

# 전계결합형 무선전력전송을 위한 비대칭 하프 브릿지 PWM 컨버터 구조 연구

최희수, 정채호, 최성진  
울산대학교 전기공학부

## A Study on the Structure of Asymmetric Half-Bridge PWM Converter for Capacitive-coupled Wireless Power Transmission

Hee Su Choi, Chae Ho Jeong, Sung Jin Choi  
School of Electrical Engineering, University of Ulsan

### ABSTRACT

공진형 컨버터에서 일반적으로 소프트 스위칭과 같은 조건을 만족시키기 위해 주파수 제어를 많이 사용한다. 그러나 전계결합형 무선전력전송 시스템 특성상 이격 거리나 정렬 오차 정도 따라 송·수신부를 연결하는 링크 캐패시턴스 값이 민감하게 변한다. 이런 시스템에서는 공진 주파수 추종과 동시에 시비율 제어가 필요하다. 송신부 앞 또는 부하단에 dc/dc컨버터를 추가하는 2단 구성은 시스템 효율이 1단 구성에 비해 낮은 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 무선전력전송 시스템에 비대칭 하프 브릿지를 사용하여 시비율 제어와 주파수 추종제어를 할 수 있는 구조를 제안한다. 이는 시뮬레이션을 이용하여 검증한다.

### 1. 서론

최근 웨어러블 기기 등 각종 전자제품의 방수 기능 향상을 위해 일체형 배터리는 물론이고 충전단자도 없애는 제품들이 나오고 있다. 이러한 제품의 배터리 충전을 위해 무선전력전송이 필요하며 본 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 논문은 무선전력전송 방식 중 인체에 유해한 자기장 영향이 없고 시스템 제작비용이 비교적 저렴한 장점이 있는 전계결합형 무선전력전송을 사용한다.

전계결합형 무선전력전송 특성상 이격거리나 정렬 오차에 따라 그림 1의 송·수신부를 분리하는 링크 캐패시턴스 값이 민감하게 변하는데 이러한 시스템의 제어를 위해서는 기존의 주파수 제어보다는 시비율 제어와 동시에 주파수 추종제어가 필요하다. 본 논문에서는 이러한 제어를 위해 그림 2와 같은 구조를 제안한다. 이는 하프 브릿지와 벡 부스트 컨버터가 결합된 구조로 공진주파수 추종제어를 통해 시스템 역률을 최대로 하고 시비율 제어를 통해 출력 제어가 가능하다.<sup>[1]</sup> 일반적으로 공진주파수로 시스템 구동 시 ZVS가 되지 않아 스위칭 손실이 큰데, 제안 구조는 통합형 변압기의 1차측 자기 인덕턴스( $L_1$ ) 값을 조절하여 전체 시비율 범위에서 ZVS 조건이 성립한다는 장점을 가지고 있으며 이는 시뮬레이션을 통해 검증한다.

### 2. 제안 토폴로지 개요 및 동작원리

#### 2.1 시스템 개요

그림 2는 본 논문에서 제안하는 토폴로지이다. 제안 토폴로

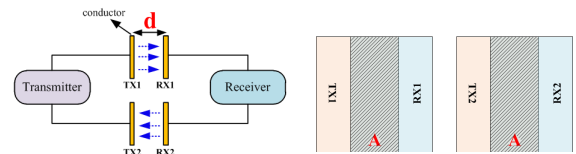


그림 1. 이격거리나 정렬도 변화에 따른 링크 캐패시턴스 변화

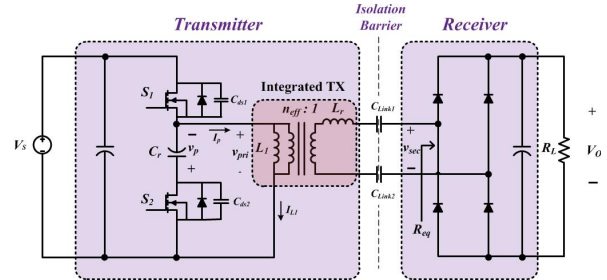


그림 2. 제안하는 전계결합 무선전력전송 구조

지는 기본적으로 벡 부스트 컨버터의 동작원리와 유사하며 MOSFET  $S_2$ 는 벡 부스트의 다이오드 처럼 구동된다. 여기서  $C_r$  캐패시터의 양단 전압  $V_p$ 는 식(1)과 같다. 벡 부스트와 하프 브릿지를 결합한 구조이기 때문에 시스템 출력전압( $V_o$ )이 기준 전압보다 낮은 경우 MOSFET  $S_1$ 의 시비율을 증가시키고 반대로 높은 경우  $S_1$ 의 시비율을 낮춰서 출력을 일정하게 제어한다. 여기서 출력전압은 식(2)와 같고 이는 시스템 기본과 해석을 통해 나온 결과이다.

$$V_p = \frac{D}{1-D} V_s \tag{1}$$

$$V_o = V_p \times \frac{2}{\pi} \times \sin(\pi D) \div n_{eff} \times \frac{\pi}{4} \tag{2}$$

그림 2를 보면 제안 구조에 인덕터 2개를 통합형 변압기 하나로 구성하였는데 여기서  $L_1$ 은 시스템 ZVS구동에 이용되고  $L_r$ 은 식(3)과 같이 시스템 공진에 이용된다. 통합형 변압기는 송신부 시스템 부피를 감소시킨다는 장점을 가지고 있으며 각 인덕터  $L_1, L_r$ 의 값은 통합형 변압기의 T등가회로에서 식을 유도해보면 각각 식(4)와 (5)처럼 나온다.

$$f_{sw} = f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r (C_{link1} \parallel C_{link2})}} \tag{3}$$

$$L_1 = \frac{L_m}{k^2} \tag{4}$$

$$L_r = (1 - k^2) L_2 \tag{5}$$

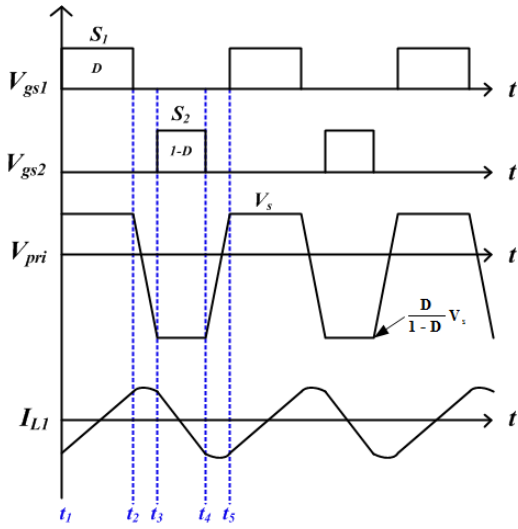


그림 3. 주요 동작 파형(D > 0.5)

여기서  $L_m$ 은 변압기 자화 인덕턴스이고,  $L_2$ 는 2차측 자기 인덕턴스,  $k$ 는 변압기 결합계수이다. 실제 변압기 제작 시,  $L_1$ 은 1차측과 2차측 코어 사이의 간격을 이용하여 조절하며,  $L_r$ 은 1차측과 2차측 와이어 사이의 간격을 이용하여 조절한다<sup>[2]</sup>.

## 2.2 시스템 동작원리

그림 3은 시스템 주요 동작 파형이다. 먼저  $t_1$ 에서  $t_2$ 구간을 보면  $S_1$ 이 켜져있고  $S_2$ 는 꺼져있으며  $L_1$ 의 전류는 식(6)과 같이 선형적으로 증가하며  $S_2$ 의 기생 캐패시터 전압과  $V_{pri}$  전압은 식(7)과 같다.

$$\Delta I_{L1(Son)} = \frac{V_s D}{L_1 f_{sw}} \quad (6)$$

$$V_{ds2} = \frac{1}{1-D} V_s, \quad V_s = V_{pri} \quad (7)$$

$t_2$ 구간에서  $t_3$ 구간을 보면  $S_1$ 과  $S_2$ 가 꺼져있고, 이 구간에서는  $t_1$   $t_2$ 구간에서 인덕터( $L_1$ )에 저장된 에너지를 이용하여  $S_2$  기생 캐패시터의 에너지를 제거하며 이로 인해 ZVS가 가능하게 한다. ZVS 구동에 필요한  $L_1$ 의 인덕턴스는 식(8)을 이용해 구할 수 있다.

$$L_1 \leq \frac{D(1-D) T_{dead}}{4 f_{sw} C_d} \quad (8)$$

여기서  $T_{dead}$ 는  $t_2$   $t_3$ 구간의 시간(sec)을 말하고  $C_d$ 는  $S_1$ 과  $S_2$ 의 기생 캐패시터의 합( $C_{ds1}+C_{ds2}$ )을 말한다.  $t_3$ 구간에서  $t_4$ 구간을 보면 ZVS 조건에서  $S_2$ 가 켜지고  $L_1$ 의 전류는 식(9)와 같이 선형적으로 감소하며  $V_{pri}$ 전압은 식(10)과 같다.

$$\Delta I_{L1(Soff)} = \frac{1-D}{L_1 f_{sw}} V_p \quad (9)$$

$$V_{pri} = V_p \quad (10)$$

$t_4$ 에서  $t_5$ 구간은  $t_2$   $t_3$ 구간과 동일하게 구동되며 여기서 다른점은 인덕터( $L_1$ )에 저장된 에너지가  $S_1$  기생캐패시터의 에너지를 제거한다는 점이다.

## 3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 사양이 설계사양이 입력전압( $V_s$ ) 150V, 출력전력( $P_o$ ) 50W, 링크 캐패시턴스( $C_{link}$ ) 1nF, 부하저항( $R_L$ ) 200Ω

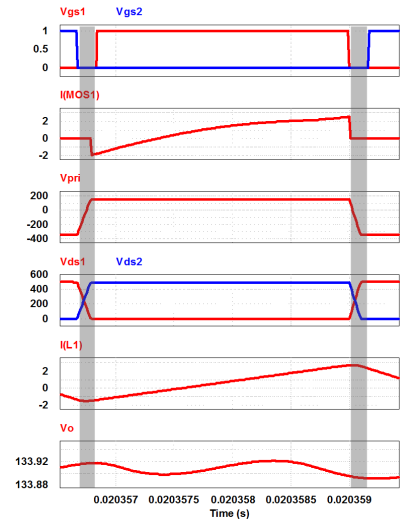


그림 4. 제안하는 토폴로지의 시뮬레이션 결과(D = 0.7)

이고 턴 비  $n_{eff}$ 가 1.5, 공진주파수가 300KHz 일 때 통합형 변압기의  $L_r$ 은 식(3)에 의해 281uH가 나왔고,  $L_1$ 은 식(8)에 의해 120uH보다 작은 80uH로 선정하였다. 그리고  $C_r$ 값은 330nF으로 설계하였는데 그 이유는  $L_1$ 과  $C_r$ 의 공진주파수가 식 (3)의 스위칭주파수 보다 낮게 하여  $V_{pri}$ 의 음의 전압이 공진현상을 나타내지 않게 하기 위해서이다. 그 결과 그림 4는 제안하는 토폴로지의 시뮬레이션 결과이고 시뮬레이션 시, 송신부 MOSFET은 SiC MOSFET(C3M0065090D)을 선정하여 ZVS가 성립하는지 확인하였고 나머지 소자는 모두 이상적인 소자를 사용하였다. 그 결과 시스템 구동 시 ZVS가 성립하는 걸 확인할 수 있고 출력전압 역시 식(2)에 설계사양 대입 결과와 동일하게 나왔다.

## 4. 결론

본 논문은 전계결합을 위한 컨버터 구조 연구로 벅 부스트 컨버터와 하프 브릿지 구조를 결합한 토폴로지를 제안하였다. 제안 토폴로지는 공진 주파수 추종제어를 하여 공진점에서 시스템이 구동되게 하여 시스템 역률을 최대로 올릴 수 있고, 시비율을 조절하여 출력전압을 일정하게 제어할 수 있다는 장점이 있다. 뿐만 아니라 인덕터 2개를 통합형 변압기 하나로 사용하여 송신부 부피를 절감하였고, 전체 시비율 범위에서 ZVS가 성립 가능하다는 이점이 있다. 본 논문의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 향후 실제 하드웨어를 구성하여 제안 토폴로지의 타당성을 검증할 예정이다.

## 참고 문헌

- [1] Myeong Hwan, Yu (2006). "A New Piezoelectric Transformer Driving Topology for Universal Input PWM Control AC/DC Adapter", Master's Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea 75pages.
- [2] S. De Simone, C. Adragna and S. Spini, "Design Guideline for Magnetic Integration in LLC Resonant Converters," ISPE, pp.950 957, Jun. 2008.