

## 전압위상을 이용한 무접점 전원공급 시스템에 관한 연구

柳周熙\*, 金春杉†

## Contactless Power Transfer System using Voltage Phase

Joo-Hee Yu, and Choon-Sam Kim

## 요 약

기존의 무접점 전원공급 시스템은 비접촉 변압기의 1, 2차측 간 RFID/ID 통신 방식을 이용하여 무접점으로 전원을 공급하고, 이물질을 감지한다. 이러한 시스템은 ID 신호를 발생시켜주는 회로가 추가 되어야 하고, 2차측에서 발생한 ID 신호의 인식과 제어는 1차측에서 수행하기 때문에 회로의 복잡성이 야기된다. 따라서 본 논문에서는 전압 위상을 이용한 무접점 전원공급 시스템을 제안하고, 타당성을 증명하기 위하여 3[W]급 무접점 전원공급 장치를 설계하고, 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

## ABSTRACT

As the existing contactless power transfer system(CPTS) is adopting the principle of contactless transformer enables to supply power in contactless way using RFID(radio frequency identification)/ID communication method between primary and secondary sides of contactless transformer and detect the alien load. Such CPTS requires the circuit that generates ID in addition, and the ID identification and control generated from the secondary side is performed at the primary side, which causes complexity of the circuit. Therefore, this study suggested the CPTS using voltage phase, and In order to verify the validity of this study, 3[W] class CPTS shall be designed, and the simulation and test of CPTS using current and voltage phases shall be carried out.

**Key Words** : Contactless power transfer system, Contactless transformer, RFID, Voltage phase, Alien load

## 1. 서 론

오늘날 휴대용 기기의 통신은 무선으로 자유롭게 이루어지고 있는 반면에 기기의 작동을 위한 전력 공급은 유선 충전기를 이용하는 접점 방식으로 USB나 충전기를 통하여 충전된 배터리를 이용하고 있다. 어떠한 접점 없이 부하에 전원을 공급하기 위한 무접점 전원공급 기술은 비접촉 변압기를 사용하여 전자기 유도 현상을 이용한다.

상대적으로 큰 공극을 갖는 비접촉 변압기를 이용한 무접점 전원공급 시스템은 휴대 전화 배터리 충전, 전기 자동차, 디지털 카메라, MP3 등과 같은 모바일 기기나, 인공 장기에 전력을 전달하는 장치, 그리고 위험한 환경에서 적용이 가능하고, 이에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다<sup>[1][2]</sup>.

현재 무접점 전원공급 기술에 대한 민간기업 컨소시엄(WPC : Wireless Power Consortium)이 구성되어 표준화가 진행되고 있다. 주요 기술은 1차측과 2차측 상호간에 RFID 방식으로 전원을 공급하고 이물질 감지 기능을 구현하고 있으며 이와 같은 기술을 실현하기 위하여 2차측에 ID 신호를 발생시키는 회로가 추가 되어야 하고, 1차측에서는 2차측에서 발생한 ID 신호의 인식 및 제어를 수행하여야 하므로 회로의 구성이

†교신저자 : 정회원, 강원대 제어계측공학과 교수

E-mail : jae6090@kangwon.ac.kr

\*학생회원, 강원대 제어계측공학과 석사과정

접수일자 : 2010. 11. 15

1차 심사 : 2010. 12. 22

2차 심사 : 2010. 12. 27

심사완료 : 2011. 1. 14

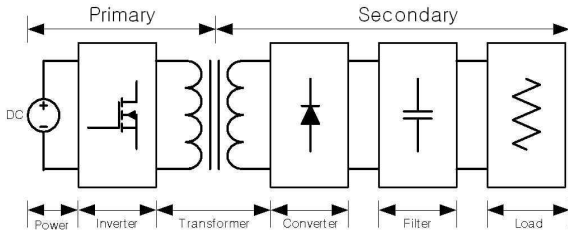


그림 1 무접점 전원공급 시스템 구성도  
Fig. 1 Block diagram of contactless power transfer

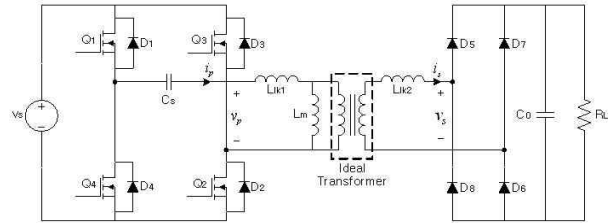


그림 2 직렬 공진 풀 브리지 컨버터  
Fig. 2 Series resonant full bridge converter

복잡해지고, 전력용 반도체 스위치와 부가적인 회로들로 인하여 비용이 증가한다.

따라서 본 논문에서는 현재의 무접점 전원공급 기술의 기술적 한계를 극복하고 각종 휴대용기기의 배터리 충전, LED 조명과 같은 제품 상용화에 이를 수 있는 최적의 솔루션에 대한 방향을 제시한다. 또한, 이물질 감지를 위하여 2차측이 정상부하 또는 비정상부하일 때 1차측 전류 및 전압위상의 변화 차이를 이용함으로써, 2차측에 ID 신호를 발생해야 하는 회로와 스위칭 소자 등을 줄여 회로의 간소화와 기술을 확보하고 WPC에 기술료를 지불하지 않고 산업전반에 사용할 수 있는 상용화에 가까운 연구개발 성과를 이룬다.

## 2. 무접점 전원공급 시스템의 개요

그림 1은 무접점 전원공급 시스템의 전체 구성도를 나타낸다. 무접점 전원공급 시스템은 변압기의 코어가 물리적으로 분리되어있는 비접촉 변압기를 사용하여 전자기 유도현상으로 1차측에서 2차측으로 전력을 전달한다. 1차측은 시스템 입력 전원인 직류 전원부, 비접촉 변압기 1차측에 교류 전압을 인가해 주기 위한 인버터로 구성된다. 2차측은 1차측으로부터 인가된 교류 전압을 직류 전압으로 변환하기 위한 컨버터, 평활부 그리고 부하로 구성된다. 무접점 전원공급 시스템에 적용되는 비접촉 변압기는 큰 공극으로 인하여 낮은 결합계수를 가지므로 에너지 전달 효율이 낮아지며 공극을 갖는 분리형 변압기가 사용되므로 일반적인 PWM 컨버터는 사용이 불며 하다. 따라서 에너지 전달 효율이 낮은 단점을 극복하고 높은 주파수의 스위칭을 통하여 출력 전압을 효율적으로 전달하기 위해 LC 직렬 공진 풀-브리지 컨버터를 적용한다. 공진형 컨버터는 공진 주파수와 스위칭 주파수의 관계에 따라 저항성, 용량성, 유도성 부하의 스위칭 패턴으로 동작이 가능하다. 본 논문에서는 MOSFET의 스위칭 손실을 줄이기 위하여 공진 주파수보다 스위칭 주파수를

높게 설정하였다. 직렬 공진 풀 브리지 컨버터에 비접촉 변압기 등가모델을 적용한 컨버터를 그림 2에 나타내며 비접촉 변압기에서의 상호 인덕턴스, 1, 2차측 누설 인덕턴스, 결합계수, 자화 인덕턴스 변압기 권선비 ( $N_1 : N_2$ ) 사이의 관계식, 그리고 L과 C에 의한 공진 주파수는 다음과 같다<sup>[3]</sup>.

$$L_M = L_m \left( \frac{N_2}{N_1} \right) \tag{1}$$

$$k = \frac{L_M}{\sqrt{L_1 L_2}} \tag{2}$$

$$L_{lk1} = L_1 - L_m \tag{3}$$

$$L_{lk2} = L_2 - \left( \frac{N_2}{N_1} \right) L_M \tag{3}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{eq} C_r}} \tag{4}$$

$$L_{eq} = \frac{L_m \cdot L_{lk2} N^2}{L_m + L_{lk2} N^2} + L_{lk1} \tag{5}$$

여기서  $L_M$ 은 상호 인덕턴스,  $L_m$ 은 자화 인덕턴스,  $k$ 는 결합 계수,  $L_{lk1}$ ,  $L_{lk2}$ 는 비접촉 변압기 1, 2차측 누설 인덕턴스,  $f_r$ 은 공진 주파수,  $L_{eq}$ 는 비접촉 변압기 2차측을 단락하고 측정된 등가 인덕턴스를 나타낸다.

## 3. 기존의 RFID/ID 방식을 이용한 CPTS

기존의 RFID(Radio frequency Identification)/ID 방식을 이용하는 무접점 전원공급 시스템의 개략도를 그림 3에 나타내고 나타나 있으며 시스템의 구성은 다음과 같다. 2차측에서 발생하는 ID신호를 인식하기 위한 전류 검출부, ID 신호 검출부, 1, 2차측 제어부, 1, 2차측 구동 드라이버, 인버터부, 공진부로 구성되어 있으며, 2차측은 정류부, LDO(Low Drop Output), ID 발생부로 구성되어 있다.

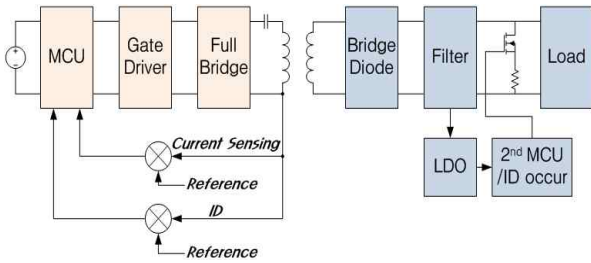


그림 3 RFID/ID 방식 개략도  
Fig. 3 Schematic diagram of RFID/ID method

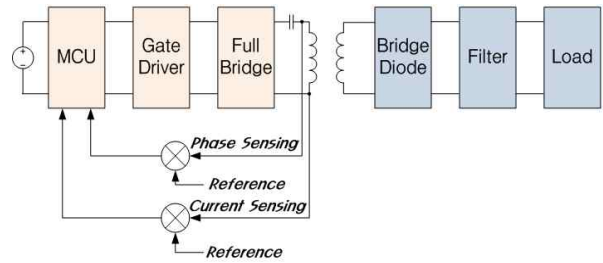


그림 4 전압위상 방식 개략도  
Fig. 4 Schematic diagram of voltage phase

2차측 코일이 1차측에 접촉하여 LDO에 전원이 인가되고 2차측에서 ID 신호가 발생하면 2차측 MOSFET의 스위칭을 통하여 1차측의 전류값에 변화를 주며 1차측에 설정된 기준 전류 값에 따라 ID가 필터링 된다. 이때, ID 신호를 발생하는 부하는 정상 부하로 판단하여 1차측 제어부에서는 2차측에서 발생한 ID를 인식하고 1차측 MOSFET는 2차측에 전원을 인가하기 위하여 스위칭 한다. 반면에 ID 신호를 발생하지 않는 부하의 경우에는 비정상 부하로 인식하여 전원 공급을 중단한다<sup>[4][5]</sup>.

#### 4. 제안된 전압위상을 이용한 CPTS

제안된 전압위상 방식을 이용하는 무접점 전원공급 시스템의 개략도를 그림 4에 나타낸다.

기존의 CPTS와는 다르게 2차측에 스위칭 소자, MCU등의 부가적인 소자가 필요하지 않음을 알 수 있다. 제안된 시스템은 2차측 코일이 1차측에 근접하여 1차측의 전류 변화와 전압위상의 변화를 판단한다. 이때, 전압위상의 변화를 발생하는 부하는 정상 부하로 판단하여 1차측 제어부에서는 2차측 부하에 전력을 공급하기 위해 MOSFET 구동을 위한 게이트 신호를 발생한다. 반면에 전압위상의 변화를 발생하지 않는 부하의 경우에는 비정상 부하로 인식하여 전원 공급이 중단된다.

##### 4.1 디지털 제어기

시스템의 제어는 ATmel사의 ATmega48을 이용하여 그림 5는 1차측 전압위상 및 전류 검출 회로를 나타낸다. 무접점 전력 전달 시 2차측의 부하 상황과 메탈 계열의 비정상 부하의 간섭 여부는 1차측의 인덕턴스 변화량에 따라 감지할 수 있다. 이와 같은 인덕턴스 변화량은 회로의 전류 크기와 위상을 ATmega48에서 인식한다.

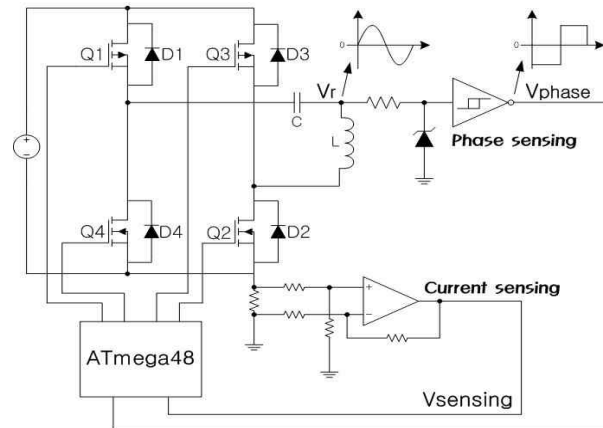


그림 5 전압 위상 및 전류 검출 회로  
Fig. 5 Sensing circuit of voltage phase and current

전류의 인식은  $0.025[\Omega]$ 의 저항 양단에 흐르는 전류에 대하여 형성되는 전위차를 OP-AMP로 증폭한 후 ADC 변환을 통하여 디지털 값으로 변환한다. 전압 위상의 인식은 공진 파형에서 피드백되는 위상을 직렬 저항과 제너 다이오드를 이용하여 전류와 전압을 감쇄시키고 슈미트트리거 회로를 이용하여 구형파로 만든 후 ADC 변환을 통하여 디지털 값으로 변환한다.

##### 4.2 스위칭 타임 차트 및 제어 알고리즘

무접점 전원공급 시 정상 부하와 비정상 부하를 감지하기 위한 스위칭 타임 차트를 그림 6에 나타내고 제어 알고리즘을 그림 7에 나타낸다.

제한한 CPTS의 동작은 그림 5에서처럼 1차적으로 검출된 전류의 평균값을, 그리고 2차적으로 스위치의 게이트 신호와 검출된 전압위상 신호간의 위상차가 조건에 맞을 경우에만 정상부하로 동작하게 되며, 시스템은 네 가지의 동작 모드로 분류될 수 있다.

##### ① Standby Mode

Standby mode는 CPTS의 2차측 코일의 접촉 없이

1차측 코일만 대기상태에 있는 경우로써, 2차측 코일이 근접하는 경우에는 전류를 감지하기 위하여 간헐적인 스위칭이 이루어져야 한다. 이러한 간헐적인 스위칭(100[msec]) 동안 그림 7의 알고리즘에서 코일의 최소, 최대값과 ATmega48의 A/D 변환을 통하여 검출된 전류의 평균값을 비교하게 된다. 이때 전류의 평균값이 코일의 최소값보다 작을 경우는 초기 상태로 돌아가 standby mode(Green LED on)를 유지하게 된다. 즉, 1차측 코일에 정상 부하와 비정상 부하 모두 근접하지 않은 상태가 된다.

② Error Mode

2차측 코일이 1차측 코일에 근접한 경우 전류 검출 부분 조건에서 전류의 평균값이 코일의 최대값보다 커지는 경우는 비정상 부하가 근접한 경우에 해당하며 시스템은 error mode(Red LED on)로 동작한다.

③ Middle Power Mode

Middle Power Mode는 검출된 전류값이 코일의 최소값과 최대값 사이의 값을 가지게 될 경우 정상 부하 또는 비정상 부하가 1차측 코일에 근접한 경우이며, 정상 부하와 비정상 부하를 판단하기 위하여 1차측 전압위상 신호를 검출하고 스위칭 신호와 비교하여 정상 부하를 판단한다. 이러한 mode에서는 스위치의 게이트 신호와 그림 5에서 검출된 전압위상 신호를 비교하기 위하여 standby mode와 마찬가지로 간헐적인 스위칭(200[msec])이 이루어져야 한다.

그림 8에 나타낸것처럼 정상 부하와 비정상 부하를 판단하기 위하여 스위칭 신호가 High에서 Low로 바뀔 때 MCU의 'nop' 명령을 이용하여 정상 부하와 비정상 부하의 전압 위상 차가 발생하는 시점에서 전압 위상 신호를 검출하여 High일 경우는 정상 부하로, Low일 경우는 비정상 부하로 판단한다.

④ Full Power Mode

Full Power Mode(Blue LED on)는 middle power mode에서 전압위상의 신호가 게이트 신호보다 앞서는 경우 전환되며, 이때 2차측 코일을 통하여 부하에 전력이 공급된다. 시스템의 완성도와 안정성을 높이기 위하여 전류의 변화를 한번 더 검출하게 된다.

4.3 실험에 적용되는 비접촉 코일 설계

무접점 전원공급 시스템의 비접촉 변압기는 코일과 코일의 결합을 이용하여 1차측에서 2차측으로 에너지를 전달한다. 본 논문에 적용되는 나선형 코일은 리프

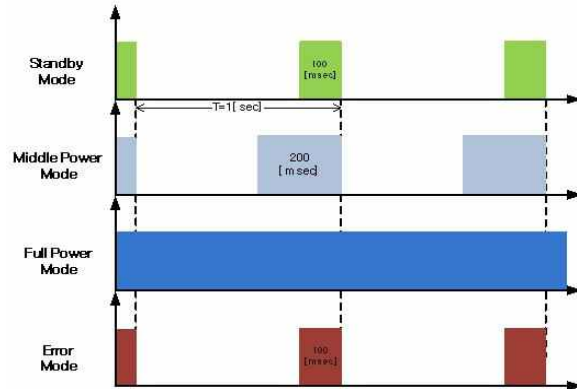


그림 6 스위칭 타임 차트  
Fig. 6 Time chart for switching

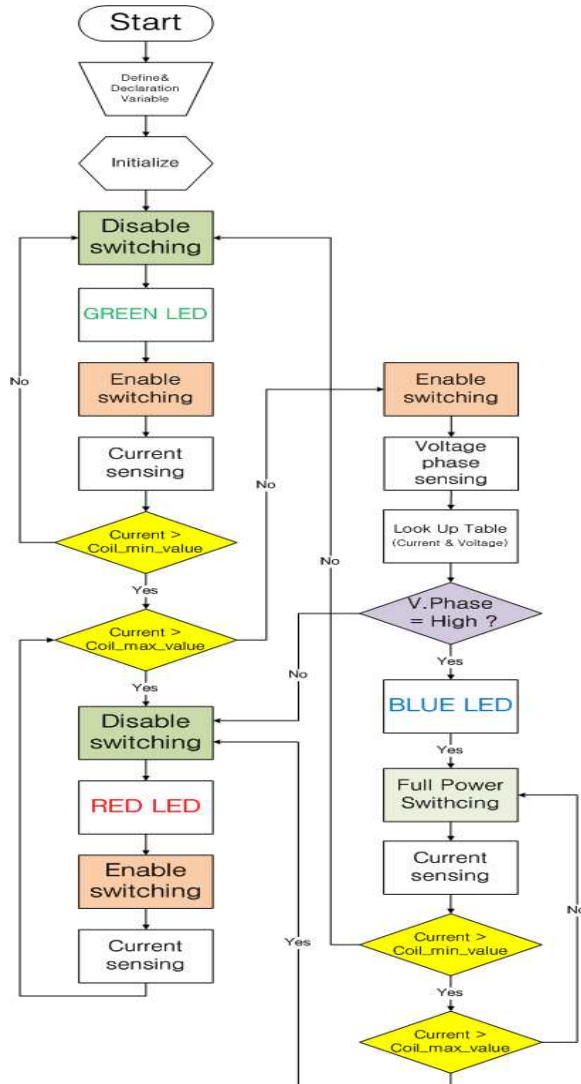


그림 7 전압위상 방식 제어 알고리즘  
Fig. 7 Control algorithm of voltage phase method

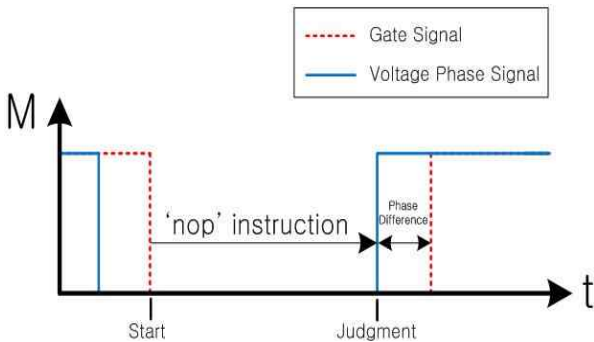


그림 8 정상, 비정상 부하 판단을 위한 MCU 동작  
 Fig. 8 Operation of MCU for normality or alien load Judgement

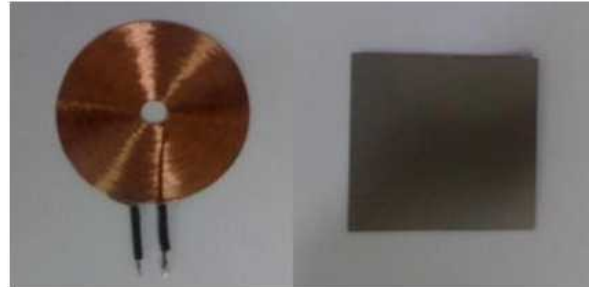


그림 9 나선형 코일과 자기 차폐지  
 Fig. 9 Spiral coil and magnetic shielding

와이어 구조로 양면이 모두 노출된 구조이므로 자료를 형성하지 않는 코일의 한 쪽면은 페라이트 재질의 차폐지를 부착하여 누설 자속을 최소화 하여 비교적 높은 효율을 가질 수 있다<sup>[6]</sup>. 그림 8은 나선형 코일과 자기 차폐지에 대한 그림을 나타내며, 본 시스템에 나선형 코일을 적용하기 위한 9종의 샘플 코일을 표 3에 나타낸다.

각각의 코일은 LCR 미터를 이용하여 9종 코일의 인덕턴스 값을 측정하였으며 표3에서 나타내듯이 1차측에 37T, 19T(2종)의 코일을 각각 적용하고 2차측 코일(7종)을 1:1로 적용하여 양 코일 사이에 3[mm]갭을 적용한 후 테스트 하였을 경우 그림 9에서 나타난 코일이 적용 되었을 때 가장 높은 효율을 나타냈다. 그림 10은 코일 적용 시 최대 효율과 최소 효율에 대한 그래프를 나타낸다.

표 1 9종 코일 샘플의 사양  
 Table 1 Specifications of 9-sort coil samples

| Side | Thickness | Strand | Turns | Diameter | Inside Diameter |
|------|-----------|--------|-------|----------|-----------------|
| 1    | 0.14 [mm] | 10     | 37    | 43 [mm]  | 6 [mm]          |
| 1    |           |        | 19    | 43       | 21              |
| 2    |           |        | 37    | 32       | 6               |
| 2    |           |        | 32    | 32       | 6               |
| 2    |           |        | 25    | 32       | 6               |
| 2    |           |        | 20    | 32       | 6               |
| 2    |           |        | 19    | 32       | 19              |
| 2    |           |        | 19    | 32       | 15.5            |
| 2    |           |        | 19    | 32       | 12              |

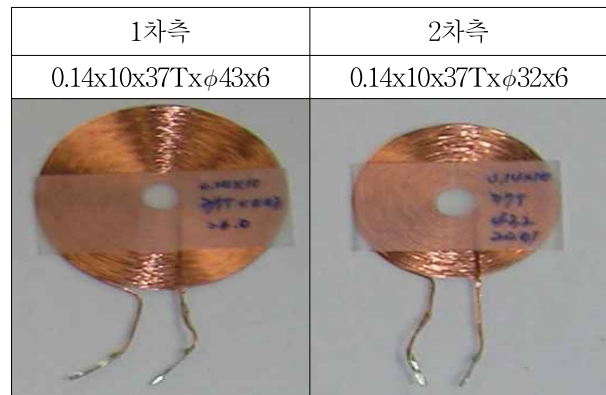


그림 10 코일 샘플  
 Fig. 10 The coil samples

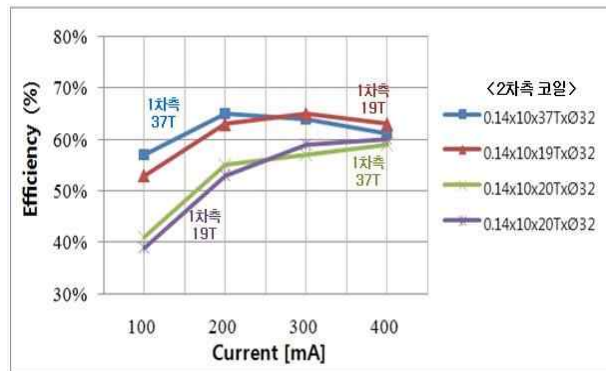


그림 11 효율  
 Fig. 11 Efficiency

### 5. 시뮬레이션 및 실험 결과

#### 5.1 시뮬레이션

제안한 전압위상 방식 CPTS의 정상 부하일 경우와 비정상 부하일 경우의 게이트 신호와 전압위상 차를 확인하기 위해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 정상 부하의 시뮬레이션은 그림 2의 회로를 부하 전류

가 400[mA]일 경우에 대하여 스위치의 게이트 신호와 전압위상 파형을 비교 하였고, 비정상 부하의 시뮬레이션은 비접촉 변압기의 2차측 인덕턴스와 정류부를 제거한 후 정상 부하 시뮬레이션과 마찬가지로 게이트 신호와 전압위상 파형을 비교하였다. 시뮬레이션을 위한 파라미터는 표 4와 같으며, 그림 11의 시뮬레이션 결과로부터 정상 부하일 경우 전압위상 변화의 폭은 큰 반면, 비정상 부하일 경우 전압위상 변화의 폭은 미비함을 알 수 있다.

**5.2 실험 결과**

시스템의 실험을 위하여 직렬 공진 컨버터에 사용된 코일은 그림 9와 같으며, 기구물 두께를 고려하여 1, 2차측 코일 간격을 3[mm]로 하였다. 또한, 부하 테스트에 사용된 전자부하는 Agilent 社에 6060B를 이용하여 수행하였다. 시뮬레이션 시 파라미터의 입력 전압, 공

표 2 시뮬레이션 파라미터  
Table 2 Simulation parameter

| Parameter | Value  |
|-----------|--|
| 입력 전압     | DC 5 [V]                                     |
| 출력 전압     | DC 4.2 [V]                                   |
| 공진 주파수    | 125.6 [kHz]                                  |
| 스위칭 주파수   | 133 [kHz]                                    |
| 상호 인덕턴스   | 16 [uH]                                      |
| 누설 인덕턴스   | primary : 23.6 [uH]<br>secondary : 11.6 [uH] |
| 공진 커패시터   | 68 [nF]                                      |

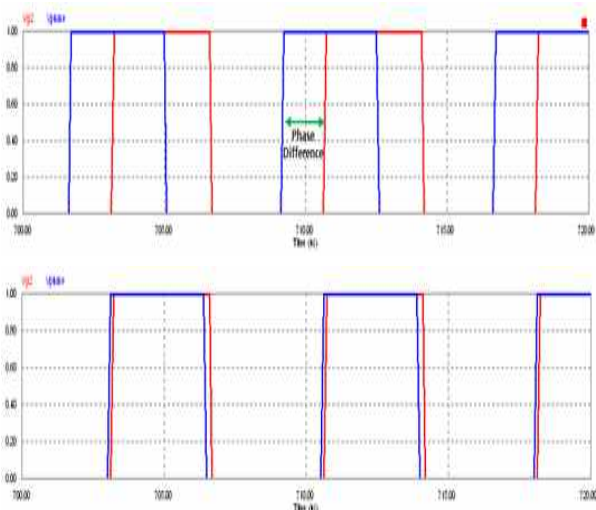


그림 12 정상 부하(위) 및 비정상 부하(아래) 시 위상 차  
Fig. 12 Phase difference in normality and alien load

진 주파수, 스위칭 주파수, 각각의 인덕턴스는 표 4와 같으며, 시스템 주요 사항은 표 5와 같다.

그림 12는 무접점 전원공급 시스템의 대기상태 시 게이트 신호(Ch1), 1차측 공진 전압 파형(Ch2), 전압위상 파형(Ch3), 전류 센싱 저항 양단에 흐르는 전류에 대하여 형성되는 전위차를 OP-AMP로 증폭한 파형(Ch4)을 나타낸다. 이때 스위칭 게이트 신호와 전압위상 파형의 차이를 비교하였을 때 전압 위상의 파형은 0.24[us]만큼 뒤쳐져 있음을 알 수 있으며 이때는 standby mode로 존재한다.

그림 13은 1차측 코일에 2차측 코일이 근접하였을 때 정상 부하에서 부하전류 가변(100~400[mA])에 따른 파형을 나타내며, 100[mA]에서는 -0.08[us], 200[mA]에서는 -0.72[us], 300[mA]에서는 -0.96[us], 400[mA]에서는 -1.04[us]로 앞서게 된다.

그림 14는 비정상 부하 시 스위칭 신호와 전압위상 신호가 정상 부하일 때 1차측 입력 전류를 비정상 부하로 발생시켜 정상 부하의 1차측 입력 전류와 동일 조건에서 측정된 파형을 나타낸다. 이러한 정상부하와 비정상 부하는 각각의 전류 조건에서 그림 7과 그림 8에 나타낸 동작을 정상적으로 수행함을 알 수 있다.

표 3 시스템 주요 정격  
Table 3 Specifications of system

| Parameter | Value  |
|-----------|--|
| 입력 전압     | DC 5 [V]   |
| 출력 전압     | DC 6~4.5 [V]   |
| 출력 전류     | 100~400 [mA]   |
| 스위칭 소자    | Q1,Q3: NTGS411PT1G(-30V@-4.3A)<br>Q2,Q4: FDC5612(60V@4.3A) |
| 브릿지 다이오드  | SA10LA03 (30V@1A)  |
| 제어기       | ATMega48   |

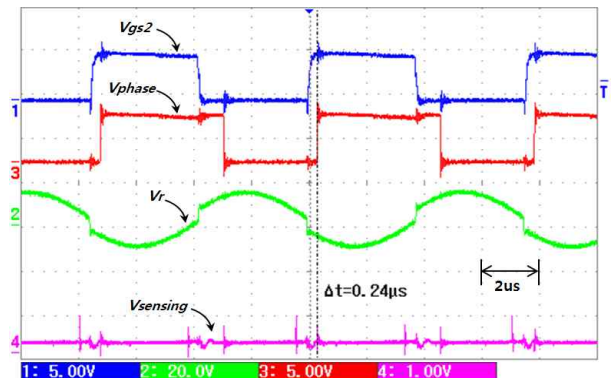
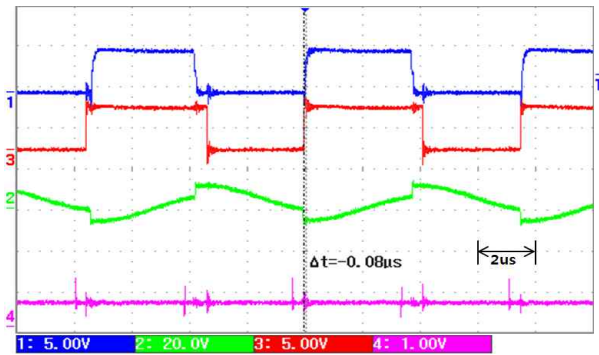
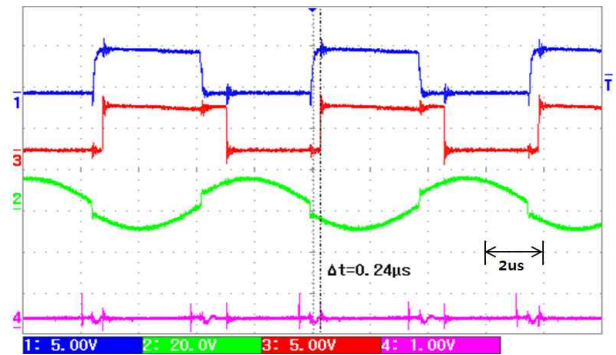


그림 13 대기 모드 시 파형  
Fig. 13 Waveforms in standby mode

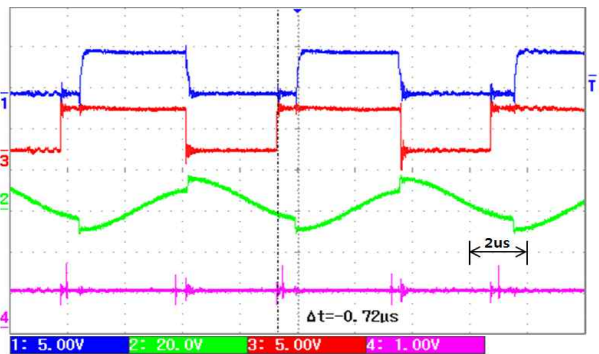




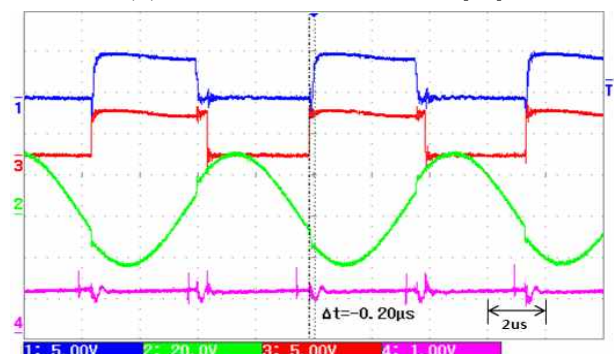
(a) 정상 부하 시 부하전류 100[mA]



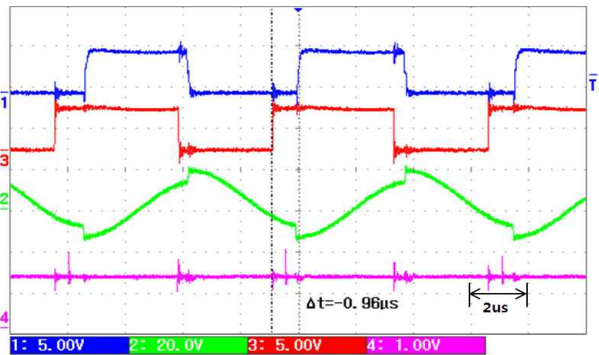
(a) 비정상 부하 시 부하전류 100[mA]



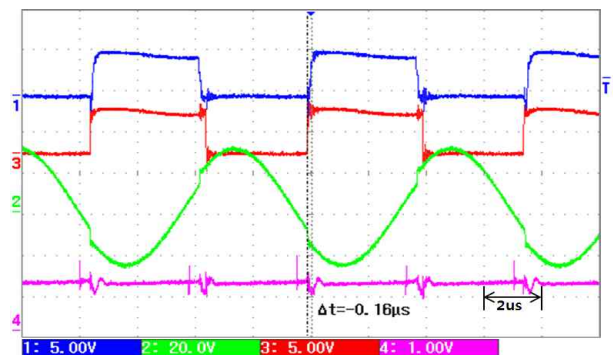
(b) 정상 부하 시 부하전류 200[mA]



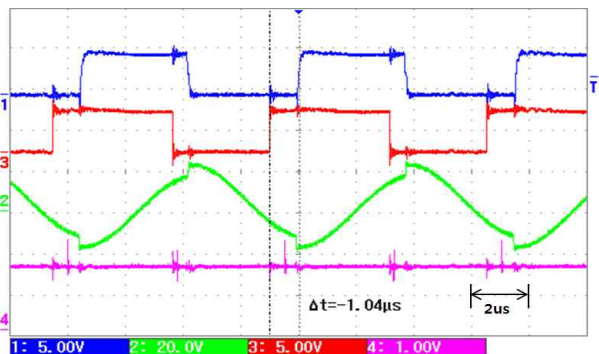
(b) 비정상 부하 시 부하전류 200[mA]



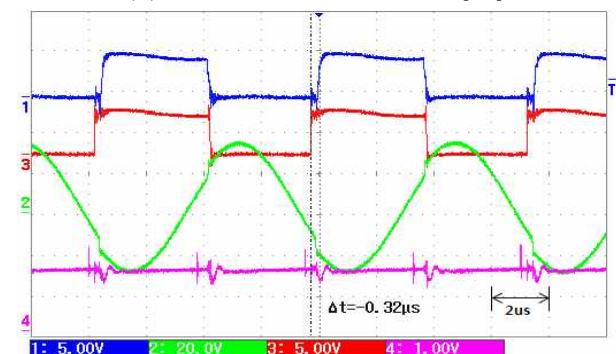
(c) 정상 부하 시 부하전류 300[mA]



(c) 비정상 부하 시 부하전류 300[mA]



(d) 정상 부하 시 부하전류 400[mA]



(d) 비정상 부하 시 부하전류 400[mA]

그림 14 정상 부하 시 파형  
Fig. 14 Waveforms in normality load

그림 15 비정상 부하 시 파형  
Fig. 15 Waveforms in alien load

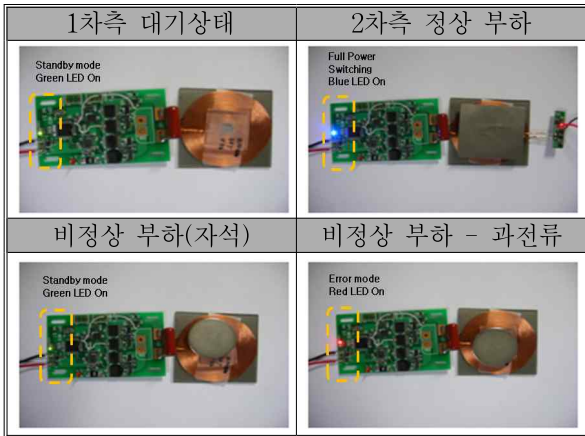


그림 16 부하에 따른 LED 동작  
Fig. 16 LED operation for load

그림 15는 2차측 정상 및 비정상 부하에 따른 시스템의 스위칭 상태를 나타내고 시스템은 각 모드에 따라 LED를 동작시키게 된다. 그림 7의 알고리즘에서 standby mode는 green LED, full power mode는 blue LED, 그리고 error mode에서는 red LED를 나타내며, 제작된 시스템은 그림 15로부터 정상 부하와 비정상 부하에 대하여 정상적인 동작을 수행함을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 기존의 RFID/ID 방식을 이용한 무접점 전원공급 시스템의 단점을 보완하기 위하여 전압 위상을 이용한 무접점 전원공급 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템의 설계는 직렬 공진형 컨버터에 비접촉의 나선형 코일을 적용하였으며, ATmega48을 이용하여 정상 부하 및 비정상 부하에 따라 변하는 전압 위상을 감지하고 시스템을 제어하였다. 제안된 전압 위상 방식의 무접점 전원공급 시스템은 2차측에 스위칭 소자와 제어가 추가로 필요하지 않으며, 1차측의 전류와 전압의 변화를 이용하므로 설계와 제어가 간단하고 이로 인해 단가와 부피가 적어지는 장점을 갖는다.

## 참 고 문 헌

[1] Jesus Sallan, Juan L.Villa, Andres Llombart and Jose Fco.Sanz, "Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge", *IEEE Trans. Ind. Electronics*, Vol. 56, pp. 2140-2149, 2009, June.  
[2] C.Fernandez, O.Garcia, R.Prieto, J.A.Cobos, and J.Uceda, "Overview of different alternatives for the

contact-less transmission of energy", *IECON 02*, Vol. 2, pp. 1318-2002.

[3] Eun-Soo Kim, Hwan-Kook Song, Joo-Hun Kim, Hyun-Kwan Lee, Yoon-ho Kim, "Efficiency characteristics of a half-bridge series resonant converter for the contactless power supply", *APEC 2008*, 32nd Annual IEEE, pp. 1555-1561, 2008, May.  
[4] Ghovanloo. M, Najafi. K, "A wideband frequency-shift keying wireless link for inductively powered biomedical implants", *IEEE Trnas. Circuits and Systems I-Regular Paper*, Vol. t1, pp. 2374-2383, 2004, Dec.  
[5] U. K. Madawala, J.Stichbury & S. Walker, "Contactless power transfer with two-way communication", *IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE*, Vol. 3, pp. 3071-3075, 2004. Nov.  
[6] William H. Hayt, Jr. Jack, E. Kemmerly, "Engineering Circuit Analysis", Forth Edition, pp. 442-446.

## 저 자 소 개



### 유주희(柳周熙)

1984년 1월 19일생. 2009년 강원대 공대 제어계측공학과 졸업. 2009년~현재 동 산업과학 대학원 제어계측공학과 석사과정.



### 김춘삼(金春杉)

1960년 11월 12일생. 1984년 동아대 전기 공학과 졸업. 1988년 중앙대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2001년 미국 Univ. of Akron 방문연구교수. 1994년~현재 강원대 제어계측공학과 교수.