

반도체 변압기 기반의 1MVA급 멀티채널 충전기 개발

김성주, 변병주, 서해원, 유광현, 이재근, 박종형, 정병환
(주)효성

Development of 1MVA Multi-Channel Charger Based on Solid State Transformer

Sung-joo Kim, Byeng-joo Byen, Hae-won Seo, Gwang-Hyeon Ryu, Jae-keun Lee,
Jong-hyung Park, Byung-Hwan Jung
Hyosung Corporation

ABSTRACT

본 논문은 국내 최초로 22.9[kVrms] 국내 배전전압에 직접 연계 가능한 반도체 변압기(Solid State Transformer, SST) 기반의 1MVA급 멀티채널 충전기 개발에 대한 시스템 소개를 다룬다.

기존의 저압 입력연계 방식을 탈피하여 수전 전력설비를 최소화할 수 있는 대용량 급속 충전기 개발과정을 소개하고, 1MVA 충전기 시스템 성능평가를 위한 시험설비 구축현황과 통합연계시험을 통해 시스템 기능/성능을 검증한다.

1. 서 론

미세먼지와 같은 환경문제가 심각해지면서 국제적 환경 규제 및 자동차 관련 규제가 강화됨에 따라, 자동차 산업의 배출 가스 저감 및 연비향상을 위한 전기자동차와 관련 인프라 개발에 대한 필요성이 높아지고 있다. 이에 따라, 전 세계적으로 전기차는 점점 더 보편화되고 있으며 수요 또한 급속히 늘고 있는 상황에서 국내외를 가릴 것 없이 많은 기업들이 전기차 충전기 개발 및 인프라 확충에 관심을 기울이고 있다. 배터리 전기자동차(BEV) 및 플러그인 하이브리드 자동차(PHEV)의 출고가 2025년까지 460만대에 이를 것으로 예상됨에 따라, 제작사들이 전기자동차의 배터리 용량증대에 집중하면서 더 큰 용량을 갖는 다채널 급속 충전기에 대한 수요가 늘어나고 있다^[1].

이러한 대용량 충전수요에 대응하기 위해서는 대용량화된 충전부가 다수 구성된 대규모 충전 인프라 설비를 구축하여야 하지만 현재 전력수요의 대부분을 차지하는 대도시 도심과 공동주택 및 집합건물에는 관련 전력 인프라 설비를 시공할 절대적 공간이 부족한 실정이다. 이러한 상황에서 다음에서 소개하는 반도체 변압기는 좋은 대안이 될 수 있다.

반도체 변압기는 전력전자 기술을 활용하여 전통적인 변압기를 대체하는 새로운 형태의 전력변환기기이다. 반도체 변압기는 기존 변압기와 연결되어 사용되는 저압 시스템에 비하여 높은 효율과 높은 전력밀도를 가져갈 수 있는 장점이 있고, 용량 확장성 측면에서도 이점이 있다. 이러한 특징으로 인해 다양한 어플리케이션에 적용이 가능하고, 일찍이 2004년도부터 해외의 기업들이 철도 분야에서부터 배전계통과 DC 계통, 전기차 충전기에 이르기까지 반도체 변압기 적용을 하기 위해 연구를 진행 중인 주된 이유이기도 하다^[2-8].

당사에서는 이러한 장점을 갖고 있는 반도체 변압기를 기반으로 대용량으로 다수의 충전기에 전력을 공급해줄 수 있는 1MVA급 멀티채널 충전기를 개발하였다. 해당 시스템은 22.9[kVrms] 전압에 직접 연계가 가능하고 동시에 배터리 시스템과 연계하여 전기차 충전기 측으로 전력 전달이 가능한 시스템이다. 또 다른 특징으로는 출력의 포트들 5개까지 출력이 가능하여 동시에 5대의 자동차를 각각 200kW까지 전력 공급할 수 있도록 되어 있다. 해당 기능 성능에 대해 검증하기 위해 사내에 1MW 이상의 부하 시험이 가능한 시험 환경을 구축하였으며, 여기서 1MW 동작에 대해 검증을 수행하였다. 또한 실제 전기자동차 3대를 충전기에 연결하여 충전이 되는 것을 확인하여 해당 시스템의 성능을 검증하였다.

2. 본 문

2.1 1MVA급 멀티채널 충전 시스템 소개

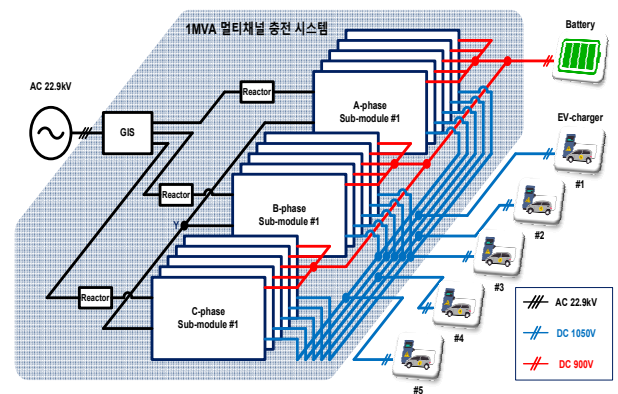


그림 1 1MVA 멀티채널 충전시스템 구성도
Fig 1. 1MVA Multi-Channel Charging System

당사에서 개발한 1MVA급 멀티채널 충전기는 반도체 변압기 기반의 전력변환 시스템이며, 그림 1과 같이 구성되어 있다.

본 시스템의 주요 특징은 첫째, 국내 최초로 교류 전압 22.9[kVrms]에 직접 연계하여 MVA급 대용량 전기차 급속충전용 전력변환기를 구현하여 수전 전력설비의 공간 및 비용을 최소화 하였다. 둘째, 멀티채널(5Ch) 출력을 통한 전기차 급속충전이 가능하게 함으로써 출력당 병렬운전 및 고속 충전기의 고도

화를 이루었다. 셋째, 전력망의 피크 전력부담에 대해 경감가능한 ESS보상기능을 구현하여 부가적인 PCS 없이 한 대의 전력 변환장치로 ESS 기능까지 동시 구현을 가능하게 하였다. 넷째, SiC 전력용반도체 소자를 활용한 수냉식 고효율 서브모듈(최고 효율: 98.3%)을 달성함으로써, 충전시스템의 고효율 운전이 가능토록 하였다. 또한 이러한 기능을 안정적으로 구현하기 위해서는 고속 통신이 필수적이며, 이를 위해 이더넷 통신을 사용하였다. 이더넷 통신속도는 100[Mbps]까지 가능하여 시스템 내의 제어 속도와 유사하게 통신 할 수 있게 하는 장점이 있고, 이를 통하여 상위제어기와 하위제어기 간의 지연시간을 줄여 안정적인 제어 및 보호 기능들을 구현할 수 있게 해주며, Ring 구조의 통신 이중화를 통해 시스템 신뢰성을 높여주었다.

표 1 1MVA 멀티채널 충전시스템 사양

Table1. Specification for 1MVA multi-channel charging system.

구분	단위	Spec.
용량	MVA	1
상수	phase	3
입력 결선	-	Wye
입력 전압	kVrms	22.9
주파수	Hz	60
EV 전압	Vdc	1,050(±2%)
ESS 전압	Vdc	900(±12.5%)
채널수	Ch	EV : 5Ch ESS : 1Ch
냉각방식	-	수냉식
SM 최고효율	%	97 ↑

1MVA급 멀티채널 충전기 시스템 사양은 표 1과 같다. 시스템 용량은 1MVA이며, 교류 입력 사양은 3상/22.9[kVrms], 60[Hz], Wye 결선이고, 출력측 사양은 충전기와 연계 전압 1050[Vdc](±2%), 배터리단 전압 900[Vdc](±12.5%)이다. 또한 시스템의 충전기를 위한 출력 채널은 5개이며, 시스템 냉각방식은 시스템 소형화를 위해 수냉식을 적용하였다.

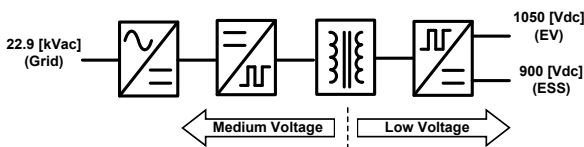


그림 2 서브모듈 단선도

Fig 2. Sub-Module one-line diagram

시스템은 그림 1과 같이 15개의 서브모듈로 구성되며, 이 때 각 서브모듈 단선도는 그림 2와 같다. 서브모듈의 용량은 70 [kW]이며, Grid단은 MMC구조를 통해 DC_LINK 전압을 생성하며, 직류단은 QAB 컨버터 구조를 가지고 있다. 또한 직류측 내 고압(Medium Voltage)측은 QAB 컨버터의 브릿지 2개를 직렬로 연결하고 있으며, 저압(Low Voltage)측은 전기차 충전기단과 배터리단으로 각각 구성 하였다. 해당 구조는 직류단의 파워 소자들의 내압을 낮게 가져가며, 배터리와 전기차 충전기를 동시에 연계할 수 있는 이점을 가져갈 수 있다

2.2 멀티채널 충전시스템 시험환경 및 구성

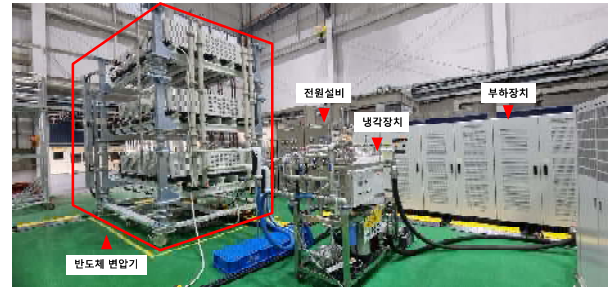


그림 3 1MVA 멀티채널 충전시스템 시험환경
Fig3. Test bench for 1MVA multi-channel charging system

그림 3은 1MVA 멀티채널 충전기(반도체 변압기)를 검증하기 위해 (주)효성 중공업연구소에 구축된 시험시설이다. 시험설비는 냉각 장치, 부하장치를 포함한 전기설비들로 구성되어 있으며, 그림 4는 충전기의 1MW 부하시험을 하기 위한 구성도이며, 그림 5는 중앙제어에서 설계/제작된 충전스탠드와 충전기간의 통합연계하여 전기차 멀티채널 충전기능을 검증하기 위한 시험 구성도를 나타내고 있다.

해당 시험들을 진행하기 위해서 계통으로부터 입력받은 전압을 슬라이더를 통해 전압을 0~760[Vrms]까지 가변을 하며, 이를 TR1을 통해 22.9[kVrms]까지 승압을 하여 해당 시스템 (SST)에 입력전압을 공급할 수 있도록 하였다. 그리고 해당 시스템의 부하를 위하여 AC/DC 컨버터를 사용하여 전력 손실 분만 계통을 통해서 전력공급 받을 수 있도록 Back-to-Back 구성을 하였다.

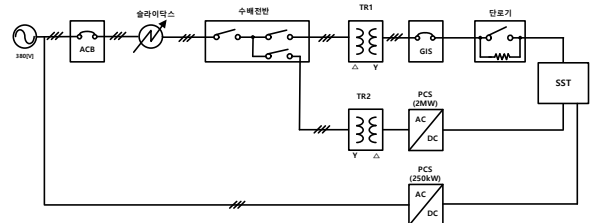


그림 4 멀티채널 충전시스템 1MW 부하시험 구성도

Fig4. Test Configuration for 1MW Load Verification of Multi-Channel Charging System

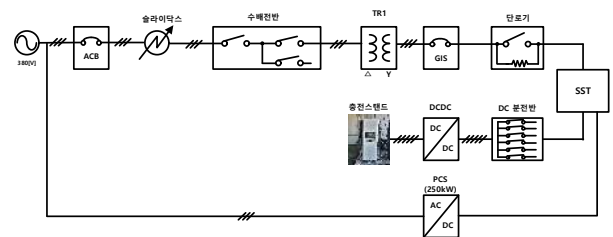


그림 5 멀티채널 충전시스템의 전기차 통합시험 구성도

Fig5. Integrated Test of Electric Vehicle in Multi-Channel Charging System

2.3 시스템 단위 시험결과

그림 6은 1MW 부하 시험 시 급속충전기용 전력변환기 시스템의 동작파형을 보여주고 있다. 그림 6(a)는 정격전압에서

무부하 동작을 하고 있는 것을 보여주고 있고, 계통 전류가 흐르지 않으며 출력 전압들이 정상적으로 제어 되고 있는 것을 알 수 있다. 그림 6(b)는 정격전압에서 전력을 전달하고 있을 때의 파형을 보여주고 있으며, 계통전류가 정현파를 잘 유지하며 제어되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 출력전압 리플 및 과도 현상 없이 정상적으로 제어되고 있는 것을 알 수 있다. 그림 6(c)는 전력을 무부하에서 정격전력까지 증가시켰을 때 시스템의 동작이 정상적으로 되는 것을 보여주고 있으며, 계통전류 및 출력 전압들의 파형이 정상적으로 제어되는 것을 알 수 있다. 마지막으로 그림 6(d)는 배터리측으로 전달되는 전력을 제어하였을 때, 정상적으로 제어되는지 보여주는 파형이다. 배터리측 전력을 충전 및 방전 동작을 200kW까지 하였을 때 계통전류가 정상적으로 제어되는 것을 알 수 있다.

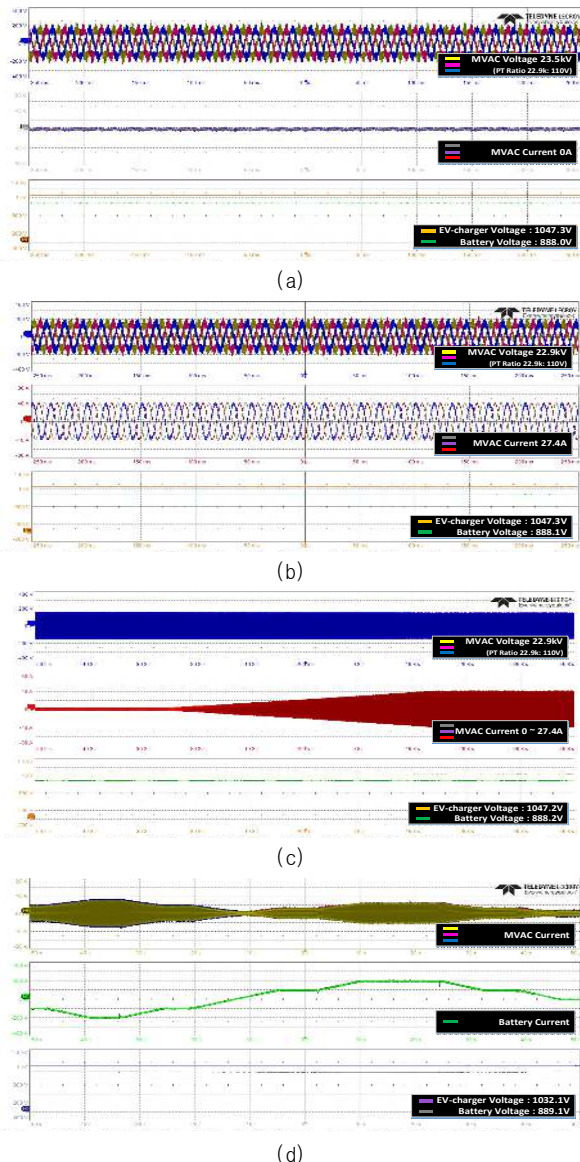


그림 6. 부하 시험 파형
(a) 무부하 파형, (b) 정격 부하 파형, (c) 부하 증가 시 동작 파형, (d) 배터리 전력제어 시 동작 파형
Fig 6. Load test waveform
(a) No-load (b) Rated load (c) Increasing load
(d) Bat.power control

그림 7은 전기자동차에 충전 시험을 하기 위해 EVSIS社에서 개발한 DC/DC 컨버터와 충전스탠드 및 실차 충전 사진을 보여주고 있다. DC/DC 컨버터는 충전스탠드에서 필요한 전력을 공급하고, 충전스탠드는 차량과 통신을 하여 배터리에 필요한 전력을 확인하기 위하여 사용되었다. 그림과 같이 전기자동차 3대를 동시에 충전을 하여 정상적으로 동작하는 것을 확인하였고, 이를 통해 시스템의 실제 충전 성능을 확인할 수 있었다.

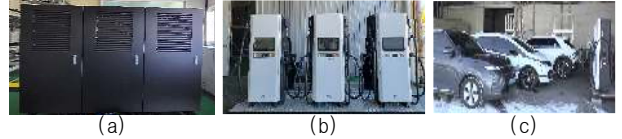


그림 7. 전기자동차 충전 시험
(a) DC/DC 컨버터, (b) 충전 스탠드, (c) 실차 충전 사진
Fig 7. Electric vehicle charging test
(a)DC/DC Con. (b)Charging stand (c) Real vehicle charging picture

3. 결 론

당사에서는 22.9[kVrms]에 직접 연계가 가능한 반도체 변압기 기반의 1MVA 멀티채널 충전기를 개발하였다. 개발된 전력 변환기는 실제 차량과의 연계를 통해 성능을 검증하였고, 여러 차량에 동시 충전이 가능함을 확인하였다. 해당 장비는 반도체 변압기 기술을 기반으로 국내 최초로 MV 레벨의 교류 전압과 연계를 했다는 것에 큰 의미가 있으며, 제품화를 위해서는 용량 증대 및 신뢰성 확보 등의 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

이 논문은 (주)효성의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] Frost & Sullivan, "Global Analysis of Charging Technologies for Electric Vehicles, Forecast to 2025" KEPCO Journal on Electric Power and Energy, Volume 6, Number1, March 2020, pp. 15-20
- [2] A. C. Nair and B. G. Fernandes, "A solid state transformer based fast charging station for all categories of electric vehicles," in Proc. 44th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON), 2018, pp. 1989-1994.
- [3] M. Safayatullah, M. T. Elrais, S. Ghosh, R. Rezaii, and I. Batarseh, "A Comprehensive Review of Power Converter Topologies and Control Methods for Electric Vehicle Fast Charging Applications," in IEEE Access, vol. 10, pp. 40753-40793, Apr. 2022.
- [4] 박진혁, "철도차량용 반도체 변압기 기술 동향", 전력전자학회지, 제26권, 제3호, 33-38, 06, 2021
- [5] 임정우, 조영훈, "전력용 반도체 변압기 개발 동향", 전력전자학회지, 제22권, 제2호, 27-32, 04, 2017
- [6] 이승환, 김성민, 김명룡, "철도차량용 반도체 변압기 개발 현황", 전력전자학회지, 제22권, 제2호, 33-37, 04, 2017
- [7] 심정욱, "전력용 반도체 변압기 개발 현황", 전력전자학회지, 제27권, 제5호, 33-37, 10, 2022