Universal GA 기반 전기자동차용 22kW급 무선 충전시스템 설계 분석

현동우, 추창엽, 박기범
한국과학기술원

Design Analysis of 22kW Wireless Charging System for EV Based on Universal GA

Dong-Woo Hyun, Chang-Yeob Chu, Ki-Bum Park
Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 SAE J2954 표준을 기반으로 22kW급 800V 전기자동차용 3단 무선 충전시스템을 설계하고 분석한다. J2954 WPT2 코일이 적용된 Double-Sided LCC와 LCC-Series 보상회로를 비교하여 22kW급 3단 무선 충전시스템에 적합한 토폴로지를 수식 기반의 분석을 통해 선정하고 설계 사양을 고려해서 코일 및 보상회로의 파라미터를 설계한다. 마지막으로 시뮬레이션으로 코일에서 발생하는 전류 스트레스 및 전력 손실을 분석하여 고효율 운전을 위한 설계 방향성을 제안한다.

1. 서론

국제 자동차 기술자 협회에서 지정한 전기 자동차의 무선 충전 표준인 SAE J2954는 현재 11.1kVA급 이하에 대해서만 충전 기준이 마련되어 있는 상태이다.[1] 하지만 800V 배터리가 적용된 전기 자동차를 충전하기 위해서 22kW급 무선 충전시스템의 개발과 연구가 필요하다. 본 논문에서는 그림 1의 22kW급 3단 무선 충전시스템을 표 1의 WPT2 (7.7kVA) 코일과 WPT4 (22kVA) 규격을 고려하여 재설계한 코일을 사용하여 구성한다. 사용된 코일 조합을 표2에 나타내었으며 두 조합 모두 송신단 코일은 Universal GA (Ground Assembly)를, 수신단 코일은 VA (Vehicle Assembly) WPT2/Z3 와 22kW급 시스템에 적합하도록 재설계한 코일을 사용하였다. 또한 Double-Sided LCC와 LCC-Series 보상회로를 분석하여 코일의 전류 스트레스를 기반으로 발열을 최소화할 수 있으며 설계 자유도가 높은 보상회로를 선정한다.[2,3] 최종적으로 시뮬레이션 결과를 바탕으로 Universal GA 기반의 22kW급 무선 충전시스템을 고효율로 운전하기 위한 설계 방향성을 제안한다.

2. 보상회로

2.1 Double-Sided LCC

그림 2 (a)의 Double-Sided LCC 보상회로는 공진 주파수에서 동작할 때 식 (1)과 같은 부하에 무관한 출력 전류 I_{Lf2}를 나타내며, Buck 컨버터의 충전 전류는 식 (2)와 같다.[2]

$$I_{Lf2} = \frac{k\sqrt{L_1 L_2}\, U_{AB}}{\omega_r L_{f1} L_{f2}} \tag{1}$$

$$I_{batt} \propto \frac{k\sqrt{L_1 L_2}\, V_{link1}}{\omega_r L_{f1} L_{f2}} \frac{V_{link2}}{V_{batt}} \tag{2}$$

송신단 LCC 구조의 송신단 코일 전류는 식 (3)과 같고 Double Sided LCC 보상회로의 수신단 코일 전류는 식 (4)와 같다.

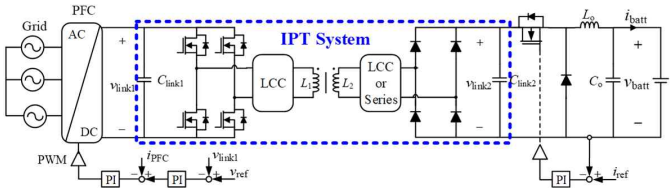
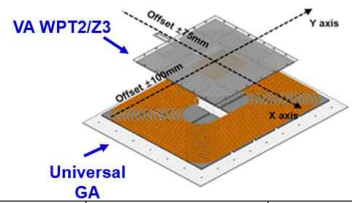
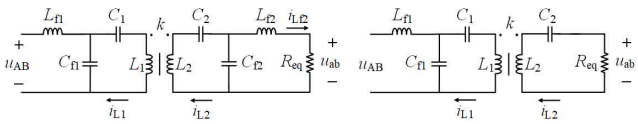


그림 1 22kW급 3단 무선 충전시스템
Fig. 1 22kW 3-Stage Wireless Charging System

표 1 SAE J2954 WPT2/Z3
Table 1 SAE J2954 WPT2/Z3

Tx : Universal GA Rx : VA WPT2/Z3			
Misalignment (mm)	X-axis	Y-axis	VA to GA
	-100 ~ 100	-75 ~ 75	170 ~ 250
Operating Frequency (kHz)	79 ~ 90 (Nominal 85)	Coupling Coefficient	0.07 ~ 0.2
Maximum GA Inverter Output Current	40 Arms	Maximum GA Coil Current	75 Arms



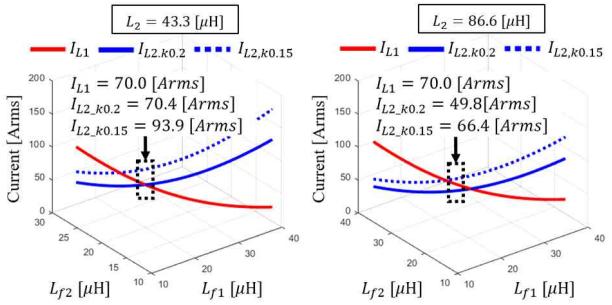
(a) Double-Sided LCC (b) LCC-Series

그림 2 고차원 보상회로의 등가회로
Fig. 2 Equivalent Circuit of High-order Compensation Network

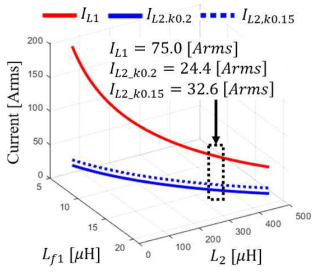
$$I_{L1} = \frac{U_{AB}}{\omega_r L_{f1}} \qquad \left(L_{f1} \propto \sqrt{L_1}\right) \tag{3}$$

$$I_{L2} = \frac{U_{ab}}{\omega_r L_{f2}} \qquad \left(L_{f2} \propto \sqrt{L_2}\right) \tag{4}$$

Double-Sided LCC 보상회로의 경우, 송신단과 수신단 보상 인덕턴스 L_{f1}, L_{f2}를 동일한 비율로 증가 및 감소시키면 출력 전류를 유지하면서 송신단과 수신단 코일의 전류 스트레스를 분배할 수 있다. 또한 송신단 코일의 전류 스트레스는 결합계수에 무관하지만, 수신단 코일에서는 결합계수 감소로 인한 Buck 컨버터의 시비율 감소로 출력 전압 U_{ab}이 상승하여 전류 스트레스가 증가하므로 이를 고려해서 코일 및 보상회로의 파라미터를 설계해야 한다.



(a) Double-Sided LCC-Coil A (b) Double-Sided LCC-Coil B



(c) LCC-Series

그림 3 송신단과 수신단 코일의 전류 스트레스
Fig. 3 Current Stress on Primary and Secondary Coil

표 2 WPT 코일 조합
Table 2 WPT Coil Combinations

Coil A	Universal GA (Tx)	L_1	$40.3\mu H$
	VA WPT2 (Rx)	L_2	$43.3\mu H$
Coil B	Universal GA (Tx)	L_1	$40.3\mu H$
	Proposed VA WPT4 (Rx)	L_2	$86.6\mu H$

송신단과 수신단 보상 인덕턴스 변화에 따른 코일 A의 전류 스트레스 변화를 그림 3 (a)에 나타내었다. 송신단 코일의 전류 스트레스가 최대 GA 코일 전류인 75Arms를 넘지 않으면서 최소 결합계수에서의 수신단 코일의 전류 스트레스가 최소가 되도록 송신단과 수신단 보상 인덕턴스를 선정한다. 그림 3 (b)의 코일 B는 수신단 코일에서도 75Arms 전류를 초과하지 않도록 코일 A에서의 수신단 전류 스트레스를 1.4배 이상 감소시키기 위해 수신단 코일의 인덕턴스 L_2를 2배 증가시켰다.

2.2 LCC-Series

그림 2 (b)의 LCC-Series 보상회로는 공진 주파수에서 식 (5)와 같은 부하에 무관한 출력 전압을 나타낸다.[3]

$$U_{ab} = \frac{k\sqrt{L_1 L_2}\,U_{AB}}{L_{f1}} \tag{5}$$

LCC-Series 보상회로의 경우, 송신단 보상 인덕턴스 L_{f1}가 동일한 출력의 Double-Sided LCC 보상회로 대비 약 2배 정도 작아 송신단 코일에 전류 스트레스가 집중된다. 출력 전압을 유지하면서 L_{f1}을 증가시켜 송신단 코일 전류를 75Arms 이하로 저감하기 위해서는 코일 A의 수신단 인덕턴스 L_2를 7배 이상 증가시켜야 하는데 이는 코일의 큰 부피 증가를 요구한다. 그러므로 본 연구에서는 설계자유도가 높은 Double-Sided LCC 보상회로를 채택하여 무선 충전시스템을 설계한다.

3. 시뮬레이션

표 2의 코일 조합을 기반으로 설계된 Double-Sided LCC 보상회로의 파라미터를 표 3에 나타내었다. 그림 4에 나타난 것처럼 코일 A 기반의 보상회로에서는 수신단의 전류가 최소 결합계수에서 105Arms를 초과하지만 코일 B 기반의 보상회로

표 3 무선 충전시스템 파라미터
Table 3 Wireless Charging System Parameters

Link Voltage	v_{link1}	$800\,V$	v_{link2}	$800 \sim 1200\,V$
Double-Sided LCC (Coil A)	L_{f1}	$16.4\,\mu H$	L_{f2}	$19.6\,\mu H$
	C_{f1}	$214\,nF$	C_{f2}	$179nF$
	C_1	$146\,nF$	C_2	$148nF$
Double-Sided LCC (Coil B)	L_{f1}	$18.3\,\mu H$	L_{f2}	$25.3\,\mu H$
	C_{f1}	$192\,nF$	C_{f2}	$139\,nF$
	C_1	$159\,nF$	C_2	$57.2\,nF$

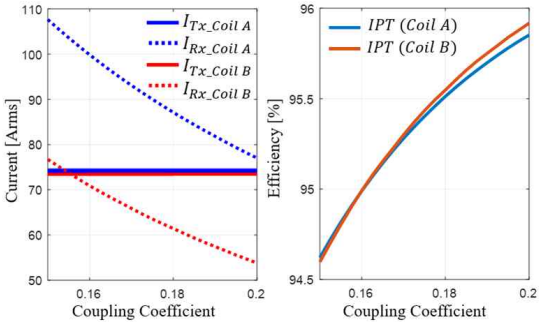


그림 4 코일의 전류 스트레스(좌) 및 IPT 시스템의 효율(우)
Fig. 4 Current Stress on Coil(left) and Efficiency of IPT System(right)

에서는 송신단과 수신단 코일의 전류 스트레스가 75Arms를 초과하지 않고 이는 결합계수가 최소가 된 경우에도 마찬가지이다. 코일 B는 수신단 코일의 인덕턴스 증가와 함께 코일의 저항 성분도 증가하지만, 송신단과 수신단 보상 인덕터의 적절한 선정으로 코일의 전류 스트레스를 분배하여 코일에서 발생하는 전력 손실을 최소화하면 그림 1에 표시된 IPT (Inductive Power Transfer) 시스템의 효율을 그림 4와 같이 개선할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 SAE J2954의 Universal GA 기반으로 22kW급 무선 충전시스템을 구성하고 코일 및 보상회로의 설계 방향성을 제안하였다. LCC-Series 보상회로의 설계는 코일의 파라미터에 크게 의존하므로 송신단 코일의 전류 스트레스를 기준 이하로 저감하기 위해 높은 인덕턴스의 코일을 요구한다. 반면, 설계 자유도가 높은 Double-Sided LCC 보상회로의 설계는 코일의 전류 스트레스를 보상 소자들의 적절한 선정으로 분배할 수 있으므로 코일의 파라미터에 비교적 자유롭다. Universal GA의 송신단 코일과 제안하는 WPT4 규격의 수신단 코일의 조합으로 Double-Sided LCC 보상회로 기반의 22kW급 무선 충전시스템을 설계하여 고효율 운전이 가능함을 확인하였다.

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2022-0-00452, 로봇향 3.3kW급 군집 무선충전 핵심기술 개발)

참 고 문 헌

[1] SAE International, "Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology", SAE J2954 RP, Nov. 2017.
[2] S. Li, W. Li, J. Deng, T. D. Nguyen and C. C. Mi, "A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, no. 6, pp. 2261-2273, June 2015
[3] Y. Wang, H. Wang, T. Liang, X. Zhang, D. Xu and L. Cai, "Analysis and design of an LCC/S compensated resonant converter for inductively coupled power transfer", 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, pp. 1-5, 2017