

풍력 터빈 날개에 장착된 에너지 하베스터를 이용한 센싱 데이터의 무선전송 기법

이 수 범*, 아흐멧 압델라지즈*, 장 민 호^o

Wireless Transmission Scheme for Sensing Data by Using Energy Harvester in Wind Turbine Blades

Soobum Lee*, Ahmed Abdelaziz*,
Min-Ho Jang^o

요 약

본 논문은 풍력 터빈 날개 (wind turbine blade)에 장착된 에너지 하베스터 (energy harvester)에서 생산된 전력 (power)을 에너지원으로 하여 다른 외부 전원의 공급없이 센서 (sensor)에서 수집된 데이터를 지그비 (ZigBee) 통신 프로토콜을 이용하여 무선으로 전송하는 기법을 제안한다. 제안된 에너지 하베스터를 이용한 센싱 데이터의 무선전송 기법은 풍력 터빈 날개의 고장 진단 및 유지보수의 효율성 및 경제성으로 인하여 풍력 발전 시스템에 광범위하게 활용될 수 있다.

Key Words : Energy harvesting, IoT (Internet of Things), sensor, vibration, wind turbine blade, ZigBee

ABSTRACT

This paper presents the wireless transmission scheme to transmit data collected from sensors by using the ZigBee communication protocol based on power produced by energy harvester mounted on wind turbine blades. The proposed wireless

transmission scheme can be widely used in wind power generation systems due to the efficiency and economy of the fault diagnosis and maintenance for wind turbine blades.

I. 서 론

최근 친환경 에너지에 대한 높은 관심으로 인하여 풍력 발전 시스템과 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 풍력 터빈 (wind turbine)의 연속적인 회전으로 인한 작은 진동 (vibration)을 이용하여 에너지를 얻어낼 수 있는 에너지 하베스팅 (energy harvesting) 기술¹⁻³⁾은 별도의 외부 전원 공급없이 지속적으로 필요한 전력 (power)을 생산해낼 수 있다는 의미에서 그 중요성이 크다.

한편, 풍력 터빈 날개 (blade) 내부에 다양한 센서 (sensor)를 설치하여 시스템의 실시간 고장 진단에 활용될 수 있다. 예를 들어, 날개 내부에 설치된 진동센서에서 센싱된 데이터를 모니터링하여 터빈 날개의 구조적 손상이 발생 시 야기되는 비정상적인 진동을 감지함으로써 고장 진단이 가능하다. 그러나 센서 동작 및 무선통신을 위하여 필요한 전력은 풍력 발전에서 생산된 전력을 이용할 수 없다. 전선의 유지보수 문제로 인하여 풍력 발전기의 슬립 링 (slip ring)을 이용한 전력 공급은 날개 루트 (root) 부분까지만 한정적으로 가능하기 때문이다. 그러므로 날개 내부에 위치한 센서 노드에는 별도의 에너지가 공급되어야 하는데, 배터리를 사용할 경우 유한한 수명으로 인하여 유지보수 이슈가 발생한다. 하지만 불행하게도 풍력 터빈 날개의 크기는 최대 100미터 이상에 달하기에 때문에, 일반적인 사물인터넷 (IoT; Internet of Things) 응용 서비스 환경과 비교하여 배터리 교환을 위한 작업에 많은 시간과 비용이 발생하게 된다. 그러므로 풍력 터빈 날개의 고장 진단 및 유지보수를 위하여 배터리 교체없이 지속적인 상태 정보 센싱을 가능하게 하는 무선전송 기법이 필요하다.

본 논문에서는 [3]에서 제시된 에너지 하베스터 (energy harvester) 구조를 기반으로, 풍력 터빈 날개

* 본 연구는 2019년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

• First Author : (ORCID:0000-0002-6418-7527)Department of Mechanical Engineering, University of Maryland, Baltimore County, sblee@umbc.edu, 부교수, 정회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-9195-5184)School of Electrical and Electronic Engineering, Ulsan College, mhjang@uc.ac.kr, 부교수, 종신회원

* (ORCID:0000-0003-4639-8096)Department of Mechanical Engineering, University of Maryland, Baltimore County, ahmedk@umbc.edu, 박사후 연구원(Post-Doc.)

논문번호 : 202005-100-C-LU, Received May 5, 2020; Revised May 27, 2020; Accepted June 5, 2020

에 장착된 하베스터에서 생산된 전력을 에너지원으로 하여 다른 외부 전원의 공급없이 센서에서 수집된 데이터를 지그비 (ZigBee) 통신 프로토콜을 이용하여 무선으로 전송하는 기법을 제안하고, 그에 따른 유효성을 실험 결과로 확인하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 에너지 하베스터에서 얻은 전력을 이용하여 진동센서에서 수집한 데이터를 지그비 방식으로 무선 전송하는 기법에 대하여 풍력 터빈의 실시간 고장진단 플랫폼 구조를 중심으로 설명한다. III장은 제안된 무선전송 기법에 대한 실험 결과를 보여준다. 이를 통하여 제안된 전송 기법의 유효성을 검증하고, IV장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

II. 센서 노드에서 에너지 하베스터를 이용한 무선전송 기법

사물인터넷 기반 응용 서비스⁽⁴⁾를 위하여 각 센서 노드에서 획득된 정보는 무선 센서 네트워크를 통하여 수집되고, 이렇게 수집된 빅데이터를 분석하여 사용자 환경에 적합한 서비스를 제공할 수 있다. 이러한 사물인터넷의 기본 개념을 바탕으로 풍력 발전 시스템의 실시간 고장 진단을 위하여 풍력 터빈 날개 내부에 무선 센서 노드 (WSN; wireless sensor node)를 설치한다. 그림 1은 풍력 터빈 날개에 장착된 에너지 하베스터에서 얻어낸 전력을 이용하여 WSN를 동작시키는 실시간 고장 진단 플랫폼에 대한 구조를 보여준다.

[3]에서 대규모 회전 물체 내부에 압전 에너지 하베스터 (PEH; piezoelectric energy harvester)와 편심 디

스크 (disk)를 설치하여 운동에너지를 진동 및 전기에너지로 효율적으로 변환할 수 있는 방법을 제안하였으며, 그 동작 원리를 요약하면 다음과 같다. 풍력 터빈 날개가 회전하고 중력의 변화에 의해 편심 디스크가 날개 내부에서 회전하게 되면 하베스터와 상대 변위가 발생한다. 이는 중력으로 인하여 지면을 향하는 디스크와 터빈 날개 방향으로 움직이는 하베스터 사이의 상대적인 움직임에 기인한다. 이때 디스크 및 하베스터에 각각 부착되어 있는 자석의 자기력에 의하여 하베스터에 진동이 발생⁽³⁾한다. 이러한 진동으로 인하여 압전 하베스터에서 발생된 전기에너지는 WSN에서 스스로 에너지를 지속적으로 공급할 수 있는 배터리 역할을 할 수 있다. 참고로 압전 하베스터에서 생산되는 에너지에 대한 전력량은 [5]에서 상세하게 확인할 수 있다. 그림 2는 [3]에서 제안된 에너지 하베스터의 구조를 보여준다.

또한 하베스터는 풍향 및 풍속의 변화로 인한 터빈 날개의 속도 변화와 무관하게 날개 회전시 중력의 변화에 따라 자석의 척력을 이용하여 외팔보 형태의 진동 하베스터를 구동하게 되므로 하베스터는 항상 공진주파수에서 진동하게 되며, 이로 인하여 안정적인 전력 수확이 가능한 특징이 있다. 아울러 풍력 터빈 날개 내부에 하베스터의 모든 구성 요소가 구현되기 때문에 날개의 공기역학적 성질에 영향을 미치지 않으며, 외부 기후에도 영향을 받지 않는 장점을 갖는다.

한편, 풍력 터빈 날개의 유지보수를 위하여 가장 중요한 센싱 데이터인 진동을 측정하기 위하여 진동 센서를 날개 내부에 설치한다. 물론 필요에 따라 온도·습도 센서와 같은 다양한 센서를 설치하여 풍력 터빈의 동작을 모니터링할 수도 있다. 또한 무선 센서 네

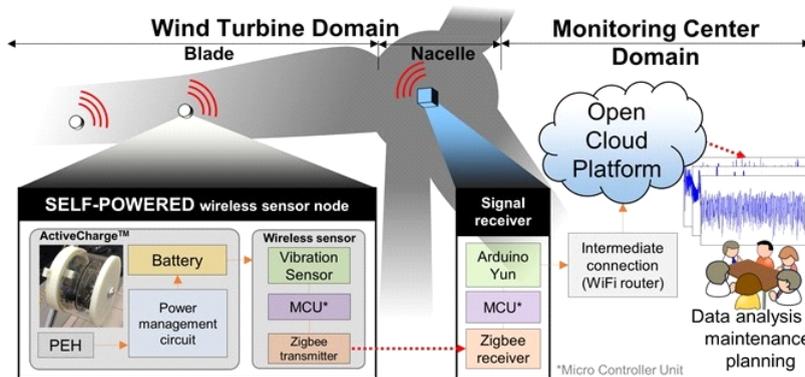


그림 1. 풍력 터빈 날개의 실시간 고장 진단 플랫폼 구조
Fig. 1. Platform structure for the real-time maintenance of a wind turbine blade

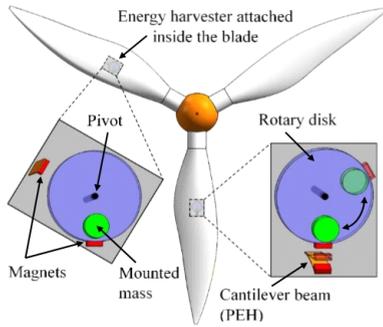
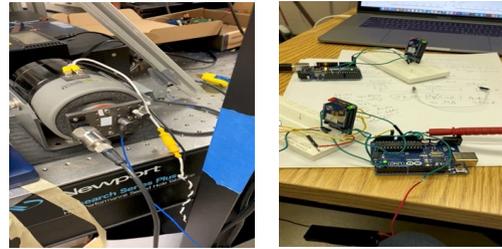


그림 2. 에너지 하베스터 구조^[3]
Fig. 2. Structure of energy harvester^[3]

트위크를 구성하기 위한 무선 통신 프로토콜로 지그비를 사용하여 센싱 데이터를 송수신한다. 지그비 통신 프로토콜^[6]은 블루투스 (bluetooth)나 무선랜 (WLAN; wireless local area network)에 비하여 전력 소비가 낮고 비용이 저렴하여 무선 센서 네트워크 구축에 적합하다. 실제로 지그비는 평균 전력 소모가 60mW 정도이며, PEH가 약 3mW 전력을 공급한다고 하면, 별도의 외부 전원이 없는 상황에서도 대략 20초마다 1초 동안 신호를 송신할 수 있다. 이때 진동센서의 전력 소모는 매우 작아 필요한 전력은 모두 지그비 신호 송신에만 사용된다고 가정하였다. 또한 풍력 터빈의 고장 진단을 위하여 측정하여야 하는 진동 관련 데이터는 동적 변동이 단시간에 일어나기 때문에 많은 데이터 샘플을 취득하여야 한다. 이러한 모니터링 목적을 달성하기 위하여 필요한 데이터 샘플링 레이트 (data sampling rate)를 1kHz로 설정하면, 지그비 프로토콜의 최대 데이터 처리율 (throughput)이 250kbps 이므로 1개의 데이터 샘플당 최대 250비트를 송신할 수 있다. 이는 본 논문에서 진동센서를 통하여 센싱된 데이터 샘플의 비트 수 보다 충분히 크기 때문에, 지그비 통신 프로토콜을 사용하는 것은 전력 소비, 데이터 샘플링 레이트, 비용 등을 고려할 때 합리적인 선택이라고 할 수 있다.

III. 실험 결과

센서 노드에서 에너지 하베스터를 이용한 무선전송 기법의 유효성을 검증하기 위하여 풍력 터빈 날개 내부에 설치된 진동센서를 기반으로 지그비 방식의 무선 센서 네트워크 환경을 모델링하여 다음과 같은 실험을 진행하였다. 구체적으로 그림 3(a)와 같이 정현파 (sine wave) 형태의 기계적 진동을 만들어내는 셰



(a) Sensor on shaker (b) ZigBee transmitter/receiver

그림 3. 무선 센서 네트워크를 위한 실험 환경
Fig. 3. Experiment environment for wireless sensor network

이커 (shaker) 위에 진동센서를 올려놓고, 센서에서 연속적으로 센싱되는 데이터를 그림 3(b)와 같이 지그비 송신단을 통하여 전송하고, 이렇게 전송된 데이터가 날개 내부의 진동 환경에서 일정 거리 떨어져 위치해 있는 지그비 수신단에서 정상적으로 수신이 가능한지 살펴보고자 한다. 이때 실험에 사용한 지그비 모듈의 평균 전력 소모는 약 60mW이고 실제 에너지 하베스터에서 공급받는 전력은 약 3mW이기 때문에, 평균적으로 20초 동안 전력을 수확하면 1초 동안 지그비 신호를 송신할 수 있다. 즉, 센싱된 데이터를 모두 전송한다면, 데이터는 메모리에 최대 20초까지 저장된 후 순차적으로 송신단에서 전송될 수 있다. 참고로 풍력 터빈 날개의 고장은 날개의 구조적 손상에 의해 발생하여 발전 효율을 저하시킬 수 있으며, 영구적인 경우가 많기 때문에 센싱 데이터의 송신 주기는 시간 단위로 충분히 길어도 큰 문제가 되지 않는다. 실제로 풍력 터빈 날개의 고장 진단을 위하여 일 년에 1-2회 정도 풍력 발전을 멈추고 날개 위에서 사람이 직접 테스트를 진행하고 있는 실정이다. 이러한 상황에서 본 시스템이 현장에 적용된다면 하루에 대략 10회 정도 센싱 데이터를 수신하여 상태를 모니터링하는 것을 목표로 하고 있다. 또한 지그비 데이터의 송수신 제어를 위하여 아두이노 보드 (Arduino board)를 사용하였으며, 지그비 모듈은 에너지 하베스터에 의하여 충분한 전력을 공급받고 있으며, 아두이노 보드와 진동센서에서 소모되는 전력은 매우 작아 필요한 전력은 모두 지그비 모듈에만 사용된다고 가정한다. 실제로 시스템에 아두이노 프로 미니 보드를 사용할 경우, 전원유지 및 간단한 프로세싱 처리의 제한된 환경에서 전력 소비를 0.115mW까지 낮출 수 있으며, 실험에 사용한 진동센서의 소모 전력은 0.3mW에 불과하다. 이는 지그비 모듈의 평균 전력 소모인 60mW에 비하면 매우 작

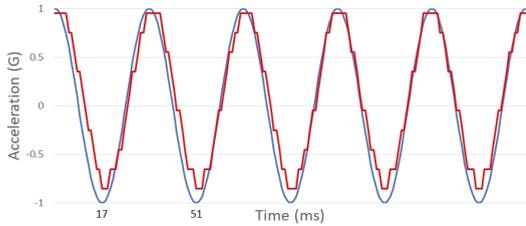


그림 4. 지그비 송신 신호 및 수신 신호 값
Fig. 4. Zigbee transmitted data and received data

은 수준이다. 마지막으로 실제 풍력 터빈 날개의 다양한 설치 환경을 고려하여 송신단과 수신단의 거리는 30m와 90m로 설정하여 실험을 진행하였다.

그림 4는 송신단과 수신단 사이의 거리가 90m 떨어져 있을 때, 시간에 따라 진동센서에서 센싱된 송신 신호 (청색)와 수신단에서의 수신 신호 (적색)를 가속도 (acceleration, g)로 표시한 결과 그래프를 보여준다. 여기서 가속도는 출력 전압값 (mV)을 민감도 (sensitivity, mV/g)로 나누어 준 값이다. 즉, 진동센서는 물리량인 가속도를 전기량인 전압으로 변환해주며, 본 실험에서 사용된 센서의 민감도는 50mV/g이다. 실험 결과에서 송신 신호와 수신 신호 사이의 유사성을 살펴보기 위하여 각 데이터 샘플에 대한 수신 신호 값과 송신 신호 값의 차이를 제공하여 평균을 계산하였고, 그 값은 약 0.03이다. 이 값은 각 데이터 샘플에 대한 송신 신호 값과 한 샘플 지연 (delay)된 송신 신호 값의 차이를 제공하여 평균을 계산한 값인 약 0.02와 매우 유사함을 확인할 수 있다. 참고로 각 데이터 샘플에 대한 송신 신호 값과 두 샘플 혹은 세 샘플 지연된 송신 신호 값의 차이를 제공하여 평균을 계산한 값은 각각 약 0.07과 0.15이다. 이러한 분석 결과를 종합하면 본 실험 결과 송신 신호와 수신 신호의 유사성이 한 샘플 정도 지연된 신호들의 유사성에 비견될 수 있다고 해석할 수 있다. 결국 실제 잡음 (noise) 환경에서 지그비 송신 신호가 수신단에서 정상적으로 수신되었음을 확인할 수 있다. 그러므로 풍력 터빈 날개에 장착된 에너지 하베스터에서 얻어낸 전력을 이용하여 진동센서에서 수집된 데이터를 지그비 통신 프로토콜로 무선 전송하는 기법은 풍력 터빈 날개의 제한적 환경에서 안정적이며 신뢰도 높은 전송 기법이라고 할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문은 풍력 터빈 날개에 장착된 에너지 하베스터에서 생산된 전력을 에너지원으로 하여 별도의 외부 전원 공급없이 센서에서 수집된 데이터를 지그비 통신 프로토콜을 이용하여 무선으로 전송하는 기법을 제안하고, 간단한 실험 환경을 모델링하여 제안된 기법의 유효성을 검증하였다. 결국 본 논문에서 제안된 기법은 풍력 터빈 날개의 실시간 고장 진단을 위한 모니터링 과정에서 배터리 교체없이 지속적으로 센싱 데이터를 무선전송할 수 있다는 점에서 사물인터넷을 기반으로 운용되는 풍력 발전 시스템에서 유지보수의 경제성으로 인하여 향후 광범위한 활용이 기대된다.

References

- [1] G. K. Ottman, H. F. Hofmann, A. C. Bhatt and G. A. Lesieutre, "Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 5, pp. 669-676, Sep. 2002.
- [2] I. M. Darmayuda, Y. Gao, M. T. Tan, S.-J. Cheng, Y. Zheng, M. Je, and C.-H. Heng, "A self-powered power conditioning IC for piezoelectric energy harvesting from short-duration vibrations," *IEEE Trans. Cir. and Syst. II: Express Briefs*, vol. 59, no. 9, pp. 578-582, Sep. 2012.
- [3] H. J. Jung, S. Nezami and S. Lee, "Power supply switch circuit for intermittent energy harvesting," *Electron.*, 2019, 8, 1446; <https://doi.org/10.3390/electronics8121446>, Dec. 2019.
- [4] J. Kim, Y.-S. Song, Y.-K. Kim, and S. W. Choi, "The requirements of internet of thing platform for railway environments," *J. KICS*, vol. 41, no. 7, pp. 833-842, Jul. 2016.
- [5] S. Nezami, H. J. Jung, and S. Lee, "Design of a disk-swing driven piezoelectric energy harvester for slow rotary system application," *Smart Materials and Structures*, vol. 28, no. 7, May 2019.
- [6] F. Zafari, A. Gkelias, and K. K. Leung, "A survey of indoor localization systems and technologies," *IEEE Commun. Surv. and Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2568-2599, Jan. 2019.