

# Semi-bridgeless 정류기를 이용한 Double-sided LCC 무선 전력 전송 시스템의 모델링 및 설계

박경호, 최영준, 차화량, 김래영†

한양대학교

## Modeling and Design of Double-sided LCC Wireless Power Transfer System with Semi-bridgeless Rectifier

Kyung-Ho Park, Yeong-Jun Choi, Hwa-Rang Cha and Rae-Young Kim†

Hanyang University

### ABSTRACT

본 논문에서는 무선전력전송시스템에서 Double-sided와 semi-bridgeless 정류기의 통합모델링 및 설계를 제안한다. 제안한 방식은 통합 모델링을 통해 제어기설계가 가능하며, 이를 통해 추가 회로가 없이 안정적인 출력전압제어가 가능하다. 본 논문에서는 구현된 모델링의 유효성 및 제어기 설계를 시뮬레이션에서 전압지령 변경과 Rising time 비교를 통해 검증한다.

### 1. 서 론

부하와 전원이 물리적으로 분리되어 있는 무선전력전송 시스템에서 이격거리가 증가하게 되는 경우 쇄교 자기장은 크기는 감소하게 된다. 이로 인해 큰 누설 인덕턴스는 출력전압 및 전송 효율이 낮아지는 문제점을 야기하므로, 이를 보상하기 위한 다양한 보상회로 제안되어 왔다. 이 중 송신부 및 수신부 보상회로를 한 개의 인덕터 및 두 개의 커패시터로 구성된 Double-Sided LCC 보상회로가 제안되었다. Double-sided LCC 보상회로는 이격거리와 부하 변동에도 공진 주파수가 일정하며, 이로 인해 커플러 설계 및 고밀도화가 가능하다는 장점을 가진다<sup>[1]</sup>.

그러나 공진 주파수에 근처에서 동작시키는 경우, 수신부의 정전류 출력특성으로 부하 가변시 수신부의 출력 전압이 크게 변동되어 정전압을 요하는 어플리케이션에서는 적합하지 않다.

정전압을 위해 추가 회로 및 Stage를 통해 출력전압제어를 하는 기법들에 대한 연구가 많이 진행되고 있다<sup>[2-3]</sup>. 하지만, 이러한 기법들은 추가 회로 및 Stage에 따른 전력밀도 및 효율감소의 단점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 Double-sided LCC 보상회로와 semi-bridgeless 정류기를 통합한 모델링과 이를 바탕으로 한 제어기설계를 제안한다. 제안한 모델링의 유효 및 보상기 설계 검증을 위해 PSIM을 통해 시뮬레이션을 진행한다.

### 2. Double-sided LCC 이용한 semi-bridgeless 정류기의 구현

그림1은 Double-sided LCC에 semi-bridgeless 정류기를 적용한 무선전력전송시스템을 나타내며, Full-bridge 컨버터, 보상회로 및 커플러 코일, semi-bridgeless 정류기, DC link capacitor와 부하로 구성된다.

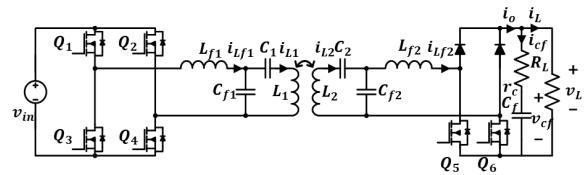


그림 1 semi-bridgeless 정류기를 사용한 Double-sided LCC 보상회로 토폴로지

보상회로의 파라미터는 공진주파수( $f_0$ )에 의해 다음 식(1), (2), (3), (4)과 같이 선정한다.

$$L_{f1}C_{f1} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2} \quad (1)$$

$$L_{f2}C_{f2} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2} \quad (2)$$

$$L_1 - L_{f1} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_1} \quad (3)$$

$$L_2 - L_{f2} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_2} \quad (4)$$

본 논문에서는 송신부 인버터 스위치의 영전압 스위칭과 semi-bridgeless 정류기 입력전압의 변동폭을 줄이기 위해 수신부의 직렬커패시터  $C_2$ 를 송신부의 직렬커패시터  $C_1$ 보다 크게 설계한다<sup>[4]</sup>.

### 3. 모드분석

그림 2와 그림 3은 semi-bridgeless 정류기의 정상상태 파형과 각 모드의 등가회로를 보여준다. 공진주파수인  $f_0$ 에서 동작하고, 스위치  $Q_5, Q_6$ 의 시비율은 항상 50% 이상의 값을 가지며,  $180^\circ$ 의 위상차를 갖는다. 각 소자들은 이상적이며, 기생성분은 무시한다. 스위칭 주기 동안 동작은 6가지 모드로 나뉜다.

모드 1 [ $t_0 \sim t_1$ ]:  $t_0$ 에서  $Q_5$ 는 턴-온되고 모드 1은 시작된다. 이 모드에서  $Q_6$ 는 이미 턴-온이 되어 있고,  $i_{Lf2}$ 는  $Q_5$ 와  $Q_6$ 를 통해 흐르게 된다.  $D_1, D_2$ 는  $v_L$ 로 클램프 되어 역바이어스된다.  $i_{Lf2}$ 가 0이 될 때, 모드 1은 종료된다.

모드 2 [ $t_1 \sim t_2$ ]:  $i_{Lf2} < 0$ 일 때, 모드 2는 시작된다. 이 모

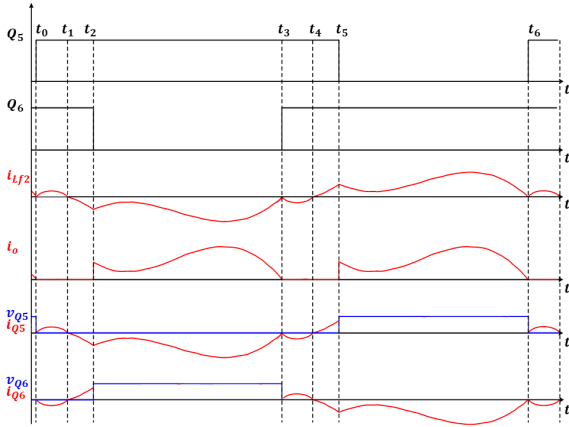


그림 2 semi-bridgeless 정류기의 동작 파형

드는 모드 1과 같이  $Q_5$ 와  $Q_6$ 를 통해 흐르게 된다.  $D_1, D_2$ 는  $v_L$ 로 클램프 되어 역바이어스 된다. 모드 2는  $Q_6$ 가 턴-오프 될 때 종료된다.

모드 3 [ $t_2 \sim t_3$ ]:  $Q_6$ 가 턴-오프 될 때 모드 3은 시작된다. 이 모드에서  $i_{Lf2}$ 는  $Q_5$ 의 바디다이오드와  $D_2$ 에 의해 부하로 전력 전달이 된다. 따라서  $Q_6$ 의 전압은  $v_L$ 로 클램프 된다. 모드 3은  $Q_6$ 가 턴-온 될 때 종료된다.

모드 4 ~ 6의 동작원리는 모드 1 ~ 3과 유사하므로 모드 4 ~ 6에 대한 자세한 설명은 생략한다.

#### 4. Double-sided LCC를 갖는 semi-bridgeless 정류기의 모델링 및 보상기 설계

이 장에서 모델링을 단계별로 수행하며, 간략화하기 위해 다음을 가정한다.

- 1) 공진소자의 파형은 정현파이며 정상상태이다.
- 2) 스위치, 수동소자는 이상적이다.

그림 4는 본 논문에서 제안한 수신부의 등가회로를 보여준다. 수신부의 입력은 앞선 가정에 따라 패러데이 법칙에 의해  $MI_{L1} \Omega_s$ 의 전압원으로 등가한다. 키르히호프의 법칙을 이용하고, 고조파 근사화를 이용하여 공진 전류 전압을 기본파의 사인, 코사인 성분으로 분리시켜, 식을 정리하면 식 (5)와 같다. 아래첨자  $s$ 는 사인성분  $c$ 는 코사인성분을 나타낸다.

$$\frac{MI_{L1,peak} \Omega_s}{\sqrt{2}} = L_2 \frac{di_{L2s}}{dt} + v_{C2s} + v_{CF2s} \quad (5a)$$

$$0 = L_2 \frac{di_{L2c}}{dt} + v_{C2c} + v_{CF2c} \quad (5b)$$

$$v_{CF2s} = L_{f2} \frac{di_{Lf2s}}{dt} + v_{abs} \quad (5c)$$

$$v_{CF2c} = L_{f2} \frac{di_{Lf2c}}{dt} + v_{abc} \quad (5d)$$

$$i_{L2s} = C_2 \frac{dv_{C2s}}{dt} \quad (5e)$$

$$i_{L2c} = C_2 \frac{dv_{C2c}}{dt} \quad (5f)$$

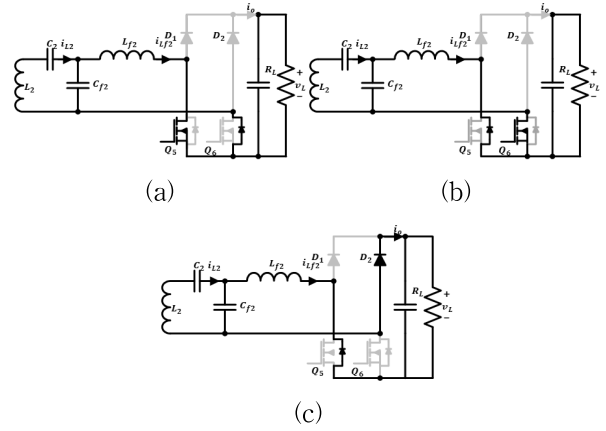


그림 3 각 모드의 등가 회로

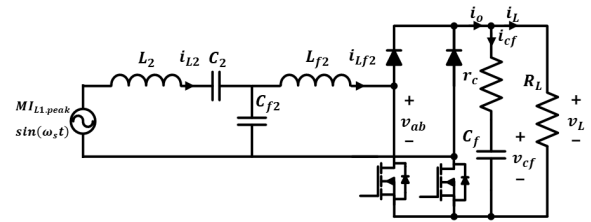


그림 4 semi-bridgeless 정류기를 사용한 Double-sided LCC 보상회로 토폴로지의 송신부 등가 회로.

$$i_{L2s} - i_{Lf2s} = C_{f2} \frac{dv_{CF2s}}{dt} \quad (5g)$$

$$i_{L2c} - i_{Lf2c} = C_{f2} \frac{dv_{CF2c}}{dt} \quad (5h)$$

$$i_o = \left(1 + \frac{r_c}{R_L}\right) C_f \frac{dv_{cf}}{dt} + \frac{1}{R_L} v_{cf} \quad (5i)$$

$$v_L = r'_c i_o + \frac{r'_c}{r_c} v_{cf} \quad (5j)$$

where,  $r'_c = r_c \times R_L / (r_c + R_L)$

등가저항  $R_{ac}$ 는  $P_{ab} \approx P_L$  (where,  $P_{ab} = \frac{V_{ab}^2}{R_{ac}}, P_L = \frac{V_L^2}{R_L}$ )을 통해 식 (6)와 같이 표현할 수 있다.

$$R_{ac} \approx 4(1-d)^2 R_L \quad (6)$$

$i_{Lf2}$ 와  $i_o$ 의 관계는 그림3의 하위 회로를 통해 식 (7)와 같이 표현할 수 있다.

$$i_o = 2(1-d)i_{Lf2} \quad (7)$$

소신호 모델링을 위해 각 변수에 DC항과 소신호항을 대입 후, DC 항 및 고차 항을 소거한다. 그 후 각 변수에 대하여 편미분 뒤 최종적으로 출력전압에 대한 전달함수를 정리하면 식 (8)과 같이 선형화된 소신호 행렬을 유도할 수 있다.

$$G_{vd}(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (9)$$

식 (9)을 통하여 알 수 있듯, 스위치 시비율과 출력전압간의 전달함수  $G_{vd}$ 를 유도 할 수 있다.

그림 5은 제안한 출력전압 보상기를 나타낸다. 출력전압  $v_L$ 을 검출한 뒤 이를 전압지령  $v_{ref}$ 와 비교한다. 출력전압과 전압지령간의 오차  $v_e$ 를 스위치의 시비율 조정을 통해 보상한다.

$$\hat{x} = [i_{L2s} \ i_{L2c} \ v_{C2s} \ v_{C2c} \ v_{Cf2s} \ v_{Cf2c} \ i_{Lf2s} \ i_{Lf2c} \ v_{cf}]^T$$

$$\hat{y} = [\hat{v}_L], \quad \hat{u} = [\hat{d}], \quad \frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + B\hat{u}$$

$$\hat{y} = C\hat{x} + D\hat{u} \quad \text{where,}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega & \frac{1}{L_2} & 0 & \frac{1}{L_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Omega & 0 & 0 & -\frac{1}{L_2} & 0 & -\frac{1}{L_2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & -\Omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_1} & \Omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{f1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\Omega & -\frac{1}{C_{f2}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{f2}} & 0 & 0 & \Omega & 0 & 0 & \frac{1}{C_{f2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{f2}} & 0 & \frac{4(1-2D+D^2) \cdot R_L}{L_{f2}} & -\Omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{f2}} & \Omega & \frac{4(1-2D+D^2) \cdot R_L}{L_{f2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2r_c(1-D) \cdot I_{Lf2s}}{r_c C_f \cdot I_{Lf2s}} & \frac{2r_c(1-D) \cdot I_{Lf2c}}{r_c C_f \cdot I_{Lf2c}} & -\frac{r_c}{r_c C_f \cdot R_L} & \frac{r_c}{r_c C_f \cdot R_L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{8(D-1) \cdot I_{Lf2s} \cdot R_L}{L_{f2}} & \frac{8(D-1) \cdot I_{Lf2c} \cdot R_L}{L_{f2}} & -\frac{2r_c \cdot I_{Lf2s}}{r_c C_f} \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1-D) \cdot \frac{I_{Lf2s}}{I_{Lf2}} \cdot r_c & -2(1-D) \cdot \frac{I_{Lf2c}}{I_{Lf2}} \cdot r_c & \frac{r_c}{r_c} \end{bmatrix}$$

$$D = [-2I_{Lf2s} \cdot r_c]$$

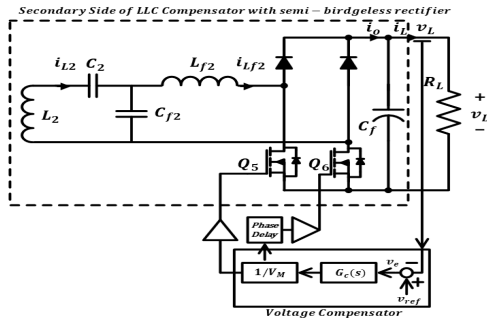


그림 5 제안된 무선 전력 전송 시스템의 제어 토폴로지  
표1은 본 논문에서 설계 예시로 든 Double-sided LCC의 회로 파라미터를 나타낸다. 전압지령  $v_{ref}$ 는 24V, 정격출력은 30W으로 선정하였다.

TABLE I  
CIRCUIT PARAMETERS OF SEMI-BRIDGELESS RECTIFIER WITH DOUBLE-SIDED LCC TOPOLOGY

Symbol	Quantity	Values
$V_{in}$	Input Voltage	48 [V]
$f_o$	Resonant Frequency	88 [kHz]
$V_{out}$	Output Voltage	24 [V]
$L_1, L_2$	Coupler Coil	48 [uH]
$L_{f1}, L_{f2}$	Series Inductor	4.8 [uH]
$C_1$	Primary Series Capacitor	82 [nF]
$C_2$	Secondary Series Capacitor	91 [nF]
$C_{f1}, C_{f2}$	Parallel Capacitor	680 [nF]
$C_f$	DC Link Capacitor	100 [uF]
$r_c$	ESR of DC Link Capacitor	22.8 [mΩ]
$k$	Coupling coefficient	0.023

보상기는 정상상태 오차를 줄이기 위한 적분기와 위상을 보상해 주기 위한 하나의 영점을 포함하며, 식 (10)와 같이 설계하였다.

$$G_{vd}(s) = -0.15421 \times \frac{s + 115}{s} \quad (10)$$

보상기의 설계를 통해 시스템은 87.9°의 위상여유를 확보하였으며, 이때의 교차 주파수는 1.05kHz로 보상기의 설계조건을 만족하였다.

## 5. 시뮬레이션

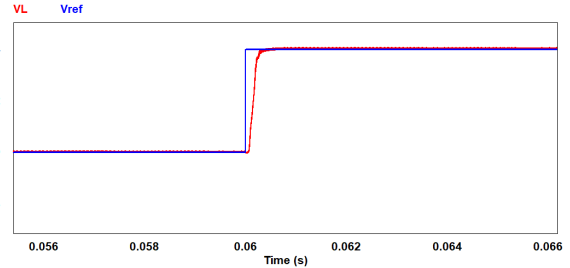


그림 6 시뮬레이션 파형 : 전압지령 및 출력전압 파형

본 장에서는 제안된 모델링을 시뮬레이션으로 검증한다. 그림 6은 표1의 파라미터와 식 (10)의 보상기를 통한 시뮬레이션의 전압지령 및 출력전압 파형을 나타낸다. 전압지령을 0.06초에 20V에서 24V로 변경하였을 시, 전압지령을 추종하고, 보상기를 통해 계산된 Rising time과 시뮬레이션의 Rising time이 300μs로 동일하다.

## 6. 결론

본 논문에서는 무선전력전송시스템에서 Double-sided와 semi-bridgeless 정류기의 통합모델링 및 설계를 제안하였다. 제안된 모델링을 통해 추가 회로 및 Stage 없이 전압제어가 가능하며, 이를 통해 고전력밀도 및 고효율이 가능하다. 시뮬레이션에서 제안된 모델링의 검증을 전압지령 변경 및 Rising time 비교를 통해 확인하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20171210201100)

## 참고 문헌

- [a] S. Li, W. Li, J. Deng, T. D. Nguyen, C. C. Mi "A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer" IEEE, Vol. 64, pp. 2261-2273, Jun 2015.
- [b] Kazuyuki IIMURA, Nobukazu HOSHI, Junnosuke HARUNA "Experimental Discussion on Inductive Type Contactless Power Transfer System with Boost or Buck Converter Connected to Rectifier" 2012 IEEE ECCE Asia, June 2-5, 2012, Harbin, China, pp.2652-2657
- [c] Fandan Zhao, Chunbo Zhu, Rengui Lu, Kai Song, Guo Wei, "Modeling and Design of Control Loop with Semibridgeless Rectifier in Wireless Charging System" ITEC Asia-Pacific 2017