

풍력 터빈발전기의 화재 조기 진압 시스템의 운용 알고리즘에 관한 연구

이명근*, 이민행*, 김세진*, 김혜원*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:magibt@naver.com

A Study on the Operation Algorithm of Early Fire Suppression System in Wind Turbine Generators

Myung-Geun Lee*, Min-Haeng Lee*, Se-Jin-Kim*,

Hye-Won Kim*, Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical, Electronic, Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 정부는 재생에너지 3020 이행계획에 따라 신재생에너지 중심의 전력 공급계획을 적극적으로 추진하고 있다. 또한, 탄소 중립을 실현하기 위한 중요한 요소 중 하나인 풍력 터빈발전기의 설치용량이 전 세계적으로 증가하고 있는 실정이다. 하지만, 풍력 터빈발전기의 단위 설비 용량 상승에 따라 화재사고 발생률이 증가하고 있으며, 대부분의 화재 사례는 기존 소화장치로 충분히 진압하지 못한 것으로 나타나고 있다. 따라서, 본 논문에서는 풍력 터빈발전기의 기존 소화 시스템을 분석하고, 조기 감지와 단계적 대응을 바탕으로 새로운 화재 조기 진압 시스템의 운용 알고리즘을 제안한다. 또한, 상기의 운용 알고리즘의 유효성을 확인하기 위하여, 제어장치부, safety 장치부, 소화시스템 장치부 등으로 구성된 풍력 터빈발전기용 HILS 시스템을 구현한다. 이를 바탕으로 시험을 수행한 결과, 화재 발생 상황에서 비상정지, 블레이드 고정, 발전기 차단 및 자동 소화설비 등의 기능이 적절하게 동작하고, 화재 진압 이후, 발전기의 속도 및 출력이 안정적으로 회복함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 화재 조기 진압 시스템의 운용 알고리즘이 기존 방식보다 풍력 터빈발전기의 화재 피해를 최소화할 수 있음을 알 수 있다.

1. 서 론

최근, 정부는 2050 탄소중립 선언과 함께 탄소중립 정책을 실행하고 있으며, 그 일환으로 재생에너지 3020 이행계획에 따라 신재생에너지 중심의 전력 공급계획을 적극적으로 추진하고 있다. 이에 따라, 탄소 중립을 실현하기 위한 중요한 요소 중 하나인 풍력 터빈발전기의 설치용량이 전 세계적으로 증가하고 있는 실정이다. 2023년 기준, 풍력 터빈발전기의 용량은 총 1,021GW이며, 2022년에 비해 신규 용량이 77.6GW에서 116.6GW로 증가하였다. 하지만, 풍력 터빈발전기의 단위 설비 용량 상승에 따라 화재사고도 증가하여, 2023년 기준 2000기당 1건이라는 높은 확률로 화재가 발생하고 있다. 또한, 화재 시 대부분 나셀 전소로 이어져 큰 경제적 손실과 환경적 피해를 유발하였다. 풍력 터빈발전기에 설치된 소화장치가 화재를 진압하지 못하여 피해가 커진 것으로 나타난다. 따라서, 본 논문에서는 풍력 터빈발전기의 기존 소화 시스템을 분석하고, 조기 감지와 단계적 대응을 바탕으로 하는 새로운 운용 알고리즘을 제시한다. 또한, 제안한 화재 조기 진압 시스템의 운용 알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, 제어장치부, safety 장치부, 소화시스템 장

치부 등으로 구성된 HILS 시스템을 구현한다. 이를 바탕으로 시험을 수행한 결과, 화재 발생 상황에서 비상정지, 블레이드 고정, 발전기 차단 및 자동 소화설비 등의 기능이 적절하게 동작되고, 화재 진압 이후, 발전기의 속도 및 출력이 안정적으로 회복함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 화재 조기 진압 시스템의 운용 알고리즘이 기존 방식보다 풍력 터빈발전기의 화재를 효과적으로 조기 진압하여, 안전성 향상 및 피해를 최소화할 수 있음을 알 수 있다.

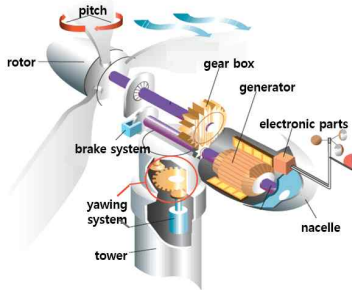
2. 풍력 터빈발전기의 화재 사례 분석

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 터빈발전기는 일반적으로 그림 1과 같이 회전날개(blade), 기어박스(gear box), 발전기(generator), 요잉 시스템(yawing system), 너셀(nacelle), 브레이크(brake 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 터빈 발전기의 화재 사례 분석

2010년부터 2021년까지 국내 풍력 터빈발전기의 화재 현황은 표 1과 같이, 총 7건으로 보고된다. 여기서, 전기적 결선(3건)과 브레이크 과열(2건) 등이 화재 원인으로 추정되고 있으며, 이 중 3건은 소화시스템이 화재 진압을 하지 못하여 나셀이 전소된 피해사례로 보고되고 있다. 또한, 육상 풍력의 경우에는 나셀 전소로 인한 경제적 손실뿐 아니라 산불과 같은 2차 피해까지 발생함을 알 수 있다. 이에 따라, 소화시스템 설치 여부와 관계없이 대부분의 사고가 전소로 이어져, 기존시스템이 실질적인 화재를 진압하지 못했음을 알 수 있다. 따라서, 화재를 조기에 진압할 수 있는 소화시스템 도입이 필요함을 알 수 있다.

[표 1] 국내 풍력 터빈발전기의 화재 현황

년도	장소	제조사	용량 [kW]	사고원인(추정)	화재 방호 설비	피해 규모
2010	제주	베스타스	600	과부하/브레이크과열	무	전소
2010	인천	유니슨	2,000	전기적 사고	무	전소 산불
2011	강원	현대중공업	2,000	원인미상	-	-
2015	제주	유니슨	750	브레이크 과열	무	전소
2017	제주	베스타스	1,500	슬립링 아크 발생	유	전소
2020	제주	두산중공업	3,000	전기적 사고	유	전소
2021	인천	두산중공업	3,000	전기적 사고	유	전소

3. 풍력 터빈발전기의 화재 조기 진압 시스템용 운용 알고리즘

3.1 기존 시스템의 구성

풍력 터빈발전기의 화재설비는 그림 2와 같이 대부분 가스계 소화설비와 고체에어로졸 소화장치로 구성된다. 여기서, 가스자동소화장치는 그림 2(a)와 같이 화재 발생부에 풀리며 소재의 열감응형 튜브를 설치하여 특정 온도에서 파열되며 소화약제가 방출되는 장치이다. 별도의 화재 감지기 없이 작동하는 방식으로 방출 시 산소를 차단하여 화재를 질식시켜 억제한다. 또한, 고체에어로졸 자동소화장치는 그림 2(b)와 같이 전기신호 또는 주위 온도 상승에 의하여 고체 화합물로 이루어진 소화약제를 자동으로 방출하는 장치로, 화학적 부촉매를 사용하여 화재를 진압하는 방식이다. 하지만, 풍력 터빈발전기처럼 개방형의 시설에서는 소화약제의 입자가 가벼워 화재지점에 도달하기가 어렵고, 튜브 자체가 감지기 역할을 하는 방식은 이미 화재가 어느 정도 진행된 후에 약제가 분사되기 때문에 그 효과가 반감될 수밖에 없다. 따라서, 본 논문에서는 풍력 터빈발전기의 안정성을 향상시키기 위하여, 조기 감지와 단계적 대응을 바탕으로 하는 새로운 운용 알고리즘을 제시한다.



(a) 열감응형 튜브



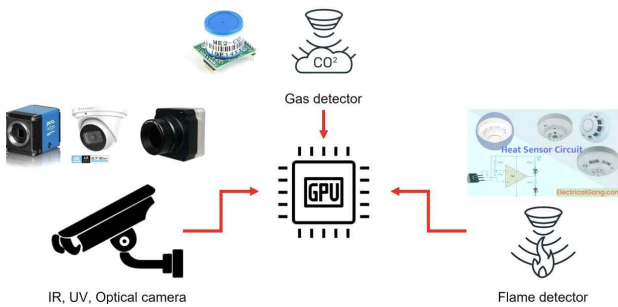
(b) 고체에어로졸

[그림 2] 기존 소화시스템

3.2 제안한 시스템의 운용 알고리즘

3.2.1 제안한 시스템의 구성

본 논문에서는 분석한 풍력 터빈발전기의 화재 사례와 기존 시스템을 바탕으로, 그림 3과 같이 연기·불꽃·온도·열화상·영상·자외선 등의 복합 센서를 통해 화재를 조기에 감지하여, 단계적 대응을 바탕으로 하는 새로운 시스템의 운용 방안을 제시한다. 여기서, 화재감지 시스템은 연기감지기(smoke), 불꽃감지기(flame, UV/IR), 열화상카메라(thermal), 광학카메라(RGB) 등으로 구성하여 나셀 내부 전역의 감시를 수행한다. 또한, 화재 발생 여부를 실시간 판별하고 위험 등급을 기반으로 경보 발령→제어실 통보→회전체 감속 및 비상정지(E-stop)→자동 소화설비 기동의 단계적 대응을 수행한다. 또한, 진압 완료 후, 재발화 가능성을 확인하고, 재가동 제어를 진행한다.



[그림 3] 제안한 다중센서 기반 화재감지 시스템

3.2.2 운용 알고리즘

상기에서 제시한 바와 같이, 기존 시스템으로 감지 지연과 비화재보로 인해 풍력 터빈발전기의 화재를 조기 진압하기 어려운 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 3.2.1 절에서 제시한 구성을 바탕으로 경보→제어실 통보→회전체 감속 및 비상정지(E-stop)→자동 소화→재가동으로 이어지는 화재 조기 진압 시스템 운용 알고리즘을 제안한다. 이에 대한 상세한 절차를 나타내면 다음과 같다.

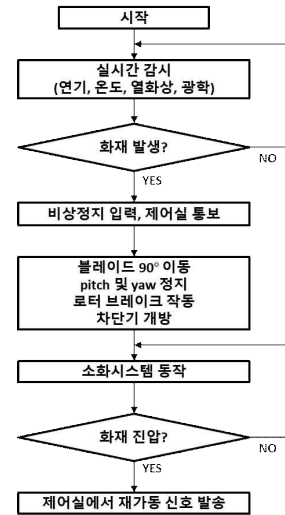
[Step 1] 연기, 온도, 열화상카메라, 광학카메라 등으로 화재를 상시 감시하고, 화재 시 탑재된 알고리즘에 의해 화재를 판별한다.

[Step 2] 화재로 판별되어 PLC에서 비상정지 입력신호를 보내면, 블레이드는 90°로 회전하며 pitch 및 yaw가 정지, 로터 브레이크 작동 및 차단기가 개방되며 소화 및 safety 시스템을 제외한 모든 시스템이 정지한다.

[Step 3] 화재 조기 진압 시스템이 작동하여 화재지점에 직접적으로 소화 약재를 방출하여 화재진압을 수행한다.

[Step 4] 실시간 감시시스템으로 화재 진압 여부를 판단하고 완료됨을 제어실로 통보한다.

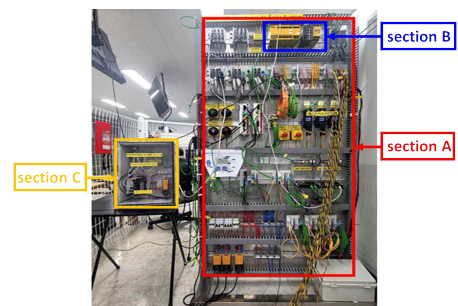
[Step 5] 제어실에서 PLC에 리셋 신호를 보내어 재가동시킨다.



[그림 4] 화재 조기 진압 시스템 운용 알고리즘

4. 풍력 터빈발전기용 화재 조기 진압 시스템의 HILS 시험 장치 구현

풍력 터빈발전기와 화재 조기 진압 시스템의 HILS를 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, section A는 풍력 터빈 HILS 통합 패널의 제어장치부를 나타내는데, 동적 제어기(Pitch/Torque), 합성 관성 제어, 감속 제어기, HMI (Human-Machine Interface)를 통해 운전 상태를 실시간 감시·제어한다. 또한, section B는 safety 장치부를 나타내는데, 전기 토크와 로터/발전기 속도 등 핵심 운전변수와 속도·온도·압력 센서를 상시 모니터링하여, 이상 상황 발생 시에 보호 기능과 경보를 즉시 구동한다. 한편, section C는 소화시스템 장치부를 나타내는데, 조기 감지 시스템과 경보 및 자동 소화 기능을 센서 피드백과 연동하여, 화재를 신속히 진압한다.



[그림 5] 풍력 터빈발전기용 HILS 전체구성

5. 시험 결과 및 분석

5.1 시험 조건

상기의 3.2절에서 제안한 풍력 터빈발전기의 화재 조기 진압 시스템의 운용 알고리즘의 유효성을 확인하기 위하여, 4장에서 구현한 HILS의 시험을 위해 미국의 국립 신재생에너지연구소 (NREL, National Renewable Energy Laboratory)에서 공공의 연구 목적으로 제공하는 5MW급 Baseline 풍력터빈 모델을 활용하며, 주요 사양은 표 2와 같다. 한편, 제시한 알고리즘에 의한 운용특성을 확인하기 위한 상정 시나리오를 나타내면 표 3과 같다. Case 1은 정상 운전 중 화재 발생 시 화재를 판단하고 비상정지 신호가 발생하였을 경우이며, case 2는 화재 진압 후 재가동하였을 경우이다.

[표 2] 시험 조건

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

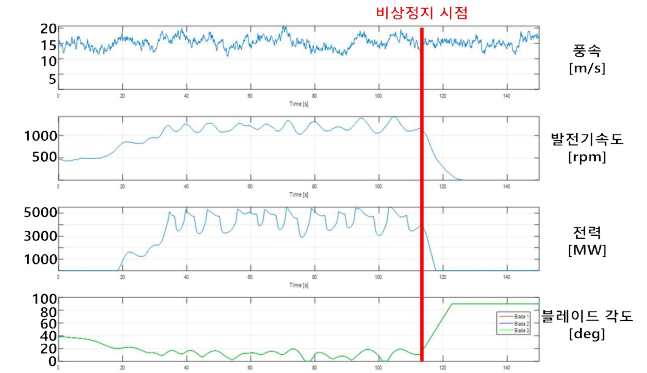
[표 3] 상정 시나리오

case	조건
case 1	화재 발생 시 비상 정지
case 2	화재 진압 후 재가동

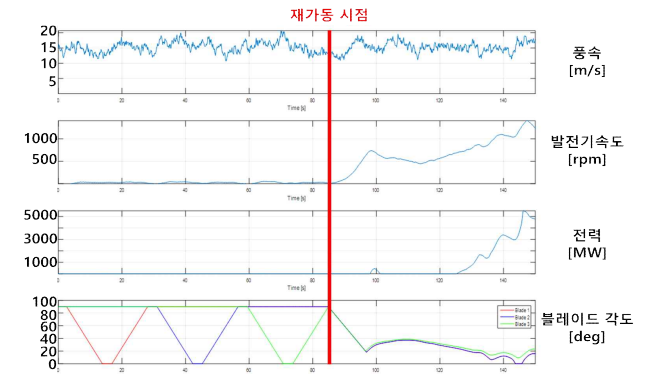
5.2 운용 특성

상기에서 제시한 시험 조건을 바탕으로, 화재 발생 시 비상 정지에 따른 풍력 터빈발전기용 HILS의 운용특성을 나타내면 그림 6과 같다. 즉, case 1의 경우, 소화시스템 장치부에 의해 비상정지가 작동되어 발전기의 속도가 1500rpm에서 0rpm으로, 전력이 2000MW에서 0MW로 변하여 발전기가 정상적으로 정지됨을 확인하였으며, 블레이드의 각도가 20°에서 90°로 고정됨을 알 수 있다.

또한, 화재 진압 후 재가동에 따른 풍력 터빈발전기의 운용특성을 나타내면 그림 7과 같다. 즉, case 2의 경우, 화재 진압 후 재가동하여 발전기 속도가 1500rpm으로, 전력이 5000MW로 증가하고 블레이드의 각도는 90°에서 풍속과 위치에 따라 0°~40°로 회전함을 알 수 있다.



[그림 6] 화재 발생시 비상 정지에 따른 풍력 터빈발전기의 운용특성



[그림 7] 화재 진압 후 재가동에 따른 풍력 터빈발전기의 운용특성

6. 결 론

본 논문은 풍력 터빈발전기의 화재사례와 기존 소화설비의 한계를 분석하고, 다중 센서 기반의 조기 감지 및 단계적 대응 알고리즘을 제안하였다. HILS 시뮬레이션을 통해 비상정지, 블레이드 고정, 발전기 차단 및 자동 소화 기동이 정상적으로 수행됨을 확인하였으며, 진압 후 재가동 과정에서도 안정적 운전이 가능함을 확인하였다. 따라서, 제안한 화재 조기 진압 시스템의 운용 알고리즘이 기존 방식보다 풍력 터빈발전기의 화재 피해를 최소화할 수 있음을 알 수 있다. 향후 다양한 화재 시나리오 적용을 통해 시스템의 적용성과 신뢰성을 추가적으로 확인할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] 이명근, 이민행, 김지명, 이예빈, 한형주, 노대석, “풍력 터빈 발전기의 구성요소별 위험도 우선순위 평가에 관한 연구”, 산학기술학회논문지, Vol.25 No.5, pp. 422-431, 2024년