

# 가공배전선로의 전력설비 감시를 위한 유비쿼터스 센서

(Ubiquitous Sensors for Supervision of Power Facilities  
in Overhead Power Distribution Lines)

길경석\* · 박대원 · 김일권 · 최수연 · 박찬용

(Gyung-Suk Kil · Dae-Won Park · Il-Kwon Kim · Su-Yeon Choi · Chan-Yong Park)

## 요 약

최근 유비쿼터스 센서네트워크 기술이 전력설비관리에 적용되어 오고 있다. 본 연구에서는 가공배전선로에서 전력용변압기와 피뢰기를 관리할 수 있는 유비쿼터스 센서의 설계 및 제작에 대해 기술하였다. 이 센서들은 8-[bit] 마이크로프로세서, IEEE 802.15.4기반 무선통신모듈과 주변 전자회로로 구성되어 있다. 변압기의 부하 및 서지전류 측정에는 1000[A]까지 포화되지 않고 선형성을 유지할 수 있도록 공심형 로고우스키 코일을 제작하여 적용하였다. 피뢰기를 흐르는 50[ $\mu$ A]~1[mA]의 미소누설전류를 측정하기 위하여 180[Hz]에서  $10^5$ 의 고투자율을 갖는 영상변류기를 사용하였으며, 피뢰기 감시모듈의 -3[dB] 주파수 대역은 12[Hz]에서 1.24[kHz]이다.

## Abstract

Recently, ubiquitous sensor network(USN) techniques have been applied to electric power facility management. This paper dealt with the designed and fabricated ubiquitous sensors which monitor transformers and lightning arresters installed in overhead distribution systems. The sensors consist of a 8-[bit] microprocessor unit, a wireless communication module specified in IEEE 802.15.4, and associated electronics. A Rogowski coil was fabricated to measure load of transformer and surge current without saturation having good linearity up to 1000[A].

A zero-phase current transformer with a high relative permeability of  $10^5$  at 180[Hz] was used to detect small leakage current of 50[ $\mu$ A]~1[mA] flowing lightning arrester, and the frequency bandwidth of the module is ranges from 12[Hz] to 1.24[kHz] at -3[dB].

Key Words : Ubiquitous sensor network(USN), Power facility management, Transformer, Lightning arrester, Rogowski coil, Zero-phase current transformer, Wireless communication module

## 1. 서 론

특고압 가공배전선로에는 공장, 빌딩, 주택 등 수용가에 전력공급을 위하여 변압기, 차단기, 피뢰기와 같은 전력설비들이 설치되어 있다. 이들 설비가

\* 주저자 : 한국해양대학교 전기전자공학부 교수  
Tel : 051-410-4414, Fax : 051-403-1127

E-mail : kilgs@hhu.ac.kr

접수일자 : 2007년 6월 26일

1차심사 : 2007년 7월 5일, 2차심사 : 2007년 8월 7일

심사완료 : 2007년 8월 23일

## 가공배전선로의 전력설비 감시를 위한 유비쿼터스 센서

내·외부적 원인으로 고장이 발생하면 동계통의 수용가에는 전력공급이 중단된다. 현대와 같은 고도정보화 사회에서는 일순간의 정전도 막대한 기술적, 경제적 손실이 발생할 수 있어 여러 가지 전력설비 관리기법이 적용되고 있으나, 가공배전선로에서 전력설비의 고장으로 인한 전력공급사고가 일정 수준 이상 발생하고 있다. 지난 수년간의 연구개발로 가공배전선로에서 차단기 원격제어 및 주상변압기 전압전류의 원격감시 장치가 개발되어 적용 평가중에 있다[1]. 최근에는 IT기술을 접목하여 ZigBee기반의 유비쿼터스 센서 네트워크(USN; Ubiquitous Sensor Network)구성에 의한 실시간 감시 및 데이터 전송 기술이 활발히 연구되고 있으나, 가공배전선로에의 적용에 대한 연구는 극히 미흡한 실정이다. 또한 가공배전선로에는 차단기외에도 변압기, 피뢰기 및 접지 등 여러 가지 전력설비가 설치되어 있어, 피보호설비의 감시 및 진단에 적합한 센서의 개발이 요구된다.

본 논문에서는 가공배전선로의 전력설비 관리에 USN기술의 적용을 위한 핵심 요소로 마이크로프로세서와 ZigBee 통신모듈을 탑재한 전력감시센서의 설계 및 제작에 대해 연구하였다. 연구대상은 가공배전선로의 주상변압기와 피뢰기 및 여기에 침입하는 서지전류의 검출센서이며, 취득데이터의 전송에는 IEEE 802.15.4 통신모듈을 적용하였다[2].

가공배전선로의 전력설비 감시에 USN의 적용은 상시 온라인 감시는 물론 고장 발생시 사고위치를 실시간으로 알 수 있어, 사고복구에 소요되는 시간의 단축과 기술적, 경제적 손실도 저감시킬 수 있을 것으로 기대한다[3].

## 2. 설계 및 제작

### 2.1 부하 및 서지전류 검출 센서

변압기 부하전류검출 및 서지전류 검출을 위한 센서는 온라인 설치 및 측정범위( $\sim 1000[A]$ )를 고려하여 자기포화 현상이 발생하지 않는 공심의 로고우스키 코일(Rogowski coil)을 설계하여 적용하였다.

로고우스키 코일은 그림 1과 같이 구성되며, 관계

식은 식 (1)과 같다[3-5].

$$M \frac{di_p}{dt} = L \frac{di_s}{dt} + (R_s + R_o) i_s \quad (1)$$

여기서,  $i_p$ 는 1차 전류,  $i_s$ 는 2차 전류,  $M$ 은 로고우스키 코일과 접지축 도선과의 상호 인덕턴스,  $L$ 과  $R_s$ 는 로고우스키 코일의 자체 인덕턴스와 저항을 나타내며,  $R_o$ 는 2차측 검출저항이다.

로고우스키 코일의 출력전압은 1차 전류  $i_p$ 의 주파수에 따라 달라지는데, 임피던스 조건이  $\omega L \gg (R_s + R_o)$ 으로 되면,  $i_s = \frac{M}{L} i_p$ 가 되고, 이때 출력전압은 식 (2)와 같이 얻어진다.

$$v(t) = \frac{M}{L} R_o i_p [V] \quad (2)$$

식 (2)에서 출력전압은 1차 전류에 비례하며, 상승시간은 1ns 정도로 감쇄시정수가 작기 때문에 고속단시간 펄스전류의 검출이 용이하며, 별도의 적분기를 필요로 하지 않는 자기 적분형이 된다.

한편  $\omega L \ll (R_s + R_o)$ 의 조건으로 되는 경우에는

$$i_s = \frac{M}{R_s + R_o} \frac{di_p}{dt} \text{가 되고, 이때 출력전압은}$$

$$v(t) = \frac{MR_o}{R_s + R_o} \frac{di_p}{dt} [V] \quad (3)$$

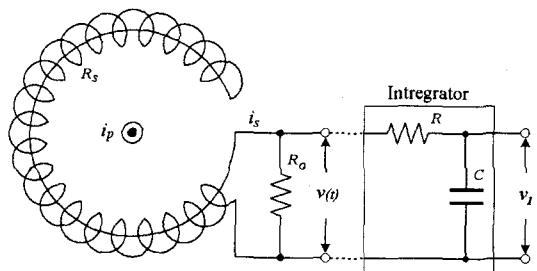


그림 1. 로고우스키 코일의 구성  
Fig. 1. Configuration of the Rogowski coil

가 되어 1차 전류의 미분값에 비례하는 특성을 갖는다. 따라서 원전류로 복원하기 위해서는 적분기가 필요하다. 그림 1에서와 같이 RC로 구성되는 수동형

적분기를 적용할 때,

$R \gg \frac{1}{\omega_h C}$  이고,  $R_o \gg R_s$ 로 하면, 출력전압은

$$v_1 = \frac{1}{RC} \int v(t) dt = \frac{M}{RC} i_p [V] \quad (4)$$

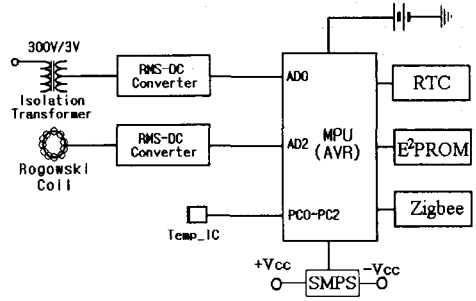
가 된다.

## 2.2 주상변압기 감시 센서

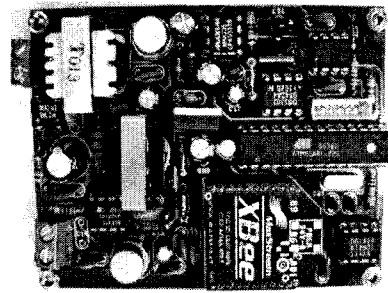
주상변압기 감시를 위한 파라미터는 전압, 전류, 온도, 부분방전 등 여러 가지가 있으나, 전력회사의 요구와 실적용성 및 경제성을 고려하면 2차 전압과 전류, 외함의 표면온도 및 주위온도를 측정하는 것이 요구된다. 또한 센서는 신설 변압기는 물론 운전 중인 기설 변압기에도 전력공급의 중단과 구조변경이 없이 설치가 가능해야 한다. 본 연구에서는 이들을 고려하여 그림 2와 같은 구성으로 변압기 감시 센서를 설계하였다.

센서모듈은 주상변압기 외함에 부착되며, 구동에 필요한 전력은 변압기로부터 공급된다. 정전시에는 내장 충전지에 의해 동작하고, 소형으로 센서의 신뢰성을 확보하기 위해 회로구성은 가능한 저전력형으로 간소화하였다. 주상변압기 2차 전압의 측정은 절연변압기(300[V]/4[V])로 강압하여 실효값(RMS)을 직류로 변환하고 마이크로프로세서의 10[bit] A/D 입력에 전달된다.

2차 부하전류 측정은 기설의 운전 중인 변압기에도 적용할 수 있도록 클램프형으로 소형·경량화가 가능한 그림 1의 로고우스키 코일로 하였다. 로고우스키 코일의 출력전압은 적분을 통해 전압신호와 마찬가지로 마이크로프로세서의 A/D포트에 입력된다. 변압기 절연유의 온도는 상태 진단에서 중요한 파라미터이다. 그러나 기설변압기에는 구조상 직접적인 측정이 불가능하고 신설변압기는 설계시부터 구조를 변경하여 온도센서를 설치하여야 하므로, 본 논문에서는 변압기 외함의 표면온도와 주위온도를 측정하기 위해 하나의 반도체 온도센서는 변압기 외함에 접촉되도록 하였다.



(a) 구성



(b) 사진

그림 2. 변압기 감시 센서

Fig. 2. Sensor for transformer monitoring

전압측정에 사용된 절연변압기의 사양은 실효값 300[V]/4[V], 10[mA]로 전 영역에서의 측정오차는 0.3[%] 이하이다. 또한 전류 측정용 로고우스키코일의 선형성은 최대 1000[A]까지 0.5[%]이내이며, 신호변환 오차를 최소화하기 위해 최대오차 0.2[%]의 실효값-직류(RMS to DC)변환기와 10[bit] 분해능의 아날로그-디지털(A/D)변환기를 사용하여 전압·전류의 최대측정오차는 1[%] 이내로 유지하였다.

또한 시제작한 센서는 5초마다 전압, 전류 및 온도를 측정하여 내장메모리(256kB E²PROM)에 저장하고, 정상상태에서는 1분 간격으로, 과전류 등 이상상태에서는 즉시 데이터를 ZigBee를 통해 무선으로 전송한다.

그림 3은 센서 모듈에서 검출한 전압·전류 파형과 ZigBee를 통해 PC로 전달된 데이터의 예를 나타낸 것이다.

Date	Time	Vrms[V]	Irms[A]	Temp[C]
2007/05/06	17:13:14	222	64	26
2007/05/06	17:13:18	228	64	26
2007/05/06	17:13:23	226	64	26
2007/05/06	17:13:28	224	64	26
2007/05/06	17:13:33	225	63	26
2007/05/06	17:13:38	226	64	26
2007/05/06	17:13:42	225	64	26
2007/05/06	17:13:47	225	56	26
2007/05/06	17:13:52	225	65	26
2007/05/06	17:13:57	225	65	26
2007/05/06	17:14:02	225	27	26

그림 3. 전송 데이터 예  
Fig. 3. Example of transferred data

### 2.3 배전용 피뢰기 감시센서

피뢰기는 열화가 발생하면 누설전류가 증가하며, 특히 제 3고조파 누설전류는 열화의 정도를 판단하는 중요한 지표이다[6-7]. 본 논문에서 피뢰기 감시 센서는 피뢰기를 흐르는 전체 누설전류의 실효값과 최대값 및 제3고조파 누설전류의 최대값을 측정한다.

누설전류검출에는 피뢰기의 접지선에 관통형영상 변류기(ZCT)를 설치하는데, 보호동작시 큰 서지전류가 흐르므로 절연거리를 확보하기 위해서 직경이 큰 영상변류기를 사용해야 한다.

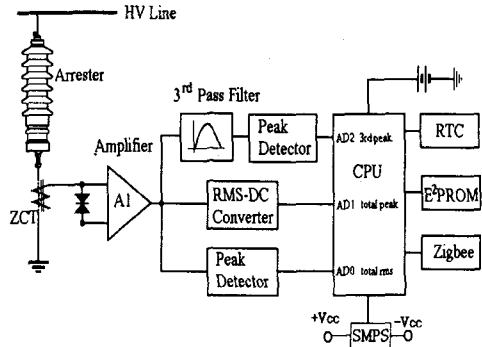
또한 피뢰기의 전체누설전류는 100[ $\mu$ A]~수 백 [ $\mu$ A]이고, 제 3고조파 누설전류는 수 십 [ $\mu$ A]이하로 작기 때문에 영상변류기는 비투자율이 커서 감도가 좋은 것이 요구된다. 본 논문에서 영상변류기는 180[Hz]에서 비투자율이  $10^5$ 의 것을 사용하였으며, 코일권수  $N$ 은 식 (5)를 기초하여 선정하였다[8].

$$N = \frac{rZ_0}{f\mu_0\mu_s A} [T] \quad (5)$$

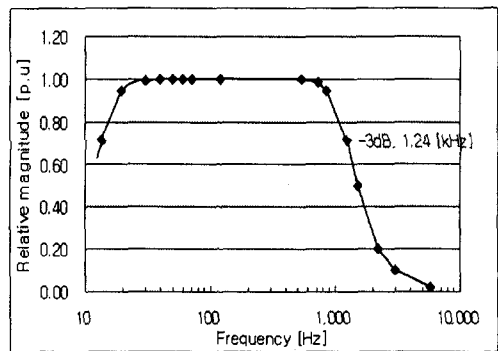
여기서,  $r$ : ZCT직경,  $Z_0$ : 대역통과필터의 영상 임피던스,  $f$ : 제 3고조파의 주파수(180[Hz]),  $\mu_0$ : 진공에서의 투자율,  $\mu_s$ : 비투자율,  $A$ : 코어의 단면적이다.

피뢰기 감시센서의 구성은 그림 4와 같으며, 영상 변류기를 포함한 증폭회로의 -3[dB]의 주파수대역

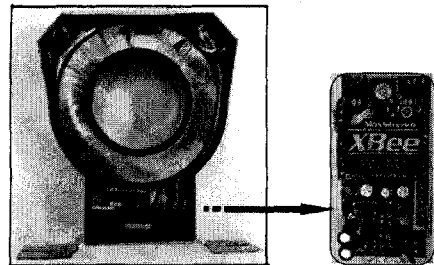
은 그림 4(b)와 같이 12[Hz]~1.24[kHz]로 상용주파수는 물론 제 3고조파를 감쇄없이 측정할 수 있다 [7].



(a) 구성



(b) 주파수 특성



(c) 사진

그림 4. 피뢰기 감시 센서  
Fig. 4. Sensor for arrester monitoring

고정밀 영상변류기의 측정오차는 0.5[%]이며, 소비전력과 피뢰기 열화를 고려하여 0.2[%]의 실효값-직류변환기와 10[bit] A/D변환기를 사용하였다. 측

정범위 50[ $\mu$ A]~1[mA]에서 전체 및 제 3고조파 누설전류의 최대오차는 2[%] 이내이다.

검출된 신호는 변압기 센서와 마찬가지로 E<sup>2</sup>PROM에 저장된다.

피뢰기 센서는 변압기 센서와 달리 설치조건에서 센서구동용 전원을 외부로부터 공급받을 수 없으므로 소비전력을 최소화하도록 회로를 구성하고, 마이크로프로세서에서 전력을 제어할 수 있도록 설계하였다.

표 1에 피뢰기 감시센서를 구성하는 구성품의 전력소비를 나타내었다. 측정대기상태에서 마이크로프로세서, 전원회로 및 ZigBee는 슬립(sleep)모드에 있으며, 나머지 능동회로는 전력차단(power down)모드로 설정되어 이론상 110[ $\mu$ A]를 소비한다.

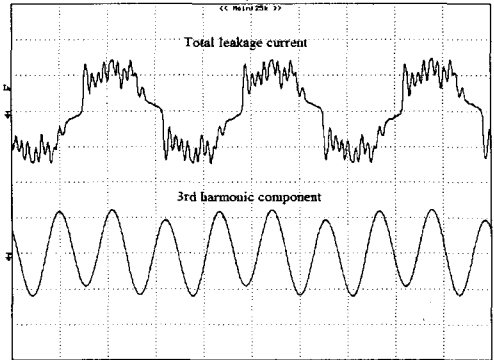
일정 주기마다 피뢰기 누설전류를 측정하도록 설계하고, 측정기간에는 ZigBee를 제외하고 모두 활성(active)모드가 되며 8.47[mA]를 소비한다. 누설전류가 설정레벨 이상이거나 데이터를 전송할 필요가 있을 때에는 ZigBee를 동작시키고 이 때의 소비전류는 58.47[mA]가 된다. 피뢰기의 누설전류가 서서히 증가하는 것을 고려하여 피뢰기 감시센서를 2시간마다 누설전류를 측정하고 동작시간을 5초로 설계하면, 전력 듀티비가 0.07[%]로 되어 평균 116[ $\mu$ A]를 소비하며, 1,200[mAh] AAA형 건전지 사용시 10,300시간 또는 1.18년 동안 사용이 가능하다.

표 1. 센서의 전력소비

Table 1. Power consumption of the sensor

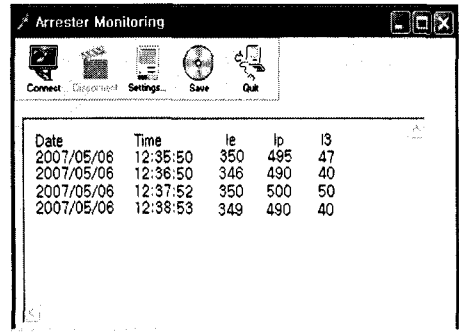
Device	소비전류[mA]		
	활성모드	통신모드	슬립모드
MPU	3.20	3.20	0.10
Op-Amp	0.60	0.60	-
Peak/hold	1.00	1.00	-
RMS/DC	0.17	0.17	-
BPF	1.50	1.50	-
SMPS	2.00	2.00	50.
Zigee		50.00	10.0
Total	8.47	58.47	0.11

그림 5에 시제작한 피뢰기 감시센서로 측정된 누설전류파형과 센서에서 개인용 컴퓨터로 전송된 데이터의 예를 나타내었다.



Upper: (200(uA/div), 5(ms/div)),  
Lower: (20(uA/div), 5(ms/div))

(a) 누설전류 파형



(b) 전송 데이터

그림 5. 측정 파형과 전송 데이터

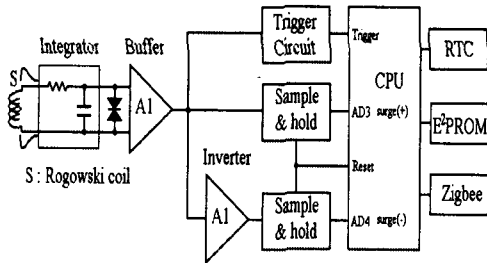
Fig. 5. Measured waveform and transferred data

## 2.4 서지 카운터

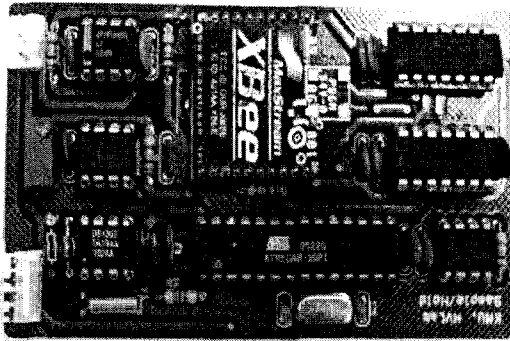
변압기와 피뢰기 등 전력설비의 접지선을 흐르는 서지전류는 수~수 십 [ $\mu$ s]동안 발생하므로 이에 대한 정보를 획득하려면 10[MS/s] 이상의 고속 샘플링 동작을 하는 고가의 A/D 변환기와 복잡한 주변회로의 구성이 요구된다. 서지파형의 기록이 가능한 전력분석기를 제외하면 현재의 서지카운터는 단순히 설정 레벨이상의 서지전류의 발생만을 측정한다. 그러나 전력설비의 효율성과 신뢰성을 향상시키기

## 가공배전선로의 전력설비 감시를 위한 유비쿼터스 센서

위해서는 서지의 발생일시, 방전전류의 크기 및 극성, 발생빈도를 분석할 수 있어야 한다.



(a) 구성



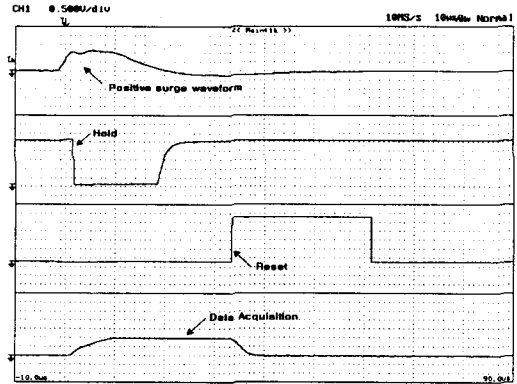
(b) 사진

그림 6. 서지카운터  
Fig. 6. Surge counter

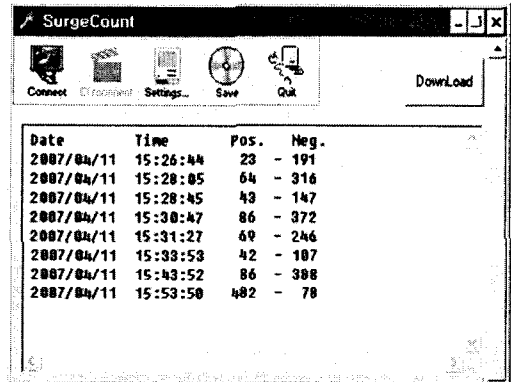
본 논문에서는 그림 6과 같이 수  $\mu\text{A}$ 의 짧은 시간 동안 발생하는 서지전류를 측정하기 위하여 큰 전류에도 포화되지 않는 로고우스키 코일과 고속의 샘플/홀드(Sample/Hold) 회로를 설계하여 원칩 마이크로 프로세서에 내장된 A/D변환 기능으로 8/20 $\mu\text{A}$  100[A]에서 10[kA]까지 측정할 수 있다.

### 3. 결 론

특고압 가공배전선로에 설치되어 있는 변압기, 피뢰기 등 전력설비감시를 위한 센서를 설계·제작하였다. 피측정설비의 특성과 설치환경을 고려하여 센서의 전원회로 및 무선통신회로를 설계하였으며, 유비쿼터스 센서네트워크에 적용이 가능하도록 IEEE 802.15.4 표준에 의한 ZigBee모듈을 탑재하였다.



(a) 서지전류와 신호처리



(b) 전송 데이터

그림 7. 측정 파형과 전송 데이터  
Fig. 7. Measured waveforms and transferred data

주상변압기 감시센서는 오차 1[%]이내에서 전압 300[V<sub>max</sub>], 전류 1000[A<sub>max</sub>]까지 측정할 수 있으며, 주위온도와 변압기 외함의 표면온도도 검출하여 메모리에 저장 후 주기적으로 원격지에 전송한다.

피뢰기 감시센서는 운전중 50 $\mu\text{A}$ ~1[mA]범위에서 오차 2[%] 이내로 누설전류의 최대값과 실효값 및 제 3고조파 누설전류의 최대값을 측정한다. 또한 피뢰기 및 주상변압기 등 설비에 발생하는 서지전류를 검출하기 위한 서지카운터를 설계하였으며, 최대 측정범위는 8/20 $\mu\text{A}$  10[kA]로 발생일시, 극성 및 크기를 기록한다.

본 연구는 (주)효성 중공업PU의 연구비 지원으로 수행되었음.

## References

- [1] 한국전력공사, 주상변압기 무선부하감시시스템(RS-6625-0016), p.10, 2006.12.
- [2] IEEE 802.15.4, Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 15 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPAN), 2004.
- [3] Ray W.F. and Davis R.M., "Developments in Rogowski current transducers", EPE Conference Proceeding, Trondheim, Vol.3, pp.308~312, 1997.
- [4] John D. Ramboz, "Machinable Rogowski Coil Design and Fabrication, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement", Vol.45, No. 2, 1996.
- [5] Murgatroyd P. N., "Progress with Rogowski Coils", 1996 EMCWA Conf., pp.369~374, 1996.
- [6] O. Nigol, Methods for analyzing the performance of gapless metal oxide surge arresters, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.7, No.3, pp. 1256-1262, 1992. 1.
- [7] 길경석, 한주섭, 서황동, "피뢰기 진단장치의 설계 및 제작", 대한전기학회 논문지, 53C권, 11호, pp.572~576, 2004.
- [8] S. Shirakawa, F. Endo, H. Kitajima, S. Kobayashi, K. Kurita, K. Goto, M. Sakai, Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.3, No.3, pp. 998-1003, 1988.

## ◇ 저자소개 ◇

### 길경석 (吉暻碩)

1962년 6월 30일생. 1984년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년 3월~2004년 2월 영국 카디프대학 방문교수. 1996년~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 교수.  
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr

### 박대원 (朴大元)

1977년 12월 28일생. 2003년 한국해양대학교 전기시스템과 졸업. 2005년 동 대학원 전기전자공학부 졸업(석사). 2007년 3월~현재 동 대학원 박사과정.  
E-mail : dwpark77@hhu.ac.kr

### 김일권 (金一權)

1974년 1월 24일생. 1997년 한국해양대학교 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.  
E-mail : kkony@bada.hhu.ac.kr

### 최수연 (崔琇淵)

1983년 10월 24일생. 2007년 한국해양대학교 전기전자공학부 졸업. 2007년 3월~현재 동 대학원 석사과정.  
E-mail : chl0919@bada.hhu.ac.kr

### 박찬용 (朴贊容)

1982년 5월 25일생. 2007년 한국해양대학교 전기전자공학부 졸업. 2007년 9월~현재 동 대학원 석사과정.  
E-mail : sksbest2@hanmail.net