

디커플링 구조를 갖는 3상 3계층 무선충전 시스템

이태연
(주)와이파워원

A Decoupling Coil Structure for Three-Phase and Three-Layer Wireless Charging System

Taeyeon Lee
WiPowerOne, Inc.

송신과 수신측의 상간 결합이 거의 0에 가까움을 보여준다. 이를 통해 공진 튜닝이 단상 설계와 같이 간단해진다.

ABSTRACT

고출력 무선전력전송(WPT) 수요가 증가함에 따라 다상 다계층 구조의 코일들이 연구되고 있다. 특히 3상 3계층 코일은 기존 단상 시스템과 비교하여 송신과 수신측 코일의 면적을 3배 감소시킬 수 있으며, 이에 따라 전력밀도를 높일 수 있다. 하지만 다중 코일이 다층으로 구성됨에 따라 원치 않는 상간 결합의 문제를 갖고 있다. 상간 결합은 전력전달의 효율을 감소시키고, 상간 간섭을 일으키게 된다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 각각의 송신 혹은 수신 코일들의 디커플링 구조를 제안한다. 단극 권선과 양극 권선들의 새로운 조합을 통해 원치 않는 상간 결합이 제거되고, 다상 다계층 코일 구조에 내재된 문제들을 해결할 수 있다. 본 논문에서는 150kW급 무선충전 시스템을 구축하여 제안한 송수신 코일을 검증하였다.

1. 서론

최근 무선전력전송과 관련된 IEC 61980 및 SAE J2954의 표준에서 최대 11kW(WPT3)까지의 전기차 무선충전 기준이 제정되었다^{[1],[2]}. 이외에도 대형 전기차와 주행중 무선충전 상호운용성에 대한 논의도 진행 중에 있다. 급속 충전 수요가 증가함에 따라 고출력 무선 충전에 대한 연구가 진행 중이며, 표준에서도 22kW(WPT4) 이상의 용량들에 대해 논의 중에 있다. 기존의 논문과 표준에 논의된 대부분의 WPT 시스템은 주로 단상 코일을 기반으로 한다. 그러나 이러한 시스템은 중전력 및 고전력 요구 사항에는 적합하지 않다. 또한 무선충전 용량이 증가함에 따라 송신측(인프라)과 수신측(차량)의 크기, 무게, 부피 및 비용이 증가하게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위해 할당된 공간에서 더 높은 용량과 전력밀도를 제공하는 고출력 무선충전용 다상 다계층 코일 시스템이 연구되고 있다^[3]. 일부 연구에서는 코일 폭이 120도인 단극 권선을 사용하여 3상 단일 계층 코일 구조가 연구되고 있다^[4]. 또 다른 연구에서는 코일 폭이 60도인 3상 단일 계층, 코일 폭이 120도인 3상 2계층, 코일 폭이 180도인 3상 3계층이 발표되었다^[5]. 그러나 기존의 다상 다계층 코일 연구들에서는 원치 않는 상간 결합(interphase coupling)이 존재하고 있다. 부작용으로서 효율 감소는 물론 정밀한 공진 튜닝의 어려움이 있다. 이 논문에서는 새로운 3상 3계층 코일 구조를 제시한다. 정렬된 단극 권선과 양극 권선의 구조에서는 결합이 되지 않는 점을 역이용하여 상간결합이 없는 코일 구조를 설계하게 된다. 하나의 단극 권선과 2개의 직교성을 갖는 양극 권선을 통해

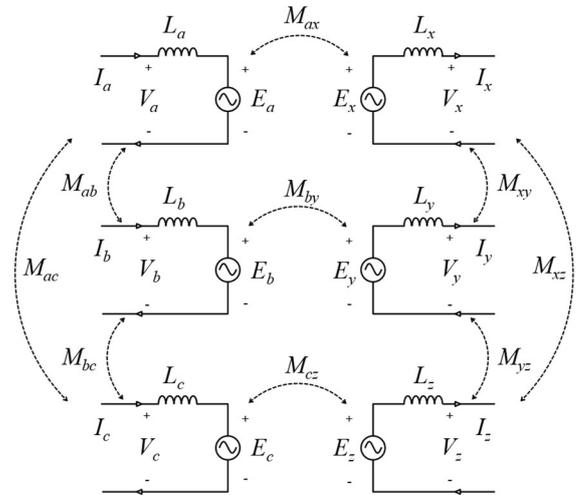


그림1 중속 전압 및 전류원으로 간략화 한 제안된 LCL-T 회로

2. 3상 3계층 코일 토폴로지

2.1절 3상 WPT 시스템의 전압 방정식

상호 결합된 3상 인덕터를 통해서 무선전력전송을 코일 구조를 설계할 수 있습니다. 3상 3계층 코일의 회로는 그림 1과 같으며, 전압 방정식은 행렬-벡터 형태를 통해 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_p \\ \mathbf{V}_s \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{L}_p + \mathbf{M}_p & \mathbf{M}_{ps} \\ \mathbf{M}_{ps}^T & \mathbf{L}_s + \mathbf{M}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_p \\ -\mathbf{I}_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 송신측 전압은 $\mathbf{V}_p = [V_a \ V_b \ V_c]^T$ 이고 전류는 $\mathbf{I}_p = [I_a \ I_b \ I_c]^T$ 이다. 수신측 전압은 $\mathbf{V}_s = [V_x \ V_y \ V_z]^T$ 전류는 $\mathbf{I}_s = [I_x \ I_y \ I_z]^T$ 이다. 자기 인덕턴스(self-inductance)의 행렬인 \mathbf{L}_p 와 \mathbf{L}_s 는 다음과 같다.

$$\mathbf{L}_p = \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 \\ 0 & L_b & 0 \\ 0 & 0 & L_c \end{bmatrix}, \mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_x & 0 & 0 \\ 0 & L_y & 0 \\ 0 & 0 & L_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

그림 1에서 좌측은 송신측 a상, b상, c상으로 나타나며, 우측의 수신측은 x상, y상, z상으로 표현된다. 설계상 대응되는 코일로는 a와 x상, b와 y상 그리고 c와 z상이다. 송신측 3상 코일들끼리 결합되는 상호 인덕턴스(mutual inductance)와 수신측 3상 코일들끼리 결합되는 원치 않는

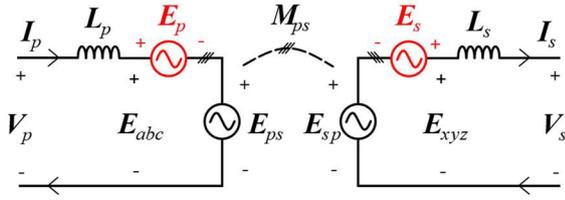


그림2 3상 커플드 코일의 등가회로

상호 인덕턴스는 다음과 같이 정리된다.

$$\mathbf{M}_p = \begin{bmatrix} 0 & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & 0 & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} 0 & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{xy} & 0 & M_{yz} \\ M_{xz} & M_{yz} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

또한 송신측과 수신측 코일들이 결합되는 상간(interphase) 인덕턴스는 다음과 같다.

$$\mathbf{M}_{ps} = \begin{bmatrix} M_{ax} & M_{ay} & M_{az} \\ M_{bx} & M_{by} & M_{bz} \\ M_{cx} & M_{cy} & M_{cz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

수식(5)의 행렬에서는 상호 인덕턴스의 대각성분이 주된 결합 성분이며, 이를 제외한 나머지를 비대각성분이라 한다. 무선충전을 위한 자기적 결합은 수식(5)에 의해 이뤄진다. 하지만 전력전달에 기여하지 못하는 수식(3)과 수식(4)의 상간 결합 성분은 3상 3계층 코일 구조의 문제점이 된다. 또한 일반적으로 보상회로를 설계 시에 수식(2)에 해당하는 자기 인덕턴스에 공진을 튜닝하게 되는데, 상간 인덕턴스는 완벽한 공진 설계의 정확도를 낮추는 요소가 된다.

수식(1)을 자기 인덕턴스의 성분과 유도전압 성분으로 분할하면 다음과 같이 재정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_p \\ \mathbf{V}_s \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{L}_p & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_p \\ -\mathbf{I}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{abc} \\ \mathbf{E}_{xyz} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 송신측 유도전압은 $\mathbf{E}_{abc}=[E_a \ E_b \ E_c]^T$ 이고 수신측 유도전압은 $\mathbf{E}_{xyz}=[E_x \ E_y \ E_z]^T$ 이다. 이를 상간결합과 송수신 간의 상호결합 성분으로 나누면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{abc} \\ \mathbf{E}_{xyz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_p \\ \mathbf{E}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{ps} \\ \mathbf{E}_{sp} \end{bmatrix} \quad (7)$$

수식(7)에서 송신 코일 간의 결합에 의한 유도전압(\mathbf{E}_p)과 수신 코일 간의 결합에 의한 유도전압(\mathbf{E}_s)은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_p \\ \mathbf{E}_s \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{M}_p & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_p \\ -\mathbf{I}_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

수식(8)의 전압은 실제로 전력전달에 기여하지 못하는 성분으로서 효율을 감소시키는 요소가 된다. 수식(7)에서 전력전달에 기여하는 성분은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{ps} \\ \mathbf{E}_{sp} \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{M}_{ps} \\ \mathbf{M}_{ps}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_p \\ -\mathbf{I}_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

패러데이 법칙에 따라 송신측 전류가 수신측에 유도시킨 전압은 \mathbf{E}_{sp} 이며, 수신측 전류가 송신측에 유도한 전압은 \mathbf{E}_{ps} 이다. 그림 2는 앞서 전개한 식들을 등가회로를 통해

직관적으로 보여준다. 그림 2에서 보여지는 바와 같이 수식(8)을 제거하도록 설계하는 것이 중요한 점을 확인할 수 있으며, 수식(6)을 통해서 상간 결합이 제거될수록 자기 인덕턴스와의 공진 튜닝이 원활해짐을 알 수 있다.

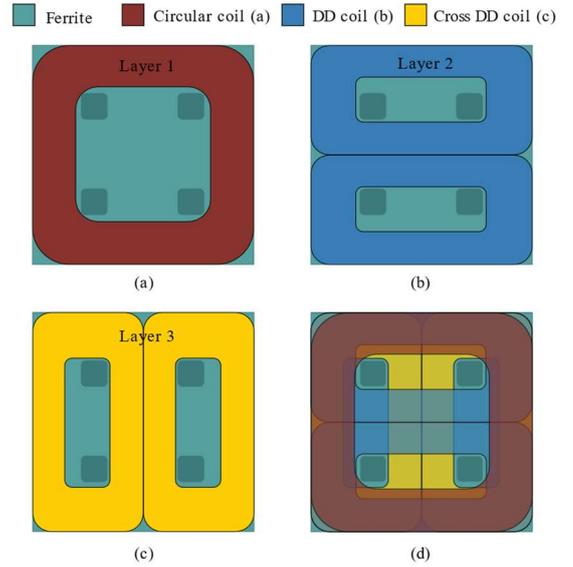


그림3 3상 3계층 토폴로지 (a) 원형코일 (b) DD 코일 (c) 크로스 DD 코일 (d) 3상 3계층 코일

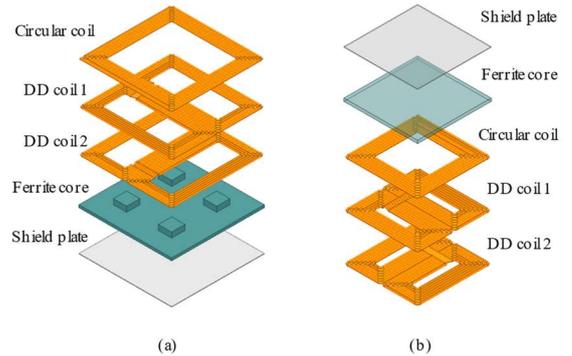


그림4 제안된 3상 3계층 코일 (a) 송신측 코일 구조 (b) 수신측 코일 구조

1.2절 단극권선과 양극권선을 이용한 3상 3계층 구조

단극 권선의 대표적인 예시로서 원형코일을 그리고 양극 권선의 대표적인 예시로서 DD코일을 들 수 있다. 같은 크기의 두 코일은 정렬된 상태에서 서로 결합되지 않다. 또한 양극 권선을 90도 회전하여 공간 상에 배치하면 직교성으로 인해 자기장이 상쇄되어 서로 결합이 되지 않는다. 이러한 점을 이용하여 3개의 상을 배치하게 되면 서로 원치 않는 결합이 제거된 코일 구조를 설계할 수 있다. 그림 3은 제안한 코일 구조를 보여주며 차폐판, 페라이트, 크로스 DD코일, DD코일, 원형코일 순으로 배치된다. 송신과 수신 패드의 구체적인 구성은 그림 4에서 자세히 보여진다. 따라서 제안하는 3상 3계층 코일 구조에서는 수식(1)에서 상간 결합 성분이 제거되어 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_p \\ \mathbf{V}_s \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{L}_p & \mathbf{M}_{ps} \\ \mathbf{M}_{ps}^T & \mathbf{L}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_p \\ -\mathbf{I}_s \end{bmatrix} \quad (10)$$

그림 4와 같이 3상 3계층 코일의 개방 및 단락 시험을 통해 LCR 미터로 측정된 결과는 표 1과 같다.

표 1 $\Delta x=0\text{mm}$, $\Delta y=0\text{mm}$, $z=170\text{mm}$ 에서의 인덕턴스 행렬.

		Tx			Rx		
		a	b	c	x	y	z
Tx	a	70.95	-0.08	-0.19	9.91	0.02	0.00
	b	-0.08	97.05	-0.35	-0.08	10.19	-0.05
	c	-0.19	-0.35	108.16	-0.04	-0.04	10.45
Rx	x	9.91	-0.08	-0.04	41.31	0.04	0.00
	y	0.02	10.19	-0.04	0.04	42.09	-0.09
	z	0.00	-0.05	10.45	0.00	-0.09	38.96

표 1은 정렬 조건에서의 인덕턴스 행렬을 보여준다. 여기서 x편차는 차량 진입방향을 말하고 y편차는 좌우편차를 의미하며 z방향은 지면으로부터의 수신코일의 공극거리를 말한다. 앞서 설명한 바와 같이 제안한 코일 구조에서는 수식 (3)과 수식 (4)에 해당하는 상간 결합 성분이 없으며 표 1에 붉은색으로 표시된 숫자를 통해 검증할 수 있다.

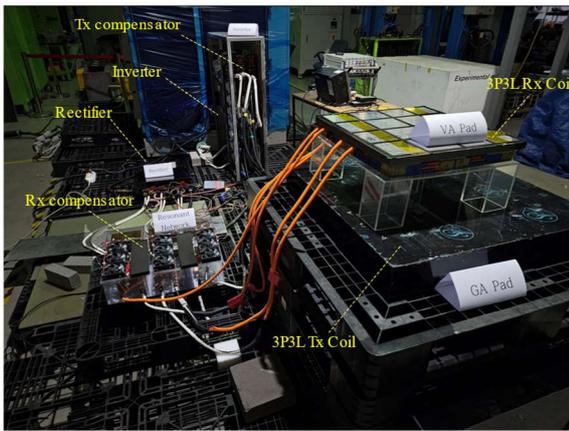
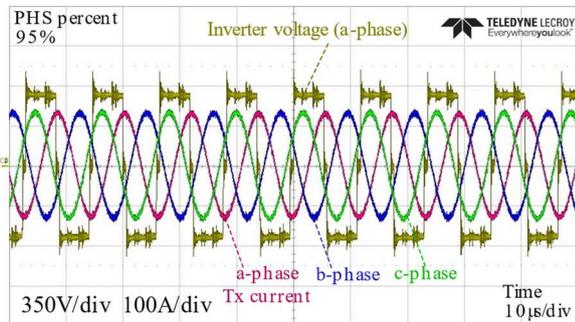
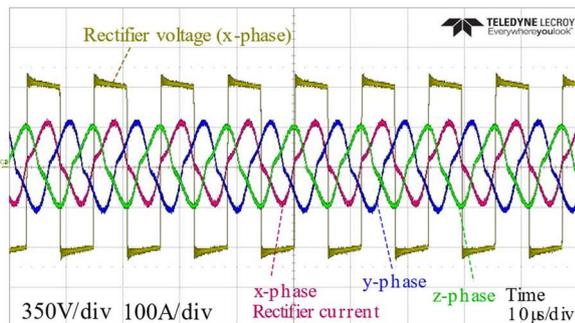


그림5 150kW 무선충전 실험 환경



(a)



(b)

그림6 제안한 3상 3계층 코일의 급전 및 집전 실험 파형 (a) 인버터 전압 및 급전 3상 전류 (b) 3상 정류기 입력 전압 및 전류

1.3절 150kW 테스트베드 구축 및 실험 결과

실험의 환경구성은 그림 5와 같다. 3상 풀브릿지 인버터와 위상천이 기법을 통해 85kHz의 전압을 공급한다. 공진 보상 회로에 해당하는 송신측 매칭회로를 거쳐서 3상 송신코일로 연결된다. 170mm 공극을 유지하는 기구물 위에 3상 집전 장치가 배치되며 수신측 매칭회로와 3상 정류기를 거쳐서 부하 저항으로 전력이 전달된다. 계통 측정은 HIOKI PW6001을 통해 측정하였고, DC 출력은 HIOKI CM4376을 통해 측정하였다. 표 2에 정리된 바와 같이 입력 기준 150kW를 인가했을 때 출력은 약 138.8kW이며, 그때의 효율은 약 92.29%로 높은 시스템 효율(AC to DC)을 보여준다. 그림 6은 전압과 전류 파형을 보여주며 그림 6(a)는 인버터 전압과 송신 코일로 들어가는 3상 전류를 보여준다. 오실로스코프 채널 수의 한계로 전압은 a상만을 측정하였고, a상 송신 코일 전류와 90도의 위상차 확인된다. 이를 통해 송신측 공진 튜닝이 잘 되었음을 확인할 수 있다. 그림 6(b)에서는 x상 정류기 입력 전압과 3상 전류를 보여준다.

표 2 입력 기준 150kW 인가 시의 효율 측정.

Pin (kW)	Pout (kW)	Vo (V)	Io (A)	η (%)
150.51	138.9	712.04	195.08	92.29

3. 결론

본 연구에서는 다상 다계층 코일 구조에서 문제가 되고 있는 코일 간의 상간 결합을 해결하고자 하였다. 이론적으로 상간 결합이 효율과 공진 튜닝에 미치는 영향을 분석해냈고, 새로운 형태의 3상 3계층 코일 구조를 제시함으로써 문제점을 해결하였다. 실제 송신과 수신 코일을 설계한 뒤, 제작하여 실측 데이터 상에서 상간 결합이 거의 존재하지 않는 것을 확인하였고, 파형 분석을 통해 공진 튜닝이 원활이 되었음을 검증하였다. 150kW 전력을 공급한 상태에서 효율을 측정하여 92.29%의 높은 수치를 달성하였고, 고출력 3상 3계층 무선 충전 시스템의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국산업기술진흥협회(KOITA)의 지원을 받아 수행된 연구임 (KOITA-RND3-2-2022-03, 3상 다계층 무선충전 급집전 패드 시스템 개발)

참고 문헌

- [1] Wireless Charging of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles, Society of Automotive Engineers. Accessed: Sep. 20, 2016. [Online]. Available: <http://standards.sae.org/wip/j2954/>
- [2] Electric Vehicle Wireless Power Transfer (WPT) Systems —Part1: General Requirements, document IEC 61980 - 1, 2020. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/31657>
- [3] J. Pries, V. P. N. Galigekere, O. C. Onar and G. -J. Su, "A 50-kW Three-Phase Wireless Power Transfer System Using Bipolar Windings and Series Resonant Networks for Rotating Magnetic Fields," in IEEE Transactions on Power Electronics
- [4] Hirokazu Matsumoto, Yasuhiko Neba, Hideyasu Iura, Daisuke Tsutsumi, Kouichi Ishizaka, and Ryoza Itoh, "Trifoliate Three-Phase Contactless Power Transformer in Case of Winding-Alignment," in IEEE Transactions on Industrial Electronics
- [5] S. Chowdhury, M. T. B. Tarek, M. E. Haque and Y. Sozer, "A Three-Phase Overlapping Winding-Based Wireless Charging System for Transportation Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics