

# 350kW 대의 급속 DC 충전기를 설계할 때의 고려사항

## Design considerations for fast DC chargers targeting 350kW

BEV를 보급하기 위해서 시급한 과제가 충전 인프라를 확충하는 것이다. 기존 충전망을 늘리는 것도 필요하지만, 장거리 주행 시에 거리 불안감을 없애기 위해서는 급속 DC 충전 HPC에 대한 투자가 필요하다. 액체 냉각이 열 관리를 위해서 중요한 요소가 될 것이다.

글/Pradip Chatterjee, 인피니언 테크놀로지스

### 머리말

자동차 운전자들은 지난 수십 년 동안 어디서나 편리하게 주유를 하는 것에 익숙해져 있다. 여행 계획을 짤 때 주유소 위치까지 고려해야 한다는 생각은 하지 않는다. 하지만 배터리 전기차(BEV)를 구입하거나 렌트하려고 할 때는 문제가 달라진다. 일상 생활에서 대개의 경우에는 자동차를 사용하는 거리가 BEV의 주행 거리 이내이지만, 주말 여행이나 휴가 같이 예외적인 경우에는 또 다르다.

BEV를 집에 주차시켜 놓을 때는 밤새 천천히 충전할 수 있다. 또 많은 도시들에서 공공 충전소를 확충하고 있으므로 쇼핑을 하는 동안에 차를 충전할 수 있다. 하지만 전기차 보급을 가속화하기 위해서는 장거리 주行的 경우에 충전 시간을 내연 엔진 차와 근접한 수준이 되게 해야 할 것이다. 22kW 가정용

22kW 가정용 AC 충전기는 약 200킬로미터 거리를 주행하도록 충전하기 위해서 120분이 걸린다.

이 시간을 7분대로 단축하기 위해서는 350kW가 가능한 급속 DC 충전기가 필요하다.

### Introduction

The car owner has, unknowingly, been spoiled for many decades by a seamless network of refuelling stops. The thought of having to plan a journey optimised around the location of gas and service stations is utterly unfamiliar. However, this is probably one of the initial thoughts going through the minds of those considering purchasing or leasing a battery electric vehicle (BEV). Although the automobile is used by many primarily for short journeys well within the range of a BEV, it is the exceptions, such as a weekend away or the annual vacation, that cause concern.

When parked at home our BEV can be charged, slowly, overnight. Many of our larger cities and towns have also started to provide municipal charging piles, enabling us to top-up our vehicle's charge while shopping. The reality is, for longer journeys at least, the charging time has to come somewhere close to that required for refuelling an internal combustion engine vehicle. A 22kW home AC charger can deliver charge equivalent to around 200 km of range in a

AC 충전기는 약 200킬로미터 거리를 주행하도록 충전하기 위해서 120분이 걸린다. 이 시간을 7분대로 단축하기 위해서는 350kW가 가능한 급속 DC 충전기가 필요하다.

## 표준화 진전

전세계적으로 표준화 기구 그룹들에서 고전력 충전기 (HPC)와 관련해서 전력대와 충전 시퀀스부터 통신과 커넥터에 이르기까지 모든 것을 정의하고 있다. 유럽과 미국에서는 이해 당사자들이 CharIN과 CCS(Combined Charging System) 쪽으로 뭉치고 있다. 다른 지역들에서도 각자 개발을 하고 있다. 일본의 CHAdeMO와 중국의 GB/T를 들 수 있다. 일부 자동차 회사들은 자체적인 충전 솔루션을 개발하고 있기도 하다.

그러므로 이러한 시장을 충족하기 위해서는 모듈러 방식의 접근법이 필요하다. 그럼으로써 공통적인 하우징이나 냉각 같이 최종 솔루션의 일부 측면들을 재사용하면서 커넥터, 케이블, 전력 반도체 같은 것들은 목표 시장의 요구에 따라서 선택할 수 있다.

## 급속 DC 충전기용의 전력 반도체

급속 충전 HPC 충전소는 전력 공급을 위해서 전용적인 저전압대 또는 중간 전압대(LV/MV) 인프라가 필요할 것이다. 이러한 충전소는 주로 고속도로 휴게소나 도시의 주요 지점에 설치될 것이다. 들어오는 AC 전원을 절연 변압기로 공급하고, 변압기의 이차측을 DC로 변환한다. 이를 위해서 이중 이차  $\Delta$  및 Y 권선을 채택한 변압기의 인기가 높아지고 있다.

이 위상 변압기는 직렬 또는 병렬로 동작하는 멀티 펄스 정류기를 결합해서 입력에서의 고조파 성분을 감소시킨다. DC/DC 스테이지로 선택한 토폴로지를 통해서 절연이 제공된다고 하더라도 이러한 디자인에는 변압기가 필요하다. 변압기를 사용해서 고조파 성분을 향상시킬 수 있기 때문이다. 이 때 가장 먼저 해야 할 설계 결정은 공통 AC 버스 접근법을 사용할지 공통 DC 버스 접근법을 사용할지 하는 것이다.

공통 AC 버스 접근법은 트랜스포머 이차측이 다중의 AC/

time frame of 120 minutes. Reducing this to seven minutes would require a fast DC charger supplying 350 kW.

## Standards are in place

Workings groups within standards organisations have, around the world, defined everything from the operational envelope and charging sequence, to the communication and connectors of High Power Chargers (HPC). In Europe and the US interested parties have coalesced around CharIN and the Combined Charging System (CCS). Elsewhere other alternatives have developed, such as CHAdeMO in Japan and GB/T in China. Some vehicle manufacturers have also placed value on developing proprietary charging solutions.

For manufacturers looking to address this market it quickly becomes clear that a modular approach is required. This allows reuse of some aspects of the end solution, such as a common housing and cooling concept, while connectors, cables and the power electronics can be selected to match the specifications of the target market.

## Approaches to the fast DC charger power electronics design

Fast charging HPC refuelling points will require dedicated electrical low or medium voltage (LV/MV) infrastructure as their supply. It is expected that this will be installed primarily in locations such as motorway service stations along key routes between cities. The incoming AC supply feeds into an isolating transformer whose secondary will be converted to DC. Transformers with a double secondary  $\Delta$  and Y winding are a popular solution.

These phase-shifting transformers are then combined with multi-pulse rectifiers operating in series or parallel that reduce harmonic content at the input. In such

DC 정류 스테이지로 공급하고, 여기서 다시 각자의 DC/DC 스테이지로 공급한다. 이 방법은 충전기의 전반적인 디자인을 간소화할 수 있다. 하지만 AC/DC 스테이지를 여러 개 필요로 하고, 그러므로 필터, 제어 스테이지, 센싱을 여러 개 필요로 하므로 총 비용을 증가시킨다. 현재는 V2G(vehicle-to-grid)나 V2B(vehicle-to-building) 같이 에너지를 전력망으로 되돌려 보내는 기능이 의무적이지 않다. 하지만 이 기능이 의무화된다면 이 접근법은 비용과 복잡성이 더 늘어나게 될 것이다.

공통 DC 버스 접근법은 단일 AC/DC 스테이지를 사용해서 DC 출력을 발생시키고 이것을 사용해서 모든 DC/DC 스테이지를 공급한다. 많은 경우에 이 방법이 더 적합하다. 부품 수와 비용을 낮추고 전반적인 효율을 향상시킬 수 있기 때문이다. 또 V2G와 V2B가 의무화되었을 때 더 수월하게 개조를 할 수 있다. 또 DC 버스는 더 손쉽게 다른 에너지 시스템(로컬 배터리 저장, 태양광 등)과 통합할 수 있다. 또 현행 DC 충전기 표준들은 충전소 중앙에서 다수 배터리 충전기의 active front end로 동작하는 개념을 지원한다. 단점은 이처럼 고전력 정격 active front end를 지원하기 위해서 크기가 커진다는 것이다.

2~3MW 전력을 공급하기 위한 충전소는 공통 DC 버스가 더 적합하다. 이를 사용해서 6개에서 8개까지 고전력 DC/DC 충전 스테이지를 공급할 수 있다.

## AC/DC 정류

최신 전력 트랜지스터 기술에 고성능 마이크로컨트롤러(MCU)와 디지털 신호 프로세싱(DSP)을 결합함으로써 고도로 효율적인 AC/DC 정류 회로를 구현할 수 있다. 이 회로를 사용해서 전력망으로부터 사인과 전류 인출, 낮은 고조파 왜

designs the transformer is mandatory even if isolation can be provided through the chosen topology for the DC/DC stage, mainly due to the harmonic content improvement its presence provides. The first design decision to be made here is whether to take a common AC or common DC bus approach.

In the common AC bus approach, the secondary side of the transformer feeds multiple AC/DC rectifying stages that feed their own DC/DC stages. This has the benefit of simplifying the overall design concept for the charger. However, it does require a replication of the AC/DC stage that results in higher total cost due to the need for several sets of filters, control stages and sensing. Currently, support for injecting energy back into the grid, such as Vehicle-to-Grid (V2G) and Vehicle-to-Building (V2B), is not mandatory. However, should this change, this approach would result in further cost and complexity.

The common DC bus approach uses a single AC/DC stage to create a DC output that supplies all the DC/DC stages. In many cases, this proves more optimal as it reduces device count and cost, and improves overall efficiency. Should V2G and V2B become mandatory it would also be simpler to retrofit. A DC bus is also easier to integrate with other energy systems (local battery storage, photovoltaic) that may be implemented. Finally, current DC charger standards support the idea of a centralised charging station operating as an active front end for several battery chargers. The main downside surrounds dimensioning such a high power-rated active front end.

Charging parks supporting 2 to 3 MW of power prefer the common DC bus, using it to supply between six and eight high-power DC/DC charging stages.

## Focussing on the AC/DC rectification

Thanks to modern power transistor technology,

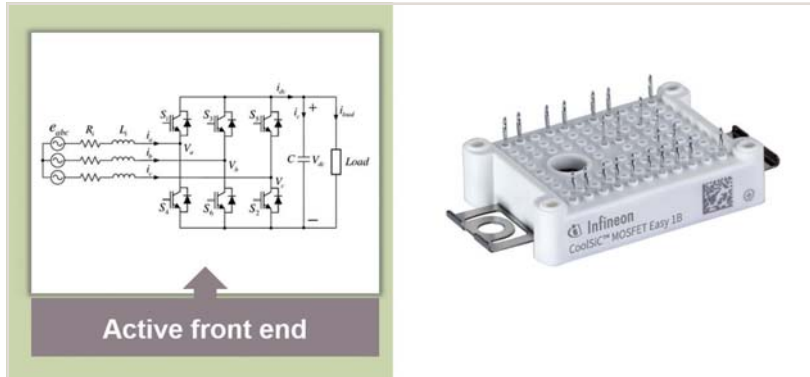
최신 전력 트랜지스터 기술에

고성능 마이크로컨트롤러(MCU)와

디지털 신호 프로세싱(DSP)을 결합함으로써

고도로 효율적인 AC/DC 정류 회로를 구현할 수 있다.

그림 1. 단일 1200V CoolSiC™ MOSFET 모듈을 사용해서 active front end를 손쉽게 구현할 수 있다.



coupled with high performance microcontrollers (MCU) and digital signal processing (DSP), highly efficient AC/DC rectification circuits can be implemented. These ensure a sinusoidal current draw from the grid, low harmonic distortion ( $\text{THDi} \leq 5$  percent), and independent control of active and reactive power flow while ensuring high dynamic control.

Operation at unit power factor ensures

곡( $\text{THDi} \leq 5$ 퍼센트), 유효 전력 및 무효 전력 흐름 개별 제어, 높은 동적 제어가 가능하다. 단위 역률로 동작함으로써 전력 망으로부터 무효 전력 소모가 일어나지 않는다. 또 선택한 토폴로지로 지원되는 경우라고 했을 때, 비교적 간편하게 AC 측과 DC 측 사이에 양방향 전력 흐름이 가능하다.

가장 널리 사용되는 토폴로지는 2레벨 전압 소스 컨버터(2L-VSC)이다. 주로 IGBT나 실리콘 카바이드(SiC) MOSFET 형태로 6개 스위칭 디바이스와 DC 링크로서 커패시터를 사용해서 입력 위상 전압보다 높은 출력 전압을 발생시킨다. 이 active front end 역시 양방향 에너지 흐름을 지원하며 역률을 완벽하게 조절 가능하다. 스위칭 기법은 펄스폭 변조(PWM)나 공간 벡터 변조(SVM)를 사용할 수 있다.

이 회로를 단일 패키지 1200V CoolSiC™ MOSFET 모듈 FS45MR12W1M1\_B11을 사용해서 손쉽게 구현할 수 있다(그림 1). 이 모듈은 EasyPACK™ 1B 패키지로 6개 스위칭 디바이스와 NTC 온도 센서를 포함한다. EasyDUAL™ 1B 패키지를 적용한 FF11MR12W1M1\_B11 같은 하프 브리지 솔루션을 사용할 수도 있다. 이들 모듈 제품은 25~45kHz 스위칭 주파수로 60~100kW를 지원한다.

양방향 전류 흐름이 필요할 때는 3위상 3레벨 비엔나 정류기가 인기가 높아지고 있다. 3개 능동 스위치만을 필요로 하며 듀얼 부스트 PFC(power factor correction)를 제공한다. 제어 회로로 오작동이 발생된 경우에 출력이나 프론트 엔드로 단락 회로를 방지하고 한쪽 입력 위상이 없어도 동작할 수 있다. 디스크리트 부품을 사용하면 어셈블리 작업이 까다로워지

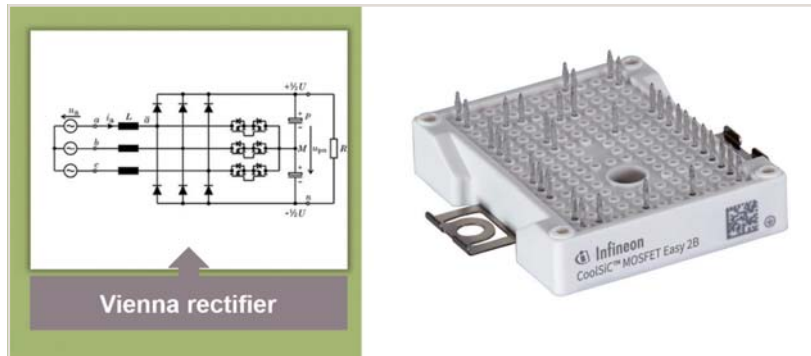
there is no reactive power consumption from the grid. Finally, if the chosen topology supports it, bi-directional power flow between the AC and DC sides is relatively straightforward.

One of the most widely used topologies is the Two-Level Voltage Source Converter (2L-VSC). This consists of an array of six switching devices, typically insulated-gate bipolar transistors (IGBT) or silicon carbide (SiC) MOSFETs, together with a capacitor as a DC link, generating an output voltage higher than the input phase voltages. This active front end also supports bi-directional energy flow and provides a fully adjustable power factor. The switching approach can make use of either pulse-width modulation (PWM) or space vector modulation (SVM).

This can be easily implemented using the single-package 1200V CoolSiC™ MOSFET Module FS45MR12W1M1\_B11 (Figure 1). This contains six switching devices in the EasyPACK™ 1B package that features a low inductive design and contains an integrated NTC temperature sensor. Half-bridge solutions, such as the FF11MR12W1M1\_B11 in the EasyDUAL™ 1B package, could also be considered. Designs based on these components could support 60 to 100 kW at switching frequencies of 25 to 45 kHz.



그림 2. Easy 2B 패키지를 적용한 하프 브리지 모듈로서 F3L15MR12W2M1\_B69는 비엔나 정류기에 사용하기에 적합하다.



므로, 이러한 고전력 애플리케이션으로 통합적인 전력 모듈 제품이 점점 더 많이 사용되고 있다.

Easy 2B 패키지를 적용한 F3L15MR12W2M1\_B69 같은 SiC 모듈을 사용해서는 대칭 부스트 PFC 비엔나 정류기를 구현할 수 있다(그림 2). 이 모듈 제품은 2개 1200V 고속 정류 다이오드, 2개 1600V 저속 정류 다이오드, 2개 1200V 15mΩ MOSFET을 포함한다. 이러한 Easy 2B 패키지를 3개를 결합해서 컴팩트한 고전류 저손실 디자인을 손쉽게 달성할 수 있다(그림 3).

### 다양한 DC 충전 전압 지원

DC 충전기에 관한 CharIN 규격에서는 200V~920V의 출력 전압, 최대 500A, 최대 350kW의 전력대로 정의하고 있다. 이러한 요구를 충족하기 위해서는 절연형과 비절연형을 비롯한 다양한 DC/DC 토폴로지를 사용할 수 있다.

어떤 토폴로지를 선택하느냐에 상관없이 몇 가지 공통적으

DC 충전기에 관한 CharIN 규격에서는 200V~920V의 출력 전압, 최대 500A, 최대 350kW의 전력대로 정의하고 있다. 이러한 요구를 충족하기 위해서는 절연형과 비절연형을 비롯한 다양한 DC/DC 토폴로지를 사용할 수 있다.

If bi-directional current flow is deemed unnecessary, the three-phase, three-level Vienna rectifier is becoming the popular choice. It requires only three active switches and provides dual boost power factor correction (PFC). In the event of a malfunction in the control circuit it is protected against a short-circuit of the output or front end, and can even operate with the loss of one input phase. Assembly effort

for such designs can be high using discrete components, but in such high-power applications, integrated power modules are more commonly used.

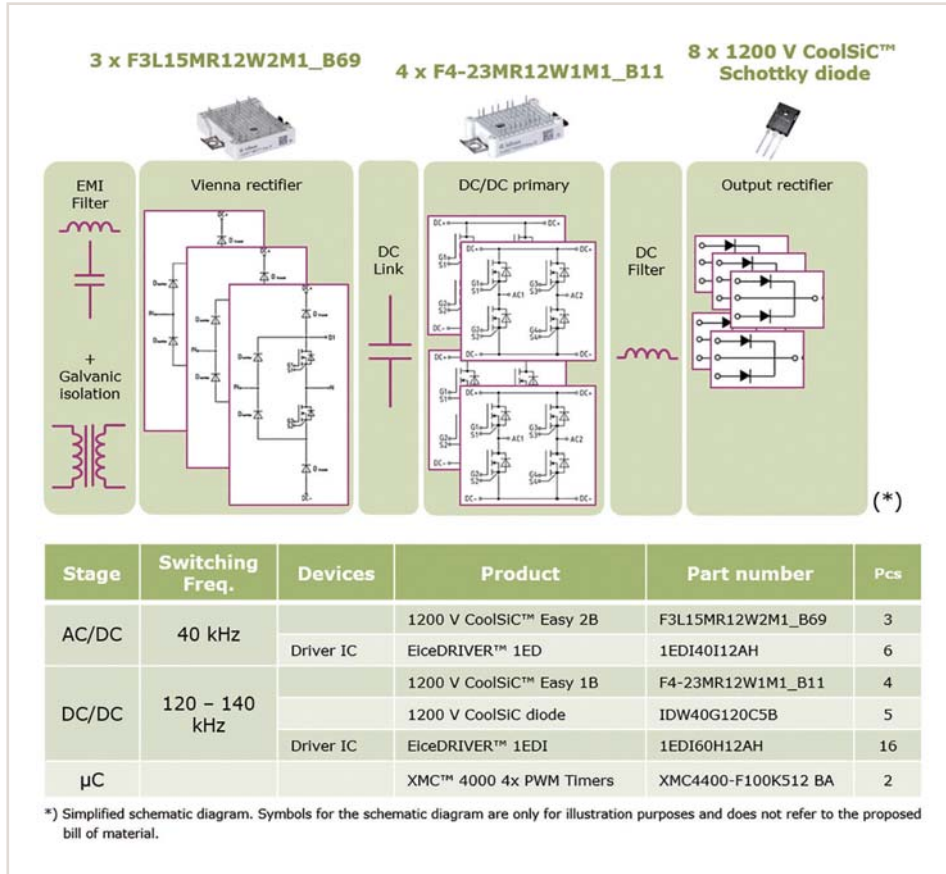
A Symmetric Boost PFC Vienna rectifier can be implemented using SiC modules such as the F3L15MR12W2M1\_B69, offered in an Easy 2B package (Figure 2). Each module contains two 1200V fast rectifying diodes, two 1600 V slow rectifier diodes, and two 1200 V, 15 mΩ MOSFETs. Three such Easy 2B packages can easily be combined to create a compact high current, low loss design (Figure 3).

### Delivering the variable DC charging voltage

The CharIN specification for DC chargers defines that the supported output voltage must lie between 200 V and 920 V, supply a maximum of 500 A, and operate within a power envelope of 350 kW. There is a range of DC/DC topologies, both isolated and non-isolated, that can be used to tackle this challenge.

Regardless of the topology chosen, there are several key requirements that need to be fulfilled. Physical size and overall cost are focus areas, while electromagnetic interference (EMI) regulations must also be observed. Zero voltage or zero current switching (ZVS/ZCS), highest

그림 3. Easy 2B 비엔나 정류기 위상 레그 모듈을 사용한 고효율 60kW 디자인



로 요구되는 것들이 있다. 특히 중요한 것이 물리적 크기와 전제적인 비용이다. 전자기 간섭 요건을 충족하는 것도 중요하다. 제로 전압 또는 제로 전류 스위칭(ZVS/ZCS), 최대의 효율, 고전력 요구 또한 중요한 고려사항이다. 또 배터리 발열을 피하기 위해서는 출력으로 전압과 전류 둘 다 리플을 낮추는 것이 중요하다.

풀 브리지 LLC 공진 컨버터 같이 고주파수(HF) 절연형 트랜스포머를 사용한 토폴로지는 공진 주파수로 효율이 높다는 점으로 잘 알려져 있다. 또한 ZVS 일차측 스위치와 ZCS 이차측 다이오드를 사용하기 때문에 크기가 컴팩트하다. 단점은 원하는 넓은 출력 전압 범위를 지원하기 위해서 충전기 개발 작업이 매우 까다롭다는 것이다.

그리드 트랜스포머를 사용해서 갈바니 절연이 보장되므로 100kW 이상의 전력 출력일 때 비절연형 벡-부스트 컨버터를

efficiency and support for the high power required are also on the list. Finally, low ripple of both voltage and current at the output are essential to avoid battery heating.

Topologies utilising a high-frequency (HF) isolation transformer, such as a full bridge LLC resonant converter, are known for their high efficiency at their resonant frequency. They are also inherently compact thanks to their ZVS primary side switches and ZCS secondary side diodes. Unfortunately, supporting the desired wide output voltage range makes charger development

exceptionally challenging with this approach.

Above 100 kW power outputs, and since the galvanic isolation is guaranteed by the grid transformer, a non-isolated Buck-Boost converter can be used. In a multi-phase configuration, it can provide efficiencies of up to 98.5 percent. This approach also significantly reduces current pulsation due to the shifted voltage pulses. Its modular design allows its dimensions and operational parameters to be easily adapted to changes, both in output and performance or physical shape.

### Managing heat dissipation

Despite the incredible efficiencies that power

사용할 수 있다. 이 기법은 다위상 구성의 경우에 최대 98.5퍼센트 효율을 달성할 수 있다. 또 전압 펄스 편이로 인한 전류 맥동을 크게 줄일 수 있다. 모듈러 디자인이므로 원하는 출력, 성능, 물리적 형태에 따라서 규모나 동작 파라미터를 조절할 수 있다.

## 열 관리

오늘날에는 전력 컨버터로 놀랄 만큼 뛰어난 효율을 달성할 수 있게 되었다. 그렇기는 하나 효율이 1퍼센트만 떨어진다고 하더라도 급속 DC 충전기를 최대 전력으로 동작하는 경우에 3.5kW의 전력이 열로 낭비되는 것이다. 여기에 더해서 케이블이 1미터의 길이마다 100W의 추가적인 손실을 일으킨다. 그러므로 HPC는 열 관리를 위해서 강제 공기 냉각 말고 그 이상의 것을 필요로 한다. 전력 반도체뿐만 아니라 커넥터와 케이블까지도 액체 냉각으로 바꾸는 것이 필요하다.

그런데 많은 액체 냉각제는 인화성, 변질, 부패, 독성 같은 문제가 있을 수 있다. 오늘날 물-글리콜 혼합액이 케이블과 커넥터 모두에 인기 있는 냉각제로 사용되고 있다. 또 3M™ Novec™ 같이 유전성 냉각제가 개발되어서 ITT Cannon HPC에 성공적으로 채택되고 있다. 충전소 구성에 따라서 이러한 냉각 시스템에 더해서 개별적이거나 중앙에 열 교환기를 사용할 수 있다.

## 맺음말

BEV를 보급하기 위해서 시급한 과제가 충전 인프라를 확충하는 것이다. 기존 충전망을 늘리는 것도 필요하지만, 장거리 주행 시에 거리 불안감을 없애기 위해서는 급속 DC 충전 HPC에 대한 투자가 필요하다. 액체 냉각이 열 관리를 위해서 중요한 요소가 될 것이다. 또 열 관리를 위해서는 전력 토폴로지와 부품들이 효율이 우수하고 열 배출을 위한 기계 장치들과 손쉽게 통합할 수 있어야 한다. 또 다이오드와 스위치 같은 SiC 디바이스가 정류 스테이지부터 DC/DC 토폴로지를 거쳐서 배터리 충전 출력을 제공하기 위해서 중요한 역할을 할 것이다. **SN**

converters can achieve today, a mere 1 percent drop in efficiency is equivalent to 3.5 kW of power dissipation, emitted as heat, when a fast DC charger is operating at full power. The cable alone can add an additional loss of 100 W per metre length. HPCs require more than a forced air-cooling approach to heat dissipation. Additionally, it is not only the power electronics but also the connector and cable that requires manufactures to move to liquid cooling.

The challenge here is that many liquid coolants have issues with flammability, degradation, corrosion, and toxicity. Today a water-glycol mix has shown itself as a popular coolant for both the cable and connector. Dielectric coolants have also been developed, such as the 3M™ Novec™, with successful deployment in the ITT Cannon HPC. The cooling system is then coupled with a separate or centrally located heat exchanger, depending on the configuration of the charging park.

## Summary

The uptake of BEVs is, to some degree, dependent on the available charging infrastructure. Some worries could be alleviated through better promotion of the existing network of charging points, although investment in fast DC charging HPCs, specifically to diminish range-anxiety for those worried about their longer journeys, is also required. Liquid cooling will be an essential part of the heat dissipation strategy, requiring that the selected electrical topologies and components are both highly efficient and provide easy integration with the mechanics of the heat extraction approach. SiC devices, including diodes and switches, will form an essential part of the design choices made, starting at the rectification stages and moving through to the DC/DC topologies chosen to deliver the battery charging output. **SN**