

풍력 터빈발전기의 구성요소별 위험도 우선순위 평가에 관한 연구

이명근^{1,2}, 이민행¹, 김지명¹, 이예빈¹, 한형주², 노대석^{1*}

¹한국기술교육대학교, ²한국전기산업연구원

A Study on The Risk Priority by Components in Wind Turbine Generator

Myung-Geun Lee^{1,2}, Min-Haeng Lee¹, Ji-Myung Kim¹, Ye-Bin Lee¹,
Hyeong-Ju Han^{1,2}, Dae-Seok Rho^{1*}

¹Korea University of Technology and Education

²Electrical Industry Research Institute of Korea

요약 최근, 에너지 위기와 환경문제가 전 세계적인 이슈로 부각되고 있는 가운데, 유엔 기후변화협약에 따라 탄소배출의 규제가 강화되고 있는 실정이다. 이에 따라, 탄소배출을 감소시킬수 있는 신재생에너지원인 풍력 터빈발전기의 설치 용량이 전 세계적으로 증가하고 있는 추세이다. 하지만, 풍력 터빈발전기의 단위 설비용량에 따라 고장 횟수도 증가하며, 화재 및 비화재 사고에 따라 각각의 위험도와 대응방법이 다르기 때문에, 이에 따른 고장원인 분석이 요구되고 있다. 현재 풍력 터빈발전기의 고장원인의 분석 방법으로 고장모드 및 영향분석 방식이 사용되고 있지만, 기존 방식의 심각도(severity) 및 발생도(occurrence)는 전문가의 지식, 경험치와 고장확률을 기반으로 하는 정성적 분석이기 때문에, 실제 위험도 우선순위(risk priority)를 적절하게 나타내지 않을 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 화재 및 비화재 사고의 잠재적 원인을 구분하여 피해액을 고려한 심각도(severity)와 운용시간을 고려한 발생도(occurrence)의 산출 방안을 제안한다. 제안한 평가 방안을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 심각도는 설비 금액과 고장 시 정지시간에 따른 손실비를 고려하여 기존의 방법보다 세분화되고, 발생도는 기존의 고장률에 운용시간을 고려하여 적절하게 평가됨을 알 수 있다. 이에 따라, 기존 FMEA 방식에 정량적인 개념을 도입하고 화재 및 비화재를 구분함으로써 위험도 우선순위 평가의 적합성과 신뢰성이 향상됨을 알 수 있다.

Abstract Recently, as the energy crisis and environmental problems have become global issues, regulations on carbon emissions have been strengthened in accordance with the United Nations Framework Convention on Climate Change. Under these circumstances, the installation capacity of renewable energy source, such as wind turbines, to reduce carbon emissions is increasing worldwide. On the other hands, as the frequency of malfunctions is also rising according to the large size unit capacity of wind turbine and the risk analysis and counter measure are different depending on fire and non-fire incidents, an evaluation method of the causes of malfunctions is required. In general, the failure modes and effect analysis (FMEA) method is adopted to analyze the causes of malfunctions in wind turbines, but the severity and occurrence of existing methods are qualitative analyses based on experts' knowledge and failure probability, which may not adequately reflect the actual risk priority. This paper proposes a method to solve these problems by calculating the severity degree considering the damage cost and the occurrence degree considering the operating time based on the fire and non-fire incidents. the simulation results based on the proposed evaluation method confirmed that the severity is more detailed than the existing method by considering the damage cost and that the occurrence had been evaluated appropriately by considering the failure rate and operating time. In addition, the performance and reliability of each risk priority is improved by introducing quantitative concepts to the existing FMEA method and categorizing fire and non-fire.

Keywords : Wind Turbine Generator, Risk Priority, Fire, Non-Fire, FMEA, RPN, Weighting Factor, Failure Modes and Effect Analysis, FMEA, Severity Degree, Occurrence Degree, Qualitative

본 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20213030020260, 풍력터빈용 화재 감지 및 자율형 소화 시스템 개발)과 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (20224000000160, DC 그리드 에너지 혁신연구센터)

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)

email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received March 15, 2024

Revised April 25, 2024

Accepted May 3, 2024

Published May 31, 2024

1. 서론

최근, 정부는 2050 탄소중립 선언과 함께 탄소중립정책을 실행하고 있으며, 그 일환으로 재생에너지 3020 이행계획에 따라 신재생에너지에 의한 전력 공급계획을 적극적으로 추진하고 있다[1]. 이에 따라, 탄소중립을 실현하기 위한 중요한 요소 중 하나인 풍력 터빈발전기의 용량이 전 세계적으로 증가하고 있는 실정이다. 하지만, 풍력 터빈발전기의 단위 설비용량에 따라 고장 횟수도 증가하며, 화재 및 비화재 사고에 따라 각각의 위험도와 대응방법이 다르기 때문에, 이에 따른 고장모드 및 원인을 체계적으로 분석할 필요가 있음을 알 수 있다[2]. 현재, 풍력 발전기의 고장위험 및 신뢰성 분석을 위해 고장모드 및 영향 분석(failure modes and effect analysis, FMEA) 방식이 사용되고 있지만, 기존 방식의 심각도(severity) 및 발생도(occurrence)는 전문가의 지식, 경험치와 고장확률을 기반으로 하는 정성적 분석이기 때문에, 기존 방식의 RPN평가는 실제 위험도 우선순위를 적정하게 평가하기 어려운 한계점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 풍력 터빈발전기의 잠재적 원인을 화재 및 비화재 사고의 유형으로 구분하고, 심각도와 발생도에 각각 피해액과 운용시간을 고려한 가중치 개념과 이에 따른 새로운 방식의 위험도 우선순위 평가 방안을 제시한다. 이를 바탕으로, 설비금액과 고장 시 정지시간에 따른 손실비용을 고려한 심각도와 운용시간을 바탕으로 발생도를 산정하여, 새로운 방식의 위험도 우선순위(risk priority number, RPN)를 평가한다. 제안한 평가 방안을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 새로운 RPN(RPN')은 설비금액과 고장 시 정지시간에 따른 피해액을 고려한 심각도와 운용시간에 따른 열화율을 반영한 발생도를 통해, 기존의 방법보다 세분화되고 사고파급효과를 적정하게 반영됨을 알 수 있다. 이에 따라, 기존 FMEA 방식에 정량적인 개념을 도입하고, 화재 및 비화재를 구분함으로써 위험도 우선순위 평가의 적합성과 신뢰성이 향상됨을 알 수 있었다.

2. 풍력 터빈발전기의 구성요소별 고장 모드 및 원인 분석

2.1 풍력 터빈발전기의 구성

풍력 터빈발전기는 자연 상태의 무공해 에너지원으로

서, 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 Fig. 1과 같이 회전날개(blade), 기어박스(gear box), 발전기(generator), 요잉 시스템(yawing system), 너셀(nacelle), 브레이크(blake system), 타워(tower), 전력변환장치 등으로 구성된다[3]. 이 그림에서와 같이, 외부에 노출된 회전날개(blade)는 바람의 운동에너지를 기계에너지로 변환해 회전을 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, 전기 구성품은 발전기에서 생산된 전기를 변환하는 변압기 및 컨버터와 컨트롤러 등으로 구성된다.

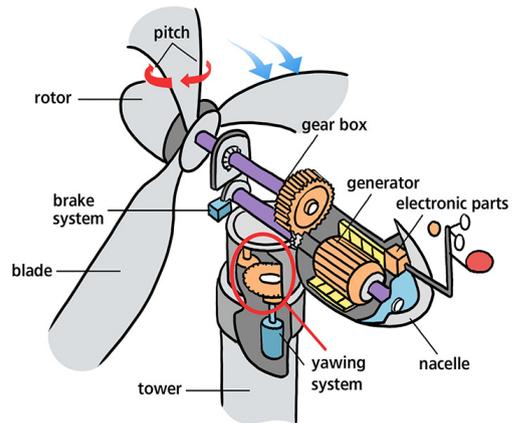


Fig. 1. Components of wind turbine generator

2.2 풍력 터빈발전기의 고장모드 원인 분석

풍력 터빈발전기의 고장모드는 다양한 원인으로 비정상적인 동작 및 환경적인 요인에 의하여 발생할 수 있다 [4,5]. 여기서, 풍력 터빈발전기의 잠재적 고장모드와 원인을 나타내면 Table 1과 같다. 이 표에서와 같이, 고장모드는 일반적으로 화재, 진동, 소음, 속도제어 불량, 일

정 출력 유지 불량 등으로 분류되며, 주로 시스템 내에서 발생한 문제와 기기 및 부품의 고유특성의 변화 및 결합 등의 원인으로 발생함을 알 수 있다. 예를 들어, 블레이드 및 피치시스템의 고장모드의 경우, 블레이드의 구조물 고장은 블레이드 파손 및 발전정지를 발생시키며, 허브 및 베어링 고장은 화재, 진동, 출력 저하 등을 발생시킬 수 있다. 또한, 유압모터 및 어큐뮬레이터 고장은 화재, 피치 회전 불가 등의 고장을 일으키고, 낙뢰보호설비, 리미트 스위치, 주전원 및 보조전원 고장은 전원 투입 및 차단 불가, 화재 등의 고장을 발생시킬 수 있다.

이외에도, 각 구성요소의 잠재적 고장원인 중 진동은 불균형 및 기어박스의 결합으로 발생하며, 소음은 부품의 피로로 인한 마찰 및 바람과의 상호작용 등의 원인으로 유발됨을 알 수 있고, 화재는 전기 시스템의 누전 및 기계 부품의 과열 등으로 발생하여 전파할 가능성을 가지고 있다. 또한, 축 회전 불량은 기어박스의 고장 및 부품 손상의 원인이며, 속도제어 불량은 브레이크의 고장 및 풍량의 계측 오류 등으로 인해 발생하는데, 안정적인 전력 생산에 악영향을 끼칠 수 있다. 따라서, 풍력 터빈 발전기의 효율적인 전력 생산과 안정적인 운영을 위하여, 풍력 터빈발전기의 고장모드를 체계적으로 분석하여 구성요소별 위험도를 평가할 필요가 있다.

Table 1. Potential failure modes and causes in wind turbine

component	potential failure mode	potential failure cause
blade and pitch system	broken blade, stop generate	blades structure failure
	fire, abnormal vibration,	hub failure, bearing failure
	fire, unavailable pitch rotation	hydraulic motor failure, overpressure, accumulator failure
	unable to power on/off, fire	lighting protection failure, limit switch fails, main and backup power failure
	unable to maintain a constant output	meteorological unit failure, abnormal vibration
	fire, vibration, noise, fire	abnormal filter, poor quality lubrication oil, dirt lubrication oil
gearbox	fire, flames, noise, vibration, inability to control speed	abnormal vibration, glued, pitting, poor design of teeth gears, the offset of teeth gears, cracks in gears
	fire, noise, vibration, speed reduction	abnormal vibration, corrosion of pins, abrasive wear, pitting

generator	verheating, fire, vibration, generation shutdown	temperature above limitation, sensor failure, abnormal vibration, abnormal instrument reading, fail to synchronize, broken bars, fail to start
	fire, noise, vibration, speed reduction	asymmetry, structural deficiency, abnormal vibration
	fire, leak, induction failure	measurement facilities failure, wire fault, leak
yaw system	blade damage, output reduction, vibration, noise	yaw subsystem failues
electric components	abnormal signal, abnormal operation	controller failure
	fire, explosion	transformer failure
	failure detection unavailable	sensors failure
	conversion failure	converter failure

3. 풍력 터빈발전기의 위험도 우선순위 평가를 위한 가중치 적용 방안

3.1 기존 위험도 우선순위 평가방식

고장모드 및 영향 분석(failure mode and effects analysis, FMEA) 프로세스는 일반적으로 시스템이나 서브시스템의 위험분석을 실시하기 위하여 사용되는 전형적인 정성적, 귀납적 분석기법으로, 이를 통한 RPN 평가에 의하여 고장의 위험도에 대하여 적절한 개선방안을 도출할 수 있다. 먼저, 2장에서 제시한 풍력 터빈발전기의 고장모드와 화재 및 비화재의 고장원인을 바탕으로, RPN 평가를 위한 심각도(severity, S), 발생도(occurrence, O), 검출도(detection, D)의 판정 기준을 나타내면 Table 2와 같다[6]. 즉, 심각도는 고장 발생시 고객에 미치는 영향의 등급이며, 발생도는 시스템 고장에 대한 발생 가능성의 등급이며, 검출도는 잠재적 고장에 대한 검출 가능성의 등급을 나타내며, 이를 바탕으로 RPN 값을 산정한다.

여기서, 위험도 순위는 RPN 값에 따라 평가하며, 낮은 등급일수록 위험에서 안전하고, 높은 등급일수록 위험에 노출될 확률이 높은 것을 의미한다. 하지만, 기존 방식의 심각도 및 발생도는 전문가의 지식, 경험치와 고장확률을 기반으로 하는 정성적 분석이기 때문에, RPN을 평가하기 어려울 가능성이 있으며, 고장이 발생하지 않거나 적은 경우에는 데이터를 수집하기 어려운 한계점을 가지고 있다. 또한, 기존의 RPN 평가방식은 심각도,

발생도, 검출도의 상대적 중요도를 고려하지 않아, 적정하지 않은 우선순위를 산정할 수 있으며, 이로 인해 시스템의 실제 위험도를 정확하게 평가하는데 어려움을 가지고 있다[7]. 따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 풍력 터빈발전기의 잠재적 원인을 화재 및 비화재 사고에 대해 구분하고, 심각도와 발생도에 각각 피해액과 운용시간을 고려한 가중치 개념과 이에 따른 RPN 평가 방안을 제시한다.

Table 2. Reference of severity, occurrence, detection degrees

item	grade	judgment criteria
severity degree [S]	1	minor failure
	2	deterioration in system performance
	3	deterioration in component or system performance
	4	possibility of system shutdown
	5	system shutdown
occurrence degree [O]	1	very low probability of failure (failure rate ≤ 0.001)
	2	low probability of failure ($0.001 < \text{failure rate} \leq 0.01$)
	3	moderate probability of failure ($0.01 < \text{failure rate} \leq 0.1$)
	4	high probability of failure ($0.1 < \text{failure rate} \leq 0.2$)
	5	very high probability of failure ($0.2 < \text{failure rate}$)
detection degree [D]	1	very high probability
	2	high probability
	3	moderate probability
	4	low probability
	5	very low probability

3.2 가중치를 적용한 위험도 우선순위 평가 방안

3.2.1 심각도의 가중치 적용

기존의 심각도는 전문가의 주관적인 판단과 경험치를 기반으로 평가하기 때문에, 심각도에 따른 RPN 값이 상이할 수 있고, 일관성과 객관성에 한계점을 가질 수 있다 [8]. 이와 같은 문제점을 보완하기 위하여, 가중치를 적용한 심각도를 Eq. (1)~Eq. (3)과 같이 산정한다. 여기서, Eq. (1)은 각 구성요소별 설비비용 비율(C_i)을 나타내는데, 각 구성요소의 설비비용을 전체 설비비용으로 나눈 값이다. 또한, Eq (2)는 풍력 터빈발전기의 정지시간(T_h)을 나타내는데, 이는 고장이 발생한 시점부터 복구되기까지의 시간을 고장률의 기준 시간인 10^3 [h]로 환

산한 값이다. 따라서, 제안한 심각도(S'_{comp})는 기존의 심각도(S_{comp})에 각 구성요소별 설비비용의 비율(C_i)과 풍력 터빈발전기의 정지시간(T_h)의 가중치를 적용한 합의 값으로 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 설비비용과 정지시간의 가중치는 지수함수의 승수에서 0 ~ 1의 값으로 산정한다. 즉, 기존 심각도는 Table 4의 판정 기준에 따라 1부터 5까지의 등급을 가지지만, 제안한 심각도는 해당 등급에서 가중치를 고려하여 산정한다.

$$C_i = \frac{C_{comp}}{C_{total}} \quad (1)$$

$$T_h = \frac{t_d \times 24}{10^3} \quad (2)$$

$$S'_{comp} = \sqrt{(S_{comp}^{1+C_i})^2 + (S_{comp}^{1+T_h})^2} \quad (3)$$

Where, C_i : the ratio of each component in the total installation cost in a wind turbine, C_{comp} : installation costs by each component, C_{total} : total installation cost in wind turbine, T_h : converted values from t_d to 10^3 [h] base, t_d : shutdown time interval in wind turbine[day], S'_{comp} : modified severity degree by each component, S_{comp} : existing severity degree by each component

3.2.2 발생도의 가중치 적용

기존의 발생도(O_{comp})는 실제 발생한 통계치에 의해 평가된 고장률을 바탕으로 산정되지만, 실제 고장이 발생하지 않거나 빈도 수가 낮은 경우에는 적절한 데이터를 수집하기 어려운 단점을 가지고 있다[9]. 또한, 운용시간에 따른 구성요소의 열화율이 고려되어 있지 않으므로, RPN 값의 신뢰성에 악영향을 끼칠 수 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 운용시간에 따른 고장률을 시스템의 신뢰성을 나타내는 비신뢰도(non-reliability) 함수를 바탕으로 Eq. (4)와 같이 나타낸다[10]. 따라서, 제안한 발생도(O'_{comp})는 Table 4의 기준에 따라 1부터 5까지의 등급으로 산정하는데, 운용시간(t)에 따른 열화율이 반영되어 등급 자체가 조정될 수 있다.

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t_n} \quad (4)$$

Where, $F(t_n)$: failure rate based on operation time for each component, t_n : operation time, λ : failure rate for each component after t_n

3.2.3 가중치를 적용한 새로운 RPN 평가식

상기의 가중치를 적용한 심각도(S'_{comp})와 발생도(O'_{comp})를 바탕으로 가중치를 적용한 새로운 RPN (RPN')은 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다. 즉, RPN' 은 제안한 심각도와 발생도를 바탕으로 기존의 검출도를 고려하여 산정한다[11]. 여기서, 심각도는 설비비용과 정지시간의 가중치를 적용한 등급으로 산정하고, 발생도는 운용시간에 따른 고장률을 반영하여 등급 자체를 재조정하여 산정한다. 하지만, 잠재적 고장에 대한 발견 가능성을 나타내는 검출도(D_{comp})는 위험이나 고장이 발생한 경우, 이를 얼마나 신속하게 감지하고 대응하는 정도를 정량화하기 어려우므로, 기존에 분석 방법과 동일한 값을 사용한다.

$$RPN' = S'_{comp} \times O'_{comp} \times D_{comp} \quad (5)$$

Where, RPN' : modified RPN, S'_{comp} : severity degree by weighting factor for each component, O'_{comp} : occurrence degree by weighting factor for each component, D_{comp} : existing detection degree for each component

4. 가중치를 적용한 위험도 우선순위 평가

알고리즘

상기에서 제시한 바와 같이, 기존의 RPN 평가방식은 실제 위험도 우선순위를 적절하게 평가하기에 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 3.2절에서 제시한 가중치 적용방안을 바탕으로 풍력 터빈발전기의 가중치를 적용한 위험도 우선순위 평가 알고리즘을 제시한다. 이에 대한 상세한 절차를 나타내면 다음과 같다.

- [Step 1] 하위 구성요소($X(k)$)의 고장원인, 고장영향, 고장률 등의 FMEA 데이터를 입력한다.
- [Step 2] 화재 및 비화재 사고는 사고발생 시 피해의

크기와 대응 방법이 다르기 때문에, 사고 발생 시 피해의 정도에 따라 위험도를 평가하기 위해 구성요소별 고장영향을 고려하여 구분한다.

- [Step 3] 제안한 심각도(S'_{comp})는 Eq. (1)~Eq. (3)의 각 구성요소별 설비비용의 비율(C_i)과 정지시간(T_h)에 의하여 가중치를 적용하고, Table 4의 판정기준에 따라 1부터 5까지의 등급을 가지지만, 가중치를 적용한 등급으로 산정한다.
- [Step 4] 제안한 발생도(O'_{comp})는 Eq. (4)에 따라, 운용시간(t_n)을 반영한 열화율을 적용하여 고장률을 산정하고, Table 4의 기준에 따라 등급 자체를 재산정한다.
- [Step 5] 상기의 심각도와 발생도를 바탕으로 Eq. (5)와 같이, 가중치를 적용한 $RPN'(X(k))$ 값을 산정한다. 단, 검출도(D_{comp})는 잠재적 고장에 대한 발견 가능성을 정량화하기 어려우므로, 기존에 분석한 방법을 사용하여 평가한다.
- [Step 6] 전체 하위 구성요소($X(k)$)에 대하여, [Step 3] ~ [Step 5]의 절차를 반복하여, 각 구성요소별 위험도 평가를 수행한다.

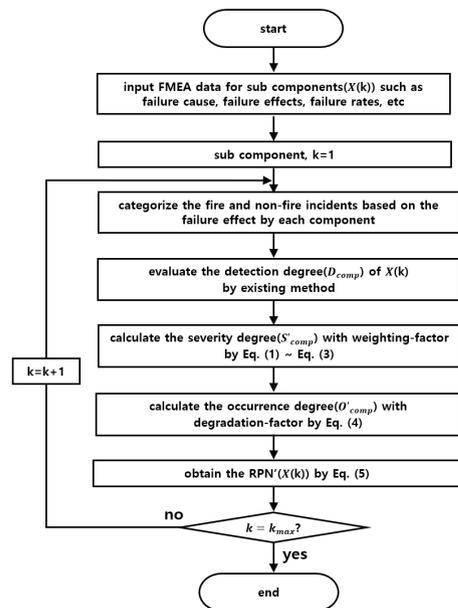


Fig. 2. Risk priority evaluation algorithm by weighting factor

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

상기에서 제안한 방식을 바탕으로 가중치를 적용한 화재 및 비화재 사고에 대한 RPN 평가방식의 유용성을 검증하기 위하여, 풍력 터빈발전기의 구성요소별 하위요소와 설비비용 및 정지시간을 나타내면 Table 3과 같다 [12]. 이 표에서와 같이, 구성요소는 블레이드 및 피치시스템, 기어박스, 발전기, 전기구성품 등으로 상정하며, 정지시간은 수리에 소요되는 시간, 설비비용은 풍력 터빈발전기의 전체 설비비용에 대한 각 구성요소의 비율을 고려하여 산정한다[12]. 예를 들어, 블레이드 및 피치시스템의 블레이드는 14.22[%]의 설비비용의 비율과 12[day]의 정지시간을 나타낸다. 한편, 풍력 터빈발전기의 열화율을 고려하기 위하여, 최대 운용기간은 기대수명인 20년으로 상정한다.

Table 3. Installation cost and shut-down time for each component

component	sub component	installation cost [%]	downtime (day)
blade and pitch system	hub	15.01	12.41
	hydraulic system	2.21	0.75
	alarm facilities	0.38	0.25
	lubrication system	2.21	0.75
	blade	14.22	12
	accumulator	0.30	0.75
	pitch system	2.21	0.79
gearbox	gear	36.33	0.91
	bearing	0.02	0.33
	break	0.39	0.33
generator	rotor and stator	9.48	1.00
	bearing	0.03	0.33
	electric system	1.58	0.58
electric components	controller	2.05	0.88
	transformer	11.06	1.08
	converter	2.05	0.58

5.2 화재위험 요소에 의한 우선순위 평가

5.2.1 기존 방식에 의한 RPN 산정

상기의 시뮬레이션 조건에 따라 기존 방식에 의한 화재위험 요소별 RPN을 평가하면 Table 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 블레이드 및 피치시스템의 4개의 하위요소인 허브, 경보설비, 유압시스템, 윤활시스템의 심각도는 각각 5, 4, 4, 4의 값으로 평가되며, 발생도는 실제

발생한 고장률을 바탕으로 각각 4, 3, 3, 2의 값이고, 검출도는 잠재적 고장에 대한 발견 가능성에 의하여 각각 1, 1, 2, 3으로 산정된다. 따라서, 기존 방식의 RPN은 4개의 하위요소에 대하여 각각 15, 12, 24, 24의 값으로 산정된다. 이에 따라, 블레이드 및 피치시스템의 4개의 하위요소인 허브, 경보설비, 유압시스템, 윤활시스템의 RPN 값은 각각 7, 4, 8, 4위의 순위로 평가됨을 알 수 있다.

Table 4. Characteristics of the existing RPN for failure components of fire risk

component	sub component	S	O	D	existing RPN	risk ranking
blade and pitch system	hub	5	3	1	15	7
	hydraulic system	4	3	2	24	4
	alarm facilities	4	3	1	12	8
	lubrication system	4	2	3	24	4
gearbox	bearing	3	3	2	18	6
	break	3	2	2	12	8
generator	rotor and stator	5	1	2	10	10
	electric system	5	5	3	75	1
electric components	transformer	5	3	4	60	2
	converter	5	3	4	60	2

5.2.2 제안 방식에 의한 RPN 산정

4장의 가중치를 적용한 위험도 우선순위 평가 알고리즘에 따라 화재위험 요소별 새로운 RPN(RPN')을 산정하면 Table 5와 같다. 여기서, 블레이드 및 피치시스템의 4개의 하위요소인 허브와 경보설비, 유압시스템, 윤활시스템의 심각도는 기존의 5, 4, 4, 4의 값에서 9.0, 5.8, 5.7, 5.8로 평가되며, 발생도는 기존의 3, 3, 3, 2의 값에서 4, 3, 3, 3으로 조정된다. 단, 검출도는 기존의 RPN 방식과 동일한 값으로 상정한다. 이에 따라, 블레이드 및 피치시스템의 4개의 하위요소인 허브와 경보설비, 유압시스템, 윤활시스템의 RPN은 각각 15에서 36.0, 12에서 34.7, 24에서 17.1, 24에서 52.0의 값으로 변경됨을 알 수 있다. 이에 따라, 블레이드 및 피치시스템의 4개의 하위요소인 허브, 경보설비, 유압시스템, 윤활시스템의 RPN 값은 각각 5, 6, 9, 4위의 순위로 평가되며, 허브는 7위에서 5위, 경보설비는 4위에서 6위, 유압시스템은 8위에서 9위의 순위로 조정됨을 알 수 있다. 단, 윤활시스템은 기존과 동일한 4위의 순위로 유지됨을 알 수 있다.

Table 5. Characteristics of modified RPN for failure components of fire risk

components	sub component	S	O	D	RPN'	risk ranking
blade and pitch system	hub	9.0	4	1	36.0	5
	hydraulic system	5.8	3	2	34.7	6
	alarm facilities	5.7	3	1	17.1	9
	lubrication system	5.8	3	3	52.0	4
gearbox	bearing	4.3	3	2	25.5	8
	break	4.3	3	2	25.6	7
generator	rotor and stator	7.7	1	2	15.5	10
	electric system	7.2	4	3	86.4	3
electric components	transformer	7.9	3	4	94.3	2
	converter	7.2	4	4	115.7	1

5.2.3 위험도 종합 평가

상기의 내용을 바탕으로, 기존 방식과 제안한 방식의 풍력 터빈발전기의 화재 구성요소별 RPN과 위험도 순위 특성을 나타내면 Fig. 3과 같다. 먼저, 화재의 구성요소별 RPN 특성은 Fig. 3(a)와 같은데, 전기구성품의 2개의 하위요소 중 컨버터의 경우, 심각도와 발생도의 값이 모두 증가하여 RPN이 60에서 115.7의 값으로 기존보다 크게 변화됨을 알 수 있다. 또한, 블레이드 및 피치시스템의 4개의 하위요소 중 허브의 경우에도, RPN이 15에서 36.0의 값으로 변경됨을 알 수 있다. 또한, Fig. 3(b)는 화재의 구성요소별 위험도 순위를 나타낸 것인데, 컨버터의 경우, 기존의 순위는 변압기와 동일하게 2위로 평가되지만, 제안된 방식에 의하면 RPN 값은 2위에서 1위로 변경됨을 알 수 있다. 또한, 허브의 경우, 기존의 순위는 7위이지만, 5위로 변경되어, 본 논문에서 제안한 가중치 적용 알고리즘이 적절하게 반영됨을 알 수 있다. 따라서, 가중치를 적용한 화재의 구성요소별 RPN 특성은 기존값에 비해 지속적으로 증가하는 경향을 보이며, 위험도 순위는 일부 구성요소에서 변동이 발생함을 알 수 있다.

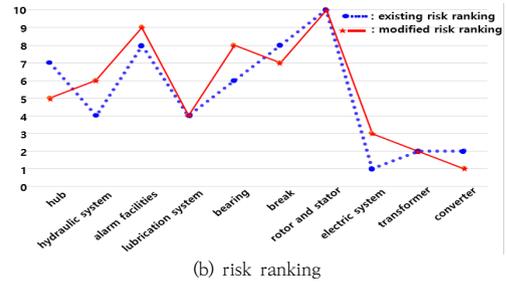
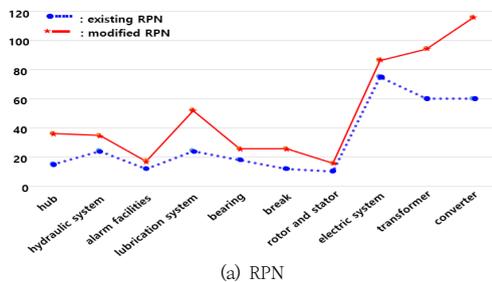


Fig. 3. Characteristics of risk priority for fire components by existing and proposed methods

5.3 비화재 위험요소의 우선순위 평가

5.3.1 기존 방식에 의한 RPN 산정

상기의 시뮬레이션 조건에 따라 기존 방식에 의한 비화재위험 요소별 RPN을 평가하면 Table 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 블레이드 및 피치시스템의 3개의 하위요소인 블레이드, 어큐뮬레이터, 피치의 심각도는 각각 5, 4, 3의 값으로 평가되며, 발생도는 실제 발생한 고장률을 바탕으로 각각 3, 2, 3의 값이고, 검출도는 잠재적 고장에 대한 발견 가능성에 의하여 각각 1, 2, 1으로 산정된다. 따라서, 기존 방식의 RPN은 3개의 하위요소에 대하여 각각 15, 16, 9의 값으로 산정된다. 이에 따라, 블레이드 및 피치시스템의 3개의 하위요소인 블레이드, 어큐뮬레이터, 피치의 RPN 값은 각각 5, 4, 6위의 순위로 평가됨을 알 수 있다.

Table 6. Characteristics of the existing RPN for failure components of non-fire risk

component	sub component	S	O	D	existing RPN	risk ranking
blade and pitch system	blade	5	3	1	15	5
	accumulator	4	2	2	16	4
	pitch system	3	3	1	9	6
gearbox	gears(cracks)	4	2	1	8	8
generator	rotor (synchronize)	4	2	1	8	8
	bars(broken)	4	1	5	20	3
yaw system	sub system	3	3	1	9	6
electric components	controller	3	3	4	36	1
	sensor	3	3	4	36	1

5.3.2 제안 방식에 의한 RPN 산정

4장의 가중치를 적용한 위험도 우선순위 평가 알고리즘에 따라 화재위험 요소별 새로운 RPN(RPN')을 산정하면 Table 7과 같다. 여기서, 블레이드 및 피치시스템의 3개의 하위요소인 블레이드, 어큐뮬레이터, 피치의 심

각도는 기존의 5, 3, 4의 값에서 8.1, 5.7, 4.3으로 평가되며, 발생도는 기존의 3, 2, 3의 값에서 4, 4, 1로 조정된다. 단, 점검도는 기존의 RPN 방식과 동일한 값으로 상정한다. 이에 따라, 블레이드 및 피치시스템의 3개의 하위요소인 블레이드, 어큐뮬레이터, 피치의 RPN은 각각 15에서 32.2, 16에서 45.6, 9에서 4.3의 값으로 변경됨을 알 수 있다. 이에 따라, 블레이드 및 피치시스템의 3개의 하위요소인 블레이드, 어큐뮬레이터, 피치의 RPN 값은 각각 5, 4, 9위의 순위로 평가되며, 블레이드와 어큐뮬레이터는 기존과 동일한 순위로 유지되며, 피치는 6위에서 9위의 순위로 변경됨을 알 수 있다.

Table 7. Characteristics of modified RPN for failure components of non-fire risk

component	sub component	S	O	D	RPN'	risk ranking
blade and pitch system	blade	8.1	4	1	32.2	5
	accumulator	5.7	4	2	45.6	4
	pitch system	4.3	1	1	4.3	9
gearbox	gears(cracks)	5.7	3	1	17.1	6
generator	rotor (synchronize)	6.1	1	1	6.1	8
	bars(broken)	6.1	2	5	61.1	2
yaw system	sub system	4.3	4	1	17.1	7
electric components	controller	4.3	3	4	51.4	3
	sensor	4.3	4	4	68.2	1

5.3.3 위험도 종합 평가

상기의 내용을 바탕으로, 기존 방식과 제안한 방식의 풍력 터빈발전기의 비화재 구성요소별 RPN과 위험도 순위 특성을 나타내면 Fig. 4과 같다. 먼저, 비화재의 구성요소별 RPN 특성은 Fig. 4(a)와 같은데, 블레이드 및 피치시스템의 4개의 하위요소 중 피치의 경우, 심각도의 증가폭이 낮고 발생도는 2단계 하락하여, RPN이 9에서 4.3의 값으로 감소함을 알 수 있다. 또한, 기어박스의 하위요소인 기어의 경우, 심각도는 증가하고 발생도는 하락하지만, RPN이 8에서 17.1의 값으로 증가함을 알 수 있다. 또한, 비화재의 구성요소별 위험도 순위는 Fig. 3(b)와 같은데, 피치의 경우, 기존의 순위는 6위이지만, 제안된 방식에 의한 위험도 순위는 9위로 변경되어, 기존의 방법과 달리 명확하게 구분됨을 알 수 있다. 또한, 기어의 경우, 기존의 위험도 순위는 8위로 평가되지만, 제안된 방식에 의한 위험도 순위는 6위로 변경됨을 알 수 있다. 한편, 비화재 사고의 경우 화재 사고에 비해 비

교적 피해액이 적어, 위험도 순위의 변동이 적은 것을 알 수 있다. 이에 따라, 사고 시 발생하는 피해액을 고려한 심각도와 운용시간에 따른 열화율을 반영한 발생도에 대한 가중치를 통해, 적절하게 우선순위가 평가되어, 본 논문에서 제안한 방법의 유효성을 확인할 수 있다.

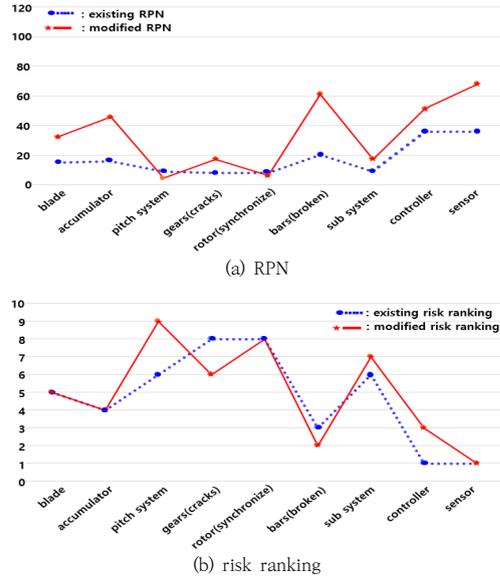


Fig. 4. Characteristics of risk priority for non-fire components by existing and proposed methods

6. 결론

본 논문에서는 풍력 터빈발전기의 구성요소별 위험도 우선순위 평가의 신뢰성을 향상시키기 위해 기존 FMEA 방식에 가중치를 적용한 위험도 우선순위 평가 알고리즘을 제시하고, 이를 바탕으로, RPN 평가를 수행한다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 화재위험 구성요소 중 컨버터와 허브는 각각 60에서 115.7, 15에서 36.0의 RPN값으로 기존보다 크게 변화됨을 알 수 있다. 여기서, 컨버터의 경우, 제안된 방식에 의하면 위험도 우선순위가 2위에서 1위로 변경됨을 알 수 있고, 허브의 경우, 기존의 순위는 7위이지만, 5위로 변경된다. 가중치를 적용한 화재의 구성요소별 RPN 특성은 기존값에 비해 지수적으로 증가하는 경향을 보이며, 위험도 순위는 일부 구성요소에서 변동이 발생함을 알 수 있어, 본 논문에서 제안한 가중치 적용 알고리

증이 적정하게 반영됨을 알 수 있다.

- (2) 비화재위험 구성요소 중 피치와 기어는 각각 9에서 4.3, 8에서 17.1의 RPN값으로 변경됨을 알 수 있다. 여기서, 피치의 경우, 기존의 순위는 6위이지만, 제안된 방식에 의한 위험도 순위는 9위로 변경되며, 기어의 경우, 기존의 위험도 순위는 8위로 평가되지만, 제안된 방식에 의한 위험도 순위는 6위로 변경됨을 알 수 있다. 따라서, 비화재 사고의 경우 화재 사고에 비해 비교적 피해액이 적어, 위험도 순위의 변동이 적은 것을 알 수 있어, 본 논문에서 제안한 방법의 유효성을 확인할 수 있다.
- (3) 본 논문에서 제시한 가중치를 적용한 RPN 평가는 심각도와 발생도에 각각 피해액과 운용시간에 따른 열화율을 고려하여, 풍력 터빈발전기의 안전성을 현실적이고 구체적으로 평가하였다. 이를 바탕으로, 풍력 터빈발전기의 가동률을 향상시키기 위한 운영 및 유지보수(Operation and Maintenance, O&M) 전략에 관한 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] J. M. Kim, B. G. Han, H. D. Lee, S. D. Cho, D. S. Rho, "A Study on Protection Coordination Operation Method of $\pm 35\text{kV}$ Hybrid MVDC Distribution System", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.24, No.3, pp.533-542, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.3.533>
- [2] Ming-Shou An, Dae-Seong Kang, "Implementation of Diagnosis Signal Analysis Algorithm Based on WSN for Wind Power Generator Monitoring System", Journal of KIIT, Vol.11, No.6, June 30, 2013. pISSN 1598-8619, eISSN 2093-7571 DOI: <https://doi.org/10.14801/kiitr.2013.11.6.33>
- [3] LYNN, Paul A., "Onshore and offshore wind energy: an introduction", John Wiley & Sons, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1002/9781119954613>
- [4] Olabi, A.G., Wilberforce, T., Elsaid, K., Sayed, E.T., Salameh, T., Abdelkareem, M.A., Baroutaji, A., "A Review on Failure Modes of Wind Turbine Components. Energies" 2021, 14, 5241. DOI: <http://doi.org/10.3390/en14175241>
- [5] S. H. Kang, H. D. Lee, S. D. Lee, D. S. Rho, "A Study on Fault Analysis of $\pm 35\text{kV}$ MVDC Hybrid Distribution System Using PSCAD/EMTDC", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.70, No.8, pp.1117-1128, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.8.1117>
- [6] S. M. Choi, H. S. You, B. G. Han, M. Y. Kim, D. S. Rho "A Study on ESS Safety Evaluation Considering CMV", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.24, No.5, pp.635-646, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.5.635>
- [7] J. M. Kim, S. M. Choi, K. H. Kim, N. K. Lee, D. S. Rho, "A Study on the Safety Evaluation Method According to Leakage and Unbalanced Current in ESS", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.24, No.9, pp.40-51, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.9.40>
- [8] C. Dao, B. Kazemtabrizi, C. Crabtree, "Wind turbine reliability data review and impacts on levelised cost of energy" Wind Energy. 2019, 22:1848-1871. DOI: <http://doi.org/10.1002/we.2404>
- [9] M. H. Lee, J. M. Kim, S. E. Rho, K. S. Ryu, C. S. Kim, D. S. Rho, "A Study on Analysis of Deterioration Patterns by Battery Type", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.24, No.6, pp.9-18, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.6.9>
- [10] Y. H. Kim, J. M. Kim, K. H. Kim, Y. B. Lee, D. S. Rho "A Study on Safety Evaluation Method Considering Fault Cases in ESS", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.72, No.8, pp.887-896, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2023.72.8.887>
- [11] W. Kohn, Z. B. Zabinsky and A. Nerode, "A Micro-Grid Distributed Intelligent Control and Management System", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 6, pp. 2964-2974, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2455512>
- [12] K. H. Kim, B. G. Han, J. S, J. M. Kim, D. S. Rho, "A Study on Operation Strategy and Economical Evaluation of Energy Prosumer Considering Power Trading Methods", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.23, No.1, pp.618-626, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.1.618>

이 명 근(Myung-Geun Lee)

[정회원]



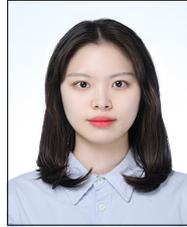
- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교
전기전자통신공학과 전기공학전공
(공학석사)
- 2023년 8월 : 동대학원 전기전자
통신공학과 박사과정 수료
- 2022년 1월 ~ 현재 : 한국전기산
업연구원 재직중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 위험성 평가

이 예 빈(Ye-Bin Lee)

[준회원]



- 2023년 2월 : 한국기술교육대학교
전기공학과 (공학사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 동대학원
전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

이 민 행(Min-Haeng Lee)

[준회원]



- 2023년 2월 : 한국기술교육대학교
전기공학과 (공학사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 동대학원
전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

전기저장장치, 전력 및 배전계통, 신재생에너지

한 형 주(Hyeong-Ju Han)

[정회원]



- 2006년 2월 : 동아대학교 전기공
학과(공학석사)
- 2006년 2월 ~ 2009년 8월 : 한국
전기연구원 위촉연구원
- 2017년 7월 : 건국대학교 전기공
학과 박사과정 수료
- 2009년 9월 ~ 현재 : (재)한국전
기산업연구원 신사업개발실장

<관심분야>

신재생에너지, ESS, 표준개발

김 지 명(Ji-Myung Kim)

[정회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교
전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 동대학원 전기공학과
(공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 동대학원
전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[종신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공
학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과
(공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교
대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한
국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신
공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석