

풍력 터빈발전기에 있어서 가중치를 적용한 화재위험 요소별 위험성 우선순위 평가

이명근***, 왕종용*, 최형석*, 태동현*, 한형주**, 노대석*

*한국기술교육대학교, **한국전기산업연구원,

e-mail:liferoot@erik.re.kr

Evaluation of Risk Priority in Wind Turbine Generator by Weighting factor for Fire Risk Components

Myung-Geun Lee***, Jong-Yong Wang*, Hyoung-Seog Choi*, Dong-Hyun Tae*,
Hyeong-Ju Han**, 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 이슈로 부각되고 있는 가운데, 유엔 기후변화협약에 따라 탄소배출의 규제가 강화되고 있는 실정이다. 이에 따라, 탄소배출을 감소시킬수 있는 신재생에너지원인 풍력 터빈발전기의 설치용량이 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 설비금액과 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.

1. 서론

최근 에너지 위기와 환경문제가 전 세계적인 이슈로 부각되고 있는 가운데 유엔 기후변화협약에 따라 탄소배출의 규제가 강화되고 있는 실정이다. 이에 따라, 전 세계적으로 탄소 중립을 실현하기 위한 중요한 요소 중 하나로, 풍력 터빈발전기의 용량이 증가하고 있는 실정이다. 하지만, 풍력 터빈발전기의 설비용량이 증가함에 따라 고장 횟수도 증가하며, 화재 및 비화재 사고에 따라 각각의 위험과 대응방법이 다르기 때문에, 이에 따른 고장원인 분석이 요구되고 있다. 현재 풍력 발전기의 위험 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 적절하게 나타내지 않을 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하고 효율성을 개선하기 위하여 정량적인 개념을 이용한 새로운 방식의

FMEA를 개발하고, 잠재적 고장 원인에 따른 화재 사고와 비 화재 사고를 구분하여 위험성 우선순위(risk priority number, RPN)를 도출한다. 이에 따라, 기존 FMEA 방식에 정량적인 개념을 도입하고 화재 위험 요소의 위험성 우선순위의 적합성과 신뢰성이 향상됨을 알 수 있었다.

2. 구성요소별 고장 모드 및 화재 위험 요소 분석

2.1 풍력 터빈발전기의 구성

풍력 터빈발전기는 일반적으로 Fig. 1과 같이 회전날개(blade), 기어박스(gear box), 발전기(generator), 요잉 시스템(yawing system), 너셀(nacelle), 브레이크(brake system), 타워(tower), 전력변환장치 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 연

결된다. 한편, 타워는 풍력발전기를 지지하는 구조물이며, 전기구성품은 발전기에서 생산된 전기를 변환하는 변압기 및 컨버터와 컨트롤러 등으로 구성된다.

2.2 풍력 터빈발전기의 화재 위험 요소 분석

풍력 터빈발전기의 고장모드는 다양한 원인으로 비정상적인 동작 및 환경적인 요인에 의하여 발생할 수 있다. 고장모드는 일반적으로 화재, 진동, 소음, 속도제어 불량, 일정 출력 유지 불량 등으로 분류되며, 주로 시스템 내에서 발생한 문제와 기기 및 부품의 고유특성의 변화 및 결합 등의 원인으로 발생함을 알 수 있다. 그 중, 화재 위험 요소로는 표 1과 같이, 허브, 베어링, 유압모터, 어큐뮬레이터, 전원, 기어, 발전기, 변압기등으로 나타난다.

[표 1] 풍력 터빈발전기의 고장 모드 및 화재 원인

구성요소	잠재적 고장모드	잠재적 고장원인
블레이드 및 피치시스템	화재, 진동, 출력저하	허브 고장, 베어링 고장
	화재, 피치 회전 불가	유압 모터 고장, 과압력, 어큐뮬레이터 고장
	전원 투입 및 차단 불가, 화재	낙뢰보호설비 고장, 리미트 스위치 고장, 주전원 및 보조전원 고장
	화재, 진동, 소음, 화재	비정상 필터, 불량 윤활유, 윤활유 때
기어박스	화재, 불꽃, 소음, 진동, 속도제어 불가	비정상 진동, 접촉, 피팅, 열화, 설계 불량, 오프셋, 기어 내 균열
	화재, 소음, 진동, 속도저하	비정상 진동, 핀 부식, 연마 마모, 피팅
발전기	과열, 화재, 진동, 발전 정지	제한온도 초과 및 센서고장, 비정상 진동, 비정상 계측기, 동기화 실패, 철심 파손, 동작 실패
	화재, 소음, 진동, 속도저하	비대칭, 구조적 결함, 비정상 진동
	화재, 누전, 유도 고장	계측기 고장, 전선 결함, 누전
전기구성품	화재, 폭발	변압기 고장

3. 풍력 터빈발전기의 위험도 우선순위 평가를 위한 가중치 적용 방안

3.1 심각도의 가중치 적용

기존의 심각도는 전문가의 주관적인 판단과 경험치를 기반으로 평가하기 때문에, 이와 같은 문제점을 보완하기 위하여, 가중치를 적용한 심각도를 식 (1)~식 (3)과 같이 산정한다. 여기서, 식 (1)은 각 구성요소별 설비비용 비율(C_i)을 나타내는

데, 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 환산한 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 합인 값으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 설비비용과 정지시간의 가중치는 지수함수의 승수에서 0 ~ 1의 값으로 산정한다.

$$C_i = \frac{C_{comp}}{C_{total}} \tag{1}$$

$$T_h = \frac{t_d \times 24}{10^3} \tag{2}$$

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

여기서, C_i : 풍력 터빈발전기 전체 설비비용에서 각 구성요소의 설비비용 비율, C_{comp} : 구성요소별 설비비용, C_{total} : 풍력 터빈발전기 전체 설비비용, T_h : t_d 를 10^3 [h] 기준으로 환산한 값, t_d : 고장 시 풍력 터빈발전기의 정지시간[day], S'_{comp} : 각 구성요소 별 가중치를 고려한 심각도, S_{comp} : 각 구성요소 별 기준 심각도

3.2 발생도의 가중치 적용

기존의 발생도(O_{comp})는 운용시간에 따른 구성요소의 열화율이 고려되어 있지 않으므로, 위험도 우선순위의 신뢰성에 악영향을 끼칠 수 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 운용시간에 따른 고장률을 시스템의 신뢰성을 나타내는 비신뢰도(non-reliability) 함수를 바탕으로 식 (4)와 같이 나타낸다.

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

여기서, $F(t_n)$: 각 구성요소별 운용시간에 따른 고장률, λ : 각 구성요소별 일정시간 후의 고장률, t_n : 운용시간

3.3 가중치를 적용한 새로운 RPN 평가식

상기의 가중치를 적용한 심각도(S'_{comp})와 발생도(O'_{comp})를 바탕으로 가중치를 적용한 새로운 RPN (RPN')은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 즉, RPN' 은 제안한 심각도와 발생도를 바탕으로 기존의 검출도를 고려하여

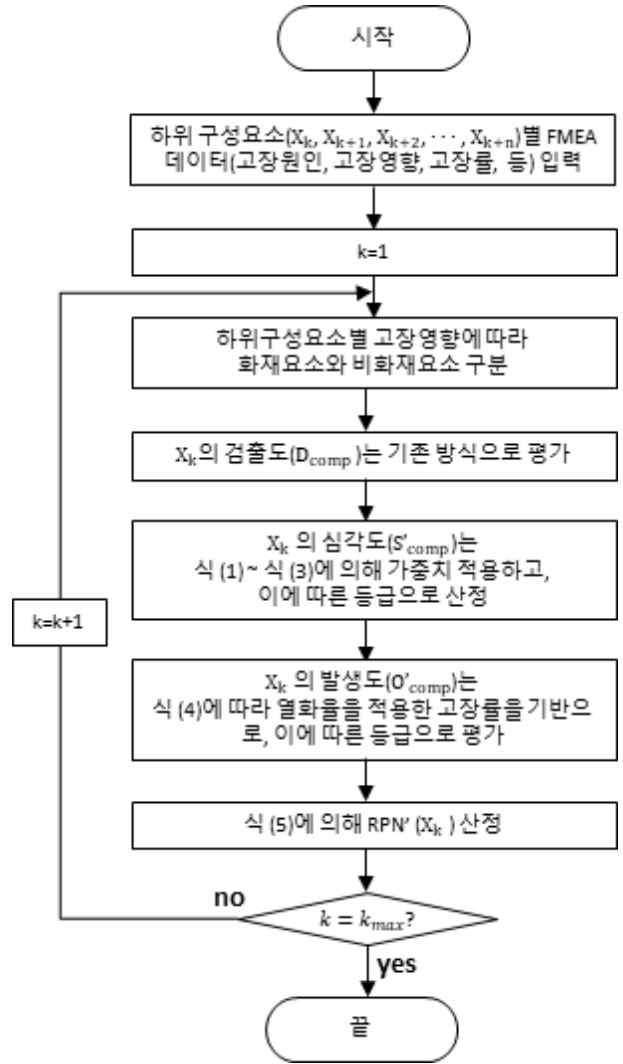
산정한다. 여기서, 심각도는 설비비용과 정지시간의 가중치를 적용한 등급으로 산정하고, 발생도는 운용시간에 따른 고장률을 반영하여 등급 자체를 재조정하여 산정한다.

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

여기서, RPN' : 새로운 위험성 우선순위(risk priority number), S'_{comp} : 각 구성요소 별 가중치를 고려한 심각도, O'_{comp} : 각 구성요소 별 가중치를 고려한 발생도, D_{comp} : 각 구성요소 별 기존 검출도

3.4 가중치를 적용한 위험도 우선순위 평가 알고리즘

가중치 적용방안을 바탕으로 풍력 터빈발전기의 가중치를 적용한 위험도 우선순위 평가 알고리즘을 그림 1과 같이 제시한다. 이에 대한 상세한 절차를 나타내면 다음과 같다. 항목의 잠재적 고장과 고장 원인을 식별하고 고장 원인의 영향, 고장률 및 고장 감지 유무를 확인한다. 심각도는 고장 원인별 피해액을 산정하고 그에 따른 가중치를 적용하여 새로운 심각도(S'_{comp})를 산정한다. 또한, 발생도를 산정하기 위하여 원인의 고장률은 분석하고 운용시간에 따른 불신뢰도의 공식을 이용한다. 여기서 일반적으로 풍력 터빈발전기의 설계 수명을 20년으로 상정하기 때문에 고장률을 산정하기 위해 t_n 는 43,800h(5년)씩 증가시키면서 산정하며 최대 175,200h(20년)으로 정한다. 그리고 고장 감지 알고리즘에 따라 고장 발생 시 검출 유무를 판단하여 검출도(D)를 평가한다. 그 다음 세 가지 요소(S'_{comp} , O'_{comp} , D)를 곱하여 위험성 우선순위를 산정하고 각 산정된 위험성 우선순위에 따라 랭크를 평가한다.



[그림 1] 제안한 위험도 우선순위 평가 알고리즘

[표 2] 구성요소별 설비비용 및 다운타임

구성요소	하위요소	설비비용 [%]	정지시간 (day)
블레이드 및 피치시스템	허브	15.01	12.41
	유압시스템	2.21	0.75
	경보설비	0.38	0.25
	윤활시스템	2.21	0.75
기어박스	베어링	0.02	0.33
	브레이크	0.39	0.33
발전기	회전자 및 고정자	9.48	1.00
	전기시스템	1.58	0.58
전기구성품	변압기	11.06	1.08
	컨버터	2.05	0.58

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 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 표 2와 같다. 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.

4.2 화재위험 요소에 의한 우선순위 평가

4.2.1 기존 방식에 의한 RPN 산정

상기의 시뮬레이션 조건에 따라 기존 방식에 의한 화재위험 요소별 RPN을 평가하면 표 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 블레이드 및 피치시스템의 4개의 하위요소인 허브, 경보설비, 유압시스템, 윤활시스템의 RPN은 4개의 하위요소에 대하여 각각 15, 12, 24, 24의 값으로 산정된다. 이에 따라, 블레이드 및 피치시스템의 4개의 하위요소인 허브, 경보설비, 유압시스템, 윤활시스템의 위험도 우선순위는 각각 7, 4, 8, 4위의 순위로 평가됨을 알 수 있다.

[표 3] 기존 방식에 의한 RPN 특성

구성요소	하위요소	S	O	D	기존 RPN	순위
블레이드 및 피치시스템	허브	5	3	1	15	7
	유압시스템	4	3	2	24	4
	경보설비	4	3	1	12	8
	윤활시스템	4	2	3	24	4
기어박스	베어링	3	3	2	18	6
	브레이크	3	2	2	12	8
발전기	회전자 및 고정자	5	1	2	10	10
	전기시스템	5	5	3	75	1
전기구성품	변압기	5	3	4	60	2
	컨버터	5	3	4	60	2

4.2.2 제안 방식에 의한 RPN 산정

가중치를 적용한 위험도 우선순위 평가 알고리즘에 따라 화재위험 요소별 새로운 RPN(RPN')을 산정하면 표 5와 같다. 여기서, 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 위험도 우선순위는 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.

[표 4] 제안 방식에 의한 RPN 특성

구성요소	하위요소	S	O	D	RPN'	순위
블레이드 및 피치시스템	허브	9.0	4	1	36.0	5
	유압시스템	5.8	3	2	34.7	6
	경보설비	5.7	3	1	17.1	9
	윤활시스템	5.8	3	3	52.0	4
기어박스	베어링	4.3	3	2	25.5	8
	브레이크	4.3	3	2	25.6	7
발전기	회전자 및 고정자	7.7	1	2	15.5	10
	전기시스템	7.2	4	3	86.4	3
전기구성품	변압기	7.9	3	4	94.3	2

	컨버터	7.2	4	4	115.7	1
--	-----	-----	---	---	-------	---

5. 결 론

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. 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 알고리즘이 적절하게 반영됨을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20213030020260)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

참고문헌

[1] 이명근, 한형주, 유영천, 김윤호, 노대석, “해상풍력용 터빈발전기의 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