
Operating voltage	106 ~ 200Vdc
Cooling	Forced air (Max. 65㎥/hr)
Size	265*205*170㎜³ (8.7L)

표 2 자동차용 파워모듈 사양

	Automotive application	Industrial application	Remark
Vibration	5~6G	2~3G	
Temperature	Up to 150℃	Up to 125℃	Junction Temp.
Material for base plate	Cu, C-CU, CuMo, AlSiC	Cu	For better cooling effect
Power cycle	1,000k cycles	300k cycles	@Tj =125℃, ⊿Tj=50℃

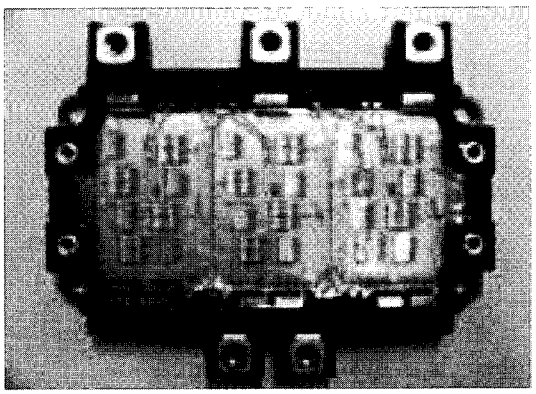


그림 7 하이브리드 자동차용 IGBT 파워 모듈

파워 모듈의 베이스 재질은 종래의 Cu 재질보다 비용이 증가함에도 불구하고 C-Cu, CuMo, AlSiC 등의 재료를 채용함으로써 열 수명 향상을 꾀하고 있다. 그림 7에서 대량 생산을 목표로 트렌치 게이트 기술이 적용된 non-punch through 방식의 현대자동차 차세대 하이브리드 자동차용 파워 모듈을 보이고 있다. 기계적 충격 및 열 사이클에 대한 높은 신뢰성 확보를 위하여 부피 및 무게 절감을 위한 플라스틱 케이스 패키지보다 몰딩 패키지 기술이 고려되고 있다.

3.2.3 제어 알고리즘

앞에서 언급한 바와 같이 영구자석 동기모터는 하이브리드 자동차에 널리 사용되고 있다. 특히, IPMSM은 성능과 기계적 구조 측면에서 몇가지 장점이 있다. 영구자석 동기모터는 회전자에서의 손실이 작아 효율이 높으며, 회전자 구조로 인해 고속운전이 가능하다. 적용된 영구자석 동기모터는 소형화를 위하여 집중권 고정자 권선 방식을 채용하였고 고토크 특성을 위하여 극수를 크게 설계되었기 때문에 전류제어에 있어 이를 고려하여야 한다. 영구자석 동기모터 제어에는 빠른 토크 응답이 가능한 벡터 제어 방법을 적용된다. 그림 8에 영구자석 동기모터 구동을 위한 벡터 제어의 블록 다이어그램이 나타나 있다. D축과 q축 전류제어기, d-q변환기, 입력 토크와 속도 명령에 따른 d-q축 전류를 생성하는 전류지령 발생기 등으로 구성되어 있다.

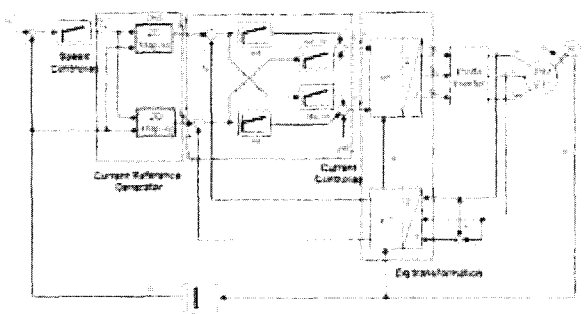


그림 8 영구자석 동기모터 제어 블록 다이어그램

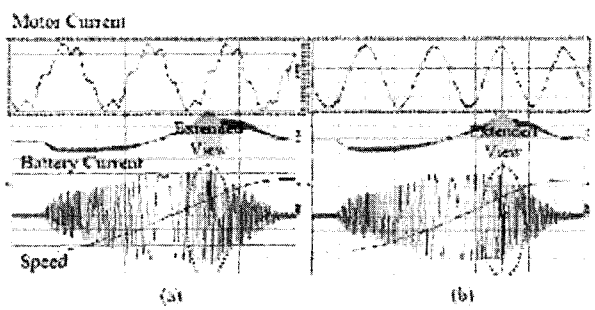


그림 9 고조파 저감 전류제어 적용시 모터 상전류

집중권 방식의 회전자 권선과 영구자석 매입형 회전자의 경우, 수백 Hz의 대역폭을 갖는 전류제어기를 이용하여 역기전력의 5차 및 7차 고조파 영향을 상쇄시키기 어려우며, 이 고조파 성분은 모터 토크의 진동을 유발하며 시스템 효율을 감소시킨다. 역기전력의 5차 및 7차 고조파 성분을 제거하고 뛰어난 토크 응답 특성을 확보하기 위하여 기존의 회전자각과 동기되는 좌표계 이외에 추가로 5차 및 7차 고조파와 동기되는 두개의 별도 동기좌표계를 추가하는 방법이 전류제어에 적용하였다.

그림 9에 기존 전류 제어 방식의 모터 상전류 실험 결과(a)와 고조파 성분 제거 방식이 적용된 실험 결과(b)가 나타나 있다. 고정자 전류의 5차 및 7차 고조파 성분이 제안된 방법에 의하여 개선됨을 볼 수 있다.

3.3 고효율 DC/DC컨버터

3.3.1 구성 및 특징

종래의 내연기관 자동차는 교류발전기로 램프, 팬 등의 12V 전압을 발생시켰으나, 하이브리드 자동차의 경우 교류발전기 대신 DC/DC 컨버터를 사용하여 12V 전압을 생성시킨다. DC/DC 컨버터는 고전압 전원을 차량 전장부하에 적합한 전원으로 변환시키는 장치이며, 고전압 시스템과 기존의 저전압 차량 전장 시스템을 전기적으로 분리시키는 역할을 한다. 입력 전원측은 고전압, 고용량 니켈수소 또는 리튬 배터리이며, 출력측 부하는 12V 배터리 또는 12V의 전장부하이다. DC/DC 컨버터는 여분의 전력을 재사용하므로 차량의 연비 향상에 기여하며 또한 아이들 스톱 기능이 작동되는 경우에도 12V 전력을 공급할 수 있다. 현대자동차의 엑센트 하이브리드의 경우 교류발전기를 사용한다면 아이들 스톱시 12V 전력 공급이 불가능하기 때문에 12V 배터리의 방전 또는 조명이 흐려지는 등의 현상을 야기시킬 수 있다. 또한 교류발전기를 DC-DC 컨버터로 대체함으로써 엔진 부하의 감소를 보장하여 엔진 출력 향상 효과를 얻을 수 있다.

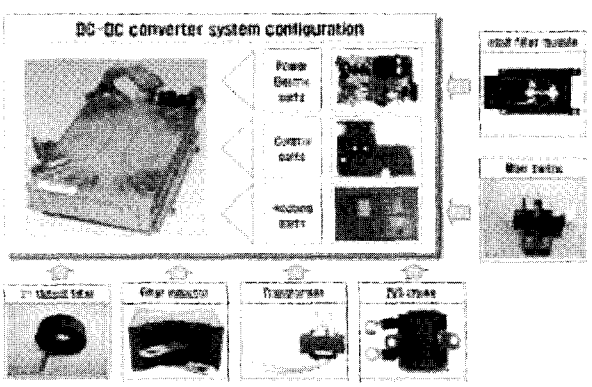


그림 10 하이브리드 자동차용 DC/DC 컨버터 시스템

표 3 DC-DC컨버터 사양

Type	Soft-switching, Full bridge
Power rating	1.1kW
Operating voltage	120 ~ 180Vdc
Output current	0~75A
Efficiency	Above 88%

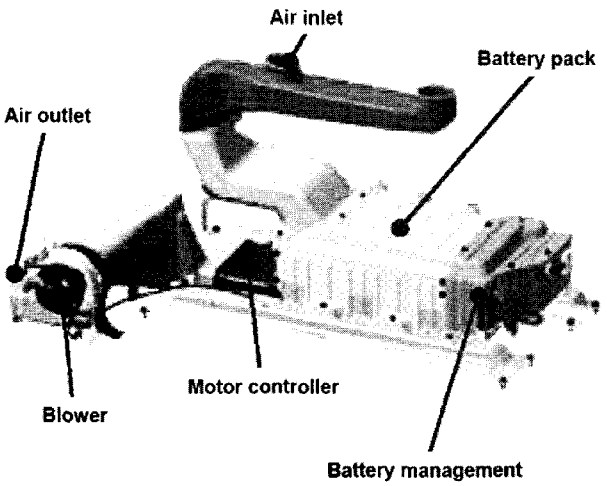


그림 11 하이브리드 자동차 배터리 시스템

3.4 배터리 시스템

하이브리드 자동차의 배터리 입출력 요구사양은 모터 출력 사양에 기초한다. 엑센트 하이브리드 자동차용 배터리 시스템의 구성도는 그림 11과 같다.

3.4.1 배터리팩

하이브리드 자동차용으로 니켈수소 배터리가 가장 널리 사용되고 있으며, 현재 니켈수소 배터리에 비하여 가격 측면에서는 불리하나 성능 측면에서 우수한 리튬이온 고분자(Li-IP) 배터리가 양산적용을 목표로 개발 중에 있다.

3.4.2 배터리 제어 시스템

하이브리드 자동차의 에너지 저장장치인 배터리 제어시 안전성 및 신뢰성이 확보되어야 한다. 배터리 제어 시스템(Battery Management System, BMS) 하드웨어 기술의 핵심은 각 배터리 셀/모듈의 센싱 회로를 분리하도록 설계하는 데 있다. 하이브리드 자동차용 리튬 이온 2차 배터리 시스템 개발을 위해 기존 제어기 크기를 1/10로 줄인 제어용 IC 개발이 필요하다. 배터리 제어 소프트웨어의 주요 기능은 배터리의 충전상태(State of Charge, SOC) 산출과 전압/온도 변화에 따른 가용전력 계산이며, 충전상태 계산에 있어서의 오차는 하이브리드 자동차 운전점 및 이에 따라 연비에 직접적인 영향을 미치므로 배터리의 충전상태 산출에 이에 대한 보정이 반드시 포함되어야 한다. 이러한 기능은 모터, 차량 제어와 같은 여러 기능과 함께 통합제어기에 구현된다.

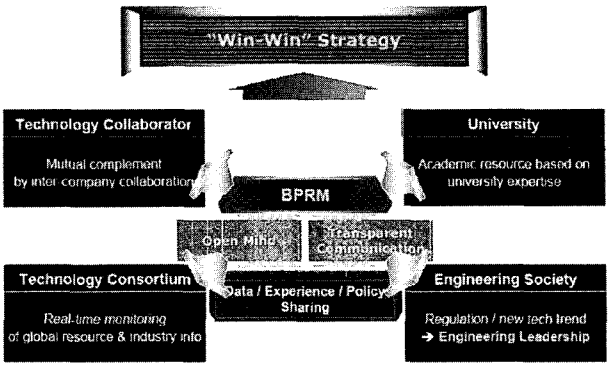


그림 13 현대자동차의 BPR 전략

4. 결 론

본 논문에서는 현대자동차의 하이브리드 자동차 개발과 하이브리드 자동차 운전에 있어 핵심인 전력전자기술 및 주요 핵심 부품에 대하여 간단하게 기술하였다. 현대자동차는 하이브리드 자동차 연구 개발을 통하여 성능 향상과 및 가격 경쟁력 확보에 노력을 경주하고 있으며, 하이브리드 양산시 기존 자동차 생산 라인과의 공용화를 통하여 생산비용을 절감하려는 생산기술 차원의 노력도 행해지고 있다. 연산 수백대 규모의 소량생산체제 구축을 통하여 이와 같은 양산 기술 확보에 주력하고 있으며 수년 내에 수천대 규모의 하이브리드 혼류 생산라인 구축에 주력할 계획이다.

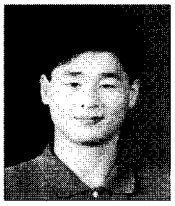
하이브리드 자동차 및 연료전지차 등과 같은 미래 환경친화 차량용 전력전자 부품의 개발 및 생산과 관련된 국내 기반이 충분치 못한 상황을 극복하기 위하여 자동차 OEM의 주도하에 관련된 전문 메이커, 대학교, 정부, 연구소, 사회 단체 등의 긴밀한 협력이 필수적이다. 현대자동차는 친환경차량용 전력전자 분야에 있어 미래 신기술 개발을 위하여 대학 및 연구소와의 협력관계를 구축하고, 양산 기술 개발을 위하여 제품의 컨셉 단계부터 전문 메이커와 협력하는 등 자체 BPR(Business Partner Relationship) 전략을 수립하여 운영하고 있다.

참 고 문 헌

[1] Automotive World Car Industry Forecast Report, Global Insight, 2004.

[2] The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs, The National Academies, 2004.
[3] Bianchi, N., Bolognani, S., "Interior PM Synchronous Motor for High Performance Applications," PCC-Osaka 2002, Proceedings of the Power Conversion Conference, Vol. 1, pp.148-153, 2-5 April 2002.
[4] C.Mademlis, V.G.Agelidis, "A High-Performance Vector Controlled Interior PM Synchronous Mo-tor Drive with Extended Speed Range Capabil-ity," IECON' 01, Vol. 2, pp. 1475-1482, 2001.
[5] K. H. Liu, R. Oruganti, F. C. Lee, "Quasi-resonant converter - Topologies and Characteris-tics," IEEE Trans, Vol.1, No.2, pp.62-74, 1987.
[6] R. A. Fisher, K. D. T. Ngo, and M, H, Kuo, "500kHz 250W dc-dc converter with multiple output controlled by phase-shift PWM and magnetic amplifiers," High Frequency Power Conversion Conf, Rec. pp.100-110, 1988.

〈저 자 소 개〉



이현동(李炫東)

1969년 10월 7일생. 1993년 서울대 공과대학 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1999년~현재 현대-기아자동차 연구총괄개발본부 선임연구원.