

신재생에너지 모니터링 시스템 구축을 위한 예측기술 동향

허진 | 상명대학교 전기공학과 조교수
백자현 | 한국전력공사 전력연구원 일반연구원
최영도 | 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
박상호 | 한국전력공사 전력연구원 책임연구원
윤기갑 | 한국전력공사 전력연구원 책임연구원



1. 신재생에너지 모니터링 시스템 구축 개요

신재생발전원 중에서 풍력 및 태양광 발전은 다른 에너지원에 비해서 성장속도가 가파르게 증가하고 있으며, 대규모 풍력 및 태양광 발전이 전력시스템에 연계되고 운영될 것으로 예상된다. 전력계통 특성상 태양광 및 풍력 중심의 신재생에너지원의 확대가 예상되며, 변동성이 심한 전력원이 계통에 연계된 경우, 송전망 운영 및 계획에 있어 기존에 경험하지 못한 다양한 문제가 제기될 것으로 예상됨에 따라 이에 대한 대비가 필요하다. 신재생에너지 확대에 따른 유연성 확보를 위해 전력 모니터링 시스템 구축 기술이 매우 시급한 실정이다.

신재생에너지 통합 감시 및 운영기술은 전력계통에 연계되는 신재생에너지의 출력데이터(전압, 전류, 유효전력, 주파수, 고조파, 플리커 등)를 실시간 감시하여 신재생에너지계통 영향(주파수변동, 전압변동, 고조파) 및 운전특성 파악을 통해 전력계통 신뢰성을 향상시켜 신재생에너지 수용향상을 목적으로 하는 기술이다. 신재생에너지 모니터링 기술의 적용으로 지역단위 신재생에너지 운전정보 확보를 통해 정확한 계통영향 분석이 가능하여 안정적인 계통운영을 위한 설비보강, 보상기기 적용 등 체계적인 계통계획수립 및 계통운영 문제발생시 원인분석을 통한 대처가 가능하다. 신재생에너지 모니터링 시

스템으로부터 취득된 데이터를 기반으로 예측 응용기술의 고도화를 통해 모니터링 시스템 구축의 기반을 확립할 수 있다.

2. 신재생에너지 통합 감시 및 운영기술 구현을 위한 예측 기술 동향

태양광 및 풍력 중심의
신재생에너지원의 확대가 예상

2-1. 풍력발전출력 예측모형 개발 동향

본 절에서는 북미 서부지역의 전력계통 운영기관 및 전력회사의 풍력발전 예측모형 현

황에 대해 기술한다. 미국 SPSC(State-Provincial Steering Committee)에서는 풍력발전을 포함한 변동성전원의 연계 비용을 최소화할 수 있는 방안을 탐색하였으며, 주요 방안으로 변동성 전원에 대한 예측 기술을 향상시키고자 하였다. 미국 서부 지역의 13개 전력계통 운영기관 및 전력회사인 변동성 전원 예측 프로젝트[1]에 참여하였으며, 각 기관별 운영현황은 표 1과 같다. 태양광 발전설비만을 보유하고 있는 SMUD(Sacramento Municipal Utility District)를 제외한 나머지 운영기관 및 전력회사에서는 모두 일정량 이상의 풍력발전설비를 보유하고 있다.

13개의 전력계통 운영기관 및 전력회사에서는 단기 풍력발전 예측을 위해 기상 데이터를 활용하고 있으며, 이를 취득하기 위해 MET tower 또는 발전단지 단위의 측정센서를 설치하

표 1. SPSC 변동성전원 예측 프로젝트 참여 기관

참여 기관명	평균 전력수요 (MW)	풍력발전 설비용량 (MW)	변동성전원 예측 시작연도
Alberta Electric System Operator (AESO)	8,604	1,088	2010
Arizona Public Service (APS)	4,500	290	2008
Bonneville Power Administration (BPA)	6,000	4,516	2009
California Independent System Operator (CAISO)	21,579-35,781	5,660	2004
Glacier Wind	N/A	399	2009
Idaho Power Co. (Idaho Power)	1,759	669	2011
Pacific Gas & Electric (PG&E)	18,707	CAISO 내 포함	2000년대 초반
Portland General Electric (PGE)	2,140	550	2007
Puget Sound Electric (PSE)	4,328	823	2007
Sacramento Municipal Utility District (SMUD)	1,200	0	2011
Southern California Edison (SCE)	13,000	CAISO 내 포함	1980년대
Turlock Irrigation District (Turlock)	245-336	BPA 내 포함	2009
Xcel Energy	4,000	2,215	2008
총량	-	16,210	

표 2. 기관별 기상 데이터 측정을 위한 적용 설비 현황

참여 기관명	Met Tower 설치 여부	발전단지 측정센서	비고
AESO	○	-	• 최소 2개 이상의 풍력터빈 높이의 Met tower
APS	○	○	-
BPA	○	○	• 풍력발전단지 1개당 1개의 Met tower • 80m 높이의 풍력터빈 Nacelle의 측정 데이터
CAISO	○	○	• 최소 2개 이상의 풍력터빈 높이의 Met tower
Glacier Wind	○	○	• On/off-site Met tower • 개별 터빈별 측정 데이터 적용
Idaho Power	○	-	-
PG&E	○	-	-
PGE	○	-	• Met tower를 적용하고 있으나, 풍력터빈 높이와 달라 스케일 조정중
SMUD	-	-	-
SCE	○	○	• 풍력설비 용량 50MW 당 1개의 Met tower
Turlock	○	○	• 2개의 Met tower 운영 중
Xcel Energy	○	○	-

고 있다. 각 기관별 기상 데이터 취득을 위해 도입하고 있는 설비 현황은 다음 표 2와 같다. 대부분의 기관에서는 Met tower를 이용하고 있으며, 발전단지 내 측정센서를 설치하여 추가적으로 현장(on-site)의 기상 데이터를 수집하고 있는 것으로 분석되었다. 또한 풍력터빈 높이의 Met tower 제원을 요구하고 있으나, 그렇지 못할 경우 추가적인 스케일 조정을 수행하고 있는 것을 알 수 있다.

북미지역 전력계통 운영기관 및 전력회사에서 풍력발전예측을 위해 수집하고 있는 데이터의 종류는 표 3과 같다. 입력 데이터는 기본적으로 1개의 풍력터빈에 대해서 측정하고 있으며, 데이터 유형 및 기관에 따라 일부는 발전단지 단위로 측

정하고 있으며, 이를 0*를 통해 표기하였다.

13개의 기관이 이용하고 있는 데이터의 유형이 매우 유사함을 알 수 있다. 풍속, 풍향, 온도, 기압 등 일반적인 기상 데이터에 대해서는 거의 모든 기관이 수집하고 있는 것을 확인할 수 있다. 터빈 위치는 풍력발전단지의 위도, 경도 등 지리적인 데이터를 의미하며, 이용률(availability)은 풍력터빈의 설비용량 대비 평균 출력 수준을 의미한다. 파워 커브(Power curve)의 경우 풍력터빈 제조사에서 제공하는 풍속별 풍력터빈 출력제원을 의미한다. 다만 일부 기관에서는 측정된 출력 데이터를 기반으로 파워 커브를 추정하여 이용하고 있으며, 이 기관의 경우 △*로 표기하였다. 13개 전력계통 운영기관 및 전력회사

표 3. 기관별 단기 풍력예측을 위해 이용 중인 데이터의 유형

참여 기관명	풍속, 풍향	온도	기압	터빈 위치	터빈 출력	이용률	고장율	파워 커브
AESO	○	○	○	○	○	○	○	○
APS	○	○	○	○	○	○	○*	○
BPA	○	○	○	○	○	○*	○*	-
CAISO	○	○	○	○	○	○*	-	△*
Glacier Wind	○	○	○	○	○	○	○	○
Idaho Power	○	○	○	○	○	○	○	△*
PG&E	○	○	○	○	○	○	○	○
PGE	○	○	○	○	○	○	○	○
SMUD	○	○	○	○	○	○*	-	-
SCE	○	○	○	○	○	○	○	○
Turlock	○	○	○	○	○	○	○	○
Xcel Energy	○	○	-	○	○	○	○	○*

표 4. 기관별 적용 중인 예측 모델의 유형

참여 기관명	Persistence	수치예보모델	통계 기반 모델	기상예지	Ramp
AESO	-	○	○	-	-
APS	○	○	○	○	○
BPA	○	○	○	○	-
CAISO	○	○	○	○	도입예정
Glacier Wind	○	○	○	○	○
Idaho Power	○	○	○	-	-
PG&E	○	○	○	-	-
PGE	○	○	○	-	-
PSE	○	○	○	○	-
SMUD	○	○	○	○	-
SCE	○	○	○	○	검토 중
Turlock	○	-	○	-	-
Xcel Energy	○	○	○	-	-

는 풍력발전 예측 기법의 최소 적용 단위를 개별 발전단지로 지정하고 있다. 즉, 예측 모형을 통해 최종적으로는 풍력발전 단지별 출력 예측 값이 도출된다.

표 4는 13개 기관별 단기 예측을 위해 적용 중인 예측 모델의 유형을 나타낸다. 대부분의 기관에서는 Persistence 모델, 수치예보모델(Numerical Weather Prediction model), 통계 기반의 모델을 이용하고 있는 것으로 분석되었다. 구체적인 예측 모델에 대해서는 언급되지 않았지만, 대부분의 경우 수치예보모델에서 도출되는 풍속 예측 값을 활용하여 파워 커브에 적용하거나 통계 기반의 모델에 적용하는 것을 알 수 있다. Persistence 모델은 현재 값을 다음 시점의 미래 예측 값으로 이용하는 가장 단순한 예측 모델로, 변동성이 적은 지역에 대한 예측, 초단기 또는 실시간 예측, 예측 모델의 성능평가를 위

한 기준 모델(reference model)로 많이 이용된다. 기상예지모델(Weather situational model)은 수치예보모델과는 달리 태풍, 허리케인 등 급격한 기상이변에 대한 예측을 수행한다. 풍력터빈의 경우 기상이변 발생 시 기계적 고장발생을 대비하여 운영을 중단하기 때문에 7개의 기관에서 이에 대한 예측 모델을 이용하고 있다. Ramp 모델은 풍력발전의 변동성에 대한 예측을 수행하는 모델로 급격한 출력 변동 시 기존 발전기의 출력 증·감발이 요구되기 때문에, 발전기 응답성에 대한 대책 수립을 위해 이용되고 있다. 풍력발전 ramping forecasting은 최근 중요성이 증가되고 있기 때문에 CAISO 및 SCE 사에서 이를 검토 중인 것으로 분석되었다.

13개 운영기관은 표 4에서 기술된 기존의 예측 모델 유형 뿐 아니라 확률론적 예측 모델에 대한 검토를 진행하고 있다.

표 5. 기관별 확률론적 예측 모델 도입 여부

참여 기관명	양상블 모델 적용여부	신뢰수준 적용여부	적용 중인 신뢰수준 (%)	비고
AESO	○	○	10, 90	13개 양상블 멤버
APS	○	-	-	-
BPA	△	○	-	Super forecast
CAISO	○	도입 예정	90	-
Glacier Wind	○	○	-	제3자 제공 값 이용
Idaho Power	○	도입 예정	-	풍속예측 모델 4개 (가중치 동일)
PG&E	도입 예정	○	90	-
PGE	○	○	90	-
PSE	도입 예정	○	80	-
SMUD	검토 중	○	80	-
SCE	○	○	10 단위	제3자 제공 값 이용
Turlock	○	○	80	-
Xcel Energy	-	○	75	-

표 6. 기관별 풍력발전 예측오차 수준

참여 기관명	2011년 기준	2013년 기준
AESO	2010년 1월부터의 평균 예측 오차 하루 전 MAPE: 13%	2010년 1월부터의 평균 예측 오차 하루 전 MAPE: 12.8% 2시간 전 MAPE: 7%
CAISO	하루 전평균 오차: MAE 15% 이내 (풍력)	하루 전평균 오차: MAE 10% 이내 (풍력) 하루 전평균 오차: MAE 8% 이내 (태양광)
Glacier Wind	1시간 전 오차: Persistence 대비 MAE 10% 향상	1시간 전 오차: Persistence 대비 MAE 20-25% 향상
Idaho Power	2011년 4월-8월 기준: 하루 전 예측: MAE 12.2%	하루 전 예측: MAE 13% 1시간 전 예측: MAE 6.5%
SCE	하루 전 RMSE: 13-20%	하루 전 RMSE: 8-13%
Xcel Energy	-	MAE: 9.8% 이내

확률론적 예측 모델은 예측 결과가 최종적인 예측 값(결정론적 예측)뿐만 아니라, 예측 값에 대한 예상 범위(확률론적 예측)를 함께 도출한다. 따라서 예측의 범위의 크기를 통해 출력의 불확실성을 알 수 있기 때문에 의사결정 시 참고할 수 있는 지표로 활용가능하다.

양상블 모델을 채택하고 있는 AESO를 포함한 대부분의 기관은 수치예보모델(NWP)을 통한 풍속 예측에 대해 적용하고 있다. 북미 지역의 경우 다양한 수치예보모델이 존재하며, 각 모델별 예측 값을 1개로 통합하기 위한 방법으로 이용하고 있다. Glacier Wind, SCE, BPA의 경우 제3의 기관들(third-parties)로부터 예측 값을 제공받고 있다. Glacier Wind 및 SCE의 경우 제3의 기관에서 제공한 예측 값들에 대해 양상블 모델을 적용하고 있으며, BPA의 경우 제공받은 예측 값을 매 시간 평가하여 가장 정확성이 높은 기관의 예측 값만

을 적용하는 “Super forecast” 기법을 적용하고 있다. Idaho Power는 4개의 예측모델을 동일한 가중치를 적용하여 하나의 값을 도출하고 있다. PG&E(Pacific Gas & Electric) 사(社)를 포함한 2개의 기관에서도 양상블 모델을 검토하고 있는 것을 감안할 때 대부분의 기관에서 다양한 모델 또는 예측 값을 하나로 통합할 수 있는 양상블 모델에 대한 필요성이 높은 것으로 분석되었다. 또한 APS(Arizona Public Service)를 제외한 나머지 12개 기관에서는 신뢰수준(Confidence Interval)에 대한 분석을 수행하고 있거나 도입할 것을 검토하고 있는 것으로 나타났다.

신뢰수준은 단일 풍력발전 예측 값에 대한 예상 출력 분포를 나타내며, 전력계통 운영자는 이 값을 통해 보다 유연성 있는 의사결정을 할 수 있게 된다. SMUD(Sacramento Municipal Utility District)의 운영자는 신뢰수준을 통해 풍력

표 7. SPSC 변동성전원 예측 프로젝트 참여 기관

참여 기관명	평균 전력수요 (MW)	태양광발전 설비용량 (MW)
Alberta Electric System Operator (AESO)	8,604	0
Arizona Public Service (APS)	4,500	481
Bonneville Power Administration (BPA)	6,000	6
California Independent System Operator (CAISO)	21,579-35,781	3,263
Glacier Wind	N/A	0
Idaho Power Co. (Idaho Power)	1,759	2-3
Pacific Gas & Electric (PG&E)	18,707	CAISO 내 포함
Portland General Electric (PGE)	2,140	2
Puget Sound Electric (PSE)	4,328	0.5
Sacramento Municipal Utility District (SMUD)	1,200	150
Southern California Edison (SCE)	13,000	CAISO 내 포함
Turlock Irrigation District (Turlock)	245-336	3
Xcel Energy	4,000	390+
총량	-	4,297.5

발전량의 불확실성의 수준을 파악하고 있다. 불확실성이 낮은 시점에 대해서는 결정론적 값을 운영 계획에 즉각적으로 적용 하지만, 불확실성이 높은 시점에 대해서는 시점별 불확실성 수준에 따라 예비력 공급에 대한 계획을 수립하고 있다.

대부분의 기관에서는 예측 모델의 오차 평가 지표로 풍력발전단지 설비용량 대비 절대평균오차(Mean Absolute Error)를 이용하고 있으며, 그 외에도 MAPE(Mean Absolute Percentage Error), RMSE(Root Mean Square Error), 편향(Bias) 수준 등을 적용하고 있다. 13개 기관 중 6개의 기관에서 공개한 예측 오차 수준은 다음 표와 같다. 하루 전 예측의 경우 10% 내외의 오차율을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

북미 서부지역의 13개 운영기관 및 전력회사에서 적용 중인 풍력발전 예측의 관련 현황을 분석한 결과, 기상 예측 및 통계적 모델을 기존의 모델로 이용하고 있으며 최근에는 확률론적 예측에 대한 모델 도입도 검토하고 있는 것으로 나타났다. 특히 기상 예측에 대한 정확성을 높이기 위해 Met tower, 풍력발전단지 내 측정 센서, 수치예보모델에 대한 앙상블 예측기법 등을 도입하고 있는 것을 볼 때, 기상 예측에 대한 중요성을 높게 평가하는 것으로 사료된다.

2-2. 태양광발전출력 예측모형 개발 동향

본 절에서는 미국 서부 전력회사의 태양광 발전 예측 모형 [2]에 대해 분석하였다. 기존에는 전력회사들이 부하 변동이나 갑작스런 발전기 및 송전설비 고장 등에 대한 변동성 및 불

확실성을 다루었다면, 최근에는 신재생에너지가 확대되면서 기상 변동에 따른 신재생에너지 출력의 불확실성 및 변동성을 해결하기 위해 신재생에너지 출력 예측 기술을 향상시키고 있다. 또한, 북미 서부지역의 SPSC(State-Provincial Steering Committee)에서 신재생에너지의 연계 비용을 최소화할 수 있는 주요 방안으로 변동성 전원에 대한 예측 기술을 향상시키고자 하였다. 미국 서부 지역의 13개 전력계통 운영기관 및 전력회사가 변동성 전원 예측 프로젝트에 참여하였으며, 각 기관별 운영현황은 표 7과 같다. AESO(Alberta Electric System Operator)와 Glacier Wind를 제외한 나머지 회사에서는 태양광발전 설비를 보유하고 있다.

태양광발전 출력 예측을 위해 이용 중인 데이터는 SMUD를 제외한 모든 운영 기관들은 일사량을 기본적으로 이용하고 있으며, 데이터 유형이 유사함을 알 수 있다. 참고적으로, SMUD는 확률론적 태양광발전 출력 예측 기법을 적용할 계획이다. 이외에도 필요한 기타 데이터는 표 8과 같다.

미국 California ISO에서 태양광발전 출력 예측에 활용하고 있는 예측 모델 유형은 4가지로 분류된다. 예측 모델 유형으로는 Persistence 모델, Total Sky Imagery 모델, Satellite Imagery 모델, NWP(Numerical Weather Prediction) 모델을 사용하고 있다. Persistence 모델은 현재 값을 다음 시점의 미래 예측 값으로 사용하는 예측 모델로, 태양광 발전 출력의 최근 값을 그대로 사용하는 것이 일반적이며, 운량이 변함에 따라 예측 정확성이 급격하게 감소한다. Total Sky Imagery 모

표 8. 기관별 태양광발전 데이터 요구사항

운영 기관	일사량	기타 요구사항
APS	O	대규모 발전단지의 derate 및 forced outage rate
CAISO	O	풍력예측 시 사용된 기상 정보 / 발전단지에서 측정된 일사량 / 발전단지의 back-panel
PGE	O	월간 또는 일간 태양광 일사량
PG & E	O	-
SMUD	-	인버터 특성 및 이용 가능한 수량 / 태양광 시스템 유형 (추적식/고정식)
SCE	O	이용 가능한 인버터 수 / Curtailment 신호 발생이 가능한 스마트 인버터 태양광 어레이와 연계된 기상측정 센서
Xcel Energy	O	온도 / 태양광 일사량 / 발전 출력

표 9. 태양광발전 예측 기법 특징

예측 기법	Sampling rate	Spatial Resolution	Spatial Extent	Suitable Forecast Horizon	Application
Persistence	High	One point	One point	Minutes	Baseline
Total Sky Imagery	30 sec	10 s to 100 meters	2-5 mile radius	10 s of minutes	Short-term ramps, Regulation
GOES Satellite Imagery	15 min	1 km	US	5 hours	Load following
NAM weather model	1 hour	12 km	US	10 days	Unit Commitment

델은 실시간이나 15-30분 전 예측을 수행하며, 하늘 이미지를 가공하고 구름 추적 기법을 활용한 모델이다. 구름의 투명함, 방향, 이동속도가 일정하다고 가정하여 일사량에 대한 예측을 수행한다. Satellite Imagery는 Total Sky Imagery와 유사하며, 구름의 투과율을 이용하여 빛의 양을 계산하는 방법이다. 공간 및 시간적 해상도가 낮을수록 Total Sky Imagery 모델보다 정확성이 떨어지며, 1~5시간 예측 범위에서 정확도가 높은 예측 모델이다. NWP 모델은 5시간 이후 예측에서 가장 효과적인 예측 기법으로, 대기의 수치 동적 모델링을 통해 지역적인 구름 정보를 추정하기 때문에 확률론적으로 접근하는 방법이다. 표 9는 위에서 언급한 4가지 기법의 특징을 나타내고 있다.

<기술 지원 및 예측>
자체적인 실시간 기상예측을 통해 기상으로 인한 설비고장 및 인명 피해 방지

<성능 모니터링 및 보고 시스템>
발전설비의 성능 모니터링 및 평가를 통해 유지보수 필요 유무 판단 및 유지보수 계획 수립

<자동 제어 시스템>
위치(Site) 특성에 따른 신재생발전설비의 자동제어로 최적의 운전 유지

<상태 기반 모니터링 서비스>
CBM(Condition-Based Monitoring) 시스템 기반의 고장 상태 감지, 설비 성능 보고

를 함께 도출한다. 따라서 예측의 범위의 크기를 통해 출력의 불확실성을 알 수 있기 때문에, 의사결정 시 참고할 수 있는 지표로 활용될 수 있다. 또한, 신재생에너지의 예측기술을 기반으로 모니터링 시스템 제공기능은 아래와 같이 확대 적용할 수 있는 응용기술 개발이 필요 할 것으로 사료된다.

3. 신재생에너지 모니터링 시스템의 응용기술 개발 방향

본 고에서는 신재생에너지 모니터링 시스템 개발의 핵심인 예측기술의 해외 동향을 살펴보았다. 다양한 예측 기술 중 확률론적 예측 모델은 예측 결과가 최종적인 예측 값(결정론적 예측)뿐만 아니라, 예측 값에 대한 예상 범위(확률론적 예측)

참고문헌

[1] R. Widiss, K. Porter, A Review of Variable Generation Forecasting in the West, NREL/SR-6A20-61035, 2014
 [2] California Renewable Energy Forecasting, Resource Data, and Mapping, California Energy Commission, 2012