

# E급 증폭기를 이용한 전계결합형 비접촉 충전회로의 설계

최병우, 최성진  
울산대학교 전기공학부

## Design of Capacitively-coupled Contactless Charging System using Class-E Amplifier

Byungwoo Choi, Sungjin Choi  
School of Electrical Engineering, University of Ulsan

### ABSTRACT

전기장만으로 에너지를 전송하는 전계결합형 비접촉 충전기술은 송수신부를 매개하는 AC링크를 구성하는 전극쌍의 정전용량 확보에 한계가 있으므로, 이를 잘 활용하기 위한 송수신회로가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 이를 감안하여 전계결합형 에너지전송에 적합한 매칭변압기를 사용한 E급 송수신회로 구조를 제안한다. 제안된 구조에서 AC 링크 캐패시터의 낮은 정전용량을 감안한 최적 설계방식을 제안하고 회로설계에 따른 성능을 모의실험을 통해 예측한다.

### 1. 개요

최근 모바일기기의 편리한 충전이라는 화두로 무선충전방식이 제품화 되고 있다. 호환성을 감안할 때 사실상의 표준은 Wireless Power Consortium에서 제안한 Qi 호환방식으로서 이는 전자기유도원리에 기반한 송신부와 수신부간 자기결합(Inductive Coupling) 방식이다. 하지만, 여러 가지 장점에도 불구하고, 페루프 특성을 가지는 자기장 경로에 수신부 회로가 노출되기 때문에 EMI 차폐가 필요하다는 점, 금속물과 의 간섭이 심하다는 점, 수신부 코일구조의 박형화가 용이치 않다는 점 등의 단점을 극복할 대체 기술연구가 진행되고 있다.

한편, 전계결합(Capacitive Coupling) 방식은 전자과파계나 인체유해성, EMI특성등에서 강점을 가지는 방식으로서 활발히 연구가 진행되고 있다. 전계결합방식에서는 송수신부의 접점에 구성할 수 있는 AC 링크 캐패시턴스 값을 많이 확보할수 없다는 점이 가장 문제이다. 낮은 캐패시턴스는 공진회로에서 지나친 공진양호도(Quality factor)를 유발하여 부하변동에 따른 민감도를 크게 만들고 시스템의 제어를 어렵게 만드는 문제가 있다. 이를 극복하기 위해서는 구조적인 설계나 유전재료 개발로 캐패시턴스 값을 증가시키거나 회로설계방식으로 이를 해결해야 한다.<sup>[1][2]</sup>

이에, 본 논문에서는 확보가능한 수준의 낮은 AC링크 캐패시턴스값을 사용하되, 높은 동작주파수에도 고효율을 가지는 E급 증폭기를 송수신회로로 채택하여, 2.5W급 모바일기기의 배터리를 충전할 수 있는 송수신회로를 설계하고 이를 시뮬레이션 검증한다.

### 2. 제안하는 E급 송수신 회로

### 2.1 AC-링크 캐패시터 형상 및 실측값

본 논문에 사용할 링크캐패시터는 다음과 같다. 공간의 제약을 생각할 때 하나의 전극에 확보가능한 크기는 10cm x 10cm 라고 가정하고, 이격거리는 PVC 투명필름으로 이격거리 0.5mm를 확보하였다. PVC의 비유전율  $\epsilon_r = 3$ 을 고려할 때 약 531pF의 이론치가 계산 된다. 실제로 캐패시턴스 값을 측정할 결과 100kHz 동작주파수에서 430pF이 측정 되었고, 이때 손실계수는 0.0165로 측정되었다. 본 논문에서는 이 측정값을 사용하도록 한다.

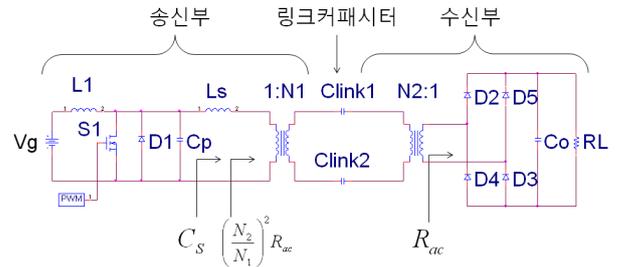


그림 1 전계결합형 비접촉에너지전송을 위한 E급 송신부 및 수신부 회로

Fig. 1 Class-E converter for Capacitively-Coupled Energy Transfer

### 2.2 매칭 변압기형 E급 송수신 회로

본 논문에 사용할 E급 DC/DC 컨버터는 그림 1과 같다. 먼저 송신부 회로의 입력 DC 전압은  $V_g$ 이며, PWM 게이트펄스로 MOSFET 스위치  $S_1$ 을 구동하였다.  $D_1$ 은 MOSFET내부에 형성된 다이오드를 표시한다.  $C_p$ 은 주 스위치의 소프트 스위칭을 위한 공진 캐패시터로서, MOSFET 스위치  $S_1$ 의 출력캐패시턴스를 포함하는 값이다.  $L_{dc}$ 는 DC 초크 코일이며,  $L_s$ 는 직렬 공진 캐패시터이다. 한편,  $C_{Link}$ 는 전계결합을 위한 AC 링크 캐패시터이자 공진캐패시터를 나타낸다. 실제로 링크캐패시터는 전류 회수 경로를 포함하여 그림 1과 같이 총 2개소에 구성되므로 송수신부간의 완전한 정렬이 일어났을 경우를 가정하면, 유효 캐패시턴스 값은 개별 링크 캐패시터값의 절반으로 계산된다. 또한 지나치게 낮은 유효캐패시턴스 값에 의해 불필요한 동작주파수 상승을 억제하기 위해서 공진인덕터와 전극사

이에 임피던스 변환용 권선비  $1:N_1$ 의 변압기를 삽입하였다.

출력 DC 부하는  $R_L$ 로 모델링하였다. 수신부 회로는 브리지 정류다이오드와 캐패시터 필터  $C_O$ 를 사용하였다. 출력부 입력 단에는 송신회로의 ZVS조건을 만족하는 공진양호도  $Q_L$  값을 보장하기 위해서 권선비  $N_2:1$ 의 임피던스 변환용 변압기를 삽입하였다. 이때, 대부분의 경우  $Q_L$ 은 5이상 값을 가지므로, 직렬공진 탱크에 흐르는 전류는 정현파가정으로 기본과 해석을 할 수가 있다. 특히 정류다이오드의 동작에 의해 출력전압의 위상은 공진탱크 전류의 위상과 같은 위상이므로 정류단 부하는 AC등가 저항으로 모델링 할 수 있다.

### 2.3 동작원리 및 회로설계절차

문헌 [3]의 E급 인버터 설계식을 활용하면, 듀티비 0.5를 가정할 때의 스위치 ZVS 구간을 만족하는 매칭 부하임피던스는 다음 식에 의해 구할수 있다.

$$R_i = \frac{8}{\pi^2 + 4} \frac{V_i}{P_{Ri}} \quad (1)$$

이때  $Q_L$ 이 충분히 크다고 가정하면, 다음 식에 의해 인덕턴스  $L_S$  값, 병렬 캐패시턴스  $C_P$  및 공진 캐패시턴스  $C_S$ 값 및 DC 초크 인덕턴스 값을 구할 수 있다.

$$L_S = \frac{Q_L R_i}{2\pi f} \quad (2)$$

$$C_P = \frac{8}{2\pi^2(\pi^2 + 4)fR_i} \quad (3)$$

$$C_S = \frac{1}{2\pi f R_i (Q_L - \pi(\pi^2 - 4)/16)} \quad (4)$$

$$L_{dc} = 2 \left( \frac{\pi^2}{4} + 1 \right) \frac{R_i}{f} \quad (5)$$

한편, 전류구동형 정류기의 부하임피던스대비 등가AC임피던스는 기본과가정을 사용하여 다음과 같이 얻어지고,

$$R_{ac} = \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (6)$$

특히 전계결합시스템에서 개별 AC 링크 캐패시턴스 값을  $C_{Link}$ 라고 하면, 두 개의 매칭 변압기의 권선비의 설계식은 다음과 같다.

$$N_1 = \sqrt{\frac{C_S}{C_{link}/2}} \quad (7)$$

$$N_2 = N_1 \sqrt{\frac{R_i}{R_{ac}}} \quad (8)$$

## 3. 설계 및 시뮬레이션 검증

### 3.1 설계 내용

설계스펙은 다음과 같다. 입력전압  $V_g = 12V$ 로 두고 부하측 배터리를 충전하는 회로인 Buck 컨버터에  $5V / 500mA$ 를 공급한다고 가정하면, 최대부하전력은  $P_{L,max} = 2.5W$ 이다. 게이트 구동회로의 동작주파수는  $200kHz$ , 듀티비는 0.5로 하였다. 앞서 측정된  $C_{Link} = 430pF$ 의 측정값을 사용하고  $Q_L$ 값으로 5를 가정하여 식(1) (8)을 통해  $R_i = 33.2\Omega$ ,  $L_S = 132\mu H$ ,  $C_P = 4.4nF$ ,

$L_{dc} = 1.2mH$ ,  $N_1 = 5.4$ ,  $N_2 = 10.9$ 를 얻는다.

### 3.2 시뮬레이션 검증

그림 2는 PSIM을 이용한 시뮬레이션 파형이다. 설계된 회로를  $200kHz$ 에서 시뮬레이션 하였을 때는 출력전압  $5.3V$ 를 얻었으나, 설계식의 가정에 의한 오차 때문에 스위치가 닫힐 때 스위치 양단 전압이 약  $2V$ 정도 상승하여 완전한 ZVS가 되지 않았다. 따라서  $204kHz$ 로 동작주파수를 약간 상향 이동하여 동작시켰을 때, 그림2와 같은 완전한 ZVS파형을 얻을 수 있었으며, 출력전압은 약  $4.5V$ 를 얻을 수 있었다. 그림에서 스위치 양단전압을 보면 게이트 온 시간에 영전압 스위칭을 하고 있으며, 다이오드 전류 또한 0이 되기 때문에 스위치 병렬 다이오드의 영전류 스위칭도 동시에 달성함을 알 수 있다.

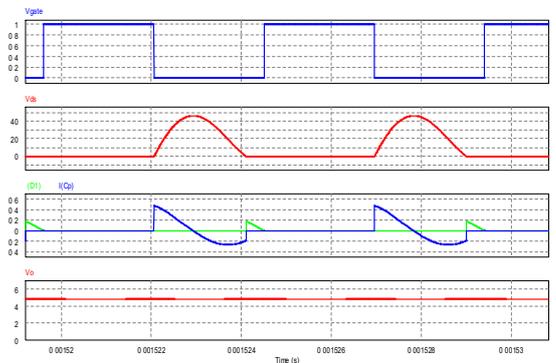


그림 2 시뮬레이션 파형 (게이트파형, 드레인소스전압, 다이오드전류 및 병렬캐패시터 전류, 출력DC전압)

Fig. 2 Simulation waveforms (gate, drain-source voltage, diode current and parallel capacitor current, dc output voltage)

## 4. 결론

본 논문에서는 전계결합형 송수신회로에 적합한 구조로서 매칭변압기를 포함한 E급 DC/DC컨버터 및 그 설계과정을 제시하였다. 제안된 설계과정을 2.5W급 충전 회로 부하를 대상으로 적용하여 그 동작을 시뮬레이션 검증한 결과 송신회로가 ZVS 조건을 만족하면서 부하에 전력전달을 하는 것을 확인하였다. 현 상태로는 전극이 완전히 정렬된 상태에서 풀부하 조건만 고려하였으나, 향후 후속연구를 통해 전극의 정렬과 부하조건이 변할 때의 제어방법을 고안하고, 하드웨어로 전체시스템의 성능을 검증할 것이다.

## 참고 문헌

- [1] 이강현, “무선전력전송 자기공명방식과 커패시티브 커플링 방식”, KPE Magazine, pp.37-41, 2013. 4월호
- [2] C. Liu, A. P. Hu, and N. K. C. Nair, “Modelling and analysis of a capacitively coupled contactless power transfer system,” IET Power Electronics, vol. 4, no. 7, pp.808-815, 2011
- [3] M. K. Kazimierczuk, and D. Czarkowski, Resonant Power Converters, John Wiley & Sons Inc., pp. 347-378, 1995