



Electrified Drive Trains in Heavy-Duty Vehicles

상용차의 전기 드라이브트레인

기후변화로 인해 전 세계적으로 CO₂ 배출을 줄이기 위한 규정들이 도입되고 있으며 운송 사업의 배기가스 저감도 요구되고 있다. 상용차들도 제로 배출을 달성하고 에너지 효율을 크게 향상시켜야만 한다. 이를 위한 적합한 전력 반도체가 활발하게 개발되고 있다.

글 | 마틴 슐츠(Martin Schulz) 박사, 인피니언 테크놀로지스

최신 드라이브트레인 컨셉

1990년대 초부터 시작해서 IGBT가 개발되면서 자동차 애플리케이션에서 DC/AC 변환을 통해서 배터리로부터 3상 전동기를 구동할 수 있게 되었다. PMSM(permanent magnet synchronous machines)이 최대 토크 밀도를 달성하면서 상품과 사람을 운송하기 위한 상업용

차량에 널리 사용돼왔다. 그림 1은 상용차의 드라이브트레인 블록 다이어그램과 적합한 반도체 제품을 보여준다.

상용차는 수명이 중요한 요구사항으로, 운행시간은 10만 시간에 달하고 사용 수명은 20년에 이른다. 따라서 승용차보다는 트랙션 애플리케이션에 더 가깝다. 버스, 트럭, 휠 로더 같은 차량은 작동 시 반도체에 가해지는 스트레스를 계산하는데

기초가 되는 부하 프로파일이 존재한다. 이를 통해 수명을 정확하게 예측하고 가격대 성능비 측면에서 인버터 시스템을 최적화할 수 있다.

실리콘 IGBT 대신 실리콘 카바이드(SiC) MOSFET이나 갈륨 나이트라이드(GaN) HEMT 같은 와이드 밴드갭 디바이스를 사용하면 성능, 특히 효율을 향상시킬 수 있다. 효율이 향상되면 한 번 충전으

로 가능한 주행거리를 늘릴 수 있으며, 또 더 적은 배터리 용량으로 동일한 주행거리를 달성할 수 있다. 그런데 애플리케이션의

전력 요구량은 그대로인데 배터리 용량이 줄이면 스트레스가 심해질 수 있다. 따라서 시스템 전반에 걸쳐서 모든 요소를 종합적

으로 고려해야만 한다.

광산, 건설 현장, 여타 오프로드 애플리케이션에 사용되는 차량에는 스위치드 릴

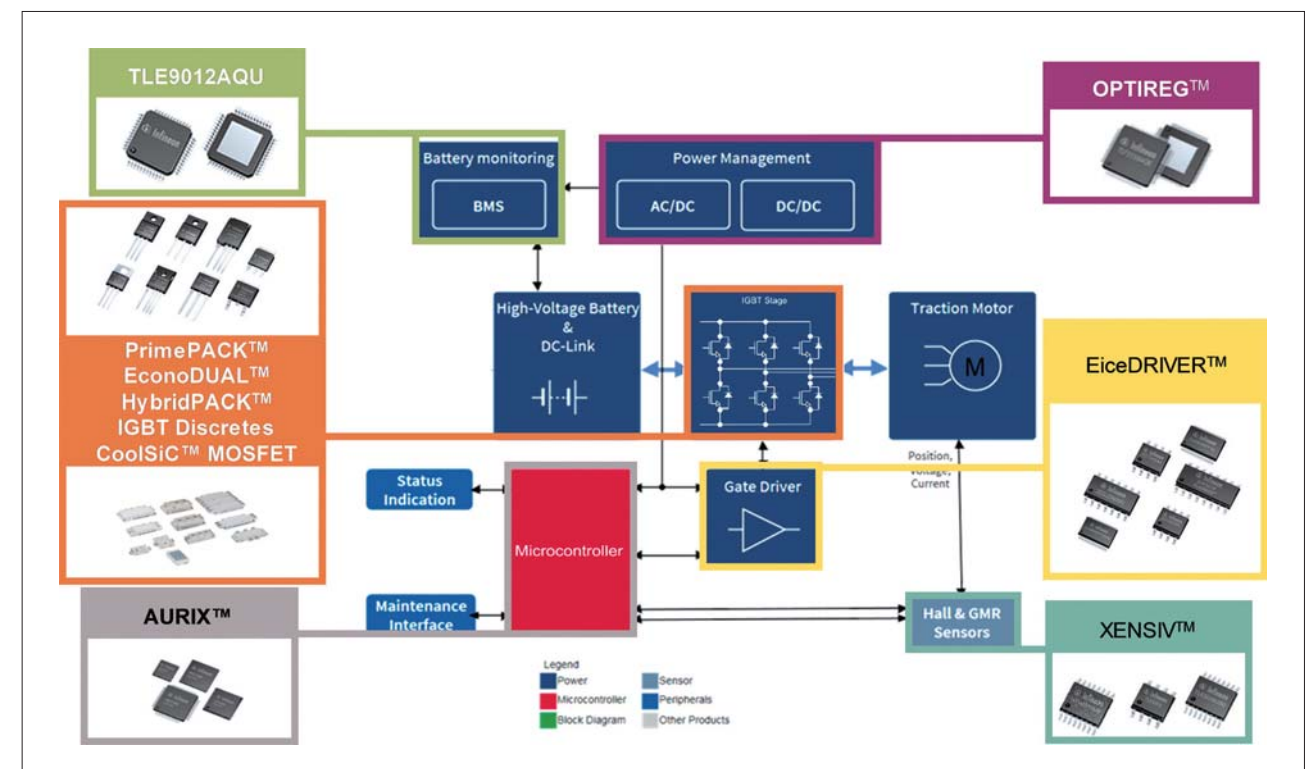


그림 1 | 상용 전기차의 드라이브트레인 블록 다이어그램

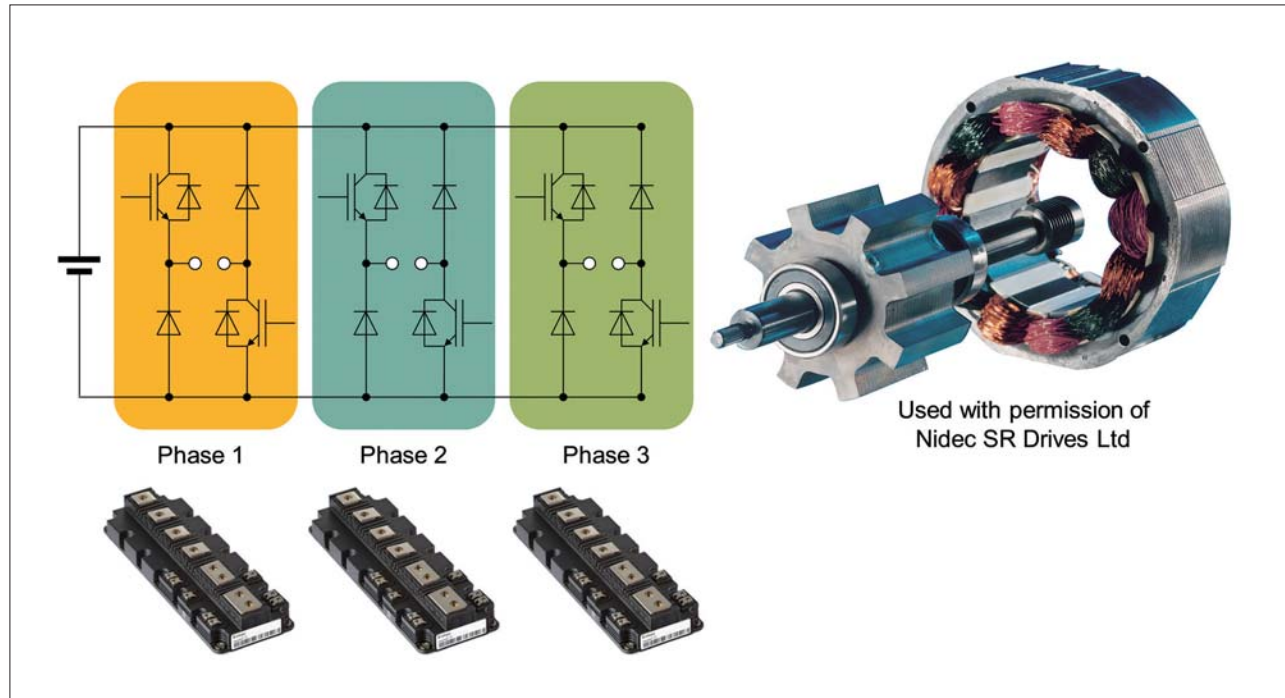


그림 2 | 스위치드 릴렉턴스 모터 드라이브 개요

력턴스 전동기가 경제성 면에서 유리할 수 있다. 이러한 전동기는 희토류 자석을 사용하지 않아도 된다. 반면에 단점은, 구동 전원 부가 다르고 동작할 때 소음이나 진동이 심할 수 있다는 것이다. 하지만 이 점은 이러한 차량에는 덜 중요한 요소이다. 그림 2에서 보듯이, 이 용도의 인버터는 상측 및 하측 구성으로 초퍼를 필요로 한다.

토폴로지 외에도, 애플리케이션에 요구되는 기계적 견고성과 전력 수준을 고려해야 한다. 이 시장에 적합하도록 2개 초퍼로 구성돼 단상을 제공하는 전력 모듈이 출시돼 있다.

또 다른 고려사항은 현장에서 에너지 저장과 활용 사례다. 배터리는 지난 수십 년에 걸쳐서 괄목할 만한 진화를 거듭해 왔으며 오늘날 주된 저장기술로 자리 잡고 있다. 그렇기는 하나 에너지 밀도와 전력 밀도에 있어서 기술적 잠재력을 최대한 구현하고 있지는 못하다. 그러므로 단기적으로 2~4배 및 장기적으로 8~10배의 향상이 가능할

것으로 전망된다.

에너지 저장기술로 수소 연료전지를 사용할 수도 있다. 이 연료전지 스택의 출력 전압은 스택으로부터 취해지는 전력에 따라서 변화된다. 따라서 연료 전지 기반 드라이브 트레인에는 제동 에너지 회수를 위해서 배터리를 같이 사용할 수 있으며, 피크 전력을 필요로 할 때 이 배터리가 보조할 수 있다. 그러려면 이러한 장치들 사이에 추가적인 DC/DC 컨버터가 필요하다. 이 컨버터를 사용해서 연료전지에서 배터리로 에너지를 전달할 수 있다. 이러한 용도로도 SiC MOSFET 같은 와이드 밴드갭 디바이스가 중요한 역할을 할 수 있다. 효율이 무엇보다도 중요하기 때문이다.

전력 반도체의 진화

지난 30년여에 걸쳐 IGBT 기술이 진화하면서 효율, 견고성, 전력 밀도가 꾸준히 향상돼왔다. 전류 밀도(A/cm²)는 5배 향상되

었으며, 전력 손실은 50%까지 감소됐다. 이렇게 발전으로 오늘날 전력 반도체 장비는 동일한 출력 전력으로 더 적은 공간을 차지하고 냉각 요구를 줄일 수 있게 됐다. 또 다르게 말하면, 동일한 크기로 장비를 교체하거나 업그레이드해서 더 높은 출력 전력을 제공할 수 있게 됐다.

이러한 대표적인 제품으로 인피니언의 잘 알려진 EconoDUAL™ 3 제품군을 들 수 있다. 이 하프 브리지 모듈 플랫폼은 전기버스와 트럭에 널리 채택돼왔다. 이 제품이 성공적일 수 있었던 한 가지 이유는, 600~1700 V와 200~900 A에 이르는 넓은 범위의 전류와 전압 구성을 지원하기 때문이다. 칩과 패키징 기술이 발전하는 것에 따라서 EconoDUAL™ 3 제품군의 하프 브리지 모듈은 그림 3에서 보는 것처럼 진화해 왔다.

두 배의 전류 정격을 제공하면서도 디바이스의 기계적 규격은 그대로라는 것을 알 수 있다. 핀과 단자 위치도 마찬가지다. 최대 동작온도는 IGBT3은 125°C에서 IGBT4



그림 3 | EconoDUAL™ 3 제품군의 IGBT3에서 IGBT7까지 진화

는 150°C와 IGBT7은 175°C로 향상되었다.

여전히 디자이너들은 열 문제에 직면하고 있다. 칩 차원에서 전류 밀도(A/cm²)가 효율보다 빠르게 높아짐으로써, 전력 손실 밀도(W/cm²) 또한 높아지게 됐다. 손실은 절반으로 줄고 면적은 1/5이 됨으로써 칩 차원에서 전력 손실 밀도가 250% 높아졌다. 전력 모듈 차원에서도 전력 손실 밀도가 거의 두 배로 높아졌다. 이러한 국부적인 핫스팟으로부터 열을 소산시키기 위해서 열 관리가 더더욱 까다롭게 되었다. 히트 싱크와 열 계면 물질을 선택하고 설계할 때 이러한 점들을 고려해야 한다.

대형 차량에서는 트랙션 인버터가 전통적으로 액체 냉각 시스템을 갖추고 있다. 열을 소스에서 라디에이터로 전달하고 여기서 다시 열 에너지를 주변으로 소산시킬 수 있다. 냉각 요구가 갈수록 높아지고 있기 때문에, 전통적인 냉각판을 고도로 효율적인 일체형 냉각 시스템으로 교체할 수 있다. 이러한 시스템을 사용하면 전력 반도체가 냉각수와 직접 접촉한다. 그러므로 이것을 직접 액체 냉각 시스템이라고 한다. 이 시스템을 사용해서 열 저항 경로를 단축하고 열 계면 물질을 제거할 수 있다.

반도체의 플레인 베이스 플레이트는 열 전달이 우수하지 않다. 베이스 플레이트를 가로질러 층류로 구축된 냉각수 필름은 열 교환을 방해한다. 열 전달을 향상시키기

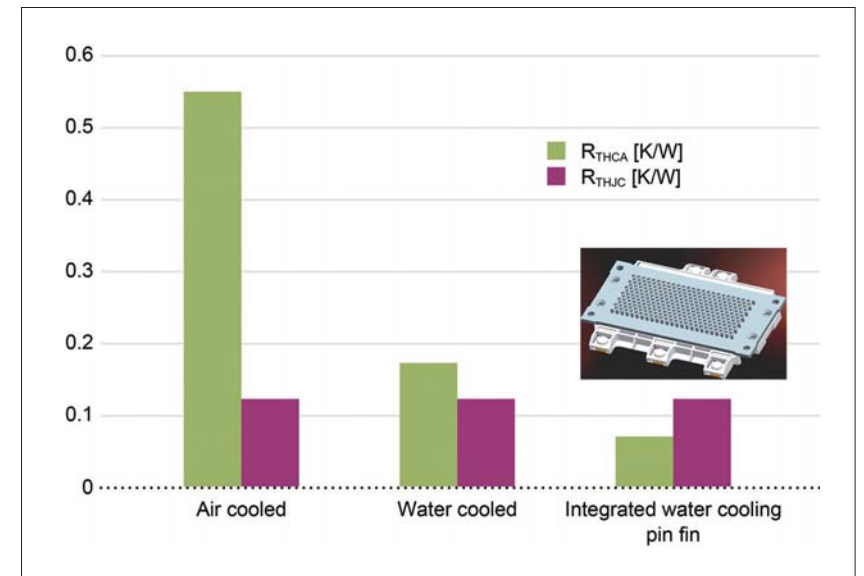


그림 4 | 각기 다른 냉각 시스템의 열 성능 비교

위해서 냉각수에 난류를 발생시키는 추가적인 구조를 사용해서 이 상황을 개선할 수 있다. pin-fin이라고 하는 이러한 베이스 플레이트가 승용차에 이미 도입됐다.

그림 4는 각기 다른 냉각 시스템의 열 성능을 비교해서 보여준다. HybridPACK™ 제품군은 최초로 베이스 플레이트, 플레인, pin-fin 제품을 모두 제공한다.

그림 4를 보면, 액체 냉각에서 직접 액체 냉각으로 전환하면 열 성능이 30%까지 향상된다는 것을 알 수 있다. 케이스에서 주변으로 열 저항 R_{THCA}를 크게 줄일 수 있는 것은, 모듈과 히트 싱크 사이에 열 계면 물

질을 제거했기 때문이다.

웨이브 디자인이라고 하는 구조화된 베이스 플레이트를 사용한 제품도 제공한다. 이 특허 기술은 알루미늄 리본을 사용해서 난류를 발생시킨다. 리본의 형태가 웨이브 구조를 닮았으며, 본드 와이어를 접속할 때 사용되는 것과 비슷한 기법으로 접착된다.

pin-fin이 열 성능이 약간 더 우수한데, 리본 본드는 비용적으로 최적화된 솔루션을 제공한다. 비용적으로나 신뢰성 면에서 유리한 이 향상 기술을 채택한 전력 모듈이 조만간 출시될 것으로 보인다.