

# 공진주파수 자동튜닝 무선전력전송 정류기

안덕주<sup>1</sup>, Saidul Alam Chowdhury<sup>2</sup>

1. 인천대학교, 2. University of Auckland

## Automatic resonance tuning rectifier for wireless power transfer

Dukju Ahn, and Saidul Alam Chowdhury

1. Incheon National University, 2. University of Auckland

### ABSTRACT

일반적으로 급전 인버터 스위칭 주파수가 2차측 공진주파수와 다를 때 detuning에 의해 전송효율이 저하된다. 스위칭 주파수가 detuning되었을 때 2차측 공진주파수를 자동으로 튜닝하는 병렬공진형 정류기를 제안한다. 제안된 정류기는 추가적인 스위치나 튜닝 캐패시터 on/off 없이 자동으로 공진주파수 튜닝을 유지한다. 구체적으로, 정류기 on/off 타이밍을 1차측 전류 위상에 맞춰 주면 특별한 제어 없이 자동으로 공진주파수가 튜닝된다. EMI 저감을 위한 Spread Spectrum 시스템에 적용되어 검증되었다. 2.2~3.3 kW 정전류 출력 무선충전 시스템에 적용되었으며, 2.2 kW의 경우 효율이 3.5~8.1% 포인트 향상되었다.

### 1. 서론

무선충전의 2차측 공진주파수는 스위칭 주파수와 일치해야 한다. 하지만 특정 경우 (특히 스프레드 스펙트럼)에서는 스위칭 주파수가 계속적으로 변화하므로 2차측 공진주파수 또한 변화해야 한다. 기존의 방법들은 직렬공진형 2차측에만 사용되어 왔다. 병렬공진형 2차측에 사용가능한 몇 가지 방법들이 있었지만 추가적인 소자 개수가 매우 많이 늘어나는 문제점이 있다.

본 논문에서는 추가적인 전력 및 수동소자들을 사용하지 않고 정류기의 스위칭만을 통해 공진주파수를 자동으로 가변하는 방법을 제안한다.

### 2. 리액턴스 생성 정류기

그림 1은 제안된 정류기를 나타낸다. 다이오드 대신 동기식 정류기를 위한 MOSFET이 추가된다. 기존의 정류기들도 전력손실 저감을 위해 동기식 MOSFET을 사용하는데, 이것들과 회로가 같다. 즉 추가적인 수동소자 및 반도체소자 없이 공진주파수 조절이 가능한 것이다.

스위칭  $V_{g1}$ ,  $V_{g2}$ 의 위상은 1차측 코일전류  $i_p$ 와 동기위상이 되도록 고정되는 것 이외에 추가적인 제어가 필요 없다.

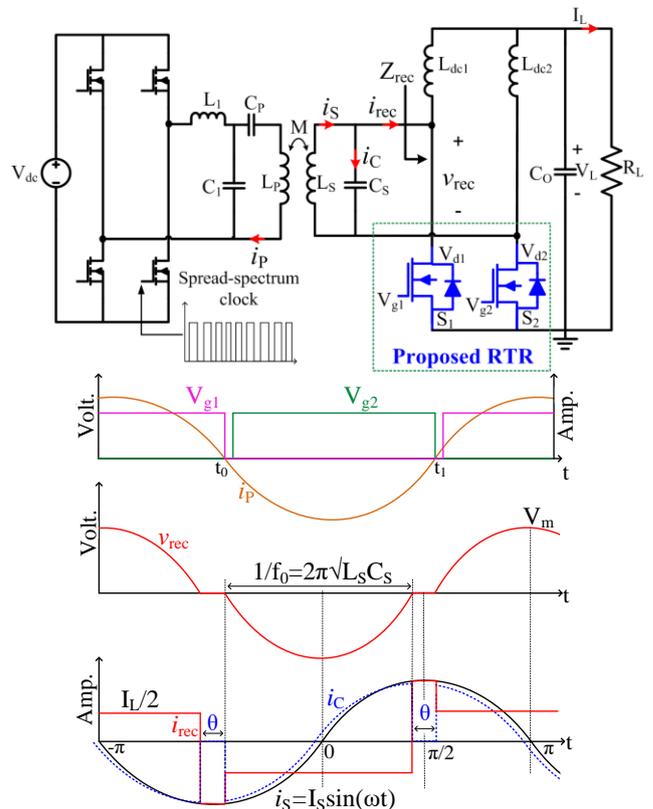


그림1 제안된 공진주파수 자동튜닝 정류기

2차측 공진주파수가 스위칭 주파수보다 빠를 때  $v_{rec}$ 의 free running 주기는 스위칭 주기보다 짧아진다.  $\theta$  만큼의 시간차가 생기게 되며 이 때  $i_{rec}$  전류는  $i_s$  전류를 모두 수용하게 되어 커진다. 이제  $v_{rec}$  전압과  $i_{rec}$  전류의 위상을 비교해 보면,  $i_{rec}$  전류 위상이 빠르다. 따라서 capacitive 임피던스를 생성하게 된다.

그림 2는 스위칭 파형을 나타낸다. 켜질때 zero-voltage switching을 하며, 꺼질 때는  $dv/dt$ 가 작아서 전압-전류 overlap이 매우 작다. 즉 스위칭 손실은 0에 가깝다.

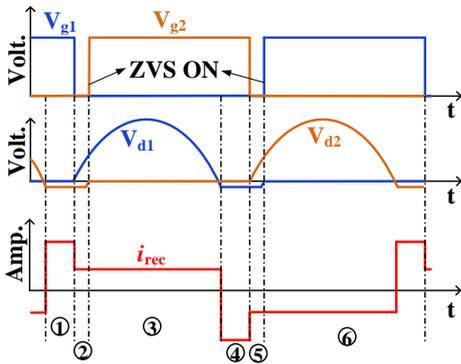
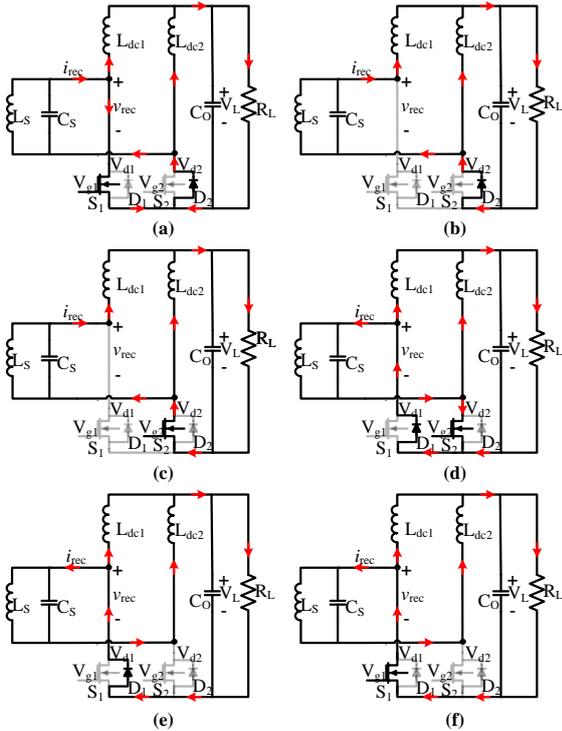


그림2 스위칭 sequence와 파형

### 3. 측정 결과

그림 3은 각각 2.2 kW와 3.3 kW 측정 셋업을 나타낸다.

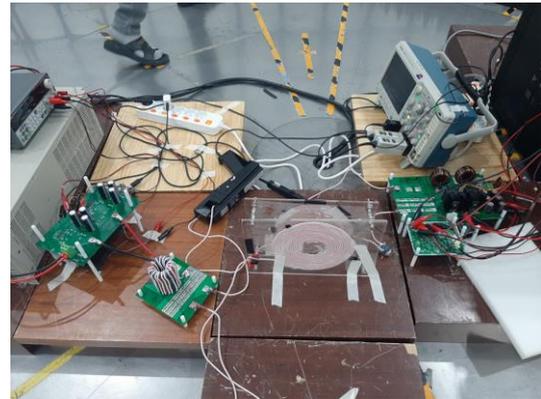
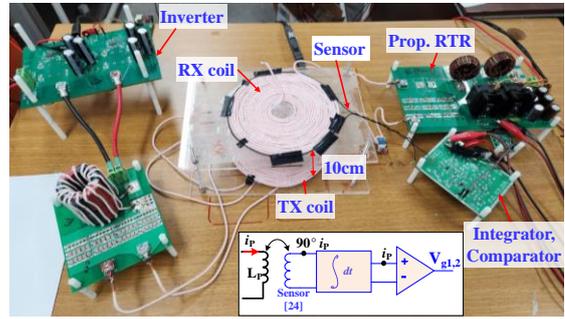


그림3. 실험 셋업 (상: 2.2 kW, 하: 3.3 kW)

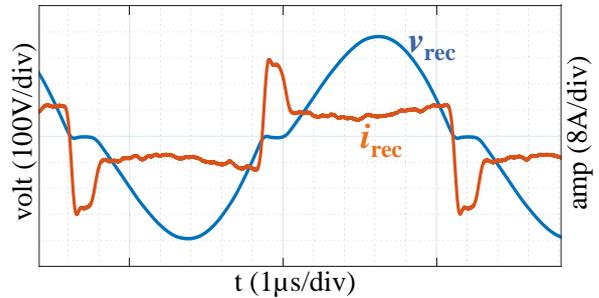
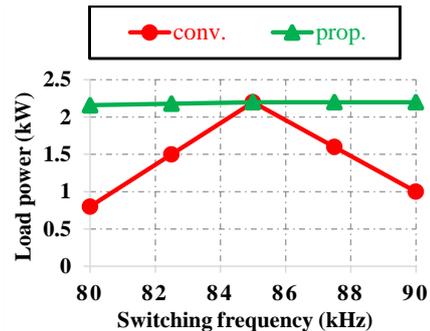


그림4 정류기 전압-전류 파형

그림 4는 측정된 전류와 전압 파형으로 그림 2의 이론적 파형과 동일하게 측정된다. 전류의 위상이 전압보다 빠르며 따라서 capacitive 임피던스를 생성한다. 공진주파수가 변화하더라도 제어신호는 바꿀 필요 없이 고정되며,  $i_{rec}$ 의  $\theta$  값이 자동적으로 조절되어 공진주파수가 항상 튜닝된다.



(a)

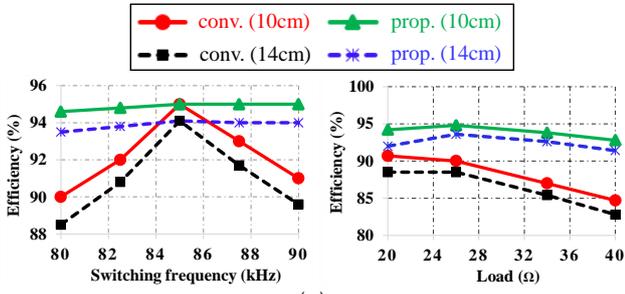


그림5 (a) 측정 전력 (b) 측정 효율

그림 5는 측정된 전력과 효율이다. 기존 시스템에서는 스위칭 주파수가 바뀌면 전력과 효율이 떨어진다. 이것은 2차측 공진주파수가 85 kHz로 고정되어 있는데 스위칭 주파수가 바뀌었기 때문에 detuning이 되었기 때문이다. 이로 인해 여분의 reactance가 2차측에 남아있고 2차측의 역률이 떨어진 것이다. 따라서 1차측 인버터에서 동일한 전류구동을 할 때 부하전력이 떨어지게 된다. 결과적으로 효율도 감소한다.

하지만 제안된 2차측 구조는 2차측 공진주파수를 항상 보정하므로 역률이 최대화된 상태를 유지하여 전력과 효율이 주파수에 상관없이 향상된다.

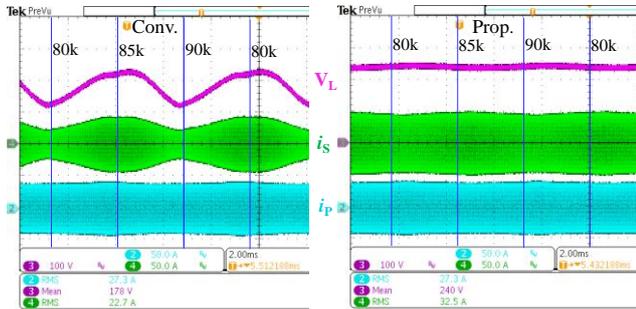


그림6 좌: 공진주파수 튜닝 없을 때. 우: 제안된 튜닝

그림 6과 7은 spread spectrum 동작을 할 때의 파형과 전자파 방사 스펙트럼이다. 기존 시스템에서는 주파수가 80 kHz와 90 kHz인 순간에 부하전압이 순간적으로 떨어진다. 2차측 공진회로가 85 kHz에 고정된 튜닝이 되어있기 때문이다. 하지만 제안된 자동튜닝 정류기에서는 주파수가 변화하더라도 부하전압이 일정하게 유지된다. 전자파 방사 스펙트럼을 살펴보면 spread spectrum 동작은 스펙트럼을 피크치를 낮춤을 알 수 있다.

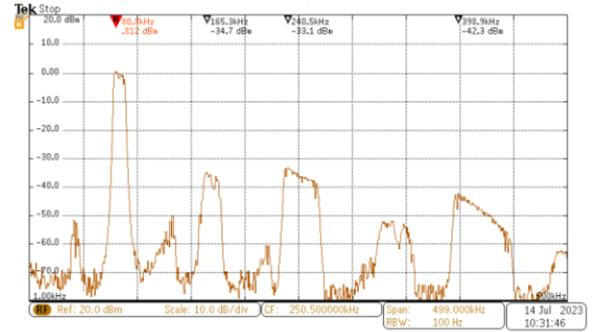
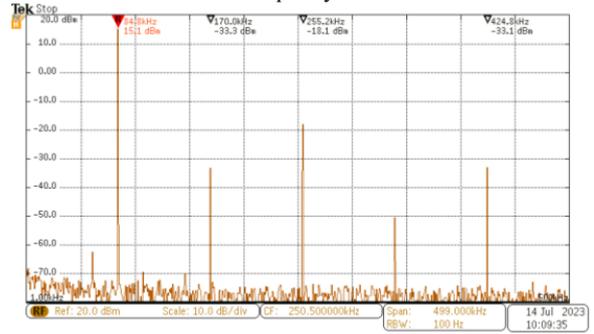


그림7 상: spread spectrum 없을 때, 하: spread spectrum 적용 시 전자파 방사 스펙트럼

### 3. 결론

일반적인 무선충전 시스템은 1차측 스위칭 주파수가 2차측 공진주파수로부터 달라졌을 때 주파수 차이에 의해 reactance가 발생되고 효율이 떨어진다. 본 논문에서는 공진주파수 mismatch에 자동으로 반응하여 적절한 리액턴스를 생성하여 튜닝을 항상 유지해 주는 새로운 정류기를 제안하였다. 2.2~3.3 kW 시스템에서 검증되었다.

이 논문은 IITP No.2022-0-00452와 한국연구재단 2022R1F1A1062679 의 연구비 지원을 받음.

### 참고 문헌

- [1] S. A. Chowdhury et al., "Resonant Tuning Rectifier for Parallel Compensated Receivers in Wireless Power Transfer", IEEE Trans. Ind. Electron.
- [2] S. A. Chowdhury et al., "Automatic Tuning Receiver for Improved Efficiency and EMI Suppression in Spread-Spectrum Wireless Power Transfer", IEEE Trans. Ind. Electron.