

# LCCL-S 보상 네트워크를 적용한 IPT 시스템의 결합 계수 증가에 따른 출력 전압 대응 방안

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

## Counterplan of Output Voltage Variation in accordance with Coupling Coefficient Increase for LCCL-S Compensation Network IPT System

Min Kook Kim, Dong Myoung Joo, Dong Gyun Woo, and Byoung Kuk Lee  
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 LCCL S 보상 네트워크를 적용한 IPT 시스템의 결합 계수 증가에 따른 출력 전압 대응 방안에 대하여 비교 분석한다. LCCL S 보상 네트워크는 정전압 출력 특성을 나타내며 출력 부하 범위에서 주파수 가변 범위가 작고, 상대적으로 bifurcation에서 자유로운 장점을 가진다. 하지만 결합 계수가 증가함에 따라 출력 전압이 지나치게 증가할 수 있다. 출력 전압 증가 문제 해결을 위하여 본 논문에서는, 고정격 소자를 이용하는 방법과 위상천이 기법을 활용하는 방법을 제시하고 이를 시뮬레이션을 통해 검증한다.

### 1. 서 론

고성능 전기 자동차용 무선 충전 시스템 구성을 위하여 보상 네트워크에 대한 연구가 활발하다. 다양한 출력 특성을 나타내는 보상 네트워크 구조 중, 정전압 출력 특성을 나타내는 보상 네트워크 구조는 전기 자동차 배터리 충전에 가장 적절한 구조이다. LCCL S 보상 네트워크는 필터 커패시터를 추가하여 기존 LCL S 보상 네트워크의 단점을 개선하였으나, 여전히 결합 계수 증가에 따라 출력 전압이 지나치게 증가할 수 있는 단점을 가진다<sup>[1]</sup>. 이러한 문제점을 해결하고자 본 논문에서는, 결합 계수 변동에 따른 출력 전압 상승 문제를 고정격 소자를 사용하여 해결하는 관점과 위상천이 기법을 활용하여 상승된 전압을 낮추는 제어적 관점으로 접근하고, 이를 시뮬레이션을 통해 비교 검증한다.

### 2. LCCL-S 보상 네트워크의 구조 및 특징

전기 자동차용 무선 충전 시스템의 보상 네트워크는 송신 회로의 VA 정격을 감소시키고, 전력을 최대한으로 전달하여 고효율 시스템을 구성하는 데에 목적이 있다<sup>[1]</sup>. 정전류 출력 특성을 나타내는 보상 네트워크는 부하 저항에 따라 출력 전압이 변하기 때문에 전기 자동차 충전용 무선 충전 시스템에는 적합하지 않다. LCL S 구조는 정전압 출력 특성을 나타내고 zero phase angle (ZPA) 주파수가 결합 계수나 부하에 상관없이 일정하며 bifurcation 발생 가능성이 낮은 장점이 있다. 하지만, 입력 전류 DC offset이 발생할 수 있으며 1차 측 공진 전류가 큰 단점을 가진다. LCCL S 구조는 송신 코일에 직렬로 필터 커패시터를 배치하여 입력 전류의 DC offset을 제거할 수 있

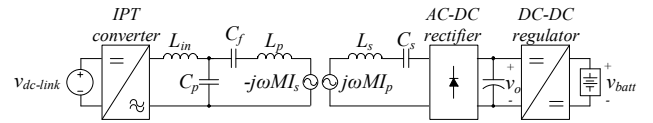


그림 1 LCCL-S 보상 네트워크 회로도  
Fig. 1 Circuit diagram of LCCL-S compensation network.

며, 송신 측의 공진 전류 크기를 조절 할 수 있다. 그림 1은 LCCL S 보상 네트워크의 등가 회로도를 나타낸다. 수신 측 보상 커패시터는 85kHz에서 리액턴스 성분이 0되도록 선정하며, 송신 측 보상 커패시터는 송신 측으로 투영한 수신 측 임피던스 성분을 고려하여 선정한다. 식 (1)은 키르히호프 법칙을 이용하여 도출한 LCCL S 보상 네트워크의 출력 전압의 크기를 나타낸다.

$$|V_{o,ac}| = |I_{o,ac} \cdot R_{ac}|$$

$$= \left| \frac{v_{in}}{z_{in}} \cdot \left\{ \frac{1}{1 + j\omega C_p(j\omega L_p + 1/j\omega C_f + Z_r)} \right\} \cdot \frac{j\omega M}{Z_{22}} \cdot R_{ac} \right| \quad (1)$$

표 1은 파라미터 값들을 나타내며, 그림 2는 표 1의 파라미터를 적용한 시스템의 결합 계수 변동에 따른 출력 전압, 전류를 나타낸다. 결합 계수는 차량의 높이 및 주차 위치를 고려하여 0.08 0.2로 설정하고, IPT 컨버터는 50% 듀티로 제어 하였으며, 출력 전압은 배터리 충전용 컨버터의 동작 범위를 고려하여 최소 결합 계수에서 200V가 출력되도록 설계하였다.

표 1 LCCL-S 보상 네트워크 파라미터  
Table 1 Parameters of LCCL-S compensation network.

Parameter	Value
V <sub>dc link</sub>	380 [V]
v <sub>o</sub>	200 500 [V]
L <sub>in</sub>	26.3 [μH]
L <sub>p</sub>	300 [μH]
C <sub>p</sub>	133.2 [nF]
C <sub>f</sub>	12.8 [nF]
L <sub>s</sub>	100 [μH]
C <sub>s</sub>	35.1 [nF]
f <sub>sw</sub>	85 [kHz]
k	0.08 0.2

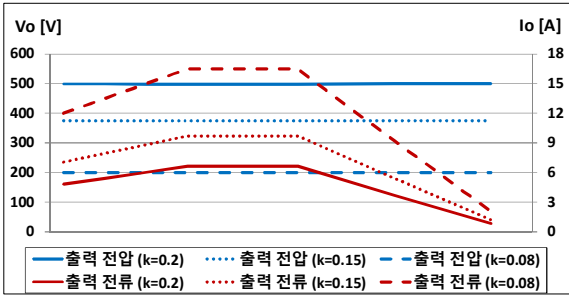


그림 2 결합 계수 변동에 따른 출력 전압, 전류  
Fig. 2 Output voltage and current according to the coupling coefficient variation.

### 3. 출력 전압 대응 방안 및 성능 비교

2장의 결과에서 볼 수 있듯이 시스템 효율 향상을 위한 결합 계수 상승은 출력 전압의 증가를 야기한다. 본 장에서는 결합 계수 상승에 의해 출력 전압 증가 문제 해결 방안으로 고정격 소자를 사용하여 증가된 출력 전압에서도 안정적으로 동작이 가능하도록 하는 방법과 IPT 컨버터에 제어 기법을 적용하여 출력 전압을 낮추는 방안을 제시하고, 시뮬레이션 결과를 통하여 성능을 비교한다.

#### 3.1 고정격 소자 사용

설계한 시스템에서 사용한 전력 반도체 소자들은 마진을 고려하여 대부분 600V 수준의 전압 정격을 가지는 소자로 선정하였다. 추가적인 결합 계수 상승 가능성을 고려해 보았을 때, 보상 네트워크 출력에 연결된 정류 다이오드 및 레귤레이터의 MOSFET 정격을 900V 수준으로 증가시켜야 한다. 고정격 소자는 기존 소자들에 비해  $R_{DS(on)}$ 과  $t_{tr}$ 성분이 크기 때문에 도통 손실과 스위칭 손실이 더 커지게 된다.

#### 3.2 위상천이 제어 기법 적용

듀티를 50%로 고정하여 동작시키는 오픈 루프 제어와는 달리, 위상 천이 제어 기법 (phase shifted control strategy)은 IPT 컨버터부의 유효 듀티를 가변하여 원하는 출력 레벨로 전압을 제어한다. 이 제어 기법을 적용하면, 보상 네트워크 출력 전압 ( $v_o$ )을 600V 정격 전력 반도체 소자를 유지하는 상황에서 출력 전압을 정격 이하로 제어 가능하다. 그러나 무효 듀티 구간에서 발생하는 무효 전력 성분에 의해 효율은 저하된다.

#### 3.3 검증

본 절에서는 결합 계수  $k=0.2$  조건에서 3.1절과 3.2절에서 제시한 방안을 적용하였을 때 전력 반도체에서 나타나는 손실 성분 크기를 비교한다. 이 때 입력 전압 380[V], 출력 배터리

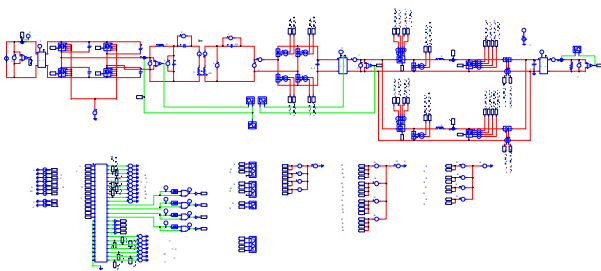


그림 3 시뮬레이션 회로도  
Fig. 3 Schematic of simulation.

표 2 시뮬레이션에 사용한 소자 및 제어 기법

Table 2 Power semiconductor devices and control strategies for simulation.

	고정격 소자	위상천이기법
IPT converter	IPW65R080CFD	
Diode rectifier	APT15DQ100BCT	APT15D60B
DC DC_sw_buck	IPW90R120C3	IPW60R075CP
DC DC_sw_boost	IPW60R075CP	
DC DC_diode_buck	APT15DQ100BCT	IDW20G65C5
DC DC_diode_boost	IDW20G65C5	
Control strategy	50% duty control	phase shift

표 3 파트별 손실 비교표

Table 3 Table of component power losses for comparison.

	고정격 소자	위상천이기법
IPT converter	28.15 [W]	36.73 [W]
Diode rectifier	34.55 [W]	20.69 [W]
DC DC_sw_buck	17.23 [W]	8.79 [W]
DC DC_diode_buck	1.45 [W]	0.67 [W]
DC DC_diode_boost	7.52 [W]	7.52 [W]
Total loss	88.89 [W]	74.40 [W]

전압 410[V], 출력 전력은 3300[W] 조건이다. 그림 3은 시뮬레이션 회로도를 나타낸다. 표 2는 사용한 소자와 제어 기법을 나타내며, 표 3에서는 파트별 손실량을 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 대응 방안에 관계없이 정상적으로 제어가 됨을 확인하였고, 고정격 소자를 사용 시엔 DC DC converter 파트에서, 위상천이기법을 적용 시엔 IPT converter에서 큰 손실이 발생하였다. 전체적인 손실을 비교했을 경우에는 고정격 소자를 사용하는 경우가 약 14.4[W] 정도 큰 손실이 발생함을 확인하였다.

## 4. 결론

본 논문에서는 LCCL S 보상 네트워크를 적용한 IPT 시스템의 결합 계수 증가에 따른 출력 전압 대응 방안으로 고정격 소자를 사용하는 방법과 위상천이 제어 기법을 적용하는 방법을 제시 및 비교하고 그 성능을 시뮬레이션을 이용하여 검증하였다. 시뮬레이션 결과, 대응 방안에 관계없이 시스템이 정상적으로 제어됨을 확인하였고, 전체적인 손실 측면에서는 위상천이기법을 사용하는 것이 결합 증가로 인한 출력 전압 대응 방안으로 더 우수한 성능을 나타내었다.

이 논문은 (주)현대자동차의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고 문헌

- [1] Chang Yu (David) Huang, "Design of IPT EV Charging Systems for Variable Coupling Applications", *Doctoral thesis*, 2011.
- [2] Chwei Sen Wang, Oskar H. Stielau, and Grant A. Covic, "Design Considerations for a Contactless Electric Vehicle Battery Charger", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 5, pp. 1308-1314, October 2005.