

J2954 기반 3.3kW 무선 충전시스템 2단/3단 구성에 따른 설계 분석

추창엽, 이영석, 박기범
한국과학기술원 조천식모빌리티대학원

Design Analysis of 3.3kW Wireless Charging System accrodging to 2-Level/3-Level Configuration Based on J2954

Chang-Yeob Chu, Youngseok Lee, Ki-Bum Park
Cho Chun Shik Graduate School of Mobility, KAIST

ABSTRACT

전기자동차용 무선 충전시스템은 넓은 범위의 코일 결합계수 값을 갖는 것이 특징이며, 이를 고려한 시스템 설계가 핵심이다. 본 논문에서는 코일의 부정합에 따른 결합계수 변화에 강인한 시스템 설계 방안을 소개한다. 실제 코일의 결합계수 값은 J2954의 표준 코일을 기반으로 얻는다. 소개하는 방안은 레귤레이터 설계의 유, 무에 따른 2단/3단 시스템 구성에 따라 차이점이 존재하며, 이를 비교한다. 또한 이러한 비교를 바탕으로 고효율 설계가 가능한 무선 충전시스템 구조를 선정하고, 최종적으로 3.3kW 시스템을 설계하여 효율을 분석한다.

1. 서론

기존의 유선 충전은 충전 케이블의 불편함, 감전의 위험 등의 단점을 갖으며, 이에 따라 무선 충전시스템의 상용화를 위한 활발한 연구가 진행되고 있다^[1]. 일반적인 무선 충전시스템의 구조는 <그림 1>과 같다. AC 전원을 DC 전원으로 변환하는 역률보상회로(PFC)와 DC 전원을 AC 전원으로 변환하는 인버터, 1차 측과 2차 측의 전력전달을 위한 변압기, 수동소자로 구성되는 보상회로, 1차 측으로부터 전달받은 AC 전원을 DC 전원으로 다시 변환하는 정류기로 구성되며, 레귤레이터의 설계 유, 무에 따라 2단 무선 충전시스템과 3단 무선 충전시스템으로 구분된다. 시스템 구성의 핵심은 변압기이며, 분리된 두 개의 코어에 각각 코일이 감겨 설계된다. 기존 한 개의 코어에 설계되는 변압기에 비해 코일 부정합에 의해 낮고 넓은 범위의 결합계수 값을 갖는 것이 특징이다.

코일 부정합에 의한 결합계수 변화는 무선 충전시스템의 특성 변화를 야기한다. 전기자동차용 무선 충전시스템은 차량의 주차 상태나 차량의 다양한 사이즈로 인한 코일 부정합이 발생할 경우가 많으며, 따라서 결합계수 변화에 강인한 시스템 설계가 매우 중요하다. 본 논문에서는 결합계수 변화에 강인한 시스템 설계 방안을 소개한다. 코일의 결합계수는 J2954에서 제공하는 표준 코일 설계를 기반으로 시뮬레이션을 통해 얻은 값을 사용한다^[2]. 보상회로의 경우, 수동소자의 구성에 따라 다양하게 구분하며, 설계 자유도가 높은 LCC-LCC 보상회로를 통해 시스템을 설계한다. 소개하는 방안은 2차 측 레귤레이터 설계의 유, 무에 따라 차이점이 존재하며, 이를 기반으로 시스템을 구성하는 스위치의 종류나 전반적인 소자들의 전압 및 전류 스트레스를 비교한다. 최종적으로는 고효율 설계가 가능한 무

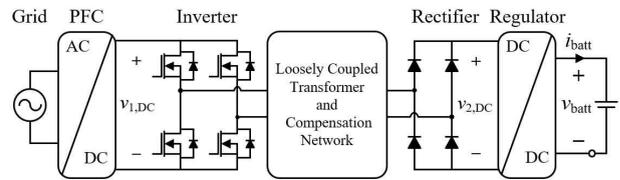


그림 1 무선 충전시스템 구성도
Fig. 1 Basic structure of wireless charging system

선 충전시스템 구성을 선정 후, 설계된 3.3kW 전기자동차용 무선 충전시스템에 대하여 전반적인 결합계수 변화에 대한 효율을 분석한다.

2. J2954 기반 코일의 결합계수 변화

SAE J2954에서 WPT는 전력 등급에 따라 WPT1, WPT2, WPT3 및 WPT4로 구분된다. 또한 Z-Class는 차량(V)의 코일에서 바닥(G)의 코일까지의 거리로 정의된다. 본 논문에서는 3.3kW 시스템 설계를 목표로 하며, 이를 고려하여 WPT2/Z3를 선정하였다. 또한 SAE J2954의 공칭 주파수인 85kHz를 기반으로 시스템을 설계하였다. WPT2/Z3의 특성은 표 1에 요약되어 있다.

표 1 SAE J2954 WPT2/Z3 기본 특성
Table 1 Characteristics of SAE J2954 WPT2/Z3

Perspective View			
Front View			
Misalignment (mm)	x-axis -75 ~ 75	x-axis -100 ~ 100	V to G 170 ~ 250

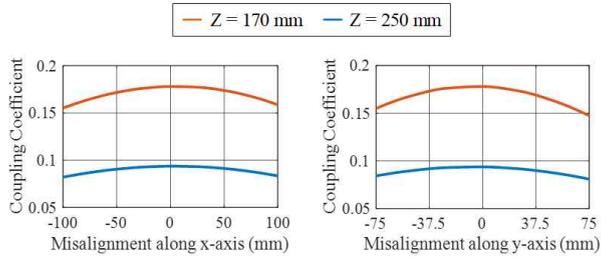


그림 2 각 축의 코일 부정합에 따른 결합계수 변화
Fig. 1 Coupling coefficient variation according to coil misalignment along each axis

<그림 2>는 WPT2/Z3의 코일 부정합에 따른 결합계수 값의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 차량의 코일과 바닥의 코일의 수직 거리에 더 민감하게 변하며, 본 논문에서는 시뮬레이션 결과를 기반으로 0.08에서 0.2의 결합계수 범위를 사용하였다.

3. 결합계수 변화에 강인한 무선 충전시스템 설계

3.1 2단/3단 구성에 따른 결합계수에 강인한 시스템 설계 방안 비교

결합계수에 강인한 시스템 제어 방안이 적용된 2단, 3단 무선 충전시스템 구성도는 <그림 2>와 <그림 3>과 같다. 두 시스템 모두 앞서 언급하였듯이, LCC-LCC 보상회로로 구성되었다. 2단 무선 충전시스템과 3단 무선 충전시스템의 시스템 파워 수식은 아래와 같다^[3].

$$M = k \sqrt{L_p L_s} \quad (1)$$

$$P_{out,2stage} = \frac{1}{\omega M} v_{1,DC} \cdot v_{batt} \quad (2)$$

$$P_{out,3stage} = \frac{1}{\omega M} v_{1,DC} \cdot \frac{v_{batt}}{D} \quad (3)$$

시스템 파워는 결합계수 값에 반비례하며, 1차 측 인버터 입력 DC 링크 전압, 2차 측 정류기 출력 DC 링크 전압에 비례한다. 따라서 소개하는 제어 방안의 경우, 결합계수가 감소함에 따라 DC 링크 전압이 증가하도록 동작한다. 배터리 전압은 제어 불가능한 변수이므로, 2단 무선 충전시스템은 오직 1차 측 인버터 입력 DC 링크 전압만을 제어할 수 있으며, 3단 무선 충전시스템은 레귤레이터의 듀티를 조절하여 2차 측 정류기 출력 DC 링크 전압 또한 제어가 가능하다. 레귤레이터는 벽 컨버터로 구성하여 배터리 전압보다 큰 전압 설계가 가능하도록 하였다.

레귤레이터의 설계 유, 무에 따라 결합계수 변화에 강인한 시스템 설계를 위한 2단, 3단 무선 충전시스템의 링크 전압 변화는 <그림 4>와 같다. 레귤레이터가 없을 경우, 결합계수 변화를 인버터 입력 DC 링크 전압이 모두 감당해야하기 때문에 전압 변동 범위가 넓으며, 최대 700V의 전압을 요구한다. 반면, 3단 무선 충전시스템은 두 링크 전압을 최대 520V내로 설계가 가능하다. 즉, 3단 무선 충전시스템의 인버터는 650V의 전압 내압을 갖는 스위치로 구성이 가능하다. 더 넓은 결합계수 범위에 대해 강인한 2단 무선 충전시스템을 만들기 위해서는 시스템 인버터를 구성하는 스위치를 더 높은 전압 내압을 갖는 소자로 변경해야 한다.

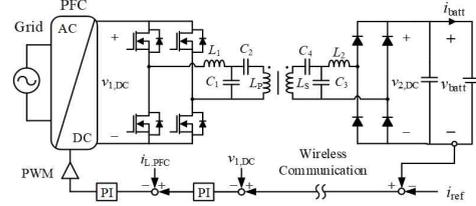


그림 2 결합계수 변화에 강인한 2단 무선 충전시스템 회로도
Fig. 2 Circuit diagram of 2-stage wireless charging system robust to coupling coefficient variation

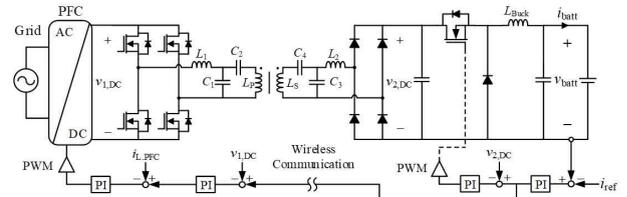


그림 3 결합계수 변화에 강인한 3단 무선 충전시스템 회로도
Fig. 3 Circuit diagram of 3-stage wireless charging system robust to coupling coefficient variation

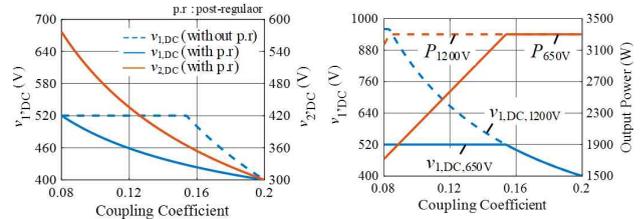


그림 4 레귤레이터 설계 유, 무에 따른 결합계수 변화에 강인한 시스템 설계를 위한 DC 링크 전압 변화(좌), 인버터 구성 스위치에 따른 2단 무선 충전시스템 링크 전압 및 시스템 파워 변화(우)

Fig. 3 DC link voltage variation of system robust to coupling coefficient variation with or without Regulator Design(left), Changes in the DC link voltage and system power of 2-level wireless charging system according to switches in inverter (right)

<그림 4>에서 알 수 있듯이, 1200V 전압 내압을 갖는 스위치를 사용하면, 주어진 0.08 ~ 0.2 범위에 걸쳐 시스템 파워를 일정하게 유지할 수 있다. 하지만 일반적으로 스위치의 전압 내압이 증가함에 따라 스위칭 성능이 감소하며, 가격이 증가할 수 있다.

3.2 고효율 3.3kW 무선 충전시스템 설계

2단, 3단 3.3kW 전기자동차용 무선 충전시스템 손실 비교를 위한 설계 파라미터는 아래와 같다. 코일의 인덕턴스 값은 WPT2/Z3 코일의 시뮬레이션을 바탕으로 얻었다.

표 2 LCC-LCC 보상회로 구성 무선 충전시스템 설계 파라미터
Table 2 Designed parameter of wireless charging system with LCC-LCC compensation network

L_p	40.3 μ H	C_1	170 nF
L_s	43.3 μ H	C_2	176.5 nF
L_1	20.5 μ H	C_3	170 nF
L_2	20.5 μ H	C_4	153.5 nF
f	85 kHz	k	0.08 ~ 0.2
$v_{L,DC}$	400 ~ 960 V	$v_{L,DC}$	300 ~ 600 V

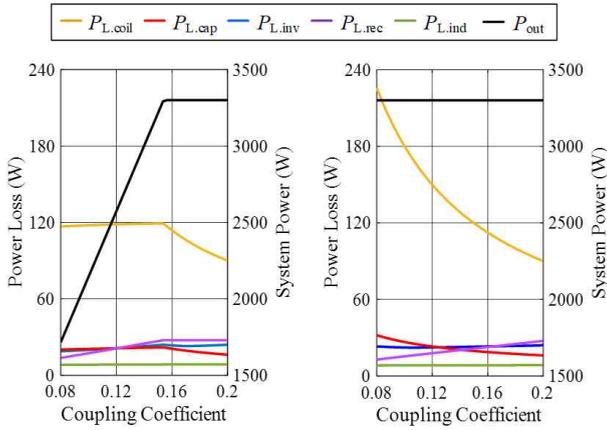


그림 5 결합계수 변화에 따른 인버터 입력부터 정류기 출력까지의 손실 분석, 2단 무선 충전시스템(좌), 3단 무선 충전시스템(우)
 Fig. 5 Analysis of Losses from Inverter Input to Rectifier Output according to the coupling coefficient variation, 2-level system(left), 3-level system(right)

<그림 5>는 시스템 2단, 3단 구성에 따라 결합계수 변화 기반 손실 분석을 나타낸다. 두 시스템 모두 650V의 전압 내압을 갖는 스위치를 사용하였다. 시스템을 구성하는 손실에서 코일의 손실이 지배적인 것을 알 수 있다.

$$i_{Lp} = \frac{v_{1,DC}}{j\omega L_1} \quad (4)$$

$$i_{Ls} = \frac{v_{2,DC}}{j\omega L_2} \quad (5)$$

위 식을 통해, 코일에 흐르는 전류는 보상 인덕턴스 값에 반비례하며, 인버터 입력 DC 링크 전압 혹은 정류기 출력 DC 링크 전압에 각각 비례하는 것을 알 수 있다. 감소하는 결합계수에 대해 각각의 DC 링크 전압이 증가하기 때문에 코일에 흐르는 전류의 증가로 손실이 증가하게 된다. 따라서 코일 정합 조건이 최대한 좋은 조건에서 시스템을 동작시키는 것이 충전 과정에서 발생하는 손실을 줄일 수 있다. 최근 무선 충전시스템의 정격 파워를 증가시키고, 800V 배터리 전압을 사용함에 따라 DC 링크 전압의 증가가 불가피하며, 이에 따라 코일에 흐르는 전류가 급격하게 증가할 수 있다. 따라서 보상 인덕턴스의 적절한 설계로 코일에 흐르는 전류 값을 감소시켜 고효율 설계가 가능하며, 이러한 측면에서 LCC-LCC 보상회로가 S-S와 같은 단순한 보상회로에 비해 설계의 자유도가 높다는 큰 장점을 갖는다.

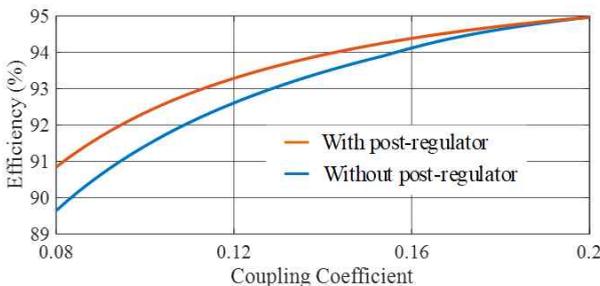


그림 6 결합계수 변화에 따른 효율 비교
 Fig. 6 Efficiency comparison of wireless charging system according to coupling coefficient variation

<그림 6>은 레귤레이터 설계 유, 무에 따른 결합계수 범위에 대한 계산된 효율 비교를 나타낸다. 인버터부터 정류기 출력까지의 효율을 계산하였으며, 코일의 부정합에 따른 결합계수 값이 감소함에 따라 3단 무선 충전시스템의 효율이 더 높음을 알 수 있다. 큰 차이가 존재하지는 않지만, 3단 무선 충전시스템의 경우, 동일한 소자들의 구성으로 더 넓은 결합계수 범위에 대해 시스템 파워를 유지할 수 있다는 장점을 갖는다.

또한 2단 무선 충전시스템의 경우, 결합계수 범위에 따른 DC 링크 전압 변화를 인버터 입력에서 모두 감당하기 때문에 식 (4)와 식 (5)에서 알 수 있듯이, 1차 측 코일에 흐르는 전류의 급격한 증가로 1차 측과 2차 측 코일에 흐르는 전류의 불균형으로 1차 측으로 손실이 몰리게 되는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 점을 고려하였을 때, 코일의 부정합으로 인한 작고 넓은 결합계수 범위에 강인한 설계가 핵심인 전기자동차 무선 충전시스템의 경우, 3단 구성이 더 적합하다고 할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 결합계수 변화에 강인한 전기자동차용 무선 충전시스템 설계 방법에 대해 소개하였다. 결합계수 변화는 SAE J2954에서 표준으로 제공하는 WPT2/Z3 코일을 이용한 시뮬레이션을 통해 얻은 값을 기반으로 하였다. 소개하는 방안은 2단, 3단 구성에 따라 차이점이 존재하며, 동일한 스위칭 소자로 인버터를 구성하였을 때, 시스템 파워를 일정하게 유지할 수 있는 결합계수의 범위가 달라진다. 두 시스템 모두 코일에서 발생하는 손실이 계산된 손실에서 가장 큰 비중을 차지하는 것을 알 수 있으며, 코일에 흐르는 수식을 고려하였을 때, 보상 인덕턴스 값을 증가시키면 코일에 흐르는 전류의 감소로 손실의 감소를 기대할 수 있다. 이는 향후 고전력 무선 충전시스템 설계에 있어서 방향성을 제시할 수 있다. 3.3kW 2단, 3단 무선 충전시스템의 결합계수 변화에 따른 효율을 비교하였을 때, 3단 구성이 결합계수가 감소함에 따라 더 높은 효율을 갖는 것을 알 수 있으며, 코일의 부정합이 빈번한 전기자동차용 무선 충전시스템 설계에 있어서 레귤레이터 기반 3단 구성이 고효율 설계에 더 적합하다고 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] S. Li and C. C. Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," in *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 4-17, Mar. 2015.
- [2] SAE International. "Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology," SAE J2954 RP, Nov. 2017.
- [3] W. Li, H. Zhao, J. Deng, S. Li and C. C. Mi, "Comparison Study on SS and Double-Sided LCC Compensation Topologies for EV/PHEV Wireless Chargers," in *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 6, pp. 4429-4439, Jun. 2016.