

## 애자/피뢰기 모니터링을 위한 유비쿼터스 센서 개발

길경석\* · 송재용\* · 김일권\* · 문승보\* · 최수연\*

\* 한국해양대학교 전기전자공학부

### Development of a Ubiquitous Sensor for Monitoring Insulators and Arresters

*Jae-Yong Song\**, *Gyung-Suk Kil\**, *Il-Kwon Kim\**, *Seung-Bo Moon\**,  
*Soo-Youn Choi\**

*Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*

**요약** : 본 논문에서는 급전선로 및 전기철도 차량에 설치된 애자 및 피뢰기의 상태 모니터링을 위한 유비쿼터스 센서 개발에 관하여 연구하였다. 제안한 유비쿼터스 센서는 누설전류 측정부와 서지전류 검출부로 구성되며, 측정된 데이터는 IEEE 802.15.4기반의 Zigbee 통신 프로토콜을 통해 감시용 컴퓨터에 전송된다. 누설전류 검출에는 관통형 변류기를 적용하고, 이득 60 dB의 저잡음 증폭회로를 설계하였으며, 측정 가능한 누설전류의 범위는 100  $\mu$ A ~ 5 mA이다. 샘플-홀드회로와 로고스키 코일은 8/20  $\mu$ s, 500 A에서 10 kA까지의 서지전류를 분석하는데 적용된다.

**핵심용어** : 유비쿼터스 센서 네트워크, 피뢰기, 애자, 누설전류, 서지전류

**ABSTRACT** : *In this study, a ubiquitous sensor for condition monitoring of insulators and lightning arresters installed in power distribution lines and electrical traction vehicles is presented. The sensor consists of two parts; a leakage current measurement and a lightning surge detection. Acquired data are transmitted to a supervisory computer through a ZigBee module based on IEEE 802.15.4.*

*To detect leakage current, a window type Mn-ZCT is used and a low-noise amplifier with a gain of 60 dB is designed. This measures leakage current in ranges of 100  $\mu$ A ~ 5 mA. A sample-hold (S/H) and a Rogowski coil are injected to analyze the magnitude of surge current up to 10 kA with 8/20  $\mu$ s-waveform.*

**KEY WORDS** : Ubiquitous Sensor Network, lightning arrester, insulator, leakage current, surge current, zigbee, IEEE 802.15.4

---

\* hvlab@hhu.ac.kr  
\* kilgs@hhu.ac.kr  
\* hvkwon@shinbiro.com  
\* hvparan@hhu.ac.kr  
\* chl0919@nate.com

## 1. 서 론

최근 전력의 사용은 해마다 증가하고 있으며, 전력사고 발생시 사고의 파급효과가 크기 때문에 전력공급체계에서 높은 신뢰성이 요구되고 있다. 전력공급에 있어서는 차단기, 변압기와 같은 전력설비와 선로 및 기기 보호를 위한 피뢰기, 전력선 지지를 위한 애자 등 많은 설비와 장치가 적용되고 있다. 이들 중 어느 한 가지라도 사고를 일으킨다면 전력공급의 일시적 중단이나, 과도전압의 발생에 따른 절연파괴 사고 등으로 이어지므로 이들 설비에 대한 정확한 상태진단이 필수적으로 요구되고 있다[1][2]. 전력설비에 대한 정확한 상태진단과 더불어 현장에서 측정된 데이터를 전송하는 것 또한 중요한 문제이다. 이러한 문제는 현재 각광 받고 있는 전력 IT 기술에 의해 진행되고 있으며, 최근에는 Zigbee 기반의 유비쿼터스 센서 네트워크(USN; Ubiquitous Sensor Network)구성에 의한 실시간 감시 및 전송 기술이 도입되고 있다. Zigbee 통신은 국제규격 IEEE 802.15.4에 정의된 무선통신 네트워크 방식으로 전송속도는 저속이지만 소비전력이 적고, 확장이 용이하다는 점에서 근거리 네트워크 구성에 효율적인 것으로 알려져 있다[3]. 이러한 배경으로부터 본 연구에서는 애자 및 피뢰기를 중심으로 누설전류와 서지 발생 정보를 측정·분석할 수 있는 누설전류 측정장치를 개발하였으며, 최종적으로 Zigbee 통신 방식을 적용한 유비쿼터스 센서를 개발하였다. 제안한 유비쿼터스 센서는 누설전류 및 서지발생에 대한 발생일시, 극성, 크기에 대한 분석이 가능하도록 하였으며, 측정된 데이터는 EEPROM에 저장되어 일정주기마다 Zigbee 무선통신에 의해 개인용 PC로 전달되며, 애자 및 피뢰기의 상태진단에 활용하게 된다.

## 2. 설계 및 제작

전력선을 시설물에 지지·접속하기 위하여 충분한 절연내력을 갖는 애자류를 사용하고 있으며, 과도전압에 대한 전력설비의 가장 효과적인 보호대책으로 전압-전류의 비선형 저항특성이 우수한 산화아연(ZnO)형 피뢰기(Lightning Arrester)를 사용하고 있다. 이들 애자와 피뢰기는 제조시의 결함이나 사용 환경에서의 흡습, 이상전압의 침입에 의해 열화가 진전된다. 열화된 애자/피뢰기가 계통에 설치되어 있으면 정상운전전압에서도 누설전류에 의해 과열되고, 열폭주에 도달하면서 지락사고로 진전하여 2차적인 인적·물적 사고를 유발시킨다[4]~[6]. 시설물의 지지, 절연거리의 확보, 과도전압에 대한 대책으로 사용되는 애자와 피뢰기의 경우 전력계통에 설치되는 전력용 설비에 비해 상대적으로 교체 비용이 저렴하다는 이유에서 상태진단에 의한 관리보다는 주기적인 교체를 통해 유지·보수가 이루어지고 있는 실정이다. 그러나 사고발생시 대부분 지락사고로 이어지고, 사고에 대한 파급효과가 크다는 점에서 보다 효과적인 상태진단이 이루어져야 할 것이다. 애자와 피뢰기는 정상 운전상태에서는 전력선과 접지선 사이에 병렬로 접속되어 충분한 절연내력을 유지하도록 설계되어 있으나 열화 진행에 따라 절연내력이 약해지면서 결국 지락사고로 이어지게 된다. 이러한 열화 요인으로는 제조상의 결함을 제외하면 정상상태의 운전전압과 외부로부터 침입하는 서지에 의해 열화가 진행되며, 이에 따라 정상상태에서 누설전류가 증가하는 현상을 나타낸다. 애자와 피뢰기의 상태진단을 위해서는 외부로부터 발생하는 서지에 대한 정보와 누설전류의 변화에 대한 측정 및 분석이 이루어져야 한다.

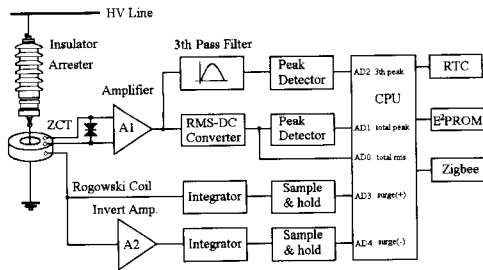


Fig. 1 Configuration of the ubiquitous sensor

Fig. 1에는 본 연구에서 제안한 애자/피뢰기 모니터링을 위한 유비쿼터스 센서의 개략도를 나타낸 것으로 누설전류 검출부, 서지전류 검출부, RTC, EEPROM, Zigbee 통신모듈로 구성된다. 먼저, 누설전류 검출부는 관통형 변류기 (CT; Current Transformer)를 적용하였으며, 미소신호 증폭을 위한 이득 60dB의 저잡음 증폭회로, RMS-DC 컨버터, 피크 검출기, 3조파 필터회로로 구성된다. 누설전류의 측정에서는 전체누설전류의 실효값, 피크값이 CPU의 A/D 컨버터에서 측정되고, 3조파 필터를 거쳐 제3고조파 성분의 피크값을 검출할 수 있도록 구성하였다. 서지전압·전류는 수  $\mu\text{s}$  ~ 수십  $\mu\text{s}$  동안 발생하므로 서지파형에 대한 정보를 획득하려면 10MS/s 이상의 고속 샘플링 동작을 하는 고가의 A/D 변환기와 복잡한 주변회로의 구성이 요구된다. 서지파형의 기록이 가능한 전력 분석기를 제외하면 현재의 서지카운터는 단순히 설정 레벨이상의 서지전류의 발생만을 측정한다. 그러나 애자 및 피뢰기 관리의 효율성과 신뢰성을 향상시키기 위해서는 서지의 발생일시, 방전전류의 크기 및 극성, 동작빈도를 분석할 수 있어야 하므로, 본 연구에서는 범용의 샘플/홀드(Sample/Hold)전용의 회로를 설계·제작하고, 원칩 마이크로프로세서에 내장된 저속의 A/D변환 기능으로 상기 정보를 얻을 수 있도록 하였다. 측정된 데이터는 Zigbee 통신모듈을 통하여 개인용 PC로 전달되는데 USN 구성을 위한 Zigbee 통신 프로토

콜의 개략도는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. USN 구성은 PC와 연결되는 ZC는 다수의 ZN으로부터 데이터를 수집하며, 통신의 신뢰도를 위하여 Peer to Peer 방식을 적용하였다. ZN들 사이는 Mesh 구조를 적용하여 ZC와 거리가 많이 떨어진 ZN이라도 다른 ZN을 거쳐서 PC로 데이터를 송신할 수가 있으며, ZN이 새로이 추가 되었을 경우에는 스스로 Mesh 구조에 포함되기 때문에 새로운 센서의 데이터를 간단히 취득할 수 있다.

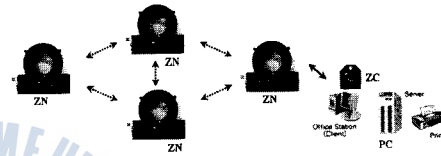
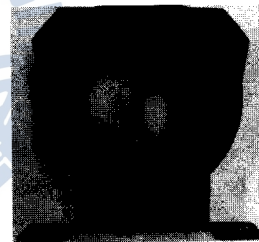
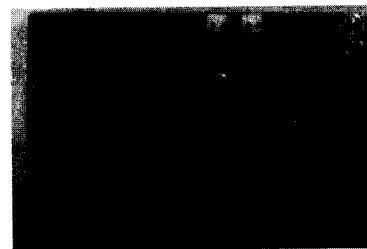


Fig. 2 Schematic diagram of USN



(a) Current sensor



(b) Ubiquitous sensor module

Fig. 3 Photograph of the prototype sensor

Fig. 3에는 누설전류 및 서지전류 검출을 위한 관통형 변류기와 유비쿼터스 센서부를 나타낸 것으로 로고스키 코일은  $8/20 \mu\text{s}$ 의 서지

전류를 측정할 수 있도록 구성하였으며, 판통형 변류기 내부에 내장할 수 있는 구조로 제작하였다.

### 3. 특성평가

시제작한 유비쿼터스 센서의 적용성을 확인하기 위하여 누설전류와 서지전류에 대한 응답 특성을 평가하였다. 먼저 누설전류에 대한 특성 평가에는 함수발생기(Tektronix CFG280)를 이용하여 임의의 전류 값을 발생시키고, 이때 센서의 주파수 특성 및 출력특성을 평가하였으며, 전기철도용 피뢰기를 적용하여 누설전류 검출 특성을 확인하였다.

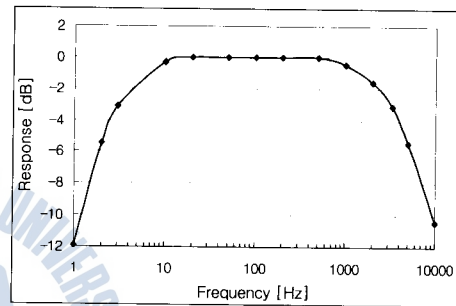
서지 전류에 대한 검출 특성은 IEC 61000-4-5에 규정된 서지 발생장치를 이용하여 8/20  $\mu$ s의 표준 뇌서지 전류를 발생시키고, 센서의 각 부분에서 응답 특성을 평가하였다.

#### 3.1 누설전류에 대한 특성평가

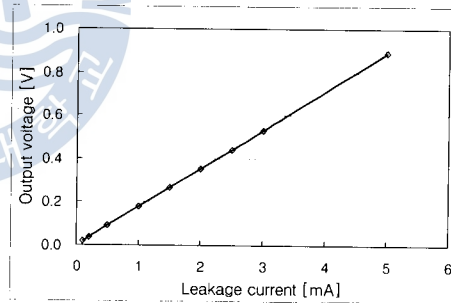
애자 및 피뢰기의 정확한 상태진단을 위해서는 정확한 누설전류의 측정이 필수적이다. 함수발생기를 이용하여 주파수 대역 및 응답 특성을 평가한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4(a)에서 -3 dB가 되는 센서의 주파수 대역은 10 Hz ~ 3.3 kHz로 나타났으며, 이는 애자 및 피뢰기의 누설전류 측정에 충분한 범위이다. 또한 감쇠가 전혀 발생하지 않는 주파수 범위는 20 ~ 700 Hz 범위로 60 Hz의 전체 누설전류 및 180 Hz의 제 3고조파 누설전류 측정에서 전혀 감쇠를 일으키지 않는 것으로 확인되었다. 누설전류에 대한 센서의 응답 특성은 Fig. 4(b)와 같이 측정되었으며, 증폭기의 잡음레벨과 공급되는 전원을 고려할 때 안정적으로 검출할 수 있는 전류 범위는 100  $\mu$ A ~ 5 mA(실효값)이고, 측정범위내에서 센서의 응답특성은 전 구간에서 선형적인 특성을 나타

내었다. 이때 유비쿼터스 센서의 누설전류에 대한 감도는 180 mV/mA가 되는데, 이러한 특성은 정상상태에서 전력선에 설치된 애자 및 피뢰기의 누설전류 범위가 250 ~ 300  $\mu$ A 정도이고, 다소 위험 수준의 열화 상태로 판단할 수 있는 누설전류의 크기가 1 mA 이상이므로, 본 연구에서 제안한 센서는 애자 및 피뢰기의 상태진단을 위한 누설전류 검출에 충분한 특성을 가지는 것으로 평가되었다.



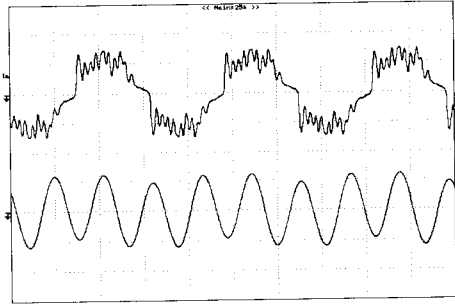
(a) Frequency characteristic



(b) Output characteristic

Fig. 4 Characteristics of the sensor

Fig. 5는 전기철도용 피뢰기에서 검출된 누설전류의 파형을 나타내었다. 측정대상 피뢰기는 약 3년간 전기철도용 급전계통에 설치되어 사용되었던 것으로 정상운전전압 1,500 V에서 약 450  $\mu$ A의 누설전류가 검출되었으며, 제 3고조파 누설전류의 경우에는 피크값 100  $\mu$ A로 측정되었다.

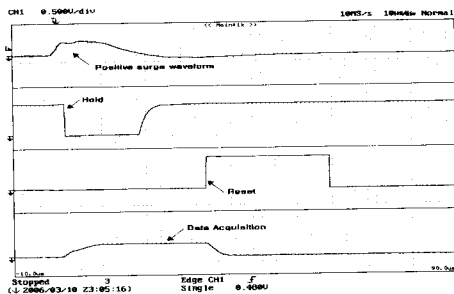


Upper : Total leakage current [500 μA/div, 5ms/div]  
Lower : Third leakage current [100 μA/div, 5ms/div]

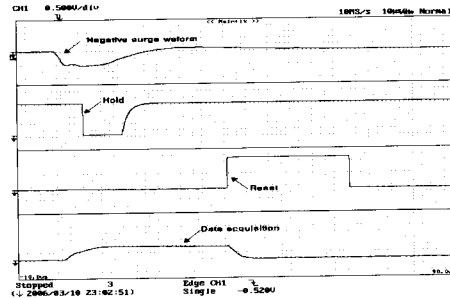
Fig. 5 Typical measured leakage current

### 3.2 서지에 대한 특성평가

서지전류에 대한 검출특성을 평가하기 위하여 8/20 μs 정극성 및 부극성 뇌서지 전류를 발생시켜 관통형 변류기에 인가하고, 이 때 인가전류의 파형과 유비쿼터스 센서의 동작을 분석하였다. 서지전류의 측정 범위는 적분회로에 의해 조절이 가능하며, 본 연구에서는 100 A ~ 10kA로 설정하였다. 정극성 및 부극성 뇌서지 전류에 대한 분석 예를 Fig. 6에 나타내었다. 뇌서지 전류의 입력시 설계된 프로그램에 의해 동작함을 확인하였으며, 샘플값(S/H 출력 또는 A/D 변환기 입력값)은 10kA까지 선형적으로 나타났다.



(a) Positive polarity



(b) Negative polarity

Fig. 6 Time flow for the surge event

Fig. 7에는 유비쿼터스 센서의 내장 메모리에 저장되어있는 데이터를 Zigbee 무선통신으로 개인용 컴퓨터에 전송하여 출력한 예를 나타낸 것으로 6시간마다 저장된 데이터를 전송하며, 서지 발생시에는 인터럽트 기능을 적용하여 검출과 동시에 데이터를 전송하도록 구성하였다.

Date	Time	Ie	Ip	I3	Surge(+)	Surge(-)
2006/05/15	17:20:00	350	495	50	11	470
2006/05/15	18:55:14	355	504	39	475	20
2006/05/15	23:20:00	346	490	40	0	0
2006/05/16	05:20:00	377	530	45	0	0
2006/05/16	11:20:00	349	490	40	0	0
2006/05/16	12:36:58	352	500	44	33	980
2006/05/16	17:18:58	350	500	50	975	40

Fig. 7 Example of acquired data

## 4. 결 론

본 논문에서는 애자 및 파괴기의 상태 모니터링을 위한 유비쿼터스 센서의 개발에 대하여 연구하였다. 제안한 유비쿼터스 센서는 관통형 변류기와 로그스키 코일을 적용하여

누설전류와 서지전류의 검출이 가능하고, RTC와 EEPROM을 내장하여 계측된 정보가 휘발성메모리에 시간정보와 함께 저장되며, 이들 정보는 USN 기반 Zigbee 무선통신을 통해 개인용 PC로 전달된다.

누설전류의 측정에서 감쇠가 전혀 발생하지 않는 주파수 범위는 20 ~ 700 Hz 이고, 측정가능한 누설전류의 범위는 100  $\mu$ A ~ 5 mA 이었다. 따라서 특성평가 결과로부터 애자 및 피뢰기의 누설전류 검출에 충분히 활용 될 수 있음을 확인하였다.

서지전류의 크기 및 극성, 발생일시, 빈도 등을 계측할 수 있도록 샘플/홀드 회로를 적용하여 서지 파형을 분석함으로써 원칩 마이크로세서에 내장되어 있는 저속 샘플링의 A/D변환기로도 충분히 상기 정보를 획득할 수 있도록 하였으며, 100 A ~ 10 kA 범위까지 선형적인 특성을 나타내었다.

본 연구에서 제안한 유비쿼터스 센서를 적용하는 것으로 누설전류 및 서지전류에 대한 제반정보를 알 수 있으므로 전력계통에 설치된 애자 및 피뢰기 상태의 정확한 모니터링에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPAN), 2004.

- [4] R. A. Sargent et al., "Effects of Multiple Impulse Currents on the Microstructure and Electrical Properties of Metal-oxide Varistors", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.27, No.3, pp.586~592, 1992.
- [5] Peter Hassel, "Overvoltage protection of low-voltage systems, The Institution of Electrical Engineers, pp.358, 2004.
- [6] T. K. Gupta, "Application of zinc oxide varistors", Journal of the American Ceramic Society, Vol.73, No.7, pp.1817~1840, 1990.

---

원고접수일 : 2007년 1월 9일

원고채택일 : 2007년 1월 19일

## 참 고 문 헌

- [1] S. Tominaga, Y. Shibuya, T. Fujiwara, M. Imataki, T. Nitta, "Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Trans. on PAS., vol.PAS-99, no.4, pp.1548~1556, 1980.
- [2] Y. Yamashita, S. Yoshikado, "Evaluation of factors in the degradation of ZnO varistor", Trans. on IEE Japa, vol.119-B, no.6, pp.652~657, 1999.
- [3] IEEE 802.15.4, Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 15: