

고효율 소형 풍력 발전소 구현을 위한 최적화 운영 체계 연구

김영부¹, 박준모^{2*}

¹동명대학교 컴퓨터공학과

²연세대학교 디지털헬스케어학부

Research on Optimized Operating Systems for Implementing High-Efficiency Small Wind Power Plants

Young-Bu Kim¹, Jun-Mo Park^{2*}

¹Dept. of Computer Engineering, Tongmyong University

²Dept. of Digital Healthcare, Yonsei University

요약 최근 들어 풍력 발전은 신재생 에너지 중에서 높은 효율을 가진 에너지원으로 주목받고 있으며, 이에 따라 전 세계적으로 다양한 기술 개발이 진행되고 있다. 일반적으로 풍력 발전은 풍력 자원이 풍부한 지역에 많은 풍력터빈을 설치하여 운영하는 대형 풍력 농장(Big Wind Farm) 형태로 운영되고 있으나 개발 도상국이나 전력망에서 고립된 지역에서는 오프-그리드(Off-Grid) 형태의 소형 풍력 발전 시스템이 효율적인 솔루션으로 부상하고 있다. 오프-그리드(Off-Grid) 형태의 소규모 발전 시스템을 효율적으로 운영하고 확산시키기 위해서는 실시간 모니터링 시스템의 개발이 요구된다. 소규모 풍력 발전 시스템 구성을 위해 과도한 풍속으로 인한 손상 방지 체계 및 다양한 환경적 요소에 능동적으로 대처하기 위한 실시간 발전소 운영 모니터링 체계 그리고 생산된 전력을 안정적으로 소규모 지역이나 시설에 공급하기 위한 ESS(Energy Storage System) 시스템에 대해 연구하였다. 구현된 시스템은 터빈의 RPM, 발전량, 브레이크 동작, 발전량 등을 모니터링하여 최적 운영환경이 조성되도록 하였다. 구현된 소형 풍력발전 체계는 격오지 도로 조명, 해양 레저 시설, 모바일 통신 기지국 등에 활용될 수 있으며 RE100 산업 생태계 발전에 기여할 수 있을 것이다.

• **주제어** : 소형 풍력 발전, 풍력 터빈 제어, 오프-그리드, ESS(Energy Storage System), RE100

Abstract Recently, wind power has been gaining attention as a highly efficient renewable energy source, leading to various technological developments worldwide. Typically, wind power is operated in the form of large wind farms with many wind turbines installed in areas rich in wind resources. However, in developing countries or regions isolated from the power grid, off-grid small wind power systems are emerging as an efficient solution. To efficiently operate and expand off-grid small-scale power systems, the development of real-time monitoring systems is required. For the efficient operation of small wind power systems, it is essential to develop real-time monitoring systems that can actively respond to excessive wind speeds and various environmental factors, as well as ensure the stable supply of produced power to small areas or facilities through an Energy Storage System (ESS). The implemented system monitors turbine RPM, power generation, brake operation, and more to create an optimal operating environment. The developed small wind power system can be utilized in remote road lighting, marine leisure facilities, mobile communication base stations, and other applications, contributing to the development of the RE100 industry ecosystem.

• **Key Words** : Small Wind Power Plant, Turbine control, Off-Grid, ESS(Energy Storage System), RE100

Received 20 June 2024, Accepted 27 June 2024

* **Corresponding Author** Jun-Mo Park, Dept. of Digital Healthcare, Yonsei University, Wonju, Gangwon-do, Korea.
E-mail: jmp0521@yonsei.ac.kr

I. 서론

풍력 발전은 신재생 에너지 중 높은 효율을 가진 에너지원으로 평가되면서 최근 들어 더욱 주목받고 있다.

이에 따라 전 세계적으로 다양한 형태의 기술 개발이 이루어지고 있으며 더불어 많은 연구개발 자원이 투입되고 있다[1]. 특히 풍력 에너지는 서유럽을 중심으로 오랜 기간 연구되어 왔으며 최근 수 MW급 상용시스템으로 발전하고 있다[2-3].

중래의 풍력 발전은 풍력 자원이 풍부한 지역에 많은 풍력터빈을 집중적으로 설치하여 운영하는 풍력 농장(Big Wind Farm) 형태로 운영되고 있으며 생산된 전력은 온-그리드(On-Grid) 형태로 지역 전력망에 연결되어 있다[4].

풍력터빈과 일정 수준의 풍력자원이 존재하면 풍력 발전 망 구성이 가능하여 전력망 구축이 어려운 격오지 등에서 사용할 수 있는 오프-그리드(Off-Grid) 형태의 소형 풍력 발전 시스템이 소규모 전력 공급 문제를 해결하기 위한 효율적인 솔루션으로 부상하고 있다[5].

특히 2014년도부터 사용전력을 100% 재생에너지로 조달하는 민간 차원의 자발적 캠페인인 RE100이 시작되었고, 2022년 5월 기준 전세계 371개 기업이 RE100에 가입하는 등 풍력에너지로 대표되는 친환경 에너지 산업에 대한 관심은 전세계 산업 전반에 걸쳐 큰 여 영향을 끼치고 있다[6-7].

국내에서는 제주를 중심으로 여러 지역에 중대형 풍력 발전 시스템을 설치 운영하고 있으며 RE100 규제의 강화로 더욱 많은 연구 개발이 이루어지고 있다[8-9].

풍력 발전 시스템은 대형과 소형으로 구분하고 있으며 에너지관리공단의 공시 기준에 따라 30kW 이하는 소형으로 분류하고 100Kw급을 기준으로 중형과 대형으로 분류하고 있다[10].

소형 풍력 발전 시스템을 구성하는 데 유의해야 할 사항으로는 발전소의 설계 및 구축 과정에 제어 및 모니터링 요소를 매우 중요하게 다루어야 한다. 특히, 브레이크 제어는 안전과 관련된 중요한 요소로서, 시스템의 안정성과 신뢰성을 보장하는 데 필수적이다.

풍력발전 시스템의 제어는 주로 피치(pitch) 제어와 요(yaw) 제어로 구성되며, 이는 날개의 각도를 조절하여 바람의 강도와 방향에 따라 최적의 발전 효율을 유지하게 한다. 또한, 모니터링 시스템은 풍력터빈의 상태를 실시간으로 감시하고, 이상 상황 발생 시 신속하

게 대처할 수 있도록 하여야 한다[11].

소형 풍력 발전 시스템의 정보교환 체계는 IEC61400-25 표준을 준수하는 것이 일반적이는데 이 표준은 원격제어 및 모니터링을 위한 별도의 데이터 전송 체계를 설계에 반영하기 위한 것으로 원격제어 기능을 구현하기 위해서는 풍력 발전의 정보를 실시간으로 획득과 제어 기능, 데이터 조회 기능, 데이터로그, 리포팅 기능의 설계 및 구현에 적용한다[12].

200W급 풍력 발전 시스템은 30kW급 이하의 소규모 풍력 발전시스템으로 주요 전력 공급망에 포함되지 않는 오프-그리드(Off-Grid) 발전 시스템으로 운영 가능한 수준으로 ESS와 결합하여 가로등, 페데스탈과 같은 독립된 소규모 전력 수요를 충족할 수 있다. 이러한 소형 풍력 발전 시스템은 격오지에 설치되는 경우가 많아 풍속 변화, 환경 변화 등에 적절히 대응하지 못하면 발전 성능의 일관성이 보장되지 않아 전력을 사용하는 전체 시스템의 안정성을 떨어뜨릴 수 있다. 그 때문에 가동 중 지속적인 발전 성능의 모니터링 기술이 매우 중요한 요소로 인식되고 있다[1].

본 연구에서는 다수의 센서와 발전 제어 알고리즘을 활용하여 풍력 발전 시스템 운영상 가장 큰 위험 요소 중 하나인 과속으로 인한 기계적 손상을 방지하기 위한 원격 모니터링 체계를 구성하여 풍력 발전 운영체제 전반의 안전을 확보하고자 한다. 이를 기반으로 하여 풍력 발전기의 성능을 최적화하고, 유지보수 비용을 절감하며, 전력 생산의 일관성을 유지할 수 있는 고효율 시스템의 기술적 토대를 구축하고자 한다.

II. 연구 방법

2.1 소형 풍력 발전 모니터링 시스템

소형 풍력 발전 시스템은 실시간으로 데이터를 획득하고 이를 서버 또는 클라우드에 전송하는 Smart Meter Controller(SMC)를 운영하여야 한다. 그림 1에서는 SMC의 역할을 설명하고 있다. SMC는 발전 효율, 출력, 배터리 상태, 바람 속도 등의 데이터를 수신하고 데이터 서버 또는 클라우드에 전송한다. 그림 1에서는 Wi-Fi 통신망을 이용해 풍력 터빈으로부터 데이터를 획득하고 이 데이터를 클라우드망으로 전송하는 구조를 설명하고 있다.

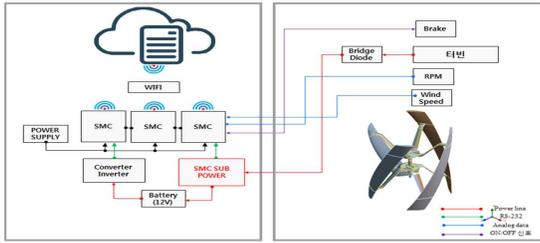


Fig. 1. Smart Meter Controller Operation Diagram

2.2 풍력터빈의 정속제어(브레이크)

강한 풍력 자원은 풍력 발전소의 효율을 높이는 중요한 요소 이긴 하지만 태풍과 같은 설계 사양을 초과하는 강한 풍력 에너지는 터빈의 과부하를 유발하여 풍력발전소의 전반적인 안전에 심각한 위협이 될 수 있다. 특히 소형 풍력 발전소는 독립적으로 운영되는 경우가 많아 터빈의 과부하로 인한 풍력발전소 손상은 특정 시설 또는 지역 전체의 에너지 공급 중단이라는 상황을 초래할 수 있다.

풍력 터빈의 과부하를 막기 위해서는 풍속을 실시간으로 감시하고 설계 사양 이상의 강한 풍속이 되면 3상 출력 단자를 단락시켜 블레이드의 회전을 강제로 멈추게 하거나 발전기 고정축에 솔레노이드를 장착하고 회전축 로터에 금속 브레이크 패드를 설치한 뒤, 솔레노이드에 전원을 공급하여 자력에 의한 인장 마찰로 블레이드를 정지시키는 전자식 브레이크를 사용한다. 대부분의 풍력 터빈에서는 전자식 브레이크만 사용하지 않고, 3상 단락 브레이크와 병행하여 사용하는 것이 일반적이다. 그림 2에서 구현된 전자식 브레이크와 3상 단락 브레이크가 동작하는 절차를 설명하고 있다.

풍력 터빈에 장착된 브레이크는 발전기의 고장 및 수리를 목적으로 사용자에게 의해 강제적으로 동작시킬 수 있으며 풍속과 터빈 회전 속도가 설정치를 초과하게 되면 그림 2와 같이 절차에 따라 브레이크가 작동하도록 구현되어야 한다.

Table 1. Magnetic brake specifications

마찰토크(kg/m)		전압 (DC)	소비전력 (W)	최대회전수 (rpm)
동마찰 (Td)	정마찰 (Ts)			
2.0	2.2	12	20	2000

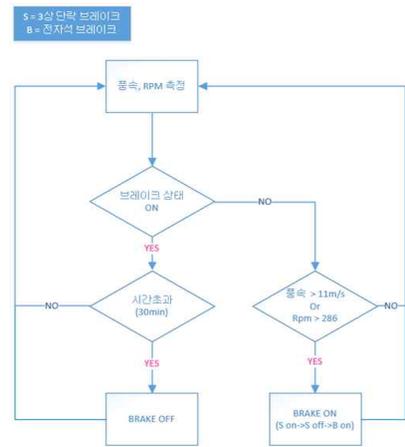


Fig. 2. Wind turbine brake operation sequence

2.3 ESS(Energy Storage System)

소형 풍력발전소가 오프그리드 방식으로 운영되기 위해서는 생산된 전력을 보관하기 위한 비교적 대용량의 ESS(Energy Storage System)를 설치 운영하여야 한다. 그러나 ESS를 구성하는 배터리들은 과충전, 과방전, 내부 단락, 외부 충격, 부적절한 설치, 관리, 운영상의 실수로 인한 화재 사고나 치명적인 폭발 사고가 발생할 위험성을 가지고 있다.

그 때문에 소형 풍력 발전에 사용되는 ESS는 온도, 습도, 진동 등 다양한 환경적 요인과 과충전 등 전기적 요인에 대한 실시간 모니터링이 매우 중요한 요소이다.

본 연구에서는 배터리 자체의 전기적 요인에 의한 사고를 예방하기 위하여 이때 배터리 잔량이 100%(12.6%) 이상일 경우 배터리 충전을 중단하여 배터리를 보호하도록 구현하였으며, 배터리 잔량이 20%(11.4V) 이하인 경우는 배터리 충전을 유지되나 부하 측 전원공급은 차단 되도록 전용 전력제어용 보드(SSP)를 그림 3과 같이 직접 설계 구현한다.

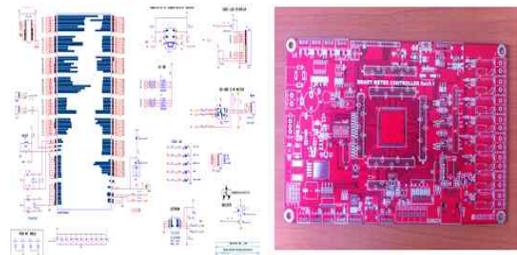


Fig. 3. Power control circuit and PCB

2.4 IEC 61400-25 표준 통신 프로토콜

IEC 61400-25 표준은 풍력 발전 시스템의 관리와 제어 위한 국제 표준으로, 풍력 발전소에 설치된 여러 장치 상호간의 운용성을 보장하고자 개발 적용되고 있다. 그림 4에서 설명하고 있는 IEC 61400-25 표준에는 풍력 터빈, 제어 시스템, 모니터링 시스템 등 풍력 발전소를 구성하는 여러 장치 간의 데이터 교환을 효율적으로 관리하기 위한 통신 프로토콜이 크게 3개의 영역으로 구분되어 정의되어 있다.

- ㉓ ICE 61400-25-2 : Wind power plant information models
- ㉔ ICE 61400-25-3 : Information exchange model
- ㉕ ICE 61400-25-4 : Mapping to communication profile

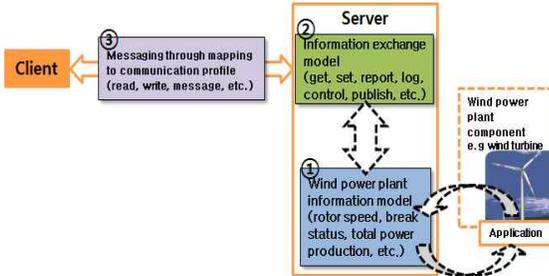


Fig. 4. IEC-61400-25 communication concept diagram

III. 연구 결과

3.1 실시간 제어 모니터링 시스템 구현

소형 풍력 발전 최적 제어를 위해 풍력 터빈에는 그림 5와 같이 풍속계, RPM 측정장치와 같은 센서류와 브레이크 제어와 생산된 전력을 보관하기 위해 발전기, ESS 시스템 제어가 가능한 통합 제어 시스템을 구성하였다.

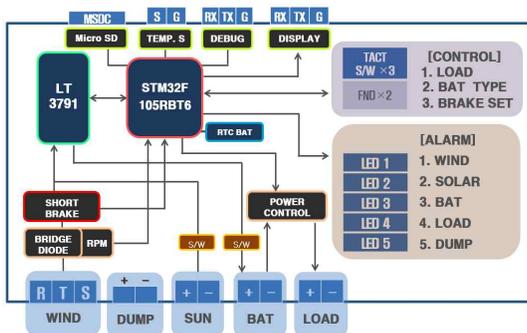


Fig. 5. Small wind power system control unit diagram

각 센서의 측정값은 그림 6과 같이 Wi-Fi 망을 통해 서버에 전송되도록 구현하였다. 센서 측정값에 대한 모니터링은 실시간으로 이루어질 수 있다.

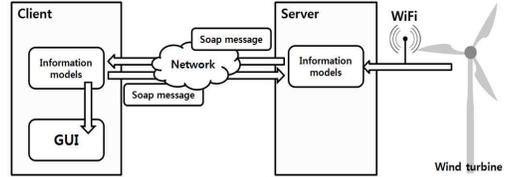


Fig. 6. Monitoring, & control data flow diagram

표 2에서는 모니터링 데이터의 구분과 모니터링 데이터로부터 추론할 수 있는 실시간 운영 상황요소에 대한 설명하고 있다.

Table 2. Monitoring, & control data specifications

구분	모니터링 데이터
풍속 모니터링	<ul style="list-style-type: none"> - 실시간 풍속 모니터링은 현재시간을 기준으로 과거 10분간의 평균 풍속을 모니터링 - 실시간 풍속 모니터링은 현재시간을 기준으로 과거 10분간의 최대/최소 풍속을 모니터링 - 실시간 풍속 모니터링의 데이터는 해당 풍력터빈의 번호, 측정시간, 평균 풍속(m/s), 최대 풍속(m/s), 최소 풍속(m/s), 이벤트 발생여부 등
RPM 모니터링	<ul style="list-style-type: none"> - 터빈의 RPM을 실시간으로 모니터링 - 실시간 RPM 모니터링의 데이터는 해당 풍력터빈의 번호, 측정시간, RPM, 이벤트 발생 여부
발전량 모니터링	<ul style="list-style-type: none"> - 터빈의 발전량을 실시간으로 모니터링 - 실시간 발전량 모니터링의 데이터는 해당 풍력터빈의 번호, 측정시간, 발전량 등
브레이크 상태 모니터링	<ul style="list-style-type: none"> - 터빈의 브레이크 상태를 실시간으로 모니터링 - 실시간 브레이크 모니터링의 데이터는 해당 풍력터빈의 번호, 측정시간, 브레이크 상태(ON/OFF), 브레이크 작동원인 등

3.2 풍력 발전 실시간 모니터링 환경 구축

실시간 모니터링을 통해 풍력 발전의 운전 상황을 파악할 수 있도록 전용 UI를 구성하였고 그림 7에서 실행 화면을 보여 주고 있다. 사용자의 효율적인 관리를 위해 개별 풍력 터빈은 그림 3에서 처럼 실제 지도에서 입력한 좌표를 통해 이미지를 캡처하고 이를 사용하여 풍력 발전 단지를 표현하였으며, 지도상에 풍력터빈의 위치 및 종류를 표시하고 상태를 색으로 표현하였다.

지도 내의 풍력 발전 단지에 있는 각각의 풍력터빈들의 상태를 모니터링 할 수 있는 화면을 제공하였으며, 측정된 풍력터빈의 풍속, RPM, 브레이크 상태, 전력 생산량을 실시간으로 표현하였다.



Fig. 7. Wind power plant real-time monitoring environment

개발된 구현된 소형 풍력 터빈은 그림 8에서 보이는 것과 같이 박계류시설에서 운영되는 급전급수 장치인 페테스텔에 장착하여 그 성능을 시험 하였다,



Fig. 8. Example of power supply/water supply device installation

3.3 풍력터빈 정속제어(브레이크) 알고리즘 구현

정속주행 제어를 설정하면 강풍 상황에서도 Dump 브레이크 제어를 통해 정격 RPM을 유지하고, 정속주행 제어 중에서도 286RPM 이상이 되면 Auto 브레이크가 동작하도록 구현하였고 그림 9에서 보이는 것과 같이 풍동 실험을 통해 성능을 검증하였다.



Fig. 9. Brake operation Test in wind tunnel

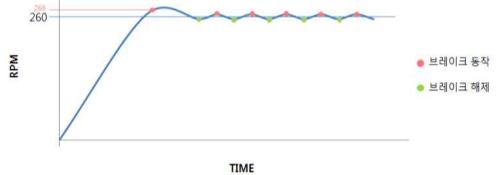


Fig. 10. Wind tunnel experiment results

풍동 실험에서 브레이크 제어는 정지 RPM 이상에서 자동으로 동작하는 Auto Mode와 사용자의 버튼 조작에 의해 수동으로 동작하는 Manual Mode로 나뉘어 구현하였으며 그림 10의 결과로부터 Auto Mode에서 정격 260RPM의 10% 이상인 286RPM 이상에서 브레이크가 30분간 동작하였고 브레이크 동작 순서는 [Dump 저항 브레이크 ON → Dump 저항 브레이크 OFF → 전자석 브레이크 ON] 순으로 동작하는 것을 확인 할 수 있었다.

V. 결론

본 연구에서는 에너지 공급을 확보하고 기후 변화에 대응하기 위한 온실가스(GHG) 배출량 감소, 생물 다양성 보호와 관련한 전 세계적인 과제 중 하나인 신재생 에너지 공급망에 대한 연구를 수행하였다.

연구 성과로부터 신재생 에너지 기반의 전력 공급 수요를 충족시키기 위한 해결책으로 최적화된 제어 기능을 기반으로 구축된 소형 풍력 발전을 제안하고자 한다.

현재 풍력 발전은 온-그리드(On-grid) 형태로 전기를 생산하는 것에 집중되어 있지만 배터리 기술의 발전과 함께 전기가 부족한 원격 지역이나 개발 도상국에서 활용가능한 오프-그리드(Off-Grid) 형태의 소형 풍력 발전의 보급이 더욱 확대될 것이다.

개발된 소형 풍력발전 체계를 적용한 소규모 도시의 도로 조명, 모바일 통신 기지국, 양식업 및 해수 담수화 등 다양한 산업 분야 적용 연구를 통해 RE100으로 대표되는 신재생 에너지 규제에 대응하는 기초연구를 이어가고자 한다.

REFERENCES

- [1] J. G. Choi, H. S. Choi, "Prediction of Wind Power Generation for Calculation of ESS Capacity using Multi-Layer Perceptron", The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences v.16 no.2 ,pp. 319 - 328 , 2021
- [2] Greenpeace, Global Wind Energy Outlook 2014, The Global Wind Energy Council, Rue d' Arlon 80,1040 Brussels, Belgium (2014)
- [3] Y. S. Lee and J. Y. Kim, "Generation Efficiency Characteristics of Small Wind Power for Green Energy Utilization", The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry Vol. 26, No. 4, pp. 489-494, 2015
- [4] S. Zang, J.H. Choi, Q.T. Sun, J. S. Choi "The AC Power System Development For the Big Wind Farm", Proceedings of the KIEE summer annual conference, pp. 16-18, 2008
- [5] J. W. Yang, On-site Test of Small Power Generator for Roof-top of Building, MS. Thesis, Korea Maritime Univ., Busan, Korea. 2008.
- [6] RE100, "RE100 members," <https://www.there100.org/re100-members>, 2022.
- [7] RE100, "RE100 annual disclosure report 2021(Stepping up: RE100 gathers speed in challenging markets)," RE100 Climate Group & CDP, 2022
- [8] Y. H. Kim, Power Factor Control of Wound Rotor Induction Generator for Wind Power Generation, Cheju, MS. Thesis, Jeju National Univ., Jeju, Korea 2000.
- [9] J. S. Jo, Estimation of Annual Energy Production for the Small Wind Turbine Generator System, MS. Thesis, Kangwon Univ., Chuncheon, Korea. 2006
- [10] O. H. Kwon, A Study on Energy Efficiency Improvement of Small Wind Power Genration using Wound Rotor Type, MS. Thesis, Chung-Buk National University, Cheongju, Korea, 2012
- [11] J. Y. Han, S. H. Lee, "Implementation of Aerogenerator Remote Individual Monitoring and Braking System", Journal of Korean institute of information technology, v.11 no.4, pp.27-33, 2013
- [12] C. H. Chae, H. Y. Choi, J. S. Choi, "A Database Design Method for Wind Power Plant SCADA System based on IEC61400-25", KIPS transactions on computer and communication systems, v.1 no.3 ,pp. 151-160, 2012

저자소개

김 영 부 (Young-Bu Kim)



1994년 2월 부산외대
독일어과(어학사)
2001년 부산대
행정대학원(행정학석사)
2012년 2월 한국해양대
행정학과(행정학박사)
2019년 10월~2024년 2월 :
부산테크노파크 정책기획단장
2012년 9월~현재 : 동명대학교
컴퓨터공학과 교수
관심분야 : ESS, 신재생에너지

박 준 모 (Jun-Mo Park)



1993년 2월 : 인제대학교
의용공학과(공학사)
1996년 2월 : 인제대학교
의용공학과(공학석사)
2008년 8월 : 부산대학교
의공학협동과정(공학박사)
2022년 3월~현재 : 연세대학교
디지털헬스케어학부 부교수
관심분야 : 신호처리,
뇌 신경계 신호 분석