

# 무접점 충전기의 전력단 변압기를 통한 무접점 피드백 제어방식

박종후, 김창균, 조보형

서울대학교 전기공학부 전력전자시스템 연구실

## Contactless feed-back control method through power stage transformer in non-contact battery charger

J.H. Park, C.G. Kim, B.H. Cho

Power Electronics System Lab. Seoul National University

### ABSTRACT

A non-contact battery charger which transfers energy using magnetic field has a difficulty with a feed-back control due to the interaction between the power and signal processing. This paper proposes an effective method which uses auxiliary windings of transformer as signal path, and copes with cross-talk using the MOSFET ringing phenomenon and ceramic filter. The power stage is half-bridge series resonant converter. Design procedure and experimental verification are presented.

### 1. 서론

#### 1.1 무접점 충전의 원리와 특성

최근에 소형 전자 제품에 배터리를 내장하는 경우가 늘고 있는데, 배터리를 충전하는 방법으로 전기적 접촉점을 통해 에너지를 전달하는 방법을 주로 사용한다. 그러나, 이러한 접촉식 충전 방법은 접촉 불량으로 인한 고장이 많이 나며, 습기가 많은 환경에서는 사용이 힘들다. 이러한 단점 때문에 무접점 충전기가 연구되고 있다[1]. 변압기의 자기적 커플링을 이용하여 에너지를 전달하는 무접점 충전기는 변압기의 1차측은 충전기 내부에, 2차측은 피충전기의 내부에 있어 그 사이에 충전기와 피충전기의 케이스가 있기 때문에 결합계수와 자화 임피던스는 작아지고, 누설 임피던스가 커져서 에너지 전달의 비효율성을 야기시킨다. 뿐만 아니라, 피드백 제어시 출력 정보를 전기적으로 1차측의 콘트롤러로 전달하기가 어렵다는 문제도 생긴다. 본 논문에서는 이러한 문제점 중, 제어에 관한 문제에 대해 살펴본다.

### 1.2 무접점 제어의 원리

배터리 충전시 정전압 모드에서 배터리 전압은  $4.1V \pm 100mV$ 로, 정전류 모드에서는 충전 전류 800mA 이하로 제한된다. 따라서 제어를 위한 출력 정보가 필요한데, 배터리 충전과 같이 제어 속도가 빠를 필요가 없는 경우에는 다음과 같이 하여 불필요한 비용의 증가를 막는다. 정전압 구간을 예로 들면 배터리 전압을 기준 전압과 비교하여 배터리 전압이 높으면 'high'상태로 하고 배터리 전압이 기준 전압 보다 낮으면 'low'상태로 한다. 'high'상태가 되면 기존의 변압기를 통해 특정한 신호를 1차측으로 넘기고 1차측에서 이 신호를 받으면 컨버터 출력 전압을 낮춘다. 'low' 상태가 되면 이와 반대로 동작한다. 이러한 원리로 최소한의 정보를 1차측으로 전달하여 배터리 충전 제어를 구현한다. 정전류 모드에서 정전압 모드로의 전환은 출력측 비교기 입력에 다이오드 OR를 사용하여 자동으로 전환되도록 구현하였다[1].

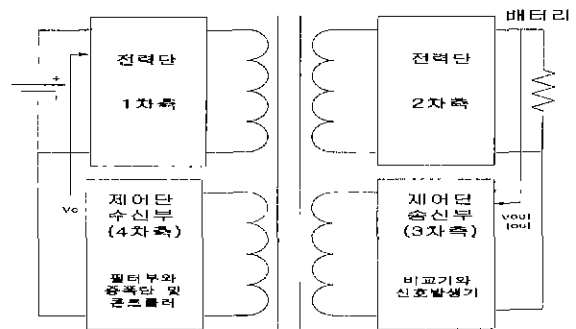


그림 1 무접점 충전기의 전체 회로 구성

#### 1.3 변압기를 통한 제어신호 전달 문제

무접점 피드백 제어를 위해 제안된 방법은 그림 1과 같이 기존의 변압기에 신호 전달용 보조권선을

추가하여 2차측에서 1차측으로 제어 정보를 전달하는 것이다. 이 방식은 전력 전달과 마찬가지로 기존 변압기의 자기장을 이용하여 전달하므로 전력 전달이 보장되는 환경에서는 제어 역시 보장되고 제어를 위한 외부경로가 따로 필요하지 않다는 장점이 있으나 전력 전달에 의한 자기장의 cross-talk이 발생하고 제어부로의 파워누설 문제가 있다. 전력 회로단의 영향을 적게 받기 위해서는 스위칭 주파수와는 다른 주파수 대역에서 신호를 전달해야 하는데 고주파 영역의 주파수를 사용할 경우와 저주파 영역을 사용하는 경우로 나눌 수 있다. 고주파 영역(1MHz이상)에서의 문제점은 변압기의 1차측 전압이 4차측에 걸리면서 필터를 통과시켜도 제어신호와 같은 주파수의 전력 harmonics가 섞여서 나온다. Harmonics와 구별되기 위한 신호 전압이 4차측에 걸리기 위해서는 3차측의 신호원이 수십 볼트의 큰 전압을 내야 하므로 약간의 전류가 흘러도 신호원의 전력이 많이 필요해진다. 또한 스위칭 주파수가 변하므로 harmonics 사이의 주파수 영역이라는 것도 의미가 없어진다. Harmonics가 감쇠하는 높은 주파수 영역(5MHz이상)으로 올라가면 변압기의 각종 기생 커패시턴스들의 영향을 받아 신호의 전달이 방해받으므로 1차측에서 신호를 수신하는데 어려움이 있다. 저주파 영역(5KHz 이하)에서는 파워 회로의 출력단 누설 인덕턴스의 임피던스가 낮아, 제어 신호 전압이 출력단 리플 전압으로 나타나는 문제점과 가청 주파수 대역이어서 소음을 일으킬 가능성이 있다는 문제가 있다.

이와 같은 문제점들을 극복하기 위해서 제안된 방식이 본론에서 언급할 MOSFET의 ringing현상을 이용한 신호발생 방식이다. 이 방식은 위에서 살펴본 고주파 영역을 이용하는 것으로 적은 전력으로 높은 전압을 얻을 수 있으며, 전력단에서의 전력 누설도 적다. 본론에서 3차측과 4차측의 회로 구성을 살펴본 뒤, 이를 실험으로 검증하고 적외선 LED를 이용한 제어방식과 비교해 본다. 결론에서는 이러한 방식의 특징과 응용범위에 대하여 살펴본다.

## 2. 무접점 배터리 충전기

### 2.1 전력단

전력단은 무접점 변압기의 단점을 극복하고 에너지를 효율적으로 전달하는 Half-Bridge 직렬 공진 컨버터를 채택하였다 (그림2). 이 회로는 변압기의 누설 인덕턴스에 직렬로 커패시터를 달아 소프트

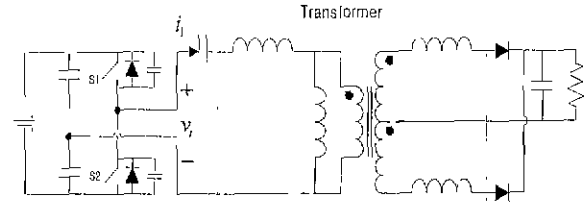


그림 2 직렬공진 하프브리지 컨버터

스위칭을 구현하고 주파수를 가변하여 출력을 제어한다. 이 회로의 분석과 설계절차는 이미 기존의 논문에 잘 나와 있다[1,3]. 기존 논문에서 제시한 전력단과 동일한 하드웨어를 이 논문의 실험 자료로 사용하여서 전력단의 각 파라미터는 기존 논문과 일치한다[1,3]. 참고로, 컨버터의 공진주파수는 48.2kHz이고 스위칭 주파수의 동작 범위는 51kHz - 96kHz이다.

### 2.2 송신부(3차측)

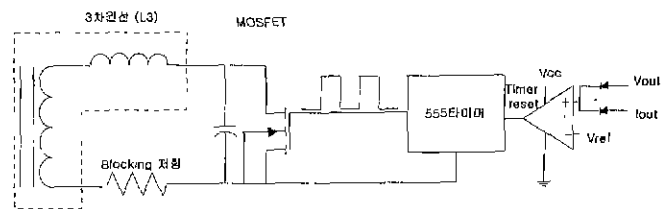


그림 3. 송신부의 회로 구성 (3차측)

그림 3은 발신부의 구성을 나타낸 그림이다. 출력 전압(정전류 모드에서는 출력전류)을 기준 전압과 비교하여 이보다 커지면 555타이머가 펄스를 발생시켜 MOSFET이 듀티에 따라서 꺼지고 켜진다. 이 때, 스위치의 기생 커패시터와 3차 권선의 누설 인덕턴스가 서로 공진하여 ringing이 발생하게 된다. 순간적으로 발생한 높은 전압은 4차측 winding에 전달된다. Ringing 파형의 각 파라미터는 다음과 같이 결정된다.

$L$  = 누설 인덕턴스,  $C$  = MOSFET의 기생 커패시터라 할 때 공진 주파수  $f$ 는

$$f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

가 되고 전압은 스위치-off 직전의 전압이  $V$ , 전류가  $I$ 일 때,

$$\frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

에 의해서 결정된다. 일반적으로 주파수 대역은 수 MHz대에서 결정되고 이 주파수에 의하여 3차 권

선의 인덕턴스가 결정된다. 식 (2)에서 전류는 blocking 저항에 의해서 결정되는데, 파워단에서 누설되는 것이므로 작을수록 좋다. Ringing의 발생 주기는 MOSFET-off시 누설 인덕턴스에 저장된 에너지가 최대일 때 의미있는(수신측에 전달되는) 전압 크기로 발생하므로 이론상 펄스 주기와 스위칭 주기의 최소공배수가 발생주기가 된다. 따라서 타이머의 펄스 주기는 스위칭 주기보다 길어야 한다. 그림 4의 실험 파형에서 위 파형이 MOSFET의 게이트 신호이다. 게이트 신호가 오프될 때, 40V 정도의 ringing이 발생함을 알 수 있다.

이 방법은 무점점 변압기 특성상 발생하는 권선의 누설 인덕턴스의 에너지를 이용하여 순간적으로 ringing을 발생시킴으로써 적은 에너지로 높은 전압을 얻을 수 있다. 따라서, 리니어 IC 신호원이 전원 전압 이상의 신호 전압을 발생하는 것이 어려운 데 반해, ringing방식은 이러한 한계를 극복했다고 할 수 있다.

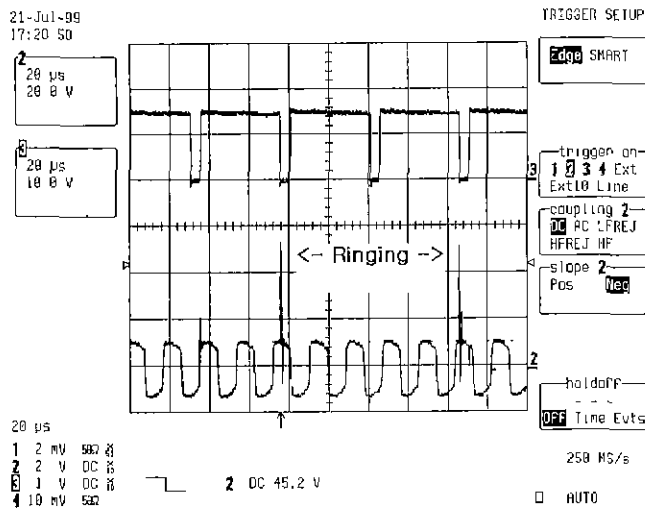


그림 4. MOSFET의 게이트 파형 (위), 3차권선 전압 (아래)

### 2.3 수신부(4차측)

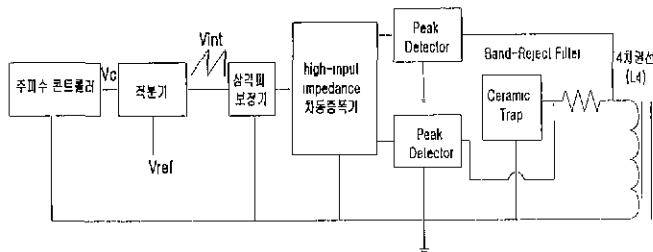


그림 5 수신부의 회로구성 (4차측)

제어신호를 수신하는 4차측의 회로는 그림 5와 같다. 4차권선에는 1차측 스위칭 파형과 3차측의

신호 파형이 같이 실리게 되는데 Band Pass Filter를 쓰면 1차측 스위칭 파형의 harmonics도 제어신호와 같이 검출된다. 그러므로 이와 같은 방법 대신, ringing 신호는 항상 스위칭 파형의 침두점에 중첩되므로 Band Reject Filter(BRF)로 신호를 제거한 파형의 침두값과 제거하기 전의 침두값을 비교한다(그림 6참조). 두 전압을 차동 증폭하여 기준 전압과의 차를 적분한 값이 증가하면 주파수를 높여서 출력을 감소시키고, 적분값이 감소하면 이와 반대로 제어한다. 출력전압(전류)은 이와 같은 원리로 제어된다. 회로 각 부분의 구성 및 동작에 대한 설명은 다음과 같다.

4차 권선(L4)에 걸리는 전압의 크기는 권선수에 비례한다. 이 전압이 차동 증폭기의 OP-Amp의 입력이 되므로 너무 높지 않도록 한다. 다음 단의 BRF는 세라믹 필터와 저항으로 구성되어서 전력단에서 4차측으로의 전력 누설을 막는다. 세라믹 필터[2]는 수동 소자이므로 전력소모가 없고 부피도 작지만 주파수 대역에 한계가 있으므로(2MHz 이상) 더 낮은 주파수에서는 저주파 필터를 써야 한다. 그림 6은 실험결과에서 제어신호 발생시 4차 권선의 파형과 이를 필터링한 파형을 잡은 것이다. 침두점의 신호파형이 짝이는 것을 알 수 있다.

Peak detector는 다이오드와 RC병렬구조로 된 간단한 회로이다. Ringing신호는 에너지가 매우 작기 때문에 peak detector의 커패시터값이 작아야 하므로 원하는 시정수를 얻기 위해서는 저항이 커야 한다. 다음 단 차동증폭기의 입력 임피던스가 detector의 시정수에 영향을 주어서는 안되므로 OP-Amp 3개가 사용되는 고입력 임피던스 차동증폭기를 쓴다. 삼각파 보정기는 회로 구성상 peak detector와 같다. 차동증폭기의 출력 전압을 거의 직류 전압의 형태에 가깝도록 하게 한다. 이렇게 해서 나온 전압을 기준전압과 비교, 적분하여 컨트롤러의 입력으로 주게 된다.

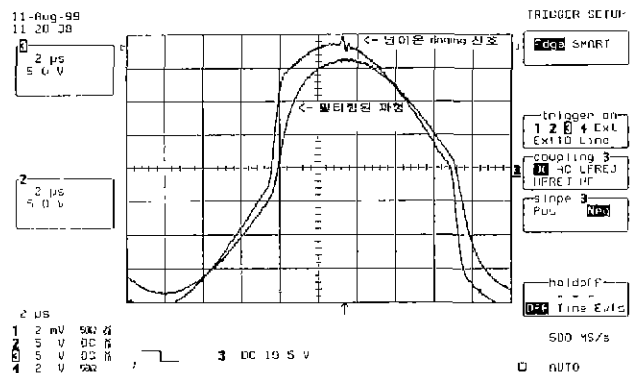


그림 6. L4 전압(위), BRF를 통과시킨 전압(아래)

### 3. 실험결과

실험을 위한 각 파라미터 값은 표1과 같다. 그림 7은 각 입력전압에 대해서 전자부하를 3.3Ω으로부터 4kΩ까지 변화시켰을 때의 파형을 잡은 것이다. 시간에 따라 증가하는 파형이 출력전압, 감소하는 파형이 출력전류이다. 정전류 모드에서 전류는 800mA로 제한되고 전압은 2.7V에서 증가하기 시작한다. 전압이 4.1V에 도달하면 정전압 모드로 들어가면서 전압은 제한되고 전류는 0mA까지 감소하는 것을 확인할 수 있다.

표 1 하드웨어 제작을 위한 파라미터 값  
Table 1 Parameter value for hardware waveforms

L3	55uH	변압기 결합계수	0.57
MOSFET	2N7000 (Siliconix)	L4	60uH
타이머 주파수	22kHz	타이머 듀티	0.85
ringing 주파수	3.8MHz	3차측 blocking 저항	200Ω
BRF	ceramic trap 60 (무라타 제작)	peak-detector의 C	200pF

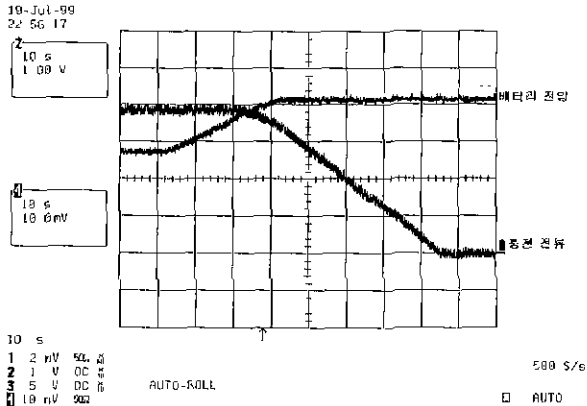


그림 7. 배터리 충전 파형  
(전압 1V/div, 전류 200mA/div)

### 4. LED를 사용한 신호 전달방식과의 비교

LED로 구성된 회로는 간단하다는 장점이 있지만 이와는 반대로 플라스틱 투과율에 대한 신뢰도가 낮다[3]. 실제로 LED는 플라스틱의 두께, 재질, 투명도, 플라스틱 사이의 공간구성 등에 따라 투과율이 크게 차이를 보인다. 이것은 충전기와 피충전기 제작에 여러 가지 제약조건을 추므로 단점으로 지적될 수 있다. 반면에 논문에서 제안한 방법은

회로구성이 상대적으로 복잡하지만 기존 변압기의 자기적 커플링으로 신호를 전달하므로 전력 전달이 가능하다면 위의 제약 조건과 무관하게 무접점 제어 가 보장된다. 위와 같은 장단점들을 살펴보고 제어 신호 전달 방식을 결정해야 할 것이다.

### 5. 결론

보조 권선을 이용하여 제어하는 방법은 무접점 충전기에 쓰이는 변압기의 큰 누설 인덕턴스의 에너지를 신호원으로 이용하는 것이다. 이 실험으로 전력을 전달하는 변압기로 출력 정보를 전달할 수 있음을 보였다. 따라서, 이 실험은 무접점으로 파워가 전달될 수 있다면 무접점 제어 또한 보장됨을 의미하고 있다.

논문에서 제안한 무접점 충전기의 응용범위를 생각해보면, 우선 컨버터의 출력단이 운동하는 경우를 생각해 볼 수 있다. 출력단의 운동 특성에 따라서 회전, 또는 선형 자기적 커플링 타입이 있을 수 있는데, 이러한 경우에 센서를 사용한다면 전력단의 운동에 따라 동기화 해야 하는 문제가 있다. 이에 반해 변압기를 이용하는 경우에는 회전이나 선형 운동하는 경우에도 부가적으로 고려해야 할 사항이 없다. 또한 기계적인 작업환경을 생각해 볼 때, 대개 접촉부가 오염되기 쉬우므로 접촉이나 센서를 사용할 경우 신뢰성이 감소한다. 제안된 방식은 이러한 경우에도 자기적 커플링에는 큰 영향이 없으므로 신뢰성이 감소하지 않는 장점이 있다.

이 논문은 삼성전기 주식회사의 연구비 지원에 의하여 연구되었습

### 참고 문헌

[1] 김창균, 유정식, 박종후, 조보형, 서동현  
"무접점 배터리 충전 장치용 Half-Bridge 직렬 공진 컨버터 분석 및 설계", 대한전기학회 하계학술대회, Volume F, pp 2508-2511, 1999

[2] Murata Manufacturing Co., "Traps for TV/VCR" in filters for audio visual equipment, *Murata Products 1999*, p.123, 1999

[3] C. G. Kim, D. H. Seo, J. S. You, J. H. Park and B. H. Cho  
"Design of a Contactless Battery Charger for Cellular Phone", *Proceedings of APEC*, pp. 769-773, 2000