

# LCCL-S 토폴로지를 적용한 무선전력전송 시스템의 ZVS를 위한 입력 인덕턴스 최적 설계

변중은, 주동명, 이병국<sup>†</sup>  
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Optimal Input Inductance Design of Wireless Power Transfer System with LCCL-S Topology for Zero Voltage Switching

Jong Eun Byun, Dong Myoung Joo, and Byoung Kuk Lee<sup>†</sup>  
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 무선전력전송 시스템이 전 부하 영역에서 ZVS (Zero voltage switching)하기 위한 LCCL S 토폴로지 입력 인덕턴스 최적 설계 방법을 제안한다. 결합계수 및 부하에 따른 입력전류를 분석하고, 설계 조건을 도출한다. 도출한 설계 조건을 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증한다.

### 1. 서 론

무선전력전송 시스템은 송수신패드의 구조적 특성상 송수신 패드의 상대적인 위치에 따라 자기인덕턴스가 변하게 된다. 이에 따라 1차측 ZPA (Zero phase angle) 주파수가 설계된 주파수에서 벗어나기 때문에 입력측의 역률이 낮아지고 VA정격 및 스위칭 손실의 증가를 초래한다. 따라서 공진 주파수 변화를 고려하여 고역률 동작을 위한 ZPA 주파수 제어가 필요하다. 기존의 주파수 제어 방법은 스위칭 시점의 입력 전류를 센싱하여 Quazi ZPA 동작을 하였으나, 이는 센싱 받는 전류의 정밀도에 따라 제어 성능이 결정되었다. 또한 위상을 직접적으로 제어하는 것이 아니기 때문에 부하 및 결합계수에 따라 역률이 오히려 떨어질 수 있다<sup>[1]</sup>.

LCCL S 토폴로지는 LCL 구조 특성 상 입력 전류에 부하와 결합계수에 무관한 고조파 전류를 가지며, 이를 통해 송수신 패드의 위치에 따라 변화하는 ZPA 주파수에서도 추가적인 제어 없이 ZVS (Zero voltage switching) 동작이 가능하다<sup>[2]</sup>. 하지만 고조파 전류로 인해 추가적인 도통손실 및 스위칭 손실이 발생한다<sup>[2]</sup>. 본 논문에서는 ZVS 동작 조건하에서 도통손실 및 스위칭 손실을 최소화하기 위한 LCCL S 토폴로지의 입력 인덕턴스 최적 설계 방안을 제안한다. 부하 및 결합계수에 따른 고조파 전류 분석을 통해 결합계수 및 부하 조건에서 ZVS 동작이 가능한 최적 설계 방법을 도출하고 설계된 무선전력전송 시스템을 시뮬레이션으로 검증한다.

### 2. 전류 센서리스 주파수 제어

#### 2.1 시스템 분석

그림 1은 LCCL S 토폴로지를 가지는 무선전력전송 시스템의 구성도이며, 그림 2는 LCCL S 토폴로지의 입력전압과 입력전류를 나타낸 파형이다. 그림 2에서 시스템이 ZVS 동작하기 위해서는  $t_{ZVS}$ 가 0보다 항상 커야 하지만, 너무 클 경우 도

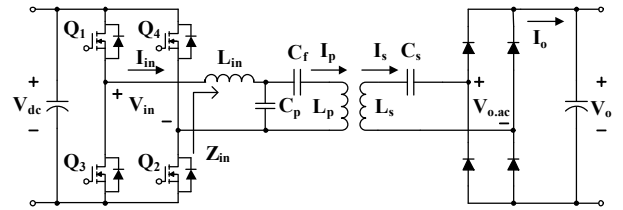


그림 1 LCCL-S 토폴로지 회로도  
Fig. 1 Circuit of LCCL-S Topology.

표 1 LCCL-S 토폴로지 공진 네트워크 파라미터  
Table 1 Parameters of LCCL-S topology resonant network

Parameter	Value	Parameter	Value
$V_{dc}$	380 V	$k$	0.062
$C_f$	7.67 nF	$L_{in}$	48.41 uH
$C_p$	72.42 nF	$L_p$	505.50 uH
$C_s$	15.42 nF	$L_s$	227.38 uH

통손실과 스위칭 손실이 증가하기 때문에  $t_{ZVS}$ 를 가능한 최소 값으로 설계해야 한다. 따라서 시스템에 대한  $t_{ZVS}$ 의 수식적 분석이 필요하다. 시스템은 최소 결합계수 조건에서 최대 부하를 출력 가능하도록 설계하며, 이때 시스템의 공진네트워크 파라미터는 표 1과 같다<sup>[1]</sup>.  $t_{ZVS}$ 를 계산하기 앞서 LCCL S 토폴로지의 입력임피던스와 입력전류 식은 다음과 같이 나타난다<sup>[2]</sup>.

$$Z_{in(h)} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{j\omega_h L_p + \frac{1}{j\omega_h C_f} + Z_r} + j\omega_h L_{in}}} + j\omega_h L_{in} \quad (1)$$

$$i_{in}(t) = \frac{4V_{DC}}{\pi} \sum_{h=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{h |Z_{in(h)}|} \sin(h\omega t - \angle Z_{in(h)}) \quad (2)$$

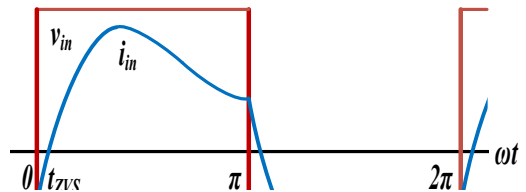


그림 2 LCCL-S 토폴로지 입력 전압 전류 파형  
Fig. 2 Input voltage and current waveform of LCCL-S

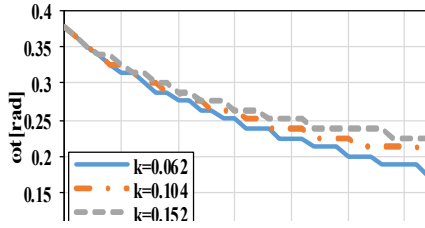


그림 3 결합계수 및 부하에 따른  $t_{ZVS}$  변화 그래프  
Fig. 3  $t_{ZVS}$  as coupling coefficient and load variation.

이 때  $h$ 는 고조파 차수를 의미한다. 식 (2)에서 입력 전류는 입력임피던스의 영향으로 부하 및 결합계수에 따라 그 크기 및 위상이 변한다. 이에 따라  $t_{ZVS}$ 가 함께 변하기 때문에 이를 고려하여  $t_{ZVS}$ 를 계산하였다. 이 때 각 결합계수에 따라 변화하는 송수신패드의 자기인덕턴스를 고려하였으며, 그에 따라 시스템 동작주파수를 변화한 1차측 공진주파수와 동일하게 하였다. 그림 3은 부하 및 결합계수에 따른  $t_{ZVS}$ 를 나타낸다. 그림 3에서와 같이 최소 결합계수일 때 최대 부하에서  $t_{ZVS}$ 가 가장 작다. 따라서 최소 결합계수 및 최대 부하일 때 시스템을 최소로 설계한다면 스위치 손실을 최소화하면서 모든 부하 및 결합계수 범위에서 ZVS 동작이 가능하다.  $t_{ZVS}$ 를 감소시키기 위해서는 입력 전류의 고조파 성분의 크기를 줄여야한다. 입력 전류의 고조파에 대한 식은 다음과 같다.

$$i_{in(h)}(t) \approx \frac{4V_{DC}}{\pi h \omega_h L_{in}} \sin(h\omega t - \pi/2) \quad (h = 3, 5, 7, \dots) \quad (3)$$

식 (3)에서와 같이 고조파 입력 전류는  $L_{in}$ 이 클수록 작아진다. 하지만  $L_{in}$ 은 공진네트워크의 일부로써 송수신패드의 자기인덕턴스  $L_p$ ,  $L_s$ 에 의해 결정되며 그 관계식은 식 (4)과 같다.

$$L_{in} = k V_{in} \sqrt{\frac{L_p L_s}{R_{ac} P}} \quad (4)$$

따라서 시스템 설계 시 최소  $t_{ZVS}$ 를 얻기 위해서는 송수신패드의 최대인덕턴스를 고려하여 설계하여야한다.  $L_s$ 가 너무 클 경우 부하 저항이 작을수록 공진네트워크의 임피던스 성분이 부하 저항보다 크게 보여 Bifurcation이 발생할 수 있으며,  $L_p$ 가 클 경우 1차측 공진네트워크의 전압 정격이 증가하기 때문에 이를 고려하여 인덕턴스를 선정해야 한다. 위 조건을 고려하여  $L_s$ 를 250 $\mu$ H로 선정하고  $L_p$ 를 변경하면서  $L_{in}$ 을 변화시키면서 부하에 따른  $t_{ZVS}$ 를 계산하였다. 이 때 결합계수는  $t_{ZVS}$ 가 가장 작을 때인 시스템 최소 결합계수 0.062로 고정하였다. 그림 4는  $L_{in}$ 에 따른  $t_{ZVS}$  변화를 나타낸 그래프이다. 그림 4에 나타나듯이  $L_{in}$ 이 증가할수록  $t_{ZVS}$ 가 작아지고 기존 설계된 시스템에 비해 약 28.57% 감소하였다.

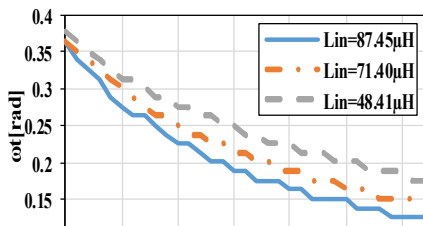


그림 4  $L_{in}$ 에 따른  $t_{ZVS}$  변동 그래프  
Fig. 4 Graph of  $t_{ZVS}$  according to  $L_{in}$  variation.

표 2 LCCL-S 토폴로지 공진 네트워크 파라미터  
Table 2 Parameters of LCCL-S topology resonant network

	k	$L_{in}$ 가변			부하 가변		
		48.41 $\mu$ H	71.40 $\mu$ H	87.45 $\mu$ H	1kW	2kW	3.3kW
전류	0.062	9.80	9.71	9.69	3.06	5.93	9.69
[A <sub>rms</sub> ]	0.152	10.66	9.98	9.96	3.26	6.13	9.96
$t_{ZVS}$	0.062	0.182	0.150	0.129	0.246	0.179	0.129
[rad]	0.152	0.263	0.245	0.230	0.340	0.264	0.230

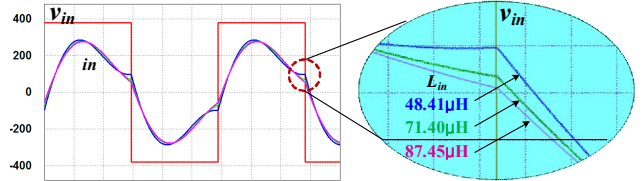


그림 5  $L_{in}$ 의 변화에 따른 시스템 동작 파형 ( $k=0.062$ ,  $P_o=3300W$ )  
Fig. 5 Waveforms of the system according to  $L_{in}$  variation.

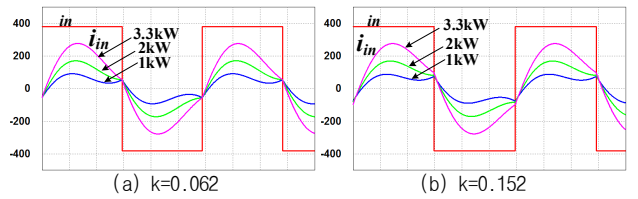


그림 6 부하 변화에 따른 시스템 동작 파형 ( $L_{in}=87.45\mu$ H)  
Fig. 6 Waveforms of the system according to load variation.

## 2.2 시뮬레이션 검증

시뮬레이션 검증을 위해  $L_{in}$ 을 바꿔 부하에 따라 주파수 가변 없이 시스템이 ZVS 동작을 하는지 확인하였다. 이때 동작 주파수는 각 결합계수별 각 1차측 ZPA 주파수로 고정하였다. 그림 5와 표 2에 나타나듯이  $L_{in}$ 이 증가할수록  $t_{ZVS}$ 가 짧아지고 전류 크기가 감소하였다. 또한 그림 6을 통해  $L_{in}=87.45\mu$ H인 시스템을 결합계수 및 부하에 따라 1차측 ZPA 주파수에서 동작시켰을 때 모든 범위에서 ZVS 동작하는 것을 확인하였다.

## 3. 결론

본 논문에서는 LCCL S 토폴로지를 이용하여 전류 센싱없이 ZVS하기 위한 시스템 설계 방안을 제안하였다. 제안하는 설계방법을 적용하기 위해 수식을 이용하여 부하 및 결합계수별 ZVS 동작 가능 조건을 판별하고, 전 부하 및 결합계수에서 ZVS 동작 가능한  $L_{in}$  값을 도출하였다.  $L_{in}$ 의 최적설계를 통해서 스위칭손실과 도통손실을 저감할 수 있다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030200980)

## 참고 문헌

- [1] D. G. Woo, "Optimal Design and Control Strategy of Inductive Power Transfer Charging System for Electric Vehicles", Ph.D. dissertation, Dept. Electron. & Comput. Eng., Sungkyunkwan Univ., Suwon, Korea, 2016.
- [2] 변종은, "무선전력전송 시스템의 LCCL S 토폴로지 입력 전류 고조파 분석", 전력전자학회 전력전자학술대회논문집, pp. 217-218, Jul. 2016.