

풍력 터빈발전기의 화재예방을 위한 HILS 구현에 관한 연구

이명근^{***}, 왕종용^{***}, 현소영^{**}, 최형석^{*}, 노대석^{*}
^{*}한국기술교육대학교, ^{**}한국전기산업연구원,
e-mail:liferoot@erik.re.kr

A Study on the Implementation of HILS for Fire Prevention in Wind Turbine Generators

Myung-Geun Lee^{***}, Jong-Yong Wang^{***}, So-Yung Hyun^{**},
Hyoung-Seok Choi^{*}, Dae-Seok Rho^{*}

^{*}Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education
^{**}Electrical Industry Research Institute of Korea

요약

최근, 에너지 위기와 환경문제가 전 세계적인 문제로 대두되고 있는데, 유엔 기후변화협약에 따라 탄소배출의 규제가 강화되고 있는 실정이다. 이에 따라, 풍력 터빈발전기는 신재생에너지원 중 하나로 설치용량이 증가하고 있지만, 대형화 및 고 출력화에 의하여 다양한 기계적·전기적 요소에서의 고장과 화재 위험으로 막대한 경제적 손실과 환경적 피해를 초래할 가능성이 있다. 따라서, 풍력 터빈발전기의 안전한 운영과 화재 예방을 위하여, 각 구성 요소별 화재 원인을 분석하고, 이를 체계적으로 관리할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요한 실정이다. 본 논문에서는 풍력 터빈발전기의 구성요소별 화재 위험을 분석하고, 이를 예방하기 위한 제어장치부, safety 장치부, 소화시스템 장치부 등으로 구성된 HILS 시스템을 구현한다. 이를 바탕으로 시험을 수행한 결과, 정상 상태와 비상정지 상황에서 안전 장치가 적절하게 동작함을 알 수 있다. 특히, 비상정지 시 발전기 속도와 블레이드 각도가 안전하게 제어되고, 소화 시스템이 정상적으로 동작하여, 소화시스템과 연계된 safety 시스템이 화재 위험에 적절하게 대응하여, 본 논문의 유용성을 알 수 있었다.

1. 서론

최근, 정부는 2050 탄소중립 선언과 함께 탄소중립정책을 실행하고 있으며, 그 일환으로 재생에너지 3020 이행계획에 따라 신재생에너지에 의한 전력 공급계획을 적극적으로 추진하고 있다. 이에 따라, 탄소중립을 실현하기 위한 중요한 요소 중 하나인 풍력 터빈발전기의 용량이 전 세계적으로 증가하고 있는 실정이다. 하지만, 이러한 풍력 터빈발전기의 운영 과정에서 고장 및 화재와 같은 사고가 발생할 수 있으며, 이는 막대한 경제적 손실과 환경적 피해를 유발할 수 있다.

특히 풍력 터빈발전기는 대형화 및 고 출력화 되면서 각종 기계적·전기적 요소에서 발생하는 화재 위험이 증가하고 있다. 이러한 화재 위험을 예방하고 시스템의 안정적인 운영을 보장하기 위해서는 풍력 터빈발전기의 구성 요소별 화재 원인을 분석하고, 이를 체계적으로 관리할 수 있는 방안이 요구된다. 본 연구에서는 풍력 터빈발전기의 주요 구성 요소별 화재 위험을 분석하고, 이를 예방하기 위한 HILS 시스템을 구현하여 그 효용성을 평가하고자 한다.

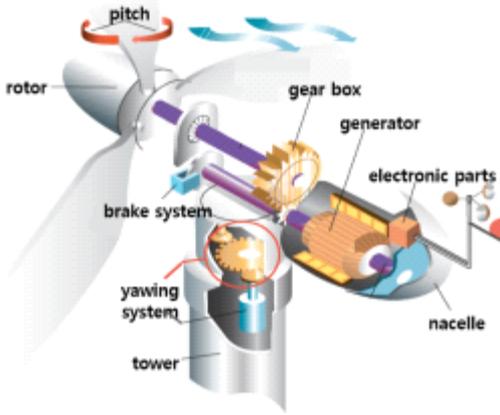
2. 풍력 터빈발전기의 구성요소별 화재 위험 분석

2.1 풍력 터빈발전기의 구성

풍력 터빈발전기는 자연 상태의 무공해 에너지원으로서, 바람의 운동에너지를 사용하여 회전날개(blade)에 부착된 발전기의 회전자(rotor)를 통해, 기계 에너지를 전기 에너지로 변환하여 전력을 생산하는 발전 시스템이다. 먼저, 풍력 터빈 발전기는 일반적으로 그림 1과 같이 회전날개(blade), 기어박스(gear box), 발전기(generator), 요잉 시스템(yawing system), 너셀(nacelle), 브레이크(blake system), 타워(tower), 전기구성품(electronic parts) 등으로 구성된다. 이 그림에서와 같이, 외부에 노출된 회전날개(blade)는 바람의 운동에너지를 기계에너지로 변환해 회전력을 생산하는 장치로서, 전력 생산을 위해 기어박스(gear box), 발전기(generator) 등으로 연결된다.

여기서, 기어박스(gear box)는 회전축을 발전기(generator)의 동기속도로 변환시켜 안정적으로 전력을 생산하는 역할을

하며, 바람의 에너지를 최적으로 전달하기 위해 피치시스템 (pitch system)을 통해 경사각을 조절한다. 또한, 요잉 시스템 (yawing system)은 운용 효율성 향상을 위해 바람의 방향으로 너셀(nacelle)을 회전시켜주는 장치이며, 발전기의 속도를 조절하거나 정지시키는 역할을 하는 브레이크 시스템(brake system) 등으로 구성된다. 한편, 타워는 풍력발전기를 지지하는 구조물이며, 전기구성품은 발전기에서 생산된 전기를 변환하는 변압기 및 컨버터와 컨트롤러 등으로 구성된다.



[그림 1] 풍력 터빈발전기의 구조 및 명칭

2.2 풍력 터빈발전기의 화재 위험 분석

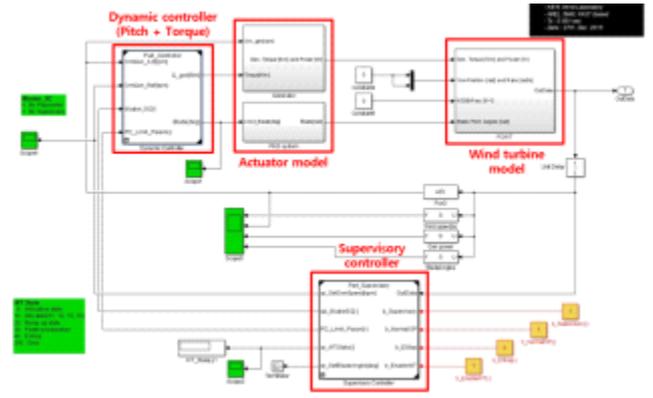
화재 위험 구성요소로는 블레이드 및 피치시스템, 기어박스, 발전기, 전기 구성품이 있으며, 피치 시스템 내의 유압 시스템 고장, 기어의 결함이나 오일 누출로 인한 기계적 마찰로 인한 과열, 발전기의 과부하, 전기적 단락, 감지 실패, 전기구성품의 전기적 결함, 과전류, 절연 파괴 등으로 인하여 화재가 발생할 가능성이 높다. 화재는 주로 전기적 문제, 기계적 마찰, 윤활제의 누출 및 과열 등으로 발생하는데, 전기적 고장으로는 전력 계통 내 단락, 변압기 및 컨버터의 과열 등이 화재의 주요 원인이 된다. 기계적 마찰로는 부품의 마찰로 인해 과열이 발생하고 윤활제의 누출이 동시에 발생할 경우 화재 위험이 커진다. 또한, 유압 모터나 유압 회로의 결함도 화재의 원인이 된다.

3. 풍력 터빈발전기의 화재예방을 위한 HILS 구현

3.1 제어장치부

제어장치부는 그림 2와 같이 동적 제어기(Pitch 및 Torque 제어)를 통해 실시간으로 터빈의 상태를 모니터링하고 제어한다. 이 시스템은 피치 시스템과 토크 제어를 통합하여 바람의 변동에 따라 터빈의 성능을 최적화하며, 합성 관성 제어 방식을 통해 터빈의 안정성을 유지한다. 또한, 감독 제어 방식

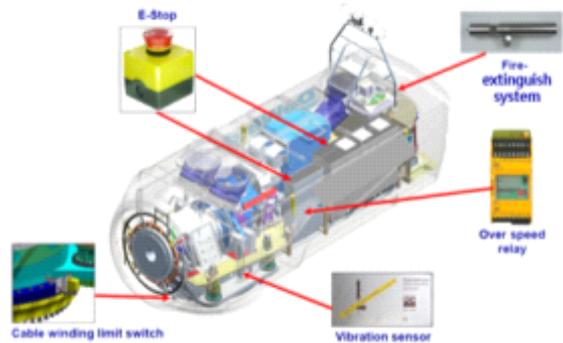
을 통해 전체 시스템을 관리하고, HMI(Human-Machine Interface) 기반으로 운영자가 터빈의 상태를 실시간으로 모니터링하고 제어할 수 있게 한다.



[그림 2] 풍력 터빈발전기의 동적 제어 모델과 제어알고리즘이 탑재된 통합 시뮬레이션 모델

3.2 safety 장치부

풍력 터빈발전기의 안전성을 보장하기 위해, HILS 시스템 내의 Safety 장치부는 다양한 안전 기능을 포함하고 있다. 이 장치부는 그림 3과 같이 전기 토크, 로터 및 발전기 속도와 같은 주요 운영 매개변수를 실시간으로 감지하고 모니터링한다. 또한, 센서 신호(속도, 온도, 압력 등)를 수집하여 터빈의 상태를 분석하며, 필요한 경우 안전 기능을 즉시 활성화한다. Safety 장치부는 비상 상황 시 시스템의 정상적인 작동을 유지하고, 알람 시스템을 통해 운영자에게 즉각적인 경고를 제공하여 화재와 같은 위험을 예방할 수 있다.

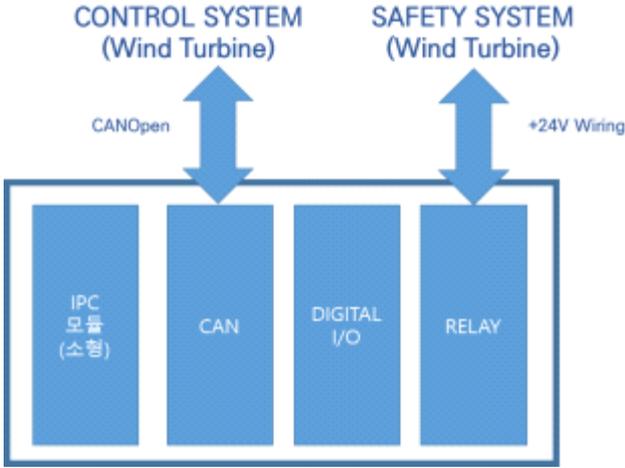


[그림 3] 풍력 터빈발전기의 safety 시스템의 구성

3.3 소화시스템 장치부

HILS 시스템의 중요한 부분 중 하나는 소화 시스템 장치부로, 주요 구성은 그림 4와 같다. 이는 화재 발생 시 즉각적인 대응을 가능하게 한다. 소화 시스템은 실시간 화재 감지 및 경보 시스템을 통해 터빈 내에서 화재가 발생할 가능성을 조기에 탐지한다. 소화 시스템은 각종 센서와 연동하여 터빈 내

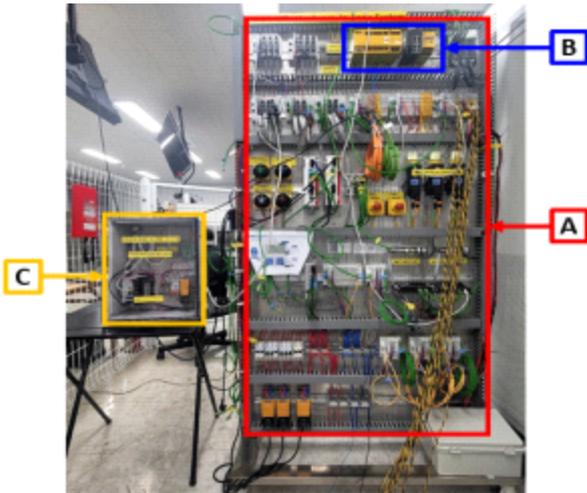
의 온도 상승이나 이상 징후를 감지하고, 화재 발생 시 자동으로 소화 장치를 작동시킨다. 소화 시스템 장치부는 각 부품 간의 긴밀한 연동을 통해 피드백을 받고 실시간으로 작동을 조정하여, 터빈 내에서 발생할 수 있는 화재를 신속하게 진압한다.



[그림 4] 소화시스템 시뮬레이터의 주요 구성

3.4 전체 시스템

풍력 터빈발전기의 화재예방을 위한 HILS 시스템의 전체 구성은 그림 5와 같다. 여기서, a는 제어장치부, b는 safety 장치부, c는 소화시스템 장치부를 나타낸다.



[그림 5] 풍력 터빈발전기용 HILS 구성도

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

HILS를 시험하기 위하여, 표 1과 같이 미국의 국립 신재생 에너지연구소(NREL, National Renewable Energy Laboratory)에서 공공의 연구 목적으로 제공하는 5MW급 Baseline 풍력 터빈발전기의 주요 사양을 활용하였으며, 시험

조건은 표 2와 같다.

[표 1] 풍력 터빈발전기의 주요 사양

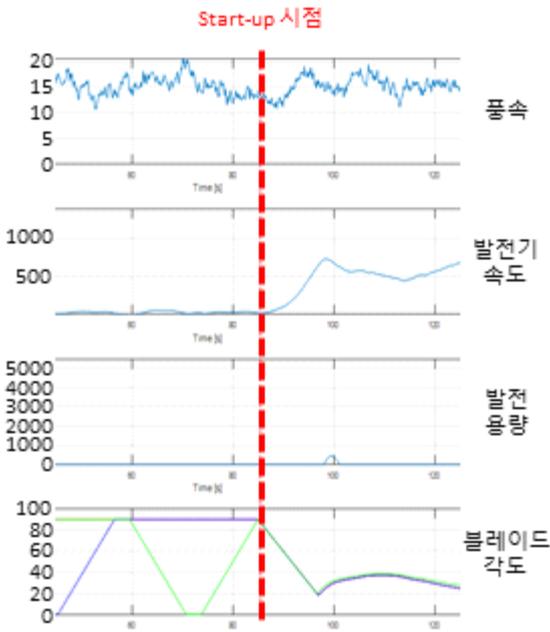
구분	내역
정격 출력~[MW]	5
로터 방향	Upwind
블레이드 수	3
로터 직경[m]	126
허브 높이[m]	90
시동 / 정격 로터 속도[rpm]	6.9 / 12.1
시동 / 정격 / 정지 풍속[m/s]	3 / 11.4 / 25
기어비	97:1
발전기 관성[$kg \cdot m^2$]	534,116
나셀 무게[kg]	240,000
타워 무게[kg]	347,460

[표 2] 시험 조건

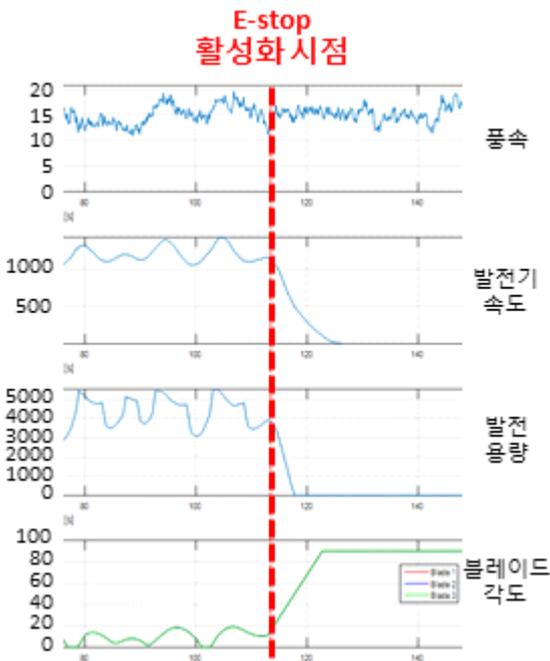
case	내역
case 1	초기상태에서 기동
case 2	정상상태에서 비상정지 작동

4.2 풍력 터빈발전기 화재예방용 HILS 운용 특성

풍력 터빈발전기 HILS의 운용 특성을 파악하기 위해 시험을 실시하였다. 상기에서 제시한 바와 같이, 초기조건에서 시작하는 정상 운전조건과 비상정지 상황이 발생하였을 때 safety 시스템의 동작에 의한 풍력 터빈발전기의 각 부품이 정상적으로 운전되는지 확인한다. 시험 결과, 그림 6~7과 같이 safety 시스템의 설계에 맞게 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다. case 1의 경우 초기상태에서 기동한 경우, 발전기 속도와 파위가 0에서 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 블레이드의 각도는 90도에서 풍속과 위치에 따라 0° ~ 40°로 회전하는 것을 확인할 수 있다. 또한, case 2의 경우 정상상태에서 소화시스템 장치부에 의해 비상정지가 작동되었을 경우, 발전기가 정지되며 블레이드의 각도가 90°로 고정되는 것을 확인할 수 있다.



[그림 6] case 1 결과



[그림 7] case 2 결과

5. 결 론

본 논문에서는 풍력 터빈발전기의 구성 요소별 화재 위험을 분석하고 이를 예방하기 위한 HILS 시스템을 구현 및 평가하였다. 풍력 터빈발전기의 화재 위험 요소로는 블레이드 및 피치 시스템, 기어박스, 발전기, 전기 구성품 등이 있으며, 기계적 마찰, 전기적 결합, 윤활 시스템 고장 등으로 인해 과열이 발생할 수 있다. HILS 시스템을 통해 이러한 화재 위험 상황을 시뮬레이션하고 safety 시스템의 대응을 시험한 결과,

정상 상태와 비상정지 상황에서 안전 장치가 적절하게 작동함을 확인하였다.

특히, 비상정지 시 발전기 속도와 블레이드 각도가 안전하게 제어되고 소화 시스템이 정상적으로 작동하여, 소화시스템이 연계된 safety 시스템이 화재 위험에 대한 적절한 대응이 가능함을 확인하였다. 본 논문을 통해 제안한 HILS 시스템은 풍력 터빈발전기의 안전성을 향상시키는 데 중요한 기여를 할 수 있으며, 추가적인 연구를 통해 다양한 환경 조건에서의 적용 가능성도 평가될 필요가 있다.

참고문헌

- [1] 이명근, 한형주, 유영천, 김운호, 노대석, “해상풍력용 터빈 발전기의 구성요소별 위험성 우선순위 평가에 관한 연구”, 산학기술학회 추계학술대회, 2022
- [2] Risø DTU, “Failure Database and Tools for Wind Turbine Availability and Reliability Analyses: The Application of Reliability Data for Selected Wind Turbines”, National Laboratory for Sustainable Energy, 2000.
- [3] Cuong Dao, Behzad Kazemtabrizi, Christopher Crabtree, “Wind turbine reliability data review and impacts on levelised cost of energy” Wind Energy. 2019, 22:1848 - 1871.
- [4] Roger R. Hill, Valerie A. Peters, Jennifer A. Stinebaugh and Paul S. Veers, “Wind Turbine Reliability Database Update”, Sandia National Laboratories, 2009