

무선 센서 네트워크 기반 소규모 풍력발전기 모니터링 및 제어 시스템 구현

김도영*, 김영천^o

Implementation of Small-Scale Wind Turbine Monitoring and Control System Based on Wireless Sensor Network

Do-Young Kim*, Young-Chon Kim^o

요 약

최근 신재생 에너지 중 각광을 받고 있는 풍력 발전의 경우 경제성 및 효율성을 높이기 위하여 대부분의 풍력 발전단지들이 해상에 조성된다. 그러나 풍력단지 관리자가 해상에 설치된 풍력발전기에 접근하기 위해서는 헬기 또는 보트를 이용해야하며 많은 비용과 시간을 필요로 한다. 이러한 유지 및 관리 비용을 감소시키기 위한 하나의 대안으로써 풍력발전기의 원격 모니터링 및 제어 기술이 요구된다. 본 논문에서는 풍력발전기의 상태 정보 계측 및 원격 제어 기능을 제공하는 무선 센서 네트워크 기반의 풍력발전기 모니터링 및 제어 시스템을 구현한다. 이를 위해 다수의 센서를 풍력발전기에 설치하여 실시간으로 상태를 계측할 수 있도록 하고 제어 장치를 통해 원격 제어가 가능하도록 한다. 풍력발전기의 센서 장치 및 제어 장치는 무선 센서 네트워크를 통해 제어 센터와 계측 데이터 및 제어 데이터를 주고받도록 한다. 제어 센터에서는 GUI 기반의 모니터링과 제어 기능을 제공하는 중앙 집중형 모니터링 프로그램을 통해 풍력발전기를 관리한다. 또한 제어 센터 이외의 지역에서 원격으로 풍력발전기 모니터링이 가능하도록 스마트 단말기 기반의 웹 프로그램을 구현한다.

Key Words : Monitoring & Control System, LabVIEW, Wind Power, Wireless Sensor Network, ZigBee

ABSTRACT

Recently, the wind power has experienced great attentions and growths among many renewable energy sources. To increase the power generation performance and economic feasibility, the size of wind turbine (WT) is getting bigger and most of wind power plants are being constructed on offshore. Therefore, the maintenance cost is relatively high because boats or helicopters are needed operators to reach the WT. In order to combat this kind of problem, remote monitoring and control system for the WT is needed. In this paper, the small-scale WT monitoring and control system is implemented using wireless sensor network technologies. To do this, sensor devices are installed to measure and send the WT status and control device is installed to receive control message for specific operation. The WT is managed by control center through graphic user interface (GUI) based monitoring and control software. Also, smart device based web-program is implemented to make the remote monitoring of the WT possible even though operators are not in control room.

* 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0028509)

◆ First Author : Chonbuk National University Department of Computer Engineering, dy_kim@jbnu.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Chonbuk National University Smart Grid Research Center, yckim@jbnu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2015-03-085, Received March 31, 2015; Revised June 19, 2015; Accepted August 18, 2015

I. 서 론

최근 풍력 발전은 신재생 에너지 발전 중 가장 많은 관심을 받고 있으며 관련 기술 또한 높은 성장을 보이고 있다^[1]. 풍력발전단지에는 효율성 및 경제성의 이유로 해상에 조성되고 있는 추세이며 풍속, 수심 그리고 육지와와의 거리에 의해 위치가 결정된다. 이러한 특성으로 인하여 관리자가 해상에 설치된 풍력발전기에 접근하기 위해서는 헬기 또는 보트를 이용해야하며 비교적 많은 비용과 시간을 소모하게 된다. 산간 지역에 설치된 대부분의 풍력발전기의 경우에도 비슷한 문제점을 갖는다. 이러한 환경에 설치된 풍력발전기의 유지 및 관리 비용을 절감하고 실시간 제어와 모니터링을 효율적으로 가능하게 하는 기술이 요구된다^[2,3].

풍력발전기 상태 모니터링 시스템(CMS: Condition Monitoring System)은 발전기 내의 부품들에 대한 상태를 확인할 수 있도록 구성된 시스템이다. 각 부품에 대해 상세한 정보를 제공 받음으로써 제어센터의 관리자가 발전기의 상태를 신속하게 확인할 수 있다. 또한 풍력발전기의 기어 박스, 컨버터, 블레이드 등에 설치된 센서를 통해 수집한 데이터를 기반으로 발전기의 부품 중 어느 부분에 결함이 있는지 예측 및 감지할 수 있다. 이를 통해 관리자는 풍력발전기의 검사 및 수리(maintenance and repair : M&R) 일정을 보다 효율적으로 계획할 수 있다^[4].

기존의 풍력발전기 CMS는 풍력발전기의 상태 정보를 수집하는 센서를 사용하기 위하여 주로 유선 기반의 통신 네트워크를 이용한다. 유선 기반의 통신 네트워크를 이용한 시스템은 설치 시간 및 비용이 높으며, 유선으로 연결된 장비 및 센서의 재배치가 필요한 경우에 이동이 용이하지 못한 단점을 가진다. 또한 센서를 연결하는 전송 매체에 문제가 발생할 경우 추가적인 수리 및 교체 비용을 필요로 한다^[5]. 반면에 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network: WSN) 기술을 사용할 경우에는 설치 시간 및 비용 절감 등 유선 기반의 시스템이 가지고 있는 문제점들을 해결할 수 있다. 또한 기존의 시스템을 무선 기반 시스템으로 교체하는 것과 동시에 신뢰성, 유연성, 효율성을 높일 수 있는 풍력발전기 모니터링 및 제어 시스템에 대한 연구 또한 필요하다^[6].

참고문헌[7]에서는 기존의 유선 기반 풍력발전기 모니터링 시스템의 형태를 가진 풍력발전기 상태 모니터링 시스템을 설계하였다. 이 논문에서는 풍력발전기의 내부에 진동 센서, 온도 센서 및 비디오 카메라를 설치하였다. 참고문헌[8]에서는 풍력발전기의 블레

이드와 타워의 동적 거동을 추적하기 위한 구조물 건전성 진단(structure health monitoring: SHM) 시스템을 구현하였다. 이 논문에서는 구조물의 상태를 기록하기 위하여 가속계와 스트레인 게이지(strain gauge)를 사용하였다. 그러나 센서를 통해 일정 시간 동안 저장된 데이터를 수집하여 분석이 이루어졌기 때문에 실시간 모니터링에는 적합하지 않다. 참고문헌[9]에서는 다양한 센서를 이용한 지그비(ZigBee) 무선 센서 노드 기반 풍력 발전기 모니터링 시스템을 구현하였다. 센서의 신호를 처리하기 위하여 LabVIEW 기반의 모니터링 프로그램을 구현하였다. 그러나 센서 노드와 모니터링 프로그램 사이의 데이터 흐름이 단 방향으로 구현되었기 때문에 풍력발전기 제어에는 어려움이 있다.

본 논문에서는 풍력발전기의 실시간 상태 정보를 계속하며 원격 제어 기능을 제공하는 무선 센서 네트워크 기반의 풍력발전기 모니터링 및 제어 시스템을 구현한다. 풍력발전기의 모니터링에 필요한 센서를 도출하기 위하여 풍력발전단지 모니터링 및 제어의 통신에 관한 표준안인 IEC 61400-25를 참고하여 필요한 센서를 선정하였다. IEC 61400-25 표준안은 풍력발전기를 논리 노드(logical node)들로 표현하였으며, 각 논리 노드의 계층 정보를 정의하였다 [10]. 따라서 본 논문에서는 여러 논리 노드에서 공통적으로 사용되는 온도, 진동, 압력, 풍향, 풍속 센서를 선정하여 모형 풍력발전기 테스트베드에 설치하였다. 테스트베드에 설치된 센서들을 이용하여 측정된 풍력발전기의 상태 정보는 무선 통신 기술인 ZigBee 프로토콜을 사용하여 제어 센터에 전송된다. 제어 센터에 전송된 상태 정보 데이터를 효율적으로 모니터링하고 제어할 수 있도록 LabVIEW 기반의 풍력발전기 모니터링 및 제어 목적의 GUI (Graphic User Interface)를 구현하였다. 또한 제어 센터의 지역 컴퓨터뿐만 아니라 관리자에게 언제 어디서든 풍력발전기의 원격 모니터링이 가능하도록 스마트 단말기 기반의 웹 모니터링 프로그램을 구현하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 관련 연구를 소개하고, III장에서는 구현된 무선 센서 네트워크 기반의 풍력발전기 모니터링 및 제어 시스템과 풍력발전기의 모니터링 및 제어 목적의 LabVIEW 기반 GUI와 스마트 단말기 기반 웹 모니터링 프로그램에 대해 자세히 설명한다. 마지막으로 IV장에서 결론을 내린다.

II. 관련 연구

2.1 IEC 61400-25 표준

풍력발전단지의 모니터링 및 제어에 관한 통신을 위한 국제 표준인 IEC 61400-25 표준은 변전소 자동화의 설계에 대한 표준인 IEC 61850을 기반으로 만들어졌다. 이것은 최근 파트 1, 2, 3, 4, 5, 6 등 총 6개의 파트로 나뉘어 발표되었다. 본 표준은 풍력발전기 및 풍력발전단지 구성 요소와 모니터링 및 제어 시스템 사이의 통신을 다룬다.

그림 1과 같이 본 표준에서는 풍력발전기를 여러 개의 논리 노드(logical node)로 가상화하여 표현하였으며, 각 논리 노드의 계측 정보도 정의되었다. 표 1에 나타난 것과 같이 풍력발전기의 논리 노드는 필수 (Mandatory) 노드와 선택 (Optional) 노드로 구분되지만 모든 논리 노드를 고려하는 것을 권장한다.

이러한 논리 노드는 이미 잘 알려진 기능들을 포함하며 실제 장치와 관련된 가상 모델을 사용하여 모델링 된다. 예를 들어 논리 노드 중 WROT는 풍력발전기의 로터에 해당된다. 논리 노드는 상태 정보, 아날로그 정보, 제어 정보로 분류되는 세 종류 클래스로 나뉘어 지며 각각 다른 속성들을 포함한다. 표 2는 WNAC의 상태 정보, 아날로그 정보, 제어 정보에 대한 데이터 속성을 보여준다. 이를 기반으로 각 노드가 필요로 하는 센서를 결정할 수 있다.

또한 논리 노드의 온도, 습도, 진동, 압력, 풍향, 풍속은 각각의 특성에 맞는 측정 샘플링 주기에 따라 측정된다. 표 3은 표준에 따른 풍력발전기의 센서 데이터를 위한 측정 요구 사항을 나타낸다.

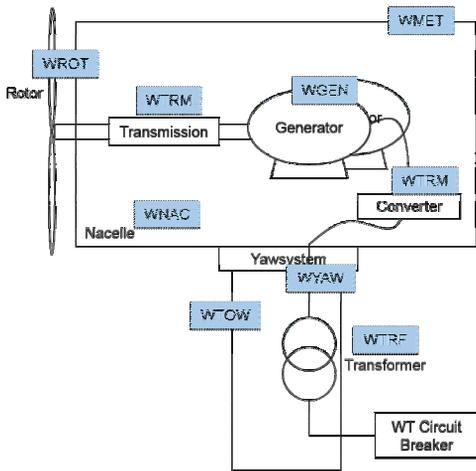


그림 1. 풍력발전기의 논리 노드 구성
Fig. 1. Logical nodes of a wind turbine

표 1. 풍력발전기 논리 노드 목록
Table 1. List of wind turbine logical nodes

LN classes	Description	M/O
WROT	Wind turbine rotor	M
WTRM	Wind turbine transmission information	O
WGEN	Wind turbine generator information	M
WCNV	Wind turbine converter information	O
WTRF	Wind turbine transformer information	O
WNAC	Wind turbine nacelle information	M
WYAW	Wind turbine yawing information	M
WTOW	Wind turbine tower information	O
WMET	Wind power plant meteorological information	O

M = Mandatory, O = Optional

표 2. 너셀의 논리 노드 데이터 종류 및 속성
Table 2. Types of data and attributes in nacelle

Data type	Attribute	Explanation
Analogue information	Dir	Nacelle orientation
	WdSpd	Wind speed outside nacelle
	WdDir	Wind direction outside nacelle
	Ex/InTmp	Temp. outside/inside nacelle
	IntHum	Humidity inside nacelle
	DispXdir	Tower longitudinal displacement
Status information	DispYdir	Tower lateral displacement
	BecBulbSt	Status of beacon
	WdHtSt	Status of wind sensor heater
	IceSt	Status of ice detection
Control information	AneSt	Status of anemometer
	SetBecMode	Set modus of beacon
	SetBecLev	Set bulb light of beacon
	SetFlash	Set beacon flash duty value

표 3. 센서 데이터 샘플링 주파수 요구사항
Table 3. Sampling frequency requirements of sensor data

Measurement	Sampling frequency
Temperature	1 Hz
Humidity	1 Hz
Vibration	200 Hz
Pressure	100 Hz
Wind speed	3 Hz
Wind direction	3 Hz

2.2 지그비 무선 통신 기술

무선 통신 기술 중 하나인 지그비(ZigBee)는 측정 및 모니터링 작업에 유용하여 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network : WSN)에서 부각을 나타내고 있는 기술이다. 이것은 단순한 프로토콜 스택, 낮은 데이터 속도, 낮은 소비 전력 및 작은 크기를 특징으로 한다. 지그비 모듈은 시리얼 명령 세트를 통해 통신을 단순화한 IEEE 802.15.4를 기반으로 한다. 지그비는 여러 시스템-온-칩(System-on-Chip : SoC), 무선 송수신기와 마이크로프로세서로 만들어진다. 이 지그비 모듈은 단일 집적 회로에 결합되며 일반적으로 센서 또는 다른 장치와 통신하기 위해 디지털 입출력, 아날로그 입력, PWM 출력 포트를 포함한다. 표 4는 본 논문에서 사용한 지그비 기반 무선 통신 모듈의 주파수, 전송 속도 및 통신 거리 사양 등을 나타낸다.

지그비는 전기능기기(Full Function Device : FFD)와 축소기능기기(Reduce Function Device : RFD) 두 종류로 분류된다. 전기능기기는 지그비 코디네이터(PAN coordinator), 라우터(Coordinator FFD), 종단기기(End device RFD)의 역할을 수행할 수 있지만, 축소기능기기는 종단 기기로서의 역할만을 수행할 수 있다. 그림 2에 나타난 것과 같이 지그비를 이용하여 스타, 트리, 메시 토폴로지를 구성할 수 있다. 코디네이터는 개별 네트워크에서 한 노드만 존재하며, 자신이 속한 네트워크의 노드들을 감독한다. 라우터는 네트워크의 통신 영역 및 범위를 넓히며 자식 노드를 관리한다. 또한 멀티홉(Multi-hop) 라우팅 메시지를 전달하기도 한다. 종단 기기는 코디네이터, 라우터에 연결되어있는 아주 간단한 기능의 프로토콜을 가지는 장치이다. 종단 기기간의 통신은 불가능하며 라우터 및 코디네이터와의 통신만이 가능하다.

표 4. 지그비 무선 통신 모듈 사양
Table 4. Specification of ZigBee communication module

Specification	Description
Standard	IEEE 802.15.4
Frequency band	ISM 2.4 GHz
Maximum data rate	250 Kbps
Indoor/Urban Range	up to 60 m
Line-of-sight Range	up to 750 m
Supply Voltage	3.3 V
Transmit power	10 mW
Network topology	Point-to-Point, Star, Mesh

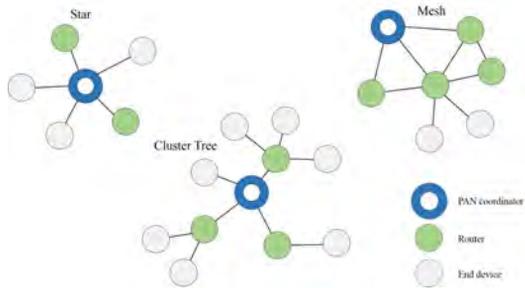


그림 2. 지그비 토폴로지 구성
Fig. 2. ZigBee topology configuration

III. 풍력발전기 모니터링 및 제어 시스템

풍력발전기 모니터링 및 제어 시스템은 제어 센터에 위치한 코디네이터 노드를 통해 풍력발전기에 위치한 센서 노드로부터 각종 상태 정보를 수집하고, 이를 기반으로 제어 센터의 관리자에게 모니터링 및 제어 기능을 제공한다. 또한 제어 센터에 위치한 지역 컴퓨터가 아닌 다른 장비에서도 원격 모니터링이 가

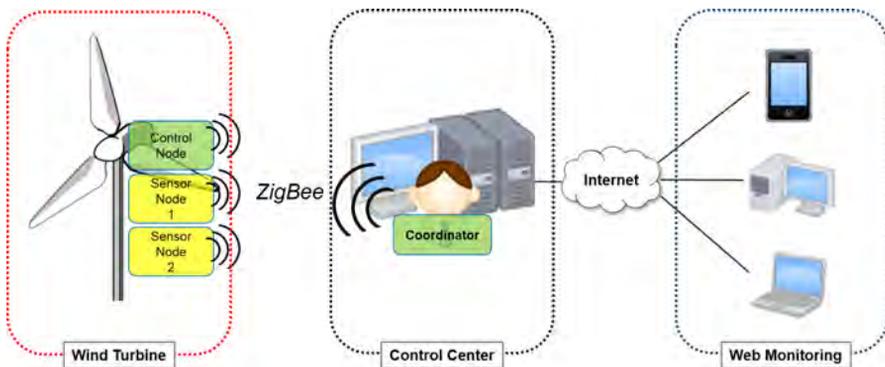


그림 3. 풍력발전기 모니터링 및 제어 시스템의 구성
Fig. 3. Wind turbine monitoring and control system configuration

능하도록 스마트 단말기 기반의 웹 모니터링 기능을 제공한다. 그림 3은 풍력발전기 모니터링 및 제어 시스템의 전체적인 구성을 나타낸다.

3.1 풍력발전기 모니터링 및 제어 테스트베드

풍력발전단지의 모니터링 및 제어에 관한 통신을 위한 국제 표준인 IEC 61400-25 표준은 변전소 자동화의 설계에 대한 표준인 IEC 61850을 기반으로 만들어졌으며 풍력발전기 및 풍력발전단지 구성 요소와 모니터링 및 제어 시스템 사이의 통신을 다룬다.

3.1.1 풍력발전기 센서 노드

풍력발전기 센서 노드는 풍력발전기에 설치되며, 무선 통신을 이용하여 발전기의 상태를 모니터링 할 수 있도록 지그비 무선 모듈과 다수의 센서를 이용한다. 풍력발전단지 모니터링을 위한 통신 관련 표준인 IEC 61400-25 표준을 참고하여 필요한 센서를 선정하였다. 선정된 센서는 온도, 습도, 기압, 풍향, 풍속, 진동 센서이며, 표 5에 센서의 모델, 측정 단위 및 사양을 보였다.

총 다섯 종류의 센서를 이용하였으며 2개의 센서 노드로 분리하여 구현하였다. 센서 노드 1은 온도, 습도, 진동 상태를 측정하고 센서 노드 2는 대기압, 풍향, 풍속을 측정한다. 센서 노드의 센서 인터페이스, 스케줄링 및 무선통신을 구현하기 위하여 아두이노 우노(Arduino UNO) 보드를 이용한다. ATmega328 기반의 아두이노 우노 보드는 기존의 다른 마이크로 프로세서 보드에 비해서 각종 센서, 모터 인터페이스, 무선 통신 모듈 등을 비교적 간단히 구현할 수 있는 장점이 있다. 센서 노드 1과 센서 노드 2의 센서, 지그

비 모듈 및 배터리 구성을 그림 4와 그림 5에 각각 나타내었다. 본 연구에서 풍력발전기는 자체의 유선 전원 공급이 가능한 환경이며, 유선 전원과 배터리를 병행하여 사용함으로써 전원 공급 및 신뢰성 문제를 해결하였다.

온/습도 센서인 SHT-15는 ADC(Analog-Digital Converter)를 내장하고 있으며, I2C통신을 이용하여 측정값을 아두이노 보드에 전달한다. 이를 위하여 보드의 디지털 I/O 채널 중 2개를 할당하며, 각각은 데이터를 위한 DATA 채널과 센서와 보드 사이의 동기화를 위한 SCK 채널로 사용된다.

아두이노 보드의 프로세서는 두 채널에 신호를 전송하여 센서와 동기화한 후 데이터 측정 명령 신호를 DATA 채널을 통하여 전송한다. 측정 명령을 수신한 센서는 측정 데이터를 보드로 전송한다. 위 과정을 거

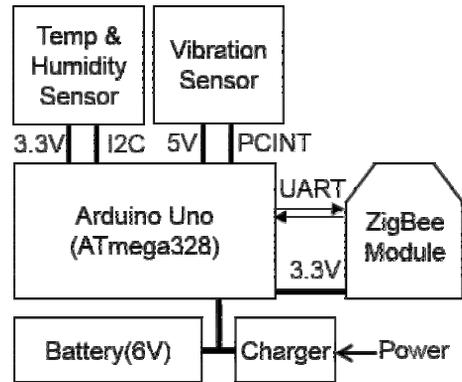


그림 4. 센서 노드1의 구성도
Fig. 4. Configuration of sensor node 1

표 5. 센서 목록 및 사양
Table 5. List and specification of sensors

Sensor type	Model	Specification	Sensor output
Temperature	SHT-15	Supply voltage: 3.3V	Digital(I2C)
Humidity		Measuring range: -40~123.8 °C, 0~100% Resolution: 0.01 °C, 0.1% Accuracy: 2%	
Vibration	DFR0027	Open resistor circuit: 10kΩ On-time: 0.1msec	Digital(0 or 5V)
Barometer	BMP085	Supply voltage: 3.3V Measuring range: 300~1100 hPa Resolution: 0.03 hPa	Digital(I2C)
Wind direction	Weather Sensor	Supply voltage: 5V Measuring range: 360°	Analog
Wind speed		Resolution: 22.5°, 0.6666m/s	Digital (0 or 5V)

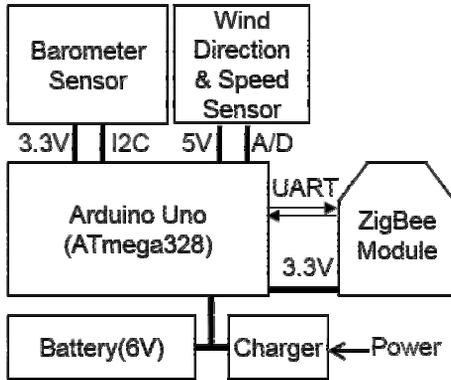


그림 5. 센서 노드2의 구성도
Fig. 5. Configuration of sensor node 2

처 수신한 데이터를 미리 정의된 수식에 대입하여 온도 및 습도 값을 계산한다. 온도와 습도 계산을 위하여 수식 (1), 수식 (2)을 각각 사용한다. 수식 (1)에서 d_1 은 센서의 입력 전압에 따라 결정된다. 본 연구에서는 입력 전압이 5V이고, d_1 의 값은 -40.00°C 이다. d_2 는 센서에서 출력되는 데이터의 비트 수에 따라 결정된다. 본 연구에서는 14bit의 데이터를 출력하며, 이에 따라 d_2 는 0.01°C 로 설정된다. SO_T 는 센서에서 출력되는 데이터이다. 수식 (2)의 c_1, c_2, c_3 는 센서에서 출력되는 데이터의 비트 수에 따라 결정되며 각각 04, 0.0405, -2.8×10^{-6} 이다. SO_{RH} 는 센서에서 출력되는 데이터이다. 그림 6은 코디네이터의 요청에 따른 온도, 습도 값을 측정하는 과정을 나타낸다. 또한 온습도 센서와 동일한 센서 데이터 출력 방식을 가지는 대기압 센서도 그림 6의 동작 순서를 따른다.

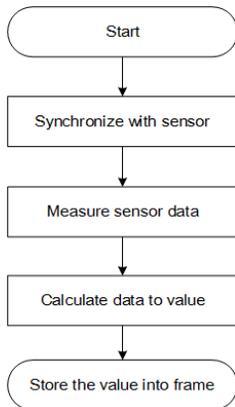


그림 6. 온도, 습도, 대기압 값 측정 흐름도
Fig. 6. Measurement process of temperature, humidity and barometer

$$Temperature = d_1 + (d_2 \times SO_T) \quad (1)$$

$$Humidity = c_1 + (c_2 \times SO_{RH}) + (c_3 \times SO_{RH}^2) \quad (2)$$

본 연구에서 사용한 진동 센서는 1회 진동 시에 하나의 펄스를 출력한다. 아두이노 보드에서는 초당 발생하는 진동 센서의 펄스를 측정하기 위하여 보드의 인터럽트 채널에 연결한다. 센서로부터 펄스가 발생되면 보드는 인터럽트를 감지하고 인터럽트 서비스 루틴(Interrupt Service Routine: ISR)을 실행하며 진동 횟수를 누적한다. 0.005초 동안 발생한 진동 횟수를 계산하며, 코디네이터 노드로 부터의 폴링에 응답하여 진동 횟수 값을 전송한다. 그림 7에 진동 센서를 이용한 진동 횟수 측정 과정을 나타내었다.

풍향 센서는 풍향 지시계가 향하는 방위에 따라 서로 다른 전압 값을 가지며, 총 16개의 서로 다른 값을 가진다. 출력 신호는 아날로그 신호로서 0 ~ 5V의 값을 출력하며 보드의 아날로그 입력 채널에 연결된다. ADC를 이용하여 측정된 풍향 센서의 전압 값을 0부터 500의 정수 값으로 정규화하여 방위를 계산한다. 그림 8은 풍향 센서를 이용한 풍향 값 측정 과정을 나타낸다.

풍속의 계산은 바람에 의해 센서의 회전체가 회전할 때 이루어지는 전압 스위칭 횟수를 측정하여 풍속을 계산한다. 센서의 스위칭 여부를 확인하기 위하여, 보드의 디지털 I/O 채널에 연결한다. 풍속 센서가 한

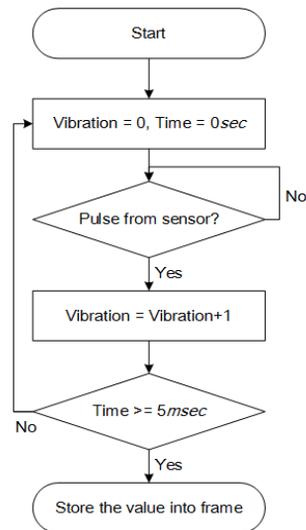


그림 7. 진동 값 측정 흐름도
Fig. 7. Measurement process of vibration

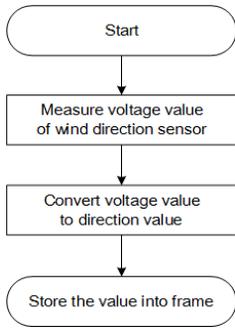


그림 8. 풍향 값 측정 흐름도
Fig. 8. Measurement process of wind direction

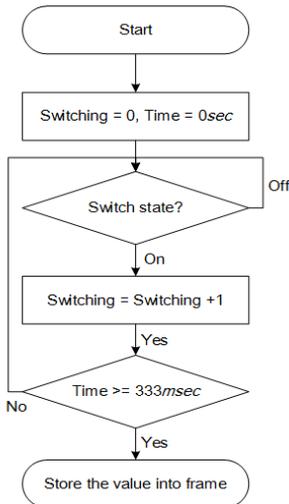


그림 9. 풍속 값 측정 흐름도
Fig. 9. Measurement process of wind speed value

바퀴 회전할 경우 총 3번의 스위칭이 일어나며, 풍속의 계산은 수식 (3)을 이용하여 계산한다. 0.333초 동안 1회의 스위칭이 감지되면 약 2 m/s를 의미한다. 그림 9는 풍속 센서를 이용한 풍속 측정 과정 나타낸다.

$$Wind_speed = switching \times 2 \text{ (m/s)} \quad (3)$$

3.1.2 풍력발전기 제어 노드

풍력발전기를 제어하는 모의 실험을 위해 스텝 모터를 사용하여 풍력발전기 제어 노드를 구현하였다. 제어 노드는 아두이노 우노 보드, 지그비 무선 모듈, 스텝 모터, 모터 드라이버로 구성된다. 그림 10에 제어 노드의 구성을 나타내었다. 모터 드라이버는 SLA7062M 드라이버를 사용하였으며, 이를 통해 모터의 구동 방향과 회전 속도를 조절한다. 제어 노드는 제어 센터에서 발생한 풍력발전기 방향 제어 명령을

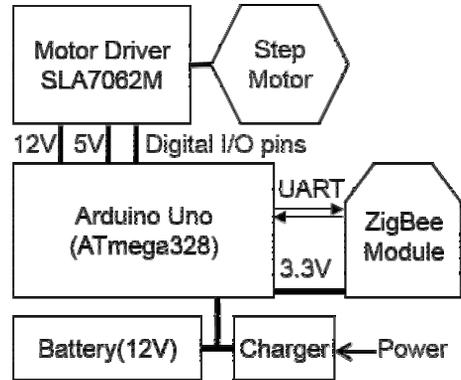


그림 10. 제어 노드의 구성도
Fig. 10. Configuration of control node

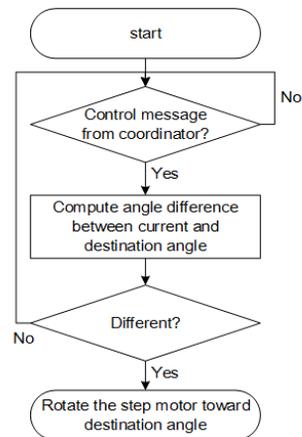


그림 11. 풍력발전기 제어 노드 동작 흐름도
Fig. 11. Work-flow of wind turbine control module

무선으로 수신하여 동작한다. 본 연구에서는 풍력발전기 테스트베드의 Yaw축을 제어하며, 제어 명령은 풍력발전기의 헤드가 가리키는 방향을 제어하기 위한 목적 방향을 포함한다. 제어 노드는 수신한 데이터를 계산하여 목적 방향과 현재 방향의 차이를 구한 후 목적 방향과 값이 같아질 때까지 스텝 모터를 시계 방향으로 구동한다. 제어 명령을 수신한 제어 노드의 동작 과정을 그림 11에 보였다.

3.1.3 코디네이터

코디네이터(Coordinator) 노드는 센서 노드, 제어 노드, 제어 센터 사이의 데이터를 교환하기 위한 액세스 포인트 역할을 수행한다. 이를 위해 아두이노 보드를 기반으로 구현한 코디네이터의 통신 인터페이스를 지그비 통신과 직렬 통신 모두 가능하도록 구성하였다. 그림 12은 센서 노드 및 제어 노드의 설치위치와

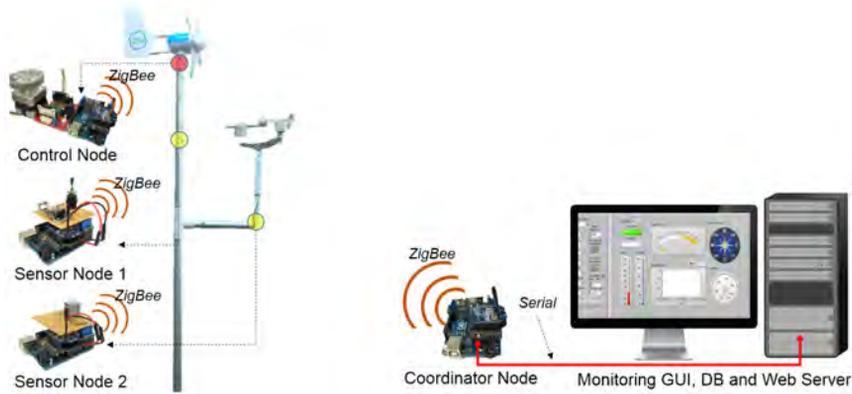


그림 12. 구현된 풍력발전기 모니터링 및 제어 시스템 테스트베드
 Fig. 12. Implemented test-bed for wind turbine monitoring and control system

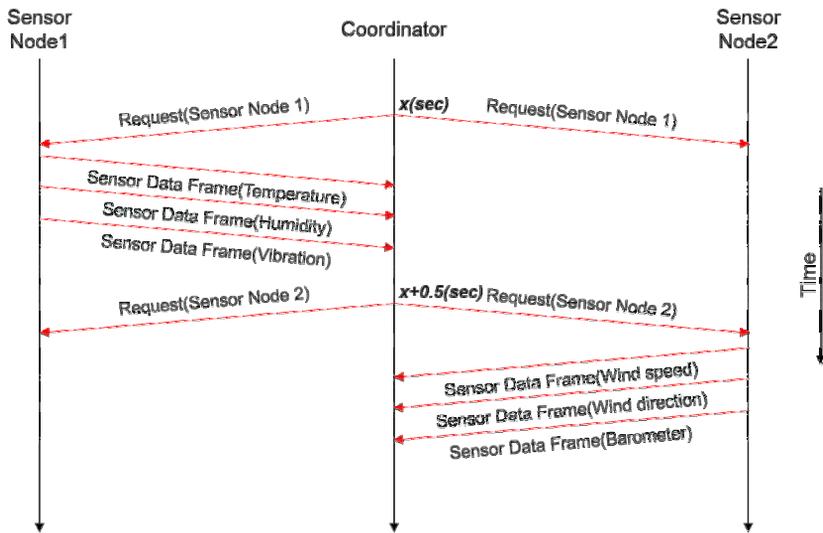


그림 13. 코디네이터와 센서 간의 정보 흐름도
 Fig. 13. Information flow between coordinator and sensors

코디네이터 노드와 제어 센터와의 연결 등을 나타낸다. 본 논문에서는 코디네이터와 풍력발전기의 직선 거리가 약 530미터인 야외환경에서 테스트를 수행하였으며 모든 노드들의 통신 속도를 57600bps로 설정하였다. 단, 코디네이터와 제어센터 PC사이의 연결은 유선이므로 통신 속도를 115200bps로 설정하여 통신 지연을 최소화하였다.

코디네이터는 센서 노드로부터 센싱 데이터를 수집하기 위해 그림 13과 같이 데이터 요청 프레임을 모든 센서 노드에 전송하여 폴링을 수행한다. 이때 그림 14의 코디네이터 프레임이 0.5초마다 송신되며, 매번 목적지 노드의 값을 변경하여 센서 노드를 선택한다. 요

청 프레임을 수신한 센서 노드는 자기 차례에 풍력발전기의 상태 정보가 담긴 데이터 프레임을 전송한다. 예를 들어 센서 노드 1이 노드 ID 필드가 0x01인 요청 프레임을 수신한 경우 센서 노드는 그림 14의 센서 노드 1 데이터 프레임 포맷에 따라 센서 데이터 프레임을 코디네이터에게 전송한다. 이때 프레임의 순서는 그림 13과 같으며 프레임의 개수는 표 3의 샘플링 주파수 요구 사항에 의해 결정된다.

코디네이터가 제어 노드에 제어 명령을 전송하는 경우에는 코디네이터 프레임의 데이터 필드에 제어 방향을 삽입하여 전송한다. 이때 제어 명령은 그림 15의 GUI를 통해 풍력발전기를 모니터링 중인 관리자

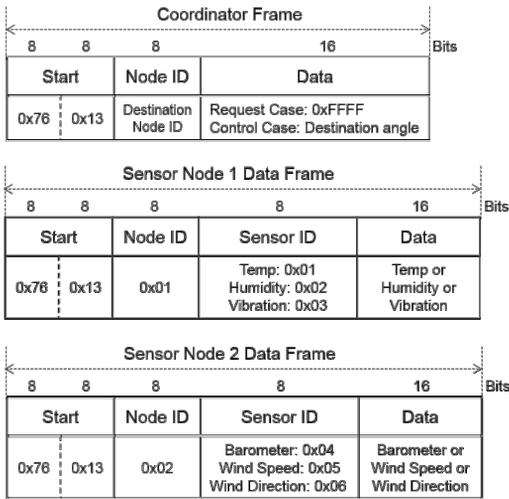


그림 14. 코디네이터 및 센서 노드 프레임 구조
Fig. 14. Frame formats of coordinator and sensor nodes

에 의해 비동기적으로 발생된다.

3.2 풍력발전기 모니터링 및 제어 프로그램

제어센터는 지역 위치에서 풍력발전기를 모니터링 하기 위한 LabVIEW 기반의 GUI와 데이터 저장을 위한 데이터베이스, 스마트 단말기 기반 웹 모니터링 기능을 제공하기 위한 프로그램 및 웹 서버로 구성된다. 웹 서버 기능 구현 및 데이터베이스 구축에는 서버용 소프트웨어인 Apache와 MySQL 데이터베이스를 사용하였다.

3.2.1 제어 센터 기반 모니터링 및 제어 GUI

풍력발전기의 상태를 제어 센터에서 GUI를 통해 실시간으로 확인할 수 있고, 풍향에 따른 Yaw 축 제

어가 가능한 LabVIEW 기반의 모니터링 및 제어 프로그램을 구현하였다. 그림 15는 제어 센터를 위한 LabVIEW 기반 풍력발전기 모니터링 GUI의 모습을 나타낸다. 본 프로그램은 직렬 통신을 이용하여 코디네이터로부터 수신한 풍력발전기의 상태 정보 데이터를 처리하여, 그림 15의 중앙에 위치한 패널을 통해 온도, 상대 습도, 진동, 대기압, 풍향, 풍속 정보를 보여준다. 또한 좌측 상단에 위치한 탭을 통해 테스트베드의 Yaw축을 풍향에 따라 제어할 수 있도록 구현하였다. 본 모니터링 및 제어 GUI가 실행중인 제어 센터의 컴퓨터와 코디네이터의 직렬 통신에 대한 파라미터를 그림 15의 좌측 패널에서 설정한다. 데이터베이스는 MySQL을 사용하였으며 풍력발전기의 상태 정보 저장 주기는 관리자에 의해 설정 가능하도록 구성하였다. 그림 15의 오른쪽 패널에서 데이터베이스와의 연결을 설정할 수 있다.

3.2.2 스마트 단말기 기반 웹 모니터링

본 논문에서 구현한 웹 모니터링 프로그램은 스마트 단말기(스마트폰, 스마트태블릿 등), PC, 노트북의 웹 브라우저를 통해 풍력발전기의 상태를 모니터링 및 통계적 분석을 할 수 있도록 작성되었다. 웹 기반 모니터링 기능 구현을 위하여 PHP, Javascript 언어 및 구글 차트(Google Chart) API를 사용하였다.

풍력발전기 웹 모니터링 프로그램은 세 종류의 기능을 갖도록 구현되었으며 그림 14에 각 기능의 실행 화면을 나타내었다. 그림 16의 (a)에 나타난 메인 페이지(Main page)에서는 프로그램에 접속한 사용자에게 가장 최근 업데이트된 풍력발전기의 상태 정보를 보여주도록 기능을 구현하였다. 그림 16의 (b)는 센서 로그 페이지(Sensor logs page)이며, 제어 센터의 데



그림 15. LabVIEW 기반의 풍력발전기 모니터링 및 제어 GUI
Fig. 15. LabVIEW based GUI for wind turbine monitoring and control

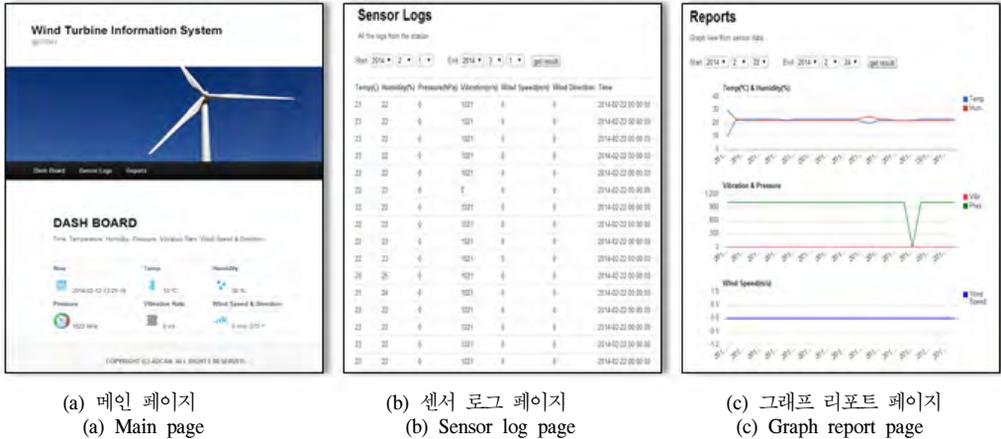


그림 16. 구현된 풍력발전기 웹 모니터링 GUI
 Fig. 16. Implemented wind turbine web-monitoring GUI

이터베이스에 저장된 모든 풍력발전기의 상태 정보 데이터를 사용자가 지정한 특정 기간의 데이터를 열람할 수 있도록 하였다. 그림 16의 (c)에 나타난 그래프 리포트 페이지(Graph reports page)는 사용자가 지정한 기간의 데이터를 그래프의 형태로 확인할 수 있도록 구현하였다. 센서 로그 페이지 및 그래프 리포트 페이지에서는 사용자가 선택한 구간에 대한 정보를 비동기적으로 제어 센터의 데이터베이스에 요청하기 위해 Asynchronous Javascript And XML(AJAX)를 이용하여 기능을 구현하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크 기반의 소규모 풍력발전기 모니터링 및 제어 시스템을 구현하였다. 이를 위하여 온도, 습도, 진동, 대기압, 풍향, 풍속 센서와 스텝 모터를 아두이노 보드와 함께 사용하여 풍력발전기 센서 노드 및 제어 노드를 구현하였다. 제어 센터로부터 원거리에 위치한 풍력발전기의 센서 노드와 제어 노드가 제어 센터와 정보를 주고받을 수 있도록 지그비 무선 통신을 이용하였다. 제어 센터는 센서 노드로부터 수신한 풍력발전기의 상태정보를 LabVIEW 기반의 모니터링 GUI를 통해 발전기를 모니터링하고, 이를 기반으로 제어 노드를 작동하여 Yaw축을 제어할 수 있도록 테스트베드를 구현하였다. 또한 데이터베이스에 저장된 풍력발전기 상태정보를 대시보드, 도표, 그래프 형식으로 제공하는 웹 모니터링 GUI를 구현하여 풍력발전기의 관리 효율과 편의를 증대하였다. 본 논문에서 구현된 시스템은 소규모 풍력발전기의 상태 모니터링 및 제어에 적용이 가능

할 것으로 사료된다.

References

- [1] Y. S. Kim, H. M. Oh, and S. S. Choi, "A method for simulation of smart grid communication network architecture," *J. KICS*, vol. 38B, no. 2, pp. 122-129, Feb. 2013.
- [2] M. A. Ahmed and Y.-C. Kim, "Hierarchical communication network architectures for offshore wind power farms," *J. Energies*, vol. 7, no. 5, pp. 3420-3437, May 2014.
- [3] J.-H. Jung, W. Yang, and Y.-C. Kim, "EPON based communication network architecture for offshore wind power farm," *J. KICS*, vol. 38B, no. 2, pp. 130-139, Feb. 2013.
- [4] Z. Hameed, Y. S. Hong, Y. M. Cho, S. H. Ahn, and C. K. Song, "Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 1, pp. 1-39, Jan. 2009.
- [5] D. Boyle, M. Magno, B. O'Flynn, D. Brunelli, E. Popovici, and L. Benini, "Towards persistent structural health monitoring through sustainable wireless sensor networks," in *Proc. 2011 7th Int. Conf. Intell. Sensors, Sensor Netw. and Inf. (ISSNIP)*, pp. 323-328, Melbourne, Australia, Dec. 2011.

- [6] P. Bae, Y. M. Jo, E. K. Moon, and Y. B. Ko, "Heterogeneous interface decision engine and architecture for constructing low power home networks," *J. KICS*, vol. 40B, no. 2, pp. 313-324, Feb. 2015.
- [7] J. Y. Park, B. J. Kim, and J. K. Lee, "Development of condition monitoring system with control functions for wind turbines," *World Academy Sci., Eng. Technol.*, vol. 5, no. 9, pp. 258-264, 2011.
- [8] R. Swartz, J. Lynch, B. Sweetman, F. Folfes, and S. Zerbst, "Structural monitoring of wind turbines using wireless sensor networks," *An Int. J. Smart Struct. Syst.*, vol. 6, no. 3, pp. 183-196, Apr. 2010.
- [9] H. H. Kim, S. B. Ahn, S. J. Choi, and J. K. Pan, "ZigBee wireless sensor nodes and network for wind turbine condition monitoring," *J. Korea Academia-Ind. Cooperation Soc.*, vol. 13, no. 9, pp. 4186-4192, Sept. 2012.
- [10] International Electrotechnical Commission, "Wind turbines—part 25-2: Communications for monitoring and control of wind power plants—information models; international standard IEC 61400-25-2," International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2006.

김도영 (Do-Young Kim)



2014년 8월 : 전북대학교 IT정보공학부 졸업
2014년 9월~현재 : 전북대학교 컴퓨터공학과 석사과정
<관심분야> 차세대 풍력발전단지 및 스마트그리드 통신망, 센서네트워크

김영천 (Young-Chon Kim)

한국통신학회 논문지 제39권 제4호 참조
현재 : 전북대학교 IT정보공학과 교수