

전기자동차용 11kW 급 양방향 유·무선 통합 충전 시스템 구성 방안 비교

하태욱, 조현우, 김채린, 이주아, 심동현, 이병국[†]

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Comparison of Configuration Methods for 11kW Bi-directional Wired/Wireless Integrated EV Charging System

Tae-Wook Ha, Hyeonu Jo, Chae-Lyn Kim, Ju-A Lee, Dong Hyeon Sim, Byoung Kuk Lee[†]

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 11 [kW] 급 전기자동차 탑재형 양방향 유·무선 통합 충전 시스템의 최적 구성 방안을 선정한다. 이를 위하여 기존 회로 설계를 기반으로 한 유·무선 통합 회로 구성 방안을 제시한다. 이후 제시된 구성 방안을 비교 분석하고 각 회로의 구현 가능성을 평가한다. 최종적으로, PSIM 시뮬레이션을 활용하여 구성 방안의 동작 검증 및 충·방전 성능 확인을 진행 하고 최적의 통합 충전 시스템 구성 방안을 선정한다.

1. 서 론

최근 전기자동차 (electric vehicle, EV)의 수요 증가 및 보급 확대에 따라 EV 충전 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. EV 충전 방식은 차량 탑재형 충전기 (on-board charger, OBC)를 활용하는 유선 충전 방식과 송·수신 패드 간 자기 유도 결합으로 전력을 전달하는 무선 충전 방식 (inductive power transfer, IPT)으로 구분된다. 각 충전 방식은 전력 변환 회로 구조가 상이하여 호환성에 제약이 있으며, 특히 무선 충전 인프라는 유선 충전 인프라에 비해 현저히 부족하여 충전 시설 접근성에 큰 불편함을 갖는다. 또한, EV의 효율적인 에너지 관리를 위하여 배터리에서 계통으로 에너지를 되돌리는 V2X (vehicle to everything) 기술의 중요성이 증가하고 있다. 현재 유선 충전 시스템에서는 V2X 기술이 상당 부분 개발되어 있으나, 무선 충전 시스템은 기술 성숙도가 낮아 양방향 전력 전달에 미흡한 상태이다^[1]. 이에 따라, EV 충전 시스템의 발전을 위해서는 유·무선 충전 통합과 더불어 V2X 기술 도입이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 유선 및 무선 충전을 자유롭게 혼용할 수 있으며, V2X 기술을 지원하는 양방향 유·무선 통합 충전 시스템 (wired/wireless integrated EV charging system, ICS)을 제안한다. 이를 통해 EV 사용자의 충전 인프라 접근성을 개선하여 기존 충전 인프라의 한계를 극복하고 전기차 사용의 유연성을 크게 향상할 수 있다.

ICS 회로 구성 시 전력 밀도 및 전비 향상과 고효율 동작을 달성하기 위해서는 유·무선 충전 회로 통합에 따른 부피 및 무게 증가를 최소화하며 기존 회로의 충·방전 성능을 보장해야 한다. 따라서 본 논문에서는 OBC 내 유선 충전 회로 구조 변화를 최소화하는 11 [kW] 급 양방향 ICS의 구성 방안 4가지를 제시한다. 이후 무선 충전 회로 결합에 따른 각 ICS 회로 특징을 분석하고, 구성 방안에 따른 설계 및 하드웨어 구현 가능성을 평가한다. 최종적으로 PSIM 시뮬레이션을 기반으로 동작 검증을 진행하여 충·방전 성능을 확인하고 최적의 양방향 ICS 구성 방안을 선정한다.

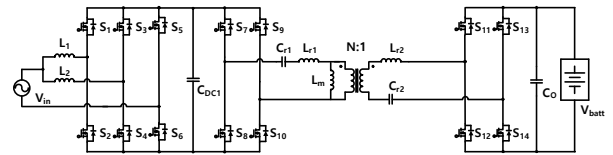


그림 1 양방향 유선 충전 회로

Fig. 1 Bi-directional wired charging circuit.

표 1 통합 충전 시스템 설계 사양

Table 1 Design specification for integrated EV charging system

Parameter	Value [Unit]	
계통 전압 범위, V_{in}	220 ~ 240 [V _{ac}]	
배터리 전압 범위, V_{batt}	436 ~ 826 [V _{dc}]	
출력 전력, P_{out}	11 [kW]	
무선 충전 패드 간 정렬 오차 범위	x축	-75 ~ 75 [mm]
	y축	-100 ~ 100 [mm]
	z축	100 ~ 170 [mm]
무선 충전 스위칭 주파수 범위, f_{swIPT}	79 ~ 90 [kHz]	

2. 통합 충전 시스템 구성 방안 비교 분석

2.1 ICS 구성 회로 특징 및 설계 사양

본 논문에서는 기존 OBC 구조 변화를 최소화하기 위하여 그림 1에 나타난 기존의 유선 충전 회로에 무선 충전 회로를 결합하는 방식으로 통합 충전 시스템을 구성한다. 그림 1에서 유선 충전 회로는 양방향 동작을 고려하여 2상 totem-pole PFC (power factor correction) 컨버터와 CLLC 공진형 컨버터로 구성된다. 무선 충전 시스템의 경우 기존에는 충전소 측 PFC 컨버터 및 IPT 컨버터와 더불어 차내 탑재된 battery management (BM) 컨버터로 구성된 3-stage 구조가 적용되었다. 3-stage 무선 충전 시스템의 경우, IPT 컨버터는 송·수신 패드 간 전력 전달만을 수행하고 BM 컨버터가 차량 충전을 제한한다. 하지만 최근 BM 컨버터를 제거한 2-stage 구조의 무선 충전 시스템에 관한 연구가 진행되고 있다. 2-stage 구조의 무선 충전 시스템은 전력 변환 단계 최소화 따른 고효율 동작 및 전력 밀도 개선에 유리함을 갖지만, 차량 충전 제어를 수행하는 별도의 회로가 존재하지 않는다. 따라서 2-stage 무선 충전 시스템의 IPT 컨버터는 전력 전달과 더불어 차량 측 배터리 전압과 전류를 제어할 수 있는 설계 및 제어 방안이 필수적이다. 위와 같은 사항들을 고려하여 유선 충전 회로 구조 변화를 최소화하며 무선 충전 회로를 결합하기 위한 양방향 ICS 구성 방안을 그림 2에 나타내었다. 구성된 ICS는 유선 충전 동작 시 기존 유선 충전 회로와 동일한 방식으로 동작하며, 무선 충전 동작 시 회로 결합 방식에 따른 특성 차이를 보인

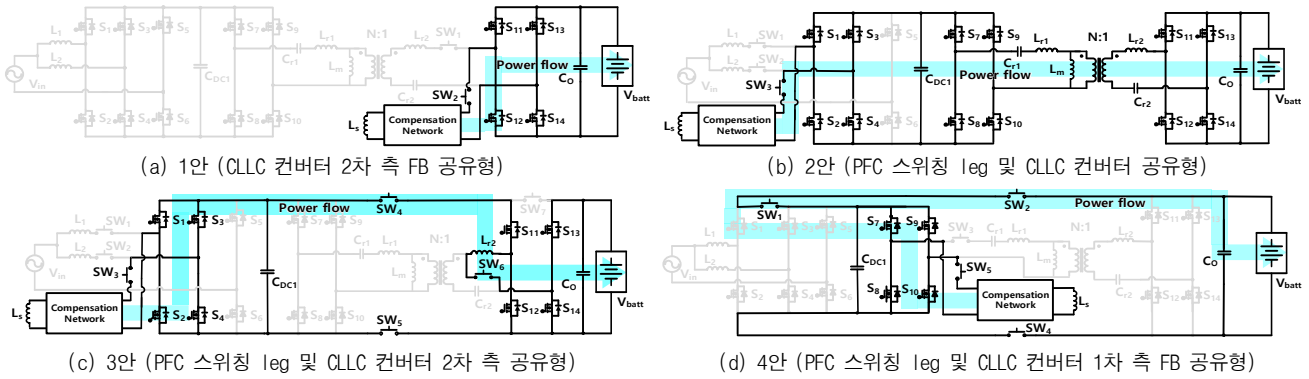


그림 2 양방향 유·무선 통합 충전 시스템 구성 방안

Fig. 2 Configuration methods for bi-directional wired/wireless integrated EV charging system.

다. 따라서 본 논문에서는 무선 충전 회로 결합에 초점을 맞추어 ICS 구성 방안을 분석하며, ICS 설계 사양은 표 1과 같다.

2.2 ICS 구성 방안 비교 분석

ICS 구성 1안은 기존 유선 충전 회로의 2차 측 full-bridge (FB)를 무선 충전 회로의 수신 패드가 공유하는 형태이며, 2차 측 FB는 수신 패드의 유도 전압을 정류하여 배터리 측으로 전달한다. 따라서 1안의 무선 충전 시스템은 충전소 측 PFC 컨버터와 IPT 컨버터만으로 차량을 충전하는 2-stage 구조로 동작한다. 1안의 무선 충전 시스템은 전력 변환 단계를 최소화하여 고효율 동작을 달성하는 데 유리하며, 기존 OBC 회로에 영향을 미치지 않으므로 OBC의 재설계가 불필요하다는 장점이 있다. 하지만 2-stage 무선 충전 시스템의 경우 기존 무선 충전 시스템과 달리 BM 컨버터가 존재하지 않으므로 IPT 컨버터만을 이용하여 충전 프로파일을 만족할 수 있는 설계 및 제어 방안이 필수적이다. 또한, 차량 측 배터리가 IPT 컨버터와 직결되므로 배터리 방전 동작이 진행됨에 따라 보상 네트워크 입력이 감소한다. 이러한 구조적 한계로 인하여 1안의 무선 충전 시스템의 경우 방전 동작에 따른 배터리 전압의 감소로 인하여 계통 측으로 전달되는 전력이 감소하고, 배터리 전압 전 범위 내 목표 출력 전력 달성이 불가능하다.

ICS 구성 2안은 무선 충전 회로가 유선 회로 측 PFC 스위칭 leg와 CLLC 컨버터를 공유하는 형태이다. 이에 따라 2안의 무선 충전 시스템은 PFC 컨버터의 스위칭 leg가 수신 패드 출력을 정류한 뒤 CLLC 컨버터가 배터리 충전을 제어하는 3-stage 구조로 동작한다. 구성 방안 2의 경우, CLLC 컨버터의 입력 전압은 무선 충전 회로의 출력 전압에 의하여 결정된다. 따라서 충전 진행에 따라 DC-link 전압 제어가 가능한 기존의 유선 충전 회로와 달리 2안의 무선 충전 시스템은 CLLC 컨버터의 입력 전압이 고정된 상태에서 배터리 전압 조건을 만족해야 한다. 이에 따라 CLLC 컨버터에 요구되는 전압 이득 범위가 과도하게 넓어지게 되어 기존 유선 충전 시스템에 최적화된 CLLC 컨버터 활용이 불가능하다. 2안 회로의 CLLC 컨버터가 무선 충전 동작을 기준으로 재설계되는 경우, 넓은 승강압 범위를 만족하기 위한 낮은 자화 인덕턴스로 인하여 CLLC 컨버터의 손실이 증가한다. 또한, 전압 이득 범위를 위한 스위칭 주파수 및 턴-오프 전류 증가에 의한 발열 문제 혹은 자성체 최적 설계의 한계에 의해 하드웨어 구현에 어려움이 존재한다.

ICS 구성 3안은 PFC 스위칭 leg를 사용하여 수신 패드 출력을 정류하고, CLLC 2차 측 FB와 공진 인덕터를 공유하는 방식으로 구성된다. 본 구성 방안에서 CLLC 컨버터의 2차 측

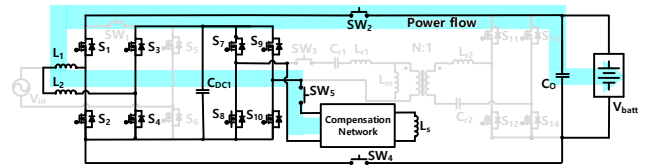


그림 3 4안 무선 충전 회로의 3-stage 동작 구조

Fig. 3 3-stage wireless charging circuit in configuration method 4.

FB는 relay를 통해 양방향 cascaded buck-boost 컨버터로 동작하여 배터리 충전을 제어하는 3-stage 구조로 동작한다. 하지만 유선 충전 동작에 최적화된 CLLC 컨버터의 2차 측 공진 인덕터 L_{r2} 는 낮은 인덕턴스를 가지며, 이를 무선 충전 회로의 승·강압형 인덕터로 사용할 경우 매우 큰 전류 리플이 발생한다. 전류 리플로 인한 인덕터 포화를 방지하기 위해서는 L_{r2} 의 코어 크기 및 공극이 증가해야 하지만, 이는 전력 밀도 감소 및 효율 저하를 야기하여 결과적으로 유·무선 동작을 모두 고려한 최적 설계가 불가능하다.

마지막 구성 방안은 무선 충전 시스템이 유선 충전 회로의 PFC 컨버터 스위칭 leg 및 CLLC 컨버터 1차 측 FB를 공유하는 형태이다. 본 구성 방안의 경우 기본적으로 2-stage 구조를 활용한 무선 충·방전 동작이 가능하며, 동작 상황에 따라 relay를 활용하여 3-stage 구조로 전환할 수 있다. 4안 회로가 3-stage 구조로 동작하는 경우, 그림 3과 같이 PFC 컨버터의 스위칭 leg와 기존 PFC 컨버터의 인덕터 L_1 과 L_2 를 활용한 양방향 cascaded buck-boost 컨버터가 충·방전 제어를 수행한다. 이를 통해 4안 ICS는 무선 방전 동작 시 배터리 전압 감소와 무관하게 보상 네트워크의 입력 전압을 일정하게 유지하여 1안 회로의 한계점인 배터리 방전에 따른 출력 전력 감소를 해결하여 배터리 전압 전 범위 내에서 목표 출력 달성이 가능하다. 3-stage 무선 방전 동작 시 cascaded buck-boost 컨버터의 인덕터는 L_1 과 L_2 가 직렬 연결된 형태이므로 높은 인덕턴스를 가지며, 이에 따라 낮은 스위칭 주파수에서도 전류 리플 조건을 만족하여 스위칭 손실을 줄일 수 있다.

ICS 구성 방안 검토 결과, 기존 OBC 구성을 효과적으로 활용하면서 우수한 충·방전 성능을 갖는 구성 방안은 4안으로 나타났다. 이에 따라 4안 ICS에 대한 동작 검증은 진행한다.

3. 제안하는 ICS 회로의 양방향 동작 검증

그림 4는 4안 ICS 회로의 유·무선 동작 검증을 위한 전체 회로도도를 나타내며, 동작 검증은 표 1에 제시된 배터리 전압 조건에서 PSIM 시뮬레이션을 활용하여 진행된다. 그림 5는 4안 ICS 회로의 유선 동작 파형을 나타내며, PFC 컨버터는 차

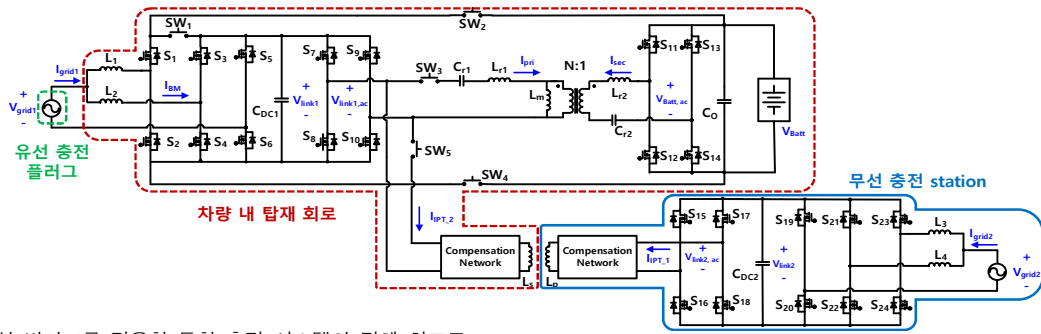


그림 4 구성 방안 4를 적용한 통합 충전 시스템의 전체 회로도

Fig. 4 Circuit diagram of integrated EV charging system constructed by configuration method 4.

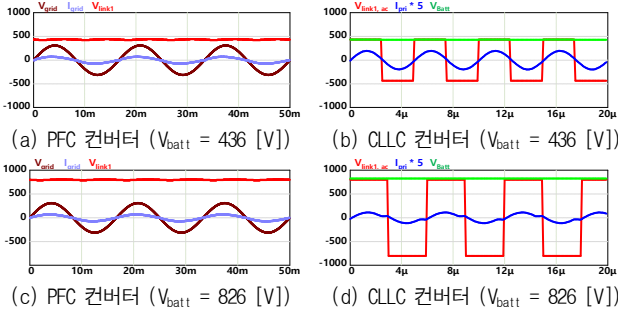


그림 5 제안하는 ICS의 유선 충전 시뮬레이션 결과 파형

Fig. 5 Simulation waveform of wired charging in proposed ICS.

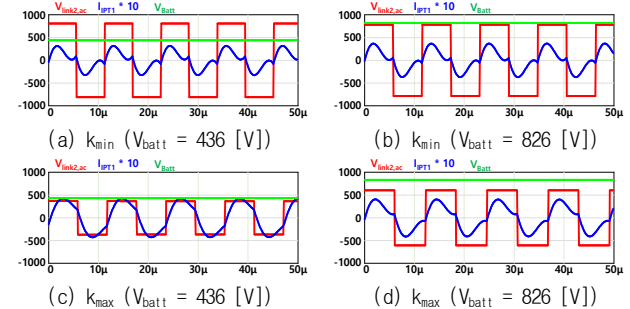


그림 6 제안하는 ICS의 2-stage 무선 충전 시뮬레이션 결과 파형

Fig. 6 Simulation waveform of 2-stage wireless charging in proposed ICS.

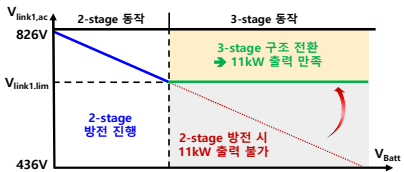


그림 7 2-stage / 3-stage 혼합 무선 방전 동작

Fig. 7 2-stage / 3-stage combined wireless discharge operation.

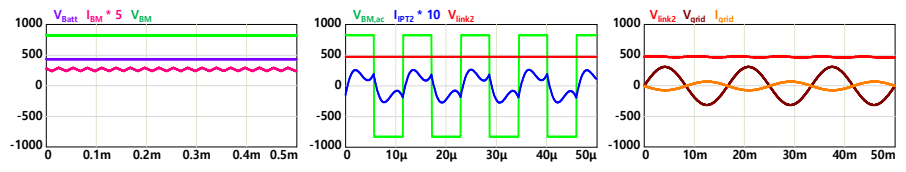


그림 8 4안 ICS 회로의 3-stage 무선 방전 시뮬레이션 결과

Fig. 8 Simulation waveform of 3-stage wireless discharging of ICS in configuration method 4.

량의 충전 상태에 따라 DC-link 전압을 가변하여 CLLC 컨버터가 공진 주파수 부근에서 효율적으로 동작하도록 제어한다.

무선 충전 동작의 경우 4안 회로는 relay를 활용한 2-stage 및 3-stage 구조를 선택적으로 사용할 수 있으며, 본 논문에서는 전력 변환 단계를 최소화하는 2-stage 무선 충전 시스템의 동작을 우선적으로 검증하였다. 그림 6은 PSIM 시뮬레이션을 통해 도출한 2-stage 무선 충전 시스템의 동작 검증 파형을 나타내며, IPT 컨버터는 주파수 제어 및 입력 전압 가변을 적용하여 최소 및 최대 결합계수 조건 모두 배터리 전압 범위 내 11 [kW] 출력을 만족하며 2-stage 충전 동작 수행이 가능하다.

무선 방전 동작의 경우, 배터리 전압 감소에 따른 출력 전력 감소를 고려할 시 3-stage 구조 사용이 필수적이지만 3-stage로 동작하는 경우는 스위칭 손실 등 추가적인 손실이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 방전 과정에서 발생하는 추가 손실을 최소화하기 위해 그림 7과 같이 2-stage / 3-stage 혼합 동작 방식을 제안한다. 방전 동작 진행 시, 배터리 전압이 충분할 때는 2-stage 구조로 동작하며, 배터리 전압이 11 [kW] 출력을 만족할 수 있는 임계 전압인 $V_{Batt,lim}$ 에 도달하면 ICS가 3-stage 구조로 전환된다. 3-stage 구조 전환 시 cascaded buck-boost 컨버터의 추가로 보상 네트워크 입력 전압 V_{link1} 을 유지할 수 있으며, 이를 통해 배터리 전압 전 범위 내 11 [kW] 출력 달성이 가능하다. 그림 8은 4안 ICS 회로의 3-stage 방전 동작 파형을 나타내며, 배터리 전압이 낮은 경우에도 cascaded

buck-boost 컨버터를 활용한 증압 동작으로 보상 네트워크 입력 전압을 유지하여 목표 출력을 달성함을 확인하였다.

동작 검증 결과를 바탕으로, 본 논문에서는 기존 OBC 설계를 효과적으로 활용하면서 우수한 충·방전 성능을 갖는 통합 충전 시스템을 위하여 ICS 구성 4안을 최종 선정하였다. 제안하는 통합 충전 회로는 무선 충전 시 2-stage 구조로 동작하며, 무선 방전 시 배터리 전압에 따라 2-stage 및 3-stage 구조를 선택적으로 동작한다.

4. 결 론

본 논문에서는 충전 인프라 접근성 및 EV 사용의 유연성 개선을 위한 11 [kW] 급 양방향 유무선 통합 충전 시스템 구성 방안을 비교 분석하였다. 이를 위하여 기존 OBC에 사용되는 유선 충전 회로를 기반으로 무선 충전 회로 결합 방안을 제시한 후 구성 방안에 따른 회로 특성 및 구현 가능성을 평가하였다. 이후 PSIM 시뮬레이션을 기반으로 한 동작 검증 및 충·방전 성능 비교 후 최적의 통합 회로 구성 방안을 선정하였다.

참 고 문 헌

[1] Y. Song, U. Madawala, T. Duleepa J and A. Hu, "Cross coupling effects of poly-phase bi-directional inductive power transfer systems used for EV charging", in *Proc. IEEE 2nd Int. Future Energy Electron. Conf. (IFEEEC)*, December. 2015.