

# 전기자동차용 양방향 무선전력전송을 위한 공진 네트워크 분석

조다정, 손원진, 이재한, 안상준, 변종은, 이병국<sup>†</sup>  
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Analysis of Resonant Network for Bidirectional Wireless Power Transfer System in EV Applications

Dajung Cho, Won-Jin Son, Jae Han Lee, Sangjoon Ann, Jongeun Byun, and Byoung Kuk Lee<sup>†</sup>  
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문은 전기자동차용 inductive power transfer (IPT) 방식의 양방향 무선전력전송에 활용 가능한 공진 네트워크를 선정한다. 각 공진 네트워크별 수식 분석을 통해 패드의 인덕턴스를 설계하고, 공진 네트워크 종류에 따라 달라지는 출력 특성을 분석한다. 분석 결과를 바탕으로 IPT 방식의 양방향 무선전력전송을 위한 공진 네트워크를 선정하고 시뮬레이션을 통하여 선정된 네트워크의 적합성을 검증한다.

### 1. 서론

전기자동차의 사용량이 점차 증가함에 따라 전기에너지를 효율적으로 사용하기 위한 vehicle to grid (V2G) 기술의 중요도가 높아지고 있다. 이에 따라 전기자동차용 on board charger (OBC)의 V2G 동작을 위한 양방향 전력전송 기술 연구가 활발히 진행되고 있는 반면에, 전기자동차용 양방향 무선전력전송 기술에 대한 연구는 OBC에 비해 미흡하다. 그 이유는 첫째로 넓은 부하 범위로 인해 모든 조건을 만족하는 시스템 설계가 어렵다. OBC와 달리 부하에 따라 공진 네트워크의 전압 이득 및 위상 곡선이 크게 달라지기 때문이다. 둘째로 송수신 패드의 크기가 고정되어 있고 서로 크기가 달라 인덕턴스 설계가 제한적이다. 이러한 문제들로 인해 전기자동차용 양방향 무선전력전송 기술 개발이 어렵다.

따라서 본 논문에서는 다양한 공진 네트워크 중 전기자동차용 양방향 무선전력전송에 적합한 공진 네트워크를 제안한다. 전기자동차용 양방향 무선전력전송을 위한 공진 네트워크를 제안하기 위해 다양한 공진 네트워크를 시스템 사양에 따라 설계하고, 실제 패드를 고려한 인덕턴스 허용 범위, 전압 및 전류 정격, 임피던스 위상 등을 비교 분석한다. 비교 분석한 결과를 바탕으로 양방향 무선전력전송에 적합한 공진 네트워크를 선정하고, 시뮬레이션을 통해 이를 검증한다.

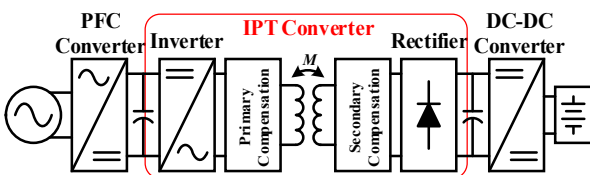


그림 1 IPT 시스템 구성  
 Fig. 1 Configuration of IPT system.

표 1 시스템 설계 조건

Table 1 Design conditions of system

Parameter	$f$ [kHz]	$k$	$V_{DC}$ [V]	$P_o$ [kW]	$V_o$ [V]
Charge	85	0.083	380	3.3	330
Discharge	85	0.083	330	3.3	-

표 2 공진 네트워크 별 패드 인덕턴스 설계

Table 2 Design of pad inductance according to resonant networks

Sec / Pri	S	LCL	LCCL
S	$L_p$ : 1357.5 [ $\mu$ H] $L_s$ : 355.6 [ $\mu$ H]	$L_p$ : 14548.3 [ $\mu$ H] $L_s$ : 75.5 [ $\mu$ H]	$L_p$ : 737.3 [ $\mu$ H] $L_s$ : 355.6 [ $\mu$ H]
LCL	$L_p$ : 26.7 [ $\mu$ H] $L_s$ : 2922.9 [ $\mu$ H]	$L_p$ : 26.7 [ $\mu$ H] $L_s$ : 0.6 [ $\mu$ H]	$L_p$ : 200 [ $\mu$ H] $L_s$ : 80.1 [ $\mu$ H]
LCCL	$L_p$ : 270 [ $\mu$ H] $L_s$ : 160 [ $\mu$ H]	$L_p$ : 270 [ $\mu$ H] $L_s$ : 160 [ $\mu$ H]	$L_p$ : 270 [ $\mu$ H] $L_s$ : 160 [ $\mu$ H]

## 2. 양방향 무선전력전송 공진 네트워크 분석

### 2.1 시스템 사양

그림 1은 power factor correction (PFC) 컨버터, inductive power transfer (IPT) 컨버터, DC-DC 컨버터로 구성된 3-stage IPT 시스템을 나타낸다. 그 중 무선전력전송을 위한 IPT 컨버터는 공진 네트워크의 구조에 따라 각기 다른 출력 특성을 갖는다. 따라서 본 논문은 양방향 무선전력전송을 위한 IPT 컨버터의 공진 네트워크별 특성을 비교하며, 이를 위한 시스템 설계 조건은 표 1과 같다. 각 공진 네트워크는 최소 결합계수 조건에서 송·수신측 공진주파수를 85 [kHz]로 동일하게 설계한다.<sup>[1]</sup>

### 2.2 공진 네트워크별 파라미터 설계

무선전력전송에 적용되는 공진 네트워크는 직렬 및 병렬 등 그 종류가 다양하다. 하지만 전류원을 이용하는 병렬 공진 네트워크는 전류원 생성을 위해 큰 인덕터가 추가되어 시스템

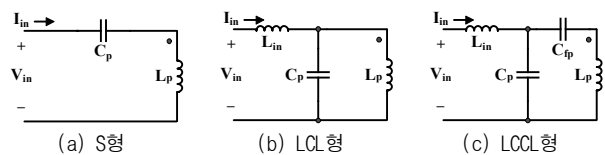


그림 2 공진 네트워크별 송신부 공진 회로  
 Fig. 2 Primary resonant circuit by resonant network.

전력 밀도에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 고려 대상에서 제외하였으며, 적합한 공진 네트워크 선정을 위해 분석한 공진 네트워크의 종류는 그림 2에 나타내었다. 표 2는 각 공진 네트워크를 표 1의 시스템 사양을 고려하여 설계한 송수신 패드의 인덕턴스를 나타낸다.

표 2에서 알 수 있듯이 S-LCL, LCL-S, LCL-LCL의 경우, 송신 패드 인덕턴스  $L_p$  또는 수신 패드 인덕턴스  $L_s$  가 굉장히 크거나 작은 값으로 설계되었다. 그 이유를 분석하기 위해 각 토폴로지의  $L_p, L_s$  관계식을 (1) - (3)에 나타내었다.

$$L_p = \frac{8L_s V_{dc}^2}{\pi^2 k^2 P_o R_{ac}} \quad (1)$$

$$L_p = \frac{8k^2 L_s V_{dc}^2}{\pi^2 P_o R_{ac}} \quad (2)$$

$$L_p = \frac{8k^2 R_{ac} V_{dc}^2}{\pi^2 \omega_o^2 L_s P_o} \quad (3)$$

이 때  $k$ 는 결합계수,  $R_{ac}$ 는 출력 등가 저항이다. 위 식에서  $L_p$ 와  $L_s$ 는 비례 또는 반비례 관계에 있기 때문에 값을 변경하기 위해서는 시스템 사양이 변경되어야 한다. 따라서 현재 시스템 사양에서는 위 세 가지 공진 네트워크는 구현이 어려워 이를 제외하고, 나머지 공진 네트워크에 대하여 분석을 진행한다.

### 2.3 전압 및 전류 정격 검증

공진 네트워크에 따른 각 소자의 전압 및 전류 정격을 검증하기 위해 설계 조건과 2.2절의  $L_p, L_s$ 를 적용한 시뮬레이션을 실시하였다. 실제 패드의 안정적인 동작 및 절연 거리 등의 확보를 위하여 최대 전압은 10 [kV], 최대 전류는 50 [A]를 기준으로 공진 네트워크를 선정하였다. 표 3은 각 공진 네트워크에서 소자에 걸리는 최대 전압 및 전류를 나타내는데, S-S, LCL-LCCL, LCCL-LCL은 앞서 선정한 전압 또는 전류 기준을 초과하였기 때문에 이후의 추가적인 분석에서 제외시킨다.

### 2.4 임피던스 특성 분석

S-LCCL, LCCL-S, LCCL-LCCL의 bifurcation 발생 여부를 확인하기 위하여 주파수에 따른 임피던스의 특성을 분석하였다. 각 공진 네트워크별 충전 및 방전 시 주파수에 따른 임피던스의 위상 변화는 그림 3과 같이 나타난다. S-LCCL은 그림 3 (a)와 같이 충전 시 부하가 3.3 [kW]일 때 bifurcation이 발생하며, LCCL-LCCL은 그림 3(e)와 같이 충전 시 부하가 400 [W]일 때 bifurcation이 발생한다. 반면에 LCCL-S는 그림 3(c), (d)와 같이 충전 시와 방전 시 모두 bifurcation이 발생하지 않는다. 따라서 공진곡선 분석 결과를 기반으로 양방향 무

표 3 공진 네트워크별 소자의 전압 및 전류 최대값  
Table 3 Voltage and current maximum value of device by resonant network

Sec	S	LCL	LCCL
Pri			
S	$V_{Lp}$ : 10.3 [kV]	$V_{Lp}$ : 107.3 [kV]	$V_{Lp}$ : 6.1 [kV]
	$I_{Ls}$ : 15.7 [A]	$I_{Cs}$ : 21.6 [A]	$I_{Cs}$ : 32.4 [A]
LCL	$V_{Ls}$ : 24.8 [kV]	$V_{Lp}$ : 589.3 [V]	$V_{Ls}$ : 12.1 [kV]
	$I_{Lp}$ : 45.8 [A]	$I_{Cs}$ : 1187.3 [A]	$I_{Cs}$ : 281.6 [A]
LCCL	$V_{Lp}$ : 6.6 [kV]	$V_{Lp}$ : 21.1 [kV]	$V_{Lp}$ : 6.6 [kV]
	$I_{Cp}$ : 48.1 [A]	$I_{Cp}$ : 149.0 [A]	$I_{Cp}$ : 50.8 [A]

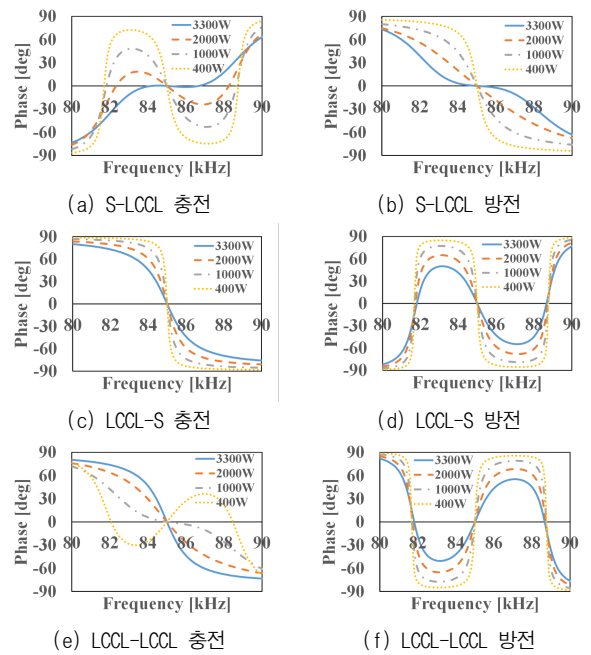


그림 3 공진 네트워크별 충/방전 시 임피던스 위상 변화  
Fig. 3 Phase change of impedance when charging and discharging by resonant network.

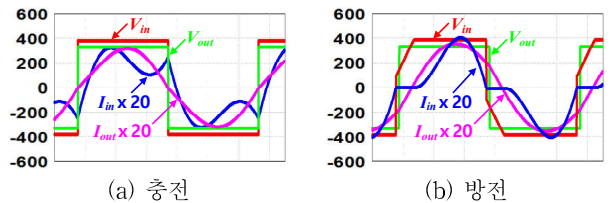


그림 4 LCCL-S 공진 네트워크의 시뮬레이션 결과  
Fig. 4 Simulation results of LCCL-S resonant network.

선전력전송에 적합한 공진 네트워크를 LCCL-S로 선정한다.

### 2.5 시뮬레이션을 통한 검증

양방향 전력전송에 대한 LCCL-S의 적합성을 검증하기 위하여 PSIM 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 4는  $C_p$ 는 197.757 [nF],  $C_s$ 는 46.384 [nF],  $L_{in}$ 은 17.728 [μH],  $C_{fp}$ 는 8.014 [nF]으로 설계한 뒤 표 1을 기준으로 진행된 충방전 시뮬레이션 파형으로, 충방전 모두 3.3 [kW] 정상 동작하는 것을 확인하였다.

## 3. 결론

본 논문에서는 전기자동차용 inductive power transfer (IPT) 방식의 양방향 무선전력전송에 활용 가능한 공진 네트워크를 선정하였다. 각 공진 네트워크에 따라 패드의 파라미터를 설계하고 실제 패드의 크기와 전압 및 전류의 정격을 고려하였으며, 임피던스 분석 결과를 통하여 양방향 무선전력전송에 적합한 공진 네트워크를 선정하였다.

## 참고 문헌

[1] M. J. Kim, D. M. Joo, S. J. Ann, and B. K. Lee, "Two-stage inductive power transfer charger for electric vehicles," *Trans. Korean Inst. Power Electron.*, vol. 22, No. 2, pp. 134-139. Apr. 2017.