

전력용 반도체 변압기 개발 현황

1. 서론

전력용 반도체 변압기(Solid State Transformer, SST)는 최근 직류배전 및 스마트그리드 분야에 있어서 핵심기술로 연구 개발이 진행되고 있다. 특히 사용 목적에 따라 고압(Medium Voltage, MV), 저압(Low Voltage, LV), 교류(AC), 직류(DC)를 출력할 수 있고 전압, 전류의 능동적 제어, 고조파 및 계통 외란에 대한 대처가 가능하며, 역률 제어를 통한 전력보상기능이 있어서 최근 확대되고 있는 재생에너지 및 EV 충전, LVDC 계통과 같이 직류와 교류가 혼재되는 복합망을 구성하는데 적합한 기기라고 볼 수 있다. 본 원고에서는 반도체 변압기에 대한 이해와 더불어 최근 개발현황에 대해 정리하였다.

2. SST 특징

전력용 반도체 변압기는 1923년 ‘Method and Apparatus for Converting Electric Power’(US Patent 1,702,402)에서 Medium frequency transformer를 통한 절연된 형태의 DC/AC converter라는 개념적 특허가 발표되어 ‘Electronic Transformer’라는 용어로 연구되기 시작하였다. 이후 전력용반도체 소자의 발전으로 80년대에 들어서 Solid State Transformer라는 용어를 시작으로 활발한 연구개발이 진행되어 Intelligent Universal Transformer(IUT), Power Electronics Transformer(PET), Energy Control Center(ECC) 및 Energy Router 등 다양한 명칭으로 정의되고 있다. 하지만 본 원고에서는 반도체 변압기로 용어를 통일하겠다.

반도체 변압기는 분산전원 상에서의 AC/DC간의 배전계통 연계를 비롯하여 대용량 전기차 충전인프라, 철도용 전력 변환장치 등 다방면에서 활용할 수 있는 기기이다. 특히 최근 재생에너지 기반의 분산전원 및 마이크로 그리드의 확대되면서 기존의 배전 변압기와 전력변환장치로 구성된 전력변환

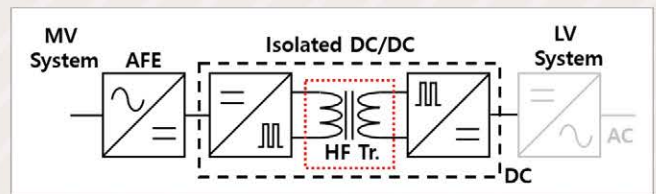


그림 1 반도체 변압기 블록 다이어그램

시스템의 한계를 보완하기 위해 많은 기업 및 연구소에서 상용화를 위한 연구개발을 활발히 진행하고 있다.

반도체 변압기는 일반적인 배전변압기와 전력변환장치로 구성된 전력변환시스템과 차별적으로 반도체 변압기 단독으로 전력변환시스템을 구성이 가능하다. 이를 통해 무게 및 부피가 감소되며 시스템 효율이 향상되는 장점을 가지고 있다. 주요 핵심구성요소는 아래와 같으며 그림 1은 일반적인 반도체 변압기의 블록 다이어그램이다.

1. AFE(Active-Front-End) 컨버터
2. Isolated DC/DC 컨버터
3. 고절연 고주파 변압기 (High/Medium Frequency Tr.)

그림 1에서 나타난 바와 같이 반도체 변압기는 AFE단에서 입력전원을 받으며 Isolated DC/DC 컨버터 단에서 고주파 변환 및 고주파 변압기를 통한 절연 및 전압변환이 이루어진다. 이후 목적에 따라 출력단에서 DC출력을 사용하거나 또는 Inverter를 거쳐 AC로 출력이 가능하다.

주요 핵심 구성요소로서 AFE 컨버터는 반도체 변압기의 입력단을 구성하는 컨버터이며 MV단의 AC입력을 반도체 변압기의 절연형 DC/DC컨버터에 연계하는 역할을 담당한다. AFE 컨버터 토폴로지는 계통전압, 반도체 소자 및 적용 목적에 따라 2-level full bridge, 3-level NPC(Neutral Point Clamped), MMC(Modular Multilevel Converter) 등 다양한 토폴로지가 있다^[1].

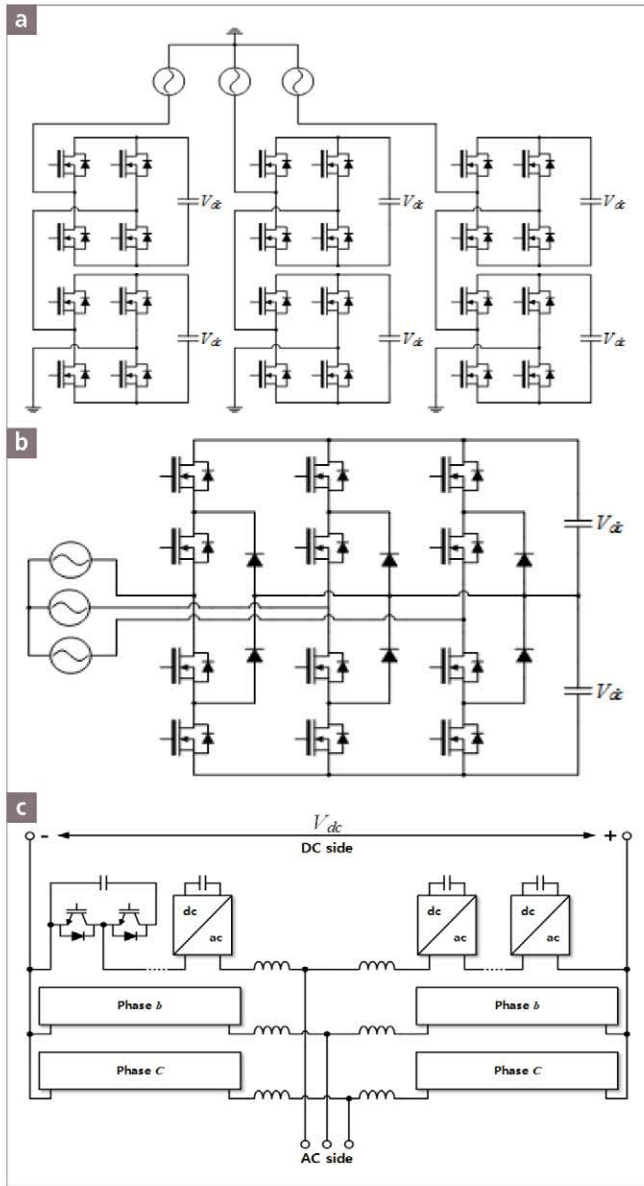


그림 2 (a) 2-level Full bridge (b) 3-level NPC AFE (c) MMC

Isolated DC/DC 컨버터 스테이지는 고주파 변압기를 포함하고 있으며 반도체 변압기의 1차측과 2차측의 절연 및 전압 변환 기능을 수행한다. 대표적인 토폴로지로는 DAB(Dual Active Bridge), LLC resonant, QAB(Quadrable Active Bridge) 컨버터 등이 있다^[2].

고주파 변압기는 일반적인 교류계통의 전력용 변압기와 동일한 원리로 동작한다. 큰 차이점은 교류계통의 주파수보다 매우 높은 주파수에서 동작하는 것으로 보통 10kHz에서 1MHz 이상의 주파수 범위에서 사용한다. 주파수가 클 경우 동일 용량 기준으로 변압기 코어의 크기가 축소되며 권선 사용량도 감소되므로 손실이 줄고 효율이 증가되는 장점이 있다. 또한 고주파로 인해 일반적인 변압기에서 사용되는 규소강판이 아닌 페라이트 계열의 코어를 사용하므로 다양한 형상 제작이 가능하고, 이는 다양한 토폴로지를 가지고 있는 반

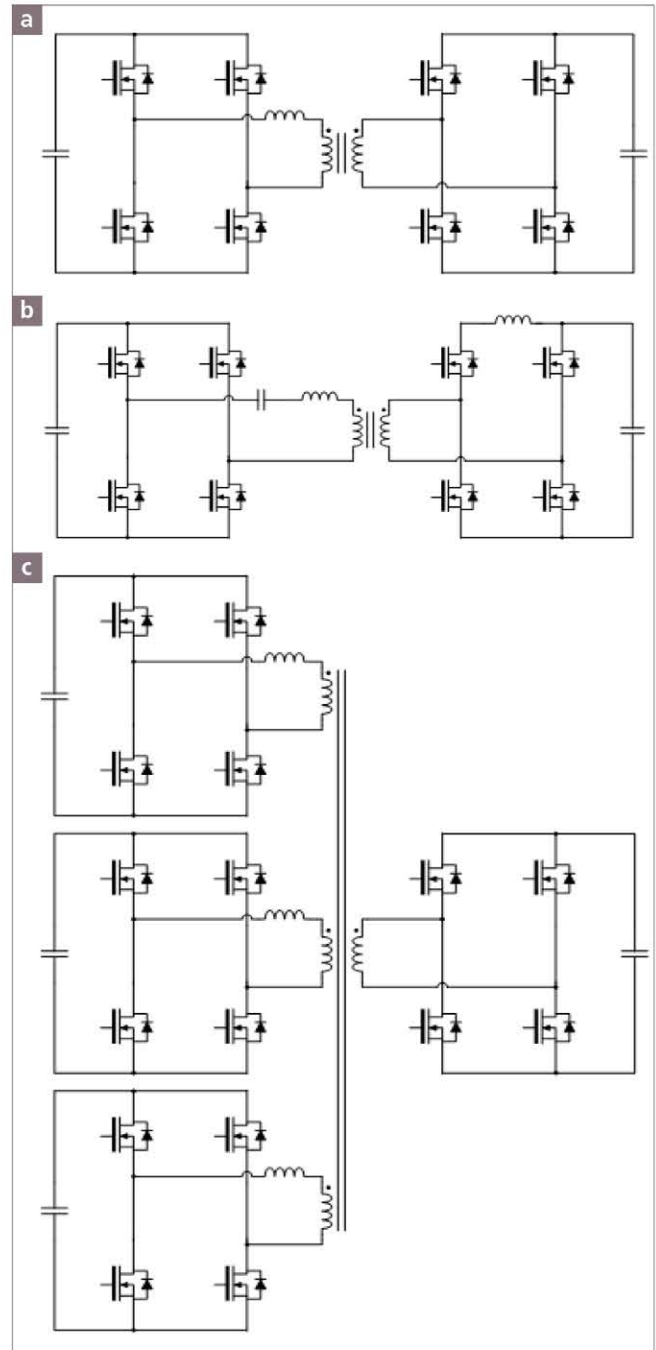


그림 3 (a) DAB Converter (b) LLC resonant Converter (c) QAB Converter

도체 변압기에 적용하기 적합하다. 앞서 언급한 바와 같이 고주파 변압기는 기존 변압기에 비해 부피, 무게 감소 및 높은 전력밀도를 가지는 장점이 있으나, 페라이트 코어의 특성상 기계적 강도가 약해 충격에 취약하다. 그리고 고주파 전류에 의한 권선의 표피 및 근접효과가 있어서 이를 방지하기 위해 리츠(Litz) 권선을 적용해야 하는 등 기존의 일반 변압기와 많은 차이가 있다. 또한 배전급 고압환경에서 운용되는 SST에 적용하기 위해선 토폴로지에 따라 차이가 있지만 고절연을 고려하여 설계되어야 한다. 그림 3은 현재 개발 중인 다양한 형태의 고주파변압기이다^[3].



그림 4 개발 기관별 반도체 변압기용 고주파 변압기

3. SST 개발 현황

SST는 국내외 대학, 연구소 기업 등에서 개발이 진행되고 있다. 주요 개발 목표로는 AC/DC혼용망, 전기차 충전인프라, 철도 차량, 신재생 및 DC배전 등 다양한 분야에서 사업화를 위한 연구개발이 진행 중에 있다^[4].

3.1 국내 반도체 변압기 주요 개발 현황

최근 국내의 반도체 변압기 개발로는 한국 전기연구원에서

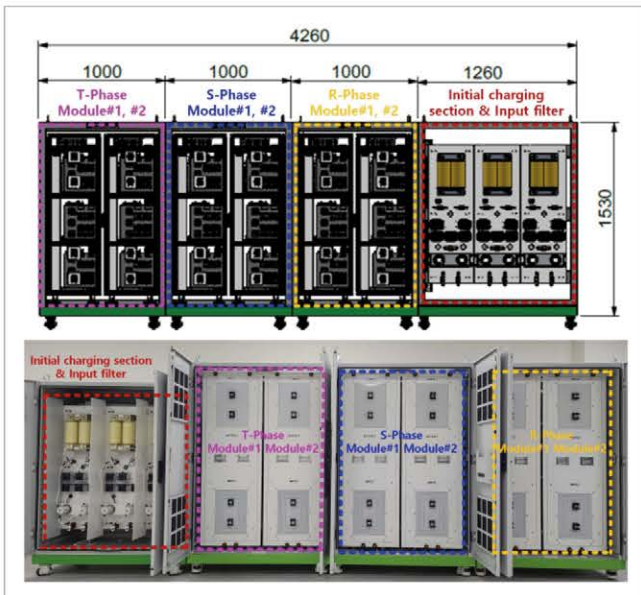


그림 5 3상 13.2kV 300kW 반도체 변압기

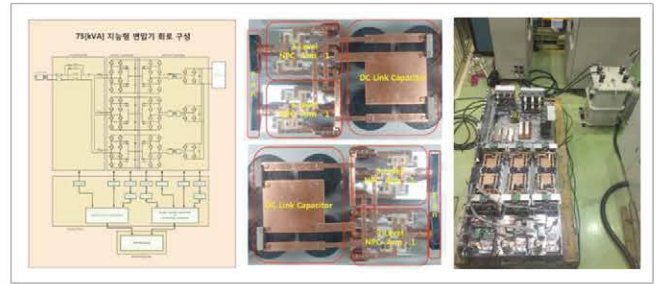


그림 6 철도기술연구원 3.3kV/75kVA 반도체 변압기

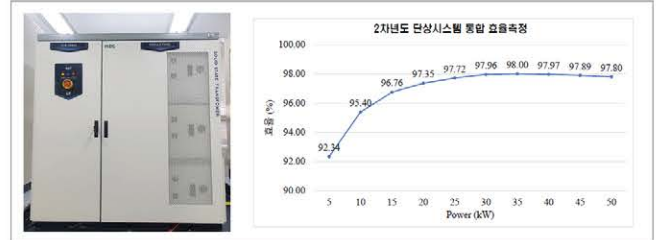


그림 7 LS ELECTRIC 5.7kV/150kVA 반도체 변압기

진행된 배전급 3상 스마트 전력용 반도체 변압기 기술개발이 있다. 본 연구의 목표사양으로는 3상 13.2kVac/1500Vdc 300kW급 반도체 변압기이며 SiC MOSFET소자와 QAB 토폴로지를 적용하였다. 주요 개발 내용으로 고압 환경에서의 고절연 고주파변압기, 고압 전력변환회로 및 전체 시스템에 대한 제어알고리즘을 개발하여 30kV 절연성능을 가지는 고주파 변압기와 이더넷 통신을 통한 50 μ s 속도의 제어기술을 확보하였으며, 이를 바탕으로 3상 13.2kV 시작품을 개발함으로써 22.9kV 반도체 변압기 개발에 필요한 기술들을 확보하였다. 그림 5는 전기연구원에서 개발한 3상 13.2kV/300kW 반도체 변압기이다^[5].

철도기술연구원에서는 철도차량의 입력용 주변압기와 전력변환장치의 경량화 및 효율 개선을 목적으로 철도차량용 경량 지능형 전력 변압기 핵심기술개발을 추진하였다. '18년 단상 3.3kV/75kVA 축소모델 개발을 완료하였으며 '22년 현재 도시철도차량 추진용 반도체 변압기 개발을 통해 25kVac/3MW급 반도체 변압기 개발을 진행 중에 있다^[6-7].

LS ELECTRIC은 3상 5.7kV/150kVA 전력용 반도체 변압기를 개발하였다. SiC MOSFET소자를 이용한 TAB 구조를 가지고 있으며 최대효율은 98%를 구현하였다.

3.2 국외 반도체 변압기 주요 개발 현황

해외 반도체 변압기 개발의 흐름을 보면 기존에는 주로 배전용 반도체 변압기 및 철도차량 추진용 반도체 변압기 개발이 진행되었으나, 최근에 들어서는 전기차 수요의 증가에 따라 충전인프라용 반도체 변압기 개발이 두드러지게 나타나고 있다.

Delta Electrics America는 DOE 과제로 신재생 연계가 가능한 초고속 충전용 배전급 반도체 변압기를 개발하였다. 참

여기관으로는 GM, DTE Energy, Virginia Tech, NetEnergy, Michigan Energy office, Detroit시 정부이며 '18-'21 일정으로 개발이 진행되었다. SiC MOSFET을 이용한 모듈형 구조로 LLC공진형 토폴로지를 적용하였다. 반도체 변압기 고압 입력은 Cascaded multilevel converter topology방식을 적용하였으며 반도체 변압기의 1kVdc DC출력단에서 PV/ESS와 EV Charger가 연계되는 구성을 가지고 있다.

400kW SST XFC(Extreme Fast Charger) System 시험 결과 입력전압 13.2kV, DC charger 출력전압 200~1000Vdc, 최대 출력전류 400Adc, 최대 효율 97.5%의 결과를 도출하였다. 이를

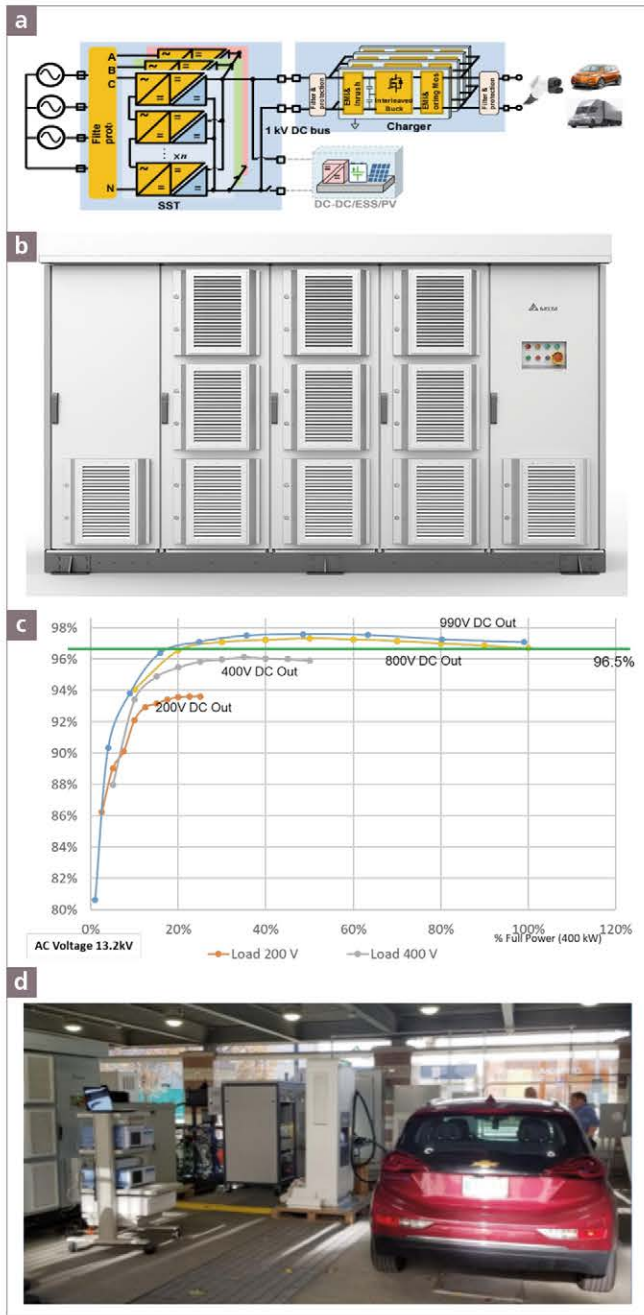


그림 8 (a) 반도체 변압기 기반 충전 시스템 개념도, (b) 13.2kVdc/400kW LLC공진형 반도체 변압기, (c) 충전시스템 효율 곡선, (d) SST기반 급속 충전시스템 실증 시험

바탕으로 GM사에서 3C이상 충전이 가능하게끔 개조된 Chevy Bolt 충전 시험을 진행하여 10분내 충전으로 290km주행 성능을 확보 하였다. 그림 8 (a)는 SST 기반으로 PV/ESS가 연계된 EV 충전 시스템의 개념도이며 (b)는 13.2kV/400kW SST, (c)는 충전시스템 효율 곡선 (최대 97.5%) 그리고 (d)는 GM Chery Bolt 전기차의 충전 시험이다⁸⁾.

DOE는 DCaaS(DC as a service) 비즈니스 모델의 일환으로 EPIR 주관, Eaton, Tritium 등의 컨소시엄으로 SST 기반의 고출력 초급속 충전 시스템을 개발하고 있다. 여기서 주요 컨소시엄 기관의 역할로 EPRI는 과제 주관, DC load center 디자인 및 실증사이트 개발, Eaton은 배전급 반도체 변압기, Tritium은 DC충전기(DC/DC converter) 개발을 담당하였다. Eaton이 개발하는 반도체 변압기는 1MW용량의 3상 13.8kVac/950Vdc 반도체 변압기이며, Tritium은 25kW Dispenser block(DC/DC module)를 개발하여 최대 350kW 초급속 충전용 Dispenser개발을 담당하였다. 그림 9는 ETRI

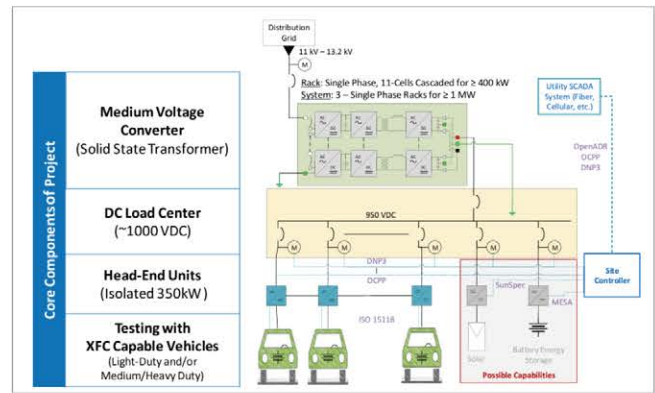


그림 9 SST기반 초급속 충전 시스템 구성

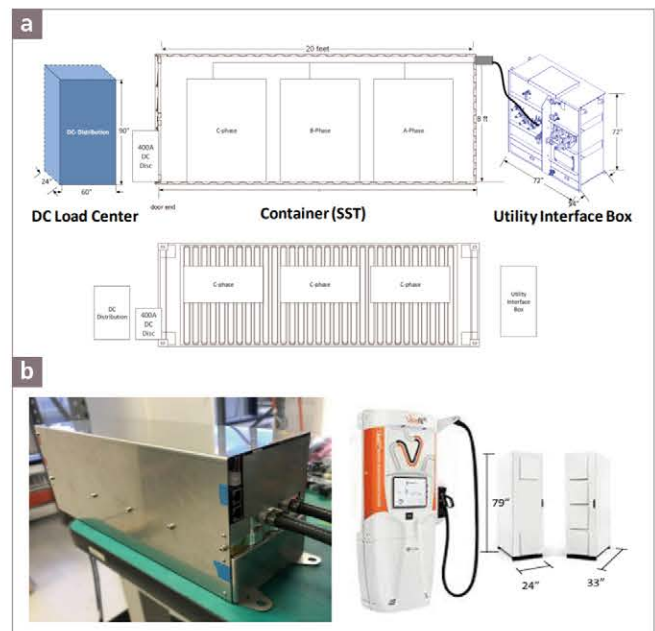


그림 10 (a) 컨테이너 구조의 반도체 변압기 구성 (b) 충전용 25kW 절연형 DC/DC Module 및 초급속 DC Dispenser 구성

주관으로 진행되는 SST기반의 초급속 충전 시스템 구성도이다. 그림 10(a)는 컨테이너에 수납된 형태의 SST 구성도이다. Utility Interface Box는 배전선로 인입, 계전 및 보호시스템으로 구성되어있고, SST의 DC출력은 DC Load Center를 통해 DC선로로 분기된다. 그림 10(b)는 초급속 충전용 25kW 수냉식 절연형 DC/DC 모듈로서 별도의 캐비닛에 병렬로 수납되어 충전 Dispenser와 더불어 최대 350kW 구성이 가능하다^[9].

4. 결론

지금까지 반도체 변압기의 기본적인 구성 및 최근 개발 현황에 대해 기술하였다. 최근 반도체 소자의 발전에 힘입어 현재의 고성능의 SiC소자 출현으로 반도체 변압기의 상용화가 빠르게 다가서고 있다. 이와 더불어 PV, ESS, EV 충전 등 DC 계통의 도입이 빠르게 증가하고 있어 배전급 반도체 변압기가 점차적으로 상용화 관점으로 접근하고 있다. 특히 충전인프라 분야의 Solution으로 많은 연구 및 투자가 이루어지고 있어 조만간 관련 시장 및 비즈니스 모델이 형성될 것으로 보여진다. ■

참고문헌

- [1] Mohammed Azharuddin Shamshuddin et al., "Solid State Transformers: Concepts, Classification, Energies," *energies* 2020, 13(9), 2319.
- [2] Seyedamin Valedsaravi, Abdelali El Aroudi and Luis Martínez-Salamero, "Review of Solid-State Transformer Applications on Electric Vehicle DC Ultra-Fast Charging Station," *Energies* 2022, 15(15), 5602.
- [3] https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/workshop_publications/5_10kV-SiC-MOSFETs-for-Solid-State-Transformers_FINAL_Guillod.pdf
- [4] 임정우, 조영훈, "전력용 반도체 변압기 개발 동향," *전력전자학회지*, Vol. 22, No. 2, pp. 27-32, April, 2017.
- [5] 정동근 외 7명, "직류 배전망 연계를 위한 3상 13.2kV급반도체 변압기 시스템에 대한 연구," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 26, No. 5, pp. 315-324, Oct, 2021
- [6] 김명동 외, "철도 차량용 경량 지능형 전력 변압기 핵심 기술 개발," 철도기술연구원 과제보고서, 한국철도기술연구원 주요사업, 과학기술정보통신부, 2017
- [7] 최동호 외 3명, "도시철도차량용 3MW급 반도체 변압기 시스템 설계 및 차량 운전조건을 적용한 손실 분석," *The Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 25, No. 3, pp. 165-174, 2022.
- [8] https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/elt241_zhu_20_21_o_5-24_126pm_LR_TM.pdf
- [9] https://assets.ctfassets.net/ucu418cgcnau/1P1nWb9gNfeq8XFz1unE97/d5757037d67da55fa2100f33169e89da/D1-2_3_Simpson_Colins_201118_-_IWC_XFC_DCaaS.pdf

심정욱 LS ELECTRIC 연구개발본부 Manager

2003년 순천향대 대학원 전기전자공학 과 졸업(공학).
2007년~현재 LS ELECTRIC 연구개발본부 선행기술연구팀 Manager,
2018년~현재 CIGRE W/G A3.40 Member.

