전기자동차용 전기동력장치 기술

• 임 형 빈 ▌현대자동차 선행개발센터, 선임연구원
e-mail : hbihm@hyundai-motor.com
• 이 현 동 ▌현대자동차 선행개발센터, 선임연구원
• 김 호 기 ▌현대자동차 선행개발센터, 수석연구원

이 글에서는 전기에너지를 기계적 에너지로 변환시켜 차량에 필요한 동력을 발생시키는 전기동력장치인 모터와 모터제어기에 대하여 그 기술 현황을 소개하고자 한다.

전기동력장치(electric power train)는 전기를 사용하여 기계적 동력을 발생시키는 장치를 말하는 것으로서 내연기관 자동차의 엔진과 변속기로 이루어진 일반적인 파워트레인(power train)과 구별된다. 엔진이 화석연료로부터 얻은 열에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 반면, 전기동력장치는 배터리 등으로부터 얻은 전기에너지를 기계적 에너지로 변환시킨다. 이처럼 차량에 필요한 기계적 동력을 다른 에너지원으로부터 발생시킨다는 면에서 전기동력장치와 엔진은 동일한 역할을 수행하고 있다.

전기동력장치는 실제적으로 모터와 모터제어기의 두 가지 요소로 구성되는데, 모터는 전기로부터 회전력을 발생시키는 장치이고, 모터제어기는 원하는 회전속도와 토크를 출력하도록 모터를 제어하는 장치이다. 전기자동차에서 사용되는 배터리 등의 전기에너지원은 출력 전압의 크기와 형태를 직접 제어할 수 없기 때문에 가변 전압, 가변 주파수를 출력하는 모터제어기를 사용함으로써 모터를 제어하게 된다.

이 글에서는 전기자동차(electric vehicle) 및 하이브리드 전기자동차(hybrid electric vehicle)에 사용되는 전기동력장치로서의 모터와 모터제어기에 대한 기술 현황을 다루어 보고자 한다. 먼저 전기모터와 모터제어기의 원리 및 현황을 설명하고 최신 기술 동향으로서 전기동력장치의 일체화 경향도 설명하기로 한다.

전기자동차용 모터

모터는 전기에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 기계장치로서 그 힘의 발생은 플레밍의 왼손법칙, 즉, 자기장 내의 도체에 전류가 흐를 때 발생하는 전자기력의 원리에 의한다. 모터는 인가되는 전류의 형태에 따라 크게 직류(DC) 모터와 교류(AC) 모터로 나뉜다.

직류모터는 영구자석 또는 전자석으로 되어 있는 계자로 자기장을 형성시키고, 전기자(amarture)에 전류를 흘려 전자기력을 발생시키는 구조로서, 내부에 전류를 한 방향으로만 통전시키는 기계적 접촉기구인 정류자(commutator)가 존재하는데, 이것이 마모 발생 및 주기적 보수를 필요케 하여 점차 그 사용이 감소하는 이유가 되고 있다.

교류모터는 고정자와 회전자로 구성되는데, 고정자에 3상 의 교류전압을 인가하여 흐르는 전류와 회전자 자계가 작용하여 전자기력을 발생시킨다. 현재 전기자동차에는 대부분 교류 모터가 사

영구자석 동기모터는 특히 10kW~20kW 출력 범위의 저용량 모터와 크기에 제약을 받는 박형 모터로의 적용이 유리하므로 엔진과 결합된 형태의 병렬형 하이브리드자동차에 대부분 사용된다.

용되는데, 그 중에서도 유도모터(induction motor)와 영구자석동기모터(permanent magnet synchronous motor)가 보편적으로 사용된다.

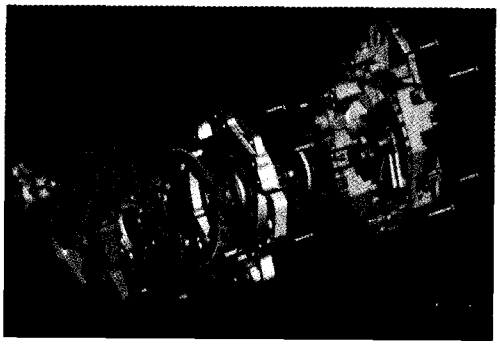
유도모터

유도모터는 변압기의 원리를 응용하여 회전자 도체에 전자유도에 의한 전류를 유기시켜 고정자 자계와 작용케 하여 회전력을 발생시키는 모터로서, 구조가 간단하여 내구성이 높고, 고속운전에 적합하며, 가격적으로 저렴한 특징을 지니고 있다. 유도모터는 소형에서 대형의 전기자동차에 이르기까지 30kW~240kW의 출력 범위의 것이 사용되고 있다. 유도모터는 제조 및 제어 기술이 이미 일정 수준에 도달하여 기존의 생산기반을 전기자동차용으로 활용할 수 있어, 개발 비용이 적게 들고 대량생산에 적합하다는 것이 장점으로 부각된다. 반면에 기술적 측면에서는 회전자 손실로 인한 발열 및 효율저하가 단점으로 지적되고, 고토크 특성을 만족시키기 위하여 극수를 증가시킬 경우 고정자 권선의 단부 결선(end wiring)과 고정자 철심의 증가로 인하여 부피와 무게가 증가한다는 점이 소형, 경량화가 요구되는 전기자동차 분야에 약점으로 간주되고 있다. 그럼에도 유도모터는 전기자동차용 모터로 현재까지도 실용적인 대안으로서 폭 넓게 적용되고 있다.

영구자석동기모터

영구자석동기모터는 회전자에 영구자석을 장착하여 자계를 발생시키는 모터로서, 회전자 발열 및 손실이 없고 고에너지 밀도의 자석을 사용함으로써 유도모터에 비하여 고효율, 소형, 경량, 고토크 등의 전기자동차에 적합한 특징을 갖는다. 반면, 영구자석의 가격이 높고, 온도, 과부하 및 고속운전 등에 대한 영구자석의 적절한 보호가 필요하다는 단점이 있다. 또한, 유도모터에 비하여 자석을 회전자에 부착하거나 내부로 삽입시키는 등의 추가적인 제조 비용이 소요되는 면이 있다. 영구자석 동기모터는 특히 10kW~20kW 출력 범위의 저용량 모터와 크기에 제약을 받는 박형 모터로의 적용이 유리하므로 엔진과 결합된 형태의 병렬형 하이브리드자동차에 대부분 사용된다. 영구자석 동기모터의 일종으로서 사다리꼴 역기전력과 구형파 전류 구동의 특징을 가지는 무정류자 직류모터(BLDCM : Brushless DC Motor)는 고속운전에 한계와 토크 리플 발생의 단점에도 불구하고 단위 전류당 발생 토크 및 출력밀도가 우수하고 제어가 용이하다는 측면에서 전기자동차에 널리 사용되고 있다.

영구자석은 신재료의 개발에 따라 고에너지밀도화되고 있는데, 1920년대부터 현재까지 페라이트(ferrite)계열, 알니코(AlNiCo)계열과 사마륨-코발트(SmCo)계열 등이 개발되어 오고 있으며, 1980년대부터 이들보다 에너지 밀도가 우수한 네오듐-철-보론(NdFeB)계열의 영구자석이 개발되어 모터용으로 사용되고 있다. 네오듐계 영구자석은 같은 희토류계 자석인 사마륨계 영구자석과 비교하였을 때, 에너지 밀도, 강도 등에서 우수한 특성을 보이나, 최대 허용 온도의 측면에서 다소 불리한 특성을 갖고 있다. 그러나 전기자동차에서는 모터의 최대온도가 네오듐계 영구자석의 한계온도인 150°C를 초과하지 않으므로 적용성에는 문제가 없다 할 것이다. 현재 네오듐계 영구자석의 가격은 kg당 약 $50의 수준이며, 2005년경에는 kg당 약 $40 수준이 예상되고 있다. 이처럼 영구자석 가격



하이브리전기차용 박형 영구자석동기모터

이 지속적으로 하락하고 제조기술도 발전할 것이므로 영구자석 동기모터는 현재의 중소출력 범위 위주의 적용으로부터 향후에는 대출력까지의 전출력 범위로 적용이 확대될 것으로 기대된다.

릴럭턴스 모터

최근에 릴럭턴스모터(switched reluctance motor)가 전기자동차용 모터의 새로운 대안으로 부상하며, 집중적인 연구 개발이 진행되고 있는데, 이 모터는 회전자가 철심으로만 구성되어 있어 고정자에 자계를 형성시키면 회전자는 자기저항이 최소화되는 위치로 움직이려는 힘 즉, 릴럭턴스(reluctance) 토크를 이용한 모터로서 유도모터와 마찬가지로 구조가 간단하고 내구성이 높아 고속운전에 적합하며 고토크 발생이 가능한 장점이 있다. 반면, 토크 리플이 크고 전자기적 잡음과 기계적 진동이 여타 모터에 비하여 크다는 것과, 모터제어기의 구성 측면에서 기존의 3상 인버터를 사용할 수 없고 전력용 반도체가 다량으로 소요되어 비용이 증가한다는 것이 단점이다. 고정자의 구조는 유도모터의 것과 상이하여 기존의 생산기반을 활용할 수 없지만, 주재료가 값싼 철이며, 생산공정이 단순하여 대량생산할 경우 가격이 매우 저렴할 것으로 예상되고 있다. 따라서 장기적으로는 릴럭턴스모터가 기술 성숙에 따라 대출력 용량의 전기자동차 영역에서 기존의 유도모터를 대체할 것으로 기대된다. 또한, 향후 적용 확대가 예상되는 다른 형태의 모터로서 매입형 영구자석동기전동기(interior permanent magnet synchronous motor)가 있는데, 이는 영구자석 동기모터와 릴럭턴스모터의 특징을 함께 가지는 혼합형 모터로서 향후 모터 방식의 구분을 모호하게 하면서 또 다른 주류를 이룰 것으로 기대된다.

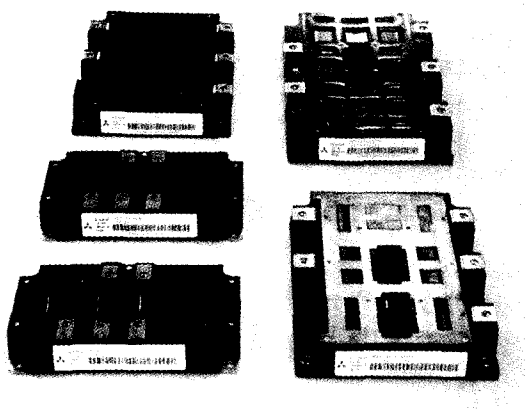
모터제어기

모터와 함께 전기자동차의 전기동력장치를 구성하는 모터제어기(MCU : Motor Control Unit)는 모터의 회전속도와 토크를 제어하는 장치이다. 전기자동차의 에너지원은 배터리 또는 수소연료전지로서 일정한 전압을 가지는 직류 전압원으로 동작하기 때문에 모터를 제어하기 위해서는 모터에 인가되는 전압이 가변되어야 함은 필수적이다. 전기자동차용 모터로는 교류모터가 사용되기 때문에 모터제어기는 결국 가변 전압, 가변 주파수의 교류전압을 물리적으로 출력하는 기능을 하는 것이다. 모터제어기의 내부는 인버터(inverter)와 제어기로 구성된다. 인버터는 직류전원을 교류전원으로 변환시키는 장치를 말하는데 그 핵심부품은 전력용 반도체이다. 전력용 반도체는 스위칭 소자(switching device)로서 동작하는데, 간단히 기능을 설명하면 입력되는 직류전원을 단속하는 즉, 끊었다 붙였다 하는 역할을 한다. 이로써 모터로 인가되는 출력 전압과 전류를 원하는 대로 만들 수 있어 모터로 향하는 전력의 흐름을 조절할 수 있게 된다. 제어기는 모터제어에 필요한 연산처리와 차량내 각종 입출력 신호를 처리하는 부분으로서 중앙연산처리장치(CPU)와 주변회로로 구성된다. 모터제어를 위해서는 모터의 모델에 근거한 제어기법이 사용되는데 교류모터의 경우 자속기준 제어가 보편화된 제어기법으로서 적용되고 있다. 이처럼 모터제어기는 제어기술과 디지털 회로기술 및 전력용 반도체 기술이 유기적으로 결합된 장치로서 향후에도 기술과 부품의 발전에 따라 지속적으로 기능과 성능이 향상되고 가격은 하락하리라 전망된다.

전력용 반도체

현재 전기자동차용 모터제어기에 사용되는 인버터의 용량은 10kVA에서 300kVA 정도이며, 그 스위칭 주파수는 1~20kHz의 범위에 있다. 전력용 반도체는 접합구조 및 동작원리에 따라 MOSFET, 전력용 트랜지스터(power transistor), IGBT, Thyristor, GTO 등 다양 다종의 것들이 존재하는데, 이 중에서도 수십~수백kW의 응용에 적합한 IGBT가 전기자동차에 거의 표준으로 사용되고 있다. 전기자동차가 필요로 하는 IGBT 는 일반 산업용보다 고효율 및 높은 내환경성이 요구되므로 자동차 전용의 부품 개발이 진전되고 있다. 전기자동차용 IGBT의 발전방향은 크게 손실 저감, 스위칭 특성 개선, 패키징 개선, 다기능화의 네 가지 정도로 요약될 수 있다.

우선 손실 저감 측면에서는 도통 및 스위칭에 따른 IGBT 손실을 감소시키기 위하여 반도체의 접합 구조를 개선하여 도통상태전압강하를 감소시키고, 역병렬 다이오드의 특성을 개선하여 스위칭시 역회복 전류의 크기 및 시간을 감소시키고자 하는 노력이 진행중이다. 또, IGBT의 고속 스위칭으로 인한 전자기장해(EMI) 등과 관련한 문제점들을 완화시키고자 전압/전류 상승률을 제한하고 패키지 내부의 인덕턴스를 최소화하는데 노력하고 있으며, 소형경량화와 함께 자동차용 환경에 적합한 내온, 내습, 내진, 내충격 특성을 가지도록 구조 설계 및 패키징에 관한 연구도 활발히 진행중이다. 전력용 반도체의 다기능화 측면에서도, 하나의 패키지 내부에 IGBT 구동 및 고장진단 회로는 물론 사용자가 요구하는 기능을 내장시킨 주문형의 지능형 전력용 반도체 모듈(IPM : Intelligent Power Module)이 등장할 것으로 예상된다. 일본의 일부 반도체 메이커에서는 이미 전



전기자동차용 지능형 전력용 반도체 모듈

하나의 패키지 내부에 IGBT 구동 및 고장진단 회로는 물론 사용자가 요구하는 기능을 내장시킨 주문형의 지능형 전력용 반도체 모듈이 등장할 것으로 예상된다.

기자동차 전용으로 600V 600A 급까지의 6-package IPM을 출시하고 있는데, 이는 기존 일반 산업용 IPM의 전류정격 범위를 차량 응용에 적합하도록 크게 증가시킨 것으로, 각각의 모터 출력 라인마다 개별적인 고장감시 기능이 있는 등 지능화 측면에서 발전된 면을 보이고 있다. 결국 전력용 반도체는 전기자동차가 요구하는 기능, 성능 및 내구성을 만족시키도록 발전될 것이다.

중앙연산처리장치

전기자동차용 모터제어기의 CPU는 모터의 구동 제어와, 차량 신호 처리, 시스템 보호/감시 등의 다양한 기능을 수행하고 있는데, 현재는 차량전자장치에 주로 적용되고 있는 인피니온(Infenion) 사의 C167계열의 16비트의 마이크로프로세서가 많이 사용되고 있다. 그러나 최적제어, 인공지능 등 고성능 모터 제어를 위한 최신의 제어이론은 많은 연산 처리를 요구하고 있으므로 연산처리 능력의 증대를 위하여 32비트 RISC(Reduced Instruction Set Computer) 또는 DSP(Digital Signal Processor)의 적용이 시도되고 있으며, 향후 확대될 것으로 전망된다. 전기자동차 또는 하이브리드 전기자동차에는 배터리, 엔진, 모터, 차량 등에 많은 수의 제어기가 사용되고 있는데, CPU의 성능 향상을 기반으로 시스템의 최적화 측면에서 서로 통합하려는 시도가 진행되고 있다. 또한 범용 모터제어 기능을 가진 CPU도 출시되고 있는 실정이어서, 결국 차량에 필요한 각종 주변회로와 통신기능 및 모터제어 기능을 내장한 자동차용의 CPU 또는 주문형 집적회로(ASIC)가 출현하리라 예상된다.

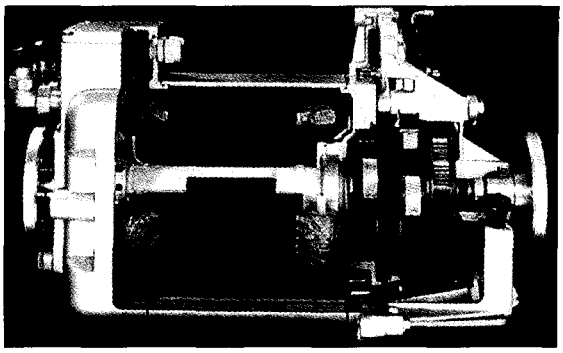
모터제어기법

전력용 반도체, 마이크로프로세서 그리고 각종 제어이론의 발달에 힘입어 유도모터 또는 영구자석동기모터와 같은 교류전동기의 제어기법은 눈부신 발전을 거두고 있으며, 유도모터의 경우 발생토크를 순시적으로 정확하게 제어할 수 있도록 자속기준제어(field oriented control)가 전기자동차 의 모터제어기에 보편화되어 있다. 또한, 최근에는 전기자동차용 유도모터의 구동제어기법으로 직접토크제어방식(direct torque control)의 적용가능 여부가 검토되고 있다. 직접토크제어는 그 구현에 있어서 간단하고, 알고리즘 자체가 모터 정수의 변

화에 강인하기 때문에 온도, 습도와 같은 환경조건이 열악하고, 부하의 변동이 극심한 차량 응용분야에서 자속기준제어보다 그 적용성이 더욱 뛰어나리라 예상된다. 한편, 자동차 응용분야에서 기계적 진동 또는 전자기적 노이즈에 대하여 가장 취약한 부분 중의 하나인 모터 속도측정장치를 삭제하려는 센서리스(sensorless) 제어기법에 관한 연구가 세계적으로 활발히 진행 중이다. 그러나 현재 센서리스 제어는 그 특성에 있어서 한계가 있을 뿐만 아니라 특히 자동차의 안전상 문제로 인해 아직 실제 적용성은 크지 않다고 볼 수 있다.

일체화 기술

부품의 실제 차량 적용에서 일어나는 중요한 문제 중 하나는 부품의 장착과 관련하여 공간적인 제약 때문에 기계적 간섭이 발생하거나 최악의 경우 장착이 불가능하다는 것이다. 때문에 차량 부품의 부피를 최소화시키는 것이 부품 개발의 중요한 목표라 할 수 있다.



감속기 일체형 인라인 모터

전기동력장치에서도 차량 장착에 소요되는 부피를 줄이기 위해서 다양한 방식의 패키징이 시도되고 있다. 인라인(inline motor)모터는 축의 중앙이 비어있는 중공형 모터와 유성기어 형식의 감속기를 일체화한 모터이다. 이 모터는 다축으로 구성되는 통상적인 감속기와 함께 조합된 모터에 비해서 외경과 부피를 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

다른 개념의 일체화로서 모터와 모터제어기를 하나의 패키지로 결합시킨 구성도 시도되고 있다. 그 장점으로는 장착 위치 단일화에 따른 패키징 간소화를 들 수 있고, 냉각구조를 공유할 수 있는 것도 큰 장점이 된다. 4륜 구동 하이브리드 전기자동차의 경우에도, 각각의 전후륜 모터에 필요한 두 개의 모터제어기를 하나의 패키지로 하는 것이 일반화되고 있다.

이와 같이 일체화 기술은 전기동력장치와 동력전달계의 구성에 폭넓게 적용되고 있는데, 이는 또한 최근 부각되고 있는 부품 모듈화와 부합되어 부품수 감소, 원가절감 등에도 기여하고 있다.

기계용어 해설

충격제어(Control of Shock)

유압계통에서 발생하는 과도현상은 사고나 작동과정 중의 한 단계로 일어나고 계통의 안전에 치명적인 영향을 주거나 성능의 저하를 야기시킬 수 있다. 따라서 과도현상에서 발생하는 압력충격치를 제어하기 위해 여러가지 방법이 제안되고 있다. 밸브나 파열원판(rupture disk)을 유동장 내에 직접 설치하여 제어하거나 어큐뮬레이터나 서지 탱크를 사용하여 간접적으로 충격을 흡수한다. 그러나 아직까지 충격치의 제어량을 정확하게 예측할 수 있는 제어방법은 개발되지 못하고 있다.

핵융합 발생장치(Fusion Generator)

태양 내부와 같은 극한 환경(초고온 플라즈마)에서 두 개의 원자핵이 합쳐지면서 막대한 에너지를 지속적으로 발생시키는 장치