

풍력 터빈발전기의 위험성 우선순위 평가를 위한 가중치 적용에 관한 연구

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

^{*}한국기술교육대학교, ^{**}한국전기산업연구원

e-mail:liferoot@erik.re.kr

A Study on the Determination of Weighting Factor for Risk Priority in Wind Turbine Generator

Myung-Geun Lee^{*,**}, Hyeon-Ju Han^{**}, Shin-Young kim^{**},
Young-Cheon Yu^{**}, Dae-Seok Rho^{*}

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

^{**}Electrical Industry Research Institute of Korea

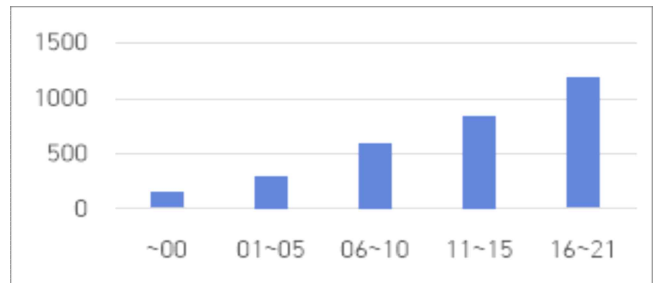
요 약

최근, 에너지 위기와 환경문제가 전 세계적인 이슈로 부각되고 있는 가운데, 유엔 기후변화협약에 따라 탄소배출의 규제가 강화되고 있는 실정이다. 이에 따라, 탄소배출을 감소시킬 수 있는 신재생에너지원인 풍력 터빈발전기의 설치 용량이 전 세계적으로 증가하는 추세이다. 하지만, 풍력 터빈발전기의 단위 설비용량이 증가함에 따라 고장 횟수도 증가하고 있어, 이를 해결하기 위한 고장원인 분석이 요구되고 있다. 현재 풍력 터빈발전기의 고장원인을 분석하기 위한 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, 피해액을 고려한 심각도(severity)와 운용시간을 고려한 발생도(occurrence)의 산출 방안을 제안한다. 제안한 평가 방안을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 심각도는 피해액을 고려하여 기존의 방법보다 세분화되고, 발생도도 기존의 고장률에 운용시간을 고려하여 적절하게 평가된다. 이에 따라, 기존 FMEA 방식에 정량적인 개념을 도입하여 각 위험성 우선순위의 적합성이 개선되고 신뢰성이 향상되어, 본 논문에서 제안한 방식의 유용함을 확인하였다.

1. 서 론

최근 에너지 위기와 환경문제가 전 세계적인 이슈로 부각되고 있는 가운데 유엔 기후변화협약에 따라 탄소배출의 규제가 강화되고 있는 실정이다. 이에 따라, 탄소배출을 줄일 수 있는 신재생에너지원인 풍력 터빈발전기가 각광받으며, 전 세계적으로 풍력 터빈발전기의 용량이 증가하는 추세이다. 하지만, 풍력 터빈발전기의 설비용량이 증가함에 따라 풍력 터빈발전기의 고장 횟수도 증가하고 있다. 즉, 전 세계의 연도별 풍력 터빈발전기의 고장빈도수는 그림 1과 같이 나타낼 수 있는데, 미래에는 증설될 풍력 터빈발전기 용량에 비례하여 고장빈도수도 이에 따라 증가할 전망이다. 따라서, 고장빈도수의 증가예상에 따라 풍력 터빈발전기의 고장 원인 분석이 매우 중요한 부분이다. 현재 풍력 발전기의 위험 및 신뢰성 분석을 위해 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

적절하게 나타내지 않을 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하고 효율성을 개선하기 위하여 정량적인 개념을 이용한 새로운 방식의 FMEA를 개발한다. 또한, 개발한 방식과 기존 FMEA의 결과를 비교하여 유효한지 본 논문에서 제시한 산출 방식의 유용함을 확인한다.



[그림 1] 전 세계 연도별 풍력 터빈발전기 고장 횟수

2. 기존 위험성 우선순위 평가의 특성

고장 영향 분석(Failure Mode and Effects Analysis,

FMEA) 프로세스는 1949년 미군에서 개발한 시스템으로 시스템이나 서브시스템의 위험분석을 실시하기 위하여 일반적으로 사용되는 전형적인 정성적, 귀납적 분석기법이다. 이 기법의 결과는 제품의 운용수명을 증가시키기 위하여 부품과 설계의 어느 부분이 개선되어야 하는가를 결정하는데 아주 유용하다. FMEA를 통한 위험성 우선순위(Risk Priority)의 평가는 고장의 위험을 평가하여 적합한 개선대책을 세울 수 있다. 즉, 기존의 FMEA 방식에서는 위험성 우선순위 평가를 위하여 심각도, 발생도를 표 1 ~ 표 2의 기준에 따라 각 요소별 점수를 산출하고 식 (1)과 같이 각 요소의 점수를 곱하여 산정한다. 여기서 심각도의 기준은 평가하는 전문가의 지식과 경험치에 기반하여 평가하고, 이에 따라 운영에 미치는 정도를 파악하여 점수를 산정한다. 또한, 발생도는 각 고장 요인에 따른 고장확률을 기반으로 평가되기 때문에 실제 고장이 발생하지 않거나 고장이 적은 경우 데이터를 구하기가 힘들고 운용시간에 따라 고장률은 증가하지만 이를 고려하지 않고 평가하기 때문에 운용시간이 지날수록 오차가 생길 수밖에 없다.

[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/10 ³ h]
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

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

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_{mg})는 식 (2)와 같이 기존 심각도(S)를 피해액비에 1을 더한 값만큼 제공하여 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.

$$S_{mg} = S^{1+x} \quad (2)$$

여기서, S_{mg} : 새로운 심각도 결과값, S: 기존 심각도 순위, x: 고장발생 시 피해액비

$$x = \frac{\text{고장 시 수리비용}}{\text{풍력 터빈발전기 설치비용}} \quad (3)$$

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 (4)와 같이 신뢰도 함수를 이용하여 불신뢰도를 계산한다.

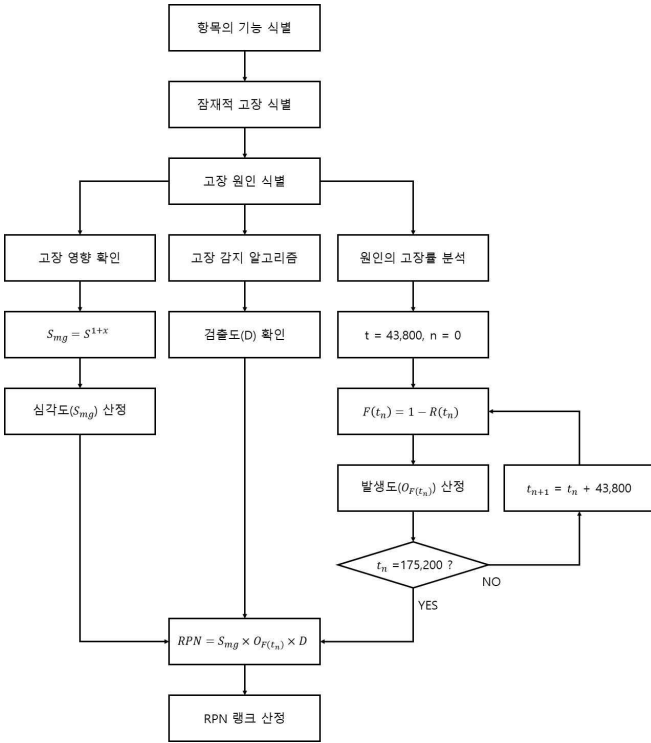
$$O_{mg} = F(t_n) = 1 - R(t_n) = 1 - e^{-\lambda t_n} \quad (4)$$

여기서, $F(t_n)$: 불신뢰도, $R(t_n)$: 신뢰도함수, λ : 고장률의 일정값, t: 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_{mg})를 산정한다. 또한, 발생도를 산정하기 위하여 원인의 고장률은 분석하고 운용시간에 따른 불신뢰도(F(t))의 공식을 이용한다. 여기서 일반적으로 풍력 터빈발전기의 설계 수명을 20년으로 상정하기 때문에 고장률을 산정하기 위해 t는 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_{mg} , O_{mg} , 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, 표 3과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 기존 심각도는 15이며 피해액비는 식 3에 따라 최소 0에서 최대 1의 범위를 갖는다. 단, 심각도가 1인 경우 피해액비와 무관하게 결과값이 1로 동일하므로 상정하지 않는다. 또한, 분석한 풍력 터빈발전기의 구성요소 별 고장률을 적용하여 제안한 알고리즘에 따라 위험성 우선순위를 산정한다.

<표 3> 시뮬레이션 조건

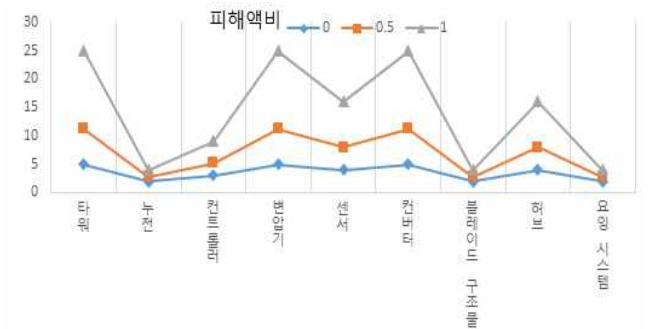
구성요소	심각도	고장률
타워	4	1.350E-04
누전	4	1.060E-04
컨트롤러	3	6.210E-05
변압기	3	1.010E-05
센서	3	4.700E-05
컨버터	3	2.590E-05
블레이드 구조물	3	1.260E-05

구성요소	심각도	고장률
허브	3	2.740E-05
요잉 시스템	3	2.730E-05

4.2 제안한 위험도 평가 결과 분석

4.2.1 심각도(S_{mg}) 산정 결과 분석

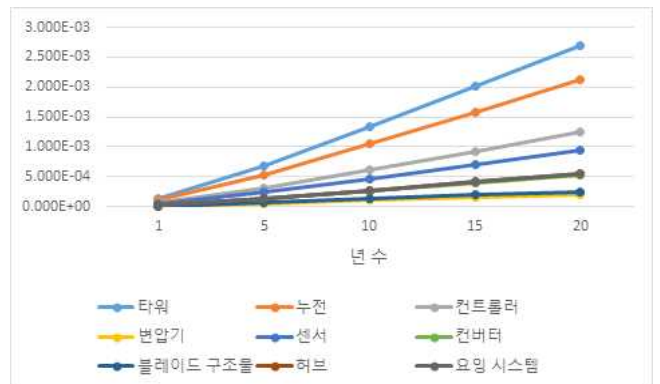
시뮬레이션 조건에 따라 심각도(S_{mg})를 산정한 결과는 그림 3과 같다. 계류 서브시스템, 타워, 플로팅 파운데이션, 회전자 및 고정자, 변압기, 컨버터 등 기존 심각도가 5인 구성요소들은 피해액비 x가 최대치인 1인 경우 25까지 증가하여 0.5인 경우와 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다.



[그림 3] S_{mg} 시뮬레이션 결과

4.2.2 운용시간에 따른 발생도(O_{mg}) 산정 결과 분석

구성요소 별 식 4를 이용하여 산정한 결과는 그림 4와 같다. 타워의 경우 초기 고장률은 1.35E-04로 비교적 낮지만 20년 후에는 2.696E-03으로 증가하고 누전의 고장률은 1.060E-04에서 2.118E-03으로, 컨트롤러는 6.210E-05에서 1.241E-03으로 증가한다. 마찬가지로 다른 구성요소에서도 운용시간에 따라 증가함을 알 수 있다. 이에 따라, 발생도를 재평가하면 표 4와 같이 나타난다. 계류 서브시스템, 타워 플로팅 파운데이션, 유압오일, 누전, 컨트롤러의 고장률은 5년 이후부터 발생도가 5로 증가하고, 그 외의 구성요소에서도 연수가 증가할수록 발생도가 상승함을 알 수 있다.



[그림 4] 고장률 산정 결과

<표 4> O_{mg} 시뮬레이션 결과

구성요소	심각도				
	초기	연수			
		5	10	15	20
타워	4	5	5	5	5
누전	4	5	5	5	5
컨트롤러	3	5	5	5	5
변압기	3	3	4	4	5
센서	3	5	5	5	5
컨버터	3	4	5	5	5
블레이드 구조물	3	3	4	4	5
허브	3	4	5	5	5
요잉 시스템	3	4	5	5	5

4.2.3 제안한 위험도 평가 결과 분석

본 논문에서 제안한 위험성 우선순위 방식을 시뮬레이션한 결과, 구성요소의 제안한 위험성 우선순위가 기존 위험성 우선순위의 수치보다 차이가 생겨 위험 순위를 확연하게 구분할 수 있고, 운용시간이 지남에 따라 위험우선순위가 변경될 수 있음을 확인하였다. 컨버터와 센서를 비교한 경우, 각 초기 위험성 우선순위는 75와 54였지만 20년 후의 위험성 우선순위는 75와 150으로 위험우선순위가 변경되었다.

<표 5> 제안한 위험성 우선순위 시뮬레이션 결과

구성요소	기존 위험성 우선순위	제안한 위험성 우선순위	
		초기	20년
타워	16	64	100
누전	16	64	100
컨트롤러	6	18	50
변압기	9	27	75
센서	9	27	75
컨버터	15	75	75
블레이드 구조물	36	108	300
허브	27	81	225
요잉 시스템	18	54	150

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_{mg})과 발생도(O_{mg})를 제안한 식에 따라 계산하여 위험성 우선순위를 재산정한다. 심각도는 기존 1~5의 범위에서 피해액(x)의 개념을 도입하여 제안한 심각도는 1~25의 범위를 가지도록 변경했다. 발생도는 고정된 고장률에 운용시간의 개념을 도입하여 진행 연수에 따라 고장률이 증가하여 시

간에 따라 발생도가 변경되도록 하였다. 이에 따라, 기존 FMEA 방식에 정량적인 개념을 도입하여 각 위험성 우선순위의 적합성이 개선되고 신뢰성이 향상되어 본 논문에서 제안한 방식의 유용함을 확인하였다.

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 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