

EV 정렬편차 감지를 위한 감지코일 설계 연구

한동연, 이은수

한양대학교 ERICA 전자공학부

Sensing Coils Design for Detecting Alignment Deviations in Electric Vehicles

Dongyeon Han, Eunsoo Lee

Hanyang University ERICA, Electrical Engineering

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차의 무선 충전을 위한 주차시 발생할 수 있는 좌우 및 앞뒤 정렬 편차를 사용자에게 알려주는 위치 감지 코일 구조를 제안한다. 제안된 위치 코일은 수신 코일에 부착된 수신 코일과 함께 네 개의 코일로 구성되며, 송신부에서 발생하는 자기장이 해당 감지 코일로 쇄교시 생성되는 각각의 유도 전압을 감지하고, 해당 유도전압을 분석하여 전기자동차(EV)의 위치를 판단할 수 있다. 제안하는 감지 코일은 기존 감지 코일과는 다르게 단층으로 얇게 구현이 가능하며, 각 감지코일은 MCU의 ADC를 통해 인가전압 추출이 가능하다. 본 논문에서는 Small-prototype EV 송수신 코일을 모델링하였으며, 이를 시뮬레이션 및 실험을 통해 성능을 검증하였다.

1. 서론

전기자동차 (EV) 보급 확대에 따른 EV 충전 편의성 증대에 대한 요구가 증가하고 있다. 현재 접촉식 충전방식인 커넥터를 사용하여 EV를 충전하는 방식은 사용자의 불편함으로 인해, 국내외 많은 유수기업에서 EV 무선충전 상용화를 위해 노력 중이다. EV 무선충전 대표 규격인 SAE J2954와 같은 원형 급집전 코일 구조는 좌우 허용편차가 좁아서 급집전 코일의 정렬이 어긋나면 출력전압이 급격하게 감소하는 문제점이 있다 [1]. 또한, Double-sided LCC 방식도 급집전코일의 좌우 허용편차는 개선하였으나 허용편차가 여전히 좁고, 집전코일에서 발생한 자기장으로 인한 차체 발열, EMF (Electro-Magnetic-Field) 등의 문제가 있다 [2]. 그러므로 그림 1 과 같이 기본적으로 EV 무선충전 코일의 좌우(x축 방향) 및 앞뒤(y축 방향) 정렬편차 발생시 사용자에게 EV가 송신부로부터 얼마만큼 정렬편차가 발생하였는지에 대한 가이드가 필요하다.

본 논문에서는 EV가 송신코일로부터 얼마만큼 정렬편차가 발생하였는지 사용자에게 안내해줄 수 있는 4코일 기반 감지 코일을 제안하였다. 제안하는 감지 코일을 통해 송신코일에서 전력 전송시 감지 코일에 유도된 전압값을 토대로 차량의 위치 정보를 계산하여 차량 사용자에게 안내하는 것을 목표로 한다.

2. 제안하는 EV 감지코일

본 논문에서는 코일 특성 분석을 위해 FEM 시뮬레이션 모델링 및 PSIM 회로 시뮬레이션 툴을 이용하였으며 EV WPT 모델은 SAE J2954 규격의 WPT3/Z3 코일구조와 정사각형 코일 구조로 진행하였다 [2]. 본 논문에서 제안하는 EV WPT는 코일 너비와 길이가 10cm를 적용 (100cm²), 입력전압 10V~20V인 수준을 고려하여 scaled-down하였다. 이때 송수신 코일의 정렬시 감지 코일의 유도전압은 식 (1) 로 나타낼 수 있다 [1].

$$V_S(t) = N_S \frac{d\phi_s(t)}{dt} \rightarrow V_{sl} = \sqrt{2} \omega_s N_S \Phi_s = \sqrt{2} \omega_s M_S I_1 \quad (1)$$

위 수식에서 N_S 는 감지코일의 턴수, M_S 는 감지코일과 송신코일간 상호 인덕턴스, I_1 은 송신코일 전류, ω_s 는 동작주파수, V_{sl} 은 감지코일에 인가되는 전압이다.

식 (1)과 같이, 감지코일에 인가되는 전압 V_{sl} 은 M_S 에 의해 결정되며, 이는 송신코일과 감지코일간 거리 변화를 반영하는 변수이므로, EV의 정렬편차시 M_S 변화에 따른 V_{sl} 을 센싱함으로써 EV 위치를 간접적으로 확인할 수 있다.

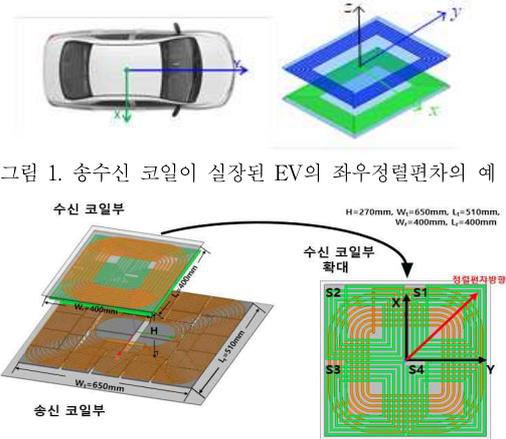
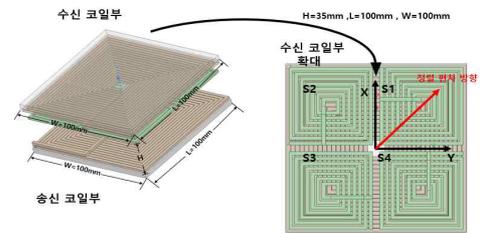


그림 1. 송수신 코일이 실장된 EV의 좌우정렬편차의 예

(a) 감지 코일이 포함된 SAE J2954 기반 Real-scaled 송수신 코일구조



(b) 감지 코일이 포함된 Small-scaled 정사각형 송수신 코일구조
그림 2. J2954 및 정사각형 송수신부 코일 기반 감지 코일 형상의 예

표 1. 제안하는 Small-scaled EV 파라미터

N_1, N_2	L_1, L_2	C_1, C_2	L_f	C_f	$L_{s1} \sim L_{s4}$
29 T	79uH	45nF	20uH	175nF	0.13uH
V_{dc}	f_s	R_L	$k_{C,12}$	$k_{C,1s}$	
10 V	85 kHz	100Ω	0.30	0.08	

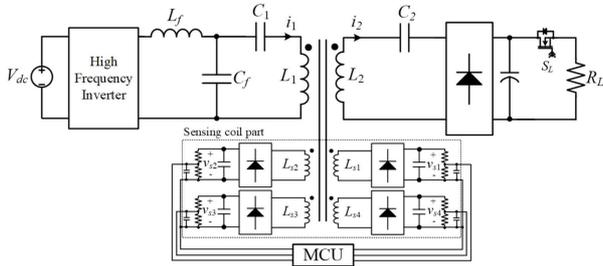
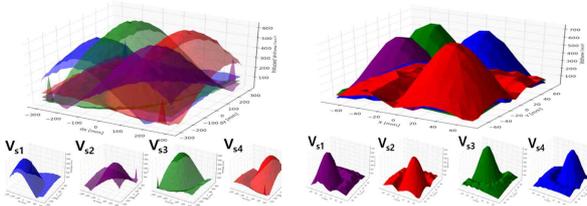


그림 3. 제안하는 감지 코일이 포함된 LLC-S 기반 EV WPT 구조

제안하는 EV WPT시스템에 대한 파라미터를 표1에 요약하였으며, 송수신부간 완전 정렬상태에서의 송수신부간 자기결합 $k_{c,12}$ 와 송신부&감지코일간 자기결합 $k_{c,1s}$ 은 각각 0.30, 0.08이다. 송수신부간 정렬편차시 발생하는 감지코일 인가전압을 확인하기 위해 그림 3과 같이, 감지 코일별로 정류기와 voltage divider를 적용하였다. 송신코일 구동시, 감지코일에 인가된 전압을 토대로 EV의 정렬편차를 확인할 수 있고, 이를 사용자가 확인한 뒤에 EV를 제대로 정렬한 뒤에는 그림 3의 Load switch S_2 를 턴 온하여 부하를 구동하는 것을 특징으로 한다.



(a) Real-scaled J2954 코일 (b) Small-scaled 정사각형 코일
그림 4. FEM 시뮬레이션을 통한 감지코일 유도전압 결과

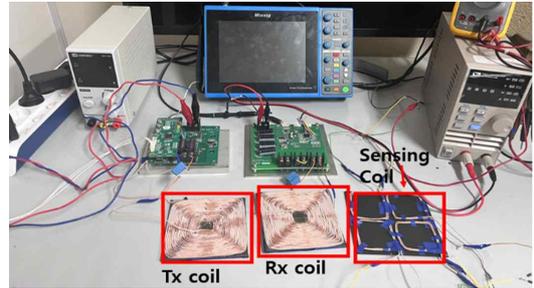
표 2 Small-scaled 감지 코일 유도 전압 시뮬레이션 결과

dx [mm]	dy [mm]	V_{s1} [mV]	V_{s2} [mV]	V_{s3} [mV]	V_{s4} [mV]
0	0	250	250	250	250
0	10	102	366	336	102
0	20	35	440	420	38
10	10	46	197	496	212
20	20	1	40	671	59

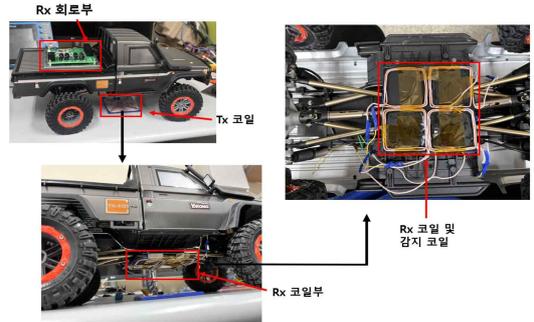
그림 3과 같이 제안하는 감지코일의 성능 검증을 위해 Center-align된 지점에서 그림 1의 x,y 방향으로 mis-align된 상황에서의 인가전압을 분석하였다. Real-scaled J2954 코일과 Small-scaled 코일 둘다 Center-align에서 4개의 감지코일 인가 전압이 동일하며, mis-align될수록 각 코일에 인가되는 전압의 크기가 각각 다른 양상임을 표 2를 통해 알 수 있다. 이러한 감지코일의 전압 특성을 통해 EV가 송신부 기준 상대적 위치를 판단할 수 있다.

3. 실험을 통한 성능 검증

제안하는 감지 코일의 유효성을 검증하기 위해 small-scaled 정사각형 프로토타입을 그림 5와 같이 제작하여 성능을 검증하였다. 송수신 코일 및 감지코일은 그림 2에 제시된 시뮬레이션 모델과 동일하며, 85kHz 동작주파수로 구동하였다. 감지 코일 실험 결과, 그림 6과 같이 center-align를 기준으로 4개의 코일의 인가전압이 각각 다른 양상임을 알 수 있고, 이는 그림 4에 제시된 시뮬레이션 결과와 유사함을 알 수 있다. 그림 5에 제시된 Small-scaled 프로토타입의 50W 부하전력 전송시, 제안하는 감지코일 적용전과 적용후의 효율은 약 1%내외로 미비함을 알 수 있으며, 상대적으로 간단한 회로구성을 통해 EV의 상대적 위치를 파악할 수 있다는 장점을 가진다.



(a) 제안하는 송수신부 코일 및 감지코일 구조 프로토타입



(b) 수신부 코일을 실장한 Small-scaled 프로토타입

그림 5. 제안하는 감지코일 성능 검증을 위한 프로토타입

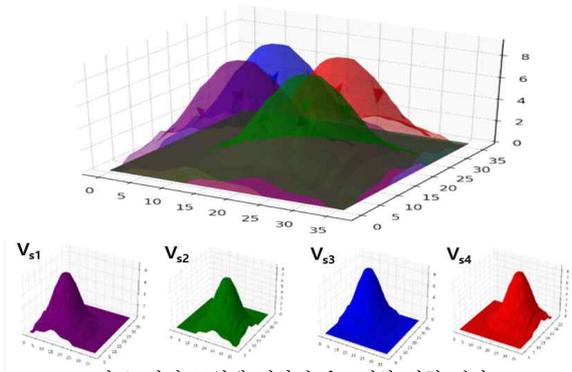


그림 6. 감지 코일에 인가된 유도전압 실험 결과

4. 결론

본 논문에서는 EV WPT의 송신코일 구동시 발생하는 쇄교 자속을 이용하여 전기자동차의 정렬 편차를 확인하는 저가의 간단한 감지 코일 구조를 제안하였다. 제안하는 감지코일을 통해 송신코일을 기준으로 한 EV의 상대적인 위치를 알 수 있으며, 이를 FEM 시뮬레이션과 실험을 통해 그 성능을 검증하였다. 제안하는 4코일 구조는 기존 무선전력시스템의 부하전달 성능을 저해하지 않고 얇은 단층 코일만으로 구성 가능하다는 장점이 있다.

참고 문헌

- [1] Eun S. Lee, Dong Uk Kim, and Seog Y. Jeong*, "Triangular DQ Tx Coils of Wireless EV Chargers for Large Lateral Tolerances," IEEE Trans. Veh. Techn., vol. 72, no. 11, pp. 14179 - 14188, Nov. 2023.
- [2] Mostak Mohammad et al., "Bidirectional LCC-LCC-Compensated 20-kW Wireless Power Transfer System for Medium-Duty Vehicle Charging," IEEE Trans. Transp. Electr., vol. 7, no. 3, pp. 1205-1218, Sep. 2021.
- [3] Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology, International Standard SAE J2954, 2023. [Online]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j2954_201904.