

# 22.9kV 배전전압에 직접 연계가 가능한 1MVA급 멀티포트 전기차 충전 시스템 제어 및 구현

김호성, 정동근, 김명호, 유명효, 윤혁진, 박시호, 백주원  
한국전기연구원

## Control and implementation of a 1MVA multi-port electric vehicle charging system capable of direct connection to a 22.9kV distribution voltage.

Ho-Sung Kim, Dong-Keun Jeong, Myoung-Ho Kim, Myung-Hyo Ryu, Hyeok-Jin Yun, Si-Ho Park, and Ju-Won Baek

KERI

### ABSTRACT

본 논문에서는 22.9kV 배전전압에 직접 연계가 가능한 1MVA급 멀티포트 전기차 급속 충전 시스템을 제안하였다. 제안하는 충전 시스템은 200kW급 급속 충전기 5개 포트와 및 200kW급 ESS PCS를 개별 독립 제어하는 것이 가능한 구조로 설계되었으며 이를 위한 제어 알고리즘 및 EtherCAT 통신 기반 제어 기술을 제안하였다. 전체 시스템의 정격 전압 및 용량 테스트를 통해 제안하는 방식의 유효성을 검증하였다.

### 1. 서론

전 세계적으로 탄소 저감 및 자동차 배기가스 허용 기준을 강화 정책을 발표하면서 기존 내연기관 차량에서 전기차로 체제 변화를 촉진하기 위한 계획들이 점점 구체화되고 있다. 즉, 우리는 전기차 보급이 폭발적인 속도로 증가하는 상황에 눈앞에 두고 있다.<sup>[1]</sup>

전기차의 보급 속도에 맞춰서 대용량 및 급속 충전 인프라 설비의 확충은 필수적이다. 전기차의 배터리 용량의 확대로 주행거리를 기존 내연기관 차량과 동등 수준으로 맞추게 되면서 향후 단일 급속 충전 용량 역시 100kW에서 400kW까지 확대될 것으로 예상된다. 이러한 대용량 충전 수요에 대응하기 위해서는 대용량화된 충전부가 다수 구성된 MW급 시스템의 대규모 충전 인프라 설비를 구축하여야 하지만 현재 전력수요의 대부분을 차지하는 대도시 도심과 공동주택 및 집합건물에는 관련 전력 인프라 설비를 시공할 절대적 공간이 부족한 실정이다. 이에 따라 기존과 다른 형태의 MW급 급속 충전기 모델이 필요하며 또한 향후 대다수 충전기가 급속 충전이 가능하도록 충전 인프라 설비의 최소화, 효율화, 다기능화가 필요하다.

기존의 일반적인 전기차 충전용 전력변환장치는 그림 1 (a)와 같이 고압 계통 변압기에 충전기가 연계되는 구조가 일반적이다. 고압 수동변압기를 통해 배전전압에서 상용전압으로 강압을 하고 이를 입력으로 받아서 정류기가 정류 직류 전압을 만들고 이를 다시 직류 컨버터를 통해 필요한 직류 출력을 만들어내는 구조이다. 완속 충전 방식이 아닌 급속 충전의 경우, 수동변압기 손실과 저압 대전류 구조로 효율 개선에 한계가 있고 고압 대용량 설비로 인해 일반 공동 주택이나 도심에서 설치 공간에 대한 제약이 많다. 동시에 대규모 급속 충전으로 인한 전력수요에 대응하기 위해서는 현재 전력망의 전력 공급 부

족 문제를 해결해야 하며 단순한 설비증설이 아닌 ESS 등을 통한 보완이 필요하다. 기존 구조에서는 ESS 설치를 위해 ESS용 PCS 컨버터의 추가 설치가 필요하다.

본 논문에서 제안하는 충전 설비의 구성은 그림 1 (b)와 같다. 반도체 변압기 기술을 이용하여 22.9kV 고압 배전망에 직접 연계가 가능한 특징을 가지며 전력변환 단계를 축소하기 위해 기존 수동 고압 변압기를 제거하여 설비를 축소하였다. 또한, 전력변환장치 내에 ESS 연계 PCS 기능을 내장할 수 있는 회로안을 제시하여 충전 인프라의 개발 요건을 충족하도록 시스템을 구성하였다.

본 논문에서 신규 전력 설비의 증설이 어려운 지역의 급속 충전 인프라 구축 기술을 마련하기 위해서 22.9kV 배전전압에 직접 연계가 가능하며 멀티포트를 통해 여러 대의 차량에 급속 충전이 가능하고 전력망의 피크 전력 부담을 경감하도록 ESS 전력 보상 기능이 내장되는 반도체 변압기 기술을 제안하였다. 개발된 시스템은 22.9kV 배전전압에 직접 연계가 가능한 1MVA급 멀티포트 전기차 급속 충전 시스템으로 200kW급 급속 충전기 5개 포트와 및 200kW급 ESS PCS를 개별 독립 제어하는 것이 가능한 구조로 설계되었다. 또한, 제안하는 시스템을 제어하기 위한 제어 알고리즘 및 EtherCAT 통신 기반 제어 기술을 제안하였다. 전체 시스템의 정격 전압 및 용량 테스트를 통해 제안하는 방식의 유효성을 검증하였다.

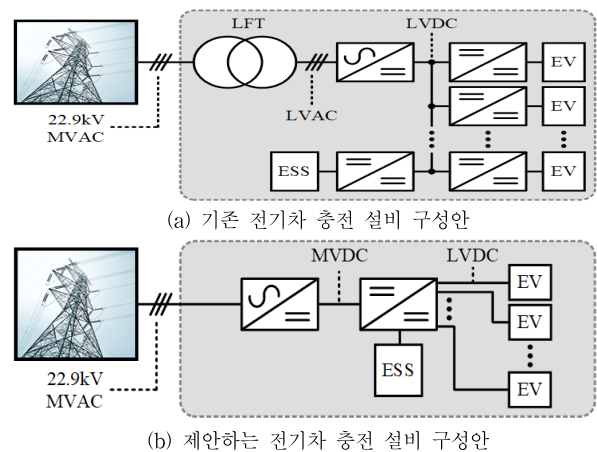


그림 1 전기차 충전 설비 구성안 비교  
Fig. 1 Comparison of Electric Vehicle Charging Infrastructure Configurations

## 2. 시스템 및 회로 구조

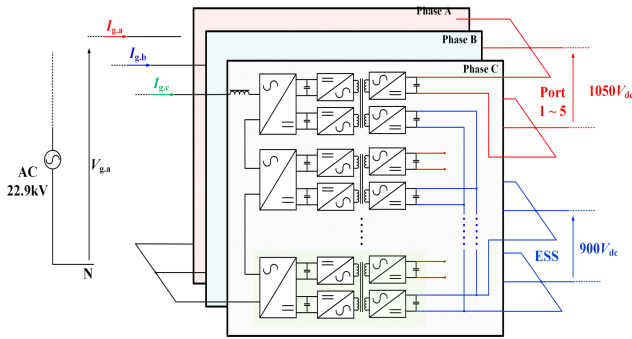


그림 2 제안하는 멀티포트 전기차 충전 시스템 회로안  
Fig. 2 Proposed Circuit Design for Multi-Port Electric Vehicle Charging System

고압 입력 전압에 대응하는 전력변환장치의 경우 반도체 소자 내전압의 한계를 극복하기 위해서 직렬 형태로 연결된 멀티 레벨 컨버터 구조가 사용된다<sup>[2]</sup>. 출력측에 절연 전원 및 저압 직류 전압으로 변환하기 위해서는 추가로 절연형 직류 컨버터가 각각의 멀티레벨 컨버터 모듈마다 필요하다. 멀티레벨 컨버터와 결합하여 절연형 직류 전압을 얻기 위한 기본적인 회로 구성 및 제어 방법은 직류 컨버터의 출력을 모두 병렬 연결하고, 그에 대한 각 직렬 모듈간 전력 밸런싱 및 출력 병렬 제어를 하는 방법이다. 따라서, 기존에 많이 연구된 반도체 변압기 토폴로지는 직렬 연결된 각 컨버터 모듈의 출력 전압과 전류를 독립적으로 제어할 수 없고 단일 출력을 가진다<sup>[3]</sup>.

그림 2는 본 논문에서 제안하는 전력변환장치의 회로 구조이며, Quadruple Active Bridge (QAB) 컨버터의 병렬 포트를 활용하여 ESS용 PCS 기능과 파워 밸런싱 기능을 수행하면서 여러개의 독립된 전압 출력을 생성할 수 있다. 각 포트의 출력 전압을 독립적으로 제어할 수 있기 때문에 전기차 충전기로서 여러대를 동시에 충전할 수 있는 특징을 가진다.

## 3. 제어기 구성

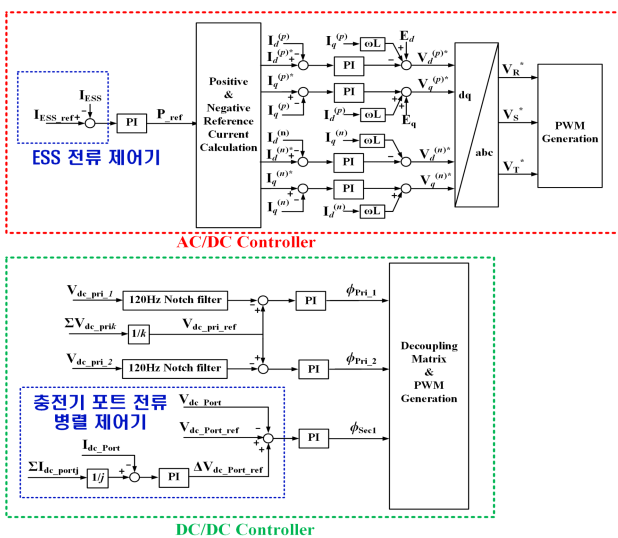


그림 3 제안하는 전력변환장치의 제어기 구성안  
Fig. 3 Control scheme of the proposed power converter

일반적으로 고압 교류 - 저압 직류에 대응하도록 설계된 컨버터의 3상 전력을 제어하기 위한 AC/DC 컨버터용 제어기는 컨버터의 중간 전압인 DC-link 전체 전압, 입력 전류와 함께, 삼상 전력 불평형에 따른 상간 전압 밸런싱을 위해서 영상분 전압 제어를 수행한다. 절연형 DC/DC 컨버터는 2차측 독립 포트 전압 제어를 출력측 한 포트의 PWM 제어 자유도를 독립적으로 하되, 절연형 DC/DC 컨버터의 다른 포트는 ESS 전류 밸런싱 및 1차측 DC-link 전압의 전압 편차를 줄이는 밸런싱 제어를 수행하여야 한다. 이때 PWM 제어 자유도는 하나이지만 출력 밸런싱 제어 및 입력 전압 밸런싱 두 기능을 동시에 제어하므로 제어 성능이 떨어질 수 있다. 또한, 출력측 밸런싱을 위해서 모든 모듈마다 정밀한 전류 센서가 필요하며, 각 모듈마다 전류 정보를 공유하기 위해서 추가로 모듈간 통신 기능이 요구된다. 따라서, 기술된 부분들이 시스템의 제작 난이도와 제어의 복잡도를 높이므로, 기존 회로 방식을 실제 시스템에 적용하기에 어려움이 있다.

그림 3은 그림 2에서 제안하는 회로의 제어 알고리즘을 나타낸 것이다. 기본적인 제어구조는 AC/DC 컨버터가 ESS 전류 제어 및 계통 전류 제어를 하면서 QAB 컨버터가 DC-link 전압 제어 및 출력 전압제어 / 모듈 병렬 제어를 하는 구조를 가진다.

제안하는 제어기의 특징은 AC/DC 컨버터는 DC-link 전체 전압 제어 대신, ESS를 충·방전하는 전체 전류를 제어하는 것이다. 이 제어기의 구성상 ESS에서 공급하지 못한 부족한 파워 용량은 QAB 컨버터가 제어하는 DC-link 전압 유지를 위해 필요한 파워 용량에서 계통측 전류 레퍼런스의 크기로 자동 반영된다.

제안하는 QAB 컨버터는 ESS 연결 포트의 회로를 기준으로 3개의 PWM을 Phase shift 동작으로 제어한다. QAB 컨버터의 제어기는 1차측 DC-link 전압 두 개를 제어하고, 전기차 충전을 위한 출력측 전압 제어 및 200kW급 5개의 독립 출력을 위해서 각 회로의 병렬 제어 기능을 수행한다.

제안하는 제어 방법을 적용하면 ESS가 본 시스템의 1차적인 입력측 전력 공급원으로 보이게 된다. 따라서, 본 제어 방식은 15개의 모듈의 ESS측과 연결된 컨버터 측의 병렬 제어가 필요 없다. 시스템 제어를 위해서 ESS 최종 출력단에 전류 센서 1개만 사용할 수 있는 제어구조를 가지기 때문에, 각 모듈마다 전류 센서를 사용하는 기존 제어 방식 대비 경제적인 특징을 지닌다. 또한, 각 모듈의 DC-link 단의 파워 밸런싱을 위해 ESS측 출력 전류 1개만 측정해도 기능을 수행할 수 있으므로 모듈간 전류 및 전력 밸런싱을 위한 통신이 불필요한 장점이 있다. 제안하는 제어기를 최종 멀티포트 충전기 시스템에 적용하여 ESS 전력 제어 / 개별 충전기 포트 병렬 제어 / DC-link 전압 제어 / 입력 전력 제어의 실험을 완료하였다.

그림 4는 멀티 채널 충전기 시스템의 제어기 구성도이다. 3상 22.9kVac 입력 / 1MVA 용량의 멀티 포트 충전기 시스템은 각 상당 5개의 단위 모듈로 구성되며 총 15개의 Slave 제어기가 사용된다. 시스템에서 AC 센싱과 AC 제어용 레퍼런스를 생성하는 Master 제어기와 EtherCAT Master인 Beckhoff사의 산업용 PC가 EtherCAT 통신으로 연결되어 있는 구조이다. 각 단위 모듈의 센싱 및 상태 정보는 EtherCAT 통신을 통해서 Master PC로 전달되며 Master PC의 모니터링 프로그램에 HMI를 구현하여 시스템 제어 및 상태 정보를 모니터링 할 수 있도록 시스템을 구현하였다.

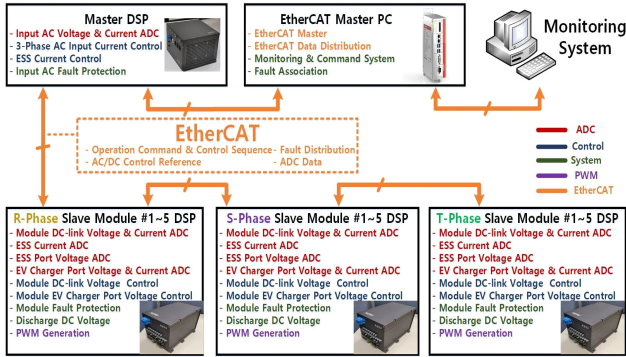


그림 4 Ethercat 통신 베이스의 시스템 제어기 구성안  
Fig. 4 System Controller Configuration Based on EtherCAT Communication

시스템 운영을 효율적으로 제어하고 통신 패킷을 최적화하기 위해서 제어구조를 그림 4와 같이 정립하였다. Master 제어기는 AC 센싱 / 3상 입력 전류 제어 / ESS 전류 제어 / AC Fault 체크를 담당한다. Slave 제어기는 Master 제어기에서 통신으로 전달해주는 제어 reference 정보를 이용하여 단위 모듈의 AC-DC 정류의 PWM을 생성한다. 또한 QAB 컨버터를 이용한 DC-link 전압제어 / 충전 포트 전압 제어 / 단위 모듈 Fault 체크를 담당한다. 각 Slave 모듈은 모두 동일한 제어기 형태로 구성되어 시스템 제작 및 운영의 편의성을 높였다.

제안하는 제어 시스템의 특징은 멀티 모듈 컨버터에 최적화된 EtherCAT 통신을 구현하기 위해 Dual CPU 구조의 DSP 기반으로 각 코어에 통신과 제어 연산을 분리한 구조를 이용하면서 모든 모듈의 PWM의 동기화를 추가적인 Sync 신호를 없이 자체 EtherCAT 통신만을 이용해서 구현하였다. 이때의 모든 PWM 최대 변동폭 150ns 이하로 15개의 개별 모듈이 정확한 Master의 PWM 지령을 통해 시스템 제어가 이루어지는 것을 실험을 통해서 확인하였다.

#### 4. 1MW 정격 부하 실험

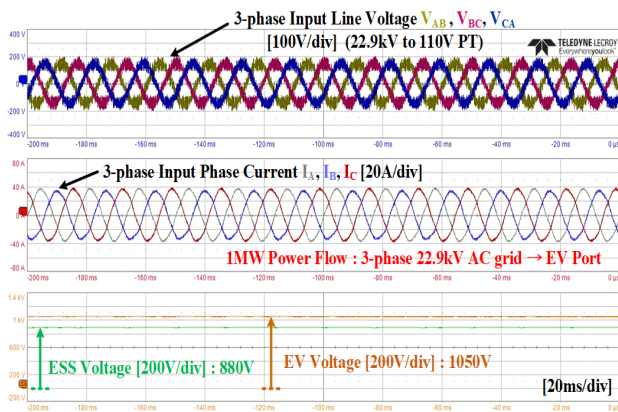


그림 5 1MVA 정격 부하 인가 조건에서 실험 파형  
Fig. 5 Experimental waveform under 1MVA rated load condition

그림 5는 3상 22.9kV 입력 조건에서 멀티채널 충전기 시스템 1MVA 부하 실험 파형이다. 3상 22.9kV의 고압의 전압은 AC 22.9kV를 AC 110V로 변환해주는 계기용 변압기 PT를 이용하여 측정하였다. ESS 전압 880V 조건에서 QAB 컨버터가

1050V의 EV 포트 전압을 안정적으로 제어하는 것을 확인하였다. 또한, ESS 전류를 0으로 제어하고, 200kW급 5개의 EV 포트에서 총 1MW의 부하를 인가하였을 때, AC 계통에서 공급받는 1MVA의 부하 전력 역시 안정적으로 제어되는 것을 확인하였다. 본 실험 파형을 통해 22.9kV 입력 / 1MVA 용량의 멀티채널 충전기 시스템의 시스템 설계 및 제어기 성능을 확인하였다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 국내 AC 배전 전압이 3상 22.9kV 전압에 직접 연계해서 전기차 급속 충전 200kW 5개와 ESS용 PCS를 내장한 회로 기술과 제어 기술을 제안하였다. 제안하는 기술은 정격 전압 조건에서 1MVA 부하 실험을 통해서 성능을 검증하였다. 본 기술은 앞으로 신규 전력설비의 증설이 어려운 지역의 급속 충전 인프라 구축을 목적으로 활용성이 매우 클 것으로 기대된다.

#### 참고 문헌

- [1] Z. Ullah et al., "Optimal scheduling and techno-economic analysis of electric vehicles by implementing solar-based grid-tied charging station", Energy, vol. 267, pp. 126560, 2023
- [2] Venkat N. Jakka et al., "Implementation of Flexible Large Power Transformers Using Modular Solid State Transformer Topologies Enabled by SiC Devices", ECCE 2019.
- [3] Yos Prabowo et al., "ZVS Boundary Analysis and Design Guideline of MV Grid-Compliant Solid-State Transformer for DC Fast Charger Applications", ECCE 2022.