

해상풍력용 터빈발전기의 구성요소별 위험성 우선순위 평가에 관한 연구

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

^{*}한국기술교육대학교

^{**}한국전기산업연구원

e-mail: liferoot@erik.re.kr

A Study on the Assessment of Risk Priority Number(RPN) by Components of Offshore Wind Turbine Generators

Myung-Geun Lee^{*,**}, Hyeon-Ju Han^{**}, Young-Cheon Yu^{**}, Yun-Ho Kim^{*}, Dea-Seok Rho^{*}

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

^{**}Electrical Industry Research Institute of Korea

요약

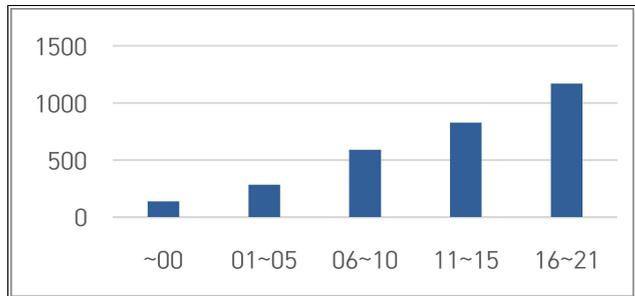
최근 에너지 위기와 환경문제가 전 세계적인 이슈로 부각되고 있으며, 이에 따라 유엔 기후변화협약에 따라 탄소배출의 규제가 강화되고 있다. 이에 따라, 전 세계적으로 풍력 터빈발전기의 용량이 증가하는 추세이지만, 늘어나는 용량에 비례하여 풍력터빈의 고장률도 상승하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 해상풍력 터빈발전기의 고장을 사전에 방지하고 정상상태 운전을 유지하기 위하여 고장모드 및 영향분석(FMEA)를 통하여 위험성 우선순위(RPN)의 평가방안을 제시한다. 여기서, RPN 평가를 위하여 심각도(severity), 발생도(occurrence), 검출도(detection)에 대하여 판정기준에 따라 각 요소 별 점수를 산출하고 이를 곱하여 RPN을 산정한다. 또한, 관련 결과를 안전점검 시 참고하여 안전점검 체크리스트에 추가하고, 이에 따라 유지보수를 진행할 경우 해상풍력발전기의 고장률을 감소시키는 효과를 기대할 수 있다.

1. 서론

최근 에너지 위기와 환경문제가 전 세계적인 이슈로 부각되고 있으며, 이에 따라 유엔 기후변화협약에 따라 탄소배출의 규제가 강화되고 있다. 이에 따라, 전 세계적으로 풍력 터빈발전기의 용량이 증가하는 추세이다. 하지만, 늘어나는 용량에 비례하여 풍력 터빈발전기의 고장 횟수도 증가하고 있다. 전 세계의 연도별 풍력 터빈발전기의 고장빈도수는 [그림 1]과 같이 나타난다.

늘어날 풍력 터빈발전기 용량에 비례하여 고장빈도수도 더욱 증가할 전망이다. 따라서 본 논문에서는 풍력터빈의 고장을 사전에 방지하고 정상상태 운전을 유지하기 위하여 고장모드 및 영향 분석(FMEA) 방식을 이용하여 각 구성요소의 고장률을 파악하고 이에 따라 RPN을 평가하여 각 구성요소별 위험성을 평가한다.

2. RPN 평가 방안



[그림 1] 전 세계 연도별 풍력 터빈발전기 고장 횟수

00년도 대비 16~21년에는 약 9배 증가한 수치이며, 미래에

2.1 FMEA를 통한 RPN 평가 개념

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 Number, RPN)의 평가는 고장의 위험을 평가하여 적합한 개선대책을 세울 수 있다.

2.2 RPN 평가 기준

RPN 평가를 위하여 심각도(severity), 발생도(occurrence),

검출도(detection)를 [표 1~3]의 기준에 따라 각 요소 별 점수를 산출하고 <식 1>과 같이 심각도, 발생도, 검출도를 곱하여 위험도를 산정한다. 또한, 산정된 RPN 값에 따라 위험성 순위를 평가한다. 여기서, 심각도는 고장모드 및 영향을 파악하여 운영에 미치는 정도를 파악하여 순위를 평가하고, 발생도는 FTA(fault tree Analysis)로 각 고장 요인과 고장확률을 나열하고 1,000시간당 고장률을 산정하여 평가한다. 또한, 검출도는 앞서 나열한 고장 요인과 실제 현장에서 사용하는 체크리스트를 비교 분석하여 검출 가능한 정도를 평가한다.

[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 |

[표 3] 검출도(detection) 기준

| 순위 | 기 준 |
|----|--------------|
| 1 | 검출될 확률 매우 높음 |
| 2 | 검출될 확률 높음 |
| 3 | 검출될 확률 보통 |
| 4 | 검출될 확률 낮음 |
| 5 | 검출될 확률 매우 낮음 |

$$RPN = S \times O \times D \quad <식 1>$$

3. 풍력 터빈발전기의 구성요소별 위험요인 분석

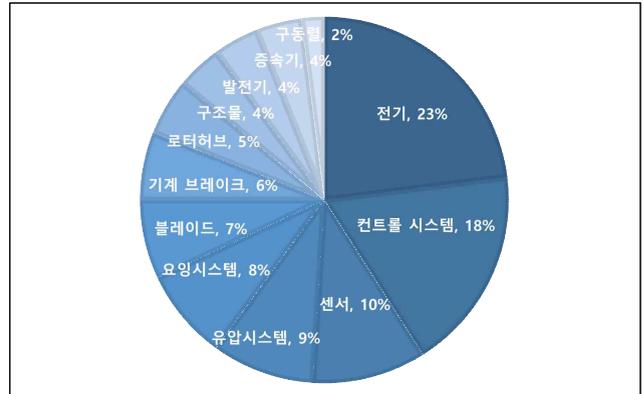
3.1 풍력 터빈발전기의 구성

풍력터빈은 풍력발전기 구조물 시스템과 풍력터빈 제어시스템으로 나뉜다. 구조는 바람에너지를 동력으로 변환시켜주는 블레이드, 3개의 블레이드를 연결하는 허브, 회전력을 증

속기에 전달하는 주축(main shaft), 회전 및 토크를 변환하는 증속기, 발전기, 제어/모니터링 시스템, 요잉 시스템, 피치시스템, 타워 등으로 이루어져 있다.

3.2 부품별 위험요인 분석

독일에서 10년간 1,500기의 풍력터빈의 운영자료를 바탕으로 한 풍력터빈에서의 부품별 고장률은 [그림 2]와 같다. 전기적인 고장이 23%로 가장 높고 컨트롤 시스템 18%, 센서 10%, 유압시스템 9% 등이다.



[그림 2] 부품별 고장비율

또한, 각 구성요소별 고장률에 따른 구성품의 고장률을 기준에 연구된 해상풍력 터빈발전기 바탕으로 하여 각 요소의 고장률을 포함배제의 원리(Inclusion-Exclusion principle)를 이용하여 [표 4]와 같이 산정하였다. 이에 따르면, 타워 등의 구조물의 고장률(3.727E-04 failure/hour)이 가장 높고 피치시스템(1.460E-04), 전기 구성품(1.458E-04), 발전기(1.383E-04), 블레이드(5.714E-05), 기어박스(4.987E-05), 요잉 시스템(2.730E-05), 스피드 트레인(9.500E-06)순 등이다.

[표 4] 각 구성요소 별 고장률

| 구조 | 고장률 [failure/hour] | 구성요소 | 고장률 [failure/hour] |
|--------|--------------------|-----------|--------------------|
| 지지 구조물 | 3.727E-04 | 계류 서브시스템 | 1.258E-04 |
| | | 타워 | 1.350E-04 |
| | | 플로팅 파운데이션 | 1.120E-04 |
| 피치시스템 | 1.460E-04 | 유압시스템 | 5.910E-05 |
| | | 경보 설비 | 5.198E-09 |
| | | 피치 각도 | 8.577E-11 |
| 기어박스 | 4.987E-05 | 유압 오일 | 6.170E-05 |
| | | 윤활 | 6.380E-06 |
| | | 기어 | 1.134E-05 |
| | | 베어링 | 3.215E-05 |

| 구조 | 고장률 [failure/hour] | 구성요소 | 고장률 [failure/hour] |
|---------|-----------------------|-----------|-----------------------|
| 발전기 | 1.383E-04 | 계측기 | 2.060E-05 |
| | | 전선 | 1.260E-07 |
| | | 누전 | 1.060E-04 |
| | | 회전자 및 고정자 | 4.619E-11 |
| | | 베어링 | 1.159E-05 |
| 스피드 트레인 | 9.500E-06 | 드라이브 트레인 | 7.220E-06 |
| | | 브레이크 | 2.280E-06 |
| 전기 구성품 | 1.458E-04 | 컨트롤러 | 6.210E-05 |
| | | 변압기 | 1.010E-05 |
| | | 센서 | 4.700E-05 |
| | | 컨버터 | 2.590E-05 |
| 블레이드 | 5.714E-05 | 블레이드 구조물 | 1.260E-05 |
| | | 허브 | 2.740E-05 |
| | | 베어링 | 5.250E-05 |
| 요잉 시스템 | 2.730E-05 | | |

| 구성요소 | 심각도 | 발생도 | 검출도 | RPN | Rank |
|----------|-----|-----|-----|-----|------|
| 드라이브 트레인 | 3 | 3 | 1 | 9 | 14 |
| 브레이크 | 4 | 2 | 3 | 24 | 4 |
| 컨트롤러 | 3 | 2 | 1 | 6 | 17 |
| 변압기 | 5 | 3 | 1 | 15 | 9 |
| 센서 | 4 | 3 | 1 | 12 | 11 |
| 컨버터 | 5 | 3 | 1 | 15 | 9 |
| 블레이드 구조물 | 2 | 3 | 4 | 24 | 4 |
| 허브 | 4 | 3 | 3 | 36 | 2 |
| 요잉 시스템 | 2 | 3 | 2 | 12 | 11 |

5. 결 론

해상풍력 터빈발전기의 구성요소별 RPN을 평가를 위해 FMEA 방식을 이용하였다. RPN은 심각도(S), 발생도(O), 검출도(D)를 곱하여 평가하였고 결과는 다음과 같다. 가장 높은 위험성을 가진 구성품은 계류 시스템이며 허브, 기어 등의 RPN은 30 이상으로 높게 평가되었다. 또한, 기어, 블레이드, 브레이크, 타워, 파운데이션, 회전자 및 고정자 등의 RPN은 20 이상으로 평가되었다. RPN이 높을수록 위험하다는 의미로 관련 구성요소에 대한 추가적인 유지보수 및 관리가 필요하다. 또한, RPN과 무관하게 심각도가 높은 구성요소에 대해서는 주의 깊은 유지보수가 요구된다. 따라서 안전점검 시 RPN과 심각도가 높은 구성요소에 대해 보안을 하면 고장률을 줄이는 효과를 기대할 수 있다.

4. 위험요인에 따른 RPN 평가 결과 분석

분석한 구성요소와 고장률을 바탕으로 RPN을 [표 5]와 같이 평가하였다. 고장 시 심각도가 높은 구성요소는 계류 시스템, 타워 파운데이션, 회전자 및 고정자, 컨버터 등으로 고장이 발생할 경우 풍력 터빈발전기의 운영이 중지될 수 있다. 또한, 고장이 발생할 확률이 높은 요소들은 계류 시스템, 타워, 파운데이션, 발전기의 누전등으로 나타났다. 그리고, 고장 원인과 체크리스트를 비교한 결과 계류 시스템, 기어, 전선, 회전자 및 고정자 등은 고장을 검출하기 힘든 것으로 나타났다. 이에 따라 RPN을 평가한 결과 계류 서브시스템 80, 허브 36, 기어 32로 위험성이 높은 것으로 평가하였다. 또한, RPN과 무관하게 심각도가 높은 구성요소에 대해서는 추가적인 유지보수 대책이 필요하다.

[표 5] RPN 평가 결과

| 구성요소 | 심각도 | 발생도 | 검출도 | RPN | Rank |
|-----------|-----|-----|-----|-----|------|
| 계류 서브시스템 | 5 | 4 | 4 | 80 | 1 |
| 타워 | 5 | 4 | 1 | 20 | 6 |
| 플로팅 파운데이션 | 5 | 4 | 1 | 20 | 6 |
| 유압시스템 | 3 | 3 | 1 | 9 | 14 |
| 경보 설비 | 2 | 1 | 1 | 2 | 22 |
| 피치 각도 | 3 | 1 | 2 | 6 | 17 |
| 유압 오일 | 2 | 3 | 1 | 6 | 17 |
| 윤활 | 1 | 2 | 2 | 4 | 20 |
| 기어 | 4 | 2 | 4 | 32 | 3 |
| 베어링 | 3 | 2 | 2 | 12 | 11 |
| 계측기 | 1 | 2 | 1 | 2 | 22 |
| 전선 | 1 | 1 | 4 | 4 | 20 |
| 누전 | 2 | 4 | 1 | 8 | 16 |
| 회전자 및 고정자 | 5 | 1 | 4 | 20 | 6 |

감사의 글

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

참고문헌

- [1] 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.
- [2] Jichuan Kang, Liping Sun, C. Guedes Soares, "Fault Tree Analysis of Floating Offshore Wind Turbines", Renewable Energy, 2018.
- [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
- [5] <https://wwindea.org/>, Germany