

EV 무선충전용 LCC 토폴로지 기반 통합 보상 코일 구조 연구

김혜연¹, 강신국², 이은수¹
 한양대학교 에리카 전자공학부¹, (주)위츠²

Integrated Compensation Coil Structure Based on LCC Topology for EV Wireless Charging

Hye Y. Kim¹, Shin G. Kang², Eun S. Lee¹.
 Hanyang University ERICA Electrical Engineering¹, WITS Co., Ltd².

ABSTRACT

본 논문에서는 전기차(EV) 무선 충전 시스템의 전력 밀도 향상을 위한 양방향 LCC 토폴로지 기반 통합 보상 코일(Integrated Compensation Coil, ICC) 구조를 제안하였다. 제안하는 ICC는 송신(Tx) 및 수신(Rx) 코일과 직교로 통합되어 보상 코일과 주 코일 간의 불필요한 자기적 교차 결합을 제거함으로써 순환전류로 인한 손실을 근본적으로 제거할 수 있다. 제안하는 ICC는 기존 송수신 코일에 추가로 권취함으로써 시스템의 부피를 줄임과 동시에, 전력 전송특성을 고려하여 송수신 코어 내부 자기장이 포화되지 않도록 설계하였다. 제안된 양방향 LCC 토폴로지는 11kW 전력 전달 시 SAE J2954 WPT3 표준에 따라 제작하였으며, 시뮬레이션 및 실험 결과 자기적 교차 결합이 5% 이하로 감소, 정렬 오차에 대한 허용 범위에서 기존 설계와 큰 차이가 없음을 확인하였고, 150mm 공극에서 93.6%의 효율로 11kW 전력을 전송할 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

전기차 (Electric Vehicles, EV) 충전은 대표적으로 온보드 차저 (On-board Charger, OBC)를 통한 유선 충전 방식과 송수신 패드 간 자기 결합으로 전력을 전달하는 무선 충전 방식으로 구분된다. 특히, 무선전력 시스템 (Wireless Power Transfer, WPT)은 안정성과 편리성에 따른 수요 증가로 이를 상용화 하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. WPT 전력전송을 최대화하기 위해 적절한 공진 네트워크 선정이 필요하고, 일반적으로 구조가 단순하고 코일의 인덕턴스에 의한 리액턴스를 효과적으로 상쇄할 수 있는 S-S 방식이 사용된다 [1]. 하지만 기존 S-S 방식은 부하 탈락 시 송수신 단락 전류, 부하 변동 시 소프트 스위칭 조건의 민감, 송수신부간 거리가 가까운 경우 Frequency Splitting 등의 문제로 EV WPT에 적합하지 않다 [2]. 이러한 이유로 일반적인 EV WPT는 양방향 대칭 LCC 토폴로지를 사용하나 해당 토폴로지의 경우 송수신부에 추가적인 인덕터가 필요하므로, 무게 및 사이즈가 증가한다는 단점이 있다.

본 논문에서는 추가적인 인덕터를 기존 송수신부 코일에 실장함으로써 무선전력시스템의 고전력밀도화가 가능한 통합 보상 코일 (Integrated Compensation Coil, ICC) 구조를 제안하였다. 제안하는 ICC는 기존 루프타입 송수신부 코일에 단순히 와인딩함으로써 구현 가능하며, 추가적인 인덕턴스는 턴수 및 공극을 조정함으로써 최적화 가능하다. 본 논문에서는 11kW에서 구동할 수 있는 ICC 무선전력시스템을 설계하였으며, 이를 FEM 시뮬레이션과 실험을 통해 그 성능을 검증하였다.

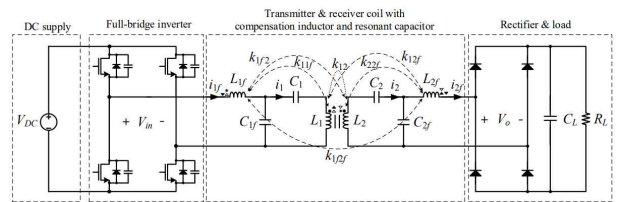


그림 1. 제안된 ICC의 IPT 시스템

2. 통합 보상 코일(ICC) 설계

2.1 제안하는 ICC 구조

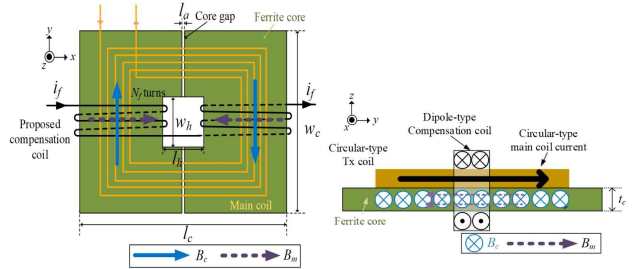


그림 2. 제안하는 ICC 코일 구조

제안하는 ICC 구조는 그림 2와 같으며, 기존 송수신 코일 구조에서 코어의 자기장 균등화를 위해 양측에 권선을 권취하는 방식을 적용하였다. 그림 2의 메인 코일(=전력전송 코일)에 의해 발생하는 자속밀도 B_m 은 추가적인 인덕터에 의해 발생하는 자속밀도 B_c 와 물리적으로 90도 위상차가 나며, 이는 코어 내부 자속밀도의 합이 $\sqrt{B_m^2 + B_c^2}$ 이 됨을 알 수 있다. 또한, ICC와 메인 코일이 직교로 배치될 경우, 물리적으로 자기 결합이 zero이며, 이를 통해 그림 1의 L_{1s} , L_{2r} 를 기존 송수신 코일에 권취하는 것이 가능하다.

2.2 ICC 최적 구조 선정

ICC는 0° 또는 90°로 물리적으로 배치될 수 있고, 이때 모든 경우에 인덕턴스가 동일하다고 가정하였다. 유한 요소 방법(FEM) 시뮬레이션 분석을 통해 그림 2에 제시된 바와 같이 코어 내부 자기장 특성을 분석하였다. 그림 3과 같이, 11kW 정격 전력 전달 조건에서 수신부의 각도를 0°와 90°로 배치한 경우, 0°의 경우 자기 플럭스 밀도가 90°보다 약간 낮았다. 반면, 다이폴형 ICC의 자기 플럭스 밀도는 홀형 ICC에 비해 약 2배 낮았다. 결론적으로, 동일한 전력전송 조건에서 코어 손실을 줄이기 위해서는 다이폴 ICC가 홀 타입 ICC 대비 더 우수함을 확인하였다.

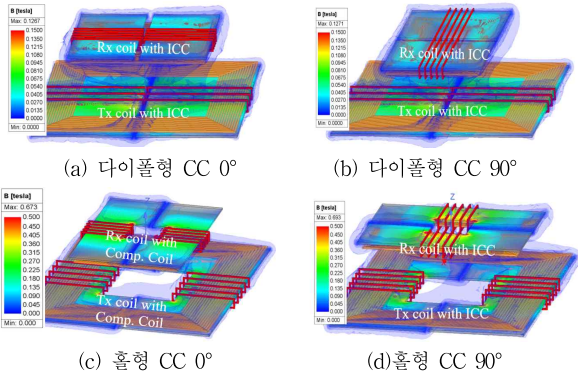


그림 3. 제안된 ICC 코일의 다양한 구조에 따른 FEM 시뮬레이션 결과

2.3 제안하는 ICC 코일 구조 최적화

본 논문에서는 전기적 매개변수는 $V_{in} = 400V$, $f_s = 85kHz$, $P_L = 11kW$ 로 설정하였고, 물리적 매개변수는 SAE J2954 표준에 따라 $w_{c1} = 600mm$, $l_{c1} = 500mm$, $t_{c1} = 5mm$, $w_{c2} = 400mm$, $l_{c2} = 300mm$, $t_{c2} = 5mm$ 로 설정하였다. 부하는 전압원이 아닌 저항으로 모델링하였으며, 배터리 전압이 350V에서 400V인 경우 11kW의 전력에서 부하 저항은 10 Ω 으로 설정하였다. 송신부(Tx) 및 수신부(Rx) 코일은 각각 16턴으로 구성하였고, 코일 간의 간격 $d_c = 150mm$ 로 설정하였다. FEM 시뮬레이션을 통해 송신부와 수신부 코일의 자기 인덕턴스는 각각 $L_1 = 250.0\mu H$ 와 $L_2 = 137.0\mu H$, 상호 인덕턴스와 결합 계수는 $M = 43.0\mu H$ 와 $k = 0.232$ 로 도출하였다. 목표 출력 전력인 11kW를 달성하도록 $L_{If} = 24.0\mu H$, $L_{2f} = 32.0\mu H$ 로 선정하였고, 코어 간격 $l_a = 10mm$ 에서 코어 포화 현상을 방지하도록 권선 수는 $N_{If} = 6T$ 로 선정하였다.

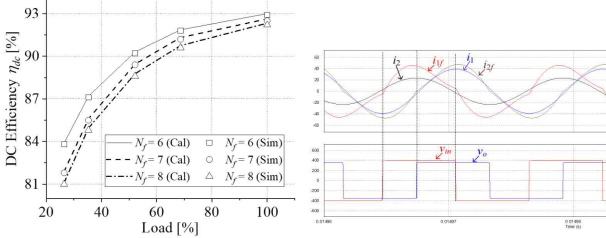


그림 4. N_f 에 따른 DC 효율(좌) 및 구동 시뮬레이션 파형(우)

그림 4에서 시뮬레이션을 통해 전류 간의 위상차, 전압 파형을 확인하였다. 송신부 전류 i_f 와 수신부 필터 전류 i_r 가 전압원 V_{in} 에 대해 90도 위상차로, 양방향 LCC 토폴로지의 주요 특성을 잘 반영했음을 확인하였다. 그림4에서 권선 간격이 증가하면 자기장의 평균 및 최대값이 증가하고, 이는 코어 손실로 이어질 수 있음을 확인하였고, 이를 고려해 권선 간격 N_f 의 최적값을 30mm로 선정하였다. 제안하는 WPT의 물리적 파라미터는 표1에 요약하였다.

표 1. 제안하는 WPT의 물리적 파라미터 선정

Classification	Tx coil	Rx coil
$w_c \times l_c \times t_c$ [mm]	600 × 500 × 5	400 × 300 × 5
메인 코일 턴 수	$N_1 = 16T$	$N_2 = 16T$
ICC 인덕턴스 [μH]	$L_{1f} = 24$	$L_{2f} = 32$
ICC 턴 수	$N_{1f} = 6T$	$N_{2f} = 10T$
공극 [mm]	$l_{a1} = 10$	$l_{a2} = 10$

3. 실험 결과

제안된 11kW EV WPT 시스템의 성능을 검증하기 위해 그림5와 같이 실험 세트를 구성하였으며. 제안된 Tx ICC는 600mm × 500mm, Rx ICC는 500mm × 500mm이고, 두께는 10mm로 제작하였다. 기존 코일과의 비교를 위해 $L_{If} = 24\mu H$ 의 70mm × 70mm × 70mm이고, 10턴으로 구성된 추가 인덕터를 제작하였다. 이를 통해 Tx의 부피는 13.2% 감소하였으며, 제안하는 WPT의 전기적 파라미터는 표2과 같이 요약하였다.

표 2. 제안하는 WPT의 전기적 파라미터 선정

Parameters	Values	Parameters	Values
L_1 [μH]	250.0	C_{1f} [nF]	146.0
L_2 [μH]	137.0	C_{2f} [nF]	97.4
C_1 [nF]	15.5	C_2 [nF]	34.7
M [μH]	43.0	d_c [mm]	150
k	0.232	f_s [kHz]	85

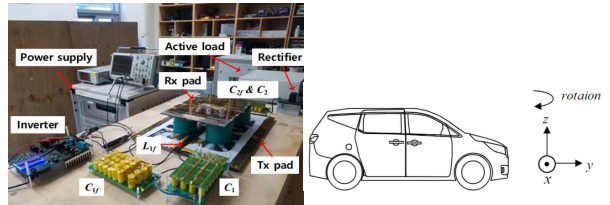
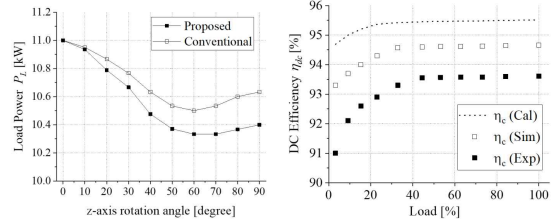


그림 5. 제안하는 ICC 실험 세트 (좌) 및 수신부 회전을 위한 그림 (우)



(a) 회전 각도에 따른 부하 전력 (b) 부하에 따른 효율

그림 6. 제안하는 ICC 시스템의 실험 결과

수신부의 회전 각도에 따른 부하 전력을 측정하였다. 그림 6(a)에서 z축 방향의 오정렬에 부하 전력이 감소하였으나 성능은 기존 코일과 유사함을 확인하였고, 그림6(b)에서 정격 부하 조건에서 효율이 거의 일정하게 유지됨을 확인하였다. 실험 결과, 11kW 부하 전력에서 93.6%의 효율을 달성하였다.

4. 결론

본 논문에서는 전력 밀도 향상과 부피 절감을 목표로 한 통합 새로운 보상 코일(ICC) 구조를 제안하였으며, 이를 실험적으로 검증하였다. 다이폴형 ICC는 기존 방식에 비해 13.2% 부피 절감과 93.6%의 전력 전송 효율을 달성하였고, 정렬 오차 상태에서 정상 동작함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Y.-D. Lee, "Electric Vehicle Wireless Charging Technology and Commercialization Strategy," *2023 IEEE Electric Vehicle Technology Journal*, vol. 1, no. 3, pp. 45-50, Aug. 2023.
- [2] Y.-L. Lyu *et al.*, "A method of using nonidentical resonant coils for frequency splitting elimination in wireless power transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6096-6107, Nov. 2015.