

## 무선 충전 시스템의 임피던스 튜닝을 위한 Switch controlled capacitor 회로 설계 및 검증

김채린, 이도현, 이주아, 이병국  
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Switch Controlled Capacitor Circuit Design for Impedance Tuning in Wireless Power Transfer System

Chae-Lyn Kim, Do Hyeon Lee, Ju-A Lee, Byoung Kuk Lee<sup>†</sup>  
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

**Abstract** - 본 논문에서는 IPT 컨버터의 임피던스 튜닝을 위한 SCC 제어 회로의 설계 기준을 제시한다. SCC 회로는 등가 직렬 커패시터를 가변하여 결합 계수 변화에 따른 패드 인덕턴스 변동을 보상하고, ZPA 동작을 유지하도록 제어한다. 이때 SCC 커패시터와 직렬 커패시터의 비율에 따라 SCC 스위치의 전압·전류 스트레스와 임피던스 튜닝 성능이 달라진다. 따라서 본 논문에서는 커패시터 선정 기준을 제시하고, 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증한다.

## 1. 서 론

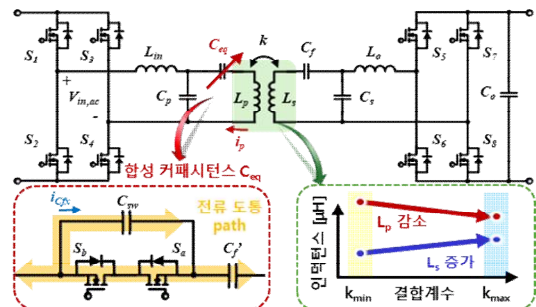
최근 전기자동차 보급 확대와 함께 충전 편의성과 안전성에 대한 요구가 증가하면서 무선 충전 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, 무선 충전 시스템은 송·수신 패드의 유도성 성분이 지배적이므로 무효 전력이 크게 발생하며, 이에 따라 동일한 유효 전력 전달을 위해 더 큰 피상 전력이 요구된다. 이로 인해, 전체 시스템의 효율이 저하될 수 있으므로 패드의 유도성 성분을 상쇄하기 위한 보상 네트워크 설계가 필수적이다. 또한, 송·수신 패드 간 정렬 상태와 부하 조건에 따라 패드 인덕턴스 성분이 변화해 공진 조건이 변화하므로, 다양한 운전 조건에서 Zero phase angle (ZPA) 동작을 유지하기 위한 임피던스 튜닝 기법이 필요하며, 대표적인 방법으로 Switch controlled capacitor (SCC) 제어 기법이 적용된다.

SCC 제어 회로는 back-to-back 스위치 ( $S_a$ ,  $S_b$ )와 커패시터 ( $C_{sw}$ )가 직렬 보상 커패시터 ( $C_f$ )와 직렬로 연결된 구조로 구성되며, 이를 적용한 Inductive power transfer (IPT) 컨버터는 그림 1과 같다. 해당 회로는  $C_{sw}$ 를 통해 도통하는 전류의 크기를 조절함으로써 등가 직렬 커패시터 ( $C_{eq}$ )를 가변하는 방식으로 동작하며, 이를 통해 결합계수 변화에 따른 패드의 인덕턴스 변동을 보상하여 IPT 컨버터의 ZPA 동작을 달성한다. 이때, SCC 회로는  $C_{sw}$ 로 도통하는 전류가 증가할수록 back-to-back 스위치의 drain-source 전압은 증가하는 반면, 도통 전류는 감소하는 특성을 보인다. 또한, 동일한 도통 전류 조건에서도  $C_{sw}$ 와  $C_f$  간 커패시터스 비율에 따라 back-to-back 스위치의 drain-source 전압이 변화하며, 이는 스위치의 정격 및 SCC 회로의 커패시터스 선정에 영향을 미친다. 따라서 SCC 회로 설계 시에는 임피던스 튜닝 성능뿐만 아니라, 커패시터스 비율에 따른 스위치 전압 및 전류 스트레스 변화를 함께 고려할 필요가 있다.

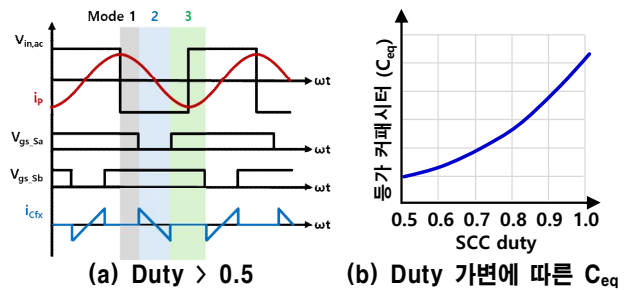
따라서 본 논문에서는 SCC 회로의 설계 기준을 제시한다. 이를 위해  $C_{sw}$ 와  $C_f$  간 비율 변화에 따른 스위치 전압 및 전류 스트레스와 임피던스 튜닝 성능을 종합적으로 분석한다. 분석 결과를 기반으로 커패시터스 선정 기준을 제시하며, 최적 설계안 선정 후 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증한다.

## 2. 임피던스 튜닝을 위한 SCC 커패시터 설계 방안

IPT 컨버터의 설계 사양 및 보상 네트워크 설계 결과는 표 1과 같다. 본 연구에 적용되는 무선 충전 시스템은 IPT 컨버터 출력단에 배터리 충·방전 프로파일 제어를 위한 DC-DC 컨버터가 추가된 구조로, IPT 컨버터는 전력 전달만을 수행한다. 이때, IPT 컨버터는 송·수신 패드 간 이격 조건에 관계없이 원활한 전



〈그림 1〉 SCC 제어 적용 IPT 컨버터 회로도



〈그림 2〉 Switch controlled capacitor 동작 원리

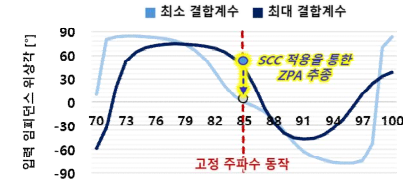
〈표 1〉 IPT 컨버터 설계 사양 및 보상 네트워크 설계 결과

| Parameter                                 | Value [Unit]             |
|-------------------------------------------|--------------------------|
| 입력 전압, $V_{in}$                           | 800 [V]                  |
| 출력 전압, $V_o$                              | $\leq 800$ [V]           |
| 출력 전력, $P_o$                              | 25000 [W]                |
| 송 · 수신 측 보상 인덕턴스, $L_{in}$ , $L_o$        | 21.6 [ $\mu$ H]          |
| 송 · 수신 측 병렬 보상 커패시터, $C_p$                | 162.3 [nF]               |
| 송신 측 직렬 보상 커패시터, $C_f'$                   | 19.77 [nF]               |
| SCC 커패시터, $C_{sw}$                        | 210 [nF]                 |
| 수신 측 직렬 보상 커패시터, $C_f$                    | 42.55 [nF]               |
| 송신 패드 인덕턴스, $L_p$ ( $k_{min} / k_{max}$ ) | 215.6 / 206.6 [ $\mu$ H] |
| 수신 패드 인덕턴스, $L_s$ ( $k_{min} / k_{max}$ ) | 104.0 / 106.7 [ $\mu$ H] |
| 공진 주파수, $f_r$                             | 85 [kHz]                 |

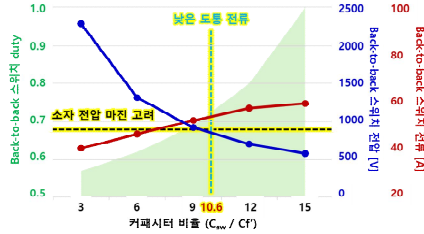
력 전달을 수행하기 위해 최소 결합계수 조건에서 설계되며, 넓은 출력 범위에 대응하기 위해 LCC-LCC 보상 네트워크를 적용한다.

## 2.1 Switch controlled capacitor 동작 원리

SCC 제어 방식은 결합 계수 변화에 따른 패드의 인덕턴스 성분 변화를 보상하기 위해, 송신측 Full-bridge 인버터를 고정 주파수로 동작시킨 상태에서 back-to-back 스위치  $S_a$ ,  $S_b$ 의 duty를 조절하여 등가 직렬 커패시터의 값을 가변하는 방식이다. 이때, 두 스위치는 0.5 ~ 1 범위의 duty로 조절되며 서로 180° 위상차로 동작한다. 그림 2(a)와 같이 mode 1에서는 두 스위치가 모두 턴 온 되어 보상 네트워크의 입력 전압 ( $V_{in,ac}$ )과 90° 위상차를 갖고 도



〈그림 3〉 SCC 적용에 따른 결합계수별 입력 임피던스 위상



〈그림 4〉 커패시터 비율에 따른 필요 duty 및 back-to-back 스위치 전압/전류

통하는 송신 코일 전류 ( $I_p$ )가 스위치 채널을 통해 도통하고, mode 2에서는 스위치 Sb가 턴 오프 되어  $I_p$ 가 SCC 커패시터 ( $C_{fx}$ )를 통해 도통하면서 커패시터를 충전 혹은 방전한다. 이후, mode 3에서는 두 스위치가 다시 턴 온 되며  $I_p$ 가 스위치의 채널로 도통하며 Mode 1 ~ 3 동작이 반복된다. 따라서 스위치 duty를 증가시키면  $C_{fx}$ 로 전류가 도통하는 시간이 감소하고, 결과적으로 그림 2(b)와 같이 등가 커패시턴스가 증가하는 방향으로 조절된다. 이는 식 (1)에서 duty 증가에 따라  $C_{eq}$ 가 증가하는 관계로도 나타나며, SCC 제어를 통해 등가 직렬 커패시턴스의 가변이 가능함을 의미한다<sup>[1]</sup>.

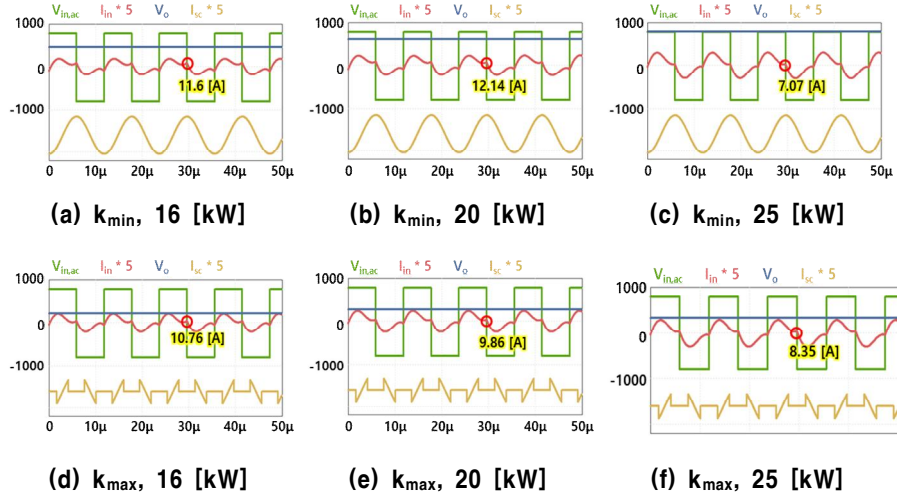
$$C_{eq} = \frac{\frac{\pi C_f C_{fx}}{2\pi(1-Duty) + \sin(2\pi Duty)}}{C_f + \frac{\pi C_{fx}}{2\pi(1-Duty) + \sin(2\pi Duty)}} \quad (1)$$

이때, SCC 회로는 IPT 컨버터의 송신 측에 위치하므로, 결합계수 증가에 따라 감소하는 송신 패드의 인덕턴스 성분을 보상하는 방향으로 제어되어야 한다. 따라서 결합 계수가 증가할수록 등가 직렬 커패시턴스가 증가하도록 SCC 회로를 제어한다. 이를 위해, 최소 결합 계수 조건에서는 duty 0.5로 동작하고, 결합 계수가 증가함에 따라 duty를 점차 증가시켜 제어한다. 이를 통해 글씨 3과 같이 결합 계수 변화에 따른 패드 인덕턴스 변화를 상세할 수 있으며, 결과적으로 ZPA 추종 제어가 가능하다.

## 2.2 Switch controlled capacitor 제어 회로 설계 방안

본 절에서는 SCC 제어 회로의 설계 기준을 제시한다. 2.1절에서 살펴본 바와 같이, SCC 회로는 duty가 0.5에서 1로 증가할수록 입력 임피던스 위상 성분을 감소시키는 방향으로 동작한다. 따라서, 패드의 결합계수가 증가하는 경우 공진점 변동에 의한 위상 증가를 보상하기 위해 duty를 증가시키는 제어가 필요하다. 이때, SCC 회로의 주된 손실 성분은 back-to-back 스위치의 도통 손실에 의해 결정되므로, duty가 0.5에 가까울수록 고효율 동작에 유리하다. 이러한 특성을 고려하여 본 논문에서는 최소 결합계수 조건에서의 duty를 0.5로 설정한다. 해당 조건에서는 전류가 모두  $C_{sw}$ 와  $C_f$ 로 도통하게 되므로 최소 결합계수 기준으로 요구되는  $C_{eq}$ 를 도출한다. 이때, 동일한  $C_{eq}$  조건에서도  $C_{sw}$ 와  $C_f$  간 커패시턴스 비율에 따라 결합계수 변화에 대응하기 위한 스위치의 duty 범위가 달라지며, 동시에  $C_{sw}$ 를 통해 흐르는 전류의 크기가 결정된다. 이는 임피던스 튜닝 가능 범위에 영향을 미칠 뿐만 아니라  $C_{sw}$ 를 통한 전류에 의해 형성되는 전압이 스위치 양단 전압으로 나타나고, 전류 분배에 따라 스위치 전류 또한 결정되므로, back-to-back 스위치의 전압 및 전류 정격 요구 조건을 함께 결정하는 주요 설계 요인이 된다.

따라서 앞서 언급한 파라미터를 종합적으로 고려하기 위해, 커패시턴스 비율을 3 ~ 15 범위로 변화시키며 분석을 수행하였다.



〈그림 5〉 SCC 회로 설계 후 시뮬레이션 기반 동작 검증

커패시턴스 비율에 따른  $C_f$ 와  $C_{sw}$  값은 식 (1)을 기반으로 산정하였으며, 각 조건에서 시뮬레이션을 통해 턴-오프 전류 10 [A]를 만족하는 duty를 도출하였다. 그 결과는 그림 4에 나타내었으며, 커패시턴스 비율이 증가할수록 요구되는 duty가 증가하는 경향을 보였다. 또한, 일정 비율 이상에서는 duty를 1로 제어하더라도 턴-오프 전류 저감에 한계가 발생하여 임피던스 튜닝 가능 범위가 제한되는 것으로 확인되었다. 이와 더불어 커패시터 비율에 따른 back-to-back 스위치의 도통 전류 및 전압을 분석한 결과, 비율이 증가할수록 도통 전류는 감소하는 반면, 스위치 양단 전압은 증가하는 경향을 보였으며, 이는 스위치 정격 선정에 직접적인 영향을 미친다. 상용 1200 [V] MOSFET 적용을 가정하고 1.5배 전압 마진을 고려한 결과, 커패시턴스 비율 10.6 조건에서 전압 정격을 만족하면서도 비교적 낮은 도통 전류를 확보할 수 있어 손실 저감 측면에서 유리한 것으로 나타났다.

이와 같은 분석 결과를 바탕으로 도출한 커패시턴스 비율을 적용하여  $C_{sw}$ 와  $C_f$  값을 설정하고, 출력 전력 조건별 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과는 그림 5에 나타내었으며, 모든 부하 조건에서 턴-오프 전류 수준 (약 10 [A] 내외)을 만족하는 것을 확인하였다. 이를 통해 앞서 분석한 설계 조건이 다양한 운전 조건에서도 적용 가능함을 확인하였다. 결과적으로 SCC 커패시터의 비율은 임피던스 튜닝 가능 범위와 스위치의 전압 및 전류 스트레스를 종합적으로 고려하여 산정되어야 한다. 특히, 과도한 커패시턴스 비율 증가는 임피던스 튜닝 범위를 제한할 수 있으므로, 요구되는 턴-오프 전류를 만족하면서 안정적으로 제어가 가능한 duty 범위 내에서 설정하는 것이 필요하다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 SCC 기반 임피던스 튜닝에서 커패시턴스 비율이 튜닝 범위와 스위치의 전압 및 전류 스트레스에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 커패시턴스 비율은 임피던스 튜닝 성능과 스위치 스트레스 간 trade-off 관계를 가지며, 설계 시 이를 종합적으로 고려할 필요가 있음을 확인하였다. 또한, 시뮬레이션을 통해 해당 설계 결과의 적용 가능성을 확인함에 따라 다양한 운전 조건에서도 안정적인 동작이 가능함을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2024-00422103, EV 스마트 충전 플랫폼 혁신연구센터)

### 참고 문헌

- [1] N. Fu, J. Deng, Z. Wang and D. Chen, "An LCC-LCC Compensated WPT System With Switch-Controlled Capacitor for Improving Efficiency at Wide Output Voltages," in IEEE Trans. on Power Electron., vol. 38, no. 7, pp. 9183-9194, July 2023