

# 무선전력전송 시스템의 SP 토폴로지 공진네트워크 설계

강민혁, 주동명, 우동균, 이병국<sup>†</sup>  
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Design of Resonant Network of SP topology for Wireless Power Transfer System

Min Hyuck Kang, Dong Myoung Joo, Dong Gyun Woo and Byoung Kuk Lee<sup>†</sup>  
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 정전압 특성을 갖는 SP 토폴로지 공진네트워크에 대한 설계 방법을 제시한다. 주어진 설계 사양을 기반으로 도출 가능한 인덕턴스 값에 따라 소자 스트레스 및 수직수평 이격에 따른 결합계수  $k$  변동을 고려한 공진네트워크를 설계한다. 이에 따라 설계된 SP 토폴로지의 시뮬레이션 및 실험을 통해 설계 과정의 타당성을 검증한다.

### 1. 서론

전기 자동차 기술의 발전에 따라 비접촉 무선 충전이 가능한 자기유도 전력전송 (Inductive Power Transfer) 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다. 무선전력전송 시스템은 전원의 전압과 전류 정격의 최소화 및 전력전달 능력을 증가시키기 위해 1차 측 및 2차 측 모두 커패시터 보상을 적용한 공진네트워크를 구성한다. 공진 네트워크는 보상 커패시터의 접속 방식에 따라 다양한 형태로 구성될 수 있으며 본 논문에서는 SP 토폴로지의 공진 네트워크의 설계 가이드라인을 제안한다<sup>[1]</sup>.

제한하는 공진 네트워크 설계는 수신패드 사이즈에 따른 인덕턴스를 초기 기준으로 하여 나머지 공진 네트워크 파라미터 ( $L_P$ ,  $C_P$ ,  $C_S$ )를 도출하고, 전압과 전류 스트레스를 고려한 조합을 선정한다. 또한 수직 수평 이격 및 결합계수  $k$  변동을 고려하여 설계 결합계수 범위에서 전력 전달능력을 확인한다.

### 2. SP 토폴로지 최적 설계 방안

#### 2.1 공진네트워크 설계 지표 분석

공진 네트워크 토폴로지는 그림 1과 같이 정전압 출력 특성을 갖는 SP 토폴로지를 사용하였다. 공진 네트워크의 설계 과정은 그림 2와 같다. 설계 요구 사양은 표 1과 같으며 결합계수  $k$ 가 낮을 때 전압 및 전류 스트레스가 높기 때문에 설계 기준으로 선정하였다. 수신패드의 자기 인덕턴스  $L_S$ 를 5  $\mu\text{H}$ 에서 24  $\mu\text{H}$ 까지 변화시켰을 때 표 1의 조건을 만족하는 나머지

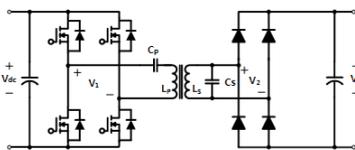


그림 1 SP 공진 네트워크 토폴로지  
 Fig. 1 SP resonant network topology.

공진 네트워크의 값은 그림 3 (a)와 같다. 송신 패드의 SAE J2954 규격에 준하여 원형으로 구성하면 코일의 직경을 최대 38 cm으로 구성할 수 있다. 이 때 송신패드의 권선을 2층으로 구성하면 최대 인덕턴스는 950  $\mu\text{H}$ 내외로 도출된다. 따라서 가능한 수신 패드의 인덕턴스는 16  $\mu\text{H}$  이하가 되어야 한다.

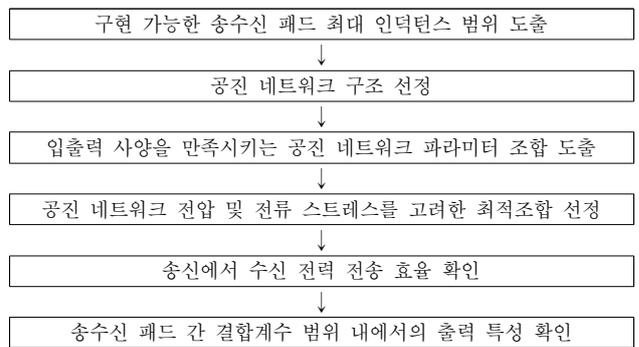
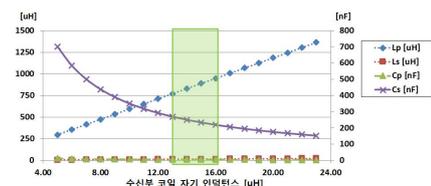
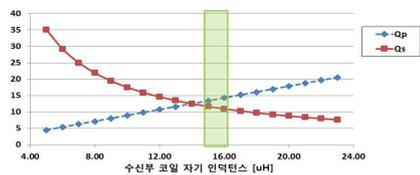


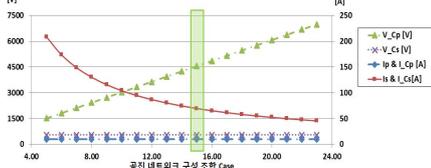
그림 2 공진 네트워크 설계 과정  
 Fig. 2 Design process of resonant network.



(a) 2차 인덕턴스 범위에 따른 공진 파라미터의 구성조합



(b) 송수신 패드에 대한 Q factor



(c) 공진 파라미터에 따른 전압 및 전류 스트레스

그림 3 공진 네트워크 설계를 위한 파라미터 도출  
 Fig. 3 Resonant network parameter derivation.

표 1 공진네트워크 설계 사양  
Table 1 Value of design parameter

Parameter	Value	Parameter	Value
$V_{in}$	380 V	$L_p$	940 $\mu$ H
$V_{out}$	200 500 V	$L_s$	15 $\mu$ H
$P_{rate}$	3300 W	$C_p$	233.73 nF
$f_{sw}$	85kHz	$C_s$	3.966 nF

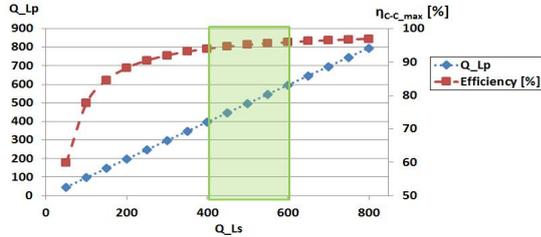


그림 4  $Q_{LS}$ 에 대한  $Q_{LP}$  및 효율 예측  
Fig. 4  $Q_{LP}$  and maximum efficiency according to  $Q_{LS}$ .

Bifurcation 현상을 방지하기 위해 1차 측 및 2차 측의 부하 품질계수는  $Q_S < Q_P$ 를 만족하여야 한다. 이 때  $Q_P$ 와  $Q_S$ 를 식 (1)에 의해 계산하여  $L_S$ 에 따라 나타내면 그림 3 (b)와 같다<sup>[2]</sup>.

$$Q_P = \frac{w_0 L_P L_S^2}{R_{ac} M^2}, \quad Q_S = \frac{R_{ac}}{w_0 L_S} \quad (1)$$

따라서  $L_S$ 의 범위는 15  $\mu$ H 이상을 만족해야 한다. 따라서 가능한  $L_S$ 의 값은 15  $\mu$ H 또는 16  $\mu$ H이며 그림 3 (c)와 같이  $C_P$ 의 전압 스트레스를 고려하여 공진네트워크 파라미터 설계 사양을 다음 표 (1)과 같이 선정하였다.

공진 네트워크의 값이 정해지면 각 송수신 코일의 Q factor를 사용하여 이론적인 최대 전력 전송 효율을 구할 수 있다. 수신 코일의 품질계수  $Q_{LS}$ 에 따른 송수신 코일의  $Q_{LP}$ 와 최대 효율 곡선을 각각 식 (2) 및 (3)에 의해 나타내면 그림 4와 같다.

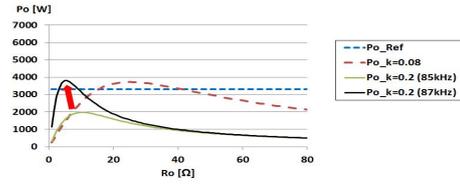
$$Q_{LP} = \frac{1}{k^2 Q_{LS} \left\{ \left( \frac{R_{Le}}{R_{LS}} \right)^2 - 1 \right\}} \quad (2)$$

$$\eta_{max} = \frac{k^2 Q_{LP} Q_{LS}}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_{LP} Q_{LS}})^2} \quad (3)$$

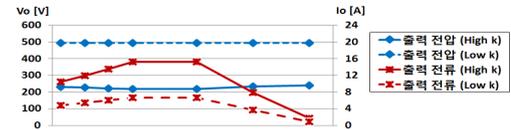
이 때  $R_{Le}$ 는 수신부 부하저항 값을 나타내며  $R_{LS}$ 는 수신코일의 기생 저항을 나타낸다. 실제 구현 가능한  $Q_{LS}$ 의 범위는 400 600정도 이며, 이 때 이론적인 최대 효율은 96% 정도로 예측할 수 있다.

## 2.2 결합계수에 따른 출력전압 특성 분석

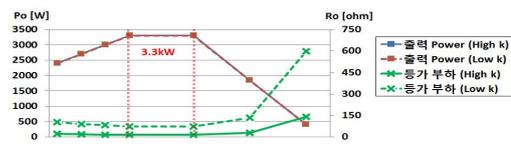
위의 설계는  $k$ 가 낮은 조건에서 수행되었기 때문에 결합계수의 변동을 고려한 출력 전력 전달 능력 확인이 필요하다. SP 토폴로지 특성 상  $k$ 가 증가하면 출력 전압이 감소하며 공진주파수 변화로 인해 필요한 출력 전력을 내지 못할 수 있다. 따라서 결합계수의 변화에 따라 스위칭 주파수의 조절이 필요하다.  $k$ 가 0.2일 경우 스위칭 주파수를 85 kHz로 동작시키면 최대 전달 가능 전력이 2 kW지만 스위칭 주파수를 87 kHz로 가 변화하면 설계 정격 전력 3.3 kW를 출력할 수 있다. 그림 5는



(a) 결합계수 및 주파수에 따른 출력 파워



(b) 결합계수에 따른 출력전압 및 전류



(c) 결합계수에 따른 출력 전력 및 등가 부하 저항

그림 5 결합계수에 따른 출력특성  
Fig. 5 Output characteristics depending on  $k$ .

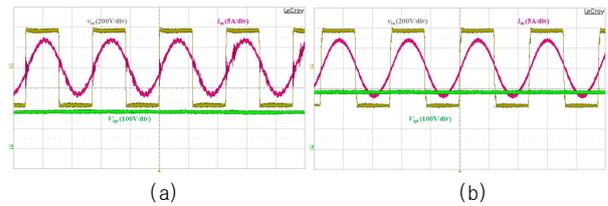


그림 6 SP 토폴로지 실험 결과  
Fig. 6 Experimental results of SP topology  
(a)  $k=0.189$ , 3000W (b)  $k=0.126$ , 3000W.

CC CP CV 충전 곡선을 고려한 결합계수별 출력특성을 나타내며, 충전 곡선의 출력 조건을 모두 만족하는 것을 확인할 수 있다. 그림 6은 각 결합계수 별 3 kW 출력 조건에서 IPT 컨버터의 주요 동작 파형을 나타낸다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 SP토폴로지 공진 네트워크의 설계 가이드라인을 제안한다. 먼저, 송수신 패드의 사이즈를 고려하여  $L_S$ 의 변화범위를 선정하고 이에 따른 공진 파라미터를 도출한다. 공진 네트워크 전압 및 전류 스트레스를 고려하여  $L_S$ 의 범위 내에서 최적 공진 파라미터 조합을 선정한다. 마지막으로 결합계수에 따른 공진 네트워크 설계 가이드라인을 제안하고 실험결과를 통해 설계과정의 타당성을 확인하였다.

이 논문은 (주)현대자동차의 연구비 지원에 의하여 연구됨

## 참 고 문 헌

- [1] Swagat Chopra, "Contactless Power Transfer electric vehicle charging application", Master of Science Thesis, pp. 31 33, 2011
- [2] Chwei Sen Wang, Covic, G.A and Stielau, O.H, "Power Transfer Capability and Bifurcation Phenomena of Loosely Coupled Inductive Power Transfer Systems", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 1, pp. 148 157, February, 2004