



송 기 옥 | 한전 전력연구원 수화력발전연구소 책임연구원 | e-mail : gwsong@kepri.re.kr

최근 신재생에너지가 각광을 받아 많은 풍력터빈이 설치되고 있으나 풍력터빈을 효율적으로 운영하여 경제성을 향상시킬 수 있는 운영 및 관리기술 개발은 부족한 실정이다. 이 글에서는 신뢰도 중심 정비기술을 이용하여 정비 비용을 절감하면서도 풍력발전설비의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 정비관리 기술에 대해 소개하고자 한다.

풍력산업은 화석연료에 대한 의존성을 줄이고 지구 온난화의 영향을 완화하기 위한 대안으로 많은 국가에서 가장 빠르게 성장하는 신재생 에너지 중 하나이다. 세계적으로 지난 13년 간 풍력터빈의 설치용량 평균 성장률이 28.6%에 이르고 있으며, 2011년에만 40GW 규모의 풍력 발전설비가 새롭게 건설되었다. 세계 풍력발전 설비용량은 2015년까지 2010년 설비용량(194.4GW)의 두 배가 넘는 450GW로 증가할 전망이다. 우리나라에 설치한 풍력발전기는 2011년 7월 기준 총 379MW로 세계 풍력발전 설비(19만 4,390MW)의 약 0.2% 수준이나, 2004년도 설비용량에 비하면 약 5.5배 성장했다. 향후에는 해상풍력추진단을 중심으로 부안 영광지역에 2019년까지 실증단지(13년, 100MW), 시범단지(16년, 900MW), 상용화단지(19년, 1,500MW)를 차례로 건설하는 계획이 수립되어 있어 해상풍력이 신재생에너지의 주력으로 성장할 예정이다. 많은 풍력발전설비가 건설되면 이용률 향상 및 운영비 절감을 통한 경쟁력 확보 노력이 필요하다. 풍력발전의 경우 전기 판매 비용에서 운영정비 비용이 차지하는 비율이 육상풍력은 10~15%인 반면 해상풍력은 25~30%로 알려져 있다. 따라서 해상 풍력터빈의 경제성을 향상시키기 위해서는 정비방법을 최적화하여 신뢰도와 이용률을 향상시키는 최적화된 정비전략을 개발하는 것이 중요한 과제라고 하겠다.

풍력발전의 정비 방법

풍력터빈의 부품은 대형기기인 2MW급의 경우에 약 8,000여 개의 부품으로 이루어져 있다. 그 중에서 핵심부품으로는 블레이드, 기어박스(증속기), 베어링, 발전기, 컨버터, 제어시스템 등을 들 수 있다. 풍력터빈의 구성부품이 파손되면 자재비, 설비 정비비 이외에 발전을 못하는 데 따른 생산손실비용이 발생된다. 풍력발전 설비의 정비에는 예측할 수 없는 잦은 고장, 예비품과 설비의 조달 용이성, 기상조건에 따른 장기 정지시간 등으로 매우 많은 비용이 발생하므로 고장이 발생하기 이전에 예방정비를 통하여 고장을 방지하고, 고장발생 시에는 신속한 정비를 수행하여야 피해를 최소화 할 수 있다. 정비의 목적은 설비의 능력을 회복시키거나 유지시켜 요구되는 설비의 성능을 달성하게 하는 것이다. 따라서 정비 최적화를 통하여 정비비용과 전기 생산에 의한 수익 사이의 균형을 맞추어 풍력터빈의 전 운전기간 중 수익을 극대화시켜야 한다. 일반적으로 정비 최적화는 직접적인 정비비용과 정지시간을 줄이고 전 운전주기 동안 운전 및 정비비용 증가에 대한 위험도를 감소시킨다.

지금까지 풍력터빈에 적용하는 일반적인 정비수행 방법은 풍력터빈이 고장날 때 정비하는 고장정비와 규칙적인 주기로 정비를 수행하는 정주기 정비(Time



based maintenance)가 주로 수행되어 왔다. 그러나 중요설비의 고장에 의한 파급효과가 매우 크기 때문에 설비의 신뢰성 향상을 위한 새로운 정비관리 기술을 도입해야 한다.

일반적으로는 정비의 방법은 관리상에서 예방정비(PM : Preventive Maintenance), 사후정비(BM : Break Down Maintenance)의 두 가지로 분류된다. 예방정비에는 사용시간을 근거로 하여 정비를 행하는 시간계획정비(TBM : Time Based Maintenance)와 설비진단을 실시하고 그 설비상태의 결과에 따라 정비를 행하는 상태감시정비(CBM : Condition Based Maintenance)가 있다. 이들의 각 정비방식은 하나의 개념으로 양부를 결정하는 것이 아니고, 설비의 중요성, 열화상황, 고장 발생가능성과 영향도, 정비대책비용 등을 고려하여 대상으로 하는 설비만의 특성에 따라서 적절한 방법을 선택한다.

예방정비는 설비의 가동 중 또는 정지 중에 설비의 운전상태 및 성능이 설계 범위 내에서 유지되도록, 고장 발생을 사전에 방지하는 능동적인 정비로 설비의 이상 유무를 사전에 점검하여 고장발생을 방지하는 예방활동을 말한다. 이러한 활동을 통하여 설비가 그 본래의 기능을 다할 수 없는 상태, 즉 기능고장(functional failure)이 발생하기 전에 진동, 소음, 온도, 압력, 윤활유 등과 같은 인자를 통해 설비의 상태와 성능을 진단하고 기기의 고장을 예측하여 설비의 고장을 사전에 예방하는 조치를 해 줌으로써 더 큰 사고를 미연에 방지하고 있다. 최근에는 설비의 이상상태를 조기진단하는 기술이 발달하면서 설비의 상태를 미리 예측하여 정비하여 설비의 정지시간을 최소화하는 예측정비(PdM : Predictive Maintenance)와 상태감시정비의 중요성이 더욱 강조되고 있다.

예방정비는 설비의 고장을 예방하여 불시정지를 방지하고 설비의 신뢰성을 향상시키며, 계획정비를 수행하고 정비기간을 단축함으로써 설비의 이용률을 높

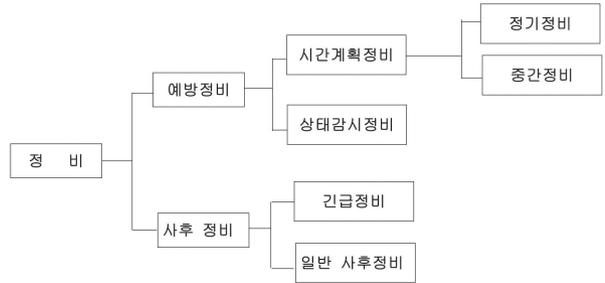


그림 1 정비의 관리상 분류

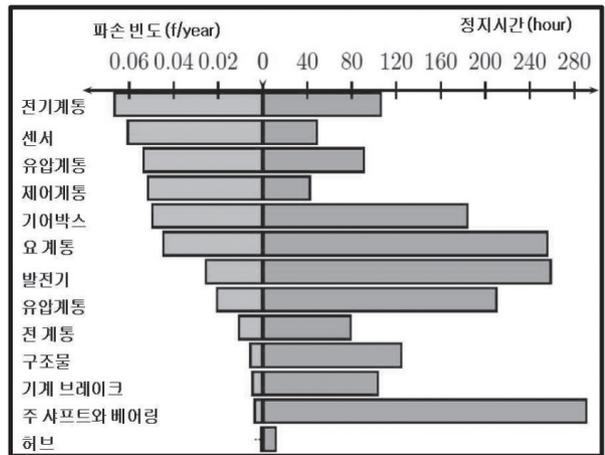


그림 2 풍력터빈의 연간 고장빈도 및 정지시간

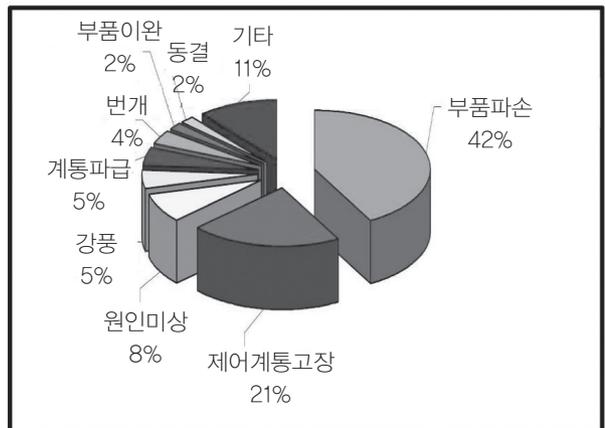


그림 3 풍력터빈의 주요 고장 원인

인다. 또한 정지로 인한 생산기회비용의 손실과 정비 및 검사에 필요한 직·간접비용을 감소시킬 수 있다. 최근의 연구결과에 의하면 풍력터빈을 예방정비 시 5원~14원/kWH의 정비비용이 소요되는 반면 사후정비

시에는 8원~16원/kWH의 비용이 소요되어 약 두 배의 비용이 더 사용된다고 알려져 있어 예방정비의 중요성을 강조하고 있다.

풍력발전소의 정비비용 모델

풍력발전이 정착화되는 시점에서 이제는 풍력에너지의 경제성을 개선하기 위하여 총 운전시간에 대한 운영비를 감소시키는 노력이 필요하다. 특히 해상 풍력발전의 경제성은 풍력터빈의 신뢰성에 의해 크게 좌우된다. 육상풍력의 경우 고장이 발생해도 이용률에 크게 영향을 미치지 않으나, 해상풍력의 경우 비록 작은 고장이라도 자주 발생하게 되면 이용률이 크게 감소하게 되고, 접근성의 어려움으로 인하여 정비비용이 크게 증가되어 운영비용이 높아지게 된다.

풍력터빈은 용량증가와 함께 kW당 운영비용이 크게 감소하게 된다. 그러나 운전연수의 증가와 함께 사후 정비비용이 서서히 증가하고 특히 5년 후 정비비용은 높은 불확실도로 인하여 정확히 예측하기 어렵다. 풍력터빈의 정비에 크게 영향을 주는 요소는 ① 터빈의 신뢰도와 용량, ② 정비개념과 체계(접근방법, 중량물 이동시설 등), ③ 육지까지의 거리, ④ 해수면 깊이, ⑤ 바람과 파도의 조건, ⑥ 풍력단지의 규모 등이다.

정비비용을 결정하는 주요 요인은 터빈의 구성부품의 고장빈도와 정비방법, 정비를 위한 장비의 이동시간 및 정비 시 기상조건, 전기생산과 정비시간을 결정하기 위한 현장이 기상조건 등이다. 모든 입력변수들이 불확실도를 가지고 있기 때문에 확률론적인 계산방법들이 필요하다. 최근 해상풍력단지의 비용과 정지시간을 결정하기 위한 모델이 ECN에 의하여 개발되었다. 이 모델은 연간 평균 운영정비 비용과 정지시간을 위한 해석적 모델로 확률 계산을 수행한다. 설비의 고장은 제작사에 의하여 제공된 고장분포함수에 의하여

효율적인 예방정비 기술의 도입은 풍력터빈의 고장을 사전에 방지하여 풍력터빈의 이용률을 향상 시킴으로써 풍력발전의 경제성 향상에 크게 기여할 수 있다.

확률적으로 계산되며, 기후조건은 해상 풍력 설치 위치의 폭풍발생 비율에 의하여 생성된다. 모델의 핵심은 정비작업을 위한 각종 장비들이 작업할 수 있는 파고와 풍속을 통계적으로 처리하여 고장이 발생된 풍력터빈의 정비 대기시간을 분포함수로 나타내는 것이다. 풍력발전 설

비에 발생된 모든 고장의 파급영향이 동일하지 않음을 알아야 한다. 발전기는 베어링 손상, 권선 소손, 부하 불평형 등 다양한 원인에 의한 기능을 상실하며 고장 형태에 따라 다한 정비방법을 사용한다. 정비비용 산정에 이런 요인을 고려하기 위하여 네 개의 정비 유형으로 분류한다. ① 외부 크레인을 사용하여 로터와 나셀을 교체, ② 내부 크레인을 사용하여 큰 설비를 교체, ③ 작은 부품의 교체, ④ 검사 후 정비. 정비유형에 따른 정비비용을 사전에 규정하고, 각각의 부품 고장률은 네 개의 정비유형 위에 분포한다. 고장을 정비하기 위하여 필요한 정지시간과 정비기간의 수익손실 또한 주요한 비용이다. 정지시간은 정비장비와 접근방법의 선택에 크게 의존하고 이는 파고와 풍속에 의해 제한된다. 정지시간을 결정하는 방법은 세 가지로 분류된다. ① 정비장비를 사용할 수 있는 최대 파고, ② 정비장비를 사용할 수 있는 최대 풍속, ③ 정비기간 등이다. 정비를 위한 시간은 평균시간을 계산할 수도 있고 정비방법에 따라 길어지거나 짧아지는 확률변수로 고려할 수도 있다. 이 확률 비용모델은 번개에 의해 손상된 풍력발전단지의 손상을 결정하여 정비전략을 수립하는 데 성공적으로 적용되었다.

풍력발전설비의 정비최적화

신뢰도 중심정비(Reliability centred Maintenance)는 풍력발전설비의 적절한 정비전략을 선택하기 위해 주로 사용하는 기술이다. 신뢰도 중심정비기술과 전

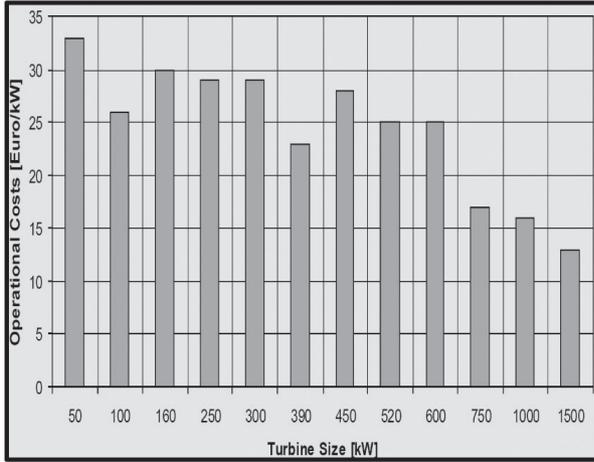


그림 4 풍력터빈 용량에 따른 운전비용

주기 비용해석 기술을 결합하면 좀 더 효과적인 최적 정비 전략을 도출할 수 있다. 풍력발전설비는 각각 고유의 기능을 수행하고 있다. 부품을 지지하거나, 부품과 부품을 연결시켜주거나, 동작을 원활히 하기 위해 윤활을 시켜주거나, 외부의 이물질이 침투하지 못하게끔 기밀을 유지시켜주는 등 구성부품의 수준에서도 고유의 기능을 수행한다. 신뢰도중심정비에서 고려하는 고장은 이러한 기능을 수행하지 못하는 상태를 의미한다. 신뢰도중심정비의 입장에서는 기능수행에 지장을 주지 않는 균열이나 침식은 고장으로 간주하지 않는다. 따라서 설비의 점검 또는 교체주기 예측에 있어서 신뢰도중심정비는 과거 고장의 발생횟수가 가장 중요한 인자이다. 신뢰도 중심정비는 다음과 같은 과정에 따라 수행된다.

1. 시스템 선택과 정의
2. 시스템의 기능과 기능고장 정의
3. 핵심 구성부품의 선정
4. 데이터 수집과 분석
5. 고장모드, 영향 분석(고장원인과 주요파손 기구의 규명)
6. 고장 시 발생하는 파급효과 분석
7. 적합한 정비방법 및 정비주기 선정

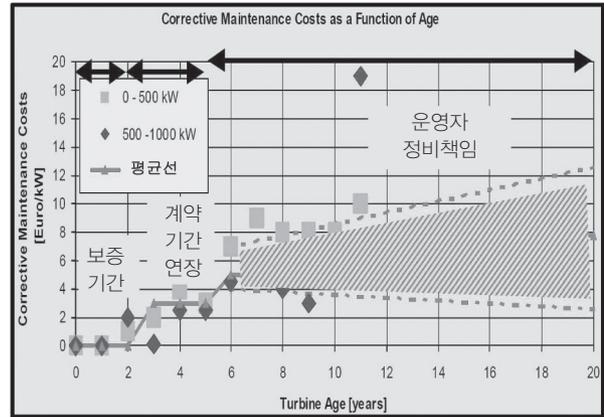


그림 5 터빈 가동연수에 따른 정비비용의 변화

처음 네 개의 과정은 운전 중인 풍력터빈이 설계된 목적을 수행하는 데 실패했을 때 원인과 영향을 규명하는 항목이며, 나머지 세 개의 과정은 고장의 파급효과를 결정하고 적합한 정비대책을 수립하는 과정이다. 그러나 신뢰도중심정비는 어떤 정비 전략이 비용 대비 효과가 가장 우수한지 결정하기에 제한이 있어 정량적인 정비 최적화 기술이 필요하다. 또한 비용 효과를 중시하는 정비 최적화 기술은 어떤 설비에 정비를 집중해야 하는지 파악하기가 힘들어 최적정비를 위해서는 신뢰도 중심 정비기술을 통하여 핵심설비를 파악해야 한다. 이 두 가지 기술이 융합된 신뢰도 중심 자산관리 방법은 설비의 신뢰도를 향상시키고 비용을 절감하는 모순된 상황을 해결하는 데 유용하다. 신뢰도 중심 자산관리 방법은 다음 3단계에 의하여 수행된다. 1단계는 시스템의 신뢰도를 분석하는 단계로 시스템을 정의하고 기능수행에 필수적인 핵심설비를 찾는 단계이다. 2단계는 구성부품의 신뢰성 모델링 하는 단계로 상세하게 구성부품을 분석하고 적절한 입력데이터를 기반으로 신뢰도와 예방정비 사이의 정량적 관계를 규명한다. 3단계에서는 시스템의 신뢰도와 비용대비 효과를 분석하는 단계로 2단계 결과를 기반으로 시스템의 신뢰도와 비용에 대한 정비 효과를 평가하고, 정비방법 간의 신뢰도를 비교하여 비용 대비

효과가 우수한 정비방법을 선택한다. 신뢰도 중심 자산관리 방법의 특징은 시스템 단계에서 신뢰도 분석을 시작하여 이를 구성부품 단계로 연계하고 다시 시스템 단계로 돌아와서 정비효과를 측정하여 최적 정비방법을 결정한다는 것이다. 이 결과를 바탕으로 운전정비 비용을 절감하기 위한 다양한 방안들이 고려된다. 먼저 정비전략에 따라 정비원과 장비의 배치방법을 개선한다. 다음에는 고장률을 감소시키기 위해 설비를 개선하고 정비를 위한 접근도도 향상시킨다. 이러한 개선방안을 통하여 설계조건외 강화, 중량물 운반설비의 보강 등을 통해 설비의 신뢰성을 향상시키고 정비시간을 단축하므로 정비방법을 최적화 할 수 있다.

맺음말

신재생에너지 확대정책에 힘입어 풍력발전이 크게 성장할 것으로 예상된다. 최근에는 소음유발에 의한 민원발생 및 풍력설비의 이용률 향상을 위해 해상풍력이 각광을 받고 있으며, 국내에도 2019년까지 2,500MW의 해상풍력발전단지 설치가 계획되어 있다. 해상풍력의 경우 육상풍력에 비해 유지 정비비용이 두 배 이상 소요된다고 알려져 향후에는 경제성 개선을 위한 풍력설비의 이용률 향상을 위하여 고장방지 및 효율적인 정비계획 수립을 위한 기술이 필요하다.

해외에서는 해상풍력의 최적 정비전략 수립을 위한 다양한 기술들이 개발되고 있으며, 설비의 고장확률 및 정비비용 계산을 위한 많은 자료들이 수집되고 있다. 확률적으로 풍력터빈의 경제성을 면밀히 분석하

기 위해 비용분석 모델과 고장저감을 위한 정비관리 방안의 개선을 위한 신뢰도 중심정비 방법과 비용대비 효과 평가 또는 전 운전주기 비용평가 모델을 결합한 하이브리드 신뢰성중심 정비방법들도 개발 되고 있다.

현재까지 국내에서는 풍력발전설비의 개발 등 하드웨어 구축에 많은 노력을 기울이고 있으며, 해상 풍력발전설비의 운영경험이 부족하여 아직 운영 및 관리 기술에 대한 투자는 부족한 형편이다. 향후 해상풍력 단지의 설치와 함께 설비의 이용률을 향상하기 위한 운영기술의 중요성이 커지고 있으며, 설비의 경제성 향상을 위한 운영기술 활발히 개발하여야 한다.

풍력설비의 이용률 향상을 위해서는 신뢰도를 기준으로 하여 설비에 대한 정비의 중요도, 긴급도를 평가하여, 우선순위를 부여하고 정비를 수행하여야 한다. 또한 정비자원을 중요설비에 집중적으로 사용함으로써 정비비용을 절감하고 고장을 방지할 수 있다. 풍력발전설비에 대한 예방정비를 효율적으로 수행하기 위해서는, 설비별 정비방법을 결정하고 전체설비의 정비전략을 수립하기 위한 정비관리 시스템구축이 필요하며, 정량적으로 전산화 및 시스템화 하기 쉬운 신뢰도기반 예방정비기술에 대한 기대가 점차 높아지고 있다.

풍력발전에 적용되는 신뢰도기반 예방정비기술은 풍력발전의 이용률을 향상시켜 신재생에너지 분야의 성장 및 지구온난화 방지를 위한 저탄소 녹색성장에 크게 기여 할 것이다. 아울러 관련 시스템 및 기술은 대외 경쟁력을 향상시켜 풍력발전설비 수출에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.