

# 스위칭 주파수의 자속을 사용한 능동 무선 전력 전송 제어와 PWM 기법

이준, 홍진수, 하정익  
서울대학교 전기정보공학부

## Active Control and PWM Method for Wireless Power Transfer Using Flux of Switching Frequency

Jun Lee, Jin Su Hong, Jung Ik Ha  
School of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

### ABSTRACT

이 논문은 스위칭 주파수의 자속을 사용한 무선 전력 전송 방법을 제안한다. 제안된 시스템의 수신단은 정류기를 사용하지 않고 유도된 전압과 같은 주파수의 스위칭을 하며 다른 위상으로 코일에 전압을 인가하여 필요한 만큼의 전력을 (송)수신한다. 이와 함께 전원단과 수신단의 코일에 흐르는 전류가 전기기기의 구동 목적으로도 쓰일 수 있도록 저주파의 평균 전류 지령을 각각 수행할 수 있는 PWM 방식을 제안한다.

### 1. 서론

오늘날 전기기기는 고효율과 고출력밀도를 달성하며 점차 다양한 분야에 적용되어지고 있다. 그러나 전기기기는 로봇팔과 같이 여러 연결된 강체를 가지는 시스템에서 주전원이 포함된 부위를 제외한 다른 곳들에 별도의 전원장치가 연결되어야 한다는 한계를 갖고 있다. 주전원으로부터 가장 먼 곳에 있는 전기기기의 구동을 위해서는 길다란 전선선이 여러 관절을 거쳐 설치되어야 하는데 이러한 구조는 마모나 접촉 불량 등의 문제에 취약하여 시스템의 안정성을 저하한다.

이 논문에서는 전기기기의 일반적인 구동을 위한 전류제어 기능을 유지하며 스위칭 주파수의 자속을 이용하여 수신단이 능동적으로 전력을 수신하는 방법을 제안한다. 전원단과 수신단은 각각 바이폴라 스위칭을 하여 스위칭 주파수에 비해 낮은 주파수의 (평균) 전류를 제어한다. 이와 함께 수신단 코일에 인가된 전원단 전압에 대한 수신단 전압의 위상을 조절하여 수신단이 받는 전력의 크기를 조절한다.

### 2. 능동 무선 전력 전송 기법

#### 2.1 전원단과 수신단의 평균 전류 제어

전기기기는 구동을 위해 고정자와 회전자(혹은 mover)가 생성하는 자속을 구동 목적에 따라 합성한다. 회전자에도 권선을 감아 구동되는 이중 인버터 구동형 기기들의 경우에는 회전자 측의 인버터가 고정자 측과 다른 전원을 사용하여 전류를 제어해야만 한다. 만약 전력과 지령이 회전자 측에 잘 전달이 되었다면 회전자 측 인버터가 회전자 전류를 제어하는 것은 고정자 측의 전류 제어와 다를 것이 없다. 따라서 양 측의 전류 제어 기법은 주어진 전류 지령을 수행하며 본 논문의 목표인 전력 전달을 할 수 있는 조건을 만족하도록 하면 된다.

전력 전달을 전류제어와 함께 하기 위해 필요한 조건은 바

로 평형상태에서 자속의 변화가 많도록 하는 것이다. 무선 전력 전송은 송신단과 수신단을 모두 통과하는 자속이 많이 변하는 것이 기본 조건이 되기 때문인데 이를 위해서는 그림 1에 도시된 것과 같은 바이폴라 스위칭이 적합하다.

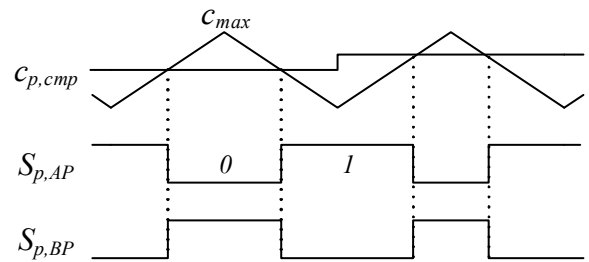


그림 1 바이폴라 스위칭 기법의 원리  
Fig. 1 Principle of bipolar switching method

그림 1에서 가장 위 부분은 PWM 캐리어와 비교 값을 보여주고 있으며  $S_{AP}$ 는 코일에 연결된 H bridge에서 A leg의 위상 스위치의 스위칭 함수를 의미한다. 캐리어와의 비교 값인  $C_{p,cmp}$ 가 클수록 A leg의 폴에 인가되는 전압이 B leg보다 커지게 된다. 이렇게 합성된 전압은 캐리어보다 180도 앞서서 전압과 90도 앞서서 전류(자속)를 합성한다. 수신단의 코일에는 유도된 전압과 수신단의 인버터가 합성한 전압이 위상이 서로 다르게 인가되고 있기 때문에 평균 전류는 캐리어의 최저점과 최고점에서 센싱한 값을 반씩 취하는 FIR을 사용하는 것이 적합하다.

#### 2.2 수신단의 능동 전력 전송(수신) 제어

송신단(고정자)과 수신단(회전자) 측 인버터들이 사용하는 각 전원의 전압이 충분히 크다면 양 측의 스위칭 duty는 50% 부근에 있게 된다. 여기에 양 측의 전압 위상차를 이용하여 전력을 송수신하는 DAB(dual active bridge) 기술을 적용하여 수신단이 능동적으로 전력을 수신하도록 할 수 있다. DAB의 전력 전달에 대한 선행 연구 중 양측 PWM 위상 변화에 따른 전달 전력의 변화가 단조 증가 함수임을 확인한 것이 있는데 이 특성을 사용하여 능동 전력 수신 제어를 구현할 수 있다 [2]. 수신단 축전기의 전압 지령과 측정된 전압 값의 오차에 의해 위상이 조절되는 PI제어기를 사용하여 수신 전력 제어를 그림 2와 같이 구성할 수 있다.

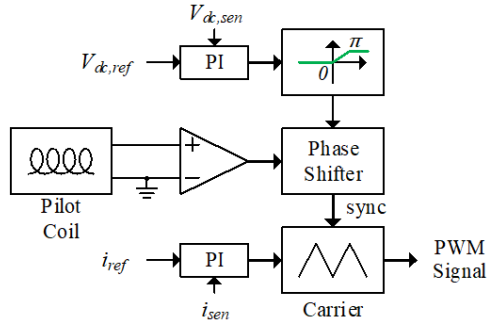


그림 2 제안된 능동 전력 수신 방법과 평균 전류 제어 방법을 함께 나타낸 제어 블록 다이어그램  
Fig. 2 Control block diagram depicting the active power receiving method with average current control method

전압(전력) 제어기의 이득(gain)을 작게 두어 PWM의 위상이 천천히 바뀌게 한다면 평균 전류 제어는 거의 영향을 받지 않고 이루어질 수 있게 된다. 제안된 DAB 방식의 전력 전달은 양 인버터의 PWM 캐리어 사이의 위상을 조절하는 것으로 수신단에 송신단의 PWM 주기와 위상을 알아야 한다. 이를 위하여 수신단에 적은 턴수를 갖는 별도의 코일을 감고 이것에 송신단 인버터가 유도한 전압(의 부호 변화)을 동기화 신호로 사용할 수 있다. 혹은 PLL을 사용하여 송신단의 PWM 주기와 위상을 함께 알기 위한 선행연구 방식을 적용할 수 있다[2].

### 2.3 시뮬레이션을 통한 제안된 제어 방식의 검증

제안된 능동 전력 전송 방법과 평균 전류 제어가 잘 이루어지는지 확인하기 위하여 PSIM 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위하여 그려진 회로는 그림 3과 같으며 사용된 변수들은 표 1에 나타나있다.

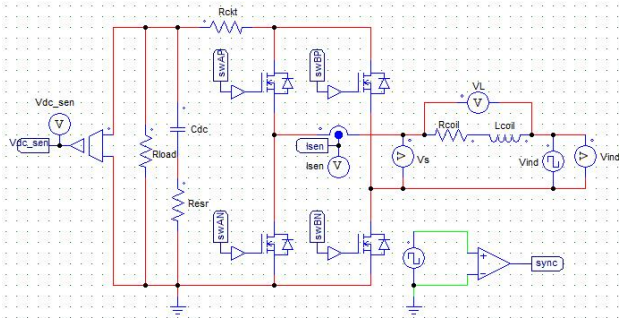


그림 3 능동 전력 수신 및 평균 전류 제어 시뮬레이션 회로  
Fig. 3 Simulation circuit of active power receiving and average current control

표 1 시뮬레이션에 사용된 변수들의 값

Table 1 Values of variables used in the simulation

| Variable                        | Value         | Variable     | Value              |
|---------------------------------|---------------|--------------|--------------------|
| $f_{sw}$                        | 20 kHz        | $V_{fwd}$    | 1.1 V              |
| $V_{ind}$                       | 12 V          | $K_{cp}$     | 1.26 V/A           |
| $R_{coil}, R_{ckt}, R_{dc,csr}$ | 0.1 $\Omega$  | $K_{ci}$     | 12570 V/As         |
| $L_{coil}$                      | 100 $\mu$ H   | $K_{vp}$     | 2 rad/V            |
| $C_{dc}$                        | 200 $\mu$ F   | $K_{vi}$     | 2000 rad/Vs        |
| $R_{ds,on}$                     | 0.15 $\Omega$ | $V_{dc,ref}$ | 25 V               |
| $R_{load}$                      | 312 $\Omega$  | $I_{ref}$    | 1sin(240 $\pi$ ) A |

시뮬레이션 결과는 그림 4에 나타나있다. 측정된 전류는 여기가 40kHz로 캐리어의 최고점과 최저점에서 변할까 센싱한 전류를 평균내어 얻은 값이다. 2 W의 부하와 동손들을 감당하며 120 Hz의 평균 전류제어와 전압제어가 함께 잘 수행된 것을 확인하였다. 위상 값이 계속 변하는 것은 steady state에 접어들지 못한 것이 아니고 전류에 의한 코일 동손을 위상을 통해 보상하는 제어가 이루어지기 때문이다.

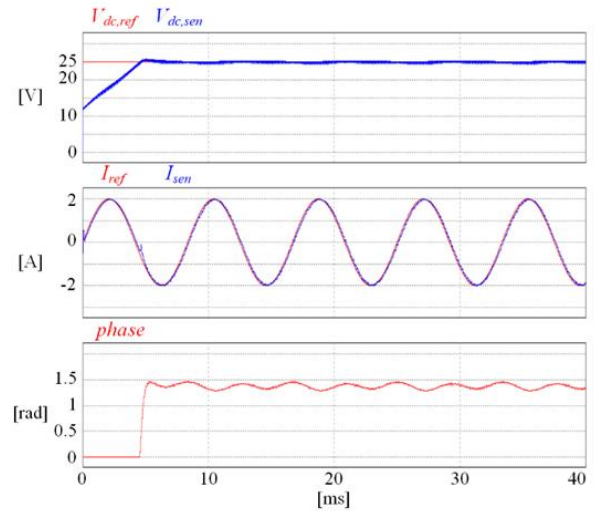


그림 4 시뮬레이션 결과  
Fig. 4 Simulation results

### 3. 결론

본 논문에서는 두 개의 인버터에 연결된 코일을 통해 무선 전력을 전송하며 각 코일의 평균 전류를 제어하는 방법을 제안하였다. 전력은 스위칭 주파수의 자속을 사용하여 전달될 수 있도록 하였다. 제안된 방법은 전력 전달에 있어 송신단에는 부가적인 동작을 요구하지 않으며 수신단에서 PWM 위상을 틀어 능동적으로 수신하는 전력의 크기를 직접 조절할 수 있음을 확인하였다. 이러한 전력전달 방식은 전원을 공급하는 선과 전달할 전력 혹은 위상 등의 정보를 전달하는 선을 시스템에서 제거할 수 있게 하여 시스템의 안정성을 향상시킨다.

본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 로봇산업융합핵심기술개발사업에 의해 수행됨(10052980).

### 참고 문헌

- [1] R. Barlik, M. Nowak, and P. Grzejszak, "Power transfer analysis in a single phase dual active bridge," *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, vol. 61, no. 4, pp. 809–828, 2013.
- [2] S. Poshtkouhi, A. Eski and O. Trescases, "PLL Based Bridge Synchronization as an Alternative to Digital Isolators for Dual Active Bridge DC DC Converters," *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2015, pp. 9–14.