

풍력발전 출력예측 기법 및 모형



김 덕 호 | 상명대학교 에너지그리드학과
허 진 | 상명대학교 에너지그리드학과

I. 서 론

2011년

더반 총회에서는 교토의정서의 후속으로 선진 및 개도국이 모두 참여하는 2020년 이후의 신기후체제를 형성키로 합의하였다. 2015년 12월 파리 합의문 서명에 따라 2020년 모든 국가에 대해 적용되는 신기후 체제 도입됨에 따라 이에 대한 대비가 필요하다. 7차 전력수급기본계획에 따르면 신재생에너지는 2029년 기준 발전량 비중 11.7%, 발전설비 비중 20.1%까지

확대될 예정이며, 그 중 풍력과 태양광 비중이 전체 신재생전원의 약 84%를 차지할 전망이다. 국내 전력계통 특성상 태양광 및 풍력 중심의 신재생에너지원의 확대가 예상되며, 변동성이 심한 전력원(변동성전원, Variable Generation Resources)이 계통에 연계된 경우, 기존에 경험하지 못한 다양한 문제가 제기될 것으로 예상됨에 따라 이에 대한 대비가 필요하다. 화석연료의 고갈과 이산화탄소 감축, 다양한 환경 문제의 해결책으로 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 신재생에너지 발전 중 풍력발전은 특히 급격한 성장을 이루고 있으나, 다른 발전원과 비교를 해보면 환경적인 제약으로 인해

확대될 예정이며, 그 중 풍력과 태양광 비중이 전체 신재생전원의 약 84%를 차지할 전망이다. 국내 전력계통 특성상 태양광 및 풍력 중심의 신재생에너지원의 확대가 예상되며, 변동성이 심한 전력원(변동성전원, Variable Generation Resources)이 계통에 연계된 경우, 기존에 경험하지 못한 다양한 문제가 제기될 것으로 예상됨에 따라 이에 대한 대비가 필요하다.

화석연료의 고갈과 이산화탄소 감축, 다양한 환경 문제의 해결책으로 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 신재생에너지 발전 중 풍력발전은 특히 급격한 성장을 이루고 있으나, 다른 발전원과 비교를 해보면 환경적인 제약으로 인해

표 1. 전원 구성비 전망(2029)

[MW,%]

구 분	원자력	유연탄	무연탄	LNG	석유	양수	신재생	집단	합계
정격용량 (‘27 6차년도 비교)	38,329 (+2,413)	43,293 (-1,376)	725 (0)	33,767 (+1,973)	1,195 (-54)	4,700 (0)	32,890 (+876)	8,969 (+1,535)	163,868 (+5,366)
	23.4 (+0.7)	26.4 (-1.8)	0.4 (-0.1)	20.6 (+0.5)	0.7 (-0.1)	2.9 (-0.1)	20.1 (-0.1)	5.5 (+0.8)	100
피크기여도 (‘27 6차년도 비교)	38,329 (+2,413)	43,293 (-1,376)	725 (0)	33,767 (+0.5)	1,195 (-54)	4,700 (+0)	32,890 (+486)	8,969 (+1,804)	163,868
	28.2 (+0.8)	31.8 (-2.3)	0.5 (-0.1)	24.8 (+0.5)	0.8 (-0.1)	3.5 (-0.1)	4.6 (+0.1)	5.8 (+1.2)	100

표 2. 신재생에너지원 발전설비 종합계획(2029)

[MW,%]

구분	수력	풍력	해양 에너지	태양 에너지	바이오	폐기물	부생 가스	연료 전지	IGCC /CCT	합계
합계 ('27 6년도 비교)	1,824 (-41)	8,064 (-9,091)	1,025 (-420)	16,565 (11,151)	193 (-1,012)	168 (-520)	2,800 (+1,808)	1,351 (-398)	900 (-600)	32,890
비율 ('27 6년도 비교)	5.55 (-0.3)	24.52 (-29.1)	3.12 (-1.4)	50.36 (+33.5)	0.59 (-3.2)	0.51 (-1.6)	8.51 (+5.4)	4.11 (-1.4)	2.74 (-1.9)	100

표 3. ISO별 풍력발전 출력예측 적용분야

ISO	풍력발전 출력예측 적용분야
PJM	·PJM의 전력시스템 내 수요와 공급의 균형을 맞출 수 있도록 하는 자동 연계 프로세스 개발에 풍력발전 Day-ahead 예측 데이터를 이용
ERCOT	·하루 전 발전기 기동정지 계획 수립 시 예측 데이터를 이용
Midwest ISO	·송전망의 Security planning, 사고 조정 및 미래 송전망의 신뢰도 분석에 풍력발전 출력예측 데이터를 이용 ·바람의 변동성으로 인한 풍력발전 출력이 송전 flow gate에 미치는 영향을 분석하기 위해 이용
NYISO	·하루 전 발전기 기동정지 계획 수립 및 검토에 이용 ·실시간 기동정지 및 급전에도 예측 데이터 이용
CAISO	·한 시간 전 시장(hour-ahead market)에 참여하기 위해 풍력발전 예측 데이터를 이용하여 입찰
SCE	·Energy scheduling
Hydro-Quebec	·하루 전 급전계획, 당일 급전계획 수정, 단기 유지보수 계획 수립에 이용

출력의 변동성이 크다는 단점이 있다. 이러한 풍력의 출력을 예측하여 불확실성을 줄이고, 전력시스템과의 연계를 위해 풍력발전 예측 모델은 필수적이며, 계통 연계의 중요한 역할을 수행하고 있다. 풍력발전의 효율적, 안정적 전력시스템 운영을 위한 핵심 기술은 풍력발전 예측기술이며, 최근 유럽, 북미를 중심으로 다양한 모형 및 예측기술이 검토되고 있다. 본고에서는 풍력발전 출력예측의 고도화를 이루기 위해 예측 모형 및 기법을 살펴보고자 한다.

II. 풍력발전 출력예측 개요 및 모델

1. 풍력발전 예측 개요

급격한 성장이 이루어지는 풍력 발전에 대한 출력 예측은 출력의 불확실성을 줄이고 전력망과 전력시스템의 통합을 위해 필수적이다. 정확한 풍력발전 예측은 전력 계통의 효율성

과 신뢰성 향상에 도움을 줄 뿐만 아니라, 해외 전력시장의 경우, 하루 전 시장 계획에서부터 실시간 운영까지의 시장 운영, 기존 발전기 급전과 스케줄링 및 발전기 운영 계획 등 다양한 부분에 적용될 수 있다. 또한 시장참여자들에게 계획과 입찰에서의 기회 및 적절한 인센티브를 제공할 수 있다. 반대로, 정확한 풍력발전 예측이 이뤄지지 못한 경우에는 손실 또는 문제점이 발생할 수 있다. 풍력발전 과다 예측의 경우 기존 발전기의 발전량을 과다하게 줄여 계통 안정도에 문제를 발생시킬 수 있으며, 과소 예측의 경우에는 기존 발전기 발전량을 늘려 안정도에는 문제가 발생시키지 않으나 경제적인 손실이 발생할 수 있다.

풍력발전 예측데이터는 실제 해외 ISO(Independent System Operator)/RTO(Regional Transmission Organization)의 하루 전 운영이나 실시간 운영에 사용되고 있다. ISO/RTO는 풍력 예측 데이터를 SCUC(Security Constrained Unit Commitment)의 입력 값으로 사용하며, 이를 기반으로 신

뢰성 평가 계획을 수립하여 하루 전 시장 가격 반영에 이용하고 있다. 또한 비교적 불확실성이 낮은 단기 풍력발전 예측 데이터를 실시간 SCED(Security Constrained Economic Dispatch)에 반영하여 풍력발전을 실시간 급전체계에 포함하여 운영하고 있다. 풍력발전 출력 예측에 대한 미국 ISO의 실제 적용 사례를 아래 표에 정리하였다.

2. 풍력발전 예측 모델의 분류

풍력 발전 예측 모델은 시간 영역(time-scale)에 따라 분류하거나, 예측 기법에 따라 분류할 수 있다. [1-2] 시간 영역에

표 4. 시간 영역에 따른 풍력발전 예측 분류 및 적용

시간 범위	범위	적용
초단기	몇 분 ~ 1시간 전	·Electric market clearing ·실시간(Real-time) 전력 망 운영 ·규제 조치(Regulation actions) ·활성 풍력발전 터빈 제어 및 계통 주파수 전압 안정성 관련 연구
단기	1시간 ~ 몇 시간 전	·경제 부하급전 계획 ·합리적인 부하 결정 ·전력시장에서의 운영보안
중기	몇 시간 ~ 1주 전	·발전기 기동정지계획 결정 ·예비력 결정 ·발전기 투입 여부 결정
장기	1주 ~ 1년 전 혹은 수년 전	·유지보수 계획 ·운영관리 ·최적화 운영가격 ·풍력단지설계를 위한 실행가능성 연구 ·기후변화와 관련된 영향 검토

다른 분류와 그 적용 사례는 다음 표 및 그림과 같고 일반적으로 6시간 이내의 예측의 경우, 풍속 또는 발전량 실적 자료에 근거한 통계적 방법 적용이 적합하고 6시간 이후의 예측의 경우, 기상 수치 모델 등 물리적 방법 동시 적용이 적합하다.

예측 기법에 따라 풍력발전 예측 모델은 물리적 방법(Physical Method)과 통계적 방법(Statistical Method) 방법으로 크게 나뉘지며, 현재는 두 가지 방법을 모두 적용한 복합적 방법(Hybrid Method)이 가장 많이 사용된다. 각 방법에 대한 설명은 다음과 같다[3-5]. 물리적 방법은 예측하고자 하는 기상 요소와 관련된 물리 식을 계산하는 방법으로 기압배치도, 제트 기류 등의 기상조건과 대상지형의 지형고도, 토지 이용도 등의 지형적 특징을 고려한다. 이를 위해 지역 기상 서비스 또는 NWP(Numerical Weather Prediction) 모델에서 제공하는 풍속을 변환하는 것을 포함한다. NWP는 대기 관측 정보를 컴퓨터를 이용해 날씨변화를 물리 규칙에 따라 예측하는 방법으로 기본 원리에 대한 미분 방정식이 3D 화면으로 구현되고 기본 대기 변수의 모든 것을 표현하여 시뮬레이션을 반복적으로 실행한다. NWP는 각 격자에 대한 변수 초기 값 지정을 해야 하며 표면 근처 바람 예측에 최적화된 방법으로 표면 바람 예측에 맞는 높은 수직, 수평 해상도를 사용해 종합적인 시뮬레이션을 수행한다. 또한 정부가 운영하는 모델에서 사용하지 않은 데이터를 통합하는 역할을 수행하기도 한다. NWP 모델과 기존 데이터를 이용하여 터빈 허브 높이의 데이터를 추정하여 물리적 지형을 고려하고, 특정 터빈 또는 풍력 전환의 대수 전력 법칙을 위한 전력 곡선을 이용한다. 물리적 방법을 기반으로 개발되어 상용중인 모델의 예시는 표 5에 기술하였다.

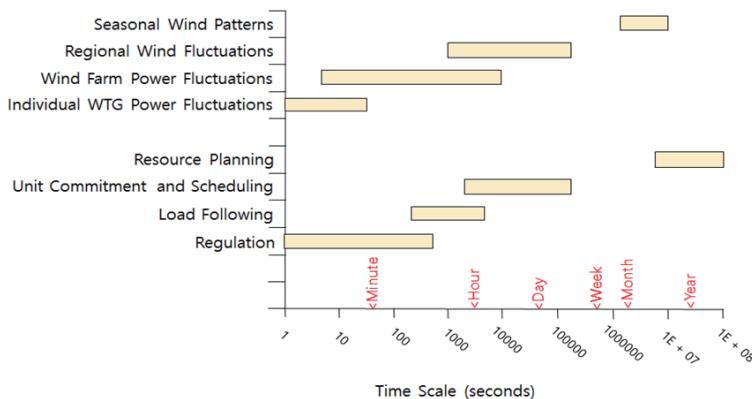


그림 1. 시간 영역에 따른 풍력발전 응용분야

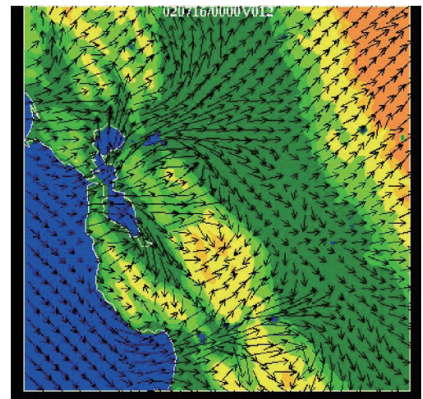


그림 2. NWP 모델

표 5. Physical Methods

Method	Model Name	Developer	Geographical Locations
Physical	Prediktor	L. Landberg at Ris ø	Spain, Denmark, Republic of Ireland, Northern Ireland, France, Germany, USA, Scotland and Japan
	SOWIE	Eurowind GmbH, Germany	Germany, Austria and Switzerland

표 6. Statistical Methods

Method	Model Name	Developer	Geographical Locations
Statistical	WPPT	IMM & DTU	Denmark, Australia, Canada, Ireland Holland, Sweden and Greece
	Sipreólico	University Carlos III & Red Eléctrica de España	Spain
	WPMS	ISSET, Germany	Germany
	GH Forecaster	Garrad Hassan	Greece, Great Britain and USA
	Alea Wind	Aleasoft at UPC, Spain	Spain

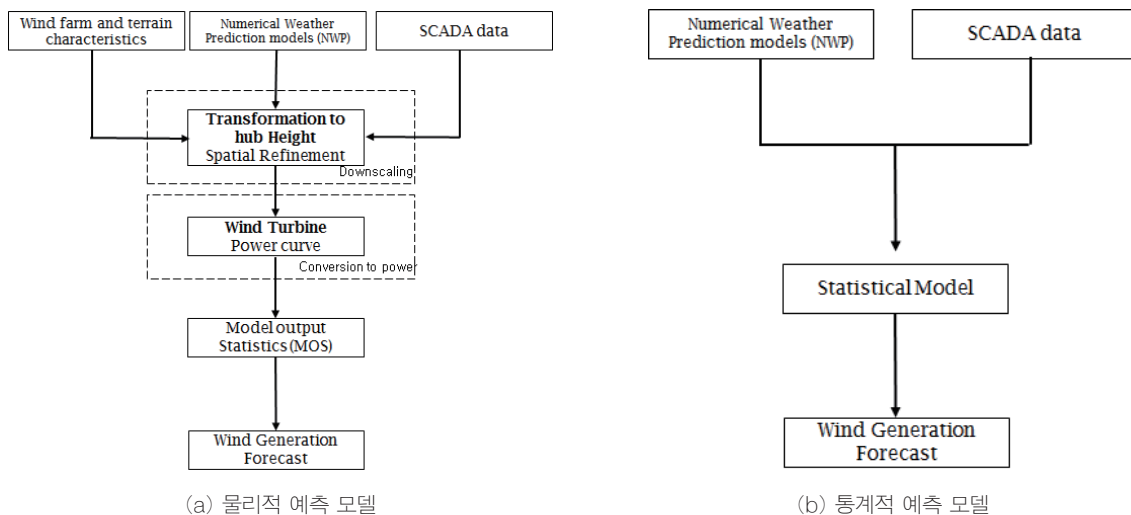


그림 3. 풍력발전 예측 모델

통계적 방법은 과거 실측 자료를 기반으로 훈련을 통한 패턴 분석을 이용하여 도출된 실증 방정식을 이용하며, 날씨 예측 및 풍력발전기의 잠재적인 출력 사이에서 통계적인 관계를 개발하여 풍력을 예측하는 방법이다. 과거의 데이터가 많을수록 정확도가 증가하고 빠른 시간 내에 예측 값을 제공해야 하는 경우에 적합하다. 선형 회귀, ARMA(Auto-Regressive Moving Average Model)/ARIMA(Auto-Regressive Integrated Moving Average Model) 모델, ANN(Artificial Neural Networks) 모델 등 많은 모델을 사용할 수 있고 기준 모델 및 예측 오류마다 다른 특성을 가지며 오차 강도는 사용

자에 따라 다르게 나타난다. 통계적 방법은 NWP 모델보다 작은 규모에 대한 예측이 가능하고 물리적 모델의 예측 오류를 수정하며, 물리적 방법 수행 이후에 취득하거나 사용하지 않았던 추가 관측 자료를 통합하고 전력 예측 데이터와 발전량 데이터를 통합하는 역할을 수행하기도 한다. 통계적 방법을 기반으로 개발되어 상용중인 모델의 예시는 표 6에 기술하였다. 위에서 구분한 바와 같이 풍력발전 예측에 대한 물리적, 통계적 모델의 일반적인 플로우(flow)는 아래 그림과 같이 표현할 수 있다.

현재 풍력 예측모델의 경우, 물리적 모델과 통계적 모델을

표 7. Hybrid Methods

Method	Model Name	Developer	Geographical Locations
Hybrid=	Zephyr	Risø & IMM	Australia
	Previento	Oldenburg University	Germany, Northern Ireland
	e Wind TM	True Wind Inc.	USA
	WEPROG	J. Jørgensen & C. Möhrlen at UCC	Ireland, Denmark and Germany
	LocalPred & RegioPred	M. Perez at CENER, Formerly CIEMET	Spain and Ireland
	Scirocco	Aeolis Forecasting Services, Netherlands	Netherlands, Germany and Spain
	SOWIE	Eurowind GmbH, Germany	Germany, Austria and Switzerland

통합한 Hybrid 형태의 예측 모델을 가장 많이 사용하고 있다. 하지만 기존의 예측모델은 예측 오류 특성이 서로 다르고 시간에 따라 오차가 비례하는 단점을 가지고 있다. 풍력발전의 에너지원인 바람은 시간과 공간적 제약이 있지만 기존 풍력발전의 예측 모델은 시간적 요소만을 고려했기 때문이다. 따라서 앞으로의 풍력발전 예측은 시간적인 특성만 고려할 뿐만 아니라 공간적인 특성을 같이 고려할 필요가 있다.

3. 해외 풍력발전 예측 모델 사례 : ERCOT 및 3TIER

미국 텍사스 주의 ISO인 ERCOT은 다양한 특징을 지닌 다양한 입력 데이터를 사용해 풍력을 예측한다. 이 방법은 예측 시간에 따라 변하는 조건과 데이터의 종류가 중요 시 되고, 예측 모델의 입력 데이터를 사용하는 방법에 따라 크게 변화한다. 그림 4 및 5에서 보는 것처럼 물리적 방법을 사용하여 지역의 대기 모델을 예측하고 그 모델과 지역의 날씨, 전력데이터들에 대해 통계적 방법을 이용하여 발전량을 산정한다. 현재 ERCOT의 풍력 예측 시스템은 물리 모델을 6시간 마다 실행하고 있고 일부 파워 커브 곡선을 사용하여 발전량을 예측한다. 현재 계획하고 있는 시스템은 9개의 물리 모델을 16시간씩 실행하고 추가적인 1개의 물리모델을 지속적으로 실행한다. 또 통계

적 방법에 최적화하여 파워커브 곡선을 모두 적용해 예측하는 시스템이다[6].

Vaisala의 자회사로 운영 중인 3TIER는 설비 관리 및 신재생 에너지 예측 서비스를 운영 중인 기업이다. 3TIER는 물리적 모델을 통해 얻어진 기상 데이터와 예측 지점에 대해 스케일링된 데이터를 통계적 모델 및 MOS(Model Output Statistics)에 적용하여 풍속이나 기상 데이터를 예측한다. 이후 얻어진 풍력 예측 값을 설치하고자 하는 제조사 파워 커브의 입력 데이터로 이용하여 출력 예측 값을 얻는다. 출력 예측을 위해 입력 데이터로 위도 및 경도, 설비 용량, 터빈 제조

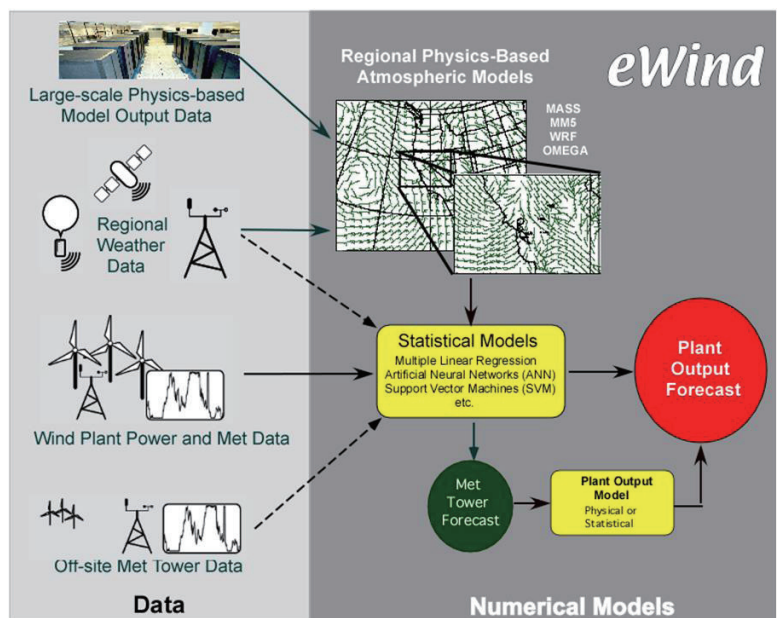


그림 4. ERCOT의 최신 풍력 예측 시스템의 입력 데이터와 흐름도

III. 풍력발전 예측 모델 발전 방향

본 절에서는 현재 풍력 발전예측과 관련된 이슈 및 동향을 다루고, 앞으로의 풍력 발전 예측 시스템의 방향을 제시한다. 현재 풍력 발전예측에 대한 이슈 중 하나로 해상풍력발전 예측에 대한 부분이 존재한다. 이제까지 풍력 발전의 예측은 대부분 육상풍력에 초점을 맞춰 왔다. 하지만 해상풍력에 대한 관심과 발전이 빠르게 이뤄지고 있는 만큼, 해상 풍력발전 예측의 중요성도 더불어 커지고 있다. 현재의 풍력발전 예측 시스템은 주로 육상풍력을 위해 설계되었기 때문에 해상 풍력 예측에 적용 시에는 많은 오차가 발생한다. 해상풍력은 특성상 광대하고 평평하기 해상에서 이뤄지기 때문에 기상전선이 육상에 비해 더욱 민감하며, 해상 풍력의 위치 정보에 대해 NWP 출력을 입증하기 위한 기상 데이터의 가용성이 낮다는 특징이 있다. 현재 풍력발전 예측에 대해 진행 중인 주요 연구 활동으로는 풍력발전 예측에서의 오차를 줄이기 위한 연구, 분산된 육상풍력발전 예측 개선에 대한 연구, 해상 풍력 발전을 위한 예측 방식 개선에 대한 연구, 기상 예측과 함께 결합되어 풍력발전 예측 향상을 위한 연구가 있다.

풍력발전 예측은 풍력 발전의 계통연계에 중요한 도구로 예측 모델의 정확도 향상에 대한 연구는 지속적으로 필요하다. 계통 연계 시 풍력발전의 불확실성을 보완하기 위해 반응속도가 빠른 발전시스템 및 에너지 저장 시스템이 필요하며, 풍력발전 예측시스템은 운영자가 사용하기 용이하도록 개선해야 할 필요가 있다. 앞으로의 풍력발전 예측 시스템 모델링 방향은 급전여부에 따라 구분할 수 있다. 발전량이 시간에 따라 일정하지 않은 경우에는 고

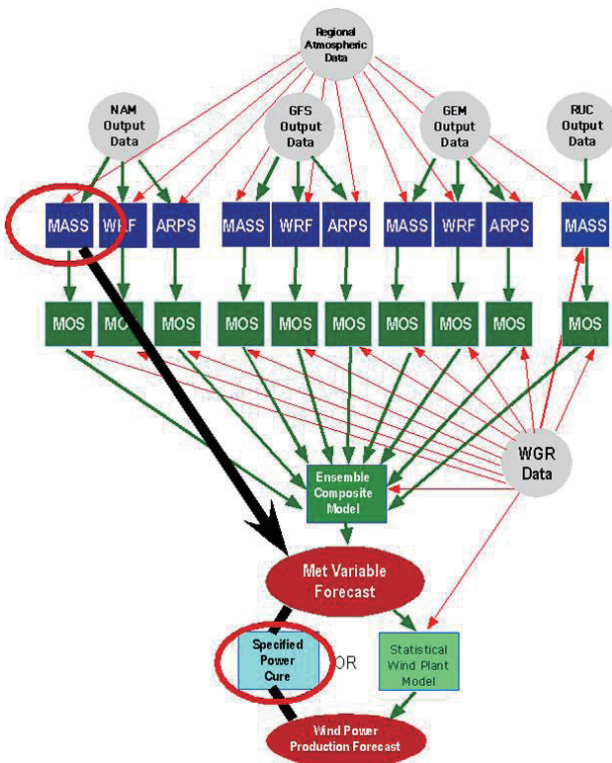


그림 5. ERCOT의 예측 시스템

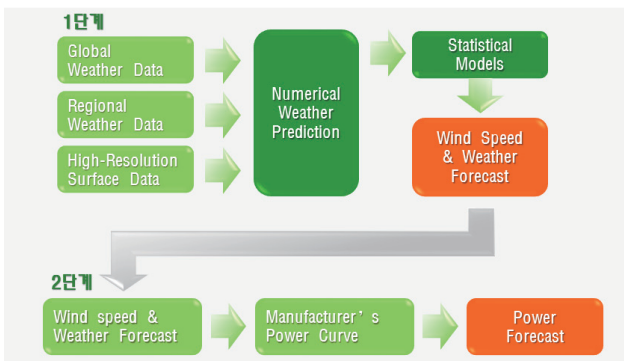


그림 6. 3TIER의 풍력발전 예측 시스템

사 및 모델, 풍력 예측 지점, 출력 관측 값 등을 이용한다. 3TIER의 지역별 풍력 발전예측 알고리즘은 다음과 같다[7].

해외의 구현 사례 모두 물리적 방법을 수행하여 기상 예측 자료가 생산된 후에 통계적 방법을 적용하여 예측하는 물리적 방법과 통계적 방법을 결합하여 활용한다.

풍력발전 예측은
풍력 발전의 계통연계에
중요한 도구


정된 발전량과 적절한 고장 정지율을 갖는 자원과 함께 모델링하는 것이 적절하며 고장정지의 확률적 처리기법을 활용하여 풍력발전 출력의 불확실성을 반영하는 것이 필요하다. 또한 예측 시스템 구현 시에는 다양한 위치의 풍력발전 단지들 간의 상관관계 검토가 필요하다. 근접하게 위치한 풍력발전 단

지들은 지역적으로 멀리 떨어져 있는 단지들에 비해 높은 상관관계를 가지는 특성이 나타난다. 예외적으로 지역적으로 떨어져 있지만 기상조건의 상관관계가 높아 전력생산 패턴이 유사하게 나타는 경우도 존재한다.

IV. 결 론

신재생에너지원 중에서 풍력발전은 다른 에너지원에 비해 성장속도가 가파르게 증가하고 있으며, 대규모 풍력발전이 전력시스템에 연계되고 운영될 것으로 예상된다. 풍력발전은 기존 발전설비와 달리 시간(time)과 공간(space)의 환경제약으로 출력 간헐성이 존재하므로 불확실성을 고려한 계통 계획 시 풍력발전의 예측은 매우 중요하다. 기존의 시계열 기반 풍력발전을 통해 통계적 분석(ARMA/ARIMA) 또는 과거 이력 데이터를 이용한 패턴분석으로 예측 수행하였지만 상당한 예측오차 발생하기 때문에 시계열예측을 개선할 수 있는 공간예측 기법 개발이 필요하다. 또한 기존의 풍속을 단일변수로 예측하던 한계에서 벗어나 풍력발전 출력(Power Output)을 주 변수(Primary Variable)로 정의하고 예측오차를 개선할 수 있는 종속변수(Secondary Variables)를 추가로 정의하여 확률 기반의 다변수 공간예측 알고리즘 개발이 필요하다.

최근에는 NWP 모델 영역 내의 여러 종류의 예측 기법을 통합하여 예측을 수행하는 Ensemble forecast 모델에 대한 관심이 높아지고 있다. Ensemble 모델은 기존의 단일 값으로 제공되던 결정론적 한계를 보완하기 위해 여러 개의 예측 모델을 수행하여 기존의 결정론적 예측 값과 확률적으로 접근한 불확실성에 대한 정보를 모두 제공하는 모델이다. 단일 예측 모델에만 의존하여 예측을 수행할 경우 예측 시간이 길어질수록 불확실성이 커져 큰 오차가 발생할 수 있기 때문에 여러 개의 예측 모델 결과를 평균한 Ensemble mean 값을 예측 값으로 활용하여 오차를 개선하는 기법이다. 기존의 연구방법은 계통 계획 시 풍력발전의 불확실성에 따른 확률론적 특성, 지역적 상관관계, 풍력발전의 변동성을 담당하는 보조서비스(예비력) 비용 산정을 반영하지 못하고 있으며, 해상풍력과 같은 새로

운 풍력발전 시스템에 대한 새로운 예측 기법이 적용되지 못하고 있다. 따라서 풍력발전의 다변수 공간예측 알고리즘 및 Ensemble forecast와 같은 개선된 풍력예측 기법과 해상풍력에 적합한 예측 시스템을 산정하여 풍력발전 수용성 확대, 계통계획 수립 시 신규 송전망 건설 및 시스템 예비력 산정 등 방안 검토, 풍력발전 투입에 따른 송전혼잡 예측을 통한 전력시스템 신뢰도 개선이 시급하다. 

참고문헌

- [1] M. Foley, "Wind Power Forecasting & Prediction Methods", IEEE, 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Prague, Czech Republic, 2010
- [2] N Hofstra and M New, "Short Communication Spatial variability in correlation decay distance and influence on angular-distance weighting interpolation of daily precipitation over Europe", International Journal of Climatology, 1872~1880, 2009
- [3] M Lei, J Shiyann and J Chuanwen, "A review on the forecasting of wind speed and generated power", Science Direct, 915-920, 2009
- [4] SB Kim, JH Lee, JS Hyun, "Correlation Analysis of Renewable Energy Sources for Future Power Preparation in Jeju", SoftTech 2013, ASTL Vol. 19, pp. 135 - 138, 2013
- [5] A Botterud and J Wang, Wind Power Forecasting and Electricity Market Operations, 2009
- [6] J W.Zack, Overview of the Current Status and Future Prospects of Wind Power Production Forecasting for the ERCOT System, 2009.06
- [7] T Gneiting and K Larson, "Statistical Algorithms for Short-term Wind Energy Forecasting", 3TIER Environment Forecast Group