

효율적인 전력케이블 접속함의 표면온도감시를 위한 무선감시시스템 개발

김영일, 송재주, 신진호, 이봉재, 조선규
한국전력공사 전력연구원 전력계통연구소 전력정보기술그룹

A Development of Wireless Monitoring System for Effective Surface Temperature Monitoring of Cable Joint

Young-Il Kim, Jae-Ju Song, Jin-Ho Shin, Bong-Jae Yi and Seon-Ku Cho
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - 계속 및 정보기술의 발달로 지하전력구 내에 설치된 송전 케이블에 대한 감시를 위해 다양한 기술을 활용하여 감시시스템을 구축하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 대표적인 방식으로 광섬유를 이용하여 전력케이블의 온도를 측정하는 방식이 있으며 이러한 방식의 궁극적인 목적은 전력케이블의 온도를 측정하고 과열개소를 실시간으로 파악하는 것이다. 그러나 이러한 시스템을 구축하기 위해서는 케이블을 설치하고 고가의 감시 장치를 설치, 운영해야 하는 어려움이 있다. 본 연구에서는 설치비용을 최소화할 수 있도록 무선 통신을 기반으로 하는 감시시스템을 고려했다. 본 연구에서는 저가형 저전력 무선센서노드를 이용하여 케이블의 표면온도를 측정하고 이를 감시할 수 있는 무선감시시스템을 개발하였다.

1. 서 론

전력산업에서 가장 중요한 사항은 고객에게 안정적으로 전력을 공급하는 것이다. 그러나 전력설비의 수명이나 고장은 정확한 예측이 어렵기 때문에 항상 문제가 발생할 수 있는 여지를 갖고 있게 된다. 따라서 전력산업에서는 고장을 예측하기 위한 다양한 연구가 시도되고 있다. 지하전력구의 경우에도 사고가 발생하기 전에 미리 예측할 수 있도록 하기 위해 다양한 형태의 예방 점검 활동을 수행하고 있다. 초기에는 순찰자가 전력구를 따라 이동하면서 육안으로 점검을 하던 방식이었으나, 기술의 발달에 따라 다양한 계측 장비를 휴대하고 계측하는 방식으로 변화하였다. 최근에는 순찰자의 이동 없이 계측 장비를 전력구내에 설치하고 광케이블이나 PLC와 같은 통신망을 통해 계측 데이터를 수집하는 형태의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 감시시스템은 수동적인 순찰에 의존하지 않고 실시간으로 현장의 상황을 감시할 수 있다는 장점이 있으나, 유선 통신망을 설치하고 계측을 위한 장치를 요소마다 설치해야 함으로 초기 구축비용이 많이 발생하게 된다. 또한 설비를 운영하는 도중 고장이나 문제가 발생할 경우 이를 유지보수하기 위해 전문 인력이 필요하게 되어 추가적인 비용이 발생하게 된다. 따라서 유선망을 활용하여 감시하는 시스템은 중요한 설비가 위치한 일부 지역이나, 연구를 목적으로 하는 지역에 설치되어 운영되고 있다.

본 연구에서는 설치 및 유지보수 비용을 최소화 할 수 있도록 저가의 센서를 이용하여 지하전력구 내에 저전력 무선 네트워크를 구성하고 전력케이블의 표면온도를 측정하여 실시간으로 계측된 값을 전송할 수 있는 무선감시시스템을 개발하였다. 설치비용을 최소화 할 수 있도록 장비의 전원은 자체적으로 배터리를 이용하며, 특별한 전문지식이 없이 케이블에 부착하고 전원만 켜서 동작시키는 형태로 개발 하였으며, 고장 발생시 문제가 되는 센서노드만 교체하여 손쉽게 복구시킬 수 있도록 설계하였다.

본 논문에서는 지하전력구 감시와 관련한 연구들을 살펴보고, 무선센서 네트워크 기술을 이용한 전력케이블 접속함의 표면온도 감시시스템의 설계 및 구현에 대하여 기술하였다.

2. 본 론

2.1 관련 연구

계측 및 통신 기술의 발달로 지하전력구의 전력케이블의 상태를 감시하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 그중에는 케이블의 고주파 부분방전 측정방식을 통한 케이블의 이상 유무를 진단하는 방식과 광섬유를 이용하여 케이블의 온도분포를 측정하는 기술을 들 수 있다. 부분방전을 측정하는 방식은 유도성, 용량성 또는 저항성 센서를 이용하여 이로부터 얻은 신호와 안테나 등을 통해 주위 노이즈 신호 또는 신호의 전파 방향 등을 전달받아 분석하여 부분방전 신호를 추출하는 방식이다. 노이즈 제거를 위해서는 T-F Map 등을 이용하는 방식이 연구되고 있으며, 방향성 유도성 센서를 이용하여 신호를 측정하는 방식이 주로 연구되고 있다 [1]. 광섬유를 이용하여 전력케이블의 온도분포를 측정하는

방식은 전력케이블의 내부나 외부에 광섬유를 연결하고, 광섬유의 Raman 산란 특성을 이용하여 광섬유 주위의 온도를 측정하는 방식이다. 특히 측정된 온도는 최고 전력 수요시 허용 가능한 최대 전류를 계산하거나, 케이블의 온도 변화를 추정하여 지락 사고 등의 발생 위치를 파악하는데 활용할 수도 있다. 또한 광섬유를 통해 지하전력구 내의 화재 발생 여부를 예측할 수도 있게 된다 [2]. 이렇게 수집된 케이블의 온도 변화를 이용하여 케이블의 노화 정보를 예측할 수도 있다 [3].

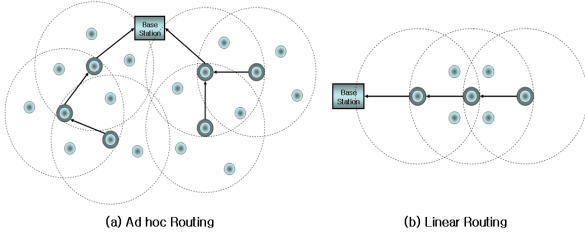
지하전력구에서 발생하는 주요 고장의 원인은 케이블 접속함에서 발생한다. 케이블은 운반의 제한으로 약 300m 간격으로 케이블을 연결하고 접속함을 만들게 된다. 이 접속부위는 케이블이 부하를 받게 되면 열이 발생하기 쉬우며, 열이 발생할 경우 케이블이 팽창하고, 부하가 낮아지면 케이블이 수축하는 현상을 반복하게 된다. 이러한 반복적인 현상으로 인해 연결 부위의 결함이 발생할 가능성이 있다. 따라서 접속함은 전력케이블에서 가장 사고의 가능성이 높은 부분으로 주기적인 순찰을 통해 접속함의 표면온도를 점검하고 접속부위와 양측, 세 지점의 온도 차이를 써모비전과 같은 측정장치를 통해 비교하여 5℃ 이상인 경우 위험요소로 판단하게 집중 관리하게 된다.

2.2 무선센서 네트워크의 설계

전력케이블을 감시하기 위하여 현재 연구되고 있는 방식들은 대부분 광케이블이나 PLC와 같은 유선망을 이용하여 데이터를 전송하게 된다. 이러한 경우에는 통신망을 구축하기 위한 많은 비용이 발생하는 문제점을 갖게 된다. 또한 감시를 위해 사용되는 센서도 또한 고가이며, 설치를 위해 전문적인 기술을 요하는 경우가 많이 있게 된다. 본 연구에서는 소형의 센서를 이용하여 손쉽게 설치가 가능하고, 무선 통신을 이용하여 유선망을 설치할 필요 없이 전력케이블을 감시할 수 있도록 연구하였다. 설치의 편리성을 위해 센서노드는 외부 전원을 사용하지 않고 배터리를 이용하는 방식을 고려했다. 따라서 센서노드의 수명을 결정하는 가장 중요한 요소는 통신을 위해 사용되는 에너지와 센싱을 위해 사용되는 에너지가 된다. 본 연구에서는 대기온도 수집을 위해 오차율이 ±1℃인 저전력 센서 LM61 온도센서를 사용하였다. 접속함의 표면온도는 보다 정확한 측정을 위해 오차율이 ±0.33℃인 저전력 센서인 LM92 온도센서를 사용하였다.

제한된 배터리를 이용하여 최대의 수명을 얻기 위해서는 센서의 소모 전력뿐만 아니라 통신을 위한 네트워크의 전력소모를 최소화하는 에너지 효율적인 프로토콜의 개발이 중요하다. 일반적으로 지금까지의 무선 네트워크에 대한 연구는 특정지역에 임의로 배치되는 센서노드들에 대한 효과적인 통신 프로토콜인 Ad hoc 방식을 주로하고 있다 [4]. 그러나 지하전력구와 같은 전력설비는 주로 수 킬로미터에 달하는 직선형으로 이루어져 있다. 따라서 이러한 선로에 대한 감시를 위해 활용되는 무선 네트워크는 유선 통신망을 대신하기 위한 목적으로 일정간격으로 선로를 따라 놓여지는 노드를 통해 이루어지게 된다. 이러한 노드들의 통신 특징은 노드간의 간격이 서로의 전파가 안정적으로 도달할 수 있는 최대거리로 놓여있다는 점이다. 다시 말하면 하나의 노드에서 인식되어지는 노드는 자신의 선로 앞단과 뒷단의 두개의 노드뿐이라는 점이다. 이러한 방식은 하나의 노드에서 다수의 노드와 통신이 가능하고, 인식 가능한 다수의 노드 중에서 최소한의 전력소모로 통신을 할 수 있는 후보를 찾아서 이를 라우팅 테이블로 관리하는 형태의 Ad hoc 네트워크 방식을 적용하기에는 무리가 있다는 것이다. Ad hoc 방식의 경우 자신이 지금까지 통신하고 있던 노드와 통신이 되지 않을 경우 다른 노드들 중에서 다음 후보가 되는 노드를 선택하여 통신을 계속할 수 있다. 그러나 케이블을 따라 전파 도달 거리에 맞추어 일정 간격으로 직선형으로 설치된 노드의 경우 자신의 앞단의 노드와 통신이 되지 않을 경우에 앞단과 통신할 수 있는 다른 노드는 존재하지 않게 된다. 따라서 Ad hoc 네트워크와 같이 통신 가능한 거리의 노드들에 대한 라우팅 테이블을 작성하고 또 다른 후보를 찾아내는 등의 프로토콜을 사용하는 방식은 의미가 없게 된다. 본 연구에서는 직선형 라우팅에 효과적일 수 있도록

노드 ID에 기반을 둔 라우팅 방식을 이용하였다. 모든 노드는 무선 수집 장치인 수집노드(base station)로부터 순차적으로 증가하는 고유 노드 ID를 갖게 되며, 각각의 노드는 수집노드에 메시지를 전달하기 위해 주위에 전파가 도달 가능한 노드들 중에서 노드 ID가 가장 작은 노드에게 메시지를 전달하게 된다. 이러한 방식은 다양한 라우팅 테이블을 만들고 이들을 관리하며, 라우팅 후보들 간의 우선순위를 부여하는 등의 불필요한 절차를 없애고 단순화함으로써 라우팅을 위한 연산을 최소화하게 된다.

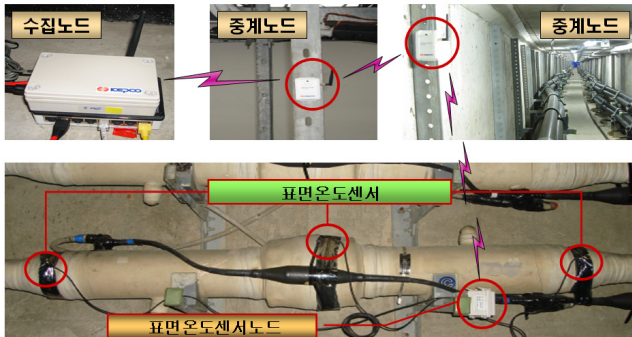


〈그림 1〉 Ad hoc 라우팅과 직선형 라우팅

2.3 무선감시시스템의 설계 및 구현

본 연구에서는 무선센서 네트워크를 이용하여 유선통신망의 설치 없이 지하전력구 내의 전력케이블에 대한 표면온도 감시가 가능하도록 무선감시시스템을 개발하였다. 지하전력구의 진입구에 설치된 유선 인터넷 망에 무선 수집노드를 연결하고 지하전력구를 따라 일정 간격으로 데이터 중계 및 대기온도 감시를 위한 중계노드를 설치하며, 접속함에는 표면온도센서노드를 설치하여 접속함의 중앙 접속부위와 양끝단의 표면온도를 측정하였다. 이 외에도 지하전력구 내의 가스 환경을 측정할 수 있도록 다양한 가스센서를 설치하여 중계노드를 통해 감시시스템에 전달하도록 설계하였다. 중계노드는 지하전력구를 따라 이동하면서 케이블 선반에 부착하였으며, 직선형으로 끈게 뻗은 구간에서는 노드간의 무선 상태가 양호하여 최대 100m 간격으로 설치가 가능하였으며, 굽어있는 경우에는 최소 10m 간격으로 설치하여 총 300m 구간에 대하여 설치하여 테스트를 수행하였다. 수집노드로 전달된 데이터는 유선 인터넷 망을 이용하여 감시시스템으로 전달되고 운영실에서 실시간으로 지하전력구 내부의 대기온도 변화와 접속함의 세 계측부위의 온도변화 및 온도차를 감시할 수 있게 된다.

중계노드를 이용한 대기온도 감시는 전력구내의 화재 발생시 이를 감지할 수 있는 효과를 얻을 수 있게 된다. 또한 일정간격으로 설치된 중계노드의 위치를 감시시스템의 도면위에 표시하고 작업자가 지하전력구에서 작업을 수행할시 착용한 카드식 노드를 중계노드를 통해 인식하여, 작업자와 가장 근접한 위치의 중계노드에 작업자의 위치를 표시해 줌으로써 지하전력구 내에서 작업 중인 작업자의 위치를 파악할 수 있게 된다. 기본적으로 중계노드가 통신망의 역할을 수행하므로 중계노드 주위에 다양한 센서노드를 설치하여 확장 사용할 수 있게 된다. 지하전력구의 특성상 물이 많이 차게 되는 구간에는 수위 센서를 부착한 노드를 설치하여 감시할 수 있으며, 유해가스의 오염여부를 감시하기 위해서는 다양한 가스센서를 부착하여 감시할 수 있게 된다. 센서노드를 제어 장치와 연동할 수 있도록 확장하게 되면 단순한 감시뿐 아니라 환풍기나 배수펌프 등과 같은 특정 설비의 전원 공급 및 차단 등을 통해 동작을 제어할 수 있게 된다.

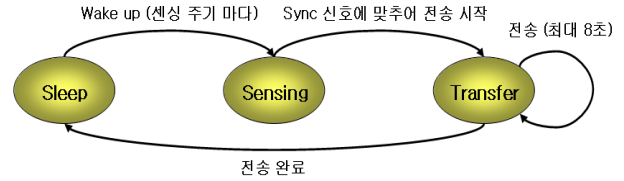


〈그림 1〉 지하전력구 전력케이블 무선감시시스템 설치 사진

2.4 센서의 배터리 수명 분석

본 연구에서는 센서를 손쉽게 설치할 수 있도록 외부 전원을 이용하지 않고 자체적으로 AA 건전지 4개를 사용하여 전원을 공급받도록 하고 있다. 일반적으로 많이 사용되는 AA 건전지는 약 3000mA의 용량을 갖고 있으므로 4개의 건전지를 사용하여 센서는 총 12000mA의 전원을

사용할 수 있게 된다. 센서는 기본적으로 3가지 모드로 동작하게 된다. 아무런 동작도 하지 않고 일정시간 동안 대기하는 sleep 모드와 wake up 후 센서로부터 데이터를 측정하는 sensing 모드, 센싱된 데이터를 전송하는 transfer 모드로 구분된다. 대기온도 센서노드의 경우 sleep 모드의 경우에는 센서의 상태를 유지하기 위한 최소한의 전원만을 사용하므로 0.02mAh를 소모하게 되며 sensing 모드의 경우에는 5mAh, transfer 모드의 경우에는 26mAh를 소모하게 된다.



〈그림 2〉 센서노드의 상태변화

우리가 개발한 센서노드는 15분 간격으로 센싱을 수행하게 되며, 센싱은 1초 이내에 이루어지며, 데이터 전송은 동기화 데이터 및 센싱 데이터 전송 등이 원활히 이루어질 수 있도록 8초 동안 안테나를 송수신 모드로 동작시키게 된다. 따라서 대기온도 센서노드가 한번의 센싱 주기(15분)를 수행하는데 소모되는 전력은 sleep시 5 μ A이며 (0.02mAh \times 1/4h), sensing시에는 1.4 μ A (5mAh \times 1/3600h), transfer시에는 59 μ A (26.5mAh \times 8/3600h)를 소모하게 된다. 따라서 15분 동안 65.4 μ A의 전원을 소모하게 되며, 이러한 주기를 반복적으로 수행할 경우 12000mAh의 배터리로 약 1900일 동안 사용이 가능하게 된다.

〈표 1〉 센서노드의 전력소모량

	대기온도 센서노드	표면온도 센서노드
Sleep시 소모량	0.02mAh	0.3mAh
Sensing시 소모량	5.0mAh	8.4mAh
Transfer시 소모량	26.5mAh	28.5mAh
5분 주기기 전력 소모량	62.1 μ A	90.6 μ A
5분 주기기 배터리 수명	약 670일(2년)	약 460일(1.2년)
15분 주기기 전력 소모량	65.4 μ A	140.6 μ A
15분 주기기 배터리 수명	약 1900일(5년)	약 890일(2.5년)

* 센싱시간은 1초, 통신시간은 8초로 지정한 경우임

3. 결 론

지하전력구의 전력케이블에 대한 감시는 안정적인 전력공급을 위해 위험 징후를 사전에 파악하기 위해 중요한 요소이다. 그러나 기존에 연구된 많은 감시시스템을 현장에 적용하기 위해서는 고가의 장비와 설치 비용이 발생하여 제한된 지역에 한하여 설치 운영되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 저비용의 센서를 이용하여 유선 통신망의 설치 없이 무선 통신을 이용하여 비교적 단순한 형태의 감시시스템을 개발하고 이를 현장에 적용함으로써 활용성을 분석해 보았다. 설치의 편리성을 위하여 배터리를 사용한 센서노드를 개발하였으며, 이를 통해 대기온도 및 케이블의 표면온도를 측정할 수 있도록 개발하였다. 설비에 대한 실시간 감시가 되기 위해서는 센싱 주기를 최소화하고 노드의 수명을 최대화할 수 있어야 한다. 현재 저전력 무선노드에 대한 연구는 활발히 진행되어 상용화하기에 충분한 성능을 보이고 있다. 그러나 아직도 만족할만한 성능을 가진 저전력 센서 제품은 온도센서 이외에는 보이지 않고 있어 유해가스 측정이나 수위 측정 등의 기능까지 현장에 적용하기에는 아직까지 어려움이 있다. 따라서 향후 저전력을 만족하는 다양한 센서 제품이 상용화될 경우에는 무선센서 네트워크를 이용한 감시시스템이 많이 활성화 될 것으로 생각된다.

〈참 고 문 헌〉

[1] 김정태, 구자윤, "최근 전력케이블 시스템의 부분방전 진단 동향", 전기학회지, vol 52, number 12, pp.42-48, 2003
 [2] 이근양, "광섬유를 이용한 전력케이블의 온도분포 측정기술", 전기학회지, vol 50, number 9 pp.22-25, 2001
 [3] Manjang, S., Armynah, B., "The radial distribution of temperature in XLPE cable an analysis the finite element numerical method", in Proc. 2006 Properties and applications of Dielectric Materials Conf., pp.439-444, 2006
 [4] 양서민, 이혁준, "자율구성 계층구조 에드혹 네트워크를 위한 상호연동방식의 토폴로지 탐색 및 라우팅 프로토콜", 정보처리학회논문지 C 제11-C권 제7호, pp.905-916, 2004