

# 중전압 멀티레벨 무선전력전송 시스템에 대한 연구

황현지, 이재홍, 이승환  
 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Research on a Medium-Voltage Transformerless Multilevel Inductive Power Transfer System

Hyeonji Hwang, Jaehong Lee, Seung-Hwan Lee  
 School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul

### ABSTRACT

본 연구에서는 중전압 멀티레벨 무선전력전송 시스템을 개발하였다. 제시한 멀티레벨 무선전력전송 시스템은 변압기를 쓰지 않고 멀티레벨 컨버터와 여자 코일을 이용하여 중전압 계통을 저전압 출력으로 변환한다. N:1로 결합된 여자 코일과 급전 코일이 무선전력전송을 위한 자기장을 생성한다. 그리고 집전 코일이 급전 코일과의 유도성 결합을 통해 전력을 모을 수 있다. 이 중전압 무선전력전송 시스템은 기차와 대규모 무선충전소에 적용될 수 있다.

### 1. 서론

무선전력전송 시스템은 편리하고 안전하기 때문에 학계에서 많은 관심을 받아 왔다<sup>[1],[2]</sup>. 그러나, 기존의 무선전력전송 시스템은 저전압에서 적용되도록 개발이 되어왔다. 전력 용량을 늘리기 위해, 중전압 멀티레벨 무선전력전송 시스템이 몇몇 연구자들에 의해 제시되어 왔다<sup>[3],[4]</sup>. 그림 1에는 여자 코일을 이용한 멀티레벨 무선전력전송 시스템이 있다<sup>[5]</sup>. 여자 코일이 멀티레벨 컨버터의 출력에 연결되어 있고, 여자 코일은 마치 멀티와인딩 변압기처럼 하나의 급전 코일에 자기적으로 강하게 연결되어 있다. 이어 급전 코일과 집전 코일은 출력전력을 부하에 전달하기 위해 자기적으로 연결되어 있다. 여자 코일과 급전 코일은 절연되어 있기 때문에, 중전압 계통과 급전 코일을 절연할 수 있다. 그러나, 이전의 연구는 저전압에서만 유효성을 확인하였다. 중전압 시스템에 적용하기 위해서는 멀티레벨 컨버터, 절연 구조, 코일 설계 등의 기술적인 어려움이 있다. 이 논문에서는 여자 코일을 이용한 중전압 멀티레벨 무선전력전송 시스템을 개발하기 위한 이러한 기술적 문제들을 다룬다.

### 2. 중전압 멀티레벨 무선전력전송 시스템

그림 2처럼 멀티레벨 무선전력전송 시스템은 복수의 모듈로 구성할 수 있다. 각 모듈은 직렬로 연결된 3개의 H-브릿지 정류기, 하프 브릿지 인버터, 임피던스 매칭 네트워크 (IMN)와 여자 코일로 구성되어 있다. 직렬로 연결된 멀티레벨 컨버터는 플로팅 전위가 형성되어 있기 때문에, 그라운드와 분리된 보조 전원 장치가 필요하다. 이를 위해 무선 전력 공급장치 (WPS)가 외부의 전원장치로부터 전력을 공급받아 멀티레벨 컨버터에

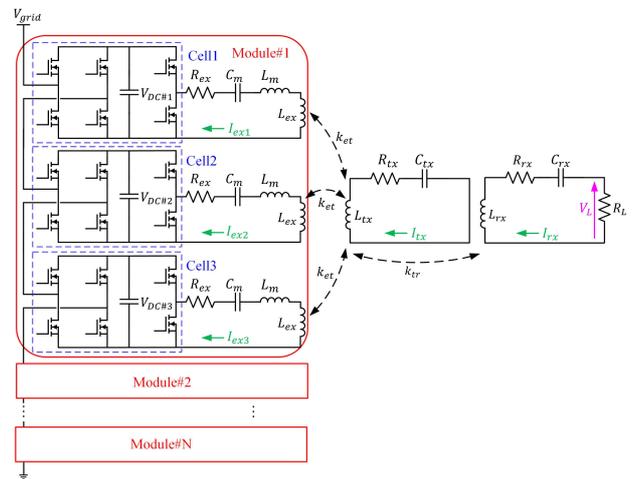


그림 1 중전압 멀티레벨 무선전력전송 시스템  
 Fig. 1 Medium-voltage multilevel inductive power system

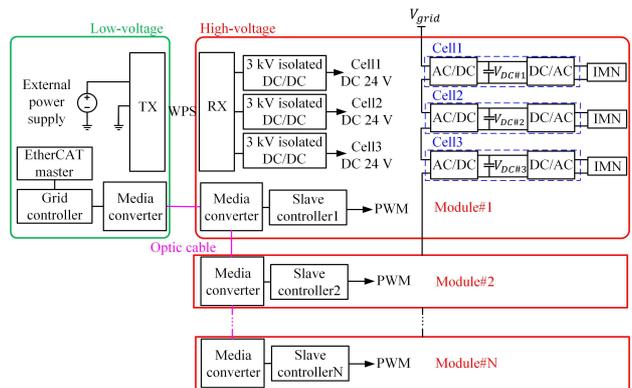


그림 2 중전압 멀티레벨 무선전력전송 시스템의 모듈  
 Fig. 2 Modules of Medium-voltage multilevel inductive power system

전력을 공급한다<sup>[6]</sup>. 세 개의 3 kV 절연된 DC/DC 컨버터가 WPS의 수신부측에 연결되어 있다. 이는 각 3개의 셀에 분리하여 전원을 공급하기 위해서이다. 복수의 모듈을 동시에 제어하기 위해, EtherCAT 프로토콜을 사용하였다. EtherCAT 프로토콜은 빠른 통신 속도와 확장성이 좋다는 장점이 있다<sup>[7]</sup>. EtherCAT master PC는 전체적인 시스템을 모니터링하고 제어기끼리의 통신을 관리한다. Grid controller는 계통 전압과

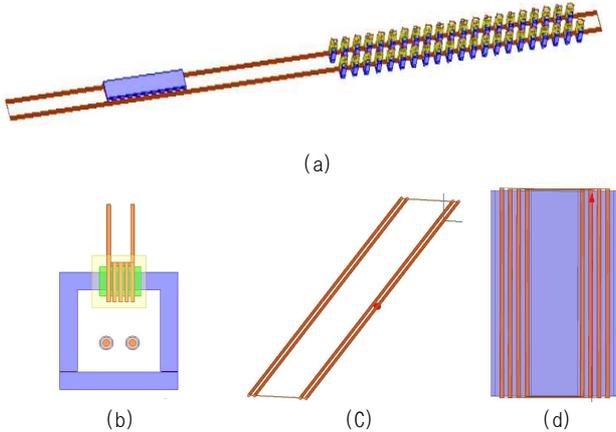


그림 3 코일의 형상 (a) 코일이 설치된 전체 모습 (b) 여자 코일 (c) 급전 코일 (d) 집전 코일  
 Fig. 3 Shape of coils (a) Overall installation (b) Excitation coil (c) Transmitter coil (d) Receiver coil

전류를 제한하는 역할을 수행하고, slave controller는 PWM 신호를 생성하고 각 모듈의 DC-link 전압을 제어한다. 여기서 주목해야 할 점은 제어기들과 컨버터들은 같이 플로팅 되어 있기 때문에, 통신을 위한 연결을 할 때 절연이 필수적이라는 점이다. 따라서 제어기들은 LAN 선을 통해 통신할 수 있지만, 제어기 사이를 절연하기 위해 미디어 컨버터와 광 케이블이 사용되었다.

### 3. 무선급전 코일

그림 3에는 무선급전 코일이 있다. 그림 3(a)에는 여자 코일과 급전 코일, 집전 코일이 설치된 전체 모습이 있다. 그림 3(b)는 여자 코일이다. 여자 코일과 급전 코일을 중전압 절연하기 위해 여자 코일은 에폭시로 몰딩하여 제작한다. 여자 코일은 급전 코일과 자기적으로 강하게 결합 되도록 코어에 여자 코일을 감고 급전 코일이 코어 내부를 관통하도록 설치된다. 그림 3(c)와 그림 3(d)는 각각 급전코일과 집전 코일의 형상을 보여준다. 급전코일은 코일 내부의 저항을 줄이기 위해 두 선을 병렬로 연결하였다. 집전 코일은 급전 코일 위에 설치되어 부하전력을 획득할 수 있다. 본 무선전력전송 시스템의 장점은 급전 코일을 대지에 접지하게 되면 급전 코일과 집전 코일을 여자 코일이 설치된 중전압 계통으로부터 분리시킬 수 있다는 점이다. 또한 집전 코일과 무관하게 각 여자 코일에서 바라본 입력 임피던스는 밸런스를 획득할 수 있어 멀티레벨 컨버터의 제어가 용이하다. 여자 코일과 집전 코일은 자기적으로 결합되어 있지 않으므로, 집전 코일의 오정렬 및 개수가 변경되더라도 안정적인 구동이 가능하다.

### 4. 시뮬레이션

그림 1의 멀티레벨 무선전력전송 시스템을 PLECS로 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 파라미터는 표 1에 정리되어 있다. 그림 4는 정류기의 출력 전압  $V_{rec}$ 와 계통 전류  $I_{grid}$ 를 보여준다. 정류기 출력의 최대전압은 직렬로 연결된 여섯 개의 셀의 전압이 각각  $1\text{ kV}_{dc}$ 로 제어되고 있어  $6\text{ kV}$ 가 된다. 그림 5는 무선

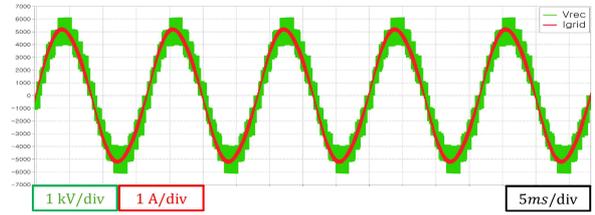


그림 4 6-레벨 정류기의 출력전압 ( $V_{rec}$ )과 계통 전류 파형 ( $I_{grid}$ )  
 Fig. 4 Waveforms of 6-level rectifier output voltage ( $V_{rec}$ ) and grid current ( $I_{grid}$ )

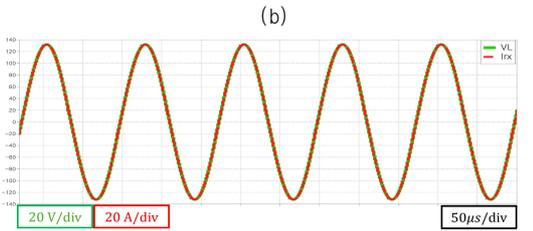
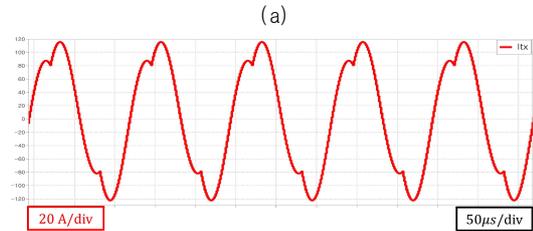
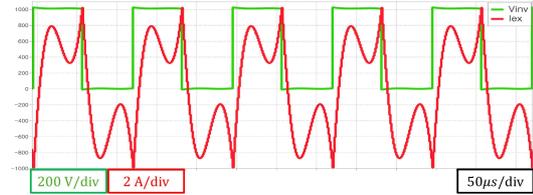


그림 5 무선전력전송 파형 (a) 인버터 출력전압 ( $V_{inv}$ )과 여자 코일 전류 ( $I_{ex}$ ) (b) 급전 코일 전류 ( $I_{tx}$ ) (c) 부하 전압 ( $V_L$ )과 집전 코일 전류 ( $I_{rx}$ )

Fig. 5 Waveforms of wireless power transfer (a) Inverter output voltage ( $V_{inv}$ ) and excitation coil current ( $I_{ex}$ ) (b) Transmitter coil current ( $I_{tx}$ ) (c) Load voltage ( $V_L$ ) and receiver coil current ( $I_{rx}$ )

표 1 시뮬레이션 파라미터  
 Table 1 Simulation parameters

멀티레벨 컨버터			
$V_{grid}$	3.5 kVrms	$V_{DC\#1-6}$	1 kV
$N_{ex}$	6	$f_{rec}$	8 kHz
$L_g$	40 mH	$f_{inv}$	80 kHz
$C_{DC}$	500 $\mu$ F		
공진 탱크			
$L_{ex}$	62 $\mu$ H	$L_m$	11 $\mu$ H
$C_m$	440 nF	$R_{ex}$	100 m $\Omega$
$L_{tx}$	21 $\mu$ H	$C_{tx}$	186 nF
$R_{tx}$	236 m $\Omega$	$L_{rx}$	42 $\mu$ H
$C_{rx}$	93 nF	$R_{rx}$	260 m $\Omega$
$R_L$	1 $\Omega$		

전력전송의 시뮬레이션 결과이다. 여자 코일에 흐른 전류가 급전 코일에 전류를 발생시킨 뒤, 급전 코일은 다시 집전 코일에 유도 전압을 발생시킨 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 중전압 멀티레벨 무선전력전송 시스템을 개발하였다. 시스템의 모듈 구조와 무선급전 코일에 대해 기술하였다. 이 모듈형 구조는 시스템의 레벨을 확장하는데에 용이하다는 장점이 있다. 또한 6-레벨, 6 kV에서 시뮬레이션을 수행하여 유효성을 입증하였다.

이 논문은 2024년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원의 “차세대시스템반도체설계전문인력양성사업”으로 지원 받아 수행된 연구 결과임(P0017011, 차세대 시스템반도체 설계 전문인력양성사업)
--

## 참 고 문 헌

- [1] P. A. J. Lawton, F. J. Lin, and G. A. Covic, "Magnetic Design Considerations for High-Power Wireless Charging Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 37, no. 8, pp. 9972-9982, 2022.
- [2] Y. Zhang, Z. Yan, Z. Liang, S. Li, and C. C. Mi, "A High-Power Wireless Charging System Using LCL-N Topology to Achieve a Compact and Low-Cost Receiver," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 1, pp. 131-137, 2020.
- [3] G. Guidi, S. D'Arco, J. A. Suul, R. Iso and J. -I. Itoh, "A Modular Multilevel Interface for Transformerless Grid Integration of Large-Scale Infrastructure for Wireless Electric Vehicle Charging," 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia), Busan, Korea (South), pp. 2059-2066, 2019.
- [4] H. R. Rahnamaee, U. K. Madawala, and D. J. Thrimawithana, "A Multi-Level Converter for High Power-High Frequency IPT Systems," 2014 IEEE 5th Int. Symp. Power Electron. Distrib. Gener. Syst. PEDG 2014, 2014.
- [5] J. Lee, M.-Y. Kim, and S.-H. Lee, "Novel Transformerless Multilevel Inductive Power Transfer System," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 55565-55573, 2022.
- [6] E. S. Lee, J. -H. Park, M. Y. Kim and S. H. Han, "Wireless Power Supply Design for Precharging Circuit of SST in Railway Vehicles," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 9, pp. 9837-9853, Sept. 2021.
- [7] D. Kim, J. Lee, S. -H. Lee and S. Kim, "High-bandwidth Control Structure for Solid-State-Transformers with EtherCAT Protocol," 2023 11th International Conference on Power