

# LCC-LCC 기반 무선전력전송시스템의 2차측 PWM 컨버터 제어기법

곽진영, 이정인, 안혜은, 김석은, 김태웅  
경상국립대학교

## Control Scheme of Secondary Side PWM Converter for LCC-LCC Based Wireless Power Transfer System

Jin-Yeong Kwak, Jung-In Lee, Hye-Eun An, Seok-Eun Kim, Tae-Woong Kim  
Gyeongsang National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 LCC-LCC 토폴로지가 적용된 무선전력전송 시스템 수신 측에 PWM AC/DC 컨버터를 적용하여 전력밀도 및 효율을 향상시킬 수 있는 제어기법에 대해 검토한 후, PWM 컨버터에 초점을 맞추어 입력전압 위상정보에 따라 삼각파신호의 위상을 가변할 수 있는 PWM 컨버터의 바이폴라 스위칭 제어기법을 제안하고, PSIM 시뮬레이션해석에 의해 유효성을 검증한다.

### 1. 서론

국제자동차 기술자 협회에서 규정한 SAE-j2954에 전기자동차 무선충전규격이 명시됨에 따라 LCC-LCC (double sided LCC) 토폴로지를 적용한 무선전력전송(WPT, wireless power transfer) 시스템이 국내외적으로 활발하게 연구되고 있으며<sup>[1]</sup> 관련된 AC/DC 정류회로 또한 활발히 연구되고 있다. 기존 다이오드 전파정류회로에 있어서 다이오드를 스위칭소자로 대체한 PWM AC/DC 컨버터를 적용하는 방식<sup>[2,3]</sup>이 연구되고 있다.

계통연계 PWM 컨버터에서는 입력전원이 저주파수이기에 스위칭주파수를 10kHz 이상으로 설정하여 고분해능 PWM 게이트신호를 발생하여 컨버터를 효율적으로 제어할 수 있다.<sup>[4]</sup> 그러나 자기공명 WPT는 85kHz의 고주파전력으로 동작하여 반도체스위칭소자의 한계로 인해 스위칭주파수를 전원주파수보다 크게 설정하는 기존 PWM 컨버터의 제어기법을 적용하기에 어려움이 있다.

이에 본 논문에서는 스위칭주파수를 고주파 전원주파수와 일치시키며 입력전압 위상정보에 따라 적절한 게이트신호를 발생시켜 제어가능한 바이폴라 스위칭기법을 제안하고, PSIM 시뮬레이션해석에 의해 이에 대한 유효성을 검증한다.

### 2. LCC-LCC 토폴로지 기반 WPT

Fig.1은 LCC-LCC 토폴로지가 적용된 무선전력전송 시스템으로 정전류 출력특성을 가진다. 양측 동일 LCC 형태인 LCC-LCC 토폴로지는 기존 SS-토폴로지 및 SP-토폴로지와 다르게 직렬 및 병렬 커패시터 모두 존재하며 직렬 인덕터를 입력측과 출력측에 각각 삽입하여 코일사이 거리가 멀거나 가

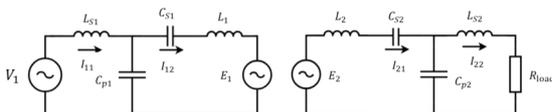


Fig.1 Equivalent circuit of LCC-LCC topology for standard WPT

까워져도 단락현상이 일어나지 않으며 영전압스위칭이 가능하다는 장점이 있다.<sup>[4]</sup> Fig.1에 제시된 WPT 토폴로지는 부하  $R_{load}$ 에 관계 없이 일정한 전류가 전달되며 각 루프에 흐르는 전류는 식(1)~(4), 그리고 1차측 및 2차측 유기전압은 식(5)~(6)과 같이 표현된다.<sup>[5]</sup>

$$I_{11} = V_1 \omega^6 M^2 C_{p1}^2 C_{p2}^2 R_{load} \quad (1)$$

$$I_{12} = -j V_1 \omega C_{p1} \quad (2)$$

$$I_{21} = V_1 M C_{p1} C_{p2}^2 R_{load} \quad (3)$$

$$I_{22} = -j V_1 \omega^3 M C_{p1} C_{p2} \quad (4)$$

$$E_1 = j\omega M I_{21} \quad (5)$$

$$E_2 = j\omega M I_{12} \quad (6)$$

여기서,  $V_1$ : 입력전압,  $\omega$ : 전원주파수,  $M$ : 코일간의 상호인덕턴스,  $C_p$ : 병렬 커패시터,  $E_1$ : 송신측 유기전압,  $E_2$ : 수신측 유기전압

### 3. PWM 컨버터의 바이폴라 스위칭기법

Fig.2는 PWM AC/DC 컨버터가 적용된 WPT의 2차측 등가 회로를 보여주며, 기존 다이오드 전파정류회로의 다이오드 소자 온저항으로 인한 손실을 줄임과 동시에 PWM 스위칭동작에 의해 출력을 가변 가능하다. 일반적으로 계통과 연계되는 PWM AC/DC 컨버터에는 유니폴라 스위칭기법을 주로 사용하지만, 본 논문에서는 WPT 전원이 고주파이기 때문에 바이폴라 스위칭기법을 채택하였고 이에 대한 컨버터의 동작모드 구간을 모드 1에서 모드 4로 구분된다.

입력전압  $V_1$ 의 위상과 삼각파  $Tri$ 의 위상이 Fig.3에서의  $t_0$  ( $t_5$ ) 및  $t_2$  시점에서 서로 일치할 경우에 성립하며, 입력전압과 삼각파신호의 위상오차가 커질수록 수신측에 흐르는 전류가 작아지게 되어 부하전류  $I_o$ 는 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_o = I_m \cos(\theta_{err}) \quad (7)$$

여기서,  $I_m$ 은 위상오차  $\theta_{err}$ 가 0일 경우에 흐를 수 있는 최대전류 피크값

위상오차  $\theta_{err}$ 가 0도에서  $\pm 90$ 도까지는 출력이 가능하지만, 그 이상일 경우에는 PWM 컨버터를 통해 제어불가능하게 되며, Fig.4에 위상오차에 따른 출력전류 및 출력전력에 대한 관계도를 제시한다. 그리고 수신측에 PWM 컨버터를 적용하여 입력전압과 삼각파와의 위상오차에 따른 출력전류 및 출력전력을

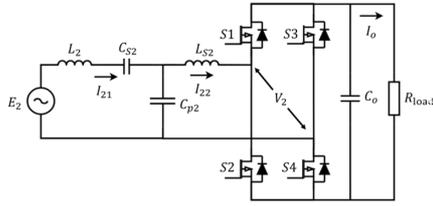


Fig.2 PWM converter of secondary side in LCC-LCC based WPT

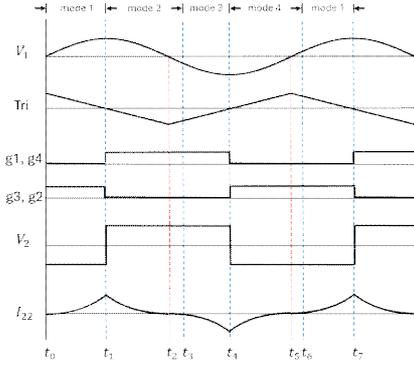


Fig.3 PWM 컨버터 게이트 신호 및 입력전압과 삼각파

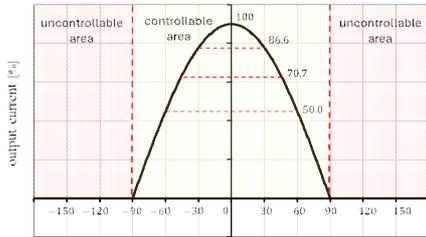


Fig.4 Output current relation according to phase error

Table 1. Output power relation according to phase error  $\theta_{error}$

$\theta_{error}$ [deg]	V1 [V]	$I_o$ [A]	Pin [W]	Pout [W]	efficiency [%]
-60	50	1.041	131.82	126.62	96.05
-30	50	1.945	393.62	379.55	96.42
0	50	2.246	524.69	505.86	96.41
30	50	1.945	393.62	379.55	96.42
60	50	1.047	131.82	126.62	96.05
90	50	0	1.07	0	0
180	50	-0.03	10.5	0.08	0.07

듀티비 0.5로 설정하여 바이폴로 스위칭기법으로 적용하였을 경우에 대한 관계 수치(입력전압, 출력전류, 입력전력, 출력전력, 효율 등)를 표 1에 제시하였으며 이는 Fig.4에 대한 이론적인 근거를 증명할 수 있다. 이에 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 전원의 위상정보를 검출하여 이를 토대로 삼각파신호를 동기화 시켜 최대전류가 흐를 수 있는 바이폴로 스위칭기법을 제안한다.

#### 4. 시뮬레이션 해석

LCC-LCC 기반 WPT 시스템에 있어서 수신측 PWM 컨버터에 대한 시뮬레이션 회로구성 및 사양은 Fig.5과 표 2에 보여준다. 검출한 고주파 입력전압의 위상정보를 토대로 삼각파신호의 위상을 가변하여 PWM 컨버터의 게이트신호를 바이폴로 스위칭기법으로 제어하도록 구성하였고, 출력전압을 검출하

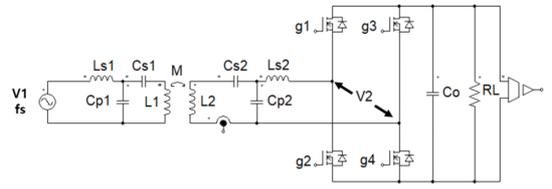
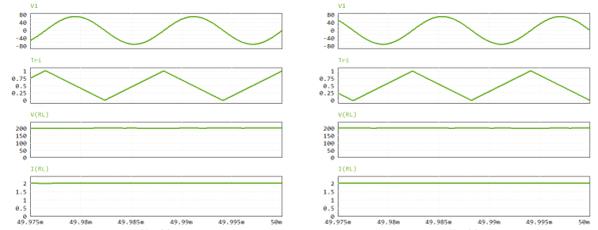


Fig.5 Simulation system configuration of secondary side PWM converter in LCC-LCC topology based WPT

Table 2. Simulation specification of LCC-LCC based WPT system

parameter	value	parameter	value
V1	50V	fs	85kHz
L1	36.4uH	L2	38.7uH
Ls1	11.7uH	Ls2	11.7uH
Cs1	140nF	Cs2	132nF
Cp1	300nF	Cp2	300nF
Co	47uF	M	3.75uH
k	0.1	RL (Rload)	100Ω



(a) phase error : 0[deg] (b) phase error : 180[deg]

Fig.6 Simulation results by proposed phase compensation algorithm based bipolar switching scheme

여 PI 전압제어기를 구성하고 이를 토대로 듀티비를 계산하였다. 즉 본 논문에서는 제안한 위상추정알고리즘기반 바이폴로 스위칭제어기법과 PI 전압제어기에 의해 최대출력이 가능하도록 하였으며, Fig.6을 위상오차에 관계없이 동일한 최대출력을 얻었음을 확인할 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 PWM AC/DC 컨버터를 적용한 LCC-LCC 기반 WPT 시스템에 있어서 입력전압과 삼각파신호의 위상오차에 따른 출력의 관계를 검토하였으며 입력전압의 위상에도 언제나 최대 출력을 얻을 수 있도록 위상추정알고리즘을 적용한 바이폴로 스위칭제어기법을 제안하였으며, 이에 대한 유효성을 PISM 시뮬레이션해석에 의해 검증하였다.

#### 참고 문헌

- [1] Ju-A Lee, Won-jin Son, Dong Hyeon Sim, Hyeonu Jo, Chae-Lyn Kim, and Byoung Kuk Lee, "Design of LCC-LCC-Compensated Bidirectional Inductive Power Transfer Systems for Electric Vehicles," in proceedings of KIEE Conference, pp.65-66, 2023.
- [2] Kyung-Ho Park, Yeong-Jun Choi, Hwa-Rang Cha, and Rae-Young Kim, "Modeling and Design of Double-sided LCC Wireless Power Transfer System with Semi-bridgeless Rectifier," in proceedings of Power Electronics Conference, pp.68-70, 2018.
- [3] X. Liu, Y. Wang, H. Chen, J. Mai, and D. Xu, "A Bidirectional WPT System Using Double-sided LCC Compensation Topology and Full-bridge Active Rectifier," in proceedings of 2022 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, pp.1-7, 2022.
- [4] Yujun Shin and Seungyoung Ah, "Principle of Power Transfer between Coils and the Method of Selecting Resonant Topologies in a Wireless Power Transfer System," The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, vol.33, no.7, pp.509-524, 2022.
- [5] Y. Shin, S. Woo, C. Lee, J. Rhee, S. Huh, and S. Ahn, "Determination of Current Ratio to Minimize Power Losses of Coils in Wireless Power Transfer system with Double-Sided LCC Topology," 2022 Wireless Power Week, Bordeaux, France, pp.95-98, 2022.