

# 광학링크를 이용한 전계결합형 무선전력전송 회로의 아날로그 피드백 제어

박준영, 이시호, 황재영, 최성진  
울산대학교 전기공학부

## Analog feedback control using optical link for capacitive-coupled wireless power transmission system

Jun-Young Park, Si-Ho Lee, Jae-Young Hwang and Sung-Jin Choi  
School of Electrical Engineering, University of Ulsan

### ABSTRACT

무선전력전송 회로는 부하의 변동에 따라 출력값을 알맞게 제어해 줄 필요가 있는데 송신부와 수신부 회로는 분리되어 있으므로 제어루프 또한 분리되어야 한다. 기존에는 주로 통신방식이나 부하측 변조를 이용한 1차측 제어를 사용하였다. 하지만 통신을 이용하는 경우 가격이 비싸고 시스템이 복잡하며, 부하측 변조 방식은 제어회로의 반응이 느리다는 단점이 있다. 본 논문은 2.5W급 전계결합형 무선전력회로에 대하여 LED 광학링크를 이용해 송신부의 스위칭 주파수를 제어하는 회로를 제안한다. 이 회로는 수신부에 포토다이오드와 연산증폭기를 내장하여 부하에 추가적인 배터리전원 없이 저가로 우수한 성능의 제어기를 구성할 수 있으며, 그 성능을 하드웨어로 검증하였다.

### 1. 서론

최근 휴대폰 배터리의 편리한 충전을 위한 방법 중 하나로 무선충전방식의 충전기가 많이 개발되고 있으며, 이는 주로 자계결합 형태를 사용하는 방식으로 이를 이용하면 복잡한 배선 문제를 해결하고 휴대폰을 충전기에 올려두는 것만으로 배터리를 충전할 수 있다. 하지만 자계결합 방식은 EMI 차폐를 해주어야 하며, 주변의 금속물과의 간섭이 심하다는 단점을 가지고 있는데 이는 전계결합 방식을 이용하는 무선전력 전송회로를 통해서 극복이 가능하다. 특히 전계결합 방식은 수신부의 에너지 픽업 구조가 간단하여 에너지 전송용량 확장이 더욱 용이하기 때문에 배터리 충전 회로뿐만 아니라 수신부에 배터리가 없는 무선급전 회로에 주로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.[1]

무선전력 전송회로는 수신부 회로에 별도의 DC/DC 컨버터를 내장하지 않고도 고효율로 부하변화에 따라 항상 일정한 에너지를 전달해야 하며, 이를 위해서 수신부의 부하 변동에 따라서 송신부를 제어하여 항상 일정한 출력전압을 제공해야 한다. 하지만 무선전력 전송의 특성상 송신부와 수신부의 회로는 분리되어 있으며, 와이어를 통한 제어가 불가능하게 된다. 결국 제어루프 또한 무선으로 구성이 되어야 하며, 이를 위한 기존의 방법으로 통신을 이용한 out-band 제어나 부하측 변조를 통한 in-band 제어가 존재한다.[2]

하지만 통신을 이용하는 경우에는 가격적인 측면도 고려하지 않을 수 없고 시스템 또한 복잡하게 구성되며, 부하측

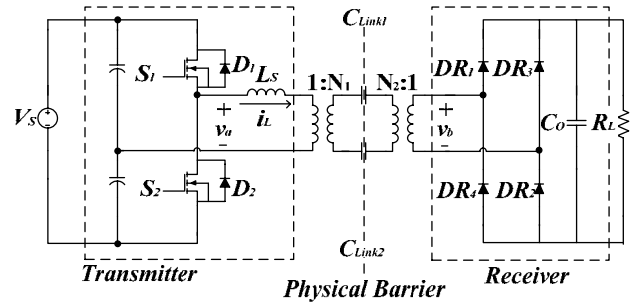


Fig. 1 Capacitive-coupled wireless power transmission circuit

변조방법은 제어회로의 반응이 느리다는 단점이 있다. 그리고 광학링크를 이용하는 문헌[3]도 제안된바 있지만 간헐적인 히스테리시스 제어만을 하여 지속적인 제어가 필요한 회로에는 적합하지 않다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 본 논문은 2.5W급의 전계결합형 무선전력 전송 회로에 대하여 광학링크를 이용한 아날로그 피드백 회로를 제안한다

### 2. 제안하는 광학링크 피드백 회로

본 논문은 그림 1과 같은 문헌[4]에서 제안된 전계결합형 무선전송 회로에 광학링크를 이용하는 제어회로를 추가하여 수신부의 동작주파수를 조절할 수 있도록 구성하였다.

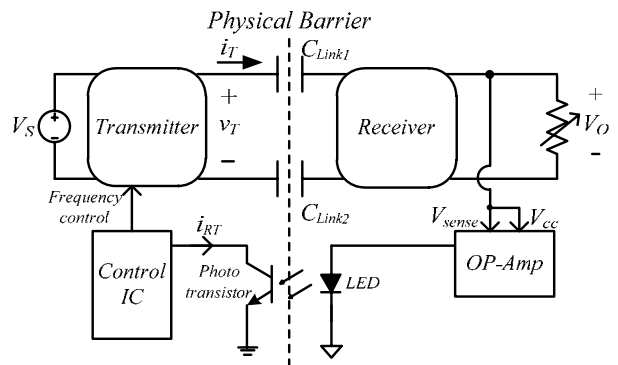


Fig. 2 Block diagram of wireless system with feedback loop using optical link

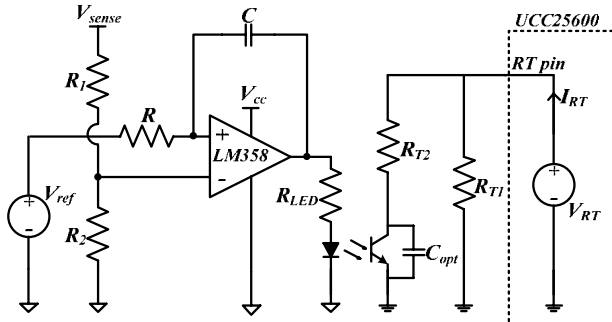


Fig. 3 Analog feedback loop implementation

광학링크를 적용한 동작주파수 제어회로는 그림 2와 같이 광다이오드, 포토트랜지스터 그리고 OP-Amp를 이용해서 구현할 수 있다.

구체적인 구현회로는 그림 3이며, 이 제어기는 제어방향을 위해서 통상적인  $V_{ref}$ 의 위치를 바꿔서 적분기로 PI제어기를 먼저 구성한 후에 포토트랜지스터의 기생 캐패시터를 이용한 고주파 극점의 추가를 통해 Type2 제어기를 구성하였다. 이 회로의 전달함수는 아래와 같이 구해진다.

$$\frac{\hat{i}_{RT}}{\hat{v}_o} = \frac{CTR}{R_{LED}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{RC} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{(1 + sRC)}{(1 + sC_{opt}R_{T2})} \quad (1)$$

제어기의 오차는 적외선 발광 다이오드의 전류를 변화 시키는데 이 때 발생되는 적외선 빛의 세기는 OP-Amp의 출력에 비례한다. 그리고 포토트랜지스터의 컬렉터 전류는 수신부의 동작주파수를 결정하는 UCC25600 IC 소자의 RT단자로부터 나오는 전류  $I_{RT}$ 를 다음과 같이 변화시켜 동작주파수를 조절한다. 그에 따라 출력전압은 항상 일정하게 유지될 수 있다.

$$\hat{f}_s = \hat{i}_{RT} \cdot 83\text{Hz}/\mu\text{A} \quad (2)$$

### 3. 하드웨어 제작 및 검증

그림 1의 전력단에서 입력전압은 19V이며, 출력전압은 10Ω 부하에 최대 2.5W를 무선전송 하도록 하드웨어로 구현하였다. 이 때, 공진주파수는 46.5kHz이다. 여기에 회로의 출력전압을 5V로 일정하게 얻기 위한 아날로그 광학링크 피드백 회로를 그림 3과 같이 추가하여 실제 하드웨어를 구성하였다. 이 때, OP-Amp LM358의 전원은 출력에서 바로 공급이 가능하므로 추가적인 배터리나 보조전원이 불필요하여 무선급전의 구현이 가능하다.

회로를 제작할 때 사용한 구체적인 전력단 및 제어회로의 회로상수는 표 1의 값으로 사용하였다. 이 때, 제어기의 영점은 1krad/s 이며, 극점은 5krad/s 이고 적분제어 상수는 광학링크 소자간 거리를 0.5mm라 산정하고 배치각을 0°라고 가정하였을 때, CTR 값 0.1을 이용해서 설계하였으며, 그 값은 0.042 이다.

검증을 위해서 부하변동은 전자부하의 CR모드를 사용하여 풀부하 10Ω부터 경부하 100Ω까지 부하조절을 10Ω 단위로

Table 1. Parameters for hardware

$L_s$	12.6μH	$N_1$	41	R	1kΩ	$R_{T1}$	2.15kΩ
$C_{link1}$	500pF	$N_2$	15	$R_1$	62kΩ	$R_{T2}$	330Ω
$C_{link2}$	526pF	$V_{ref}$	0.7V	$R_2$	10kΩ	C	1μF
$C_o$	100μF	$V_{RT}$	2.48V	$R_{LED}$	330Ω	$C_{opt}$	8.8nF

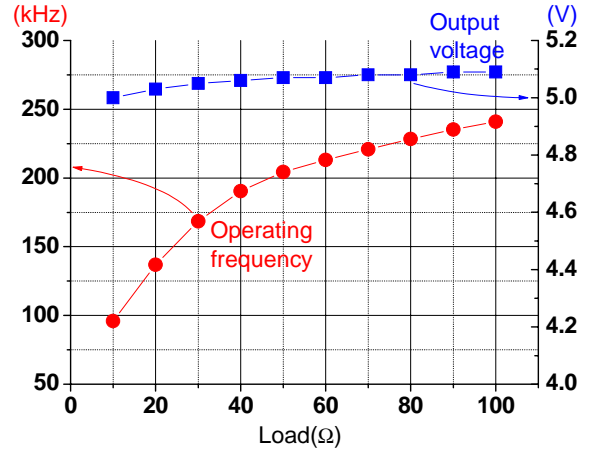


Fig. 4 Hardware test results of the proposed feedback scheme

하면서 각 부하에서의 출력전압과 동작주파수를 측정하였다. 그 값을 그림 4와 같이 그래프로 정리하였고 그래프를 통해서 부하변동에 따라 피드백회로는 동작주파수를 적절하게 제어하는 것을 확인할 수 있으며, 회로의 출력전압은 목표치인 5V로 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문은 광학링크를 사용하는 제어루프를 적용하여 통신을 통한 제어방식 보다 가격적 측면에서 우수하고 부하측 변조를 통한 제어방식 보다 반응이 빠른 전계결합형 무선전력전송의 동작주파수 제어회로를 제안하였다. 광학링크를 이용하여 제작된 실제 하드웨어 회로를 통해서 시스템의 부하가 풀부하 10Ω에서 경부하 100Ω까지 변화할 때 출력전압이 항상 5V로 일정하게 되도록 동작주파수를 적절하게 제어하는 것을 확인하였다. 이는 전계결합 타입에서는 처음으로 광학링크를 이용한 피드백 제어를 검증한 것으로 향후 제어회로의 최적화를 진행하여 출력전압을 보다 안정적인 값으로 얻는 것이 가능할 것으로 예상된다.

### 참고 문헌

- [1] 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.
- [2] Wireless Power Consortium, The Qi Interface Specification Volume I : Low Power, 2010.
- [3] Chang-Gyun Kim, Dong-hyun Seo, Jung-Sik You, Jong-Hu Park, and Bo H. Cho "Design of a Contactless Battery Charger for Cellular Phone," IEEE Trans. on IE, Vol. 48, No. 6, pp. 1238–1247, Dec. 2001.
- [4] Sung-Jin Choi, Se-Young Kim, and Byung-Woo Choi "Power Stage Design for a Surface Wireless Power Transmission System using a Coupled Electric Field," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2014.