

풍력 터빈발전기의 화재 및 비화재 고장요인에 따른 위험성 우선순위 평가에 관한 연구

이명근^{*,**}, 한형주^{**}, 김신영^{**}, 유영천^{**}, 노대석^{*}

^{*}한국기술교육대학교, ^{**}한국전기산업연구원

e-mail:liferoot@erik.re.kr

A Study on the Risk Priority in Wind Turbine Generator by fire and non-fire failure factors

Myung-Geun Lee^{*,**}, Hyeong-Ju Han^{**}, Shinyoung Kim^{**},
Young-Cheon Yu^{**}, Dae-Scok 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(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, 실제 위험성 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 위험성 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 비화재 사고를 구분하여 위험성 우선순위(risk priority number, RPN)를 도출한다. 이에 따라, 기존 FMEA 방식에 정량적인 개념을 도입하고 화재 및 비화재를 구분함으로써 위험성 우선순위 평가의 적합성이 개선되고 신뢰성이 향상되어, 본 논문에서 제안한 방식의 유효함을 확인하였다.

2. 기존 위험성 우선순위 평가의 특성

고장모드 및 영향 분석(FMEA)기법은 전형적으로 사용되는 정성적이고 귀납적인 분석방법중 하나이며, 이로써 얻어지는 결과는 제품의 수명을 늘리기 위해 부품 및 설계의 어떤 부분을 개선해야 하는지 결정하는데 유용한 정보를 얻을 수 있다. 즉, FMEA를 통한 RPN 평가는 고장의 위험을 분석하고 적절한 개선대책을 도출할 수 있는 이점을 가지고 있으며 식 (1)과 같이 각 요소의 점수를 곱하여 산정한다. 여기서, 기존의 FMEA 방식에서 위험성 우선순위 평가를 위하여 심각

도와 발생도의 기준은 각각 표 1과 표 2로 나타낼 수 있다. 먼저, 심각도의 기준은 평가하는 전문가의 지식과 경험치에 기반하여 운영에 미치는 정도만을 파악하여 산정되고, 발생도는 각 고장 요인에 따른 고장확률만을 기반으로 평가되기 때문에, 실제 위험성 우선순위가 적절하게 나타내지 않을 가능성을 가지고 있다. 또한, 화재 및 비화재 사고에 따라 각각의 위험도와 대응방법이 다르기 때문에, 이에 따른 고장원인 분석이 필요함을 알 수 있다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 본 논문에서는 화재 및 비화재 사고의 잠재적 원인을 구분하여, 피해액을 고려한 심각도와 운용시간을 고려한 발생도의 산출 방안과 이에 따른 가중치 적용방안을 제안한다.

[표 1] 심각도(severity) 기준

순위	기 준
1	사소한 고장
2	시스템 성능의 저하
3	부품 또는 시스템 성능의 저하
4	시스템 정지 가능성
5	시스템 정지

[표 2] 발생도(occurrence) 기준

순위	기 준 [failure/10³h]	
1	고장 발생할 가능성 거의 없음	고장확률 ≤ 0.001
2	작은 확률로 고장 (예: 2달에 한번)	0.001 < 고장확률 ≤ 0.01
3	보통 확률로 고장 (예: 1달에 한번)	0.01 < 고장확률 ≤ 0.1
4	높은 확률로 고장 (예: 2주에 한번)	0.1 < 고장확률 ≤ 0.2
5	매우 높은 확률로 고장 (예: 1주에 한번)	0.2 < 고장확률

$$RPN = S \times D \times O \quad (1)$$

여기서, RPN : 위험성 우선순위, S : 심각도, O : 발생도, D : 검출도

3. 위험성 우선순위 평가를 위한 가중치 적용 방안

3.1 심각도의 가중치 적용 방안

기존의 심각도는 전문가의 지식과 경험치에 기반하여 평가하기 때문에 전문가의 판단에 순위가 변할 수 있다는 단점을 가진다. 따라서, 새로운 FMEA에서 심각도(S'_{comp})는 식 (2)

와 같이 기존 심각도(S)를 피해액비에 1을 더한 값만큼 곱하여 계산하는 방식을 제안한다. 피해액비(x)에 따른 승수로 차이가 나기 때문에 기존 심각도의 순위보다 확실한 구분이 가능하며 정량적인 요소로 인해 신뢰성이 증가한다. 여기서, 피해액비는 식 (3)과 같이 풍력 터빈발전기의 설치비용과 고장 시 수리비용의 비율로 나타낸다.

$$S'_{comp} = S_{comp}^{1+x+\frac{t_d}{40}} \quad (2)$$

여기서, S'_{comp} : 각 컴포넌트 별 개선된 심각도 결과 값, S_{comp} : 각 컴포넌트 별 기존 심각도, x : 고장발생 시 피해액비, t_d : 고장 시 풍력 터빈발전기 정지시간

3.2 발생도의 가중치 적용 방안

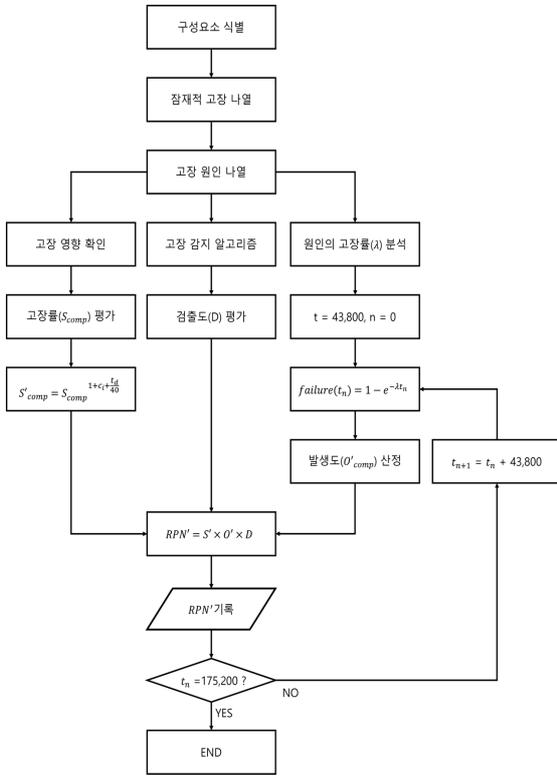
기존의 발생도는 고장 경험에 따른 일정 시간에 대한 고장수에 의해 결정하고 있다. 이것을 기준으로 하여 순위를 설정하였을 경우 시간이 흐른 후의 변경되는 순위는 알 수 없다. 운용시간에 따라 변화하는 고장률을 순위 기준으로 정하기 위하여 식 (3)와 같이 신뢰도 함수를 이용하여 시간에 따른 고장률을 산정하고 이에 따라 새로운 발생도(O'_{comp})의 순위를 정한다.

$$failure(t_n) = 1 - e^{-\lambda t_n} \quad (3)$$

여기서, $failure(t_n)$: 시간에 따른 고장률, λ : 고장률의 일정값, t_n : 운용시간

3.3 제안한 위험도 평가 알고리즘

풍력 터빈발전기의 평가 알고리즘은 그림 2와 같다. 먼저 항목들의 기능을 식별한다. 항목의 잠재적 고장과 고장 원인을 식별하고 고장 원인의 영향, 고장률 및 고장 감지 유무를 확인한다. 심각도는 고장 원인별 피해액비를 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 2] 제안한 위험 우선순위 산정 알고리즘

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제안한 알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, 설치비용과 고장 시 정지 시간을 표 3과 같이 상정한다. 여기서, 정지시간은 수리에 필요한 시간이며, 접근성 및 기상 조건에 의해 발생하는 대기시간은 포함하지 않는다. 또한, 기존 심각도가 1인 경우 피해액비와 무관하게 결과값이 1로 동일하므로 상정하지 않는다. 또한, 분석한 풍력 터빈발전기의 구성요소 별 고장률을 적용하여 제안한 알고리즘에 따라 S'_{comp} , O'_{comp} , D 를 산정하여, 여기서 발생도는 일반적인 풍력 터빈발전기의 수명인 20년으로 상정하여 RPN은 평가한다.

<표 3> 시뮬레이션 조건

구성요소	하위 구성요소	설치비용 (%)	정지시간 (일)
블레이드 및 피치시스템	블레이드	15.26	3
	유압시스템	1.80	1
	경보 설비	3.00	1
	운환시스템	0.34	1
	피치시스템	3.75	3

기어박스	기어	18.11	6.1
	베어링	1.45	1
	브레이크	2.50	6
발전기	회전자 및 고정자	0.30	3.9
	베어링	1.45	1
	전기시스템	11.86	1.6
요잉 시스템	드라이브 및 베어링	2.10	2.2
전기구성품	변압기	6	1.7
	센서	6	1.7
	컨버터	6	1.7
타워		15.06	5.7

4.2 제안한 위험도 평가 결과 분석

4.2.1 잠재적 화재위험 요소 RPN 평가 결과

상기의 시뮬레이션 조건에 따라 화재위험 요소별 RPN 평가의 결과를 나타내면 표 4와 같다. 유압시스템, 운환시스템의 운환류 때, 베어링의 경우 기존 4위에서 각 8, 9, 10위로 세분화되어 변경되고, 전기시스템은 기존 1위, 컨버터는 3위에서 각 3위와 2위로 변경되었다. 변압기는 새로운 rank가 기존 rank가 동일하다. 이와 같이 rank가 동일한 요소들의 경우 세분화되고 시간이 지남에 따라 rank가 변경됨을 확인하였다.

<표 4> 화재위험 고장원인별 RPN rank 산정결과

구성요소	고장 원인	기존 rank	새로운 rank
유압시스템	유압 모터 고장	4	8
운환시스템	비정상 필터	11	13
	운환류 때	4	9
기어	톱니 열화	11	7
	톱니 설계 불량	20	19
	기어 내 과도 온도	11	14
베어링	비정상 진동	25	26
	핀 부식	19	22
	연마 마모	10	12
	피팅	25	26
브레이크	브레이크 고장	15	18
회전자 및 고정자	과열	20	25
	비정상 진동	20	23
베어링	구조적 결함	4	10
전기시스템	누전	1	3
변압기	변압기 고장	1	1
컨버터	컨버터 고장	3	2

4.2.2 잠재적 비화재위험 위험도요소 RPN 평가 결과

비화재위험 요소별 RPN 평가의 결과를 나타내면 표 5와 같다. 전기시스템의 경우 기존 2위에서 5위로, 베어링의 경우 5위에서 7위로, 회전자 및 고정자가 10위에서 15위로 변경되며, 다른 요소들의 rank가 상승하였다. 컨트롤러의 경우 새로운 rank가 기존 rank가 동일하게 나타났다. 화재요소의 RPN rank와 마찬가지로 비화재요소들의 rank도 시간이 지남에 따라 변경됨을 확인하였다.

<표 5> 비화재위험 고장원인별 RPN rank 산정결과

구성요소	고장 원인	기존 rank	새로운 rank
윤활시스템	불량 윤활류	14	11
기어	비정상 진동	3	2
베어링	비정상 진동	12	13
브레이크	변속기 고장	15	14
회전자 및 고정자	동작실패	10	15
베어링	비정상 진동	6	7
전기시스템	계측기 고장	2	5
컨트롤러	컨트롤러 실패	1	1
센서	고장 검출 불가	3	3

5. 결 론

풍력 터빈발전기의 구성요소별 위험성 우선순위 평가의 신뢰성을 향상시키기 위해 기존 FMEA 방식의 심각도(S)와 발생도(O)에 피해액과 운용시간의 개념을 도입하여 새로운 심각도(S'_{comp})과 발생도(O'_{comp})를 제안한 식에 따라 계산하여 위험성 우선순위를 재산정한다. 심각도는 설비비용(C_i)과 고장 시 정지시간(t_d)의 개념을 도입하여 제안하고, 발생도는 고정된 고장률에 운용시간의 개념을 도입하여 운용 년수에 따라 고장률이 증가하여 시간에 따라 발생도가 변경되도록 하였다. 또한, 잠재적 고장원인에 따라 화재원인과 비화재원인을 구분하였다. 이에 따라, 기존 FMEA 방식에 정량적인 개념을 도입하고 화재 및 비화재를 구분함으로써 위험성 우선순위 평가의 적합성과 신뢰성이 향상되어, 본 논문에서 제안한 방식의 유용함을 확인하였다.

감사의 글

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

참고문헌

[1] 이명근, 한형주, 유영천, 김윤희, 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