

EV 무선전력 LCC 토폴로지를 위한 Toroidal-Type 보상 코일 구조 연구

박지수, 김재준, 표기현, 이은수
 한양대학교 ERICA 전자공학부

Toroidal-Type Compensation Coil Structure for Integrated-LCC Topology

Ji S. Park, Jae J. Kim, Gi H. Pyo, and Eun S. Lee
 Hanyang University ERICA, Electrical Engineering

ABSTRACT

본 논문에서는 EV용 무선전력에 적용되는 LCC 토폴로지 구현 및 송수신 코일의 고전력 밀도화를 위해, Toroidal-Type 보상 코일 구조를 송수신 코일에 적용한 새로운 코일 구조를 제안하였다. 전력용 송수신 코일에 제안하는 Toroidal-Type 보상코일을 추가하였음에도 Magnetic cross-coupling이 없음을 확인하였으며, 기존 LCC 토폴로지 대비 전체 송수신부 크기를 줄일 수 있음을 확인하였다. 전력용 코일과 제안하는 보상 코일에서 생성된 자기장의 위상이 직각인 특성을 이용하여, EV 정격 구동시에도 코어의 포화되지 않음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 제안하는 시스템은 J2954 표준 11kW 무선충전 시스템에 활용될 수 있으며, 150mm 공극에서 최대 93.7% 효율을 달성할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. Introduction

자동차 산업은 온실가스 배출 규제 강화로 인해 내연기관 차량을 대체할 전기차(EV)의 도입을 확대하고 있다. 전기차는 배터리의 낮은 에너지 밀도 때문에 비교적 짧은 주행 거리와 잦은 충전 필요성이 주요 제약으로 남아 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 무선 전력 전송(Wireless Power Transfer, WPT) 기술이 개발되었으며, 그 중 유도 전력 전송(Inductive Power Transfer, IPT) 시스템이 전기차 충전에 널리 채택되고 있다. IPT 시스템에서는 대표적으로 직렬-직렬(SS) 토폴로지, 그리고 LCC 토폴로지가 주로 사용될 수 있다. 대표적인 공진 네트워크인 전압원 기반 S-S 토폴로지는 무부하시 매우 큰 단락전류로 인한 인버터 소손, 송수신부간 근접으로 인한 frequency splitting 문제로 인해 EV 어플리케이션에서는 주로 코일로 정전류원 공급이 가능한 LCC-S를 사용한다 [1]. 그러나 LCC 토폴로지는 추가적인 LC 수동 소자가 필요하며, 해당 LC 수동소자의 인덕터에 흐르는 전류는 송신 코일 전류와 유사한 수준이거나 더 크므로, 큰 사이즈의 인덕터가 필요하다는 단점이 있다.

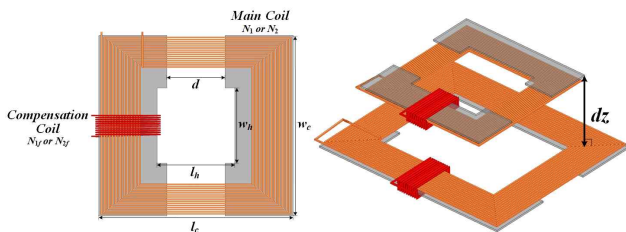


그림 1 제안하는 LCC 토폴로지를 적용한 Tx & Rx 코일 구조

본 논문에서는 그림 1과 같이 기존 LCC 토폴로지의 사이즈를 최소화하기 위해 Toroidal-Type의 보상 코일 구조를 채택한 새로운 LCC 토폴로지 코일 구조를 제안한다. 제안하는 구조

에서의 LC 수동소자의 보상 코일을 주 코일과 직각으로 결합함으로써 교차 결합을 제거하고 시스템의 전체 부피를 현저하게 줄이는 동시에 전기적 성능을 유지한다는 장점이 있다. 제안하는 무선전력 코일은 11kW에서 구동할 수 있도록 설계되었으며, 이를 Finite-Element-Method(FEM) 및 회로 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다.

2. Proposed LCC Coil for IPT System

A. FEM Analysis

본 논문에서 보상 코일은 페라이트 코어에 Toroidal-Type 형상으로 감겨 있으며, 주 코일과 직각으로 배치된다. 페라이트 코어의 높은 투자율로 인해, Toroidal-Type 보상 코일에서 발생하는 대부분의 자기장은 코어 내부를 통과하게 되며, 해당 자기장 성분은 주 코일에서 발생한 자기장 성분과는 직교하므로, 서로간 상호 인덕턴스가 형성되지 않는다. 그러므로 제안하는 보상코일 추가로 인한 송수신부 성능저하는 없다. B_{Tx} 와 B_{cc} 는 각각 주 보상 코일로부터 나오는 자기 플럭스 밀도이고, 주 코일과 보상 코일의 전류는 90도 위상 관계에 있어 페라이트 코어 내의 총 자기 플럭스 밀도 B_t 는 아래와 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$|B_t|^2 = |B_{Tx}|^2 + |B_{cc}|^2 \quad (\because B_{Tx} = B_{Tx} \sin(\omega t), B_{cc} = B_{cc} \cos(\omega t)) \quad (1)$$

그림 2은 제안하는 EV WPT의 11kW 정격 구동 상황하, 보상코일 전후에 따른 비교를 FEM 시뮬레이션으로 수행한 결과이다. 시뮬레이션 결과, 제안하는 보상코일을 적용하더라도 적절한 턴수와 코어간 간격 조정을 통해 코어 내부 자속밀도를 포화점인 0.4T 이하로 유지할 수 있음을 알 수 있다.

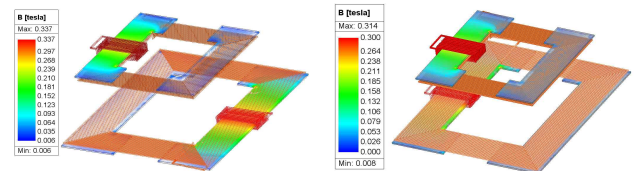


그림 2 제안하는 LCC 코일의 정격 구동시 B-field 비교 (좌: 보상코일 대칭, 우: 보상코일 비대칭)

B. Proposed IPT System Design

무선 EV 충전을 위한 LCC 보상 회로는 그림 3과 같이 Tx와 Rx의 보상 코일 통합으로 인해 원치 않는 추가 결합이 나타날 수 있으며, 이러한 결합은 $k_{11f}, k_{1f2}, k_{12f}, k_{1f2f}$ 등으로 표현된다. 이때, k_{1f2f} 는 그림1과 같이 멀리 이격시킴으로써 최소화 가능하다. 제안하는 IPT 시스템은 그림 3과 같이 double side LCC 토폴로지를 적용하였으며, 각각의 전류는 아래 수식과 같이 나타낼 수 있다.

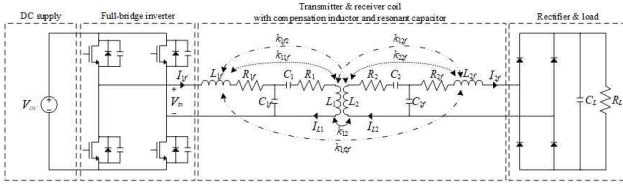


그림 3 보상 코일이 통합된 Double-side LCC WPT 토폴로지 회로

표 1 제안하는 11kW EV WPT의 전기적 파라미터 선정

Parameters	Value	Parameters	Value	Parameters	Value
L_1 [uH]	260.0	C_1 [nF]	13.0	R_1 [mΩ]	37.4
L_2 [uH]	180.0	C_2 [nF]	25.0	R_2 [mΩ]	28.0
L_{1f} & L_{2f} [uH]	40.0	C_{1f} & C_{2f} [nF]	87.0	R_{1f} & R_{2f} [mΩ]	2.75
k_{11f}	0.00032	k_{12}	0.00017	k_{12}	0.17
k_{2f}	0.00056	k_{2f}	0.00001	f_s [kHz]	85

$$I_{1f} = \frac{L_{12} V_o}{\omega_0 L_{1f} L_{2f}}, I_{2f} = \frac{L_{12} V_{in}}{\omega_0 L_{1f} L_{2f}} \quad (2)$$

$$I_{L1} = \frac{V_{in}}{\omega_0 L_{1f}}, I_{L2} = \frac{V_o}{\omega_0 L_{2f}} \quad (3)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{1f} C_{1f}}} = \frac{1}{\sqrt{(L_1 - L_{1f}) C_1}} \quad (4)$$

본 논문에서는 J2954 표준 11 kW 무선충전 시스템을 기준으로 동작주파수를 $f_s = 85$ kHz로 선정하였으며, 인버터부 전류와 정류기측 전류의 위상차가 90도를 이루었을 때 최대 전력전달이 되도록 파라미터를 선정하였으며 [2] - [3], 본 논문에서 제시된 파라미터를 표 1에 요약하였다.

C. Tx&Rx Core Design

보상 코일 설계는 통합으로 인해 발생할 수 있는 코어 포화를 방지해야 한다. 보상 인덕터가 Toroidal-type으로 감겨질 때, 생성되는 자기장은 자기 경로의 짧은 쪽에 집중되고 부분적인 포화가 발생할 수 있다. 페라이트 코어의 부분 포화를 완화하기 위해, 그림 1에 표시된 것처럼 페라이트 코어에 간격을 삽입할 수 있고, 해당 코어 간격은 보상코일의 인덕턴스를 결정한다. FEM 시뮬레이션을 통하여 제안하는 구조의 Tx와 Rx 각각의 변수들을 표 II와 같이 선정하였으며 각 인덕터에서 생성되는 자기장은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$B_i = \frac{|N_{f1} I_{f1} + N_{f1} I_1|}{\frac{l_c}{\mu_c \mu_0} + \frac{l_a}{\mu_0}} \approx \frac{\mu_0 |N_{f1} I_{f1} + N_{f1} I_1|}{l_a} < 0.4 T \quad (5)$$

여기서 μ_0 과 μ_c 는 각각 진공과 페라이트 코어의 투자율, l_c 와 l_a 는 코어 자기장 통과 길이, 공기 통과 길이이다. 만일 제안하는 보상 코일이 주 코일과 통합된다면 코어간 간격인 l_a 를 조정함으로써 보상코일의 인덕턴스를 조절할 수 있을 뿐만 아니라 송수신 코어의 자속포화를 방지할 수 있다.

D. Load Power and Efficiency

본 논문은 PSIM 시뮬레이션을 통해 회로를 구성하였으며 표 I의 값을 적용하여 결과 파형을 그림 4에 나타내었다. 시뮬레이션 결과, 1차측 및 2차측의 위상차가 90도이므로 공진조건을 만족함을 알 수 있다. 부하측 배터리 전압 100V ~ 400V 변화에 따른 출력전력과 효율을 그림 5에 나타내었으며, DC-to-DC 최대효율은 약 93.7%임을 확인할 수 있다.

표 II 제안하는 11kW EV WPT의 물리적 파라미터 선정

Remarks	Parameters	Value	
		Tx	Rx
Ferrite core length [mm]	l_c	500	400
Ferrite core width [mm]	w_c	600	400
Hole length [mm]	l_h	270	220
Hole width [mm]	w_h	370	220
Turn of main coil [turns]	N_1/N_2	15	16
Turn of compensation coil [turns]	N_{1f}/N_{2f}	10	10
Air gap [mm]	d	150	150

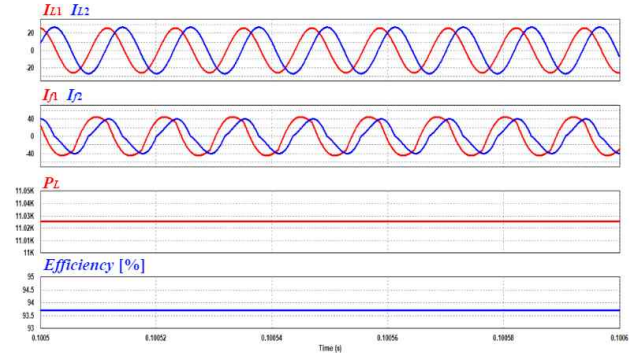


그림 4 제안하는 11kW급 WPT 시뮬레이션 결과 파형

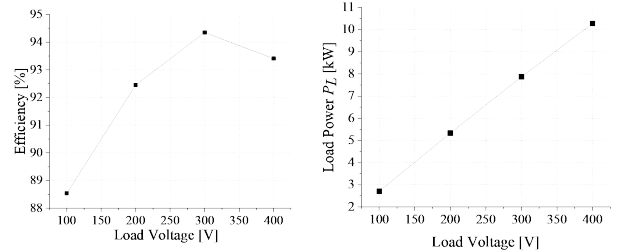


그림 5 부하변동에 따른 효율 비교(좌: 효율, 우: 부하전력)

3. Conclusion

본 논문에서는 EV용 무선전력 시스템에 사용되는 LCC 토폴로지에 Toroidal-Type의 보상코일 구조를 결합한 통합 코일 구조를 제안하였다. 주 코일과 보상 코일을 통합한 형태이므로 전체 자기소자 크기를 줄였으며, 주 코일과 보상코일에서 생성된 자기장 벡터 합을 적절한 코일권선수와 코어간 간격을 통해 자속포화점인 0.4T 이하로 유지할 수 있음을 확인하였다. 향후 11kW급 EV WPT 실험세트 제작을 통해 본 LCC 통합 코일에 대한 주요 성능을 검증할 예정이다.

참고 문헌

- [1] 신유준, 안승영, “무선전력전송 코일간의 전력전달 원리와 공진 토폴로지 선택,” THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE, vol. 33, no. 7, pp. 509-524, July 2022.
- [2] Mostak Mohammad et al., “Bidirectional LCC-LCC-Compensated 20-kW Wireless Power Transfer System for Medium-Duty Vehicle Charging,” *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, vol. 7, no. 3, pp. 1205-1218, Sep. 2021.
- [3] 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.