

전기자동차 충전기용 2-stage 자기유도 무선전력전송 시스템

김민중, 주동명, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Two-stage Inductive Power Transfer Charger for Electric Vehicles

Min-Jung Kim, Dong-Myoung Joo, and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차 무선충전기 송수신 코일의 결합계수가 변동되는 조건에서, 수신 측에 DC-DC 컨버터를 사용하지 않고, 넓은 출력전압 범위를 갖는 전기자동차 배터리팩을 충전하기 위한 자기유도 무선전력전송 (Inductive Power Transfer, IPT) 충전기 시스템과 제어 알고리즘을 제안한다. 전기자동차용 무선 충전기 시스템은 승강압 역률보상 컨버터와 Bridgeless 정류기를 포함하는 자기유도 IPT 컨버터로 구성되며, 시뮬레이션을 통하여 시스템과 제어기의 타당성을 검증한다.

1. 서론

전기자동차 (Electric Vehicle, EV) 무선충전기 시스템은 무선 전력 전달 효율을 높이기 위해 자기유도 무선전력 전송 (Inductive Power Transfer, IPT) 방식이 주로 적용된다. IPT 컨버터만으로는 전기자동차의 배터리팩의 넓은 출력전압 범위를 감당하기에 한계가 있기 때문에, 일반적으로 수신 측에 DC-DC 컨버터를 추가하여 출력을 제어한다. 최근에 수신 측에 DC-DC 컨버터를 사용하지 않고 출력을 제어하는 연구들도 진행되었으나, 제한된 조건에서만 정격 출력을 전달할 수 있는 한계가 있다^[1-2].

본 논문에서는 승강압 역률개선 (Power Factor Correction, PFC) 컨버터와 Bridgeless 정류기를 포함하는 IPT 컨버터로 구성되는 EV 무선 충전기 시스템과 통합 시스템 제어 알고리즘을 제안한다. 3.3kW로 제안한 EV 무선 충전기 시스템을 설계하여, 시뮬레이션을 통해 제안한 시스템의 타당성을 검증한다.

2. 무선충전기 시스템 구성 및 제어알고리즘

그림 1은 본 논문에서 제안하는 EV 무선 충전기 시스템의 전체 회로도이며, PFC 컨버터, IPT 컨버터로 구성된다. EV 무선 충전기 시스템 설계 시, 아래와 같은 시스템 특징에 대한 고려가 필요하다.

- 차종 및 주차 위치에 따라 송수신 코일 결합계수 (k)의 변동 범위가 크며, 규격에 의해 0.08~0.2의 값을 가짐^[3].
- EV 무선 충전기 규격에 의해 IPT 컨버터의 동작주파수 범위가 81.38~90kHz로 제한됨^[3].
- EV 고전압 배터리팩은 넓은 충전 전압범위를 요구하며, 배터리 등가부하저항의 변동 범위가 큼.

IPT 컨버터가 일정 고정주파수에서 동작할 경우, 수신패드의 출력전압 ($V_{o,ac}$)은 송수신 코일의 결합계수 (k)에 따라 크기가 가변되며, 본 논문에서 적용한 LCCL-S 토폴로지의 경우 $V_{o,ac}$ 는 아래 식과 같다. L_p 와 L_s 는 송수신 코일의 자기인덕턴스, C_f , C_p 는 보상 커패시터이다.

$$V_{o,ac} = \frac{V_{in}M}{L_{in}} = \frac{V_{in}k\sqrt{L_pL_s}}{L_{in}}, \quad (L_{in} = \left(\frac{C_f}{C_f + C_p}\right)L_p)$$

(1)

IPT 컨버터의 2차 측 정류단을 다이오드만으로 구성 시, 스위칭 주파수, 듀티, 위상 등을 제어하여 출력전압을 가변한다. 하지만 EV 무선충전기 시스템의 경우 스위칭 주파수 범위가 제한되어 있으며, 부하인 고전압 배터리의 넓은 충전 전압 범위를 감당하기에는 제어에 한계가 있다. 또한 수신

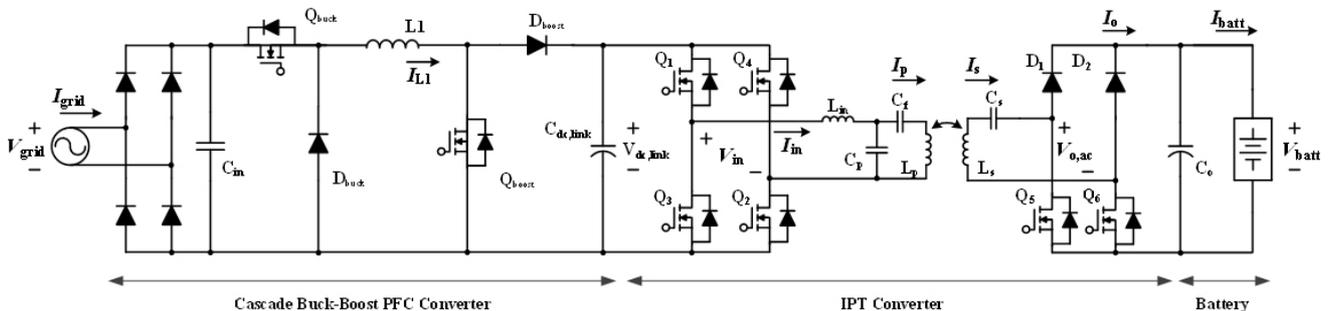


그림 1. 제안한 EV 무선 충전기 시스템의 회로 구성
 Fig. 1. Configuration of the proposed EV wireless charging system.

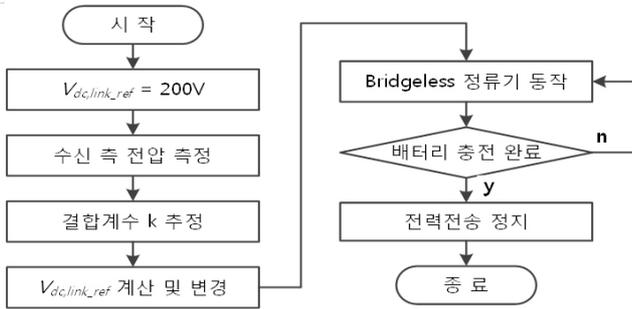


그림 2. EV 무선 충전기 시스템의 제어 순서도
Fig. 2. Control flow chart of EV wireless charging system.

측과 송신 측에 무선 통신 시 발생하는 신호 지연 때문에 수신 측에서 전력을 제어할 수 있는 방법이 필요하다. 따라서 제안하는 EV 무선 충전기 시스템의 경우 IPT 컨버터의 2차 측 정류단을 2개의 MOSFET과 2개의 다이오드로 Bridgeless 정류기 구조로 구성하여 MOSFET의 듀티 제어를 통해 출력전압을 제어한다. Bridgeless 구조의 경우 수신 코일, MOSFET, 다이오드가 Boost 컨버터 구조이기 때문에 승압 동작만 가능하다. Bridgeless 정류기를 포함하는 IPT 컨버터 제어만으로는 넓은 고전압 배터리팩의 출력전압 범위를 감당할 수 없기 때문에, 승강압형 토폴로지인 Cascade buck-boost PFC 컨버터를 적용하여, IPT 컨버터의 입력전압의 크기를 제어한다.

그림 2는 제안한 EV 무선 충전기 시스템의 제어알고리즘을 순서도로 나타낸 것이다. 송수신 코일의 결합계수가 높을 경우 승강압형 PFC 컨버터의 출력전압을 낮게 제어하고, 결합계수가 낮을 경우 출력전압을 높게 제어한다. IPT 컨버터는 고정 스위칭 주파수로 제어를 하며, 배터리 충전 프로파일에 따라 IPT 컨버터 2차 측 Bridgeless 정류기에서 듀티 제어를 통해 출력을 제어한다. 실시간으로 배터리 상태에 따라 송신 측에서 출력을 제어할 수 없기 때문에 초기 일정 시간동안 송수신 코일의 결합계수를 예측하여 PFC 컨버터의 출력전압 기준치를 선정한다. 초기 동작동안 Bridgeless 정류기의 MOSFET은 동작하지 않으며, 일반 다이오드 정류기와 같이 동작한다. IPT 컨버터의 출력전압을 측정하여 송수신 코일의 결합계수를 예측한 후에, 결합계수에 따라 PFC 컨버터 출력전압을 제어하며 IPT 컨버터 1차 측은 고정 스위칭 주파수 동작, 2차 측은 배터리 상태에 따라 듀티 제어를 수행한다. 결합계수를 예측한 후에 PFC 컨버터의 출력전압 지령치는 충전 완료시까지 일정한 값으로 고정되며, 소자 정격 및 배터리 전압범위를 고려하여 200~420V 내의 값으로 선정한다.

표 1 EV 무선 충전기 시스템 특성값
Table 1 Parameters of EV wireless charging system

Parameter	Value	Parameter	Value
L_p	400 [μ H]	L_s	190 [μ H]
L_{in}	47.7 [μ H]	C_p	73.5 [nF]
C_f	9.9 [nF]	C_s	18.4 [nF]
f_{PFC}	50 [kHz]	f_{IPT}	97.3 [kHz]
V_{grid}	220 [V]	$V_{dc,link}$	200~420 [V]
V_{batt}	240~410 [V]	P_o	3,300 [W]

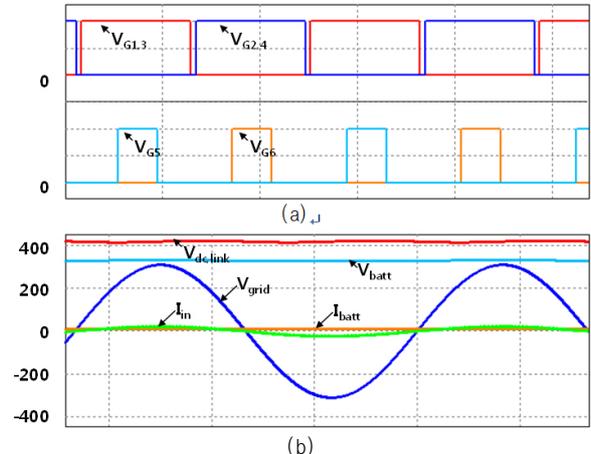


그림 3. 제안한 시스템의 시뮬레이션 파형
Fig. 3. Simulation waveform of the proposed system.

그림 3은 제안한 EV 무선 충전기 시스템의 동작을 PSIM 시뮬레이션 툴을 이용하여 검증한 결과 파형이다. 그림 3(a)는 Bridgeless 구조를 포함하는 IPT 컨버터의 게이트 신호 파형이며, 그림 3(b)는 배터리 전압이 330V, 충전 전류가 10A인 3.3kW로 동작할 때의 EV 무선 충전기 전체 시스템의 주요 파형이다. 이 때 송수신 코일의 결합계수는 0.08인 조건으로, PFC 컨버터의 출력전압은 420V로 제어되며, IPT 컨버터 2차측 Bridgeless 정류단 제어를 통해 출력이 제어됨을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 Bridgeless 정류기를 포함하는 IPT 컨버터와 승강압형 PFC 컨버터를 이용한 EV 무선 충전기 시스템 및 제어 알고리즘을 제안하였다. EV 무선 충전기 시스템에서 차량에 설치되는 수신측 회로에 DC-DC 컨버터를 추가하지 않음으로써 무선 전력 수신부의 전력밀도 및 시스템 효율을 향상시킬 수 있다. 또한 결합계수를 예측하여 PFC 컨버터의 출력전압 지령치를 가변하고 IPT 컨버터의 Bridgeless 정류기를 제어하는 알고리즘을 통해, 0.08~0.2 결합계수 범위 내에서 넓은 배터리 충전 전압 범위를 만족할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Dong-Gyun Woo, "Optimal Design and Control Strategy of Inductive Power Transfer Charging System for Electric Vehicles", Ph.D Thesis paper, 2016.
- [2] K. Colak, E. Asa, M. Bojarski, D. Czarkowski, and O. C. Onar, "A novel phase-shift control of semibridgeless active rectifier for wireless power transfer," IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 11, pp. 6288 - 6297, Nov. 2015.
- [3] J. Schneider, "SAE J2954 overview and path forward," Society of Automotive Engineers (SAE) International, 2012.