

논문 2010-4-9

스마트 그리드 내 독립전원의 단독운전 방지를 위한 무선 센서 네트워크 기반의 원격 전력 감시 시스템

Wireless Sensor Network based Remote Power Monitoring System for Anti Islanding application in Smart-Grid

김기민*, 이경중*, 문찬우**, 안현식***, 정구민***

Kee-Min Kim*, Kyung-Jung Lee*, Chan-Woo Moon**, Hyun-Sik Ahn**,
Gu-Min Jeong**

요약 최근, 산업현장의 전력분야에서는 신재생 에너지와 스마트 그리드에 관심이 모아지고 있다. 스마트 그리드는 기존 전력망에 정보통신기술을 접목하여 전력망의 신뢰성, 효율성, 안전성을 향상시키고, 전력의 생산 및 소비 정보를 양방향, 실시간으로 모니터링하면서 에너지 효율을 최적화하는 차세대 전력망 기술이다. 그러나 스마트 그리드 내의 원격 모니터링 시스템들은 대부분의 유선망을 이용하는데, 유선망은 소규모 발전기에는 설치하기 어려운 단점이 있다. 본 논문에서는 스마트 그리드 내에서의 통신거리 제약 등의 여러 가지 문제점을 해결하기 위하여 센서네트워크를 기반으로 하는 원격 전력 모니터링 시스템을 구현한다. 또한, 구현된 시스템을 이용하여 새로운 분산전원 단독운전 방지 기법을 제안하고 실험을 통하여 검증하고자 한다.

Abstract Renewable energy and smart grid become the focus of attention of industry. The smart grid is an intelligent system which maximizes the efficiency of energy and it needs to monitor the amount of power generation and power consumption continuously. Remote Monitoring System(RMS) is very useful for monitoring the power generation and consumption, but mostly they are implemented on the wire communication. In this paper, we propose a wireless sensor network based remote power monitoring system. And as an application, a new anti-islanding method with the proposed RMS is presented. An experimental micro grid system is implemented to verify the proposed RMS and anti-islanding method.

Key Words : Smart-grid, Anti-islanding, ZigBee, Monitoring

1. 서 론

최근, 산업현장의 전력분야에서는 신재생 에너지와 스마트 그리드에 대한 관심이 커지고 있다. 스마트 그리드는 기존 전력망에 정보통신기술을 접목하여 전력망의 신

뢰성, 효율성, 안전성을 향상시키고, 전력의 생산 및 소비 정보를 양방향, 실시간으로 모니터링하면서 에너지 효율을 최대화하는 차세대 전력망 기술이다. 이러한 스마트 그리드는 에너지 효율향상에 상당한 도움이 되고, 여러 가지 신재생 에너지원인 태양열발전, 풍력발전, 연료 전지와 같은 분산전원 계통들에 적용이 가능하다.^[1] 스마트 그리드 내에서 최대의 에너지 효율을 내기 위해서는 전력 생산량과 소비량 각각의 상태를 모니터링 할 필요가 있다. 또한, 전력 발전과 각 수요처에서에서 발생하는 전

*준회원, 국민대학교 전자공학부

**정회원, 국민대학교 전자공학부 (교신저자)

***정회원, 국민대학교 전자공학부

접수일자 2010.6.14, 수정일자 2010.7.11

게재확정일자 2010.8.13

력 소비를 제어를 위해서는 실시간으로 분석한 많은 양의 데이터가 필요하다.

스마트 그리드내의 원격 모니터링 시스템은 전력 발전량과 소비량을 관리하는데 매우 유용하고 앞으로 스마트 그리드내의 구성요소 중 필수적인 장치가 될 것이다. 현재까지 많은 원격 모니터링 시스템이 개발되어 왔는데, 대부분 산업 현장에서는 원격 모니터링 시스템에 유선망을 이용한 통신방식을 택해왔다. 하지만 이러한 방식은 넓게 분산되어 있는 소규모의 발전기에 적용하기에는 매우 비효율적이다. 따라서 유선망 통신을 대체 할 수 있는 무선 통신 방식의 원격 모니터링 시스템이 요구된다.

스마트 그리드 내에 소규모의 독립전원을 포함할 때, 각각의 독립 전원에서도 여러 가지 문제가 야기된다. 하나의 예로서, 같은 전원 계통에 연계되어 있는 전력발전기의 연결이 끊어져 생산된 전력을 다른 계통에 전송하지 못하고 계속 쌓아두고 있거나 심지어 계통에 전원이 잔류하는 현상이 바로 그 예이다. 최근 이러한 단독운전은 독립전원 내부에서 작업하는 작업자 들이나, 연계된 다른 장치들의 안전에 있어 문제를 발생 시킬 수 있기 때문에 독립전원의 단독운전 방지에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 따라서 전력회사들 또한 독립전원의 단독운전 방지를 위한 방법론을 요구하고 있다^[2-3].

본 논문에서는 위에서 논한 스마트 그리드 내의 문제점들을 해결하기 위하여 무선 센서 네트워크기반의 원격 전력 모니터링 시스템을 제안한다. 또한, 독립전원의 단독운전 방지를 위한 새로운 방법을 제안한다. 제안된 원격 전력 모니터링 시스템은 JAVA로 제작하고, 또한 각각의 노드간의 통신은 Zigbee기술을 사용한다. Zigbee기술을 사용하는 이유는 저가이며, 구현이 간단하고, 한 개의 네트워크에 많은 노드를 동시에 연결할 수 있는 장점이 있기 때문이다^[4]. 또한, 제안하는 새로운 독립전원의 단독운전 방지 방법은 출력전압에 대한 변조를 하지 않기 때문에 전력품질에 영향을 미치지 않는 장점이 있다. 이러한 기술들을 이용해 원격 전력 모니터링 시스템 구현하고, 실험과 시뮬레이션을 통해 검증한다.

II. 스마트 그리드를 위한 원격 감시 시스템(RPMS)의 구조

그림 1은 본 논문이 제안하는 스마트 그리드를 위한

RPMS(Remote Power Monitor System)의 블록 다이어그램이다. RPMS의 시스템은 광역 감시 모듈(WAM)과 지역 감시 모듈(LAM) 그리고 하위 감시 모듈(EM)으로 구성되어 있다. 이 모듈들은 시스템의 신뢰도를 올리기 위하여 계층적으로 다른 연결 기술을 사용하고 있다.^[5] EM(End Monitor Module)은 무선 센서 노드의 일종으로 3개의 타입으로 구별할 수 있다.

- End Power Monitor Module(EPM) : EPM모듈은 그리드 내의 소규모 발전기에 부착되며 전력, 전류, 전압, 전력의 질과 발전기의 상태를 모니터링 한다.
- End Load Monitor Module(ELM) : ELM모듈은 집, 사무실, 공장과 같은 소비자에 직접 위치하게 되며 이 소비자들의 파워 소비와 상태를 측정한다.
- End Grid Monitor Module(EGM) : EGM모듈은 전력 분산 망에 위치하며 전체적인 전력 공급량과 유틸리티의 소모량, 그리고 사고 발생 및 전력의 질을 감시한다.

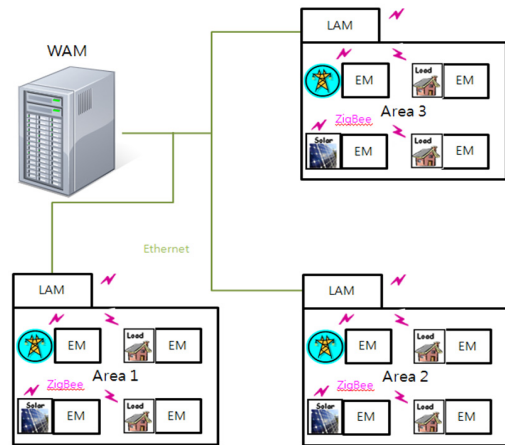
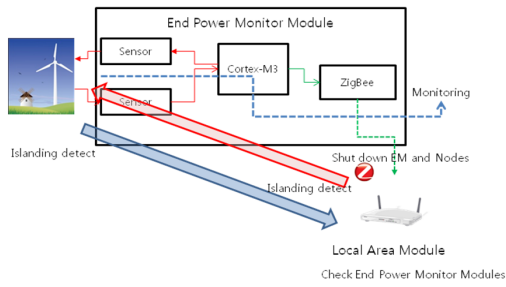


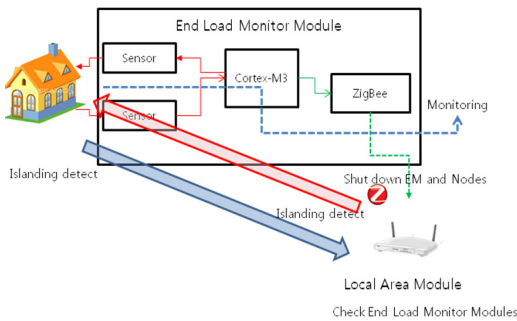
그림 1. RPMS의 블록 다이어그램
Fig. 1. A block diagram of RPMS

EPM, ELM은 LAM(Local Area Monitor)모듈의 지령에 따라 연결된 장치를 차단 할 수 있다. 각각의 EM모듈은 Cortex-M3를 기반으로 한 메인 컨트롤러로 구성되어 있으며 센서와 통신 모듈을 가지고 있다. EM모듈은 각각의 모듈을 제어하고 동시에 정보를 측정해야 하기 때문에 고성능 32비트 기반의 마이크로 컨트롤러인 Cortex-M3로 구성하였다. 또한, EM의 통신 모듈은 Zigbee모듈로 구성하여 다른 EM모듈이나 또는 LAM모

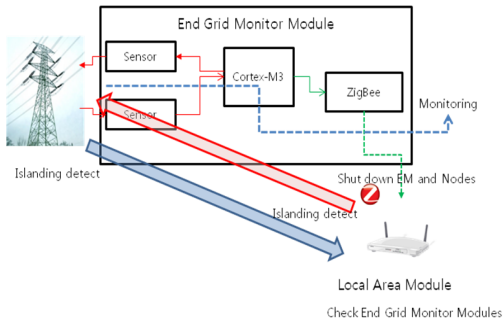
들과 통신을 한다.



(a) End Power Monitor Module



(b) End Load Monitor Module



(c) End Grid Monitor Module

그림 2. EM의 블록 다이어그램

Fig. 2. A block diagram of EM Module

EM모듈은 계측된 정보를 LAM모듈에 전송하며, LAM모듈은 각각의 EM모듈에서 전송되어진 모든 데이터를 수집하고 각각의 EM모듈에 필요한 지령을 내린다. 예를 들어 분산 전력망의 발전기가 과도한 전기를 생산하면, LAM모듈은 EPM모듈에게 전력 생산을 감소하라는 명령을 내린다. EM모듈의 시나리오는 그림 2에 나타나 있다. 각각의 EM모듈에서 수집된 정보들은 전체 지역을 신뢰성과 연결의 보안을 보증할 수 있을 정도의 거리

로 지역을 구분하고 구분한 지역 마다 LAM모듈을 설치한다. 이 LAM모듈은 나뉜 구역 내의 각각의 EM모듈을 감시하고 제어하는 기능을 수행한다. LAM모듈은 ZigBee 정보를 이더넷으로 변환하는 게이트웨이도 가지고 있다. 만일 발전기나 부하 또는 EM모듈에 연결된 어떤 전원장치에서 문제가 발생되면 LAM모듈은 사고가 일어난 독립전원을 정지시키고 이더넷을 통해 WAM(Wide Area Monitor)모듈에 보고한다. 여기서 WAM모듈은 모든 네트워크를 실시간에 감시할 수 있으며 사용자가 필요시 인터넷으로 각각의 노드를 체크할 수 있는 기능을 하고, 네트워크에 속한 노드를 제어할 수 있다.

III. 단독운전 방지를 위한 무선 원격 감시 시스템의 응용

RPMS은 소규모 분산전원 발전기에 의해 발생하는 단독운전 현상을 방지하는데 응용할 수 있다. 단독운전 현상이란 사고에 의해 그리드 내에 부하들의 연결이 끊겨진 상태에서 분산전원 발전기에 전력이 계속 공급되어 문제가 야기되는 현상을 말한다. 단독운전에 의한 문제점은 다음과 같다. 첫째, 연결이 끊긴 부하들이 네트워크에 다시 연결 될 때 복잡한 상황을 만들 수 있고 둘째, 그리드 내의 부하에 위험을 줄 수 있으며 셋째, 소규모 발전기에 부담을 준다^[6]. 이러한 독립운전 현상을 검출하는 방법은 수동적 방법과 능동적 방법으로 구분할 수 있다. 만약 발전기의 인버터가 과전압 방지(OVP)나 저전압 방지(UVP) 또는 과주파수 방지(UFP) 그리고 저주파수 방지(OPF)등의 기능을 가지고 있으면 발전기는 기본적인 단독운전 방지를 할 수 있는데^[7], 이러한 단독운전 방지 방법을 이용하여 그리드 내에 사고가 발생 했을 때 전압, 주파수, 위상 등의 변동을 감지하여 단독 운전을 검출하는 것을 수동적 단독운전 방지 방법이라 한다. 반면 능동적 단독운전 방지 방법에는 주파수 바이어스나 Sandia 주파수 이동법, 주파수 점프, 하모닉 진폭 점프, 그리고 전력 선 캐리어 통신 등이 있다. 이 방법들은 발전기의 출력 전압을 임의의 신호로 변조하여 부하의 전력이나 주파수의 변화를 검출하는 방법이다.

기존의 단독운전 방지 방법은 몇 가지 문제를 가지고 있는데, 우선 능동적 단독운전 방지 방법일 경우 발전기

의 출력 전압을 임의의 신호로 변조하기 때문에 전력의 품질이 떨어진다. 또한 기존의 단독운전 방지 방법은 NDZ(Non-Detect Zero) 영역을 가지게 된다. 즉 단독운전을 검출하지 못하는 영역을 가지므로써 안정성에도 문제가 발생할 수 있다. 그래서 이 논문에서는 RMS를 기반으로 한 단독운전 방지 방법을 제시한다. 각각의 EGM 모듈에 전류 센서와 전압 센서를 부착한 후 실시간의 분산 전력 네트워크를 감시하면서 IEEE 표준929-2000의 기준에 따라 사고를 검출한다. 단독 운전 검출 시간은 국제 표준인 IEEE std.929-2000과 UL1741을 따른다^[8]. 이 규격들의 주 파라미터는 아래의 테이블 1에 정리되어 있다. 규정에서는 소스와 부하가 균형상태를 검출할 때 걸리는 시간은 최대 2초가 허용되는데, 2초 이내에 검출이 된다면 장비나 부하가 받는 손상을 줄일 수 있기 때문이다. EGM으로부터 받는 배전망 상의 사고의 정보는 마이크로-그리드 내에 소속된 모든 노드에 무선 네트워크를 통해 공유된다. 마이크로-그리드에 있는 LAM모듈은 이 사고가 어디서 발생 되었는지 찾고, 사고에 의해 영향을 받는 발전기를 즉시 차단하도록 EGM모듈에 요청한다. 그리고 발전기는 스마트-그리드 내에서 격리된다. 이와 같은 과정을 거쳐 전원의 단독운전을 방지할 수 있고, 그림3은 RMS기반의 단독운전 방지 방법의 개념을 도식화한 것이다.

표 1. 국제 표준 IEEE Std. 929-2000와 UL1741
Table 1. International standard IEEE Std. 929-2000 and UL1741

상태	ac dump 후 전압	ac dump 후 주파수	최대검출 시간
1	0.5V _{nom}	f _{nom}	6 cycles
2	0.5V _{nom} < V < 0.88V _{nom}	f _{nom}	2 sec
3	0.88V _{nom} ≤ V ≤ 1.37V _{nom}	f _{nom}	2 sec
4	1.10V _{nom} < V < 1.37V _{nom}	f _{nom}	2 sec
5	1.37V _{nom} ≤ V	f _{nom}	2 cycles
6	V _{nom}	f _{nom}	6 cycles
7	V _{nom}	f _{nom}	6 cycles

위에서 제한한 단독운전 방지 방법은 출력 신호에 변조를 하지 않으므로 전력 품질을 보장할 수 있으며, NDZ

영역도 없어진다. 또한, 스마트-그리드 내에 사고를 검출하는 EM모듈들이 존재하면 사고가 있을 때 즉시 정보를 공유할 수 있으며 그것을 이용하여 위험요소들을 사전에 방지할 수 있으므로 기존의 방법보다 높은 안정성을 가질 수 있다.

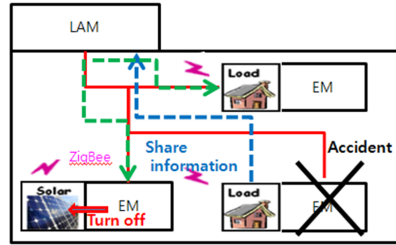


그림 3. RMS를 이용한 단독운전 방지 방법의 개념
Fig. 3. Concept of the RMS based anti-islanding method

IV. RMS를 이용한 실험

Zigbee기술은 일반적인 센서 네트워크에 최적화 되어 있으며 소비전력이 적고 구현이 간단하다는 장점을 지니고 있다. 원격 전력 모니터링 시스템은 Zigbee기술을 적용하기 위해 Zigbee스택을 이용해 구현하였다. Zigbee스택의 구조는 그림 4와 같다^[9]. 코디네이터와 센서노드사이의 무선통신은 Zigbee통신규약에 따라 이루어지며 센서노드들은 주기적으로 데이터와 패킷지를 수집하고, 수집된 데이터와 패킷지들을 코디네이터에 전송한다. 이때 전송이 성공하면 센서노드들은 전송이 가능한 대기상태가 되며, 이 노드들이 데이터를 다시 수집하기 시작하면 이 수집한 데이터를 전송한다.

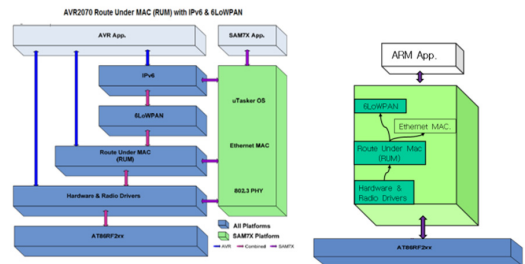


그림 4. RUM API 구성
Fig. 4. RUM API layout.

코디네이터는 각각의 노드들로부터 전송받은 데이터들을 RS-232을 이용한 시리얼통신으로 PC에 전송하고 PC는 JAVA로 프로그래밍된 모니터링 프로그램을 통해 수집된 데이터들을 보여준다. 모니터링 프로그램에서는 데이터뿐만 아니라 각 노드의 상태 변화율을 확인하기 위한 그래프 파형도 보여준다. 이러한 모니터링 시스템에서 확인할 수 있는 데이터 및 그래프를 통해 분산전원의 상태를 분석할 수 있다. 이와 같은 실험을 위해 구성된 분산 전원 및 전원 소비원의 모습은 그림 5와 같다. 그림 6에서는 각각의 분산전원과 전원 소비원에서의 전력 발전량 및 소비전력을 데이터 수치 및 그래프 파형으로 PC상에서 모니터링하는 프로그램 화면이다.



그림 5. 실험을 위해 구성된 EM
Fig. 5. Design of experimental EM

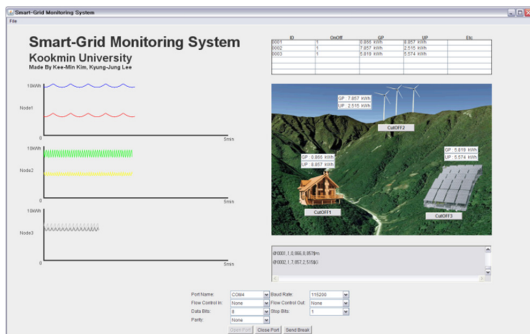


그림 6. 구현된 RPMS 화면
Fig. 6. Design of Remote Monitoring System

V. 결론

이 논문에서는 무선 센서 네트워크 기반의 원격 전력 모니터링 시스템을 구현하고, 센서 네트워크를 이용한 새로운 독립전원의 단독운전 방지기법을 제시 하였다. 원격 전력 모니터링 시스템은 WAM, LAM, 그리고 EM으로 구성되어 있다. EM모듈은 전력 발전량과 소비량을

모니터링하고 배전망의 사고를 감지한다. LAM모듈은 스마트 그리드에 연계되어 있는 EM모듈의 정보를 취합 하며 EM모듈에 제어명령을 내릴 수 있다. 그리고 EM모듈은 자신의 노드를 차단할 수 있고 전력 발전량과 소비량의 조절도 가능하다. 또한, 제작된 원격 전력 모니터링 시스템을 기반으로 독립전원의 단독운전 방지를 위한 방법을 제안하였다. EGM은 배전망 상의 사고를 감지하였을 때, LAM에 알람 신호를 전달하고 LAM은 필요시 EPM과 ELM을 차단한다. 테스트용 원격 전력 모니터링 시스템은 신재생 에너지의 전력 발전 및 전력을 소비를 모사하는 작은 모형들을 이용하여 구현하였다. LAM에서는 각각의 EM모듈의 정보를 수집하고 시리얼 통신으로 PC에서 전체 전력계통 상황을 모니터링 및 각각의 전원계통을 제어할 수 있었다. 이와 같이 제안한 기술은 인터넷을 이용한 적용도 가능하다.

참고 문헌

- [1] Tai, H. and Hogain, E.O., "Behind the buzz [In My View]," IEEE Trans Power and Energy Magazine, vol. 7, pp. 96 - 92, Mar.-Apr. 2009.
- [2] IEEE 1547 Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, June 2003.
- [3] M. Ropp, "design issues for grid-connected photovoltaic systems," Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, December, 1998.
- [4] Indra H. Mulyadi, Eko Supriyanto, Norlaili M. Safri, and Muhammad H. Satria, "Wireless Medical Interface Using ZigBee and Bluetooth Technology", pp.276-281, 2009 Third Asia International Conference on Modelling & Simulation, 2009.
- [5] Bipul Luitel, Student Member, Ganesh K. Venayagamoorthy, Senior Member, and Cameron E. Johnson, "Enhanced Wide Area Monitoring System", IEEE PES conference on Innovative Smart Grid Technologies, 2010.
- [6] S. Mekhilef, N.A. Rabim, "Implementation of

Grid-Connected Photovoltaic System with Power Factor Control and Islanding Detection”, 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004.

[7] Zhang Chunjiang, Liu Wei, San Guocheng, and Wu Weiyang, “A Novel Active Islanding Detection Method of Grid-connected Photovoltaic Inverters Based on Current-Disturbing”, Power Electronics and Motion Control Conference, 2006.

[8] Raymond M. Hudson, Tony Thome, Fereydoun Mekanil Michael R. Behnke, Sigifredo Gonzalez and Jerry Ginn, “IMPLEMENTATION AND TESTING OF ANTI-ISLANDING ALGORITHMS FOR IEEE 929 - 2000 COMPLIANCE OF SINGLE PHASE PHOTOVOLTAIC INVERTERS”, Conference record of the twenty-ninth IEEE photovoltaic specialists conference, 2002.

[9] 이경중, 김기민, 김재오, 안현식 “로봇 환경 플랫폼 구성을 위한 ZigBee기반 센서노드 구현”, 2010 정보 및 제어 학술대회, 2010.

※ 본 연구는 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음" (IITA-2009-C1090-0904-0002)
 ※ 본 연구는 2009년도 국민대학교 교내연구비를 지원 받아 수행된 연구입니다.

저자 소개

김 기 민(준회원)



- 2009년 국민대학교 전자공학부 학사 졸업
- 2009년~현재 국민대학교 대학원 전자공학부 석사과정
- <주관심분야 : USN 기술, 로봇틱스 응용>

이 경 중(준회원)



- 2010년 국민대학교 전자공학부 학사 졸업
- 2010년~현재 국민대학교 대학원 전자공학부 석사과정
- <주관심분야 : USN 기술, 로봇틱스 응용>

문 찬 우(정회원)



- 2001년 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 박사
- 현재 국민대학교 전자공학부 교수
- <주관심분야 : 로봇틱스 응용>

안 현 식(정회원)



- 1992년 서울대학교 제어계측 공학과 박사
- 현재 국민대학교 전자공학부 교수
- <주관심분야 : 차량 전자 제어>

정 구 민(정회원)



- 2001년 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 박사
- 현재 국민대학교 전자공학부 교수
- <주관심분야 : 임베디드 시스템, 차량 전자 제어>