

계단과 응답을 이용한 전계결합형 무선전력전송의 수신부 감지 알고리즘

정채호, 최희수, 최성진
울산대학교 전기공학부

A Receiver Detection Algorithm Using Step Response for Capacitive Coupling Wireless Power Systems

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

ABSTRACT

무선전력전송 시스템은 대기전력과 안전 문제로 인해 수신부의 존재를 판단하는 알고리즘이 필요하다. 현재 전계결합을 이용한 무선전력전송 시스템이 연구되고 있지만 아직 송·수신부 확인에 대한 연구는 활발하지 않다. 본 논문에서는 거리나 압력 센서를 더하지 않고 기존 전극의 기생커패시턴스를 이용해 부하 유무를 감지하는 방법을 제안한다. 송신부의 두 전극은 수신부가 분리됐을 때와 비교했을 때 수신부가 완전 정렬된 경우 커패시턴스 값이 약 9배 증가하므로 일반적인 마이크로프로세서의 내부 저항과 본 기생커패시터의 계단과 응답을 이용하면 부하의 존재유무를 판단할 수 있다. 그리고 마이크로프로세서를 통해 분리 시와 완전정렬 시에 기생커패시턴스 값을 LCR 미터와 비교했을 때 각각 오차율 5.5%, 6.8%로 측정하고 이를 이용해 수신부 감지 알고리즘을 성능을 검증하였다.

1. 서론

무선전력전송 시스템은 수신부가 존재하지 않을 때 송신부 회로가 동작하는 것은 대기전력 낭비가 되며 송신부 전극 사이에 전압이 존재하기 때문에 위험하다. 특히, 전기자동차 무선충전 장치와 같이 시스템의 규모가 커질수록 대기전력 낭비와 위험성은 매우 커진다. 그러므로 수신부가 송신부와 약속된 면에 위치했을 때에만 송신부 회로가 켜지도록 하기 위한 알고리즘을 구현한다. 아직까지 전계결합 방식의 경우 수신부 감지에 대한 고려가 적었으므로 송신부의 두 전극 간 커패시턴스의 변화량을 이용해 별도의 거리, 압력 센서를 더하지 않고 저비용의 효과적인 부하 감지 알고리즘을 제안하고자 한다.

2. 수신부 감지 원리

전계결합 시스템은 그림 1과 같이 송·수신부에 전극을 형성해 커패시터가 생성되는 원리를 기반으로 무선전력전송을 한다. 그림 1은 기본적인 전계결합 시스템 구조인 하프 브릿지 직렬 공진형 컨버터를 나타낸 그림이다. 송신부의 분리된 전극으로 직류를 보낼 수 없기 때문에 송신부 회로에서 MOSFET S1과 S2의 스위칭을 통해 입력전원을 교류형태로 변환하고 송신부와 수신부 사이에 링크 커패시터를 통해 전력을 전달하게 된다. 수신부에서는 전파정류 다이오드 D1 ~ D4를 통해 다시 교류전원이 직류전원으로 정류된다. LC 공진 네트워크에서 바

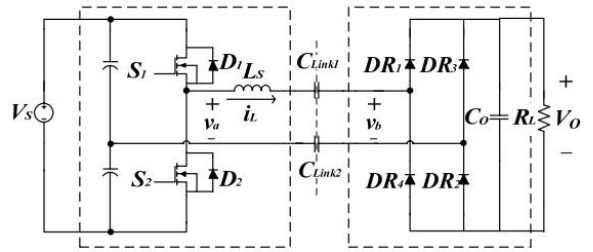


그림 1. 하프 브릿지 공진형 컨버터

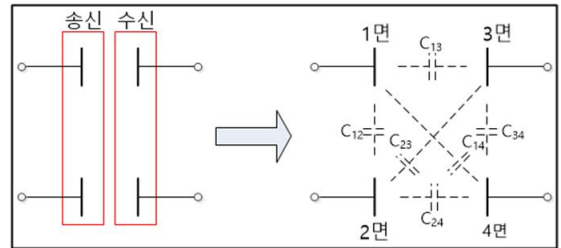


그림 2. 송수신 전극의 기생커패시터 표현

라본 등가저항 R_{ac} 와 R_L 의 상관관계는 식(1)로 나타내며 링크 커패시턴스의 직렬연결로써 C_r 은 식(2)로 구해진다.

$$R_{ac} = \frac{V_{bl}}{I_{L1}} = \frac{8}{\pi^2} \times \frac{V_o}{I_o} = \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (1)$$

$$C_r = \frac{C_{link1} C_{link2}}{C_{link1} + C_{link2}} \quad (2)$$

전계결합 시스템은 송신부와 수신부의 4개 전극을 이용해 커패시터를 형성 한다. 마주보는 두 전극을 통하여 전력을 전송하는데, Cross Coupling에 의해 그림 2와 같이 C_{12} , C_{13} , C_{14} , C_{23} , C_{24} , C_{34} 최대 6개의 다른 기생커패시터들이 발생하게 된다.^[2] 기생커패시터에 의해 송신부와 수신부간 접촉이 있을 경우 송신부의 두 전극간에 커패시턴스 변화가 발생하게 되는데, 이 변화를 이용해 부하여부를 판단한다.

송신부의 마이크로프로세서(이하 MCU)와 두 전극을 그림 3과 같이 연결한 후 Output으로 5V의 전압을 출력하고 Input 노드의 ADC를 이용해 V_{sense} 전압값을 입력한다. 회로의 V_{sense} 를 전달함수 식을 통해 구하면 다음 식(3)과 같다.

$$V_{sense} = V_o \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{parst}} e^{-\frac{t}{R_L(C_{parst} + C_{12})}} \quad (3)$$

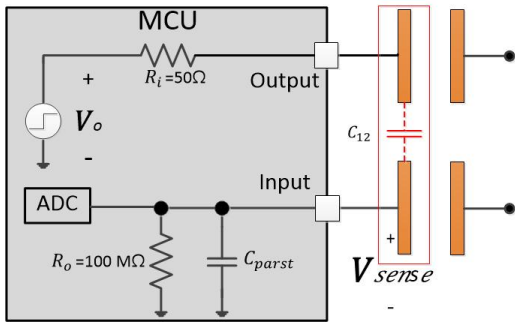


그림 3. 커패시터의 측정 원리

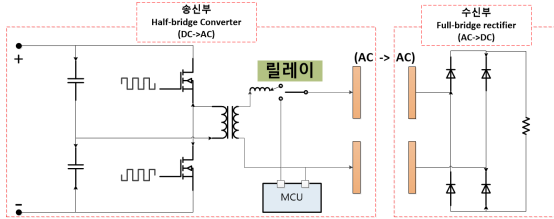


그림 4. 릴레이를 추가 한 전체 시스템 회로

Output에서 5V 출력을 내보내자마자 Input에서 V_{sense} 를 읽기 때문에 지수 함수 부분의 시간 축 값을 $t=0$ 으로 보면 지수함수의 계수가 바로 측정된다. 이 값을 다시 해석하면 두 전극 간의 커패시턴스 C_{12} 는 다음 식(4)로 구해진다.

$$C_{12} = C_{parst} \frac{V_{sense}}{V_o - V_{sense}} \quad (4)$$

그림 4는 기존 무선전력전송 회로와 제안한 감지 알고리즘을 연계하는 방법이다. 송신부 전극 앞 단에 릴레이 스위치를 이용해 MCU로 연결한다.

3. 구현 및 성능검증

변화하는 기생커패시턴스 값을 수신부 존재 감지에 이용하기 위해서 수신부 위치 조건에 따라 변하는 커패시턴스 값을 측정 하였다. 송·수신부가 완전히 떨어졌을 경우를 분리, 조금이라도 접촉면이 어긋났을 때를 부분정렬, 송·수신부가 접촉면이 일치 할 때를 완전정렬로 정의한다. 실제 송·수신부 단면은 42cm×12cm 크기로 제작했고 42cm 방향을 가로, 12cm 방향을 세로로 보고 X축 이탈을 가로 방향, Y축 이탈을 세로 방향으로 정의한다. 실험에서 전송효율을 높이기 위해 송·수신부 사이에 유리(유전상수 $\epsilon_r=3$, 이격거리 1.60mm)를 삽입해서 커패시턴스 값을 충분히 확보하였다.

LCR미터를 이용해 분리, 부분정렬, 완전정렬 시에 송신부 전극 사이에 커패시턴스 값을 측정한 결과 분리 시에는 18pF, 완전정렬 시에는 157pF, 수신부가 X축으로 1cm 이탈하면 9 ~ 17pF 감소 그리고 Y축으로 1cm 이탈하면 8 ~ 16pF 감소한다.

실험 결과를 바탕으로 LCR미터가 아닌 MCU를 이용해서 커패시턴스를 측정하였다. 하드웨어 구현에 사용된 MCU는 ATmega328P이며 본 MCU의 그림 3의 등가 회로의 변수 값들은 $C_{parst}=24pF$, $R_i=50\Omega$ 이다.^[3] 실제 수신부가 분리 시와 완전정렬 됐을 때 오실로스코프를 이용해 V_{sense} 를 측정한 값은 그림 5와 같으며 앞의 식(4)를 이용하면 각각 17pF, 147pF으로 계산된다. LCR미터에 의한 측정값과 MCU의 계산값이 분리와 완전정렬 시에 오차율은 각각 5.5%, 6.8%이다. 커패시턴스 변



그림 5. 분리 시($C_{12}=18pF$)와 완전정렬 시($C_{12}=157pF$) V_{sense} 전압

화량에 비해 오차율이 작기 때문에 알고리즘 구현이 가능하다.

앞의 이론에 의해 MCU는 수신부 존재 유무를 커패시턴스 변화량에 의한 V_{sense} 전압의 차이로 판단할 수 있다. 대기상태의 송신부 두 전극은 그림 4에 의해 전력전송 회로가 아닌 MCU로 연결 돼 있으며 MCU는 계속해서 커패시턴스를 측정한다. 수신부가 위치할 때 커패시턴스 차이에 의해 V_{sense} 가 문턱 전압 이상이 되면 릴레이를 동작시켜 측정을 멈추고 전력전송을 시작한다. 문턱전압은 시스템 두 전극 쌍의 특성과 감도에 의해 정해진다. 그림 4에 의하면 릴레이 스위치에 의해서 전력전송 중에는 수신부 존재를 판단할 수 없으므로 전력전송을 멈추어야한다. 그러므로 계속해서 수신부를 감지하기 위해서는 일정 시간마다 전력전송을 잠깐 중지하고 커패시턴스를 측정해서 수신부가 전력전송 중 분리 될 때를 감지한다.

하드웨어 검증에 사용된 무선전력시스템은 송·수신부 구리 전극 크기가 20cm×5.8cm, 동작주파수는 429KHz, 출력전력은 2.5W이다. 본 알고리즘을 적용해 수신부 감지 알고리즘을 실행한 결과 수신부 접촉을 인식하는 시간은 10msec 이내, 대기모드 전환시간은 최대 4sec, 마이크로컨트롤러 소비 전력을 제외한 송신부 회로의 대기전력 감소율은 90% 이상이다.

4. 결론

본 제안 연구를 통해 전계결합형 무선전력전송 시스템에서 수신부의 존재 인식을 간단한 신호 펄스 입력만으로 송신부 전극의 기생커패시턴스 변화량 측정을 통한 알고리즘을 이용하여 구현하였다. 본 방법을 이용하면 부분 정렬 시에 정렬정도는 기생커패시턴스에 비례하는 것을 이용해 수신부를 어긋나게 위치해도 전력 효율을 높이는 공진점 트래킹 제어도 가능하다. 커패시턴스를 측정하기 위해 일정시간 마다 전력전송을 중단해야 하지만 배터리를 장착한 대부분의 시스템은 큰 문제가 아니며 혹은 수신부존재 감지를 위해 별도의 통신 알고리즘을 추가한다면 본 방법은 통신을 하기 전 저전력을 유지하기 위한 충전 개시 용도로 매우 유용하게 쓰일 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] 최성진, 김세영, 김병우 (2014). “전계결합을 이용한 먼대면 무선 에너지 전송회로 개발,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 20, no. 2, pp. 143-148.
- [2] J.W. Nilsson and S.A. Riedel (2011), *Electric Circuits, 9th Edition*, PEARSON, NewYork
- [3] Atmel (2015), "Atmel 8 bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes in system Programmable Flash Datasheet"