

EV 유·무선 통합 충전 시스템의 최적 구성 방안 연구

이슬기¹, 강신국², 이은수¹
 한양대학교 에리카 전자공학부¹, (주)위츠²

Research on Optimal Configuration for Integrated Wired and Wireless Charging Systems in EVs

Seul G. Lee¹, Shin G. Kang², Eun S. Lee¹.
 Hanyang University ERICA Electrical Engineering¹, WITS Co., Ltd².

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차 탑재형 양방향 유·무선 통합 충전시스템의 최적 구성 방안을 제안하였다. 제안하는 유·무선 통합 충전시스템은 기존 시스템 대비 시스템 복잡도 및 스테이지가 감소함으로써 고효율 및 상용성이 증가하였다는 장점이 있다. 본 논문에서는 제안하는 최적 토폴로지를 PLECS 시뮬레이션을 통해 모델링하였고 이를 시뮬레이션을 통해 그 성능을 확인하였다.

1. 서론

최근 자동차 산업은 내연기관 차량에서 친환경 전기자동차(EV)로의 전환을 가속화하고 있다. 이에 따라 전기자동차의 보급이 빠르게 확산하고 있으나, 충전 인프라의 한계와 비효율성은 여전히 중요한 사회적 문제로 남아 있다^[1]. 무선 충전은 사용자의 편리성을 크게 높일 수 있는 기술로 주목받고 있으나, 유선 충전에 비하여 상용화된 인프라가 부족하다. 따라서 인프라 구축에 따른 사회적 비용을 줄이기 위해, 유연한 충전 방식을 갖춘 EV 유·무선 통합 충전시스템의 도입이 필수적이다.

유·무선 통합 시스템의 전력 밀도 향상 및 비용 저감, 고효율 동작을 실현하기 위해서는 stage 수를 줄여 무게와 부피 증가를 최소화하면서도 기존 충전 성능을 유지하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 그림1과 같이 전력 변환 회로가 유·무선 충전 시 서로의 구성요소를 공유하는 EV 유·무선 통합 충전시스템의 최적 구성 방안 두 가지를 제안한다. 이는 EV에 탑재 시 충전시스템 통합에 따른 부피와 무게 증가를 최소화할 수 있으며, 적은 수의 Stage 구성을 통해 전력 밀도 향상과 손실 저감을 기대할 수 있다. 또한 기존의 복잡한 구조를 단순화해 충전 효율을 높이고 상용성을 극대화하였다.

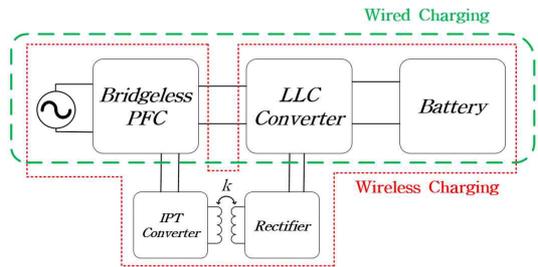
본 논문에서는 제안하는 전기자동차 탑재형 양방향 유·무선 통합 충전시스템의 최적 구성 방안을 기존 연구와 비교 및 분석하였으며, 이를 PLECS 시뮬레이션을 통해 모델링하고 시뮬레이션 수행을 통해 그 성능을 확인하였다.

2. 본론

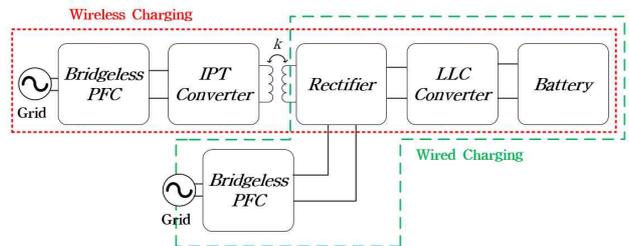
2.1 유·무선 통합 충전시스템 토폴로지 고찰

현재 유·무선 통합 충전시스템의 구성 방안에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 가장 대표적으로, 유선과 무선 동작 시 DC-DC 컨버터를 공유하여 사용하는 토폴로지^[2]가 있다. 이는 구조상 복잡성이 낮지만 결합 계수의 변화에 따라 IPT 출력 전압 변동 폭이 크기 때문에 복잡한 제어가 요구되는 단점이 있다. 또 다른 구성 방안으로는 기존 OBC의 구조 변화를 최소화하기 위해 유선 충전 회로의 공통부분에 무선 충전 수신부를 결합하는 양방향 토폴로지도 있다. 이때 무선 회로가 결합되

는 위치에 따라 여러 가지 토폴로지가 존재한다. 무선 충전 수신부가 OBC의 PFC 스위치와 정류 단을 공유하는 형태^[3]와 수신부의 정류 단과 CLLC 컨버터의 1차 측이 소자를 공유하며 릴레이 사용을 통해 2 stage 모드와 3 stage 모드를 혼용하는 형태^[4]가 대표적이다. 전자의 경우엔 송·수신부의 공극과 부하의 변동이 발생하면 IPT 컨버터의 출력 전압 범위 폭이 커진다는 단점이 존재한다. 자화 인덕턴스 크기를 작게 하면 CLLC 컨버터 입력 전압 범위를 늘릴 수 있지만, 추가적인 손실이 발생하게 된다. 후자의 경우엔 적은 전력 변환 단계와 유연한 동작 모드 전환으로 고성능을 달성할 수 있지만, 상대적으로 많은 릴레이를 사용하여 복잡도가 높다. 이는 또한, 모드 전환 시 안정적인 Dynamic 특성을 확보할 필요가 있다.



(a) 토폴로지 1 (PFC 컨버터 공유형)



(b) 토폴로지 2 (PFC 및 IPT 정류단 공유형)

그림 1 제안하는 유·무선 통합 충전시스템 최적 구성 방안

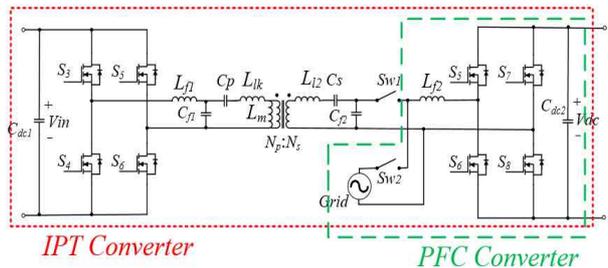


그림 2 토폴로지 2에 제시된 IPT 컨버터와 PFC 컨버터 토폴로지

제안하는 토폴로지 1과 2는 모두 릴레이를 사용하여 모드를 전환한다. 그림 1은 본 논문에서 제안하는 유·무선 통합 충전 시스템의 회로 구성도이다. IPT 컨버터는 안정적으로 전력을 전달하며, 전력 손실을 최소화하고 부하 변화에 영향을 받지 않는 Double-sided LCC 토폴로지를 사용하였다. 그림1(a)에 나타난 토폴로지 1은 유·무선 충전에서 PFC 컨버터를 공유하는 방식이다. 이를 통해 시스템의 복잡도를 확연히 줄이면서도 효율을 유지할 수 있다. 그림 1(b)과 그림 2에 나타난 토폴로지 2는 IPT와 Bridgeless PFC가 정류 단과 인덕터를 공유하는 방식이다. 가장 간단하고 일반적으로 사용할 수 있는 토폴로지이므로, 무선 충전 동작 시 동기 정류 방식을 사용하기 때문에 고효율 달성이 가능하며 양방향 동작이 가능하다.

표 1 충전 시스템 시뮬레이션 제정수

Simulation metrics for EV charging systems			
Input Voltage, V_g	220 [V]	Input freq. , f_g	60 [Hz]
Output Power, P_o	11 [kW]	Battery V, V_{Batt}	400 [V]
IPT Converter			
PFC output Voltage V_m	400 [V]	IPT output V_{dc}	540 ~ 600 [V]
f_{r1}, IPT	147.63 [kHz]	f_{r2}, IPT	120.66 [kHz]
L_{f1}, L_{f2}	20 [uH]	C_{f1}, C_{f2}	175 [nF]
L_{l1}, L_{l2}	42 [uH]	C_p, C_s	87 [nF]
L_m	18 [uH]	DC-link Capacitor	3600 [uF]
LLC Converter			
LLC transformer turns ratio	15 : 10	LLC resonance frequency, f_{LLC}	118.3 [kHz]
Leakage Inductance L_r	20 [uH]	Resonant Cap C_r	90.5 [nF]
Magnetizing Inductance L_m	80 [uH]	LLC output Cap C_{d2}	50 [nF]

2.2 제안하는 토폴로지 동작 검증 시뮬레이션

본 절에서는 시뮬레이션을 통해 제안하는 시스템의 효율성과 유·무선 동작 시 전압 및 전류 파형과 효율을 확인하였다. 시뮬레이션에 사용된 컨버터들은 토폴로지 1과 2에서 모두 동일하게 모델링하였으며, 사용된 파라미터는 표1에 나타내었다. 그림 3은 컨버터별 시뮬레이션 동작 시 전압 및 전류 파형이고, 그림 4는 이에 따른 출력 전력으로 계산한 효율이다.

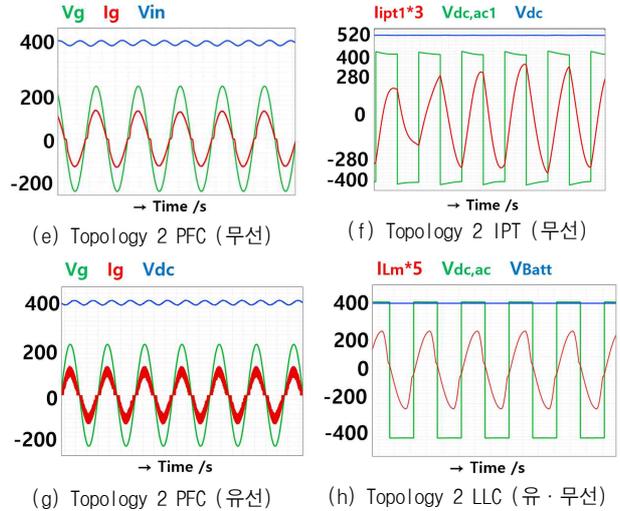
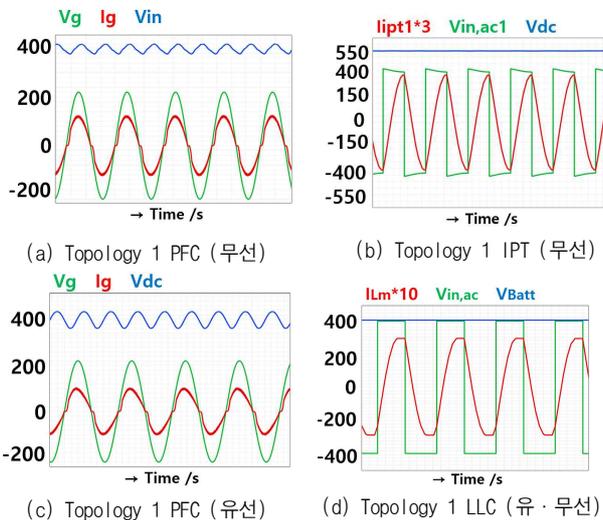


그림 3 제안하는 토폴로지 PLECS 시뮬레이션 동작 파형

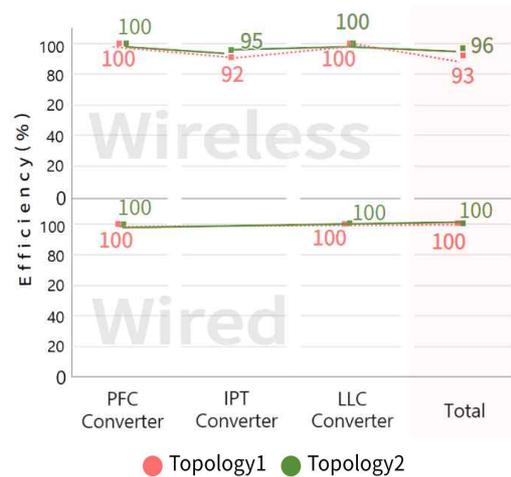


그림 4 제안하는 토폴로지 1 & 2 효율 비교 그래프

3. 결론

본 논문에서는 전기자동차용 유·무선 통합 충전시스템의 최적 구성 방안을 제안하였으며 이를 기존 연구와 정성적으로 비교하여 고찰하였다. 성능 분석을 위해서 제안하는 토폴로지 각각 PLECS 기반 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과, 그림 4처럼 토폴로지 1과 2 모두 전력 변환 효율에서 우수함을 알 수 있다. 따라서 제안하는 토폴로지가 시스템의 무게와 부피 증가를 최소화하면서도 기존 충전 성능을 유지할 수 있는 유·무선 통합 충전시스템의 최적 구성 방안임을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Zeng, R, et al. (2020). Wireless Power Transfer: Principles and Technology. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 67(1), 210-220.
- [2] 심동현, 이주아, 손원진, 안상준, 변중은, 이병국. (2020-08-18). DC-DC 컨버터 공유형 고효율 전기자동차 유·무선 통합 충전 시스템의 DC-link 전압 설계. 전력전자학회 학술대회 논문집, 강원.
- [3] Heo, H, Lee *et al.* (2022). Comparison of efficiency according to the two control method of the wireless charging system considering wired/wireless integrated charging system for EV. *전력전자학회 논문지*, 27(3), 228-236.