해상풍력단지 운영 및 정비 비용과 가용성에 관한 민감도 분석

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 나덕주
(djra15@reseat.re.kr)

1. 서언

○ 해상풍력은 세계 전기 생산에서 급성장하는 산업이다. 격동하는 해양 환경의 변화와 함께 터빈의 크기, 용량, 프로젝트에 사용되는 터빈의 개수가 증가하면서 프로젝트의 수명 주기에 관한 도전이 계속되고 있다. 운전 및 정비(O&M, operation and maintenance) 비용이 해상풍력 단지의 총 수명 주기 비용 중 14~30%를 차지한다.

○ 풍력발전단지의 운영자가 핵심 이슈를 해소하고 비용을 절감하려면 운전비용과 가용성에 영향을 주는 요인을 찾아내는 것이 가장 중요하다. 그러나 기상학적 조건이나 터빈의 신뢰성과 같은 요인은 불확실하거나 예측하기 어려운 요소이다.

○ 운영 팀은 O&M 단계에서 터빈과 지지 구조물의 신뢰성, 선박에 의한 접근성, 부품과 기술자의 운송, 기상학적 조건 및 상태 감시 등을 주로 고려한다. 해상풍력단지(OWF, offshore wind farm)는 육상풍력단지와 달리 건설 단계가 서로 다르고 기간도 연장된다. 일부 프로젝트는 운전 단계에 진입하였는데 다른 부분은 아직 건설이 진행되기도 한다.

○ 컴퓨터 모델은 프로젝트 개발자와 운영자에게 비용과 성능을 제공하고, 기후 및 신뢰성과 같은 확률적 인자를 모방하여 불확실성을 감안한 복잡한 모델은 에너지 비용을 절감하는데 도움을 준다. 이는 단순히 평균값을 적용하는 것이 아니고 비용을 분산함으로써 운전비용의 위험 수준을 식별할 수 있고 또한 불확실성을 감소하는데 도움을 준다. 시간 기준보다 조건 기준에 의해 정비하는 것이 비용 절감에 도움이 된다.

○ 풍력단지 O&M 모델은 O&M 비용을 예측하거나 풍력터빈의 가용성을 고려하여 최대 수익성을 추구할 목적으로 OWF의 운영 방법을 모색하는 것이다. 해상풍력단지 O&M 모델의 핵심은 풍력터빈의 신뢰성에 근거하여 고장 발생에 대해 확율적 접근 방법을 의미하는데 이는 와이불 분포(Weibull distribution) 또는 포아손 과정(Poisson process)을 사용한 통계적 분포에 근거를 둔다.

○ 민감도 분석(SA, sensitivity analysis)은 컴퓨터 모델 입력 변동량에 대해 출력 변동량을 측정하여 출력에 가장 크게 영향을 미치는 입력을 식별하는 방법이다. SA를 사용하여 각 입력 인자와 관련된 불확실성을 이해하고 메타모델을 생성하는 변수를 찾아낼 수 있다. SA는 원자력, 의학 또는 생물학 분야에 다양한 방법으로 응용할 수 있으며, Saltelli 등은 해상풍력단지의 O&M 모델에 적용하였다.

○ 본문에 SA 분석을 위해 Morris 방법을 적용하여 OWF 프로젝트를 건설할 때 각 단계별로 O&M 비용과 가용성에 기여하는 중요한 인자가 어떻게 변하는지에 대해 설명한다. 전반부에는 OWF의 O&M 모델을 정의한 후 고정 및 가변 입력변수에 대해 설명하고, 후반부에는 SA를 수행하는 일반적 구조와 접근 방법에 대해 설명한다.

2. 분석 방법

○ 해상풍력 O&M 분석도구를 사용하여 연간 및 총 O&M 비용 및 풍력단지 비가용성 비용을 평가한다. 풍력단지 기술은 터빈 개수, 월간 용량 인자 및 부품 정보를 제공한다. 각 부품의 입력 조건은 고장율, 수리 시간 및 수리비용을 포함한다. 가용한 정비요원 및 선박 정보와 같은 정비 자원과 전략을 포함하고, 시간대별 풍속 및 파고 데이터와 같은 지역 기상 조건 데이터를 제공한다.

○ 가변 입력변수의 전체 값은 산업 경험, 운영 연구, 과학 문헌 및 분석으로부터 구할 수 있다. 터빈 제조자와 운영자는 지적 재산권에 관한 협약 때문에 신뢰성과 비용에 관한 정보의 배포를 꺼려한다. 해상풍력과 같이 초기 산업에서는 가능한 최소값과 최대값을 찾아내고 균일 분포를 이루어야 한다. 상업적 민감도와 공인 데이터가 없을 경우 단일 값을 식별하고 불확

실성은 ±10% 또는 20%를 적용한다.

○ 터빈 간 평균 거리는 여러 개의 풍력단지 레이아웃으로부터 추정한다. 매월 평균 용량은 5년의 풍속 데이터와 함께 3개의 터빈 제조자가 제시한 출력 곡선을 곱하여 얻을 수 있다. BoP 가용성은 터빈에 기인하지 않은 OWF의 정지시간을 포함하며 이 값은 일반적으로 98~99% 사이 값을 가진다. 풍속은 풍속 전단 법칙(wind shear law)을 적용하여 지상에서의 풍속 값을 허브 높이에 맞게 추정하여 계산한다.

○ 터빈을 정상 상태로 운전 가능하도록 유지하기 위한 정비 요원의 숫자도 중요한 입력 조건이고, 보통 한 개의 터빈당 0.37~0.75명의 값을 가진다. 작업 시간은 대표적으로 하루에 10~12시간 작업하는 것으로 본다. 부품에 대한 고장율과 그에 따른 정지시간 정보는 해상풍력터빈 성능에서 중요한 요인이다. 부품 수리 비용은 육상터빈의 비용과 비슷한 값을 가진다.

○ SA 방법은 단순 및 복잡한 상태에 걸쳐 국지적 및 전체적인 두 가지로 나눌 수 있다. 국지적 방법은 측정 위치에서 영향을 분석하고, 전체적 방법은 조사하고 있는 전체 구간에 걸쳐 미치는 영향을 고려한다. OWF의 O&M 모델의 계산 시간은 각 모델마다 1~30분에 수행할 수 있다.

3. 사례 연구

○ OWF 프로젝트의 각 단계에서 비용과 가용성이 어떻게 영향을 미치는지 조사하기 위하여 3가지 사례에 대해 연구하였다. 고정 입력 조건을 정의하고, 가변 입력 조건의 불확실성 범위를 결정한 후 3가지 경우에 대하여 SA 접근 방법을 적용하여 분석 비교 검토하였다.

○ 사례는 영국 남부에서 수행한 OWF 프로젝트의 3단계를 선정하였다. 지리적으로 북쪽 단지를 1A, 남쪽 단지를 1B라고 부르고 전체를 1C라 명명하였다. O&M을 실행하기 전 초기 단계에 중요 요인을 찾아내어 충분한 시간을 가지고 의사결정을 하고 각 운전 단계를 관리하는 방법에 의해 비용을 줄이고 가용성을 높일 수 있었다.

○ 풍력터빈의 7개 부품에서 흔히 발생하는 고장률을 조사하였다. 터빈은

조건 기준 정비와 시간 기준 정비를 수행하고, 단순 수리와 중대 수리의 2가지로 나누어 분석하였다. 단순 수리는 정비공이 약간의 부품을 가지고 CTV(Crew Transfer Vessel)를 이용하여 터빈에 접근하여 고장을 수리하는 것이고, 중대 수리는 전문 수리업체와 계약을 하고 HLV(Heavy Lift Vessels)를 임대하여 중량물을 수리하는 경우를 말한다.

○ 터빈의 예방 정비를 위하여 매년 방문 서비스를 수행하는데 이를 위한 변수로는 정비 요원의 수, 팀, 선박의 대수 및 비용을 포함한다. 3가지 경우에 대해 민감도를 조사하기 위해 1A는 8MW 터빈을 62대, 1B는 8MW 터빈을 59대, 1C는 8MW 터빈을 121대로 정하였다. 기상학적 데이터는 4년 동안에 걸쳐 파고와 수면 위 10m에서의 풍속을 취하였다. 평균 풍속은 7.15m/s이고 연간 평균 파고는 1.02m로 조사되었다.

○ 비용은 연간 평균 운전 비용과 정비 비용을 포함하고 이 비용에는 수리비, 정비공의 급여, 선박 임대비, 연료비 및 하청업체의 부가 비용을 포함하였고 전기를 발생하지 못한 손실 비용은 포함하지 않았다. 가용성은 총 시간 대비 터빈이 정상적으로 운전되는 시간 비율을 고려하였다.

○ SA분석은 MATLAB과 SimLab을 사용하였고, 컴퓨터 계산 시간은 여러 날이 소요되었다. FAST와 같은 SA방법을 적용하였다면 약 1,000 수준에 대해 57,500과 115,000 사이의 모델을 처리하는데 수개월의 계산 시간이 소요 되었을 것이다.

4. 결과 종합

○ 1A와 1B의 결과는 차이가 별로 없는 것으로 나타났기 때문에 아래에는 1A와 1C의 결과를 비교 분석한다. 두 가지 경우 모두 전기시스템과 기어박스의 고장률이 가장 중요한 요인으로 나타났다. 전기시스템은 작은 고장이 자주 생기고 비용도 적게 발생하였지만 기어박스는 고장률이 적지만 HLV를 필요로 하고 비용도 많이 발생하였다. 따라서 운영자는 고장 발생이 적지만 비용이 많이 소요되는 경우와 비용이 적게 들지만 자주 발생하는 경우를 모두 고려하여야 한다.

○ 또 다른 중요 요인은 HLV 및 헬리콥터 비용이다. 1C의 경우 단순 정

비의 소요 시간과 운영 전환 기간과의 관련성도 중요한 요인으로 나타났다. 부품 비용과 고장률은 육상풍력단지의 경우와 비슷한 것으로 가정하고, 주민들의 영향도 무시할 수 없는 것으로 결론지었다. 육상 프로젝트에서는 헬리콥터를 사용하지 않는 등 접근 수단이 다른데 비해 해상 프로젝트는 중량 부품의 인양 등 많은 비용이 소요된다.

○ 운전 기간 및 운영 전환 기간은 육상이나 해상풍력 모두 비슷하게 영향을 주지만 크기는 같지 않다. 해상풍력에서 선박으로 터빈에 접근하는 방문에 관련된 고정 비용은 육상에서 차량으로 접근하는 비용보다 더 높다. 접근 전략은 수리에 충분한 시간을 얻기 위하여 CTV 및 헬리콥터 등을 고려하여야 한다.

○ 1A의 경우 가장 중요한 요인은 단순 수리 기간, 작업일수, HLV가 필요한 부품의 고장률, BoP 가용선 및 인원 수송 시간 등이고, 가용성은 84%~92%이다. 1C의 경우 중요 요인은 1A와 같지만 추가로 단순 수리를 완료하기 위해 선박의 수, 팀 숫자를 포함하고, 가용성은 최저 50%, 평균 82%이다. 정비 전략은 육상 O&M 기지를 근거로 CTV 또는 헬리콥터 수송과 12시간 정비를 기준으로 한다.

5. 시사점

○ 동일한 OWF에서 서로 다른 단계의 경우 비용에 영향을 미치는 요인은 거의 같지만 고장율과 수리 비용은 다르다. 따라서 대형 OWF에서는 신뢰성이 더 중요한 요인이 된다. 1A의 경우 단지 가용성에 가장 영향을 주는 요인은 터빈 신뢰성과 수리 속도이다.

○ 고장률 입력 조건은 십 수 년 전 소형 육상터빈에서 획득한 신뢰성 데이터베이스로부터 취득한다. 1C의 OWF성능은 육상 O&M 기지 전략에 의해 제한되지만 운송 시간을 줄이기 위하여 모선 또는 고정 플랫폼을 사용하는 경우도 있다. 마찬가지로 하루 한번 교체하거나 2~3회 교체할 수도 있다.

6. 결언

○ 본문에 해상풍력 운영 및 정비 모델에 대하여 민감도분석 방법을 적용하여 어떤 요인이 비용 및 가용성 관점에서 가장 중요한지 찾아보았다. 운영 및 정비 비용과 가용성에 영향을 주는 가장 의미 있는 요인을 식별하기 위해 어떤 형태의 영향을 미치는지 또 각 프로젝트의 단계마다 변화를 고려하여 민감도를 분석하는 것은 새로운 도전이었다. 입력 조건의 분포를 식별하는 과정에 대해 설명하고, 접근 방법을 소개하고 그 결과에 대해 설명하였다.

○ 1A와 1B의 조사 결과는 유사하고, 작은 소 단계와 완전한 프로젝트의 결과는 서로 달랐다. O&M 비용을 계산하기 위해 고장률, 부품 가격, 수리 기간 등 14개의 중요한 입력 조건을 찾아내었다. 가용성 분석을 위해 낮거나 높은 고장률을 가진 부품, 정비 자원 가용성 및 운영변환 기간 등 7개의 중요한 요인을 열거하였다. 대형 OWF는 소형 프로젝트의 입력 조건을 포함하여 몇 개를 추가하였다. 운영자는 다단계 프로젝트의 경우 가장 유익한 의사결정의 우선순위가 확장된 OWF에 따라 달라지는 점을 고려하여야 한다.

ReSEAT

출처 : Rebecca Martin, Iraklis Lazakis, Sami Barbouchi, Lars Johanning, "Sensitivity analysis of offshore wind farm operation and maintenance cost and availability", *Renewable Energy*, 85, 2016, pp.1226-1236

◁ 전문가 제언 ▷

○ 운전 정비(O&M) 비용은 해상풍력단지(OWF)의 전체 수명주기 비용의 대략 14~30%를 차지한다. 풍력단지 운영자가 최고 수익을 얻기 위한 의사결정을 내리기 위해서는 운영 비용과 가용성에 영향을 주는 요인을 찾아내는 것이 대단히 중요하다. 많은 OWF는 여러 단계로 나누어 건설되며, 각 단계마다 중요한 요인이 항상 일정한 것은 아니다.

○ 이 이슈를 검토하기 위해 본문에 2개의 건설단계 프로젝트와 한 개의 전체 프로젝트를 포함한 3개의 OWF 사례에 대해 연구하였다. 먼저 질적 검사에 의한 민감도 분석을 수행하여 운영 비용과 가용성에 영향을 미치는 O&M 의 가장 중요한 요인을 찾아내었다. 연구 결과 전체 O&M 비용의 중요 요인은 고장율과 함께 단순 및 중대 수리를 위한 접근 및 수리 비용으로 나타났다.

○ 시간 기준 가용성에 대해 찾아낸 중요 요인은 정비 업무를 수행하는데 걸리는 시간에 관련한 사항으로 운전 시간과 작업일수를 포함한다. 2개의 건설단계 프로젝트는 비슷한 결과를 보였고, 전체 프로젝트와는 다른 결과를 나타냈다. 이 결과는 프로젝트 개발과 의사결정 과정에 걸쳐 OWF 운영자에게 가치 있는 정보를 제공하게 된다.

○ 세계 풍력발전의 O&M 시장 규모는 2013년에 73억 달러이었고, 2016년에는 98억 달러에 이르고, 향후 매년 평균 12.7%의 성장을 보여 2020년에는 190억 달러에 도달할 것으로 전망된다. O&M의 효율화를 위해서는 모니터링 및 데이터의 수집과 분석, O&M 인재의 육성과 활용, 수리용 부품 조달의 효율화, 지역 단위에서의 효율적인 O&M의 실시 등을 추진해 나가야 한다.

○ 국내에 증가하는 풍력 설비 용량에 비해 풍력발전단지의 유지 보수는 해외 풍력발전기 제조사에 의존하기 때문에 국내 풍력발전 산업 성장의 한계점으로 지적되고 있다. 따라서 국내 풍력발전 사업자들이 보다 효율적이고 비용 효과적으로 풍력발전단지를 운영하기 위해서는 O&M 분야의 자체 기술력 증강이 더욱 필요하다고 생각한다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.