

DS-LCCL 토폴로지 재구성을 통한 무선 충전 패드 스트레스 측정 방법

조승진, 리광야오, 사준신, 김동희†
 전남대학교 전기공학과

Methodology for Measurement of Wireless Charging Pad Stress with DS-LCCL Topology Reconfiguration

Seungjin Jo, Guangyao Li, Junchen Xi, and Dong-Hee Kim†
 Department of Electrical Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT

본 논문은 무선 충전 패드에서 실제 동작 시 발생하는 손실을 측정하기 위해 DS-LCCL 토폴로지로 재구성하여 손실 측정 및 비교한다. 무선충전시스템의 출력 특성은 입력 전압, 주파수, 패드의 전기적 특성 등에 의해 결정된다. 실제 동작 검증을 위해 전압 특성을 충족하는 전원 및 부하가 있어야 하나, 제한된 실험실 환경에서 입·출력 특성을 만족하는 정격 동작이 어려울 수 있다. 기본 보상 토폴로지로 구성된 무선충전시스템의 입·출력 특성을 분석 후, DS-LCCL 토폴로지로 재구성하여 입출력 전압 특성을 유연하게 설정하면서 동일한 패드 스트레스를 인가하는 방식을 제안한다. 제안하는 방법의 타당성은 3.3kW급 무선전력전송 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증한다.

1. 서론

자기 유도 방식 무선 전력 전송(Inductive Power Transfer, IPT)은 편리한 충전 인터페이스와 유선 케이블 노후화에 의한 분진 발생, 누설 전류 문제를 해결할 수 있다는 장점으로 다양한 산업 분야에서 적용되고 있다.^[1] IPT 컨버터는 인버터, 공진 네트워크와 무선 충전 패드, 정류기 및 DC/DC 컨버터 등으로 구성되어 있으며, 송신부에서 수신부 무선충전 코일에 자기 에너지를 전송하기 위해 높은 전류가 흐른다. 따라서 무선충전시스템을 제작 후, 실제 정격 동작 테스트를 통하여 무선 충전 패드의 발열, 절연 문제 등을 확인 및 검증이 필요하다.

그러나, IPT 시스템 제작 후 실험 과정에서, 실험실 환경에 따라 전원 공급 장치 및 부하의 성능 한계로 정격 동작 시 입·출력 전압 조건 특성을 충족하지 못하는 경우가 발생한다. 정격 동작 확인을 위해 DC/DC 컨버터를 추가할 수 있으나, 시간과 비용 소모가 발생한다.

본 논문은 다양한 무선충전시스템을 구성하는 공진 네트워크를 DS-LCCL 토폴로지로 재구성하여, 입출력 전압 특성을 유연하게 설계하면서 무선 충전 패드에 동일한 전류를 인가하는 방법을 제안한다. 공진 네트워크에 의한 입출력 수식을 분석 후, 시뮬레이션과 3.3kW급 무선충전시스템을 구성하여 검증한다.

2. 공진 네트워크 분석 및 재설계

2.1 IPT 컨버터 기본 분석

그림 1은 IPT 컨버터 구성도이다. 공진 네트워크를 통해 고,

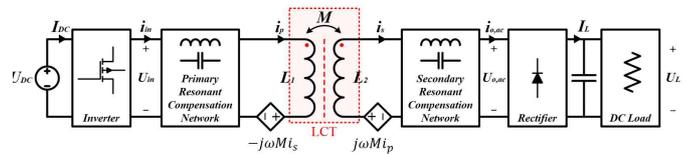


그림 1 IPT 컨버터
 Fig. 1 IPT Converter

표 1 IPT 기본 보상 네트워크 식

Table 1 IPT Basic compensation network equations

	S-S	S-P
회로도		
C_2		$\frac{1}{\omega_r L_2}$
C_1	$\frac{L_2 C_2}{L_1}$	$\frac{L_2^2 C_2}{(L_1 L_2 - M^2)}$
$\frac{U_{o,ac}}{U_{in}}$	$\frac{R_{o,ac}}{\omega_r M}$	$\frac{L_2}{M}$
	P-S	P-P
회로도		
C_2		$\frac{1}{\omega_r L_2}$
C_1	$\frac{L_1}{\left(\frac{\omega_r^2 M^2}{R_{o,ac}^2}\right)^2 + (\omega_r L_1)^2}$	$\frac{(L_1 L_2 - M^2) L_2^2 C_2}{(L_1 L_2 - M^2)^2 + \frac{M^4 R_{o,ac}^2 C_2}{L_2}}$
$\frac{U_{o,ac}}{U_{in}}$	$\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{L_1}{M}\right)^2 + \left(\frac{\omega_r M}{R_{o,ac}}\right)^2}}$	$\frac{M R_{o,ac} C_1}{L_2} \sqrt{\left(\frac{M^2 R_{o,ac}}{(L_1 L_2 - M^2)}\right)^2 + \omega_r^2}$

조파 성분을 필터링한다고 가정해 인버터에서 나오는 구형파와 전브릿지 다이오드를 기본과 동작 주파수로 교류 모델링한다.

IPT 시스템은 무선 충전 패드에 흐르는 시변 전류에 의해 발생하는 자속선을 수신부로 쇄교시켜 시변 전류로 변환하는 방식이다. 이때, 코일이 갖는 인덕턴스 성분에 의해 순환전류 증가를 해결하기 위해 공진 네트워크를 추가한다. 공진 네트워크는 공진 커패시터를 직렬 또는 병렬로 연결하여 보상하는 기본 공진 네트워크와, 공진 인덕터 등을 추가하여 보상하는 고차 공진 네트워크가 있다.^[2] 본 논문에서는 기본적인 공진 네트워크의 전기적 특성을 분석 후, DS-LCCL 토폴로지로 재구성한다.

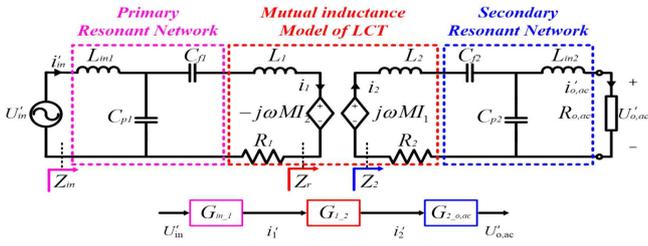


그림 2 DS-LCCL 토폴로지
Fig. 2 DS-LCCL Topology

2.1.1. 기본 공진 네트워크 분석

무선충전시스템을 구성하는 기본적인 공진 네트워크는 series-series(S-S), series-parallel(S-P), parallel-series(P-S), parallel-parallel(P-P)가 있다. 표 1은 기본 공진 네트워크를 구성하는 수식이다. 표 1의 수식들을 통해, 무선충전시스템의 입·출력 전압이득이 무선 충전 패드의 자기 및 상호 인덕턴스, 동작 주파수에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 따라서 기본 보상 네트워크로 구성된 무선충전시스템의 정격 동작 시, 입·출력 사양 조건을 수용할 전원 공급장치와 DC 부하 저항이 필요하며, 실험실 환경에 따라 적절한 장비가 구축되지 않았을 경우 정격 특성 테스트에 어려움이 발생할 수 있다.

2.1.2 DS-LCCL 토폴로지 수식 분석

기본 보상 네트워크로 구성된 무선충전시스템이 정격 동작 시, 무선 충전 패드에 인가되는 스트레스를 유연하게 측정하기 위해서 DS-LCCL 토폴로지 재구성을 고려할 수 있다. DS-LCCL 토폴로지는 송·수신부 모두 추가 인덕터 1개 (L_{in1}, L_{in2})와 공진 커패시터 2개($C_{p1}, C_{p2}, C_{f1}, C_{f2}$)를 직·병렬 연결해서 리액턴스 성분을 보상하는 토폴로지이며 구성도는 그림 2와 같다. 식 (1)은 DS-LCCL의 공진 조건이다. 공진 조건 계산 시, 무선 충전 패드에 존재하는 기생 저항(R_1, R_2)은 무시한다. 식 (2)~(5)는 DS-LCCL 토폴로지로 재구성된 IPT 시스템의 입력 전압(U'_{in}), 출력 전압($U'_{o,ac}$), 무선 충전 패드에 흐르는 전류(i_1, i_2) 방정식이다.

$$\begin{cases} j\omega_r L_{in,i} + \frac{1}{j\omega_r C_{pi}} = 0 \\ \frac{1}{j\omega_r C_{pi}} + \frac{1}{j\omega_r C_{fi} + j\omega_r L_i} = 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

$$i_1 = \frac{U'_{in}}{j\omega_r L_{in1}} \quad (2)$$

$$i_2 = \frac{M U'_{in} C_s R_{o,ac}}{L_{in1} L_{in2}} \quad (3)$$

$$U'_{in} = \frac{U'_{in} C_s R_{o,ac}^2}{L_{in1}^2 L_{in2}} \quad (4)$$

$$U'_{o,ac} = \frac{M U'_{in} R_{o,ac}}{\omega_r L_{in1} L_{in2}} \quad (5)$$

식 (2)~(5)를 통해, DS-LCCL 토폴로지 재구성하여 기존 무선충전시스템 정격 동작 시 요구되는 입출력 전압 특성을 유연하게 설계하면서 무선 충전 패드에 동일한 전류 스트레스를 인가할 수 있음을 확인한다.

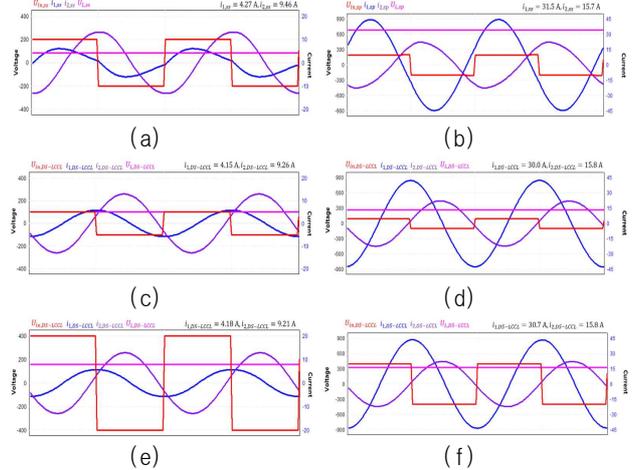


그림 3 PSIM 시뮬레이션 결과 (a) S-S (b) S-P (c) DS-LCCL ($U_{in} = 100V$, S-S 재구성) (d) DS-LCCL ($U_{in} = 100V$, S-P 재구성) (e) DS-LCCL ($U_{in} = 400V$, S-S 재구성) (f) DS-LCCL ($U_{in} = 400V$, S-P 재구성)
Fig. 3 PSIM Simulation results a) S-S (b) S-P (c) DS-LCCL ($U_{in} = 100V$, S-S reconfiguration) (d) DS-LCCL ($U_{in} = 100V$, S-P reconfiguration) (e) DS-LCCL ($U_{in} = 400V$, S-S reconfiguration) (f) DS-LCCL ($U_{in} = 400V$, S-P reconfiguration)

2.2 Simulation 검증

제안하는 DS-LCCL 토폴로지 재구성 방식의 타당성을 검증하기 위해 기본 공진 네트워크 중 S-S와 S-P 토폴로지와 재구성된 DS-LCCL 공진 네트워크를 비교한다. 그림 3은 기본 보상 네트워크 중 각각 S-S, S-P 토폴로지로 구성된 임의의 IPT 시스템과, DS-LCCL 토폴로지로 재구성하여 시뮬레이션을 진행한 결과이다.

무선 충전 패드는 송수신부 인덕턴스 $100[\mu H]$, 결합 계수 $k=0.3$, 동작 주파수 $100[kHz]$, 입력전압 $U_{in} = 200[V]$ 로 동작한다. 각 토폴로지의 공진 소자값은 표 1과 식 (1)~(5)를 토대로 도출했다. DS-LCCL 토폴로지는 무선 충전 패드에 흐르는 전류를 동일하게 가져가면서 입력 전압을 $100[V]$, 또는 $400[V]$ 로 유연하게 동작하도록 공진 네트워크를 설계했다. 시뮬레이션 결과, 공진 네트워크 재구성을 통해 입력 특성을 유연하게 설계하면서 기존 공진 네트워크에서 정격 동작 시 발생하는 무선 충전 패드 손실을 알 수 있다.

2.3 비정렬 상태 고려사항

무선충전시스템은 무선 충전 패드의 이격거리 변동에 따라 결합 계수와 무선 충전 패드 인덕턴스가 변동한다. 따라서, 비정렬 상태가 되면 무선충전시스템의 구조에 따라 DC 링크 전압, 인버터 동작 주파수, 시비율 등을 제어한다. 비정렬 상태 시 감소되는 특성을 보상할 경우, 동일한 정격 전력 테스트를 해도 무선 충전 패드에 흐르는 전류 스트레스가 달라진다. 따라서, DS-LCCL 토폴로지 재구성 시 기존 토폴로지의 비정렬 동작 시 주파수, 전류 스트레스를 확인한 후, 식 (1)~(5)를 토대로 공진 소자를 재설계해야한다. 본 논문에서는 수직 이격거리가 변동된 경우를 예시로 실험 진행 후 DS-LCCL 토폴로지 공진 소자를 재구성한다.

표 3 IPT 컨버터 시스템 변수

Table 3. IPT Converter system parameters

Coil design	Parameter	Value [Unit]
무선충전 코일	동작 주파수 (f_s)	100 [kHz]
	수직 이격거리	100~150 [mm]
	결합 계수 (k) 범위	0.136~0.224
	L_1	222.5 [μH]
	L_2	160.2 [μH]
S-S Topology	C_1	11.4 [nF]
	C_2	15.7 [nF]
DS-LCCL Topology	Parameter	Value (align / misalign)
	$L_{i n 1}$	23.9 [μH] / 15.3 [μH]
	$L_{i n 2}$	15.1 [μH] / 15.0 [μH]
	$C_{p 1}$	168.7 [nF] / 165.3 [nF]
	$C_{p 2}$	105.4 [nF] / 176.1 [nF]
	$C_{f 1}$	12.9 [nF] / 12.3 [nF]
	$C_{f 2}$	17.6 [nF] / 18.4 [nF]

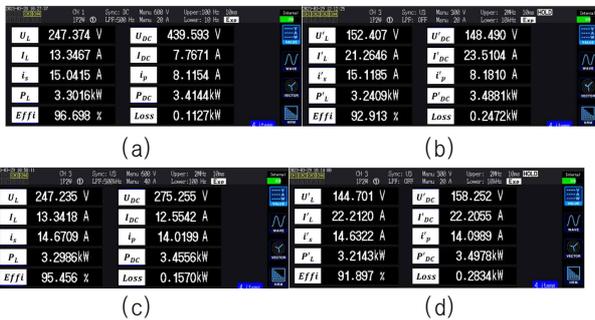


그림 4. 실험 결과 (a) 정렬 상태($z=100mm$) S-S topology 와 (b) 정렬 상태($z=100mm$) DS-LCCL topology (c) 비정렬 상태($z=150mm$) S-S topology (d) 비정렬 상태 ($z=150mm$) DS-LCCL topology
Fig. 4. Experimental result with (a) align state ($z=100mm$) S-S topology (b) align state($z=100mm$) DS-LCCL topology (c) misalign state($z=150mm$) S-S topology (d) misalign state($z=150mm$) DS-LCCL topology

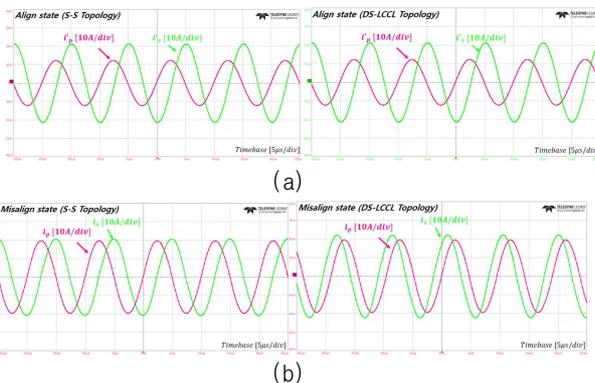


그림 5. 실험 결과 파형 (a) 정렬 상태 (b) 비정렬 상태
Fig. 5. Experimental result waveform with (a) align state (b) misalign state

2.4 실험 결과

제한하는 DS-LCCL 토폴로지 재구성 방식의 타당성을 검증 하기 위해 3.3kW급 설계했다. 검증하는 공진 네트워크는 S-S

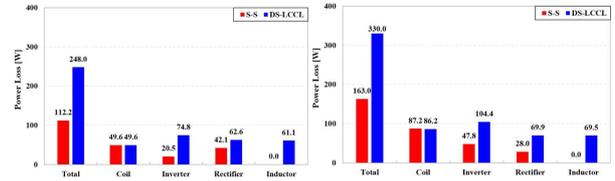


그림 6. IPT 컨버터 손실 값 (a) 정렬 (b) 비정렬
Fig. 6. IPT Converter loss distributions (a) align (b) misalign

토폴로지로 선정했으며, IPT 시스템을 구성하는 사양은 표 3과 같다. S-S 토폴로지는 비정렬 상태일 경우, DC Link 전압 제어를 통해 출력 특성을 달성한다. DS-LCCL 토폴로지 재구성을 통해 입·출력 전압을 200 V 미만으로 설계 진행했다. 그림 4는 S-S 토폴로지와 식 (2)~(5)을 기반으로 재구성된 DS-LCCL 토폴로지가 포함된 IPT 시스템이 각각 정렬 상태와 비정렬 상태에서 정격 동작 시 전력분석기로 측정한 실험 결과이다. 무선 충전 패드에 흐르는 전류가 유사하면서 DS-LCCL 토폴로지로 재구성했을 시, 입출력 전압이 200V 미만으로 동작하는 것을 확인했으며, 비정렬 상태에서도 무선 충전 패드에 유사한 전류가 흐르는 것을 확인했다. 그림 5는 3.3kW 정격에서 동작 시, 각각 S-S 토폴로지와 DS-LCCL 토폴로지로 구성된 무선 충전 패드에서 흐르는 전류 파형이다.

그림 6은 IPT 시스템에서 발생하는 손실 분석 결과이다. 손실 계산을 통해 S-S 토폴로지와 재구성한 DS-LCCL 토폴로지의 무선 충전 패드 손실은 거의 동일하며, 입출력 특성에 의한 인버터, 정류기 손실, 공진 인덕터 추가에 의한 손실 발생으로 IPT 시스템 효율 차이가 있음을 확인했다.

3. 결론

본 논문은 무선전력전송 시스템을 구성하는 무선 충전 패드를 테스트할 때, 토폴로지 재구성을 통하여 실험실 장비 성능의 한계로 측정이 어려운 무선전력전송 시스템을 테스트를 가능하게 하는 방법을 제안했다. 제안하는 토폴로지 재구성 방식은 논문에서 검증한 공진 네트워크 뿐만 아니라 다양한 공진 네트워크 외에도 적용이 가능하며, 저전압 또는 저전류를 인가하면서 동일한 스트레스를 무선 충전 패드에 인가할 수 있다. 3.3kW급 무선충전시스템을 구성 후 실험을 통해 제안하는 방법의 타당성을 검증했다.

본 연구는 2023년도 한국산업기술평가관리원의 자동차산업기술개발사업의 지원에 의한 연구임 [20018829]

참고 문헌

[1] G. A. Covic and J. T. Boys, "Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 1, no. 1, pp. 28-41, Mar. 2013.
[2] V. Shevchenko, O. Husev, R. Strzelecki, B. Pakhaliuk, N. Poliakov and N. Strzelecka, "Compensation topologies in IPT systems: standards, requirements, classification, analysis, comparison and application," IEEE Access, vol. 7, pp. 120559-120580, Aug. 2019.