

Getting Wind and Sun Onto the Grid

태양과 바람의 전력망 수용

A Manual for Policy Makers

정책설계자를 위한 안내서

본 문서에서 제시된 견해는 국제에너지기구(IEA) 사무국 또는 개별 회원국의 견해나 정책을 반드시 반영하지는 않는다. 이 문서는 어떤 특정한 문제나 상황에 대한 조언이 되지 않는다. IEA는 문서의 내용 (완전성 또는 정확성 포함) 과 관련하여 명시적 또는 묵시적 표현이나 보증을 하지 않으며, 문서의 그 어떤 사용이나 의존에 대해 책임을 지지 않는다. 의견은 환영하며 sir@iea.org 으로 연락하면 된다.

국제에너지기구

국제에너지기구(IEA)는 석유·가스·석탄 수급, 재생에너지, 전력시장, 수요관리, 에너지 효율, 에너지 접근성 등 에너지 산업 전 분야에 걸친 심도있는 분석을 통해 30개 회원국과 7개의 준회원국이 지속 가능하고, 신뢰성있는 에너지 시스템을 구축하는 데에 기여하고 있다.

IEA가 다루는 4대 핵심 영역:

- 에너지 안보: 에너지 수입 경로의 다변화, 에너지 수급의 유연성 제고 및 에너지 효율 향상
- 경제 성장: 에너지 빈곤을 없애고, 경제 성장을 효과적으로 지원하기 위한 에너지 시장 구조 설계
- 지속 가능성: 기후변화 방지 및 대기오염 저감을 위한 정책 방안 분석
- 국제 협력: 회원국 뿐만 아니라 전 세계 주요 개발도상국들이 다양한 에너지 현안을 논의하는 협력의 장 마련

IEA 회원국:

호주
오스트리아
벨기에
캐나다
체코
덴마크
에스토니아
핀란드
프랑스
독일
그리스
헝가리
아일랜드
이탈리아
멕시코
일본
대한민국
룩셈부르크
네덜란드
뉴질랜드
노르웨이
폴란드
포르투갈
슬로바키아
스페인
스웨덴
스위스
터키
영국
미국



© OECD/IEA, 2018

International Energy Agency
Website: www.iea.org

본 출간물은 그 사용과 배포에 있어 특정한 제한을 받고 있음에 주의하십시오. 관련 조건 및 조항은 다음 주소에서 온라인으로 확인할 수 있습니다:
www.iea.org/t&C/

유럽 연합 집행위원회 역시
IEA의 업무에 참여하고 있다.

번역본 발간에 기여하신 분들

한국어 번역본을 발간하는데 많은 분들이 기여하셨습니다. 전체 번역을 담당한 채영진님, 계통전문가 입장에서 전문용어와 실제 현업 상황을 고려하여 꼼꼼하게 교정과 의견을 주신 송태용님, 이창근님과 초심자 입장에서 교정과 의견을 주신 한수경님, 신송하님께 감사드립니다. 전기연구원의 정구형 박사님은 전문가 입장에서 번역본 내용 개선에 많은 기여를 하였고, 이투뉴스의 이상복 기자님은 언론인으로서 번역본의 많은 오류를 세밀하게 수정해주시고 적절한 용어 선택에 큰 도움을 주셨습니다. 또한 IEA와의 실무협약에 도움을 주신 SK 에너지의 김근형님께도 감사의 마음을 전합니다. 마지막으로 본 책자의 발행에 많은 관심을 가져주시고 승인해주신 전력거래소 조영탁 이사장님께도 깊이 감사 드립니다.

이 번역본은 IEA의 적절한 협조와 허락이 없었으면 불가능한 일이었습니다. IEA의 Peerapat Vithayasrichareon를 비롯한 관계자 여러분께도 깊이 감사 드립니다.

이 한국어 번역본은 공식 영어판을 참고하였습니다. 한국어 번역본 파일은 전력거래소 공식 웹사이트(<http://www.kpx.or.kr>) 종합자료실에서 찾아보실 수 있습니다.

목차

감사의 글	5
개요.....	6
도입.....	10
이 문서에는 무엇이 담겨있나?	10
누가 이 문서를 읽어야 하는가?	10
이 문서에 담겨있지 않은 것은?	11
전력망 연계: 신화와 현실	11
주장 1: 기상변화에 따른 변동성은 관리할 수 없다.....	11
주장 2: VRE 보급은 기존 발전소에 높은 비용 부담을 초래한다	12
주장 3: VRE 용량에는 1 대 1 “백업”이 필요하다.....	12
주장 4: 전력망 관련 비용이 너무 높다	13
주장 5: (전력) 저장은 필수다.....	14
주장 6: VRE 용량이 전력계통을 불안정하게 한다.....	14
VRE 연계의 여러 단계	16
1 단계: VRE 가 전체 계통에 미치는 영향이 없음	19
2 단계: VRE 에 의한 영향 인지.....	20
3 단계: 유연성에 대한 우선 고려	20
4 단계: 전력계통 안정도의 중요성 증대	21
4 단계를 넘어서.....	22
VRE 보급 단계 요약.....	22
전략 및 계획수립: 성공적인 전력계통 연계의 기반.....	23
1 단계: VRE 가 전체 계통에 미치는 영향이 없음.....	25
전력망은 확인된 입지에서 VRE 를 수용할 수 있는가?	28
가용 전력망 용량 결정하기	28
가능한 전력망 개선 요건 관리	29
적절한 기술적 전력망 접속 규칙이 있는가?.....	30
2 단계: 계통운영자가 VRE 에 의한 영향 인지	32
순 수요란 무엇인가?	32
계통 연계를 위한 새로운 우선순위	33

전력망 접속 규칙이 적절한가?	33
VRE 발전량이 계통운영에 반영되는가?	34
계통운영자에게 제공되는 발전소 가시성	34
VRE 발전량 예측.....	36
발전소 운영계획 수립, 연계 조류량 관리, 운영 예비력	37
실시간 및 그에 근접한 시간대의 발전소 관제	39
전력망이 VRE 보급을 지속하기에 수용능력이 충분한가?	41
VRE 보급과 신규 송전선로 증설 동기화	41
기존 전력망 인프라의 최적 사용	43
저압 및 중압 전력망에서 양방향 전력 조류 처리	45
VRE 는 계통 친화적인 방식으로 보급되고 있는가?	46
기술 믹스	46
VRE 의 지리적 분산	48
VRE 발전소 위치 관리 메커니즘	51
3 단계: 유연성이 유의미해 진다	53
유연성이란 무엇이며 왜 중요한가??.....	56
화력발전소 유연성 결정	57
유연성 발굴 및 지원	58
결론 및 권고사항	60
VRE 보급 1 단계에 대한 권고 사항	60
계통 연계를 점진적인 프로세스로 처리	60
올바른 문제에 집중	60
전력망 접속 용량의 투명하고 건전한 기술 평가 보장	60
최신 국제 산업표준이 VRE 보급 초기부터 전력망 접속 기술요건에 대한 기초를 제공	60
2 단계에 대한 권고 사항	61
적절한 전력망 접속 규칙이 준비되어 있도록 보장	61
발전소 운전 시 VRE 반영	62
VRE 수용을 위한 충분한 전력망 용량 보장	63
VRE 가 전력계통에 미치는 영향 최소화	64
부록 1: VRE 개발 사업자들에게 정보 제공	65
어떤 정보가 필요한가?	65
어떻게 위의 정보를 공유할 수 있을까?.....	66
부록 2: 전력망 접속 규칙의 초점	68
접속 규칙이 무엇이고 왜 중요한가?	68

전력망 운영규칙이 VRE 에 적합한가?.....	70
VRE 보급요인	71
전력계통의 기술적 특성	71
규제 및 시장 맥락	72
적절한 전력망 운영규칙 개발 프로세스	72
VRE 비중에 따른 전력망 운영규칙 요건 우선순위 지정	74
전력망 운영규칙의 시행 및 개정	75
용어 사전	77
참조문헌	80
축약 및 약어.....	82
측정단위	82

그림 목차

그림 1 • 국가별 연간 VRE 발전비중 및 다양한 VRE 단계 적용, 2015	18
그림 2 • 전력수요 및 VRE 발전량, 이탈리아, 2010 년 4 월 13 일	25
그림 3 • 1 단계: 이슈 정리 및 접근 방법	25
그림 4 • 전력수요, VRE 발전량 및 순 수요, 이탈리아, 2016 년 4 월 13 일	32
그림 5 • 2 단계: 이슈 정리 및 접근방법.....	33
그림 6 • CECRE 의 관제실	41
그림 7 • 매립형 태양광 발전 발전기의 양방향 전력 조류.....	46
그림 8 • 독일의 풍력 및 태양광 월간 발전량, 2014.....	47
그림 9 • VRE 발전비중에 따른 평균 VRE 발전 차단 에너지 및 변전소 용량 대비 백분율로 산정	47
그림 10 • VRE 출력 및 지리적 분산의 이점	49
그림 11 • 풍력 발전소의 지리적 분산은 발전량 평활화로 이어진다, 남아프리카 공화국	50
그림 12 • 독일 각 지역 풍력 발전 프로젝트의 시장 가치	52
그림 13 • 전력계통 유연성을 활용한 VRE 균형유지	55
그림 14 • 일조량강도(Direct Normal Irradiance) 수준을보여주는 AREMI	67
그림 15 • FRT 기능이 없는 풍력설비 규모 및 전압강하로 100MW 이상 전력손실이 발생한 횟수(스페인).....	70

표 목차

표 1 • VRE 전력망 연계의 4 단계	18
표 2 • 풍력 및 태양광 발전 간 차이점 개요	55
표 3 • VRE 보급의 여러 단계에 따른 기술 요건	75

Page | 4

박스 목차

박스 1 • 전력망 연계 과제의 범위를 결정하는 전력계통 주요 특성	16
박스 2 • 풍력과 태양광 보급을 빠르게 시작하기	26
박스 3 • VRE 기술 표준	30
박스 4 • 스페인 재생에너지관제센터(CECRE)	40
박스 5 • 전력망 취약 지점 관리	44
박스 6 • 남아프리카 전력망의 VRE 수용 용량에 대한 모델링 기반 상호보완성 영향 분석 ...	47
박스 7 • 풍력 및 태양광 발전 변동성을 평활화 시키기 위한 수단으로서의 지리적 분산	48
박스 8 • 풍력 및 태양광 발전: 둘 다 변동성이 있지만 동일하지는 않다	53
박스 9 • 하와이 전력회사(HECO)의 기존 발전소 자산 관리	58
박스 10 • 아일랜드의 최소 발전 수준	59
박스 11 • 호주 재생에너지 지도 인프라	66
박스 12 • 유럽전력망 운영규칙 요구조건의 변화	69

감사의 글

본 간행물은 국제에너지기구(IEA)의 재생에너지 계통 연계(SIR) 부서에 의해 작성되었다. SIR의 책임자인 Simon Mueller와 Peerapat Vithayasrichareon(SIR)는 New Resources Partners 사(社)의 Hugo Chandler와 함께 이 보고서의 주요 작성자이다. Emanuele Bianco(SIR)도 상당한 기여를 했다. 이 보고서는 재생에너지 본부 책임자인 Paolo Frankl과 에너지 시장 안보 담당 이사인 Keisuke Sadamori의 감독 하에 작성되었다.

이 문서는 IEA 풍력 기술 협력 프로그램인 Task 25 *대용량 풍력과 전력계통 운영 및 설계*, 특히 Hannelle Holtinnen(VTT)로부터 도움을 받았다. 또한 리뷰와 추가 의견을 주신 Debra Lew(GE Energy Consulting), Charlie Smith (UVIG) 및 Jens Tambke (Oldenburg 대학)에게도 특별히 감사드린다.

저자들은 Fernando De Sisternes (세계은행), Miguel de la Torre Rodriguez(Red Eléctrica de España), Matthias Deutsch, Fabian Joas, Shuwei Zhang (Agora Energiewende), Lion Hirth (Neon Neue Energieökonomik GmbH), Jonathan Horne (M.P.E. Power System Consultants), Ruud Kempner, Dimitrios Sofianopoulos (유럽 의회) 그리고 Mariano Morazzo (ENEL)가 제공한 의견에도 감사드린다.

IEA는 독일 연방의 경제에너지부, 유럽기후재단, ENEL 재단이 이 프로젝트를 위해 제공한 재정 지원에 감사한다.

이 보고서에 대한 의견과 질문은 환영하며, Simon Mueller (simon.mueller@iea.org) 또는 SIR 부서 (sir@iea.org)로 문의하면 된다.

개요

Page | 6

풍력 및 태양광 발전 용량은 많은 국가에서 지원 정책 및 극적인 기술 비용 하락 덕분에 매우 빠르게 증가했다. 2015 년 말까지, 이러한 기술(충청적으로 변동성 재생 에너지(이하 VRE)라고 함)은 10 개 국가에서 연간 전력 생산 비중이 두 자릿수에 도달하였다. 덴마크에서는 약 50%까지 상승했고, 아일랜드, 스페인, 독일에서는 대략 20%를 차지했으며 모든 경우 전력 공급의 신뢰도를 떨어뜨리지 않았다.

이러한 증거에도 불구하고, VRE 연계에 대한 논의는 여전히 (옳지 않거나 이해하지 못하는 정보에 기인한) 오해, 신화, 그리고 경우에 따라 잘못된 정보 등으로 인해 바람직하지 않게 전개되는 경우가 많다. 일반적으로 알려진 주장에는 VRE 연계를 위해 전기저장장치나 필수 조건이며, VRE 비중이 증가함에 따라 기존 발전기가 매우 높은 추가 비용에 노출된다는 주장이 포함된다. 의사결정자들이 이러한 잘못된 주장들에 현혹된다면, 진짜 문제들에 대한 관심이 소홀해질 수 있다(물론 이 문제들은 궁극적으로 관리가 가능하다); 만일 이를 억제하지 않고 그냥 놓아둔다면, 이 주장들은 VRE 보급에 큰 지장을 초래할 수 있다.

에너지부처 및 규제기관 정책 당국자와 직원을 위해 작성된 본 안내서에는 두 가지 주요 목표가 있는데, 첫째는 VRE 보급 초기에 직면했던 진정한 당면 과제를 명확히 하고, 둘째는 이러한 어려운 과제를 완화하고 성공적으로 관리할 수 있는 방법을 제시하는 것이다.

이는 VRE 보급의 4 단계에 걸쳐 전력계통의 비용 효율성과 신뢰도를 유지하는 방법이 어떻게 달라질 수 있는지를 보여준다. 이러한 단계는 VRE 용량 증대에 따른 전력계통 영향 수준에 따라 구별되는데, 해야 할 일의 우선순위를 결정하는 유용한 프레임워크를 제공한다. 만일 이러한 프레임워크가 없다면 보급 초기부터 계통 연계와 관련된 여러 가지 도전과제에 직면하게 되어 적절한 조치를 취하기 어려워질 수도 있다.

1 단계는 매우 간단하다. 1 단계의 VRE 용량은 전력계통에 뚜렷한 영향을 미치지 않는다. 최초 풍력 발전소와 태양광 발전소가 대규모 전력계통에 설치된 경우, 풍력과 태양광의 발전량과 변동성은 일일 전력수요 변화에 비해 매우 미미하기 때문에 큰 문제가 안 된다. 현재 VRE 보급 단계 중 1 단계 국가의 예로는 인도네시아, 남아프리카 및 멕시코가 있으며, 연간 VRE 점유율은 연간 전력 생산량 대비 약 3% 미만 수준이다.

2 단계에서는 VRE 가 주목할 만한 영향을 미치지만 일부 계통운영 방식을 개선하면 그 영향을 쉽게 관리할 수 있다. 예를 들어, VRE 발전소 출력 예측을 할 수 있고, 이를 통해 (응동 능력이 우수한) 유연한 발전소가 전력수요 변동성과 함께 VRE 변동성을 좀 더 효율적으로 관리하여 전력수급 균형을 맞출 수 있다.

VRE 전력생산량 점유율 측면에서는 1 단계처럼 3% 미만이라는 단일 기준이 있는 것은 아니다. 전력계통이 2 단계로 진입할 때는 각 계통의 개별적인 특성에 따라 다르다. 예를

들어 VRE 2 단계 점유율은 3~15% 사이인데, 현재 2 단계 국가에는 칠레, 중국, 브라질, 인도, 뉴질랜드, 호주, 네덜란드, 스웨덴, 오스트리아 및 벨기에가 포함된다.

VRE 3 단계는 VRE 자원의 생산 변동성으로 인해 전체 전력계통과 다른 발전소에 미치는 영향이 실제로 감지되기 때문에, VRE 자원을 전력계통에 연계하는 매우 중요한 과제가 처음으로 드러난다. 이제 전력계통 유연성이 맨 앞에서 주목을 받게 된 것이다. 여기서 유연성이라는 용어는 예를 들어 바람이 약해질 때 분 단위에서 시간단위로 다른 자원으로부터 전력을 공급할 수 있는 능력, 즉 전력수요공급(이하 수급) 균형의 불확실성과 변동성에 대응하는 전력계통의 능력을 말한다. 오늘날, 두 가지 주요 유연성 자원에는 중앙급전 발전소와 송전망이 있다. 그러나 수요 측면의 자원 및 새로운 에너지 저장장치 기술이 중기적으로 중요해질 가능성이 높다. 3 단계 VRE 에 진입한 것으로 간주되는 국가들의 예로는 이탈리아, 영국, 그리스, 스페인, 포르투갈 및 독일이 있다. 이러한 국가들의 VRE 보급률은 연간 발전량 기준으로 15%에서 25% 사이이다.

4 단계에서는 새로운 도전이 등장한다. 특성상 유연성 개념보다 직관적으로 이해하기 어려울 수 있지만, 이는 매우 기술적인 전력계통 안정도(stability)와 관련된다. 전력계통 안정도는 매우 짧은 시간(초단위)에서 정상적인 계통운동을 방해할 수 있는 고장들에 직면했을 때 나타나는 전력계통의 복원력을 의미한다. 주로 이 단계와 관련하여 어려움을 겪고 있는 국가는 아일랜드와 덴마크를 포함하며 VRE 발전량 점유율은 연간 약 25~50%이다.

본 안내서는 오늘날 대부분 국가들이 현재 처해있는 첫 두 단계에 초점을 맞추고 있다. 또한 첫 두 단계에 대부분의 국가들이 해당된다는 측면에서는 3 단계에 대한 선행계획이 매우 중요하기 때문에 3 단계에서의 유연성 측면도 간략히 논의한다.

1 단계에서는 VRE 를 전력계통에 연계하는 과제가 소규모이긴 하지만 2 가지 측면에서 중요하다. 첫째, 첫 번째 소수의 VRE 발전소가 접속 지점에서 전력망에 향후 미치는 영향에 대한 적절한 평가가 필요하며, 둘째, VRE 발전소와 그 운영에 적합한 규칙(전력망 접속 규칙)이 마련될 필요가 있다. 2 단계의 연계 작업은 조금 더 부담이 되지만, 국제적 경험에 따르면 2 단계 연계 작업도 완전히 관리 가능한 것으로 드러났다.

- 1 단계에서 확인된 전력망 접속 규칙은 VRE 보급 수준과 일치해야 한다. 전력망 운영규칙은 - 종종 그 규정들이 가지고 있는 고도의 기술적 특성 때문에 - 적절한 정책적 관심을 거의 받지 못한다. 그러나 최근 몇 년 동안 VRE 의 공급 안전도(security)에 대한 우려 대부분은 전력망 운영규칙에서 공급안전도 문제를 미리 예측하지 못했기 때문에 발생하였다; 물론 이러한 문제들은 사후에 전력망 운영규칙을 보완함으로써 해결되기는 했다. 대표적인 예로는 2000 년대 중반에 스페인에서 처음 문제가 된 저압보상(LVRT) 및 독일의 "50.2 헤르츠(Hz)" 문제가 있다. 두 가지 문제는 VRE 발전기를 다시 프로그래밍하여 해결되었다. 이해관계자의

적극적인 참여와 효과적인 이행을 바탕으로, 국제 경험을 고려하여 업데이트되는 전력망 운영규칙은 전력공급 안전도에 매우 중요하다.

- 풍력 발전소와 태양광 발전소 발전량은 보다 광범위한 전력계통 운영 계획에 반드시 반영되어야 한다. 계통운영자(연계 맥락에서 가장 중요한 기관, 한국에서는 전력거래소)는 반드시 이러한 발전소가 실시간으로 무엇을 하고 있는지 가시적으로 파악(데이터)하여 그에 따라 중앙급전 발전기 운영 계획을 수립할 수 있어야 한다. 또한 계통운영자는 중요한 순간에 반드시 VRE 출력 비중을 일정부분 줄일 수 있어야 한다. 이는 계통운영자가 공급 안전도 유지라는 기관의 핵심 목표를 수행할 수 있도록 하는 데 매우 중요하다. 예를 들어, 스페인의 계통운영자는 VRE 출력을 효과적으로 모니터링하고 제어하기 위해 관제 센터의 한 구역을 전담으로 지정하였다.
- 반면에 풍력 및 태양광 발전소 출력을 예측하기 위한 효과적인 시스템이 없다고 해서 전력공급 안전도가 저해되지는 않겠지만, 이 경우 계통운영자가 변동성에 비해 과도하게 많은 예비력을 유지해야 하기 때문에 VRE 수용에 엄청난 비용이 수반될 것이다.
- (전력흐름의) 병목현상을 해결하기 위해서는 계획된 전력망 확충뿐만 아니라 기존 전력망의 자산 활용을 극대화하는 체계적인 접근방식을 확립하는 것이 중요하다. VRE 발전소가 소형이고 저압 전력망(배전계통)에 분산되어 있는 경우(예: 지붕형 태양광), (고압) 송전계통과 (저압) 배전망 사이의 접속을 관리하는 것이 우선순위로 떠오르게 된다. 호주(남호주), 독일(바바리아), 미국(하와이), 이탈리아(푸글리아) 등지에서는 이 접속 관리가 우선순위가 되고 있다.
- 마지막으로, VRE 발전소를 상위 계통의 요구에 부합할 수 있도록 하는 중요한 조치를 취해야 한다(즉, 반대의 경우는 해당되지 않는다). 예를 들어, 풍력과 태양광 발전소를 잘 조합하면 기존의 전력망 자산을 더 잘 사용할 수 있게 하는 상호보완적인 전력생산이 가능하다는 것이 국제적인 경험으로 확인되고 있다. 발전소 위치 선택도 또한 중요한 이점을 가질 수 있다. 지리적으로 산재된 VRE 발전소는 지리적으로 집중되어 있는 경우보다 전체적인 출력이 더 원활하여 관리가 더 쉬울 것이다. VRE 발전소 집중은 인도 타밀나두와 호주 남부를 포함한 지역에서 문제를 야기했다.

3 단계에서는 VRE 발전소 변동성을 더 잘 수용할 수 있도록 전력계통의 기존 유연성을 최대한 활용하는 것이 최우선 과제이다. 가장 쉬우면서도 대표적인 유연성 향상 방법은 주로 기존 발전소 운영 방식을 바꾸는 것이며, 전력시장 설계 변경 – 본질적으로 전력이 거래되는 방법 – 과 기술 개선을 조합하여 기존 발전소의 잠재력을 최대한 이끌어 낼 수 있다.

계통 연계는 VRE 발전소 보급에서 발생하는 많은 과제에서 일부분에 불과하다. 이들 과제 가운데 일부는 재생에너지 정책 프레임워크 설계, 국내 재생에너지 시장을 활성화하기 위한 조치, 도매 및 소매 전력 시장 설계에 관한 과제들을 포함한다. 이러한 과제들은 부록 및 기타 최근 IEA 간행물에서 확인할 수 있다. 본 설명서는 미래에 발생할 수 있을 것으로 예상되는 VRE 연계 문제에 초점을 맞추고 있다. 이 문서는 이러한 문제들을 어디서 어떻게 부딪히고 해결했는지에 대한 사례를 제시하고, VRE 보급을 시작하는 국가들이 어떻게 사업을 진행해야 하는지에 대한 분명한 정책제언을 제공한다.

도입

이 문서에는 무엇이 담겨있나?

Page | 10

풍력 및 태양광 발전 기술은 빠른 속도로 비용이 하락해 왔고, 이제는 점점 더 많은 국가에서 전통적인 공급원의 비용과 동일한 수준 혹은 그 이하로 전력을 공급할 수 있다. 그러나 풍력과 태양광 발전은 다른 발전자원과 차별화 된 여러 가지 특성을 가지고 있다.

가장 중요한 것은 풍량과 일사량의 변화로 인해, VRE 출력이 시간에 따라 변동한다는 것이다. 이러한 출력 불확실성 및 기타 요인들은 실제로 이와 관련된 어려움이 거의 없는 경우에 한해, 특히 VRE 보급 초기에 여러 우려로 이어질 수 있다. 그리고 전력계통에 풍력 및 태양광 에너지의 비중이 증가하면서 새로운 도전이 발생하는 것도 사실이지만, 사실 이러한 도전과제들은 VRE 기술에 익숙하지 않은 사람들이 자주 제기하는 우려와는 통상 매우 다른 것들이다.

VRE 를 기존 전력계통에 연계하는 데 중점을 두는 본 안내서의 목적상, IEA 는 VRE 보급을 4 가지 고유한 단계로 구분했다. 이 단계들은 VRE 가 없는 계통에서 관찰되는 것에 더해 풍력 및 태양광 발전 시스템이 전력계통에 미치는 영향에 기초한 것이다.

많은 나라들이 이제 막 VRE 보급을 시작하고 있기 때문에 이 문서는 특히 VRE 보급의 1 단계와 2 단계에 초점을 맞추고 있다. 또한 발전소 유연성에 관한 3 단계의 매우 중요한 측면 중 하나가 논의되는데, 이는 전력계통에 대한 장기 계획이 VRE 보급 초기부터 시작되어야 할 수도 있기 때문이다.

이 문서는 두 가지 목적을 가지고 있다. 첫 번째는 풍력 및 태양광 발전을 시작할 때 무엇이 진정한 도전과제인지를 명확히 하는 것이다. 두 번째는 이러한 과제의 문제점을 성공적으로 완화하고 관리하는 방법에 대한 실용적인 지침을 제공하는 것이다. 이는 무엇보다도 중요한 사안이다; 만일 적절한 조치가 실행되지 않는다면 그 때는 VRE 의 추가 보급과 전력 공급의 안전도가 훼손될 수도 있기 때문이다.

누가 이 문서를 읽어야 하는가?

이 문서는 안전하고 비용 효율적인 방식으로 VRE의 전력계통 연계를 고려하는 것을 목적으로 하는 에너지부처 및 규제기관에 근무하는 정책 당국자와 직원들이 주요 대상이다. 여기에 포함된 정보는 비(非)VRE 발전소 소유자와 계통운영자 및 전력계통 설계자를 포함하여 전력 부문에서 근무하는 직원에게도 유용할 것이다. 저자들은 독자들이 재생에너지 정책과 전력계통 계획 및 운영에 대해 전반적으로 충분한 이해를 보유하고 있다고 가정한다. 좀 더 기술적인 용어 중 일부에 대한 간략한 설명을 용어 설명부문에서 제공한다.

이 문서에 담겨있지 않은 것은?

본 문서는 VRE의 계통 연계를 다루며, 여기에는 VRE를 전력계통에 안정적이고 비용 효율적인 방식으로 수용하는 데 필요한 - 즉, 풍력 및 태양광 발전소가 건설될 때 이 설비들이 나머지 전력계통과 원활하게 연동하는 것을 보장하기 위해 - 기술적, 제도적 및 규제적 변화들이 포함된다. 풍력발전과 태양광발전 시장을 빠르게 시작하기 위해서는 분명히 많은 다른 요소들이 준비되어 있어야 한다. 여기에는 VRE 발전소를 보상해주기 위한 강력한 메커니즘, 간소화된 인허가 절차, 자원에 대한 정확한 평가 및 효과적인 에너지 계획 수립이 포함된다. 본 문서는 계통 연계와 관련된 한도 내에서만 - 즉 풍력 및 태양광 발전의 구체적인 특성을 다룰 때에만 - 보상 메커니즘과 인허가 절차를 논의한다. 보다 광범위한 정책 프레임워크에 관심이 있는 독자는 여러 IEA 간행물(예: IEA 2016a, 2016b, 2016c, 2015)에서 상세한 분석 및 권고사항을 찾을 수 있다.

Page | 11

전력망 연계: 신화와 현실

VRE 보급이 이제 막 시작되거나 이러한 설비운영에 대한 충분한 경험이 없어 아직 어떤 주장에 오류가 있는지 알 수 없는 상황인 전력계통에서는 풍력발전과 태양광발전 연계에 관한 많은 주장이 종종 제기된다.

주장 1: 기상변화에 따른 변동성은 관리할 수 없다

아마도 가장 두드러진 주장은 다음과 같이 요약될 수 있을 것이다: "풍력 및 태양광은 발전 자원으로 적합하지 않은 극단적인 단기적 변동을 보여준다."

이 진술은 우선 매우 그럴듯해 보인다 - 매일의 경험으로 볼 때, 우리는 갑작스러운 풍속 변화에 매우 익숙하다. 그리고 이러한 풍속변화로 인해 발생하는 VRE 출력 변동을 수용하기 위해 화력발전소가 매우 빠르게 출력을 변경해야 할 수도 있다. 이와 유사하게, 지나가는 구름은 매우 빠르게 일사량을 바꿀 수 있고, 따라서 그들이 지나가는 지역에 있는 태양광 발전소 생산량을 바꿀 수 있다. 그러나 이 직관적 주장은 두 가지 중요한 요인을 놓치고 있다.

첫째, 전력수요 자체가 임의적이고 단기적인 변동을 보여준다. 따라서 모든 전력계통은 이미 이러한 변동성을 처리할 수 있는 메커니즘을 가지고 있다. 풍력 및 태양광 발전 보급이 시작될 때, 그 생산량의 변동은 수요 변동의 "노이즈 손실(lost in the noise)"로 처리될 가능성이 있다.

계통에 더 많은 VRE 발전소가 추가되면서 두 번째 효과가 발생한다. 전력계통의 서로 다른 위치에 있는 VRE 발전소의 단기 변동은 서로 상쇄되는 경향이 있다. 즉, 상쇄된 이후

잔존하는 변동성은 더 작아지고 계통 운영상 큰 변화는 초 단위가 아니라 매시간 단위로 발생할 가능성이 있다.

그럼에도 불구하고, 단일 발전소가 인접한 주변 환경에 악영향을 미칠 수 있는 상황이 있을 수 있다. 이에 대해서는 아래에서 자세히 설명하고 있다.

주장 2: VRE 보급은 기존 발전소에 높은 비용 부담을 초래한다

자주 제기되는 또 다른 주장은 다음과 같다. "풍력과 태양광 발전소에서 발생하는 변동성은 전통적인 중앙급전 발전소 발전량을 매우 빠르게 조정하도록 강제함으로써 이 발전소들에게 큰 부담을 준다. 이로 인해 중대한 기술적 문제가 발생하고 전력계통 비용이 크게 증가한다."

풍력 및 태양광 발전 보급이 막 시작되는 대규모 전력계통에서는 일반적으로 이러한 주장은 사실이 아니다. 그 이유는 첫 번째 주장과 동일하다. VRE 비율이 낮을 때 변동성은 소비자 수요 변화에 비해 미미하고, 결과적으로 기존 전력생산에는 큰 변화가 없다.

그러나 VRE 비중이 증가함에 따라 VRE 출력 변동성은 다른 발전소 발전 패턴에 영향을 미치기 시작할 것이다. 하지만 경험에 따르면 많은 전력계통에서 발전소는 기술적으로 전체 전력계통 비용을 크게 증가시키지 않고 보다 역동적인 운전을 할 수 있다. VRE 발전 예측을 사용하고 발전기 급전운영 일정을 실시간에 가깝게 조정하는 것이 낮은 비용으로 부정적인 영향을 완화하는 효과적인 수단이 된다. 그리고 이러한 조치를 취하지 않을 경우 계통 운영비용이 전체적으로 증가할 수 있다. 이와는 대조적으로, 소규모 고립 전력계통에서는 VRE 가 보급 초기에 다른 발전기에 영향을 미칠 수 있고, 좀 더 큰 영향을 줄 수도 있지만, 이러한 소규모 시스템은 본 문서의 관심대상이 아니다.

주장 3: VRE 용량에는 1 대 1 "백업"이 필요하다

이러한 주장은 보통 다음과 같이 표현된다: "풍력 및 태양광은 신뢰할 수 없는 전력 공급원이기 때문에 기존 발전소에서 뒷받침해야 하며, 이는 매우 비싸다." VRE 발전소 발전량이 날씨에 따라 변하는 것은 분명하지만, 1 메가와트(MW)의 VRE 가 기존 발전소 1 메가와트(MW)로 뒷받침되어야 하는 것은 아니다.

예를 들어, 1MW 태양광 발전소는 연간 평균 시간의 10~30% 동안 작동될 가능성이 있다. 이는 설비이용률(Capacity Factor, 이하 CF)로 알려져 있으며, 실제 값은 지역에 따라 변동하는 태양광/풍력 자원의 품질에 따라 달라진다. (풍력 발전소의 경우, CF 가 20~50% 사이에 있는 경향이 있다.) 또한 장기 전력수급계획 측면에서 볼 때, 바람이 멈추거나 밤시간대의 태양광처럼 VRE 자원이 부재했을 때 기존 발전소가 지원해야 하는 용량이 바로 이 용량이다.

단기 측면에서 볼 때 - 즉 초 단위부터 일 단위 운영 측면에서 볼 때 - VRE 발전기(MW)의 출력은 날씨에 따라 변동한다. 태양광의 경우, 하루 중 어떤 시간인지에 따라 발전량이 정격 용량(100%)에서 약 20~30%까지일 수 있다(태양광은 발전하기 위해 태양이 직접 비출 필요가 없고 따라서 출력량이 0으로 떨어지지 않는다). 그러나 VRE 발전기가 넓은 지역에 걸쳐 설치되면 이러한 출력 변동 수준은 감소하며, 인접 국가/전력계통 간 상호연계는 VRE가 보다 넓은 지역에 설치되는 효과를 발생시킬 수 있다. 이는 설치된 VRE의 용량가치(capacity value)가 증가되는 효과를 갖는다(그림 10의 풍력과 태양광 그림 참조).

용량 가치(또는 "용량 크레딧")는 - 위에 언급된 설비비용률과 혼동하면 안되며 - 기존 발전소와 마찬가지로 VRE를 얼마나 신뢰할 수 있는지의 정도를 나타낸다. 따라서 VRE 용량가치는 각 장소와 고려되는 계통의 크기에 따라 달라진다. 이는 매우 중요한 사실이다: "백업" 주장에 대해서는 하나의 답변만이 있는 것이 아니다. 전력생산 측면에서 상호보완적일 수도 있는 풍력 및 태양광 기술을 결합하면 용량 가치가 더욱 개선된다.

피크 수요와 VRE 출력이 동시에 발생하는 것도 또 다른 주요 요인이다. 예를 들어, 태양광은 하루 중 기온이 가장 높은 시간에 최대 출력에 도달한다; 만일 대규모 냉방 부하가 있다면 이러한 출력 패턴과 정합될 것이며, 태양광 설비의 용량가치는 더욱 향상될 것이다. 풍력 에너지는 태양광에 비해 발전출력의 규칙성이 부족하기 때문에, 이와 같이 수요패턴과의 정합성으로 얻을 수 있는 용량가치의 향상을 기대하기 어렵다.

마지막으로 전력계통은 전통적으로 어느 한 특정 유형의 발전소를 백업하기 위해 구성된 것이 아니라는 점에 유의해야 한다; 중요한 것은 - 전통적으로는 여유 설비 구축을 통해 그리고 점차적으로 상호연계된 전력설비의 보다 유연하고 동적인 운영을 통해 - 전체적으로 수요를 충족시킬 수 있는 계통의 능력이다.

그리고 이 점에 있어서 (수요 충족을 위해) 발전소만이 고려되는 것은 아니다. VRE의 상대적으로 낮은 용량 가치를 관리하기 위한 다른 저비용 전략 또한 존재한다. 수요자원(DR)을 사용하여 VRE 가용성이 높은 기간에 수요를 이동시킬 수 있다. 배터리 저장 기술이 기존 저수형 수력발전 및 양수발전과 함께 부상하고 있다. 이러한 에너지 저장은 VRE 발전량이 충분할 때 충전했다가 VRE 발전량이 낮은 기간에 방전할 수 있다. DR 및 배터리 저장장치는 초기 단계에 있지만 미래에는 상당한 활용 가능성이 있다(IEA, 2016b).

주장 4: 전력망 관련 비용이 너무 높다

처음 세 가지 주장은 시간 경과에 따른 VRE의 발전 특성과 관련이 있다. 또 다른 일련의 주장은 VRE 발전소 위치와 관련이 있다: "풍력 및 태양광 발전소는 수요지에서 매우 멀리 떨어져 있다. 따라서 그들을 전력망에 연결하는 것은 많은 비용이 소요된다." 최고의 풍량과 일사량은 종종 사람이 거주하기에는 적합하지 않은 원격지 있는 것은 사실이다; 사막은

지구상에서 가장 햇빛이 잘 드는 장소이고, 설령 고품질의 해상풍력자원에 대한 접근성이 높다고 하더라도 바람이 많은 개방된 평원에 대규모 거주지가 건설될 가능성은 거의 없다.

원격지에 존재하는 이러한 자원을 활용하려면 기존 전력망을 확장하거나 개량하는 비용이 발생할 수밖에 없다. 이 비용은 지리적 요인, 토지 비용 등에 따라 상당히 다르게 나타난다. 미국의 VRE 연계 연구를 종합적으로 검토한 결과, 송전망 확장비용은 풍력 발전소 건설비용의 약 15%(중간값 기준)를 차지하는 것으로 확인되었다. 그러나 이 비용들은 가변적이기 때문에, kW 당 0~1500 달러(미화 기준)까지 천차만별이다(Mills et al., 2009). 경험적으로 전력망 인프라 확충 비용은 발전 설비 건설비보다 적은 10분의 1 수준이며, 송전망 확충은 혼잡 감소와 신뢰도 향상과 같은 다른 가능한 편익을 많이 얻을 수 있다.

또한, 기술 습득 및 비용 하락으로 인해 풍력이나 태양광 품질이 최고가 아닌 지역이라고 하더라도 비용 대비 효과가 뛰어난 VRE 보급으로 이어지고 있다. VRE 발전소 입지 선정시 이러한 추가적인 유연성은 관련 전력망 비용을 낮출 수 있다.

주장 5: (전력) 저장은 필수다

"추가적인 전력 저장장치만이 풍력 및 태양광 발전기의 변동성을 원활하게 제어할 수 있다"는 주장이 강하게 제기되는 경우가 많다. 다시 말하지만, 이는 매우 직관적인 설명으로 보인다: VRE 발전소에서 발생하는 출력변동을 보면, 안정적인 전력생산을 위해 이러한 출력변동을 완화할 필요가 있는 것이 매우 확실해 보인다.

그럼에도 불구하고 다른 주장과 마찬가지로 여기에도 중요한 요인들을 간과하고 있다. 이 주장의 주된 이유는 어느 시점에서 VRE 를 전력망에 연계하기 위해서는 전력계통의 유연성 향상이 필요하다는 것이다. 결과적으로 이는 3 단계 VRE 연계의 대표적인 특징이다. 그러나 전력 저장만이 유일한 유연성 자원인 것은 아니다. 화력발전소와 저수형(貯水形) 수력 발전소를 포함한 중앙급전 발전기들은 수요 측 변동을 일상적으로 감당하고 있다. 수요자원 또는 타 전력계통과의 연계를 포함하여 다양한 유연성 자원들이 있다. 따라서 전력 저장은 해결방안 중 하나일 뿐이며, 아직까지 VRE 비율이 이미 20%를 초과하는 대부분 국가에서도 전력저장이 크게 활용되는 사례는 많지 않다. (이러한 사례의 대부분은 풍력발전이 차지하고 있으며; 전기 저장의 비용효과는 일반적으로 풍력보다는 태양광의 경우가 보다 높다.)

주장 6: VRE 용량이 전력계통을 불안정하게 한다

전력계통은 지금까지 구축된 시스템 중 가장 복잡한 시스템 중 하나이다. 이 시스템을 안정적으로 운영하기 위해 계통운영자는 이를 끊임없이 감시하고 제어한다. 어떤 면에서

자전거를 타는 것과 유사하다: 자전거를 타는 사람은 균형을 유지하기 위해 계속해서 자전거를 조정해야 한다.

자전거를 타본 사람이라면 누구나 알겠지만, 매우 느리게 갈 때 균형을 유지하는 것이 더 어렵다; 고속으로 자전거 바퀴를 돌리면 관성이 발생하면서 물리 법칙을 통해 자전거가 안정된다. 전력계통에서도 유사한 프로세스가 발생한다: 전통적인 발전소에서는 초대형 발전기와 터빈의 회전이 균형을 유지할 수 있게 한다. 이와 대조적으로, 풍력 및 태양광 발전기는 전통적인 발전기와 같은 방법으로 전력망에 연결되어 있지 않으므로, 그 자체로 관성을 제공하지 않는다.

이것이 마지막 주장의 근거가 된다: "풍력 및 태양광은 전력계통의 관성에 기여하지 못하며 - 그리고 이것이 전력계통을 불안정하게 한다." 풍력 및 태양광이 관성을 제공하지 못하는 것이 문제가 될 정도에 도달하려면 두 가지 요인이 중요하다: 첫째, 주어진 시간에 VRE가 얼마나 많은 전력을 생산하고 있느냐와, 둘째, 전력계통의 크기이다. 전력계통의 최소 - 평균 전력수요와 비교하여 VRE 용량의 비율이 작은 한, 관성 관련 문제는 매우 작은 전력계통(예: 최대전력수요가 100MW~3GW)을 제외하고 그리 중요한 것이 아닐 수 있다. 어떤 경우에도 VRE 보급 단계 초기에서 관성 문제가 중요한 요소가 될 가능성이 높지 않다. 또한 전력계통에 추가적인 관성을 제공하기 위한 기술 수단도 있다. 이러한 옵션에는 플라이휠 사용과 풍력 터빈으로부터 가상 관성(synthetic inertia)을 활용하는 것이 포함된다.

보다 일반적으로, 최첨단 VRE 발전기는 기술적으로 정교하고 전력망 안정화를 위한 다양한 계통 관련 서비스를 제공할 수 있다. 그러나 전력망을 안정화하는 보다 비용 효율적인 방법을 이용할 수 있기 때문에 VRE 발전기에게 이러한 서비스를 제공하도록 요구하거나 혹은 그에 대한 보상을 제안하는 국가는 거의 없다. 따라서 이러한 서비스를 요구받거나 이에 대한 보상이 제공되기 전까지는 VRE 발전기가 전력망 안정화를 위한 계통 서비스에 참여하지 않을 것으로 예상된다.

VRE 연계의 여러 단계

앞 절에서는 풍력과 태양광에 대한 일부 부정적 주장이, 특히, VRE 보급 초기에는 그런 주장이 타당하지 않은 이유에 대해 설명하였다. 그렇다면 VRE 전력망 연계와 관련된 과제는 무엇일까?

이 질문에 대해 명쾌한 해답은 없다: 어떤 두 개의 전력계통도 정확히 일치하지 않는다 ; 그리고 비교대상이 되는 두 나라의 일사량 또는 풍량도 마찬가지로 다르다. 따라서 풍력 및 태양광 비중에 비례하여 계통연계 비용을 산정하는 것과 같은 단순한 규칙을 도출하는 것은 불가능하다.

이 문서는 VRE 연계의 4 단계를 정의한다. 각 단계들은 VRE 용량 점유율 증가로 인해 전력계통 운영에 미치는 영향에 따라 구분된다. 일반화는 필연적으로 중요한 세부 항목을 간과할 수도 있지만, 전력망 연계 작업 우선순위를 정하기 위한 유용한 프레임워크를 제공한다. 만일 이러한 프레임워크가 없다면 보급 초기부터 계통 연계와 관련된 여러 가지 도전과제에 직면하게 되어 적절한 조치를 취하기 어려워질 수도 있다.

전력계통이 특정단계에 진입한다고 말할 수 있는 VRE 발전 비중은 여러가지 상황에 따라 달라진다(박스 1).

박스 1 • 전력망 연계 과제의 범위를 결정하는 전력계통 주요 특성

주요 구조, 기술 요인:

- VRE 의 지리적 및 기술적 분산: 다양성이 증가하면 VRE 계통연계와 관련된 어려움을 완화시킬 수 있다.
- 크기(MW 수요): 전력계통 규모가 클수록 VRE 계통연계와 관련된 어려움을 완화시킬 수 있다.
- 수요와 VRE 출력 간 일치(계절과 매일): 정합성이 좋을수록 VRE 계통연계와 관련된 어려움을 완화시킬 수 있다.
- 발전소 유연성(화력, 수력 또는 기타 중앙급전 재생에너지 포함): 기동 시간 단축, 최소 출력 하향, 보다 신속한 출력증감발(출력의 변화)은 VRE 계통연계와 관련된 어려움을 완화시킬 수 있다.
- 계통연계, 전력저장 및 수요자원: 각각 규모가 증가할수록 VRE 계통연계에 대한 관리가 보다 용이해진다.

계통운영, 시장설계 및 규제

- 계통운영: 발전소 및 계통연계에 대한 운영상 결정은 실시간 계통운영에 근접해야 한다.

- 시장설계: 단기 시장에서 거래되는 전력량이 많을수록 유리하다.
- 기술표준(전력망 운영규칙): VRE 발전소가 계통 서비스를 제공해야 하는 경우 전력망 연계의 어려움은 감소한다. (그러한 요건은 VRE 발전소에 대한 추가 비용과 균형을 이루어야 한다.)

수요공급 기본원칙

- 전력수요 진화: 수요 증가는 기존발전기를 대체하지 않고서도 VRE 투자 기회를 창출한다; 미래 전력수요는 (어느 정도) 공급 특성에 맞춰 변화할 수 있다.

1 단계는 놀라울 정도로 간단하다: VRE 용량은 전력계통에 주목할 만한 영향을 미치지 않는다. 풍력 또는 태양광 발전소가 자기 용량보다 훨씬 큰 규모의 계통에 설치되면, 이 발전소의 출력 – 및 이로 인한 변동성 – 은 거의 인지하기 어려울 것이다.

2 단계에서는 VRE 영향이 눈에 띄게 되지만, 일부 운영 방식을 개선하면 VRE 용량을 쉽게 연계할 수 있다. 예를 들어, 출력을 유연하게 조정할 수 있는 발전소들이 VRE(및 수요) 변동성을 효율적으로 맞추어 균형을 달성할 수 있도록, VRE 출력을 예측하기 위한 예측 시스템을 구축해야 할 수도 있다.

3 단계에서는 첫 번째 난관이 나타난다. 간단히 말해, VRE 변동성 영향이 전체 계통 운영 및 다른 발전소에서 모두 감지된다. 이 시점에서는 전력계통 유연성이 중요해진다.

이러한 맥락에서 *유연성*은 전력수요/공급 균형 관점에서 보다 높은 수준의 불확실성과 변동성을 처리하는 전력계통 능력과 관련이 있다. 오늘날, 이 불확실성과 변동성을 다루는 두 가지 주요 자원은 중앙급전 발전소와 송전망이다. 일부 계통에서는 기존 양수발전소도 적절한 기여를 할 수 있다. 미래에는 새로운 전력저장 기술 및 대규모 수요자원과 같은 보다 혁신적인 해법이 효과적인 유연성 공급처가 될 것으로 예상된다.

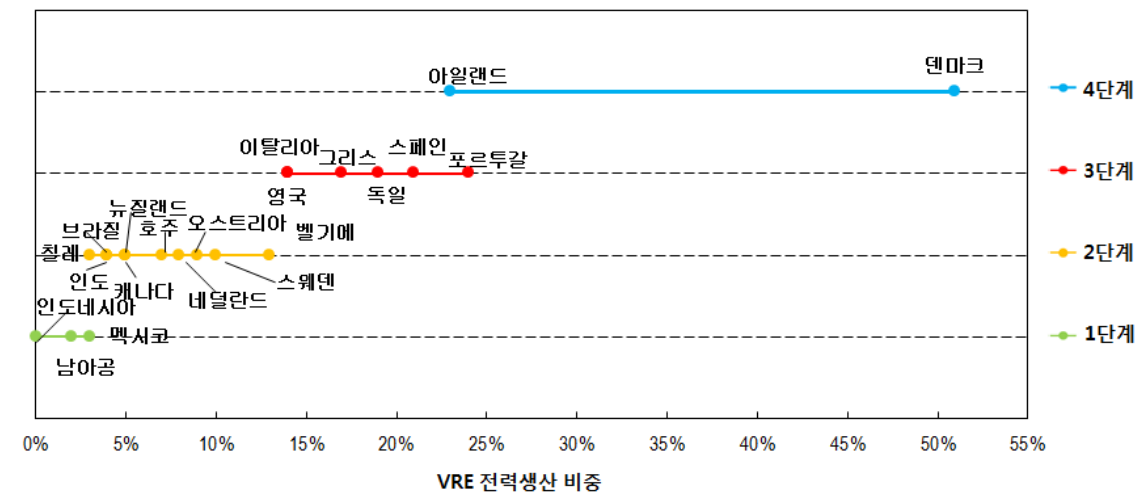
4 단계에서도 새로운 도전과제가 등장한다. 이는 매우 기술적이며, 특성상 유연성 개념보다 직관적으로 이해하기 어려울 수 있다. 그들은 전력계통 안정도와 관련된다. 간단히 말해, 전력계통 안정도는 매우 짧은 시간 동안 고장을 견딜 수 있는 능력을 특징으로 한다. 예를 들어, 대형 화력 발전기에 고장이 발생할 경우, 안정적인 전력계통이라면 이는 정상적인 운전점으로부터 미미하게 벗어난 수준에 불과할 수 있다. 이와는 대조적으로, 안정성이 낮은 계통에서는 대형발전기 탈락으로 인해 공급 안전도가 저하될 수 있는 다수의 중대한 사건으로 이어질 수 있고, 이는 몇 초 혹은 그보다 짧은 시간에 나타난다.

전력계통 안정도가 VRE 연계의 문제가 되는 시점은 계통마다 매우 다르며, 지난 수십 년 동안 결정된 공학적 판단에 따라 달라질 수 있다. 그러므로 언제 안정도 문제가 발생할지 단정할 수 있는 간단한 규칙은 없다.

전력계통이 한 단계에서 다음 단계로 급격하게 전환되지는 않을 것이다. 이 단계들은 개념적이며, 단순히 업무의 우선순위를 정하는 것을 돕기 위한 것이다. 예를 들어, 유연성과 관련된 문제들은 3 단계에서 본격화되기 전 2 단계에서부터 점진적으로 나타날 것이다. 마찬가지로 계통 안정도와 관련된 일부 문제는 3 단계에서 이미 수면 위로 부상할 것이다.

다양한 단계를 설명하기 위해 국제적으로 발생한 몇 가지 예를 검토하는 것이 유용할 수 있다(그림 1). "전력망에 연계 문제가 발생하는 VRE 비중은 어느 정도인가?"라는 질문을 종종 받지만 이를 일반화할 수는 없다. 예를 들어, 현재 보급 2 단계에 있는 국가는 3~13%의 VRE 비중을 특징으로 한다.

그림 1 • 국가별 연간 VRE 발전비중 및 다양한 VRE 단계 적용, 2015



출처: IEA, *중기 재생에너지 시장전망 보고서 2016*에서 발췌(2016d)

요점 • 각 단계는 VRE 전력생산 비중 측면에서 광범위한 범위에 걸쳐질 수 있다: 새로운 단계에 진입하는 특정 단일 시점은 없다.

표 1 • VRE 전력망 연계의 4 단계

	속성(단계별 진행에 따라 증가함)			
	1 단계	2 단계	3 단계	4 단계
계통 관점에서의 특징	모든 계통 수준에서 VRE 용량이 차지하는 비중은 미미	계통운영자가 VRE 용량으로 인한 영향을 인식	수급균형의 변동폭이 커짐에 따라 유연성 확보의 중요성 증가	안정도가 중요해짐. 특정 시점에서 VRE 용량이 전력수요의 거의 100%를 차지함
기존 발전기 운영에 미치는 영향	부하와 순부하 간에 뚜렷한 차이가 없음	순 부하의 불확실성과 변동성이 크게 증가하지는 않지만, VRE를 수용하기 위해 기존 발전기의 운영 패턴에 약간의 변화가 있음	순 부하의 변동성이 커짐. 운영 패턴에 큰 차이 발생; 발전소 운전이 지속적으로 감소	24 시간 가동 중인 발전소가 없음; 모든 발전소가 VRE 수용을 위해 출력을 조정함

전력망에 미치는 영향	(존재한다면) 접속점 부근의 하위 전력망에 영향	하위 전력망 상태에 영향을 미칠 가능성이 매우 높음, 전력망에서 조류변동으로 송전혼잡 발생 가능	지역 간 기상 조건 차이로 인해 전력망 전체의 전력 조류 패턴에 상당한 변화 발생; 전력망의 고압단과 저압단 사이의 양방향 흐름 증가	전력망 전체에 대한 전반적인 망 보강 및 외란에 대한 계통 복구 능력 개선 필요
도전과제 해소의 주요 결정요인	하위 전력망의 상태	수요와 VRE 출력 간 일치	유연 자원의 가용성	외란에 견딜 수 있는 계통의 강건성

마찬가지로, 두 나라의 연간 VRE 발전 비중이 동일하다고 하더라도 전력망 연계 수준은 서로 다를 수 있다. 이를 구분하는 요인 중 하나는 VRE 출력과 전력수요의 시간적 정합성이다: 시간대가 일치할수록 추가적인 연계 문제없이(즉, 다음 단계로 진입하지 않음) VRE 비중을 확대하는데 보다 유리하다.

이러한 단순 분류의 유용성은 가능한 VRE 연계 문제가 부문별로 나뉘질 수 있다는 사실에서 비롯된다. 여기서 우리는 이 단순한 분류를 연계 문제에 대한 실질적인 대응 권장사항을 위한 프레임워크로 사용한다; 각자 계통에서 VRE 전력망 연계 수준을 판단하는 것은 독자들의 임무이다. 필자들은 첫 두 단계에 초점을 맞추겠지만 다음 절에서는 네 가지 단계에 대해 보다 자세히 설명할 것이다.

1 단계: VRE가 전체 계통에 미치는 영향이 없음

초기에 VRE 변동성은 전체 전력수요에 비해 미미하며, 이 사실이 4 단계 중 첫 번째 단계임을 정의한다. 계통운영자 입장에서는 VRE 발전소가 없는 상황과 뚜렷한 차이가 없기 때문에 VRE 발전소 운영을 우려할 필요가 없다. 다수 계통운영자들이 이를 확인하였다: 첫 번째 VRE 발전소 영향(전력계통의 규모와 비교하여 추가된 VRE 용량이 큰 경우는 제외)은 그저 감지되지 않는 수준이다. 설령 영향이 있다고 하더라도, 그 충격은 전력망 접속 지점 또는 그 부근에서 국지적으로 발생할 것이다.

그렇다고 해서 VRE 발전소가 무시될 수 있다는 뜻은 아니다. 신재생 개발사업자는 전력망에 접속할 수 있는 위치에 대한 충분한 가시성을 확보해야 하며, 신규 발전소가 실제로 연결될 수 있는 현장 조건을 확보하는 것이 중요하다. 또한 첫 번째 VRE 발전소 설치 시, 관련된 접속 표준, 전력망 접속 규칙 또는 단순히 전력망 운영규칙이라고 알려진 기술 표준에도 각별히 주의를 기울여야 한다. 이러한 기술 표준은 모든 유형의 발전소에 필요하지만 VRE 발전소는 몇 가지 사항에 대한 추가적인 고려가 필요할 수도 있다.

현재 VRE 보급 1 단계에 해당하는 것으로 간주될 수 있는 국가들로는 인도네시아, 남아프리카 및 멕시코가 있다.

2 단계: VRE 에 의한 영향 인지

Page | 20

2 단계는 전력계통에 더 많은 VRE 발전소가 추가되고 계통 운영에서 VRE 발전이 현저히 드러나게 되면서 시작된다. VRE 발전량이 명확하게 계량되지 않는다면, 이러한 변화는 (VRE 가 일부 수요를 충족시키기 때문에) 예상수요보다 실제수요가 낮아지는 형태로 나타난다. 이렇게 예상보다 낮아진 전력수요를 "순 수요"("순 부하"라고도 함)라고 한다. 순 수요란 전력수요에서 VRE 발전량을 뺀 값이다.

이 시점에서, 종합적 프레임워크를 개발하기 위해서는 전력망 운영규칙에 대한 추가적인 고려사항이 더욱 중요해진다. 이는 새로 건설된 발전소가 전체 수명주기 동안 계통이 원하는 수준으로 성능을 구현할 수 있도록 함으로써, 향후 설비 개보수에 보다 많은 비용이 소요되는 것을 회피할 수 있도록 한다.

둘째로, 전력망 혼잡(송전망 포함)이 처음 발생할 경우 이를 관리할 필요가 있으며, 특히 VRE 보급이 빠르게 진행되고 있는 지역에서 더욱 그러하다.

셋째, 비(非) VRE 발전소에 대한 최소 비용 운영계획 및 급전은 VRE 발전을 고려해야 한다. 이 단계에서는 VRE 발전소에 대한 가시성이 더욱 중요해지고 재생에너지 발전 예측 시스템을 구축하는 것이 현명한 방안일 수도 있다. 예측시스템이 없어도 전력계통의 안정적인 운영은 가능하지만, 보다 많은 비용이 소요된다는 점에 유의해야 한다.

현재 2 단계 VRE 보급 사례로는 칠레, 캐나다, 브라질, 인도, 뉴질랜드, 호주, 네덜란드, 스웨덴, 오스트리아 및 벨기에가 있다

3 단계: 유연성에 대한 우선 고려

VRE 보급이 계속됨에 따라 전력 공급은 불확실성과 변동성이 상당히 높은 특징을 보이며, 특히 주말 기간에 낮은 순 부하를 볼 수 있다. 이로 인해 (기존) 중앙급전 발전소를 좀 더 역동적으로 운영할 필요가 있게 되고, VRE 예측은 전력계통의 효율적인 운영을 위한 필수 사항이 될 것이다. 또한 새로운 운영 조건이 과거와 상당히 다를 수 있으므로, 발전소들이 얼마나 유연하게 작동할 수 있는지 결정하기 위한 분석이 필요할 수도 있다. 전력 계통의 전력조류는 일시적인 기상 조건에 의한 영향을 보다 많이 받게 되어 빈번하게 변동하게 되며, (태양광이 대세인 지역에서는) 낮과 밤에 따라 상당히 달라질 수도 있다.

많은 수의 소형 VRE 발전소가 지리적으로 집중되어 있는 경우, 중·저압 전력망으로부터 송전 망으로 흐르는 "역방향" 조류가 점점 더 빈번해질 것이다. 이 문제를 해결하기 위해서는 송전계통운영자(TSO, Transmission System Operator)와 배전계통운영자(DSO, Distribution System Operator) 간 긴밀한 협조가 더욱 중요하다.

Page | 21

이 단계에서는 가능할 경우, 인접 전력계통 혹은 수급균형 관리 지역을 연계하여 운영하는 것이 유리하다. 이렇게 하면 운영 예비력 공유가 가능해지면서(따라서 각자의 예비력 부담이 줄어들고), 동시에 보다 넓은 지역에 걸쳐 VRE 발전을 연계하고 평활화(平滑化) 할 수 있게 된다.

VRE 보급 3 단계에 있는 것으로 간주되는 국가의 예로는 이탈리아, 영국, 그리스, 스페인, 포르투갈 및 독일이 있다.

4 단계: 전력계통 안정도의 중요성 증대

4 단계에서는 VRE 발전이 특정 상황에서 대부분 또는 심지어 모든 전력수요를 충족시키는 것이 가능해진다. 이러한 현상은 주말과 같이 수요가 낮은 기간 동안 VRE 출력이 최대치에 있을 때 일반적으로 발생한다. 온대 기후 국가에서는 이러한 현상이 춘계에 발생할 수 있으며, 이 때 풍력 발전 및 태양광 발전 모두 높은 출력을 보일 수 있다. 유역식(run-of-river) 수력발전소 용량이 풍력과 태양광 발전에 더해 질 수도 있다.

이 단계에서, 새로운 문제들이 주목을 받게 된다. 본질적으로, 이는 계통에 외란이 발생한 직후 안정적인 운영 조건을 유지하는 전력계통 능력과 관련이 있다(안정도). 이 단계와 관련된 여러 가지 문제들 중, 동기 관성 문제가 최근에 주목을 받았다. 관성이란 대형 화력발전소 발전기에 연결된 회전체에 저장된 운동에너지를 말한다. 이 회전체는 단기에너지 저장장치와 같이 동작한다. 전력이 순간적으로 부족할 경우, 발전기들은 회전에 반대로 작용하는 힘으로 이를 경험하게 된다. 전력계통에 연계되어 있는 발전기들의 결합된 관성은 순간적인 전력부족에 저항하여 작용하면서 전력망을 안정적으로 유지한다.

이러한 반응은 물리 법칙의 직접적인 결과이며 어떠한 제어도 필요하지 않다는 것에 주목해야 한다. 또한 계통에서 기존(동기식) 발전기 수가 감소하면 관성이 줄어들기 때문에 계통 안정도를 위한 대체 자원을 찾아야 한다. 이 과업이 VRE 전력계통 연계 4 단계의 주요 목표이다.

이 단계에서, VRE 발전기는 전력망에 필요한 모든 필수 신뢰도 서비스를 제공할 수 있는 방향으로 움직여야 한다; 이렇게 해야만 전체 동기 전력망 계통(단일 수급균형 구역이 아닌)에서 때때로 100%에 가까운 전력수요를 충족시킬 수 있다.

현재 VRE 보급의 4 단계로 간주되는 국가들의 예로는 아일랜드와 덴마크가 있다.

4 단계를 넘어서

여기에서는 VRE 보급의 4 단계만 논의되지만 4 단계 이상의 VRE 보급도 가능하다. 완전성을 위해 5 단계와 6 단계 주요 특성을 간략히 설명하면 이렇다. 5 단계는 VRE 발전이 구조적으로 남아도는 상태이다. 만약 이러한 초과 발전을 억제하지 않으면, 대규모 VRE 발전 차단으로 이어지고, 따라서 추가 VRE 확장에 제약이 발생한다. 이 시점에서 VRE 를 추가로 확대하려면 다른 최종 소비부문의 전기화가 필요하며, 난방 및 수송 분야 전기화(電氣化)가 가장 가능성 있는 대안이 될 것으로 예상된다.

6 단계는 VRE 공급과 전력수요 사이의 계절적 불균형으로 인한 구조적 에너지 부족 기간의 발생으로 특징지어질 수 있다. 때때로 수일/주간의 공급 부족(예: 풍력 생산의 장기 "소강상태")을 강력한 단기 유연성 자원인 수요자원 혹은 전력저장으로 감당하지 못할 가능성이 있다. 궁극적으로, VRE 가 전력계통에서 핵심자원이 되기 위해서는, 예를 들어, 전기를 인공 천연 가스나 수소의 형태와 같이 규모에 따라 비용 효율적으로 저장할 수 있는 화학적 형태로 변환하는 것이 필요할 수도 있다.

여기에서 위도차이가 중요한 함의를 갖는다: 보다 낮은 위도에서는 전력수요나 태양광 출력에 계절적 편차가 거의 없을 가능성이 높으며 이는 계절 간 저장 필요성이 적거나 없음을 의미한다. 이와 달리, 보다 높은 위도에서는 상호 보완적인 풍력 및 태양광 조합이 가능할 수 있으며, 이 조합은 서로 계절적 차이를 관리하는데 도움이 될 수 있다(그림 8). 한편, 보다 높은 위도에서는 난방을 전기화할 경우, 동계 최대 전력수요가 하계 최대 전력수요보다 몇 배 더 클 수 있으며, 계절간 저장 필요성이 증가하게 된다(DECC, 2012).

VRE 보급 단계 요약

VRE 보급 단계를 요약하면, 대규모 전력계통의 특정 부분이 계통의 나머지 부분보다 먼저 더 발전된 단계로 진입할 수도 있다는 점도 주목할 가치가 있다. 이는 전형적으로 전력망에 하위 영역이 존재하고 상호연계를 통해 주 전력망에 연결되는 경우이다. 이에 대한 대표적인 예가 호주 국가전력시장(NEM)의 5 개 지역 중 하나인 남호주(South Australia) 지역이다.

또한 중요한 것은 전력수요와 VRE 발전 타이밍의 상관관계, 지리적으로 VRE 를 한데 모으는 데서 발생하는 평활화 문제, 전력계통 규모와 연계능력, VRE 발전량을 예측하는 계통운영자 능력 모두가 어느 정도까지는 언제 새로운 단계의 VRE 연계가 이루어질 것인가를 결정할 것이라는 점이다.

VRE 의 효율적인 전력망 연계는 보급 단계 적정성을 평가하는 척도가 될 수 있다. 일부 어떤 전력계통에서는 기존 자산을 활용하여 이러한 조치들을 구현할 수 있으며, 다른

계통에서는 추가 인프라에 투자해야 할 수도 있다. 두 경우 모두 상승하는 VRE 비중을 따라잡지 못하면, 장기적으로 비용이 더 많이 들고 전력계통의 안전도를 위협할 수도 있다. 반대로 지나치게 높은 요건을 적용하면 비용이 증가하거나 보급 속도가 느려질 수 있다.

공급 안전도에 필요한 핵심적인 조치와 전력계통의 비용 효율성을 유지하는 데 필요한 조치를 구분하는 것이 유용하다. 예를 들어, 2 단계에서 시작할 때에는, 계통운영자가 충분한 양의 VRE 발전을 차단할 수 있는 것이 반드시 필요하다. 만일 그렇지 않으면, 전력 공급 안전도가 위협할 수 있다. 반대로, 효과적인 예측 시스템 부재로 인해 계통운영자가 다른 발전기를 필요 이상으로 기동시킨 다음 풍력 발전을 과도하게 축소하여 비용을 증가시킬 수도 있다. 공급 안전도에 매우 중요한 수단들은 아래에서 확인할 수 있다.

전략 및 계획수립: 성공적인 전력계통 연계의 기반

이 안내서는 VRE의 전력계통 연계와 관련된 일련의 문제들에 초점을 맞추고 있으며, 이 일련의 문제들 안에는 초기 단계에서 마주칠 수 있는 하위 문제들이 있다. 그러나 연계 그 자체가 더 광범위하고 장기적인 에너지 전략의 하위 부분이기 때문에; 시간의 흐름에 따라 설치될 네트워크 및 저장장치와 같은 다른 전력계통 설비뿐만 아니라 발전설비용량 규모와 유형에 대해서도 명확하고 일관된 비전을 갖는 것이 중요하다. 에너지 전략에 대한 전체적인 장기적 관점은 시장 참여자와 계통운영자가 변화를 예측할 수 있도록 도와주며, 이를 통해 안전하고 보다 낮은 비용으로 VRE 전력망 연계를 용이하게 할 것이다.

그러한 전략을 개발하는 핵심은 해당 지역에서 이용 가능한 풍량과 일사량을 완벽하게 파악하는 것이다. 자원 데이터는 국제재생에너지기구(IRENA, International Renewable Energy Agency)가 작성한 일반 공개용 재생에너지용 글로벌 아틀라스(Global Atlas for Renewable Energy) 등 여러 기관에서 제공한다. 여기에는 에너지 계획 목적을 위한 충분한 세부 사항(그러나 개별 프로젝트 개발은 아님)이 포함되어 있다. 즉, 이 자료들을 통해 자원 잠재력이 가장 높은 지역이 어디인가에 대한 개략적인 이해를 제고할 수 있다. 이러한 맵은 기존 전력망 맵과 겹쳐 새로운 자원개발과 설비보강이 가장 가치가 있는 위치를 나타낼 수 있다.

만일 전반적인 정책적 전략의 일부로 VRE 목표치가 증가하는 경우, VRE의 효율적인 계통연계를 다른 에너지 시스템 개발과 함께 고려하는 것이 무엇보다 중요하다. 정책당국자는 "이런 사업이 기존(전통적인) 전력계통 계획 요구사항에 어떻게 추가되거나 변경될 수 있습니까?"라고 물을 지도 모른다. 조기에 정책을 추진한 국가들은 종종 이러한 결합적 접근방식에 실패한 경우가 있다: 예를 들어 스페인, 독일 및 이탈리아와 같은 유럽

선두 주자들은 거의 틀림없이 VRE 보급이 나머지 발전기 그룹 운영 패턴에 미칠 영향을 충분히 예상하지 못한 경우가 있었다.

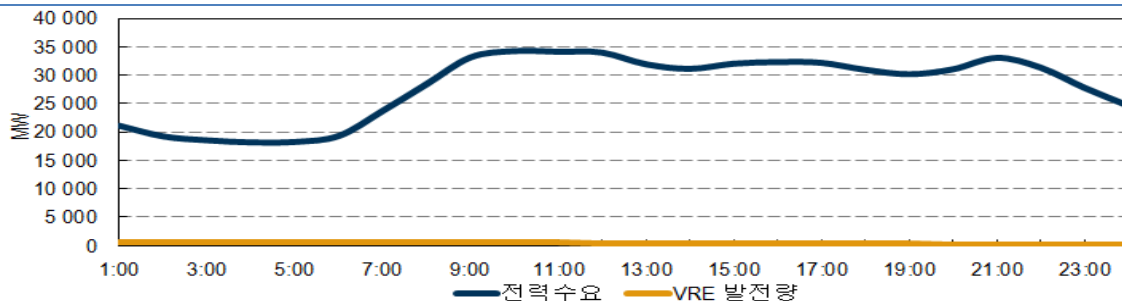
VRE가 가장 원활하고 비용 효율적인 방식으로 보급되는 것을 보장하기 위해서는 여기에 설명된 4단계 접근방식이 보다 광범위한 에너지 계획에 포함되어야 한다. 특히, 이는 VRE의 부정적 영향을 완화하기 위해 2단계에서 제시한 조치들에 적용된다; 이러한 조치들은 VRE 기술에 대한 올바른 포트폴리오(풍력/태양광)를 선택하고, 지리적 측면(분산/중앙 집중, 수요지로부터 근접/원격)뿐만 아니라 전력망 전압측면(분산형/중앙집중형)에서 전략적으로 입지를 선정하는 데에도 초점을 맞춘다.

1 단계: VRE 가 전체 계통에 미치는 영향이 없음

1 단계에서는 풍력발전소나 태양광 발전소가 처음으로 설치된다. 이러한 VRE 발전소의 전체적인 용량은 그 발전량이 어떤 순간에도 전력수요의 2~3% 이상을 차지하지 않는 수준이다. 이 보급 수준에서, 설령 VRE 발전량과 전력수요가 (그림 2 와 같이) 상관관계가 없다고 하더라도, 발전량이 매우 작기 때문에 계통 운영에 영향을 미치지 않는다. VRE 발전량은 그저 마이너스 부하¹로 간주될 수 있다. 다시 말해서, 1 단계에서 VRE 발전소는 공급/수요 균형을 안정적으로 유지하거나 혹은 기존 발전소를 운영하는 계통운영자의 주요 업무(표 1)²에 포함되지 않는다.

Page | 25

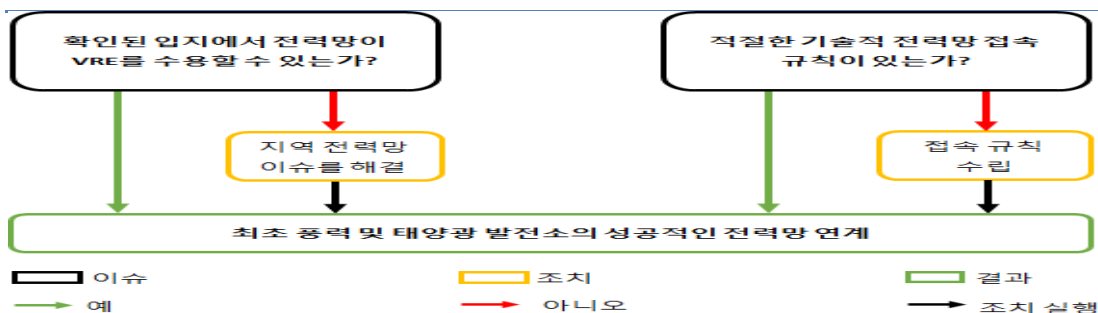
그림 2 • 전력수요 및 VRE 발전량, 이탈리아, 2010 년 4 월 13 일



출처: Terna (2017)에서 발췌, *사후 실제 발전량 데이터*.

요점 • 설령 풍력발전량과 전력수요가 관련이 없는 경우에도, 1 단계에서는 전력계통 운영에 아무런 영향이 없을 것이다.

그림 3 • 1 단계: 이슈 정리 및 접근 방법



요점 • 1 단계 과제들은 첫 번째 발전소를 전력망에 연결하기 위해 실행 가능한 해결책을 찾는 데 집중한다.

¹ 이 맥락에서 마이너스 부하는 VRE 발전기들이 관리가 되지 않는 부하들로 취급될 수 있다는 사실을 언급한 것이다. 즉, 이 발전기들의 발전량을 조절하거나 감시할 필요가 없다는 의미이다.

² 종종, 규칙에는 항상 예외가 존재한다. 하와이, 온두라스 혹은 Tucson electric power 가 운영하는 Springerville 태양광 발전소를 포함하여, 단일 VRE 발전소들이 문제를 일으켰던 사례들이 있다.

개별 VRE 발전소 크기에 상관없이, 해당 발전소 연계로 인한 영향은 접속되는 지점 인근에서만 발생할 것이다. 즉, 전력계통 연계 당면 과제와 그에 따르는 연계 전략은 VRE 발전소 주변 환경에 국한 된다는 것을 의미한다.

이 단계에서는 두 가지 주요 문제를 해결해야 한다. 첫째, 전력망의 "수용가능 용량"(신규 발전소로부터의 발전을 수용할 수 있는 지의 여부)을 평가해야 한다. 예를 들어, 대형 풍력 발전소가 전력망의 외딴 부분에 연결되어 있다면, 그 지역 전력망이 목적에 적합하도록 운영되기 위해 해결되어야 하는 여러 기술적 문제가 있을 수 있다. 둘째, VRE 발전소가 운전을 시작하기 전에 준수해야 하는 적절한 일련의 기술적 요건들이 미리 확립되어 있어야 한다(그림 3).

박스 2 • 풍력과 태양광 보급 빠르게 시작하기

VRE 보급 시작점에서 물어야 할 첫 번째 질문들은 "VRE 를 어디에 구축할 것인가?"와 "프로젝트 개발사업자가 입지 데이터를 사용할 수 있는가?"이다. 여기에는 가용 자원, 전력수요 및 공급, 기술 비용 및 기존 전력 인프라에 대한 데이터가 포함된다. 데이터 공개는 VRE 보급을 촉진하는데 매우 중요하다. 필요한 정보와 이를 공유하는 방법에 대한 자세한 설명은 부록 1 에서 확인할 수 있다.

일단 잠재적인 풍력이나 태양광 프로젝트가 인지되면, 이를 계속 진행하기 위해서는 다섯 가지 주요 조건이 충족되어야 한다. 독자는 아래에 제기된 사항들 모두가 전력망 연계 문제와 직결되지는 않지만, 프로젝트 개발사업자가 VRE 보급 초기 단계에 직면하게 될 문제들과의 연관성을 설명하기 위해 기술하였음을 유의해야 한다.

전력망 접속: 전력망 접속에 대한 허가를 받는 것은 전력망에 전력을 공급하기 위한 전제 조건이다.

허가: 새 VRE 발전소는 입지 적정성이 확인되고 이에 대해 허가를 받은 후에만 건설할 수 있다. 입지 선정 정보를 제공하고 허가 취득 프로세스를 간소화하는 것이 프로젝트 개발을 촉진하는 데 중요하다. 이 조건은 1 단계에서 특히 관련이 있다.

지역적으로 채택된 기술과 인적 자원의 가용성: 국가별 조건 하에서 기술 가용성 및 VRE 기술에 대한 적절한 표준은 전력망 연계의 관점에서 관련이 있다. 하드웨어 고장 및 비용 초과를 방지하며 설비의 성공적인 설치를 보장하기 위해 프로젝트의 여러 단계에 숙련된 인력이 제공되어야 한다. 박스 3 은 기술 표준이 무엇이고 왜 그것들이 중요한지를 설명한다.

구매 협약: 프로젝트 개발사업자들은 그들이 생산하는 전력에 대한 비용을 보상 받으려면 "구매자"와 합의에 도달해야 할 것이다. 일반적으로 전력구매계약(PPA)의 형태로, 최소한 이 계약은 전력 가격과 수량을 명시해야 한다.

재원조달: 개발 및 건설 단계에 충분한 자금을 조달할 수 있는 경우에만 프로젝트를 진행할 수 있다.

비록 위의 모든 사항들이 VRE 보급의 필수적인 성공 요인들이지만, 이 안내서는 VRE 전력계통 연계와 관련된 경우에만 해당 요인들을 다룬다.

출처: IEA(2015 년), *에너지 기술 전망 2015*

전력망은 확인된 입지에서 VRE 를 수용할 수 있는가?

Page | 28

VRE 보급의 시작은 일련의 조건(박스 1)을 충족해야 하며, 그 다음부터는 이 조건들이 충족된 상태라는 것을 가정한다. 이 시점에서, 첫 번째 VRE 발전소는 전력망에 접속되어야 한다. 이는 결과적으로 전력망 접속 신청이 이루어질 수 있고, 가능한 전력망 개선 요구 사항이 결정되었으며, 개선비용 회수를 포함하는 기능적 절차가 존재해야 한다는 것을 의미한다.

가용 전력망 용량 결정하기

VRE 발전소가 입지 내 지역 전력공급 품질과 신뢰도에 부정적인 영향을 미치지 않도록 보장하기 위해 해당 지역의 전력망 상태를 분석하는 것은 매우 중요한 일이다. 원칙적으로, 주변 전력망에 대한 신규 VRE 발전소의 기술적 영향을 결정하는 것은 단순한 전기 공학 문제이다. 그러나 실제로는 많은 복잡한 상황이 발생할 수도 있다. 예를 들어, VRE 발전소가 중·저압 전력망에 연결되어 있는 경우, 관행이라는 이유 말고는 신규 발전소의 전력망 연계만을 위한 전담 연구를 수행한 사례가 없을 수도 있다.

발전소 크기(해당 지역의 네트워크 부하와 비교)와 전력망의 일반적인 품질에 따라, 새 발전소를 안정적으로 연결하고 가동하기 전에 해결해야 할 많은 문제들이 있을 수 있다. 그럼에도 불구하고, 대부분의 경우, 소형 VRE 발전소는 어려움 없이 기존 전력망에 그대로 연결될 수 있다.

배전(저압) 전력망은 매우 다양하며, 배전 전력망의 수용가능 용량에 대한 일반적인 경험 법칙을 적용하는 것은 적절하지 않을 수도 있다. 예를 들어, 캘리포니아에서는 주어진 하나의 배전 선로(distribution feeder)가 수용할 수 있는 연간 태양광 전력량에 대해 처음부터(해당 선로에서 발생하는) 연간 피크 수요의 15%이내만 수용가능하다는 제약이 설정되어 있었는데, 이는 많은 경우 실제로 가능한 양을 제대로 반영하지 못했었다. 이후 이 단일 상한 제약은 고도로 세분화된 접근법으로 대체되었으며, 온라인 포털에서는 관심 있는 당사자가 배전 선로(distribution lines)별로 수용가능 용량을 확인할 수 있다. 이와 유사한 정교한 접근 방식을 택한 하와이에서는 이로 인해 지난 몇 년 동안 최소 주간 부하의 250%까지 태양광 보급이 크게 성장하는 것이 가능해졌다.

이렇게 한 걸음 더 나아가는 것은 어떤 지역에서 수용가능 용량 평가 방식이 실증적인 방향으로 이동하는 것을 의미한다. 미국에서는 산디아 국립 연구소 및 국가재생에너지연구소(NREL)와 함께 전력연구소(EPRI)가 이러한 움직임을 주도하고 있다. 실증적 접근법은 배전 변전소로부터의 (VRE 발전소의) 거리와 첨단 기능이 있는 인버터,

배전선로 재구성 및 PV 역률 설정과 같은 변동성 완화 기술의 존재와 같은 일련의 요인들을 고려한다(NREL, 2016).

대규모 풍력발전소나 대규모 태양광 발전소는 고압망에 직접 연결되는 경향이 있다. 이 경우 매년 해당 지역에 이 발전소 접속이 미치는 영향이 무엇인지 상세한 평가가 이루어질 것이며, 변동성을 완화시킬 수 있는 조치가 필요한 지를 결정하게 될 것이다. 종종 이러한 평가와 결정의 내용에 따라 신규 발전소는 적절한 일련의 기술적 운영 변수들을 준수하게 된다.

전력망 회사가 그러한 분석을 수행할 능력이 있을 수 있지만, 이 작업은 발전 또는 전력망 자산 소유에 아무런 이해관계가 없는 중립 기관이 수행/검증하는 것이 바람직할 수 있다. 이것은 프로젝트 개발사업자나 전력망 회사의 관점에서 발생할 수 있는 불공정 가능성을 회피할 수 있게 해준다. 표준 소프트웨어 패키지를 사용하여 이러한 서비스를 제공하는 명망있는 엔지니어링 회사가 다수 존재한다. 이 작업을 최종적으로 수행하는 기업들은 전력망 기업 및 프로젝트 개발사업자와 협력하여 검토 중인 전력망 및 VRE 발전소 관련 필요 정보를 확보해야 한다.

가능한 전력망 개선 요건 관리

1 단계에서는 처음 몇 개 VRE 프로젝트를 연결하는 데 있어 전력망 보강이 필요할 가능성이 거의 없다. (이미 가능성이 거의 없는) 문제가 발생하는 경우에도, 새로운 전력망 자산에 비해 더 비용 효율적일 수 있는 대안이 있을 수 있다는 점에 주목해야 한다. 예를 들어 이러한 옵션에는 송전망 용량 및 효율성 향상, 유연송전시스템(FACTS, Flexible AC Transmission System)과 같은 추가 송전망 설비를 이용한 계통제어 향상 기능 및 고장파급방지장치(SPS, special protection schemes)가 포함된다. 이러한 옵션은 VRE 보급의 2 단계와 더 관련이 있으므로 다음 장에서 자세히 논의한다.

1 단계임에도 특히 보급 초기에 상당한 비용이 발생할 수 있는 경우가 있다: 즉, VRE 발전소가 높은 품질의 풍력/태양 자원을 가진 지역에 있지만, 멀리 떨어져 있기 때문에 전력망 접속을 위해 장거리 선로가 필요한 경우이다.

그리고 여러 개발사업자들이 그러한 강력한 신재생 자원을 최대한 이용하고자 할 수도 있고, 이 경우 각 개발사업자는 전력망 변전소에 각자 선로를 구축해서, 이른바 "기타 줄(guitar strings)" 구성, 즉 불필요한 선로 중복투자가 발생하는 경우가 있을 수 있다. 또는 한 개발사업자가 비용 부담을 지고 선로를 건설하는 반면, 다른 개발사업자는 (타인이 건설한 선로를 이용할 수 있는) 후발주자의 이점을 누리기 위해 기다릴 수도 있다(이를 "선발주자의 불리함"이라고 한다).

이 문제가 해결되지 않으면 VRE 보급이 완전히 중단될 수도 있다. 또는, 자체적인 "기타 줄"(접속선로) 접속 비용을 관리할 수 없는 소규모 개발사업자들은 사업에 참여할 수 없기

때문에 초대형 프로젝트만 VRE 보급이 계속 가능한 상태로 남아 있는 결과가 초래될 수도 있다.

최근 두 가지 해결방안이 채택되었다: 1) 개발사업자는 비용을 분담하고(이 경우 분담 방법 설계라는 복잡한 일이 하나 더 추가되는 셈이다), 선로의 운영은 독립적인 계통운영자/배전사업자 ISO/DSO 에게 대해 완전히 귀속되며; 혹은 2) 정부예산으로 접속비용을 지불하고, 그 비용은 전력소비자 혹은 납세자로부터 공평하게 회수하는 것이다.

적절한 기술적 전력망 접속 규칙이 있는가?

VRE 발전소가 전력 공급 신뢰도와 발전소 입지 주변의 전력품질에 부정적인 영향을 미치지 않도록 보장하기 위해서는 적절한 기술적 전력망 접속 규칙이 매우 중요하다.

모든 현대식 풍력 발전소와 태양광 발전소는 그들의 운전 방법이 소프트웨어 프로그램을 통해 제어된다는 점에서 전통적인 발전기와는 다르다. 이는 전력계통의 안정적인 운영을 보장하는 기회이자 도전과제이기도 하다. 전력망 장애에 대한 대응으로 VRE 발전소들이 상당히 광범위하게 반응할 수 있다면, 거기에 새로운 기회가 존재하는 것이다. 도전과제는 소유주에게 과도한 비용을 부담시키지 않으면서 특정 전력계통 요구사항에 맞춘 바람직한 모든 기술 요건을 상세히 제시하는 것이 단순한 과제가 아닐 수 있다는 것이다. 기회와 도전과제 사이에서 적절한 절충점을 찾는 것이 전력망 운영규칙의 핵심 역할이며, VRE 발전기의 진입이 증가함에 따라 점점 더 중요해지고 있다. 부록 2 는 전력망 운영규칙을 보다 상세히 조명한다.

그러나 VRE 발전소 보급의 맨 처음 단계에서는 규칙이 단순한 것이 가장 좋다. 첫 번째 VRE 발전소를 전력망에 연결하는 작업이 - 일반적으로 전체 전력망 접속 규칙의 개발에 수반되는 복잡하고, 이해관계자가 깊이 관여해야하는 절차 때문에 - 지연되어서는 안 된다. 대신 (부록 2 에 명시된) 풍력 발전소와 태양광 발전소에 대해 계통운영자의 "필수" 요건을 충족하는 최첨단 기능을 요구하는 것으로 충분하다.

또한 종합적 전력망 운영규칙이 필요한 시점에서 시행되도록 전력망 운영규칙 개발 프로세스를 빠른 시일 내 시작하는 것이 바람직하다.

Box 3 • VRE 기술 표준

VRE 의 효과적인 보급은 기술 품질 보증과 함께 시작한다. 국제적으로 인정된 표준은 모든 주요 부품에 적용된다. 최신 첨단 기술을 보유할 필요는 없겠지만 품질은 중요하다; 이제 막 VRE 발전소를 보급하는 시장에는 최신형 풍력터빈 모델과 인버터 모델이 반드시 적절한 것만은 아닐 수 있다.

개발사업자와 정책 당국자는 제공된 설비가 해당 지역에 적합한지(습도 조건, 풍력터빈의

허브 높이, PV 용 청소 장치 등)를 확신할 필요가 있다. 초기 경험이 긍정적이어서 지출된 자본 대비 최대 에너지가 수확되고 있다는 것을 모든 관련 당사자들이 확신하는 것이 중요하다.

부적절한 설비는 성능에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 브라질에서는 풍력발전 초기에, 유럽과 미국에서 만든 설비가 사용되었다. 이 설비들은 미국과 유럽 국내 시장의 기후 조건에 적합하도록 설계되었지만, 따뜻하고 습한 기후를 가진 브라질에서 더 강한 풍속과 어떤 경우에는 염분이 더 많은 바람을 맞으면서 기계적인 어려움을 경험하였다. 브라질 계통운영자는 - 부적절한 운영 및 유지관리(O&M) 기술과 같은 다른 요소들이 어느 정도 영향을 미쳤는지는 불확실하지만 - 2014 년까지 13%의 풍력터빈이 제대로 작동하지 않았다고 지적했다.

기술표준은 발전소 부품의 품질과 상호교환성을 보장하기 위해 시장에서 더 일반적으로 사용되지만 정책 수립을 지원하기 위해 사용될 수도 있다. 표준으로는 국제전기기술위원회(IEC)와 국제표준화기구(ISO)가 제시한 기술기준을 적용하며, 특정 기술 문제에 대한 해법 - 풍력터빈이 강풍에 견딜 수 있는 능력이나 고품질의 발전품질 제공과 같은 계통운영기준 요구조건을 충족하는 - 으로서의 국제적 합의를 의미한다.

이러한 표준은 구매자가 기대한 것을 확보할 수 있도록 보장하지만, 그 표준이 계통운영자의 요구까지 반영하는 것은 아니다. 계통운영자는 발전소에서 생산된 전기가 네트워크를 유지하는 데 각자의 역할을 할 수 있는 적절한 품질인지를 확인할 필요가 있을 것이다. 이 부분은 전력망 접속 규칙의 영역이며 부록 2 에서 자세히 다루고자 한다.

출처: Spatuzza(2015 년), *브라질 풍력의 큰 문제*

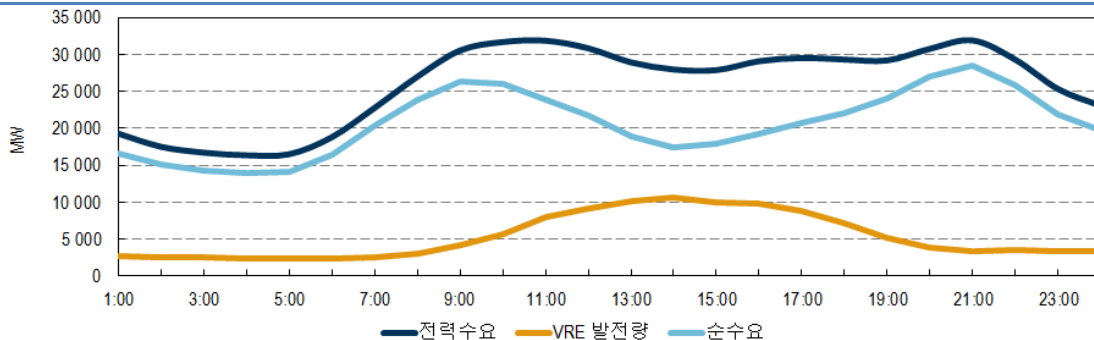
2 단계: 계통운영자가 VRE 에 의한 영향 인지

풍력 발전소와 태양광 발전소가 증가하면서, 이들의 발전량은 전력수요공급 균형에 좀 더 시스템적인 영향을 미치기 시작할 것이다. 이러한 영향을 제대로 이해하기 위해서는, 순 수요(또는 순 부하)의 개념이 가장 중요하다.

순 수요란 무엇인가?

풍력 및 태양광 발전소 발전량은 특정 순간에 얼마나 많은 바람이나 햇빛을 이용할 수 있는지에 좌우된다. 또한 일단 건설되면 연료비가 들지 않으므로 이 발전소에서 전기를 생산하는 비용은 매우 낮으며, 어떤 경우에는 거의 0에 가깝다. 이러한 두 가지 이유로, VRE 에서 생산한 전기를 우선적으로 사용하는 것이 일반적으로 가장 경제적인 것이다. 즉, VRE 발전량을 고려한 후에도 모자란 전력수요를 충족하려면 전력계통의 다른 자원들(주로 중앙급전 발전소뿐 아니라 저장장치, 수요 자원 및 연계선로)이 필요하게 될 것이다. "순 수요"는 단순히 전력수요에서 VRE 발전량을 차감하는 것으로 산정할 수 있다(그림 4).

그림 4 • 전력수요, VRE 발전량 및 순 수요, 이탈리아, 2010 년 4 월 13 일



출처:Terna (2017)에서 발췌, 사후 실제 발전량 데이터.

요점 • N 전력수요에서 VRE 발전량을 차감하면 순 수요를 얻는다.

1 단계는 부하와 순 부하 사이에 유의미한 차이가 없는 상황으로 특징지어진다. 2 단계로의 전환은 순 부하 곡선의 구조적 변화 신호이다. 또한 이 시점에서 (총 부하와 비교하여) 순 부하의 불확실성과 변동성이 크게 증가할 것으로 예상할 수 있다. 하지만 이러한 상황은 그다지 자주 발생하지는 않는다.

예를 들어, 대다수 전력계통에서는 주간에 전력수요가 높게 발생하기 때문에, 태양광 발전은 이러한 수요패턴과 일치하는 경향이 존재하며, 결과적으로 순 부하의 실제 변동성은 전반적으로 낮을 수도 있다. 풍력에 있어, 발전량은 종종 매우 변동적인 날씨에 의해

좌우되지만, 변동성과 불확실성 측면에서의 영향은 전력수요 변동성과 불확실성에 비해 일반적으로 미미한 경향이 있다.

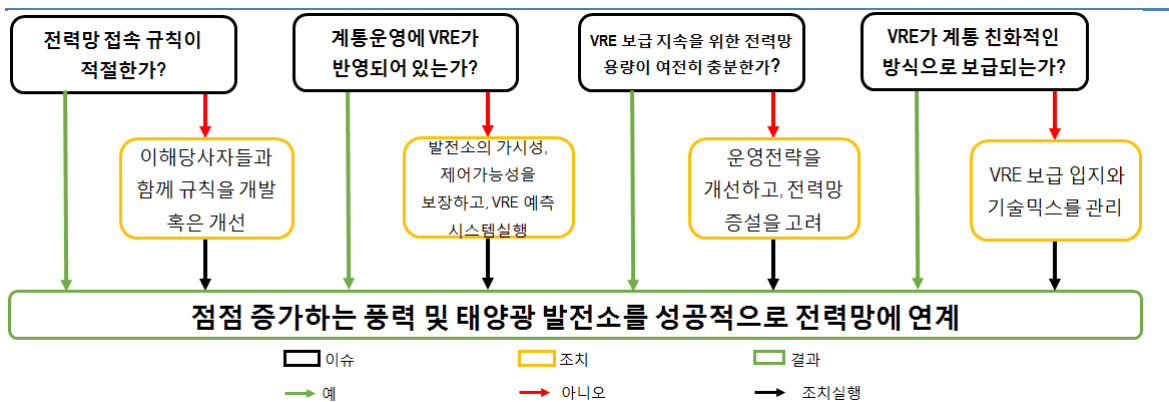
2 단계는 다음 장에서 간단히 소개하듯이 전력 수급균형을 유지하는 것이 구조적으로 더 어려워질 때까지 지속된다. 반면, 2 단계에서는 기존 전력계통 운영 방식에 대한 점진적인 개선만으로도 성공적인 VRE 연계를 위해 충분할 가능성이 매우 높다.

계통 연계를 위한 새로운 우선순위

1 단계의 우선순위는 2 단계 전반에 걸쳐 관련이 있다: 즉, 신규 발전소가 입지 주변 전력망 환경에 부정적인 영향을 주지 않으면서 전력망에 연결될 수 있고, VRE 발전소가 최신 기술 표준을 충족하도록 보장하는 것이다.

또한 VRE 발전이 이제 전력계통에 보다 광범위하게 영향을 미치기 시작한다는 사실과 관련된 새로운 우선순위도 발생한다. 이는 두 개의 범주로 나뉜다: 하나는 전력망과 관련된 것이고, 다른 하나는 (기존) 발전소 집단에 미치는 영향이다. 마지막으로, 세 번째 일련의 우선순위는 전력망에 발생 가능한 부정적인 영향을 완화하기 위해 VRE 가 보급되는 방식과 관련이 있다(그림 5).

그림 5 • 2 단계: 이슈 정리 및 접근 방법



요점 • VRE 보급은 2 단계에서 어느 정도 영향을 미치기 시작한다.

전력망 접속 규칙이 적절한가?

이미 1 단계에서도 전력망 접속을 위한 적절한 규칙이 매우 중요하다. 2 단계에서는 VRE 발전소가 전력계통에 미치는 영향이 증가하므로 전력망 접속 규칙 개발에 보다 체계적인 접근방식이 필요하다. 여기에는 VRE 발전소의 기술적 능력에 대한 적절한 필요사항을 파악하고 이러한 기능이 실제로 준수되는지 확인하기 위한 메커니즘을 시행하는 것이

포함된다. 이 주제의 심대한 중요성으로 인해, 부록 2에 상세한 논의가 포함되어 있다. 보다 자세한 내용은 국제재생에너지기구(IRENA, 2016)의 최근 보고서를 참조하면 된다.

2 단계 이상 단계에서는 VRE의 안정적인 계통연계를 위해 적절한 전력망 접속 규칙을 확립하는 것이 반드시 수반되어야 한다. 그렇게 하지 않으면 전력계통 신뢰도가 훼손될 가능성이 높다.

VRE 발전량이 계통운영에 반영되는가?

2 단계에서는 VRE 발전소 출력량이 순 부하 모양을 변화시키며, 그 결과 전력수요를 충족시키기 위한 비(非) VRE 발전소 발전량에 보다 다양한 영향을 미치게 된다. 전력계통의 안정적이고 경제적인 운영을 지속적으로 보장하기 위해, 전력계통의 일상적인 운영에서 VRE의 다양한 기여를 반영할 수 있는 효과적인 절차가 점점 더 필요해진다.

계통운영자가 VRE 기술을 이해하는 것이 주요 목표이며, 이는 계통운영자가 VRE를 불필요하게 축소하는 경향을 감소시킬 것이다. 계통운영자는 전통적인 화력발전 및 수력발전에 익숙해져 있을 가능성이 높다. 대부분의 전통적인 발전소는 급전이 가능하며, 이는 연료 공급, 기동준비시간(lead-time) 및 돌발적인 상황만을 고려하여 출력조정을 수행함을 의미한다. 따라서 계통운영자가 풍력 발전소와 태양광 발전소의 공급 변동성과 불확실성에 대해 우려하는 것도 무리가 아니다.

신중한 운영을 위해 전력계통의 현재 및 미래 상태(가시성)를 평가하는데 충분한 정보가 필요하며, 이 정보를 근거로 조치를 취할 수 있는 적절한 수단을 확보하는 것(제어 가능성)이 필요하다는 것은 잘 알려진 계통운영의 핵심이다. 현실적으로, 발전소 급전과 관련하여 4가지 요소를 고려해야 한다. 첫 번째 두 가지는 가시성과 관련이 있고 세 번째와 네 번째는 제어 가능성과 관련이 있다.

- VRE를 포함하여 충분한 수의 발전소 운영 가시성을 계통운영자에게 제공.
- VRE 발전량 예측의 구현 및 사용.
- 발전소 운영계획 수립, 다른 계통운영 지역과의 상호연계 관리, 수요와 VRE 예측에 따른 운영예비력 관리(시장자유화를 거친 전력계통에서는 시장설계 변경이 필요할 가능성이 있음).
- 실시간 운영 및 이에 근접하여 계통운영자가 충분한 수의 발전소를 제어할 수 있는 능력.

계통운영자에게 제공되는 발전소 가시성

VRE 점유율이 증가하는 상황에서 공급 안전도(security)를 유지하기 위해서는 VRE 발전량에 대한 충분한 가시성 확보가 매우 중요하다.

계통상황의 가시성 확보에 있어 중요한 요소는 재생에너지 및 기존의 발전자원을 포함한 발전단 전체 정보를 정확하게 확보하는 것이다. VRE 보급이 2 단계로 진입함에 따라 VRE 발전소의 "가시성"은 전력계통을 안정적이고 최소한 비용으로 운영하는데 필수적으로 작용한다. 이러한 가시성은 VRE 발전량을 설명하는 데이터를 라이브(실시간)로 계통운영자에게 전송하는 형식을 취한다.

Page | 35

정적 데이터와 운영 데이터가 모두 제공되어야 한다. 정적 데이터에는 예를 들어, 풍력터빈의 경우, 허브 높이와 정격 출력 및 출력 곡선이 포함된다. 원격감시제어시스템(SCADA)은 발전소 운영 데이터를 수집하고 분석할 수 있도록 한다. 예측 활동의 기초로 계통운영자가 올바른 품질의 올바른 데이터를 사용할 수 있도록 보장하기 위해서는 적절한 기술을 선택하는 것이 필요하다. SCADA 품질이 불충분하거나 충분한 수의 측정치를 수용할 수 없는 경우, 이와 같은 매우 중요한 과정이 위험에 빠지며 기존 SCADA 시스템을 업데이트해야 할 수도 있다.

이러한 데이터의 관리는 도전과제의 하나로 부각될 수 있다: 즉, 상당한 양의 데이터로 인해 기존 제어 센터는 이러한 정보를 관리하기에 적절한 장비를 구비하지 못한 상태일 수도 있다. 하지만 이러한 데이터를 수신하고 처리하도록 설계된 검증된 패키지가 존재한다.

VRE 발전소의 충분한 가시성이 모든 VRE 발전소를 실시간으로 감시해야 한다는 것을 의미하지는 않는다. 예를 들어 소형 태양광 발전 시스템에 실시간 데이터 모니터링 시스템을 설치하는 것은 일반적으로 비용 효율적이지 않다. 대신, 대표적인 일련의 시스템에 이러한 장치를 설치한 다음 실시간 출력량을 계산하고 집계할 수 있다. 이는 독일처럼 분산형 태양광 발전소 보급률이 매우 높은 전력계통에서는 일반적인 관행이다.

기존 발전소에 어떤 시스템이 이미 설치되어 있는지에 따라 감시기능을 개선해야 할 수도 있다. 시간이 지남에 따라 기존 발전소 운영에 대한 VRE의 영향이 증가함에 따라, 계통운영자가 이 VRE 발전소들의 성능을 완전히 인식하고 그들의 작동 상태(예를 들어, 오프라인, 최대 출력, 최소 출력)를 감시하는 것이 점점 더 중요해지고 있다. 이를 통해 날씨 패턴, 날씨 변화에 따른 VRE 발전소의 운전 및 수요 변동에 보조를 맞추는 발전계획(급전) 변경 계획 수립이 가능해질 것이다.

적절한 시기에, 계통운영자는 모든 발전기(즉, 전체 발전소 단위가 아닌)에 대해 운영 및 정적 데이터³를 보유해야만 하며, VRE 비중이 증가함에 따라 이러한 데이터의 정밀함이 더욱 강화될 것이다. 예를 들어, 전력망 접속 지점에서 계량된 석탄 발전소 출력량은 발전소 내 개별 발전기 운전 상태에 대해 거의 알려줄 수 없다. 이러한 추가 데이터를 수집하는 것은 상당한 업무 부담을 발생시킬 수 있다.

³ 정적데이터는 발전기의 고정된 매개변수들이며 정격용량(MW), 최소안전운전수준, 발전기 출력변화속도(출력증감발률, MW/분 기준), 발전기 기동/정지 시간 등이 포함된다.

VRE 발전량 예측

SCADA 에 의해 수집되고 실시간으로 제공되는 VRE 데이터에 대한 계통운영자의 감독 기능은 최대 20~30 분에 앞서 향후 발생 가능성이 높은 발전소 운전방향을 예측할 수 있는 기초를 제공해 준다 - 지속 예보(persistence forecasting)라고 알려진 기법이다. 그러나 계통운영자는 순 수요를 바탕으로 실시간 운영 전일 및 수 시간 전에 중앙급전발전소 및 다른 계통 자원에 대한 운영계획을 수립하기 때문에, 순 수요에 대해 믿을 만한 그림을 제공하기 위해서는 보다 포괄적인 예측기법과 방안들이 필요하다.

발전량 예측은 미래 어느 한 시점에서 발전소 생산량을 예측하려는 시도이다. 이를 통해 출력량 변화(출력증감발)를 예측할 수 있는데, 이는 계통운영자 업무의 핵심이다. VRE 발전량을 예측하기 위해 수 분전에서 수일 전까지 기간별로 다양한 도구가 사용된다. 이러한 도구는 측정된 데이터가 필요하며 물리적 그리고/혹은 통계적 모델링에 기반하고 있다.

측정 데이터에는 기상 관측소, 위성 데이터, 구름 및 하늘 관측치, VRE 시스템 데이터가 포함된다. 모델링은 수치 기상 예측(NWP) 모델에 기초하며, 이는 보다 광범위한 기상 예측의 기초를 형성한다. 측정된 데이터에만 기반한 예측은 최대 1~3 시간 전까지 가장 정확한 반면, NWP 방법은 3 시간 이후 예측에 매우 유용하다.

특정 풍력 발전소의 생산량을 예측하기 위해서는 기상 예측 수치 자료가 필요하다. 통계 모델링의 경우, 최소 6 개월간의 NWP 데이터(예: 풍속 및 발전량)가 필요하다. 모델링의 물리적 부분에는 현장 전체에 걸친 바람 흐름의 상세한 시뮬레이션이 가능하도록 풍력 발전소의 지형과 기하학적 구조에 대한 정보가 필요하다. 여기에는 웨이크 효과(wake effects)도 포함된다(어떤 풍력터빈 다음에 위치한 또다른 풍력터빈이 “받게 되는” 바람 자원에 미치는 효과. 일명 후류효과라고도 한다).

계통 전체에 걸친 예측 결과를 도출하기 위해, 과거 전력 생산에 대한 통계/실증 분석을 사용하여 대표적인 풍력 발전소 데이터를 일정비율로 확대한다. 계통운영자가 데이터를 수신하는 VRE 발전소 범위가 넓을수록 전체 예측은 더 정확해질 것이다. 그러나 새로운 프로세스가 계통운영에 자리 잡기 위해서는 시간이 필요할 수 있으며; 어떠한 경우에도 모든 VRE 발전소 예측치가 필요할 경우는 없을 것이다. 예를 들어 독일은 2015 년에 풍력발전소 및 태양광발전소로부터 전력의 20% 이상을 생산했다; 전해지는 바에 따르면 독일 4 개 계통운영자는 800 개 풍력발전기로부터 데이터를 받아 전체 풍력 자원 발전량을 추정한 것으로 알려져 있다.

계통 전체에 걸친 예측은 VRE 발전량에 대해 훨씬 더 정확한 관점을 제공해 준다. 예를 들어, 독일의 경우, 전국적인 풍력 예측의 불확실성은 설비 용량의 약 2-3%인 반면, 단일 풍력

발전소의 경우에는 그 불확실성이 10~30% 사이이다⁴. 다른 중요한 요소로는 실시간에 대한 근접성(실시간에 가까울수록 예측이 일반적으로 더 정확함)과 전체 VRE 발전량이 예측되는 지리적 영역(더 넓을수록 좋음)이 포함된다.

발전소 운영계획 수립, 연계 조류량 관리, 운영 예비력

Page | 37

발전소 운영 결정은 실시간까지 이르는 다양한 기간에 걸쳐 이루어지며; 때때로 이러한 결정은 발전사업자가 제출한 입찰에 기초하여 시장운영자가 결정하거나; 때로는 발전소 운영자가 어떻게 전력을 공급할 것인지를 결정한다(예를 들어, 시장제도 혹은 수직통합 전력회사 체제에서의 자율 급전).

첫째, 발전기 기동 여부를 결정해야 한다. 특정 유형의 발전기에 대한 기동 결정은 다른 유형의 발전기보다 훨씬 먼저 선행되어야 한다: 급전 순위 중간에 위치한 대부분의 발전소를 기동하는 데는 수 시간이 소요되는 반면, 첨두 발전기들은 일반적으로 30 분 이내에 기동하여 계통에 병입될 수 있다. 또한 발전소의 정확한 발전량 수준은 (종종 발전소 급전이라고 함) 사전에 결정해야 하며, 이는 각 발전소에 대해 일정 시간 간격(급전주기) 동안 고정되어 있다(IEA, 2014).

기술적 제약으로 인해 발전기 기동 및 발전소 급전과 관련하여 일정 수준의 사전 계획수립이 필요하다. 그러나 실제로 많은 전력계통은 기술적 관점에서 필요한 시기보다 훨씬 앞서서, 몇 주 또는 심지어 몇 달 전에 발전기 운영계획을 정하는 경향이 있다. 이것은 종종 경제적인 이유 때문이다. 따라서 발전기와 소비자 간의 장기 계약은 발전소가 순 부하 변화를 비용 효율적으로 충족할 수 있는 유연성을 제공하지 못하게 할 수도 있다. 특히 VRE 보급률이 증가하는 경우 이는 전력계통 전체의 최소 비용 운영에 바람직하지 않다.

요약하자면, 운영계획 수립은 이상적으로 다음과 같아야 한다:

- 최대한 실시간에 근접하여 빈번한 운영계획 변경 허용(실시간 최대 5 분 전까지가 모범사례).
- 짧은 급전 주기(5 분이 현재 모범 사례임)를 목표로 하고, 여러 개의 급전 주기를 "예상하면서(looking ahead)" 급전을 결정.
- 발전소가 장기간 동안 최대 용량으로 고정 출력을 유지하는 계획을 회피(모범 사례는 가능한 단기간 동안만 최대 용량으로 발전하는 것을 의무화하는 것임).
- 송전제약을 고려하여 발전운영계획을 최적화.
- 발전운영계획과 보조서비스를 동시 최적화.

⁴ 평균제곱근편차(RMSE) 기준, root-mean-square-deviation 라고 불리기도 하며 예측모델링의 표준 측정치이다.

위의 주장들은 수직 통합 시스템이나 자유화되고 기능이 분리된 시장에서도 동일하게 구현될 수 있지만, 사용되는 실제 메커니즘은 서로 다를 것이다.

VRE 보급 확대는 중앙급전 발전소 운영 계획수립에 미치는 영향 외에도, 계통운영보조서비스 및 관련 시장에 중요한 영향을 미친다. 계통의 예비력 규모를 결정하기 위해서는 계통 공급 안전도(security)와 비용 사이의 균형을 맞추는 필요가 있다. 현재 널리 사용되고 있는 방법은 필요한 예비력 수준을 설정하기 위해 상당히 간단하고 결정론적인 규칙을 채택하고 있다. 일반적으로 가장 큰 전력계통 자원(발전소 또는 송전선)의 고장에 대응하기 위해 대규모 예비력이 유지된다. 동일한 양으로 순간적으로 응동해야 하는 예비력과 수동 운전을 통해 상대적으로 느리게 응동하는 예비력에 모두 대응한다. 또한, 수요 예측 오차 및 급전 주기 사이의 수요 변동성과 같은 정상적인 계통운행을 위해서도 예비력을 확보해야 한다.

VRE는 전력계통 운영의 불확실성을 가중시킨다. 그러나 이는 일반적으로 수요 불확실성 또는 발전기 고장과는 관련이 없다. 다시 말해, 발전기 고장 사고, 극단적인 수요 변동 및 VRE 발전량의 급격한 변화는 동시에 발생할 가능성이 거의 없다. 따라서 각각 위험 요소별로 예비력을 개별적으로 할당할 것이 아니라, 예비력 요구량을 확립할 때 이러한 모든 위험요소들을 함께 고려하는 것이 매우 중요하다. 과거 풍력과 태양광 발전량에 대한 체계적인 분석 결과는 충분한 정보에 입각한 의사결정을 지원한다. 예를 들어, 미국 콜로라도 Xcel Energy는 예비력 요구량 산정을 위해 이러한 분석을 수행하였으며, 이를 뒷받침하는 방법론도 잘 확립되어있다(IEA Wind, 2013).

예비력을 산정할 때 또 다른 중요한 요소는 VRE 발전량이 시간대 및 발전량 수준에 따라 서로 다른 수준의 불확실성을 유발한다는 것이다. 즉, VRE가 전력계통에서 더 큰 몫을 차지하여 예비력을 설정하는 데 영향을 미치게 되면, 전체 예비력 요구량은 매일 달라지게 된다. 예를 들어 바람이 불고 구름이 낀 날처럼 불확실성이 높은 날에는 (보다 적은 예비력으로도 충분한) 청명한 날보다 많은 예비력이 필요하게 된다. VRE 비중이 증가할수록 이른바 동적 예비력 적용이 더욱 중요해진다.

인접 전력계통(balancing area)과 연결하는 연계선로(송전망)의 활용은 예비력 할당 측면에서 매우 중요하다. 만일 VRE 발전량이 인접 지역으로부터 분리된 소규모 전력계통 내에 위치하는 경우, 각 지역 내 VRE 발전량은 모든 지역을 연계하는 경우보다 높은 변동성을 유발할 것이다. 이러한 경우, 광역 전력망 내 발전소 분산으로 인한 자연적인 발전량 평활화 이점을 얻지 못하기 때문에, 다른 발전기, 저장장치 및 수요자원을 이용하여 지역별 수급균형을 유지하기 위한 보다 많은 노력이 필요하게 된다. 또한 지역 간 협조운영 부재는 특정 지역이 증발 예비력을 투입할 때 인접 지역은 감발 예비력을 투입하는 것과 같은 불필요한 예비력 투입 중복을 야기할 수 있다.

이 문제는 독일 전력계통에서 성공적으로 해결되었다. 역사적인 이유로, 독일은 네 개의 서로 다른 전력계통을 가지고 있다. 2008 년 12 월까지는 각 계통들은 독립적으로 운영되어 위에서 설명한 역효과를 초래했다(인접 전력계통에서 예비력이 서로 다른 방향으로 이동). 여러 단계의 협약에 따라, 4 개 송전계통운영자(TSO)가 서로 다른 방향으로 예비력을 운영하는 대신, 처음으로 협력하여 계통 인접지역에 걸쳐 각자의 수급 불균형을 함께 해결하는 것으로 해소하였다(IEA, 2014). “각 계통을 연계하여 수급균형을 유지”하는 첫 번째 단계 이후, 계통 간 협조운영은 공동 수급균형시장(balancing market)을 구성하는 것으로 확대되었다.

보다 일반적으로, (기술적으로 가용한 유연성이 성공적으로 확보되기 위해서는) 연계선로 운영계획 수립 방법이 위에서 제시된 발전부문 사례와 동일한 원칙을 따라야 한다.

실시간 및 그에 근접한 시간대의 발전소 관제

발전기 운영 상태에 대한 지식은 계통운영자가 해당 정보를 활용할 수 경우에만 유용하다. VRE 의 비중이 증가하면 일반적으로 보다 진보한 계통운영 제어가 필요하게 되고, 정확한 VRE 발전량 예측을 포함하여 최신 데이터를 반영할 수 있어야 한다.

많은 계통에서 자동발전제어(AGC, Automated Generation Control)가 설치되어 있지만, 많은 시장에서 계통운영자와 발전소 운영자 간의 통신은 여전히 전화로 이루어지는데, 이 경우 발전기 모니터링 및 직접 제어가 불가능하다. 이러한 상황에서는 일반적으로 제어 기능을 AGC 로 개선하는 것이 일반적으로 바람직하다.

초기에는 거의 필요할 것 같지 않지만, VRE 발전기 차단은 비상상황, 선로 유지보수 및 기타 경우에 필요할 수 있다. 발전기 차단방법은 다음과 같은 이유로 계획되어야 한다; 미래 이해충돌을 예방하기 위해 처음부터 규칙을 확립할 필요가 있으며, VRE 발전소가 그에 따라 적응할 수 있도록 해야 한다. 일반적인 원칙으로써 계통운영자에 의한 개별 VRE 설비 제어 수준은 VRE 보급 수준에 따라 진화해야 한다. 초기 VRE 설비는 계통운영에 큰 문제가 되지 않지만, VRE 발전량이 순 부하 형태에 변화를 일으키게 되면, 계통운영자 제어신호에 따라 VRE 발전기가 발전량을 신속하게 조정할 수 있어야 한다. 계통운영자가 개별 발전소를 직접 통제할 필요는 없겠지만, 대신 발전소 운영자에게 요청하여 급전지시를 실행하게 할 수 있다는 점에 주의해야 한다.

계통운영자는 총 발전량을 제어하는 것을 목표로 할 수 있으며, 이 경우 VRE 발전량이 지시된 수준으로 감축될 수 있다. VRE 출력증감발 변화 속도(분당 MW)와 그러한 출력증감발 지속시간도 제어할 수 있다. 돌발적인 날씨 변화의 영향을 완화하기 위해, 태양광의 경우에는 인버터 기술을 적용하거나 풍력의 경우에는 터빈 날개 각도의 피치 제어를 통해 증감발 속도를 제어할 수 있다. 스페인 계통운영자의

재생에너지관제센터(CECRE)는 VRE 계통 연계 측면에서 스페인이 주도적인 역할을 수행하는데 중요한 역할을 수행했다(박스 4).

매우 작은 규모의 시스템을 많이 모아서 계통전체에 영향을 미치는 대규모 태양광 보급을 달성하는 것이 더 적은 수의 대형 태양광 시스템을 모아 동일한 규모의 시스템을 구축하는 것보다 더 어려울 수 있다는 점을 언급할 가치가 있다. 이는 부분적으로 소규모 시스템에 동일한 수준의 제어 기능을 구현하기가 더 어렵고, 계통운영서비스 제공에 관한 한 최첨단 지붕형 태양광 시스템 역시 일반적으로 대형 발전소보다 성능이 떨어지기 때문이다.

예를 들어, 독일에는 아주 많은 소규모 시스템들이 있으며, 심지어 이러한 소규모 시스템에게보다 정교한 능력을 요구하는 방향으로 나아가고 있다. 이는 전력망 운영규칙 개정을 통해 수행되고 있다(VDE-AR-N 4105 분산 전원의 저압 네트워크 접속을 위한 적용 가이드).

계통운영자가 충분한 양의 발전용량(VRE 포함)을 제어할 수 있는 능력은 VRE 비중이 증가하는 시점에서 전력공급 안전도(security)를 유지하는 데 매우 중요하다.

박스 4 • 스페인 재생에너지관제센터(CECRE)

2006 년 스페인 계통운영자는 급증하는 풍력발전을 보다 잘 제어하고 향후 태양광 및 태양열 집적 발전(CSP)를 잘 관리하기 위해 주 전력계통 운영 센터 내에 전담 제어 센터를 처음 설립하였다. CECRE 는 운영자가 재생에너지 생산을 지속적으로 감시하는 운영 데스크로 구성되며, 계통 신뢰도를 유지하면서 RE 생산을 극대화한다는 목표를 가지고 있다. CECRE 는 필요한 경우 스페인 전역의 보조 발전제어센터(Subsidiary Generation Control Center, SGCC)를 통해 모든 대형 VRE 발전소를 제어할 수 있으며, 또한 SGCC 는 실시간 데이터를 수집하고 이 자료를 CECRE 로 전송한다.

그림 6 • CECRE's 관제실



Page | 41

출처: REE (2016), *재생에너지의 안전한 연계*

전력망이 VRE 보급을 지속하기에 수용능력이 충분한가?

1 단계 VRE에서는, 전력망 접속 관점에서 조기에 전력망의 약점을 파악해야하는 중요성을 제기하였다. 2 단계에서는 추가적인 전력망 문제가 발생할 가능성이 매우 높으며, 특정 지역에 집중된 VRE 설치로 인해 전력망 관련 문제가 확대되는 계통 "취약지점"이 발생할 수도 있다.

예를 들어, 남부 이탈리아의 Foggia 지역은 이탈리아 육지 면적의 불과 2.4%를 차지하지만 2014년까지 이탈리아 풍력 설비 용량의 22%를 차지했다(GSE, 2015). 특정지역에 집중된 이러한 설비 집중은 다양한 경제적 및 비경제적 요인에 의해 발생할 수 있으며, 설비집중을 야기한 해당 지역의 요인이나 (다른 지역) 규제 장벽을 조사해 보는 것이 필요할 수 있다. 이탈리아의 사례에서는 이러한 설비집중 문제를 해결하기 위해 신규 전력망 인프라에 대한 투자가 필요하였다.

다음 절에서는 빈번하게 발생하는 다양한 문제를 제기하고 이러한 문제들이 어떻게 해결됐는지에 대한 사례를 제시한다.

VRE 보급과 신규 송전선로 증설 동기화

2 단계에서는 VRE 보급이 증가하여 특정 지역에서 추가 VRE 발전기를 수용할 수 있는 전력망의 능력이 소진될 수도 있다. 이는 애초에 전력망에 VRE 발전기를 수용할 수 있는

여유 용량이 거의 없었기 때문이거나, 혹은 문제가 된 지역이 전력망과 관련 없이 별도로 VRE 개발사업자들을 유인하여 신규 VRE 발전소들이 집중되었기 때문일 수도 있다.

예를 들어, 브라질에서는 2013 년에 새로 건설된 풍력 발전소 가운데 약 2GW 의 설비가 전력망 수용 용량이 부족하여 발전 불가 상태에 있었다. 이 풍력 발전소들은 체결된 전력구매계약(PPA)에 따라 정상 연계 시의 발전량에 대해 보상을 받고 있었지만, 전력망에 실제로 전력을 공급하지는 못했다. 이렇게 된 이유는 이전 경매 규칙에서, 프로젝트 위치와 상관없이 전력 생산 비용에 근거하여 낙찰자가 선정되었기 때문이다. 결과적으로, 수요 집중지역이나 전력망에 대한 근접성과 무관하게, 사업자 입장에서 최소 비용을 달성한 전력생산이 성공적인 프로젝트가 된 것이다. 차후에 이 풍력 발전소를 전력망에 연결하는데 드는 소요시간(lead time) 때문에 완성된 풍력 발전소들이 전력망에 연결되지 못하게 되는 결과를 초래했다.

그 이후로, 그러한 전력망 접속 지연의 위험부담은 풍력 개발 사업자가 지게 되었다: 만일 풍력 발전소가 발전할 수 없다면, 계약된 보상을 받지 못할 것이다. 2015 년 말까지 단지 대략 300MW 의 풍력 발전 용량만이 전력망 접속을 대기하고 있었다. 이러한 전력망 접속 문제로 인해, 최근의 풍력 프로젝트는 기존 전력망 인근에서 입지가 정해지는 경향이 있다. 동시에, 경매에 참여하기 위해서, 풍력 프로젝트는 반드시 송전선로 관련 사항을 포함해야 한다.

2011 년까지 중국에서는 50MW 미만의 풍력 발전소가 지방 정부 승인 대상이었다. 결과적으로, 전력망 확장 계획을 충분히 고려하지 않고 많은 수의 풍력 발전소(각 49.5 MW)가 승인되었다. 풍력 발전 보급은 전력망 확장보다 빠르게 진행되었고, 그 결과 일부 풍력 발전소는 전력망에 연결될 수 없었다. 2011 년 8 월 중국국가에너지청(NEA)은 이 문제를 해결하였는데, 이 때 이후로 건설 승인을 받기 위해서는, 개발사업자가 반드시 관련 전력망 회사와 계약을 체결해야만 했다. 이 결정은 유휴 설비를 크게 감소시켰다.

텍사스에서는 전력망 개발을 최적화하기 위해 풍력 발전소 입지를 계획하는 데 구역할당제(zoning)가 사용되었다. 텍사스 공공서비스규제위원회(PUCT, Public Utilities Commission of Texas)는 2005 년 새로운 송전망 확장과 풍력발전소 건설 사이에 난항(이 지역의 송전망과 풍력발전소는 서로의 부재로 인해 각자의 활동이 방해받는 상황이었다)을 해소하기 위해 경쟁적 재생에너지구역(CREZ, Competitive Renewable Energy Zone)을 지정했다. 서부 텍사스 대부분 지역을 포함하는 5 개 구역이 선택되었고, PUCT 는 몇 가지 선택 옵션 가운데 11.5 GW 의 추가 풍력 설비 용량을 수용할 수 있는 신규 345kV 송전선로 건설 계획을 채택하였다. 발전소를 건설하기에 앞서 송전망 확장에 착수하여 적기에 발전량을 수용할 수 있는 송전선로가 준비되도록 보장한 사실은 이러한 접근방법이 성공했다는 것을 보여준다.

기존 전력망 인프라의 최적 사용

접속 지점에서 신규 VRE 용량을 수용하는 전력망의 능력이 제한될 수 있는 것과 마찬가지로, 전력망의 병목 현상(예를 들면, 선로 또는 변전소 용량 제한)으로 인해 VRE 접속 지점에서 수요 집중지역(즉, 도시와 공장)까지 전력 전송이 제한될 수도 있다.

Page | 43

전력망 "혼잡"이라고도 하는 이러한 취약지점은 일반적으로 주변 전력망보다 전력을 전달하는 능력이 낮은 선로와 열저항 한계에 근접하여 전력을 전송하는 선로를 의미한다; 두 상황 모두 혼잡의 반대편에 위치한 전기 소비자에게 전력이 전달되지 못하는 것이다. 따라서 한쪽은 발전소 생산량을 줄여야 하는 반면 다른 쪽은 증가시켜야 한다.

이러한 발전소의 "발전력 재조정(re-dispatching)"은 일반적으로 준최적(suboptimal)이 되므로, (낮은/제로 비용의) 풍력이나 태양광 발전소가 병목 현상의 한 쪽에서 차단되고, 반대편 다른 쪽에서 연료 기반 발전소가 상향 운전을 하게 되면, 경제적 손실이 더욱 심각해진다.

과거에 접속 용량이 제한적이거나 혹은 해당 접속점에 연결된 발전소가 없었던 전력망에 신규 (VRE) 발전 발전소가 건설되면 병목 현상이 발생할 가능성이 높다는 점에서, 전력망 혼잡은 위에서 논의한 바와 같이, 전력망 접속 용량이 제한되는 것과 유사하다. 풍력 자원은 전력망에 연결된 지역에 걸쳐 매우 극적으로 다르게 나타날 수 있다. 비록 해당 지역의 지형과 식생이 여전히 영향을 미칠 수 있지만 풍력의 이러한 변동성은 태양광 사례보다 적을 수 있다. 이러한 자원의 불규칙성은 풍력 에너지 확보 측면에서 기존 전력망이 최적으로 준비된 상태가 아니거나, 혹은 풍력 자원이 더 강한 곳에서는 전력망이 취약한(전력전송 능력이 떨어지는) 상태일 수도 있다는 것을 의미한다.

전력망의 심각한 혼잡을 관리하기 위해서는 전력망 보강(예를 들어, 선로 한계용량 상향(uprating of lines))이 필요하지만, 기존 병목 지점과 새롭게 부상하는 병목 지점을 관리하기 위한 방안을 고려하는 것과 동시에 VRE 발전소를 지리적으로 분산시키고(지리적 분산, geo-spread), 시간의 흐름에 따라 VRE 발전량을 평활화 시켜(기술 분산, technology spread) 기존 여유 용량을 보다 잘 활용할 수 있는 기회도 최대한 모색해야만 한다. 모델링을 통해 네트워크를 강화함으로써 발생하는 비용과 편익을 평가하면 이러한 의사결정이 명확해지고 새로운 전력망 보강이 정당화될 수 있다.

전력망 보강을 고려하기 전에, 에너지 계획수립 담당자는 병목 현상을 유발할 수도 있는 기존 인프라의 취약점을 파악하기 위한 분석을 실시해야 한다. 대규모 전력망 보강 없이 취약점을 강화하기 위해 사용할 수 있는 다양한 도구들이 있으며, 일부는 다음과 같다.

- **송전선로 동적 열용량(DLR, Dynamic line rating).** 송전선로는 가용송전용량이 정해져 있다. 이 용량은 일반적으로 시간에 따라 설정된 수준에서 고정되어 있다. 그러나 실제 한 선로가 전력을 전송하는 능력은 외기온도에 의해 영향을 받는다: 온도가

낮을 때는 선로의 실제 전송가능 용량이 정격보다 높을 수 있다. 송전선로 동적 열용량은 시간에 따라 선로 온도 변화를 고려하므로, 더 높은 기술 사양의 송전설비로 (더 비싼 비용을 들여) 송전설비를 교체하는 것을 회피/지연할 수 있다.

- **유연송전 시스템(FACTS).** FACTS는 주어진 전력망 모선에 투입되는 무효 전력을 유연하게 조절하여 선로의 송전능력을 증가시킴으로써 전력 계통의 제어능력과 안정도를 향상시킬 수 있는 전력전자장치이다.
- **선로 재보강(line repowering).** 송전용량이 낮은 선로는 고온에서 동작할 수 있는 도체(conductor)로 교체하여 보다 많은 전력을 전송할 수도 있다.

이러한 옵션 중 일부는 박스 5에 설명되어 있다. 교류 전력망 최적화 방법과 관련된 보다 자세한 내용은 유럽 연합 "최적 경로" 프로젝트 웹 사이트에서 확인할 수 있다⁵.

박스 5 • 전력망 취약지점 관리

최근 몇 년간 풍력발전소가 상당한 규모로 증설된 스웨덴 섬 올란드(Öland)에서는 동적 송전열용량(DLR) 감시가 효과적으로 활용되어 왔다. 기존 선로의 정적인 열용량 한계를 적용하였다면, 48MW 용량의 풍력 발전소 증설로 인해 신규 송전장비 확보에 미화 900만~1600만 달러(미화 기준)가 필요했을 것으로 추정된다. 대신 실시간 선로 감시를 시행하여 바람이 더 많이 부는(보다 서늘한) 기간 동안 최대 60%의 선로 용량을 확보하여, 송전선로 업그레이드 필요성이 없어지고, 결과적으로 선로 보강에 필요한 비용이 75만달러에 불과하게 되었다.

전통적으로 전력망은 여분의 선로 구성을 통해 주요 선로 또는 기타 설비의 고장을 수용할 수 있도록 계획되어 왔다. 이러한 소위 "n-1" 기준을 사용한 위기관리는, 비록 신뢰도가 높아지긴 하지만, 상당한 비용이 소요되는 단점이 있다. 보다 최근에는 "예방적인(preventive)" 접근법과 대조적으로 "수정적인(corrective)" 접근법이 등장했다. 이 방식은 비상사태가 발생할 수 있는 네트워크의 특정 부분을 관리하기 위해 고장파급방지장치(SPS)를 사용한다. 예를 들어, 이탈리아와 뉴질랜드가 SPS를 활용하고 있다.

FACTS는 많은 전력망에 채택되어 왔다. 예를 들어 덴마크에서는 선로 중간 지점에 설치된 인덕터(솔레노이드) 및/또는 콘덴서가 무효전력을 성공적으로 보상하였다. 이는 한 선로에서 무효 전력의 필요성을 감소시켜, 해당 선로의 유효전력(active power) 전송 능력을 증가시키는 것이다.

고온에 견디면서 전압강하가 적은 HTLS(High Temperature Low Sag) 도체를 사용하는 선로가 2010년 아일랜드 네트워크에서 도입되었다. 당시 목표는 1000km의 송전선로 전송능력을 50% 상향 조정하는 것이었다. 신규 선로를 건설하는 전통적인 접근법은 종종

⁵ <http://www.bestpaths-project.eu> 참조

지연되는데, 이는 미관, 환경을 이유로 한 지역 단체의 반대뿐만 아니라 인허가 과정에서 상당한 시간이 소요되기 때문이다. 고온에 견디는 선로를 기존 선로에 추가 설치하게 되면 신규 송전선로 건설 없이도 송전용량 증가가 가능하다.

출처: *재생에너지 연계와 스마트그리드의 역할*, IEA RETD (2013), *RES-E-NEXT*, *차세대 RES-E 정책 수단*, Geary et al. (2012), 아일랜드 송전망의 HTLS 컨덕터 도입

저압 및 중압 전력망에서 양방향 전력 조류 처리

상당수의 VRE 발전소가 소규모로 중·저압 전력망에 직접 연결된 경우, 2 단계 기간 동안 특정한 일련의 당면과제들이 발생할 것이다.

송전(고압) 네트워크와는 달리 배전망(중·저압)을 능동적으로 관리하는 것은 일반적인 현상이 아니다. 지금까지 배전망은 단순히 송전망에서 전력을 수전하여 이를 소비자에게 수동적으로 분배해 왔다. 배전망에 보다 많은 발전자원이 추가되는 상황에서는 이러한 수동적인 운영이 변화할 수도 있다.

배전망의 일부에서 전력 생산량이 소비량을 초과할 경우, 전기는 일반적인 상황과는 반대로 이동한다; 소비자를 향해 "하향"으로 전송되지 않고, 고압전력망에 배전망의 해당 부문을 연결하는 변전소를 향해 "상향"으로 역송된다(그림 7).

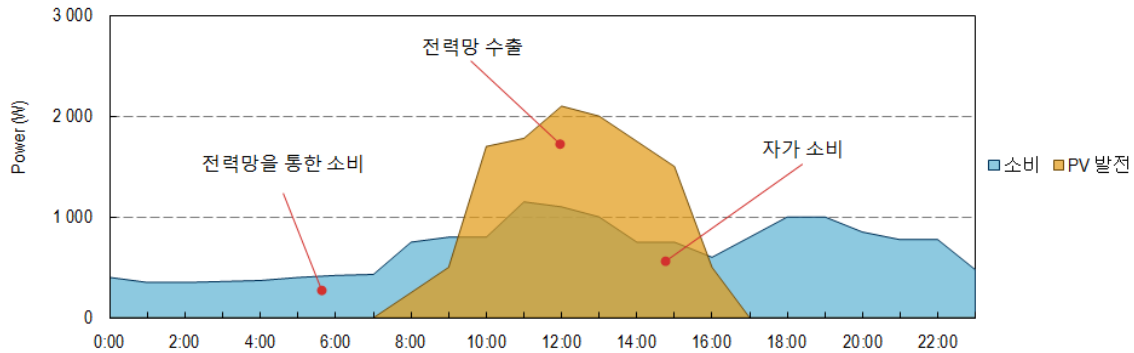
이러한 역방향 조류 흐름은 다양한 시간대에 발생하며 지속적이지 않을 것이다. 다수의 태양광 발전기가 설치된 주거중심지역 배전선로에서는 한 낮에 발생할 수도 있다: 거주자들이 일하러 나갔기 때문에 낮에는 배전망 내부의 전력수요가 낮지만, 지붕의 태양광 발전기들은 최대 생산량을 발전하기 때문이다.

배전망은 배전변전소에서부터 소비자에게 하향으로 전송되는 전력조류를 관리하도록 진화했기 때문에 이러한 역조류(또한 "양방향" 조류)는 매우 중요하다.

그럼에도 불구하고, 비록 많은 개선과 운영상 변화가 필요할 가능성이 높지만, 대부분의 배전망은 실제로 양방향 전력 조류를 물리적으로 관리할 수 있다.

첫 번째 역조류는 시골지역 배전 선로(배전 변전소의 하류부문)에서 화창한 시기에 관측될 가능성이 높지만, 이러한 상황은 태양광 설비용량이 해당 배전망 최대 수요를 여러 차례 초과하는 상황으로 빠르게 변할 수도 있고, 그렇게 되면 과부하가 자주 발생할 수 있다(IEA PVPS, 2014).

그림 7 • 매립형 태양광 발전기의 양방향 전력 조류



요점 • 생산량이 자가 소비를 초과할 경우 전력조류가 거꾸로 흐른다.

VRE 는 계통 친화적인 방식으로 보급되고 있는가?

앞 절에서는 VRE 의 수용도를 높이기 위해 전력계통이 어떻게 적응 할 수 있는 지를 논의하였다. 본 절의 목적은 다음의 질문에 답하기 위한 것이다: 전력계통 내 VRE 수용성을 향상시키기 위해 취할 수 있는 조치는 무엇인가?

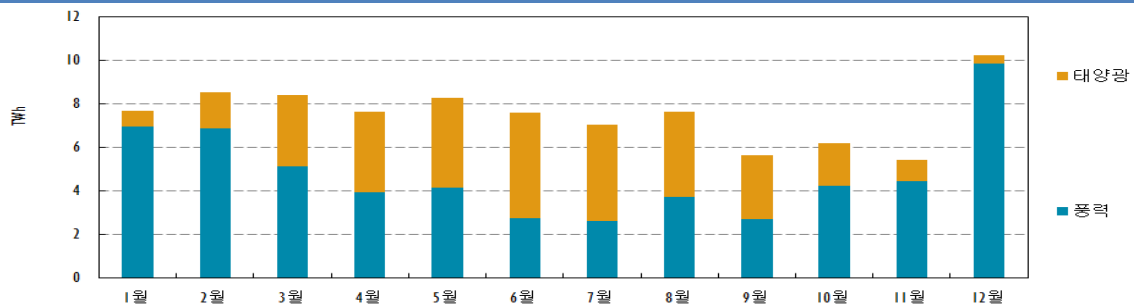
예를 들어, 수요집중지역의 좀 더 가까운 위치에 VRE 발전소를 건설하여 전력망 보강 필요성을 줄일 수도 있다. 그러나, 이로 인해 재생자원 선호도가 낮은 지역에 VRE 입지를 정해야 할 수도 있으며, 이는 발전 비용을 증가시키는 경향이 있다. 최적 전략은 VRE 비용(발전소 위치, 자원 품질 및 기타 필수 인프라에 대한 접속)과 VRE 를 연계하는 비용을 포함하여 국가별 상황에 따라 달라질 것이다. 상쇄효과를 관리하기 위해서는 체계적인 계획수립이 필요하다. 다음 논의에서는 계통 관점에서 VRE 보급을 개선하는 데 사용할 수 있는 수단을 집중 조명한다.

기술 믹스

VRE 를 수용할 수 있는 변전소의 용량을 체계적으로 평가해야 한다는 점은 이미 주목한 바 있다. 태양광과 풍력 발전은 종종 부정적인 상관관계를 가지고 있는데, 이는 전력망에서 평균적으로 태양광과 풍력의 발전시간이 서로 다른 시간대에 발생한다는 것을 말한다. 이는 단순히 풍력과 태양광 발전기의 정격 용량을 합산하면 풍력 발전소와 태양광 발전소의 조합을 받아들이는 데 필요한 수용용량에 대해 매우 비현실적으로 높은 추정치가 나올 수도 있다는 것을 의미한다. 용량이 매우 크고 이용률이 높은 발전소의 경우에는 논리적인 주장이지만, 출력이 기후 조건에 따라 달라지는 VRE 발전소의 경우에는 그럴 가능성이 적다.

풍력 및 태양광 발전소가 동일한 변전소에 연결되는 경우, 해당 접속 용량을 보다 일정하게 사용할 가능성이 높다. 풍력 및 태양광 발전 출력의 보완성 사례는 독일에서 찾을 수 있다(그림 8). 이러한 포트폴리오 효과는 풍력 및 태양광에만 국한되지 않는다: 예를 들어 출력의 상호 보완성은 유역식 수력발전소에도 적용될 수 있다.

그림 8 • 독일의 풍력 및 태양광 월간 발전량, 2014



출처: Fraunhofer ISE (2017)에서 발췌, “2016 년 독일의 월간 발전량”, 에너지 차트, www.energycharts.de/energy.htm.

Page | 47

요점 • 상호 보완적인 풍력과 태양광 출력은 전력망 접속 용량을 보고 효율적으로 사용하도록 지원한다.

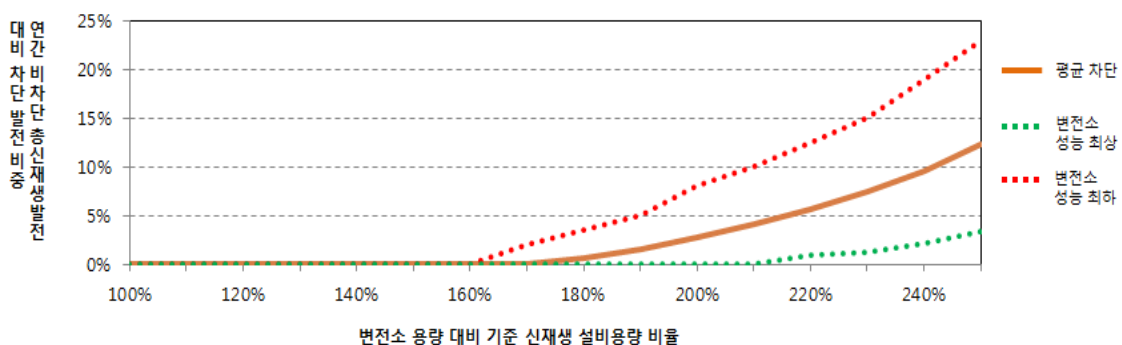
남아공의 최근 분석은 이러한 "기술-분산" 접근방식을 지지하며, 남아공에서는 VRE 발전기의 정격 용량을 단순히 합한 것에 비해 주어진 변전소에서 VRE 용량이 최대 70%까지 추가될 수 있음을 시사한다(Box).

박스 6 • 남아프리카 전력망의 VRE 수용 용량에 대한 모델링 기반 상호보완성 영향 분석

과학 및 산업 연구 위원회(CSIR, The Council for Scientific and Industrial Research)는 상호보완적인 출력 프로파일을 보여주는 풍력 및 태양광 발전 조합이 기존 전력망 인프라의 VRE 수용 용량을 증가시킬 수 있는 정도를 분석했다.

모든 변전소에 걸쳐 필요한 연간 발전 차단에 대한 통계적 분석이 모델링되어 각 변전소 수준에서 수요뿐만 아니라 풍력 및 태양광 발전량을 모의 운영한 결과, VRE 발전기 정격 용량을 단순히 합한 것에 비해, 발전기 차단 전 연계될 수 있는 VRE 조합의 용량이 최대 70%까지 증가한다는 시사점이 도출되었다(그림 9).

그림 9 • VRE 발전비중에 따른 평균 VRE 발전차단 에너지, 변전소 용량 대비 백분율로 산정



출처: CSIR (2016)에서 발췌, W 남아프리카 풍력 및 태양광 자원 총계 연구.

요점 • 6 출력의 상호 보완성으로 인해 풍력과 태양광 용량이 변전소 수용가능 용량보다 60~70% 더 많이 설치될 수 있다.

VRE의 지리적 분산

특정 지역⁶에서 설비 집중을 완화하기 위해 기존 전력망의 공급지역(footprint) 주변에 신규 VRE 설비를 비용 효율적으로 분산 건설하는 것이 가능할 수도 있으며, 이에 따라 전력망 보강이 필요하기 전에 재생에너지 설비용량 증설이 가능해진다.

VRE 발전소의 계획된 지리적 분산("geo-spread")은 종종 VRE 발전소 출력을 평활화시키는 중요한 기회를 제공한다. 즉 변동성을 완화하여 계통운영(수급균형 유지) 측면에서 VRE 추가로 인한 부담을 최소화시키는 기회를 제공해주는 것이다.

이것은 한 국가나 지방의 다른 지역들이 어떤 특정 시점에 서로 다른 날씨 상태를 나타낼 가능성이 높기 때문이다. 이러한 변동성 수준은 지역에 따라 크게 달라진다. 스페인 대서양 연안과 지중해 연안 지역처럼 한 국가 안에서도 하나 이상의 기후대가 존재할 수 있다. 또 다른 나라는 지역별로 다양한 기후 조건을 경험할 수도 있다. VRE 발전소의 계획된 지리적 분산 가치는 박스 7에서 자세히 논의된다.

풍력 발전소를 지리적으로 분산시키는 것의 가치를 확인하였다면, 독자는 지리적 분산으로 인한 혜택을 누리기 위해서는 고도로 분산된 풍력 발전소의 발전량을 수용할 수 있는 효과적인 송전 네트워크가 전반적으로 확보되어 있어야만 한다는 점을 유의해야 한다. 광범위하고 포괄적이며 효과적인 전송 네트워크가 필요하다는 점에서 그렇다. 이러한 송전망이 이미 구축되어 있을 수도 있지만 그렇지 않을 수도 있다. 더욱이, 넓은 산악 지형에 걸친 송전망 분산은 경제성도 없고 기술적으로 가능하지 않을 수도 있다. 이것은 VRE 연계에서 발생하는 많은 상쇄관계(trade-off)의 한 예로서, 이 경우에는 전력망 구축비용과 발전소의 지리적 분산으로 인한 혜택 사이에 상쇄관계가 존재하는 것이다.

박스 7 • 풍력 및 태양광 발전 변동성을 평활화 시키기 위한 수단으로서의 지리적 분산

지리적으로 분산된 VRE 발전소의 총 생산량은 개별 발전기 생산량보다 변동성이 적을 것이다. 예를 들어, 한낮의 구름은 그 아래 있는 태양광 모듈 출력을 최대 출력에서 20-30%로 감소시킨다(태양광은 발전을 위해 직접적인 태양빛이 필요한 것이 아니기 때문에 생산량이 0으로 하락하지는 않을 것이다). 만일 모든 모듈이 동일한 위치에 있으면 태양광 포트폴리오 출력도 동등하게 감소할 것이다. 계통 운영자 관점에서 볼 때 이는 매우 바람직하지 않은 상황이다: 태양광의 출력 손실을 관리하기 위해 대규모 대체 발전설비를 확보해야 하고, 또한 구름이 사라졌을 때 발전기 기동, 정지, 출력 조절을 위한 시간이 매우 짧기 때문이다.

이와는 대조적으로 발전소가 잘 분산되면 그러한 변동은 더욱 완만해지고 더 느려질 것이다. 그림 10은 남아프리카의 풍력(파란색)과 태양광(노란색)의 경우 이러한 사실을 분명히

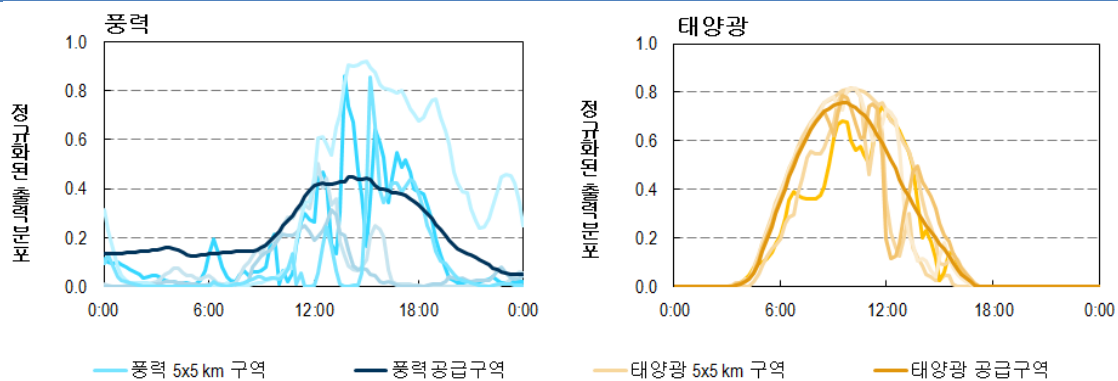
⁶ VRE의 연계를 위해서는 위치를 최적화하는 것 외에도 다른 고려사항이 있을 것이다; 여기에는 경제적 및 실용적 요인이 포함된다: 이 절에서는 연계 관점에서 위치를 고려한다.

보여준다. 전국의 모든 풍력 발전소 전체 출력 프로파일과 비교했을 때, 연한 색상의 곡선은 가로세로 5km 지역단위로 구분한 태양광 및 풍력 발전소 출력이 매우 급격하게 변동하고 있음을 보여준다.

그림 10은 태양광 발전소 출력이 구름 한 점 없는 날에 예상되는 종 모양으로 매끄러워지는 것을 보여준다. 풍력발전의 집성 효과는 바람이 불규칙하기 때문에 덜 극적이다. 따라서 풍력의 전체 출력은 여전히 불규칙하지만(진한 파란색 선) 출력의 최고치는 더 낮아지고, 출력 저점은 상승하였으며, 특히 출력증감발("램프")이 훨씬 부드러워 졌다.

따라서 지리적 분산은 VRE의 갑작스러운 변동에 대응하는 데 필요한 가용 용량(예비력)을 감소시키기 때문에 계통운영자 업무를 훨씬 용이하게 해준다. 태양광의 경우, 발전량 예측은 상당히 단순해진다. 풍력의 경우 예측 오차가 감소하며, 기상 변화를 수용하기 위해 계통에서 다른 발전소를 급전해야 하는 업무가 훨씬 용이해진다.

그림 10 • VRE 출력 및 지리적 분산의 이점



출처: CSIR (2016)에서 발췌, 남아프리카 풍력 및 태양광 자원 종합 연구

요점 • VRE 발전소의 지리적 분산으로 인해 VRE 발전량 수용이 더 용이해진다.

남아프리카 CSIR 최근 연구에 따르면 광범위한 지역에 걸친 VRE 발전소 분산의 중요성이 다시 확인된다. 또한, 전체 풍력발전량 평활화 효과를 극대화하기 위해서는 풍력 발전소를 풍력 자원이 가장 좋은 지역에만 건설하는 대신에 전국적으로 고르게 풍력발전소를 분산시키는 것이 더 나을 수 있다고 이 연구는 제안한다(CSIR, 2016). 이는 풍력 포트폴리오 출력을 극대화하는 것(바람이 가장 강한 곳에만 발전소를 보급함), 따라서 개발사업자 이익을 극대화하는 것과 전체적인 출력을 최대한 평활하게 하여 계통 전체적으로 혜택을 보게 하는 것 사이에는 서로 상충되는 측면이 있다는 것을 시사한다.

전체 출력이 더 평활하다는 것은 풍력 포트폴리오가 최대와 최소 출력 사이 지점에서 발전하는 기간이 더 길어진다는 것을 의미한다. 이는 풍력 발전 지속시간 곡선(wind output

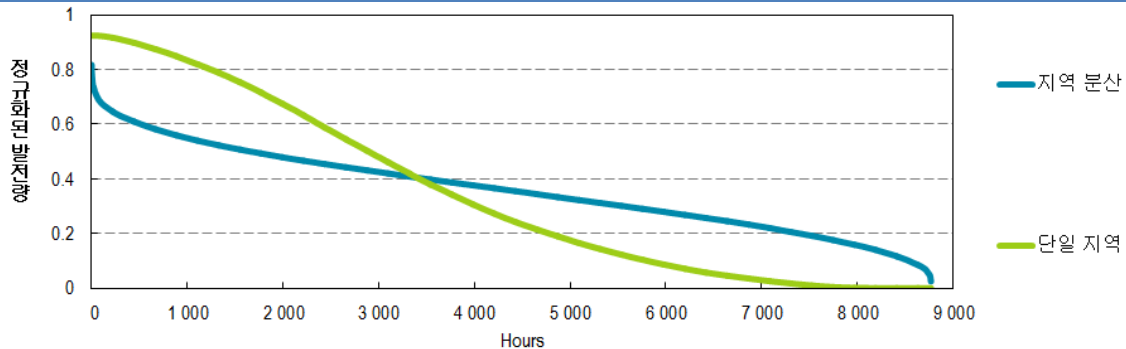
duration curve)⁷(그림 11)에 나타나 있다: 녹색 선은 풍력 포트폴리오가 단일 영역에 위치할 경우 출력을 나타내고, 파란색 선은 풍력 발전소가 광범위하게 분산될 경우 출력을 나타낸다⁸.

한 지역에 풍력발전기가 집중된 경우의 모델링된 발전량은 약 1300 시간 동안(즉, 연간 8760 시간의 약 15%) 정격 출력⁹의 80% 이상이며, 유사한 시간 동안 출력도 0 이다. 이는 단일 위치에서 바람 부는 날과 고요한 날들이 비슷한 빈도로 발생하며, 그 결과 풍력 발전량이 매우 극단적으로 변동한다는 것을 의미한다.

대조적으로, 파란색 선은 합산된 모든 발전소 출력을 나타내며, 출력이 0 이거나 최대인 경우는 존재하지 않지만, 대부분 중간 수준에 위치하고 있다. 총합계 출력이 0 인 경우는 거의 존재하지 않는다. 이는 예외적인 경우를 제외하고는 풍력 포트폴리오의 일부가 언제라도 운용될 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 경우, "용량 가치"가 더 높은 것으로 설명되기도 한다.

주어진 계통에 가장 적합한 분산 비율을 정하기 위해서는, 지리적 평활화에 따른 편익(필요 예비력 감소 및 네트워크 병목 현상 완화)이 지리적으로 자원이 가장 풍부한 지역을 활용하지 않음으로써 발생하는 비용을 초과하는 지 여부를 결정하는 비용 편익 분석이 필요하다.

그림 11 • 풍력 발전소의 지리적 분산은 발전량 평활화로 이어진다, 남아프리카 공화국



출처: CSIR (2016)에서 발췌, *남아프리카 풍력 및 태양광 자원 종합 연구*

요점 • 풍력발전소의 지리적 분산은 풍력발전 출력변동을 보다 계통 친화적으로 만든다.

⁷ 부하지속곡선(LDC, Load Duration Curve)은 다양한 목적으로 사용할 수 있다. 이 경우 평균 연도에 걸쳐 시간대별 풍력 발전기(들)의 출력을 표시한다. 도표의 간격은 시간 순서 대신 출력 크기 순서대로 매겨진다. 이는 발전소가 최대/최소 출력일 때 (시간 단위) 평균연도의 비율뿐만 아니라 최대/최소 사이의 모든 (시간 단위) 출력 비율을 보여주기 위한 것이다.

⁸ 남아프리카의 경우 이러한 지리적 분산을 위해서는 지금보다 송전선로를 더 증설해야 한다는 점에 주의해야 한다.

⁹ 정격출력/정격용량은 한 발전기가 낼 수 있는 최대 발전량이다.

실제로, 가장 좋은 자원이 있는 장소이긴 하지만 수요 집중지역으로부터 멀리 떨어져 있는 위치에 태양광 발전소를 건설하는 것과 합리적 수준의 자원이지만 수요 집중지역에 인접한 위치에 태양광 발전소를 건설하는 것 사이에는 비용 차이가 거의 없을 수도 있다. 남아프리카의 태양광 발전소 입지에 대한 연구가 바로 그런 사례이다(Poeller 등, 2015).

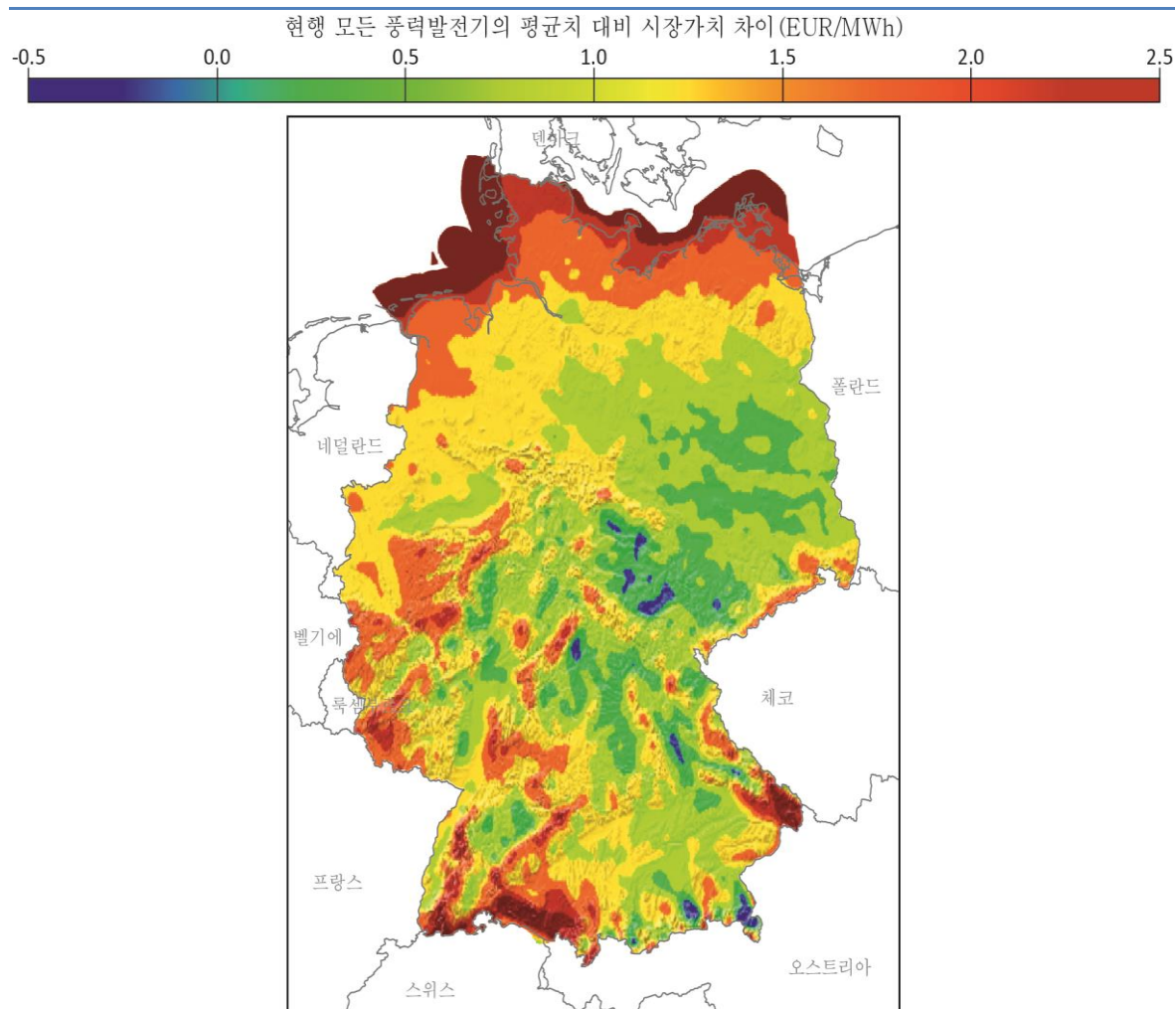
VRE 발전소 위치 관리 메커니즘

위에서 논의한 지리적 분산(geo-spread) 및 기술 분산(technology-spread)의 상당한 편익을 고려하더라도, (2 단계를 포함한) VRE 보급 초기 단계에서는 일반적으로 취약 지역 내 VRE 보급이 가능하도록 망보강에 대한 계획 및 실행과 병행하여 가용한 전력망 용량 내에서 VRE 보급을 조정하는 것에 신중을 기해야 한다.

VRE 보급을 조절하는 데 사용될 수 있는 하나의 수단은 지역별로 구별되는 전력망 이용요금차등화이다. 전력망 이용요금은 발전기가 시장에 전기를 팔기 위해 전력망 소유주에게 지불하는 수수료이다. 수요 집중지역(예: 도시 및 공장)에서 더 멀리 위치한 발전기의 경우 이 요금이 더 높은 경향이 있는데, 이는 더 많은 전력망 투자비용과 원거리 전력망이 요구하는 높은 유지보수 비용을 반영하기 위한 것이다. 전력망이 강한 지역으로 VRE 보급을 유도하기 위해 보다 낮은 전력망 이용요금을 적용할 수도 있다. 다시 말해서, 송전망이 강한 - 즉, 대규모 송전용량에 비해 이용률이 낮은 - 위치에 신규 VRE 발전소를 건설하게 되면 신규 전력망 건설을 회피할 수 있게 될 것이다. 그러나 이렇게 되면 개발사업의 품질이 희생될 수도 있으며(VRE 발전소 위치가 최적 입지에 있지 않아서, 설비 이용률이 최적 수준에 미치지 못함), 기존에 존재하던 이용요금 제도를 변경해야 할 필요가 있을 수 있다.

또한 출력 평활화 관점에서 최적 입지와 다른 중요한 요인들 사이에는 서로 상충관계가 존재할 수도 있다. 그러한 관계 가운데 하나는 (발전차액지원제도에 의한 고정가격이 아닌 시장가격에 노출된다고 가정하면) 풍력발전 소유자가 적용받는 가격이 될 수도 있다. 예를 들어, 독일의 시장 프리미엄 시스템에서는 풍력발전 가치가 가장 높은 지역을 선택한 투자자에게 인센티브를 제공한다. (그림 12). 발전소 가치가 평균 시장 가치보다 높으면 해당 발전기는 추가 이익을 낼 수 있다.

그림 12 • 독일 각 지역 풍력발전 프로젝트의 시장 가치



이 지도는 영토의 지위나 주권에 대한 침해가 없으며, 국제국경과 경계, 그리고 영토, 도시 또는 지역의 명칭에 대한 침해가 없다.

출처: Enervis/anemos (2016)에서 발췌, *시장가치 아틀라스*, www.marketvalueatlas.com

요점 • 전력계통에 대한 풍력의 가치는 위치에 따라 달라진다.

VRE의 지리적 분산 관점에서 보면 비생산적인 과거 장애요인들이 계속 영향을 미칠 수도 있다. 예를 들어, 브라질에서처럼 세금 부담이 적은 지역에 풍력 발전소가 집중되듯, 지역간 조세의 차이가 특정 발전소 집중을 야기할 수도 있다. 추가 조세 혜택이 주어지는 브라질 동부 Rio Grande do Norte 지역도 마찬가지이다.

또한 지역한계가격(LMP, Locational Marginal Price)도 수요 집중지역 인근에 신규 발전소를 유도하는 인센티브를 제공하여 전력망 혼잡을 완화시킬 수 있다. LMP는 혼잡 비용을 고려하여 다양한 위치에서 전력 가치를 반영하는 가격 결정 방법이다.

3 단계: 유연성이 유의미해 진다

본 문서는 VRE 연계 1 단계 및 2 단계에 초점을 맞추고 있다. 3 단계와 관련된 본격적인 논의는 매우 광범위하고 복잡한 과정을 필요로 할 것으로 예상된다.

Page | 53

그럼에도 불구하고 3 단계 보급(및 그 이후)에서의 전력계통운영이 점점 더 보편화되고 있다. 2015 년 풍력발전량과 태양광발전량 합계는 덴마크 51%, 아일랜드 23%, 이베리아 반도 (포르투갈·스페인) 21%였다. 또한 특정 지역은 국가 평균 이상의 수준을 보여준다. 캘리포니아에서 VRE 는 발전량의 14.2%를 차지했는데, 반면 미국 전체에서는 이 수치가 5%를 약간 상회하는 수준이다(IEA, 2016a).

많은 부분에서 유사하기는 하지만, 풍력발전과 태양광발전 간에는 상당한 차이도 존재하고 있음에 유의해야 한다; 3 단계(박스 8)에 진입한 것으로 판단되는 특정 전력계통에서는 이러한 두 발전자원 간 차이가 연간 VRE 발전비중을 결정하는 주요 요인이 될 수 있다.

박스 8 • 풍력 및 태양광 발전: 두 자원 모두 변동성이 있지만 동일하지는 않다

풍력 발전 및 태양광 발전 모두 VRE 기술이다. 그러나 이 기술들은 계통연계와 관련하여 다수의 차이점을 보여주고 있으며, 이 차이들은 표 2 에 요약되어 있다. 보다 자세한 사항은 다음 절에서 기술하고 있다.

풍력 발전 및 태양광 발전량의 변동성과 불확실성은 풍력 및 태양광 에너지 자원의 통계적 특성과 관련이 있다. 일사량은 하늘을 가로지르는 태양의 움직임에 따라 가장 크게 변한다. 낮에만 사용할 수 있으며 위도에 따라 다소 뚜렷한 계절 패턴이 나타난다. 결과적으로, 태양광 변동성의 가장 큰 요소는 정밀한 계산이 가능하다(즉, 결정론적이라고 한다). 그러나 안개, 눈 또는 먼지와 같은 기타 대기 현상과 구름은 태양광 출력에 불규칙한(확률론적) 요소를 부여한다.

태양광은 예측 가능한 아침 및 저녁의 출력증감발율을 고려한 후에도 개별 발전소 차원에서는 태양광 발전이 풍력 발전보다 더 변동성이 높을 가능성이 있다. 그러나 충분히 큰 전력계통 영역에 걸쳐 전체 발전량을 합산하면, 태양광 출력은 매끄러운 "종 모양" 패턴을 따른다. 일단 그러한 패턴에 도달하면, 보다 원거리에 위치한 PV 발전소를 연계선으로 추가 연결해도 패턴이 현저하게 변화하지 않는다. 이는 일조 시간이 대륙적인 규모에서도 비슷하기 때문이다. 예측 오차는 눈이나 안개와 관련된 경우 특히 국지적 수준에서 크게 발생할 수 있다.

바람은 종종 날마다 반복되는 경향을 보이지만, 그 범위는 계절과 위치에 따라 다를 수 있다. 연중 바람이 강한 계절은 전 세계 여러 지역에서 동일하다. 넓은 지역에 걸쳐 합산된 풍력 발전량은 강력한 평활화 효과를 보여준다. 예측 오차는 발전 시점과 발전 출력의 형태로 인해 발생할 수 있다. 예를 들어, 예측은 정확하지만 발전 시점이 30 분 "늦을" 수도

있으며, 또한 전체 발전 출력의 형태와 다르게 발전할 수도 있다.

태양광은 많은 국가에서 전력수요와 바람직한 상관관계를 보여준다. 풍력 발전은 전력수요와 상관관계가 약하다; 위치 - 즉 육상 (많은 지역에서 밤에 더 커짐) 또는 해상 (대개 낮에는 더 커짐) - 에 따라 부합하거나 또는 반대되는 상관관계가 될 수 있다.

합산된 태양광 발전은 매일 아침과 저녁마다 급격한 출력증감발을 보여준다. 대기 요인에 따라 이에 대한 예측이 가능하다. 넓은 지역을 연계할 때 출력증감발이 다소 줄어들 수는 있지만, 출력이 수백 킬로미터에 걸쳐 연계되어도 상당한 수준으로 출력변화가 발생할 것이다. 대규모 계통 수준에서, 빠르게 움직이는 구름에서 발생하는 변동성은 일반적으로 중요하지 않다. 합산된 풍력 발전의 출력증감발 급변현상은 빈도수는 적지만 예측하기가 더 어렵다.

풍력발전과 태양광발전은 설치 단위 측면에서도 다르다. 대부분의 신규 풍력 발전 용량은 육상에서는 1MW 에서 3MW 의 풍력 터빈과 해상에서는 4MW 에서 6MW 의 풍력 터빈을 사용하여 보급된다. 이는 불과 몇 kW 에 불과한(지붕 태양광 시스템의 경우) 대부분 태양광 발전 설비 규모보다 크다. 따라서 태양광 발전소는 종종 저압 배전망에 연결되는 반면, 풍력 발전기는 배전망 이상의 수준에서 연결된다, 종종 규모가 큰 태양광 발전 시스템도 중압 이상의 전력망에 연결된다. 또한 풍력 발전소는 송전망과 연계하여 많은 수의 터빈을 한 데 모아 수백 메가와트급 대형 발전소로 만들 수도 있다.

두 기술은 서로 다른 물리적 효과를 활용하여 전기를 생산한다. 풍력터빈은 발전기를 이용하여 풍력 운동 에너지를 기계적으로 전기로 변환한다. 따라서 동적(moving) 장치와 기계적 관성이 있다. 이 부분이 풍력터빈을 태양광보다 전통적인 발전기와 약간 더 유사하게 만드는 것이다. 태양광 발전소는 직접적인 물리적 효과를 통해 태양빛을 전기로 전환하며 움직이는 부품이 없다. 따라서 태양광 발전소는 관성이 없다.

마지막으로, 풍력 발전은 전형적으로 태양광 보다 설비이용률이 더 높다. 설비이용률은 설치위치와 기술에 따라 편차가 크지만, 일반적으로 풍력 발전소 설비이용률이 태양광 발전소의 약 두 배이다. 설비이용률이 높기 때문에 풍력(연간 비중)이 태양광보다 더 높은 보급률에 더 빠르게 도달하는 경향이 있다.

또한 두 기술의 차이는 적절한 계통 연계 전략에 영향을 미칠 것이다. 예를 들어, 풍력 연계의 주요 과제는 종종 예상치 못한 바람의 실종이다; 만일 수요가 증가할 때 이러한 현상이 발생할 경우 순 부하에서 매우 가파른 출력증감발이 발생할 수 있다. 반대로, 태양광의 경우, (예측 가능한) 발전량 감소와 그에 상응하는 순 부하 출력증감발에 대처하는 것은 많은 전력계통에서 일상적인 일이 될 것이다.

수용 전략 측면에서, 바람과 태양은 다시 유의미한 차이를 보여준다. 매우 일반적으로 본다면, 전략적인 풍력 용량의 지리적 분산은 비용효과적으로 두 자리수의 연간 발전비중을 달성하기 위한 효과적인 수단이 될 수 있다; 반면, 태양광은 (수요반응 및 저장장치를 통해) 발전시점과

수요 발생시점을 조정하는 접근방식을 통해 가장 큰 편익을 얻을 것이다.

출처: Mills, A. 및 R. Wiser(2014 년), 보급 증가에 따른 변동발전의 경제적 가치 하락 완화를 위한 전략; Mills, A. A. 및 R. Wiser(2010), 태양광의 단기 변동성에 대해 광역의 지리적 다양성이 미치는 영향 분석; Ibanez, E 등(2012), 1 시간 미만의 변동성 분석에 기초한 재생에너지 연계 시의 태양광 예비력 방법론 연구

표 2 • 풍력 및 태양광 발전간 차이점 개요

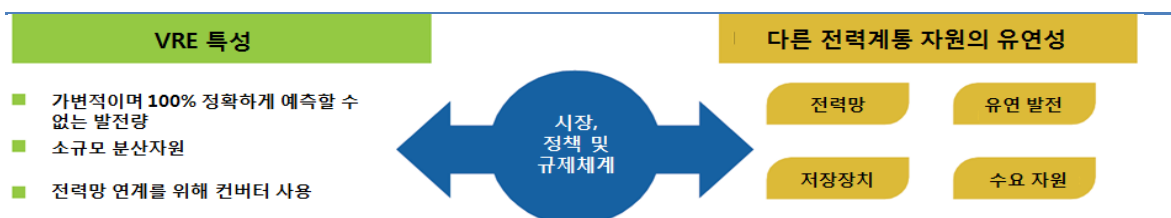
	풍력	태양광
발전소 수준의 변동성	종종 2 주~2 개월 단위(sub-seasonal)에서 무작위인 경우가 있음; 지역상황에 따라 패턴 산출 가능	규칙적인 행성운동(일, 계절)에 확률요인(구름, 안개, 눈 등)이 부가됨
합산 시 변동성	일반적으로 지리적 평활화 편익이 매우 큼	일단 "종 모양"에 도달하면, 편익이 제한됨
합산시 불확실성	발전의 형태 및 시점을 알 수 없음	출력모양은 알 수 있으나 확대비율은 알 수 없음
출력증감발	자원에 따라 다름. 일반적으로 극단적인 사례가 거의 없음	빈번하고, 대체로 결정론적이며, 반복적이고, 변화가 가파름
모듈성	커뮤니티 규모 이상	일반 가정집 이상
기술	비동기 및 기계공학	비동기 및 전자공학
설비비용률	일반적으로 20%~40%	일반적으로 10% ~ 25%

요점 • 풍력 발전 및 태양광은 기본적인 특성을 공유하지만 중요한 차이를 보인다.

많은 경우, 이러한 VRE 비중은 대규모 추가 자본 투자가 아닌 기존 전력계통 자산의 운영을 향상시킴으로써 달성되었다. 전력계통 운영 개선은 VRE 필요성과 관계없이 유용하지만 VRE 보급률이 높을수록 장점이 더 커진다. 그러나 일정 시점 이후에는 안정적이고 비용 효율적으로 더 높은 VRE 비중에 도달하기 위한 추가 조치가 필요하다(IEA, 2014, 2016a).

정책, 시장 및 규제 프레임워크는 VRE 특성과 전력계통의 유연성의 상호작용 방식에 중요한 영향을 미친다. 이러한 프레임워크는 전력계통이 실제로 작동하는 방식을 결정하며, 따라서 실질적으로 달성가능하면서 경제적으로도 매력적인 전력계통운영이 기술적으로 가능한지 여부를 결정한다(그림 13).

그림 13 • 전력계통 유연성을 활용한 VRE 유형 유지



요점 • VRE 연계 과제는 VRE 속성, 전체 전력계통의 유연성, 정책, 시장 및 규제 프레임워크 사이의 상호작용에 의해 형성된다. 규제 프레임워크는 이러한 상호작용을 규율한다.

3 단계에서 VRE 연계를 달성하기 위한 조치와 관련된 본격적인 논의는 본 매뉴얼의 범위를 벗어난다. 그러나 그 논의의 실질적 중요성을 고려할 때, 한 가지 특정한 측면이 포함된다. 이 측면은 전통적인 발전소에서 파생된 유연성이다. 이는 4 가지 유연성 옵션 중 하나에 불과하다. 다른 세 가지는 전력망 인프라(다른 계통과의 연결 포함), 수요 측면 옵션 및 저장장치이다. 발전소 유연성에 초점을 맞추는 이유는 VRE 보급 초기에 모든 전력계통이 이 전통적인 발전소 유연성 자원에 대해 이미 파악하고 있을 것이기 때문이다.

유연성이란 무엇이며 왜 중요한가?

발전소 그리고 저장장치와 같은 전력 자원의 *유연성*은 급전시 발전소 및 저장장치가 전력수요와 VRE 전력공급의 균형을 맞추는데 “적합한” 발전을 하는 경우 해당 자원의 응답 속도와 발전가능 범위로 파악될 수 있다. 즉, 순 수요를 안정적으로 충족시켜주는 것이다. 매우 유연한 발전소가 포함된 전력 계통은 변동성과 불확실성에 보다 용이하게 대응할 수 있으며, 따라서 VRE 발전소를 더 많이 수용할 수 있다.

발전소 유연성은 발전소 설계에 따라, 그리고 어느 정도 연료 특성에 따라 매우 다를 수 있다. 유연성을 결정함에 있어 다음과 같은 3 가지 요인이 중요하게 작용한다.

- 발전 출력의 조정 가능성: 최소출력(lower bound)은 발전소가 안정적으로 작동할 수 있는 최소 출력수준이다.
- 증·감발률: 발전소가 출력을 증가시키거나 감소시킬 수 있는 속도(시간 경과에 따른 MW).
- 발전기 투입시간: 발전소 운영자가 발전기를 기동하고 발전을 시작하는 데 필요한 시간.

석탄 발전소와 같은 증기 발전소는 복합가스터빈(CCGT, combined cycle gas turbines), 단독운전가스터빈(OCGT, open cycle gas turbines) 및 내연기관(reciprocating engines)에 비해 기동준비시간이 길다. 그러나 일단 가동되면 증기 발전기는 종종 출력을 상당히 빠르게 증가시킬 수 있고 동시에 일부 CCGT 발전기에 비해 출력 수준을 매우 낮게 가져갈 수 있다. 반면, OCGT 및 내연기관은 발전기 투입시간이 짧고 대부분 출력 범위가 넓은 편이다. 저수식 수력 발전소는 유연성이 매우 뛰어나고, 일반적으로 기동준비시간이 짧으며, 출력증감발 능력도 높다.

중앙급전발전기가 예상된 것보다 더 많이 기동정지 등 주기적 운전(cycling)을 반복하게 되면 부품의 마모와 파손이 더 많이 발생할 수 있다. 예를 들어, “기저 부하(baseload)” 용도로 24 시간 가동하도록 설계된 발전소를 자주 기동하고 정지하는 경우, 마모 증가는 상당히 클 수 있다. 또한 연료가 전기로 전환되는 효율도 하락할 가능성이 높으며, 이는 연료가 보다

많이 소비됨으로써 발전 비용이 더 많이 증가한다는 것을 의미한다. 이러한 비용 압박은 (적절한 보상을 받지 못한 경우) 해당 발전소 사업성을 훼손할 수 있다. 그러나 계통측면에서 보면, 중앙급전발전기의 기동정지 증가로 인해 발생하는 전체적인 비용 영향은 매우 작을 수 있다.

Page | 57

Western Wind and Solar Integration 연구(2 단계)는 미국 서부 지역에서 연간 33%의 보급률을 나타낸 다양한 VRE 포트폴리오의 운영 영향을 탄소배출 측면에서 조사하였다. 연구된 발전소 포트폴리오에는 많은 석탄 발전소들이 포함되어 있었다. 해당 연구는 부분 출력으로 운영되는 석탄발전소 CO₂ 배출량 패널티가 총 CO₂ 배출량의 1% 이하를 차지한다는 것을 보여주고 있다; 기동시 CO₂ 패널티는 더욱 미미해서 0.1% 수준에 불과했다.

동일한 연구에서 화석연료 발전의 MWh 당 운전변화 비용이 비(非) VRE 시나리오 시 MWh 당 미화 0.47 달러, 높은 VRE 시나리오 시 미화 1.28 달러로 상승하는 것으로 밝혀졌다. (시나리오에 따라 33% VRE, 풍력과 태양광은 8%에서 25%). VRE 발전의 MWh 당 운전변화 비용은, 높은 VRE 시나리오의 경우, 미화 0.14 달러/MWh 에서 미화 USD 0.67 달러/MWh 로 증가하였다(NREL, 2013).

위의 연구는 상당수의 유연하지 못한 노후 발전소가 있는 전력계통을 조사했다는 점을 유념해야 한다. 새로운 CCGT 발전소와 최신 설계의 기저부하 발전소는 부분 부하 운전 효율성에 미치는 영향이 더 낮음을 알 수 있다(IEA, 2014).

또한 발전기 운전방식을 변경하거나(예: 기동과 정지 사이에 발전기를 핫(hot) 상태로 유지) 혹은 기저부하 발전기 설계를 주기적 운전에 보다 적합하도록 변경하는 유지보수나 자본투자를 통해 주기적 운전비용을 절감할 수 있다(NREL, 2012). 그러한 설비개보수는 북미 지역에서 기록된 사례에 따르면 유연하지 못한 원자력 발전소를 수용하는데 비용 효율적인 조치였다(Cochran 등 2013).

화력발전소 유연성 결정

많은 문제들이 기존 발전기들의 유연성 잠재력에 대한 분석을 복잡하게 만들 수 있다. 구형 발전기의 기술 사양을 구하는 것이 어려울 수도 있다. 특히 구형 발전기의 경우 위에서 확인한 유연성 기준에 대한 정확한 지식이 거의 없을 수 있다. 아마도 40 년 전 발전기 시운전 시험 결과는 현재 해당 발전기의 능력에 대해 거의 아무런 정보를 주지 못할 것이다. 그리고 예전 발전기 운전원들이 수집한 경험을 바탕으로, 구형 발전기를 운전하는 것도 드문 일이 아니다. 마치 발전기 한계치를 테스트하는 것처럼 보이는 특정한 사례가 그런 경우이다. 발전기 능력에 대한 확실성 부족은 운영자가 발전기 능력을 과소평가하는 계기가 될 수 있고, 특히 운영자 입장에서 과소평가가 이익이라면 더욱 그렇다.

따라서 기존 발전소 포트폴리오의 실제 유연성을 확인하는 유일한 방법은 발전기 별로 모두 시험하는 것이다. 하와이의 데이터 수집 절차가 하나의 예이다(박스 9).

발전소 운영자는 두 가지 서로 다른 최소 출력수준을 고려할 수 있다는 점을 지적할 필요가 있다: 하나는 비상상황에 대비한 기술적 최소 출력이며, 다른 하나는 일간 운전에서의 경제적 최소출력이다. VRE 연계 관점에서는 경제성 측면의 최소 발전수준을 낮추는 것이 특히 관련이 있을 것이다.

또한 다양한 비기술적 요인들이 발전소 유연성을 제한할 수 있다. 예를 들어 유지보수 계약은 기동정지가 빈번한 발전소에 높은 비용을 초래할 수 있다. 다른 경우 계약상 의무로 인해 기술적으로 유연한 발전소를 매우 경직되게 운영해야 할 수도 있다.

박스 9 • 하와이전력회사(HECO)의 기존 발전소 자산 관리

태양광 발전소 증가에 직면하여, 하와이 군도의 수직통합 전력회사인 하와이 전력(HECO, Hawaii Electric Company)은 보유 중인 발전기의 운영기준을 확립하기 위하여 30 년에서 60 년 된 가스, 석유 및 증기 발전기 포트폴리오에 대한 종합적인 현황 조사를 시행하였다.

발전기들은 종류와 크기가 매우 다양했다. 경우에 따라서는 특정 출력증감발 조건 하에서 발전기의 연소실(firebox) 내부의 화염안정성(flame stability)이 감소하는 것과 같은 기술적 제약도 있었다. 다른 경우에는 발전기 관리 방법과 관련이 있었다. 예를 들어, 많은 수의 디젤 발전기들이 동일한 기동 배터리를 공유했다; 기동시 마다 빼서 옮겨야 했는데 약 20 분의 시간이 필요했다.

일단 발전기 목록이 완성되자, 특정 발전기의 유연성을 높이기 위한 명확한 조치와 비용을 확인할 수 있었다. 전하는 바에 따르면 이 과정은 매우 성공적이어서 출력증감발 능력이 5 배나 증가하는 성과가 있었다고 한다.

유연성 발굴 및 지원

화력 발전소의 효과적인 운영을 측정하는 핵심 성과 지표(KPI)가 무심코 유연성을 제한할 수 있다. 이러한 현상은 남아프리카에서 관찰되었다. 예를 들어, 많은 발전소에서 발전소 운영자가 진술한 것보다 출력을 더 낮게 안정적으로 운전하는 것이 가능한 것을 볼 수 있었다; 이는 KPI 중 하나가 해당 발전소가 고장정지 되지 않는다는 것이었기 때문에, 발전소 운영자가 지나치게 조심한 나머지 최소운전 수준을 높게 가져갔던 것이다. 따라서 유연성 특성(예: 제공되는 최대 출력증감발률, 최소 기동시간 등)을 반영하도록 KPI 를 조정하는 것이 바람직할 수 있다.

만약 발전소 소유주의 노력이 전출력 운전시간을 감소시키고, 전력가격을 낮게 만들며¹⁰, 설비 마모와 손상 증가로 귀결된다면, 이들은 자기 발전소 출력 유연성 확보에 그다지 적극적이지 않을 것이다(박스 10).

그러나 만일 유연성을 제공하기 위한 인센티브가 비용을 초과하도록 정책 당국자들이 신경을 쓴다면, 문제 가능성이 줄어들 수 있다. 이는 전력 시장 설계에 중대한 변화가 필요한 일일 수 있으며, 일부 OECD 시장에서 관찰되고 있다. 예를 들어 영국에서는 용량 시장이 개설되어 겨울철에 발전소가 가장 필요할 때 가동할 수 있는 *가용성*에 기초하여 발전소를 보상한다. 이 용량시장을 통해 벌어들인 수익은 도매(에너지) 시장에서의 매출 감소를 보완하는데 사용된다.

어떤 경우에는, 잠재적으로 유연한 발전소들이 그들이 생산한 전기 가격이 0¹¹이라고 하더라도 발전할 인센티브가 존재한다. 예를 들어 중국에서는 특정 월(月)에 발전한 MWh 에 비례하여 2 차 보상을 받는다. 이는 실제로 24 시간 내내 발전하라는 인센티브이며, 이러한 의도하지 않은 결과로 인해 계통의 VRE 수용능력이 감소될 수도 있다(IEA, 2016a).

박스 10 • 아일랜드의 최소 출력 수준

아일랜드 계통 운영자는 특정 계통운영 서비스(이 경우 무효 전력)를 제공하기 위해 최소 8 개 대형 화력 발전기를 야간에 운전하였다. 이러한 조치로 인한 부작용은 심야 시간대의 낮은 수요로 인해 해당 시간대에 계통이 수용할 수 있는 풍력발전량에 상한제약이 발생한다는 것이다.

최근, 아일랜드 계통운영자는 풍력발전기 추가 수용을 위해 이 발전기 중 일부가 야간 시간대에 정지할 수도 있다는 점을 분명히 밝혔다. "상시 운전해야하는" 상태를 유지하는 발전기는 안정적인 최소운전 수준을 가진 발전기가 되어야 하는 것으로 이해되었다. 전하는 바에 따르면 계통운영자는 최소운전 수준이 이전에 파악된 것보다 훨씬 낮았고, 게다가 더 낮은 출력으로 운전할 수 있는 이들 발전기 성능에 대해 유지보수 계약업체들이 더 이상 우려하지 않는다는 것을 알게 되었다고 한다.

¹⁰ 풍력과 태양광 발전소는 단기 한계비용이 매우 낮으며, 경제급전 순서에서 연료 기반(더 비싼) 화력 발전소보다 더 우선순위에 있는 경향이 있다. 경제급전 효과에 대한 설명은 IEA(2014 년)를 보면 된다.

¹¹ 원자력 발전소와 같은 유연성이 떨어지는 발전소는 도매가격이 영(0)으로 떨어질 때 지속적으로 발전할 수 있지만, 이는 주기적 운전(cycling)과 관련된 비용을 피하기 위한 것이다.

결론 및 권고사항

VRE 보급 1 단계에 대한 권고 사항

Page | 60

계통 연계를 점진적인 프로세스로 처리

- 전력계통 내 VRE 가 증가함에 따라, 계통연계 문제 또한 점진적으로 발생한다. 결과적으로, 계통의 VRE 수용능력 또한 점진적으로 강화하는 것이 바람직하다. 일반적으로 최초의 VRE 발전소는 계통에 거의 아무런 영향 없이 연계될 수 있다.

올바른 문제에 집중

- VRE 연계에 대한 논의는 오해, 왜곡된 기대와 때로는 잘못된 정보(가설)로 가득 차 있다. 의사결정자들이 이러한 잘못된 주장들에 현혹되면, 실제 문제들에 대한 관심이 소홀해질 수 있다(물론 이 문제들은 궁극적으로 관리가 가능하다); 만일 잘못된 문제들이 제대로 밝혀지지 않는다면, 이런 잘못된 주장들이 VRE 보급에 큰 장애가 될 수 있다.

전력망 접속 용량의 투명하고 건전한 기술 평가 보장

- 기술적으로 유능하고 중립적인 기관에 전력망 연계의 기술적 타당성을 평가할 책임을 부여한다. 임의적인 상한(caps) 적용 또는 전통적인 발전소를 대상으로 하는 접근법 적용은 피해야 한다.
- 1 단계에서는 가능성이 매우 낮지만, 특정 지역에 대한 국지적인 전력망 보강이 필요할 수 있다. 전력망 보강에 앞서 최대한 신규선로 건설을 회피할 수 있는 대안을 검토해야 한다. 예를 들어 전력망에 대한 영향을 최소화하는 방식으로 VRE 발전소 환경을 설정하는 것이 그것이다.
- 개발사업자들 간 비용 부담 및 개발사업자, 소비자 및 납세자로부터 회수할 수 있는 재정지원을 포함한 비용 배분 대안을 평가한다.

최신 국제 산업표준이 VRE 보급 초기부터 전력망 접속 기술요건에 대한 기초를 제공

- 계통운영자가 최초의 VRE 발전소 연계를 위한 기술적 요구조건을 확인할 때, 최신 산업표준 및 해외사례를 참조함으로써, 불필요한 업무수행 가능성을 회피해야 한다. 단, 국제표준은 지역 특성에 맞게 수정되어야 한다.

- 계통운영자는 VRE 보급 수준이 낮은 상황에 적합한 기술적 요구조건부터 검토해야 한다. 이는 운전범위, 전력품질, 가시성 확보 및 대규모 발전기의 제어가능성을 포함한다. 또한 기술적 요구조건은 VRE 보급의 확대 수준에 맞춰 조정되어야 한다.

2 단계에 대한 권고 사항

적절한 전력망 접속 규칙이 준비되어 있도록 보장

VRE에 적용되는 전력망 운영규칙의 개발을 위한 적절한 프로세스를 설정해야 한다

- 계통운영자는 정책 당국자 및 규제담당자와 협력하여 VRE 발전기 접속을 위해 새로운 전력망 운영규칙이 필요한지, 또는 기존 전력망 운영규칙을 수정해야 하는지 여부를 결정해야 한다.
- 계통운영자는 관련 전력계통 데이터를 수집하고, 전력망 운영규칙에 포함되어야 할 기술적 요건을 설정하는 데 사용할 적절한 모델링 도구를 확인해야 한다. 정책당국자는 혹시 있을지도 모를 이해 상충을 세심하게 검토해야 한다.
- 이 프로세스는 모든 이해관계자, 특히 프로젝트 개발사업자, 제조업체 및 기존 발전소 소유자/운영자와 협의하여 투명하게 진행해야 한다.

최첨단 국제 산업표준이 전력망 운영규칙에 대한 기초를 제공한다

- 계통운영자는 계통운영기준 내 기술적 요구조건을 확인함에 있어, 최신 산업표준 및 해외사례를 참조함으로써, 불필요한 업무수행 가능성을 회피해야 한다. 단, 국제표준은 지역 특성에 맞게 수정되어야 한다.
- 계통운영자는 보다 높은 VRE 보급 수준에 적합한 계통운영기준을 참조해야 한다. 이는 이미 다른 지역에 대규모로 보급된 풍력터빈과 PV 기술이 적용가능한지와 비용절감에 기여할 수 있는지를 결정할 수 있도록 한다.

다른 전력계통의 교훈은 전력망 운영규칙의 개발과 시행에 중요하다

- 업계 이해 관계자와 계통운영자는 다른 전력계통의 동향, 특히 대규모로 VRE 보급이 달성된 전력계통에서의 경험 사례를 검토함으로써, 자신의 운영기준에 이러한 결과가 반영될 수 있도록 해야 한다.

전력망 운영규칙은 지속적으로 평가되고 적절성을 보장하기 위해 수정되어야 한다

- 계통운영자는 계통운영기준을 지속적으로 검토함으로써, VRE 보급 확대에 맞춰 전력계통이 진화할 수 있도록 해야 하며, 운영 경험을 바탕으로 필요한 계통운영기준의 개정작업을 수행할 수 있도록 해야 한다.
- 규칙 이행과 관련된 이해관계자의 피드백을 위한 채널이 구축되어야 한다.
- 계통운영자는 운영규칙 개발 및 시행의 다양한 단계에서 전력망 운영규칙 준수를 검증하기 위한 프로세스를 확립하고 자원을 확보하며, 강력하게 규칙 준수를 장려해야 한다.

발전소 운전 시 VRE 반영

계통운영자에게 제공되는 발전소 가시성

- 기존 발전소와 VRE 발전소에 대한 충분한 수준의 정적 및 실시간 데이터 전송이 필요하다.
- 방대한 양의 데이터 및 관련 비용을 관리를 위해 소규모 분산형 발전소(예를 들면, 지붕형 태양광) 발전량 추정 시 통계적 기법을 활용한다.
- 전력계통 분석을 활성화하기 위해 공공 부문과 데이터 공유를 고려한다.

VRE 발전예측 활용

- 발전소 운영계획 및 기타 운영상 의사결정을 효과적으로 지원하기 위해, 최첨단 중앙집중형 예측 시스템을 구축해야 한다.
- 가능한 경우, 예측 정확도 제고를 위해 개별 VRE 발전소로부터 발전소 단위의 예측 데이터를 요구한다.

운영예비력 관리 및 발전소 운영계획 수립

- 효율적으로 변동성에 대응하기 위해, 물리적인 전력공급 시점(실시간) 이전에 수립되는 전력계통 운영계획은 가능한 실시간에 가깝게 실행되어야 한다. 특히, 운영계획 수립주기 및 급전주기는 더욱 단축되어야 한다.
- 도매전력시장이 운영되는 지역에서는, 당일 전력거래를 포함하여 실시간에 가까운 전력거래가 가능해야 한다.

- 계통운영보조서비스 요구량 산정을 위한 현행 절차는 대부분 적합하지 않다. 단기 VRE 발전예측을 바탕으로 계통운영보조서비스를 정의하는 것은 운전예비력과 같은 계통서비스 요구량을 산정하고 그 활용을 최적화하는데 도움이 될 수 있다.

시장 운영 개선

Page | 63

도매전력시장이 개방된 지역에서는 VRE 보급 확대에 따라 정확한 가격을 제공할 수 있도록 전력거래 제도를 개선할 필요가 있다.

- 변동성 관리: 가격신호 발생주기 단축 즉, 단기 가격신호 제공의 중요성 고조; 가격변동성 허용수준 확대
- 불확실성 관리: 단기 가격신호 즉, 현재 수급균형 상황을 반영하여 실시간에 가깝게 산출된 가격의 중요성 증대
- 위치 제약 및 모듈성 관리: 가격신호의 지리적 세분화 즉, 지역에 따른 전력가격 차이의 중요성 증대

실시간 및 실시간에 근접하여 발전소 관제

- 계통운영자는 계통 신뢰도를 보장하기 위해 충분한 규모의 기존 발전 설비를 직접 제어할 수 있어야 한다. 이 때문에 관제 센터를 점진적으로 개선해야 할 필요가 있다.
- VRE 설비에 대한 충분한 제어가능성도 필요하다. 이는 직접적인 필요는 없으며, 발전소 운영자가 계통운영자의 명령 신호에 반응할 수 있으면 충분하다.

VRE 수용을 위한 충분한 전력망 용량 보장

VRE 보급에 따른 신규 송전선로 건설 동기화

- VRE 보급이 확대됨에 따라, 발전소 연계를 위한 송전망 신규 투자가 필요할 수도 있다. 송전망 건설이 지체되는 경우에는 VRE 및 송전망 건설 시점의 동기화 방법 및 VRE 운영 관리 방법에 대해 고려해야 한다.

기존 전력망 인프라의 최적 사용

- 혼잡 현상이 발생하는 경우, 전력망 운영자는 신규 선로 건설에 앞서 저비용으로 혼잡을 관리할 수 있는 방안을 우선 모색해야 한다.

저압 및 중압 전력망에서 양방향 전력 조류 처리

- 소규모 VRE 용량이 지리적으로 밀집된 계통에서는 중·저압망에서 송전망으로의 "상향" 조류를 안전하게 관리할 수 있도록 해야 한다. 이는 일반적으로 기존 설비로도 가능하지만, 일부 조정이 필요할 수도 있다.

Page | 64

향후 계획 수립

- 이 단계의 VRE 연계에서는 전력망 계획에 대한 체계적인 접근방법이 개발·구현되어야 한다. 수요지역에 가깝게 VRE 발전소를 건설하는 것과 (아마도 원거리에 위치한) 최상의 VRE 자원을 활용하는 것 사이의 상쇄관계를 관리하는 것도 여기에 포함된다.

VRE 가 전력계통에 미치는 영향 최소화

기술믹스

- 에너지 계획수립 담당자는 풍력, 태양광 및 유역식 수력발전의 포트폴리오와 같이 발전출력을 상호 보완할 수 있는 기술 보급에 대해 고려해야 한다.

VRE 의 지리적 분산

- 계통운영 측면에서는 VRE 발전소를 광범위하게 분산하여 설치함으로써 얻을 수 있는 편익을 고려해야 하지만, 기존 전력망 용량을 활용하여 즉시 최적화 할 수 있는 기회에 대해서도 검토해야 한다.
- 특정 지역에서 VRE 보급에 대한 기존 인센티브/저해요인(disincentive)을 이해하려고 노력해야 한다. 이러한 인센티브/저해요인은 의도하지 않게 VRE 발전소의 집중(핫스팟)을 초래할 수도 있다.
- 위치에 따라 전력망 이용요금을 차등하여 부과하는 것은 VRE 발전소의 지리적 분산을 유인하는 수단으로 사용될 수 있다; 또한 전력시장은 전력가격이 높은 시간대에 발전할 수 있도록 하는 것과 같은 또 다른 유인을 제공할 수도 있다.

부록 1: VRE 개발 사업자들에게 정보 제공

VRE 보급 출발점에서 자문(自問)해야 할 첫 번째 질문은 "VRE 가 어디에 보급될 예정입니까?"와 "프로젝트 개발사업자가 입지 데이터를 사용할 수 있습니까?"이다. 이러한 데이터에는 가용 자원, 전력수요 및 공급, 기술 비용 및 기존 전력 인프라가 포함된다. 정보공개 및 공개 데이터는 VRE 보급을 촉진시키는 데 매우 중요하다.

Page | 65

어떤 정보가 필요한가?

VRE 프로젝트에서 위치를 결정할 때 프로젝트 개발사업자에게 중요한 것으로 간주되는 정보와 데이터는 일반적으로 다음과 같다.

- **입지:** VRE 프로젝트 개발사업자는 PPA 전체 기간 동안 VRE 발전소 건설 및 운영을 위해 반드시 입지에 접근할 수 있어야 한다. 또한 입지는 좋은 자원 및 전력망 접속과 함께 반드시 공개적으로 용인될 수 있는 곳이어야 한다. 관련 정보에는 예를 들어 토지 소유권과 보호 구역이 포함된다.
- **재생에너지 자원:** 재생에너지 자원은 VRE 프로젝트의 성공 가능성 측면에서 매우 필수적인 것이다. 발전 출력량의 정확한 시뮬레이션을 위해 자원의 특성을 적절히 이해해야 한다. 2 년 또는 그 이상 기간에 걸쳐 시간대별 및 분단위(sub-hourly) 데이터가 필요할 수도 있다.
- **전력망 인프라:** 이 문제는 주로 기존 전력망을 사용하여 접속할 경우 접속용량에 대한 문제이다. 이 정보를 통해 기존 송전선로 및 변전소와 해당 계통의 제약현황과 병목현상을 포함하여 전력망의 현재 상태를 정확하게 파악할 수 있다. 또한, 이미 건설 중이거나 사실상 확정된(committed) 송전선로 프로젝트에 관한 정보도 필요하다.
- **전력 공급 및 수요:** 다양한 위치(또는 지역)와 특정 지역에 대한 전력수요 동향 정보는 프로젝트 개발사업자가 전력수요 성장률이 높은 지역(따라서 추가 발전 용량이 필요할 가능성이 높다)을 파악하는데 유용할 수 있다. 전력 공급에 포함되는 정보에는 현재 건설 중인 프로젝트의 건설기간과 건설이 확정된 발전프로젝트현황 그리고 기존 발전 설비 현황이 포함된다. 이 정보를 통해 어느 지역에 전력설비용량 부족 혹은 초과가 발생할 가능성이 높은지를 알 수 있다.
- **전력 가격:** 이는 특히 자유화된 전력 시장의 경우 필요한 정보이다. 전력시장 가격은 전력망에서 시간대와 위치에 따라 크게 변동할 수 있는 반면, PPA 가격은 투자 결정에 큰 영향을 미친다. 프로젝트 개발사업자들이 어느 지역에서 가장 높은 기대 수익을 거둘 수 있을지를 평가하려고 할 때 전력시장 가격이 유용한 정보를

제공한다. PPA 가 체결될 때, 투명한 도매전력시장가격을 통해 PPA 가격이 적절한지를 판단할 수 있는 가격예시(價格豫示)(price discovery) 정보를 얻을 수 있다.

- **기술 및 공급 비용:** VRE 프로젝트 개발사업자가 다른 발전기술과 비교하여 VRE 프로젝트 경쟁력을 평가할 때, 서로 다른 기술비용 및 연료비용 자료는 중요한 정보를 제공해 준다.

어떻게 위의 정보를 공유할 수 있을까?

필요한 정보는 정부에 의해 설립된 국가 내 책임 기관이 가장 투명하고 공정한 방법으로 누구나 공개적으로 이용할 수 있도록 해야 한다. 그 다음에는 다양한 방법으로 정보를 공유할 수 있다. 가장 유용하고 효과적인 방법 중 하나는 온라인상에 게재된 국가 또는 지역 지도를 이용하는 것이다. 예를 들어, 재생에너지 자원지도(map)은 국제재생에너지기구(IRENA), 에너지분야 관리지원 프로그램(ESMAP, Energy Sector Management Assistance Program), 글로벌 에너지 네트워크 연구소(GENI, Global Energy Network Institute)와 같은 조직에서 제작해 왔다. 이러한 조직은 회원 국가, 광역(regional) 및 지역(local) 조직을 포함한 다양한 출처로부터 데이터를 수집한다.

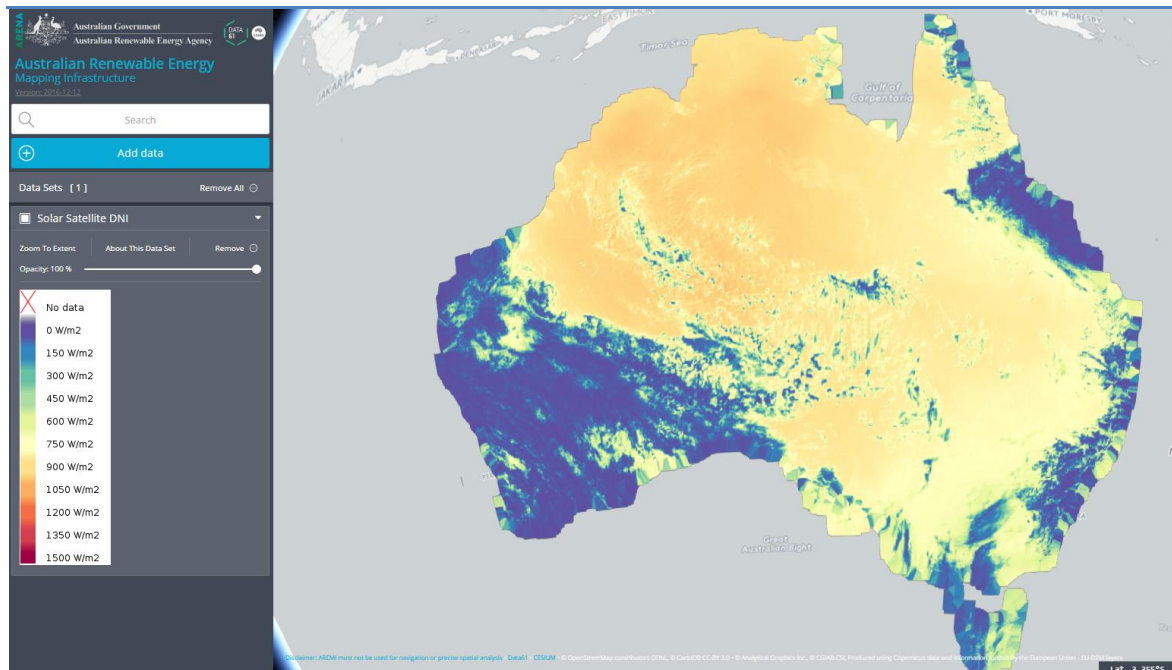
국가 차원에서, 호주와 미국과 같은 나라들은 재생에너지 자원지도와 재생 에너지 프로젝트의 실행 가능성을 평가하는 데 도움이 되는 많은 방법을 준비했다. 호주에서는, 정부 주도로 에너지 부문과 관련된 지형 공간 데이터를 제공하는 개방형 지도 플랫폼이 만들어졌다(AREMI, 2016)(박스 11).

박스 11 • 호주 재생에너지 지도 인프라

호주는 호주 에너지 시장 운영자(AEMO, Australian Energy Market Operator), 호주 기상청(BOM, Bureau of Meteorology) 및 호주 지형관리원(Geoscience Australia) 등 관련 정부 기관의 데이터 서버를 직접 연결하여, 완전히 개방되고 공개적으로 이용 가능한 프레임워크인 호주 재생에너지 지도 인프라(AREMI, Australian Renewable Energy Mapping Infrastructure)를 구현했다. AREMI의 주요 목적은 에너지 인프라 투자 결정에 필요한 정보와 관련된 데이터를 제공하는 것이다. 프로젝트 개발사업자는 기존 전력 인프라, 계획된 네트워크 투자, 네트워크 용량, 실제 발전 및 수요 데이터를 포함한 공간(지리) 정보에 접속할 수 있다.

관련 정보에는 네트워크 용량, 발전소, 변전소 및 송전선로의 지형 공간 데이터가 포함되기도 한다(그림 14). 매핑 플랫폼은 데이터를 변환하여 웹 브라우저 상에 정보와 데이터를 시각적으로 표시한다. 이 기능을 사용하면 지리적 태그가 붙은 다양한 포맷의 여러 데이터 세트를 얻을 수 있다.

그림 14 • 일조량 강도 수준을 보여주는 AREMI



출처: AREMI (2016), 호주 재생에너지 지도 인프라, <http://nationalmap.gov.au/renewables/>

요점 • 자원 및 전력 인프라에 대한 지형 공간 데이터는 투자 결정에 필요한 정보를 제공해준다.

부록 2: 전력망 접속 규칙의 초점

접속 규칙이 무엇이고 왜 중요한가?

Page | 68

전력계통은 매우 복잡한 시스템이다. 대규모 전력계통의 경우 전력공급 안전도(security)를 보장하기 위해 반드시 모두가 일관되고 공동으로 작동해야만 하는 엄청난 숫자의 설비들로 구성되어 있다. 이러한 설비들은 다양한 회사에서 제조하며, 전력 부문 조직구성에 따라, 많은 이해관계자가 소유 및 운영할 수 있다. 예를 들어, 독립발전사업자(IPP)를 허용하는 전력계통에서는 (일부) 발전 자산과 전력망이 서로 다른 기업에 의해 운영될 수 있다.

따라서 전력계통의 모든 설비들이 적절히 동작하기 위해서는 일련의 규정 및 기술사양이 필요하고, 모든 당사자가 이를 준수해야 한다. 이 규정의 집합을 전력망 운영규칙이라고 한다. 전력망 운영규칙은 전력계통 운영 및 계획과 관련한 여러 내용을 포함한다(IRENA, 2016).

- 접속 규칙은, 정상적인 운영 상태와 예외적인 운영 조건 모두에서, 발전기 및 부하와 같은 개별 구성 요소가 계통에서 어떻게 동작해야 하는지를 규정한다.
- 운영 규칙은 발전소 운영계획수립 및 급전 방법과 예기치 않은 상황에 대응하기 위한 예비력 필요량을 포함하여 계통운영자가 사용하는 절차를 명시한다.
- 계획수립 규칙은 전력망 확장 계획 및 신규 발전 용량 계획 수립에 관한 규칙을 포함한다.
- 시장 규칙은 가격 형성에 기술적 제한을 반영하는 방법을 포함하여 전력 거래에 대한 일반적인 규칙을 정의한다.

이 모든 규칙을 논의하는 것은 이 안내서의 범위를 벗어나는 일이다. VRE 보급 초기에 가장 관련성이 높은 것은 접속 규칙이다. 실제로, 아래의 사례처럼 전력망 운영규칙이라는 용어를 전력망 접속 규칙을 의미하는 것으로만 사용하는 경우가 일반적이다.

전력 시스템이 자유화되면서 처음으로 공공규정의 필요성 때문에 전력망 운영규칙이 만들어졌다. 서로 다른 이해당사자들이 소유한 발전 자산이 동일한 전력계통에 접속되는 단계부터 지켜야 할 의무규정을 공개적이고 명확히 정의하는 것이 매우 중요해졌다.

전력망 운영규칙은 풍력 및 태양광 발전소와 특히 관련이 있는데, 이는 이 발전소들이 기술적으로 전통적인 발전기들과 매우 다르기 때문이다. 동기발전기들의 전기적 동작(electrical behavior)은 기본적으로 설계 방식에 의해 결정된다. 일단 전력계통에서 작동하기 시작하면, 계통 외란에 대한 동기발전기들의 응답특성은 물리학의 기본 법칙에 의해 결정된다. 이와 달리, 실질적으로 모든 최신 VRE 발전소는 전력전자 기반의 장치를 통해 전력망에 연결된다. 이는 VRE 발전소 운전특성이 초기 설계뿐만 아니라 (추후에) 만들어진 운영 프로그램에 의해 좌우된다는 것을 의미한다.

전력계통의 특정 상황에 대응하여 VRE 발전소 운전 형태를 조정할 수 있기 때문에, 이는 계통 계획 수립과 운영 측면에서는 기회가 된다. 하지만, 그것은 두 가지 이유로 도전이기도 하다. 첫째, VRE 발전소를 프로그래밍하는 최선의 방법을 찾는 것이 다소 어렵다. 과거에는 전력계통에 접속되는 VRE의 규모가 미미할 것으로 가정하고 여러 동작특성을 설계하였다. 그러나 VRE의 중요성이 커짐에 따라, 발전소 동작특성을 변경해야만 했다(박스 12).

Page | 69

둘째로, VRE 발전소가 할 수 있는 것에는 몇 가지 제약이 있다. 더 정확히 말하면, VRE 발전소에서 전력계통의 외란에 대해 출력을 조정하는 것과 같은 특정한 행동을 요구하는 것은 발전소에 상당한 비용을 추가시킬 수 있다; 결국 소비자가 부담하게 될 비용이다.

전력망 운영규칙을 개발하려면 적절한 균형을 이루어야 한다. 한편으로, VRE 발전소는 최소한의 비용으로 전력계통을 안정적으로 운영하는 데 필요한 기능들을 반드시 제공할 수 있어야만 한다. 다른 한편으로, VRE 발전소에 대해 과도하게 많은 요건을 적용하지 않는 것이 중요하며, 그렇지 않으면 VRE 보급이 필요이상으로 제한될 수 있다.

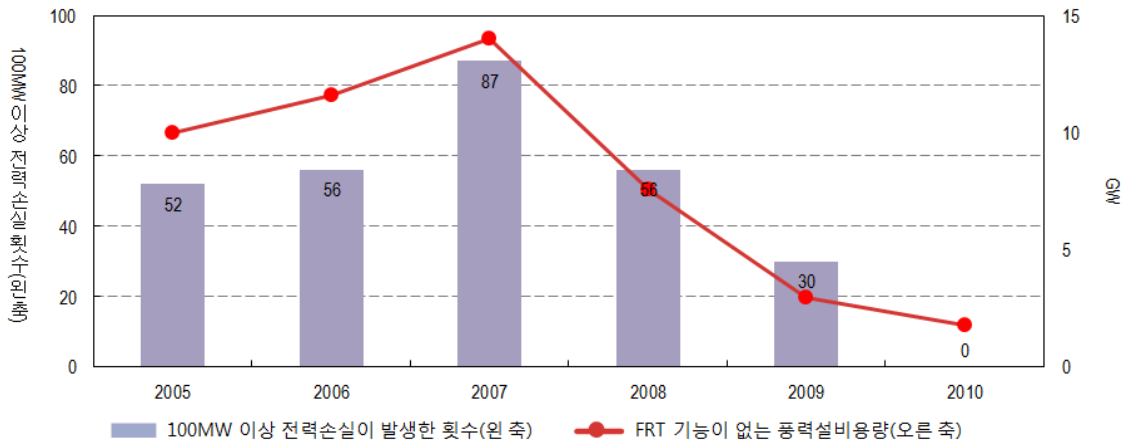
박스 12 • 유럽 전력망 운영규칙 요구조건의 변화

전력망 운영규칙에 관련된 영역 중 하나는 FRT(fault ride through, 전력계통에서 송전선 고장 등으로 전압강하가 발생하더라도 발전기가 정지하지 않고 계통에 접속되어 있을 수 있는 능력)이다. 초기에는 풍력 발전기의 경우 전력망 운영규칙에 지정된 순시 전압강하(voltage dip)이 발생하면 계통에서 분리되어도 무관 하였다. 하지만, 예를 들어, 스페인에서 풍력의 비율이 상당한 수준으로 증가하면서, 이러한 규칙이 계통 안전도(security)에 위협이 될 수 있음이 밝혀졌다. 이는 VRE 발전 기술 자체 문제가 아니라 VRE 발전기 운전 방식에 대한 문제였다.

전력망 운영규칙을 변경하고 VRE 발전소들에게 FRT 능력을 요구함으로써, 단일 순시전압강하 문제는 스페인 사례처럼 해결될 수 있다. 스페인의 경우 전압강하 후에 계통에서 탈락하는 VRE 발전기 사례가 한 건도 없게 되었다(그림 15). 모든 발전소들에게 FRT와 같은 새로운 능력을 요구하는 것은 이전에 이미 존재하던 발전소들에게 상당한 비용부담을 강요할 수 있다는 점을 유의해야 한다. 이는 중요한 고려사항이다.

또 다른 사례는 태양광에 관한 것이다. 독일 태양광 발전소 전력망 운영규칙은 주파수가 50.2 헤르츠 이상을 넘게 되면 모든 태양광 발전소가 계통에서 분리될 것을 명시적으로 요구했다. 계통 외란시 이런 사태가 발생할 수도 있다. 태양광 보급률이 낮은 단계에서는 이러한 규칙이 전력계통의 안전한 운영을 가능케 하지만, 보급률이 더 높은 수준에서는 위협이 될 수 있다. 모든 태양광 발전소가 동시에 송전망에서 분리되면 발전 용량 손실이 계통 안전도를 위험에 빠뜨릴 수 있다. 이 문제가 파악된 후, 새로운 전력망 운영규칙 요구에 의해 갑작스런 전력용량 손실이 발생하지 않도록 보장하기 위해 전력설비 개보수(retrofit) 프로그램이 시행되었다.

그림 15 • FRT 기능이 없는 풍력설비 규모 및 전압강화로 100MW 이상 전력손실이 발생한 횟수(스페인)



참조: FRT = fault ride through(고장시 계속 운전 능력).

출처: IEA (2014), *The power of Transformation* 으로부터 재구성.

요점 • 적절한 전력망 운영규칙 요건이 필수적이다.

전력망 운영규칙이 VRE 에 적합한가?

독립발전사업자가 있는 전력계통에서는 거의 대부분 전력망 운영규칙이 있다. 그리고 계통 계획수립 및 운영이 단일기관에 의해 수직적으로 이루어진 계통의 경우에도 어떤 형식이던 일련의 기술 표준이 있을 것이며, 신규 발전설비들은 이 규칙들을 준수해야 할 것이다. 그럼에도 불구하고, 거의 모든 경우에 그러한 표준이 VRE 발전기에 대한 기술적 요구사항을 적절한 수준으로 규정하는 것은 어려운 일이다.

무엇이 적절한 것이냐 하는 것은 여러 가지 요인에 달려 있다. 국제재생에너지기구(IRENA, 2016)가 발표한 최근 연구는 VRE 에 적합한 전력망 운영규칙을 개발할 때 고려해야 할 관련 요소에 대한 자세한 설명을 담고 있다. 관심 있는 독자는 보다 자세한 내용에 대해 이 연구를 참조할 것을 추천한다. 주요 요점은 다음과 같다.

일반적으로 전력망 운영규칙 요건은 기존의 VRE 비중이 높은 국가에서 요구하고 있는 규정을 적용하는 것이 바람직하다. 이는 다른 곳에 이미 보급된 기술과 접근방식을 모방할 수 있기 때문에 비용을 줄이는 데 도움이 될 것이다. 반대로, 새로운 요건을 발전기에 적용하기 위해서는 비용이 증가되는데, 특히 그것들이 소규모 시장에만 적용되어 결과적으로 (대량 생산 설비보다는) 맞춤형 해법이 필요한 경우에 해당된다.

이와 동시에, 다음 절에서 논의하는 바와 같이 어떤 기능이 필요한 지에 대해 많은 요인들이 영향을 미치기 때문에, 한 전력계통의 전력망 운영규칙을 1 대 1 로 다른 전력계통에 모방하는 것은 가능하지 않다(IRENA).

VRE 보급요인

Page | 71

VRE 보급의 현재 및 미래 수준: 일반적으로 계통에서 VRE 비율이 높을수록 전력망 운영규칙은 보다 엄격하여야 한다. 그 이유는 간단하다. VRE 가 대부분의 전력을 생산하는 기간 동안, 계통을 안전하게 유지하기 위하여 VRE 들이 광범위한 서비스를 제공해야 할 필요가 있을 것이기 때문이다. 반대로, VRE 의 비중이 미미한 경우에는, 엄격한 규칙을 적용하는 것이 그다지 중요하지 않을 것이다.

VRE 발전기가 연결되는 전압 수준: VRE 발전소 크기와 위치에 따라 이에 맞는 각 발전기들은 서로 다른 전압계급에 연결된다. 대형 발전소는 송전망에 직접 연결될 수 있다. 이와는 대조적으로 소형 지붕형 태양광 발전 시스템은 가장 낮은 전압계급에 연결될 것이다. 일반적으로 높은 전압계급에 연결하는 대형 설비는 보다 엄격한 요구 조건을 따라야 한다. 그러나 이 또한 분산형 용량 대비 중앙집중형 비율에 따라 달라진다. 예를 들어, 소형 지붕 PV 시스템에 대한 독일의 전력망 운영규칙 요건은 지난 몇 년 동안 점점 더 엄격해졌으며, 많은 소규모 발전소의 전력계통 지원을 위한 요건은 계속 증가하고 있다.

전력계통의 기술적 특성

계통 규모(MW 최대 전력수요): 일반적으로 VRE 발전소를 대형 전력계통에 연계하는 것이 더 용이하다. 이는 VRE 발전소 변동성이 전체 전력수요의 변동성에 비해 작기 때문이다. 또한 VRE 발전소가 더 많아져도 서로 다른 지리적 위치에 분산될 경우 발전량이 평활해질 가능성이 높다. 또 다른 이유는 대형 전력계통은 동일한 수준의 외란에 대해 보다 더 안정적이기 때문이다. 이는 개별 발전기에 대한 요건이 다소 덜 엄격해질 수 있음을 의미한다. 예를 들어 비교적 작은 규모의 전력계통인 아일랜드는 제한된 연계선로 용량 문제로 인해 주파수 조정에 중점을 두고 VRE 여부와 무관하게 발전기 성능에 대해 매우 엄격한 조건을 요구하고 있다.

다른 전력계통과의 동기 연계 수준: 타 전력계통과 계통연계가 잘 구축된 소형 전력계통은 대형 전력계통과 요건이 유사할 수 있다. 예를 들어 덴마크 계통은 두 개의 하위 계통으로 나뉘어 서로 연결되어 있다. 각각은 훨씬 더 큰 인근 전력계통(각각 유럽 및 북유럽 전력계통)과 매우 강하게 연결되어 있다. 이로 인해 덴마크에서는 VRE 연계가 훨씬 수월하다. 그러나 연계된 계통이라고 하더라도 단순비교 할 수 없다는 사실에 유의하여야 한다. 표준 교류(AC) 선로를 이용할 경우 직류(DC) 선로로는 해결할 수 없는 문제를 해결할 수 있으며, 그 반대의 경우도 마찬가지다. 예를 들어 계통 관성은 AC 선로를 통해서만 공유할 수 있다.

전력망의 강건성(strength): 이것은 발전기에서 전력망의 각 부분에 있는 부하(load)로 전력을 전달하는 능력이다. 전력계통에서 혼잡과 병목현상은 그 계통의 취약성을 나타낸다. 전력망 강건성은 전력망 외란(위상, 전압장애 및 기타 우발상황)에 대해 전압이 변동하는 정도와 관련이 있다. 강건한 계통은 일반적으로 대부분의 시간 동안 전압운영 기준 내에서 운영할 수 있다. 배터리를 포함한 저장장치 및 연계선로처럼 계통에서 사용할 수 있는 기술 옵션은 전력망의 강건성을 높일 수 있다. 전력망 강건성은 전력망 운영규칙에서 FRT 성능 요건의 엄격성에 영향을 줄 수 있다. 마지막으로, 인버터는 취약한 전력망에서 최적으로 작동되지 않으므로 인버터의 적절한 작동을 보장하는 것 자체가 문제가 될 수 있다는 점을 유의할 필요가 있다.

중양급전 발전의 특성: 이는 기존 발전 포트폴리오의 연료 및 기술 유형과 관련이 있다. 유연한 발전 포트폴리오를 갖춘 계통은 VRE의 빠른 출력 변화를 수용할 수 있다. 일반적으로 발전기는 빠른 출력증감발 속도, 낮은 최소 발전 수준 및 빠른 기동 시간 등의 특성이 가지는 것이 바람직하다. 주로 대형 화력발전소로 구성된 계통은 일반적으로 유연성이 떨어진다. OCGT 및 수력 발전소가 일반적으로 매우 유연하다.

규제 및 시장 맥락

기존 전력망 운영규칙 요건: 과거 전력망 운영규칙과 관련된다. 기존 규칙은 VRE 발전기를 수용하기 위한 추가 규칙 개선의 근거를 제공할 수 있다. 또한 전력망 운영규칙의 진화는 VRE 기술 제조업체들이 전력망 운영규칙 요건을 충족하고 전력망 연계를 촉진하기 위해 어떤 영역의 기술 개선이 필요한지 더 명확하게 파악할 수 있도록 도와준다.

유사한 요건을 가진 타 시장에 보급된 VRE 용량: VRE의 비율을 늘리려는 계통의 경우, 유사한 요건이 있는 다른 관할 지역의 시장 경험을 활용하는 것이 중요하다. 중요한 건 전력망 운영규칙 요건이 합리적이고 시행 가능한지 확인하는 것이다.

적절한 전력망 운영규칙 개발 프로세스

적절한 전력망 운영규칙을 개발하려면 몇 가지 조건이 필요하다. 첫 번째 단계로, 일반적으로 정책 당국자들이 전력망 운영규칙이 필요한지 여부를 결정한다. 독립발전사업자가 발전소를 소유하는 경우, 발전소가 전력망의 안전한 운영에 기여하도록 보장하기 위해 전력망 운영규칙이 매우 필요할 것이다. 그 다음으로 전력망 운영규칙의 제정(또는 개정)이 법률에 의해 요구될 수 있다.

이상적으로는 한 국가에서 VRE 발전소 보급이 시작되기 전에 규칙 개발이 완료되어야 한다. 대부분의 경우, 규제 당국은 계통운영자에게 규칙 초안을 작성하도록 하고 전력망 운영규칙이 구속력을 갖도록 승인한다. 초안 작성을 위해서는 전력계통과 적절한 모델링

방안에 대한 충분한 데이터가 필요하다. 확보된 데이터와 적절한 모델링에 의한 검토 결과물은 전력계통의 전체적인 그림에 대한 정확한 통찰력을 제공한다. 이 통찰력은 전력망 운영규칙 개발을 지원하는 데 사용된다. 적절한 규칙 개발을 위한 중요한 요소는 다음과 같이 요약된다(IRENA, 2016).

- **기존 전력계통에 대한 데이터:** 발전, 전송 및 배전 계통을 포함한다. 이러한 정보는 전력계통 시뮬레이션과 안정도 분석(정상상태(steady state) 및 과도상태(transient))을 수행하는 데 사용된다.
- **전력계통 및 전력망 연계 연구의 컴퓨터 시뮬레이션 모델:** 필요한 전력망 운영규칙 요건을 쉽게 확인할 수 있게 해준다. 적절한 모델링 방안을 파악하고, 분석과정과 결과에 의해 사업자 간의 이해가 상충될 수 있음에 유의하여야 한다. 연구는 정상 상태와 과도 상태 분석 모두를 포함해야 한다.
- **비용 편익 분석:** 제안된 전력망 운영규칙 요건으로 인해 예상되는 비용과 편익을 분석해야 한다.
- **장기 발전 및 송전 개발 계획:** 에너지 분야의 전략적 방향과 장기적 목표를 설정하는 데 필요하다. 재생에너지, 에너지 효율성, 탈탄소(decarbonization) 및 기타 에너지 요소를 포함해야 한다.
- **경험이 풍부한 팀:** 전력망 운영규칙 작성, 시행 그리고, 필요하다면, 개정에 대한 지식이 풍부한 팀. 해당 팀은 국가의 법률 및 규제 시스템을 이해하고 전력계통에 대한 튼튼한 기술적 이해를 확보하는 것이 중요하다.
- **다른 국가와의 협력:** 이를 통해 해당 국가는 전력망 운영규칙의 경험과 VRE 연계로 인한 이슈를 공유할 수 있다. 여러 국가에서 자원을 모으고 여러 시장에 적합한 설비를 개발하여 비용을 절감할 수 있는 기술적 요건을 조정하는 것이 가능할 수도 있다. 이러한 관행의 예로는 유럽 규정(European Regulation)(2016/631)이 있다. 이 규정은 회원국 간 전력융통을 위해 모든 EU 국가에 적용될 발전기의 전력망 접속 요건에 대한 네트워크 규칙을 정하고 있다.

전력망 운영규칙의 첫 번째 초안을 작성할 때, 계통운영자는 규칙의 적용가능성이 명확하게 정의되었는지, 예를 들어 특정 요건이 적용되는 전압계급과 발전 유형이 명확하게 명시되었는지 확인해야 한다.

초안이 작성되면 모든 관련 이해관계자(프로젝트 개발사업자, 제조업체, 기존 발전회사, 건설업자 등)와 협의 과정을 거쳐야 한다. 그러한 협의는 규칙 초안과 병행하여 이루어질 수도 있다. 초안이 최종안이 되면 대개 규제 당국의 승인을 받아야 하며, 시행을 위해 추가 법률이 필요할 수 있다.

VRE 비중에 따른 전력망 운영규칙 요건 우선순위 지정

VRE 발전기에 대한 전력망 운영규칙의 요건은 달성된 VRE 보급 단계에 따라 달라진다. 이 요건들은 VRE 발전의 현재 비중에 의해 영향을 받고(IRENA, 2016), 또한 VRE 보급의 다양한 단계에 따라 여러 범주로 분류할 수 있다(표 3). VRE 와 관련된 주요 기술 요건은 다음과 같다.

- **보호시스템:** 이 시스템은 전력계통에서 고장설비를 분리하고 전력계통에 미치는 고장의 영향을 완화하기 위한 것이다. 보호 시스템에 대한 표준은 VRE 보급의 모든 단계에서 요구된다.
- **통신 시스템:** 이는 계통운영자가 VRE 발전소 출력을 실시간으로 감시하고 자동 발전 제어(AGC, Automatic Generation Control)를 통해 VRE 발전소를 직접 제어할 수 있도록 하기 위한 것이다.
- **전력 품질:** 전력 품질의 주요 측면에는 파형 왜곡(waveform distortion) 및 단기간의 고조파(harmonics)와 플리커(flicker)가 포함된다.
- **전압 및 주파수의 운전 범위:** 다양한 조건에 따른 전력계통의 운전 범위이다. 계통에 연결된 모든 설비는 일반적으로 전압 공칭 값의 $\pm 10 \sim \pm 15\%$, 주파수의 경우 $-5 \sim 3\%$ 범위의 공칭 값에서 작동할 수 있을 것으로 예상된다.
- **주파수 제어/유효 전력 제어:** 이것은 특히 과주파수(over-frequency)에 대응하여 주파수가 정상으로 되돌아가도록 유효 전력 조절 기능을 제공하는 능력이다(유효 또는 실효 전력, 와트(watts)로 측정). 유효 전력 출력의 변화는 계통 주파수에 영향을 미친다. AGC 를 통해 유효전력을 제어할 수 있다.
- **순동예비력(spinning reserves):** (주파수 편차에 비례하는 지역제어오차(ACE, Area Control Error)를 줄이기 위해) 계통에 이미 연계되어 운전하고 있는 발전소들이 AGC 로 해결할 수 없는 수급불균형을 해소하기 위해 즉시 사용할 수 있는 추가 예비력이다. 무시할 수 없는 VRE 보급률을 보이는 전력계통에서는, 예상 VRE 출력에 비례하여 동적으로 순동예비력을 정량화해야 한다.
- **VRE 발전량 예측:** VRE 발전소 출력을 여러 시간대(timeframe)에 걸쳐 예측하기 위한 시스템과 관련이 있다. 이 시스템은 계통운영자/계획 수립자가 중앙급전 발전소 및 순동예비력 운영계획을 비용 효율적으로 수립하는 것을 도와준다. VRE 발전기가 계통에 더 많이 연계될수록 예측 시스템의 중요성이 더 커진다.
- **전압 제어/무효전력 제어:** 접속 지점의 전압 변동에 대응하는 VRE 발전소 응답능력과 관련된다. 발전기 무효전력은 전자기(electromagnetic) 에너지의 흐름을 돕는다. 발전기 무효전력 변화는 발전기 주변의 지역 전압에 영향을 미친다.

- **고장시 계속운전 능력(FRT):** VRE 발전소는 저압 발생시 특정 시간 동안 네트워크에 연결된 상태를 유지할 수 있거나 그렇지 못할 수 있다. VRE 발전소는 저압 발생 시 무효전력을 제공하여 고장 관리에 기여해야 한다.
- **시뮬레이션 모델:** 전력망의 물리적 동작을 모의하는 모델로서, 전력계통 계획수립 및 운영에서 의사결정이 용이하도록 가능한 시나리오를 모의 하는 데 사용된다. 시뮬레이션의 정확성을 보장하기 위해서는 정확하고 업데이트된 전력망 및 발전기 모델이 필요하다. 발전기 소유자는 계통에 연결된 발전소 시뮬레이션 모델을 제공해야 한다.
- **가상 관성:** VRE 비중이 매우 높을 경우 관련이 있다. VRE 발전기는 계통에 관성을 제공하지 않으므로, VRE 비중이 높을 때, 주파수 변동률(RoCoF, rate of change of frequency)이 증가한다. 가상 관성은 공학적으로 가능하지만, 그러나 매우 진보된 제어 방법과 추가 하드웨어 장비가 필요하다.

표 3 • VRE 보급의 다양한 단계에 따른 기술 요건

	항상	1 단계	2 단계	3 단계	4 단계
기술 요건	- 보호시스템 - 전력 품질 - 운전주파수 및 전압범위 - 대형발전기의 가시성 및 제어 - 대형발전기 통신시스템	- 과주파수 기간 중 출력감소 - 전압제어 - 대형발전기의 FRT 기능	- 소형(분산형) 발전기의 FRT 기능 - 통신시스템 - VRE 예측도구	- 주파수/ 유효전력 제어 - 예비력 제공을 위한 출력제한 운영 모드	- 일반 주파수 및 전압 제어 방식 연계 - 가상 관성 - 독립형 주파수 및 전압 제어

전력망 운영규칙의 시행 및 개정

전력망 운영규칙이 적용되는 범위는 규칙의 법적 지위에 달려있는데, 이는 국가 및 관할권에 따라 달라진다. 호주와 같은 일부 국가에서는 전력망 운영규칙이 법률에 의해 의무화되고 확정되므로 전력망 운영규칙 요건을 준수하지 않을 경우 벌금이 부과될 수 있다. 일부 다른 국가에서는 전력망 접속 규칙이 법률에 따라 의무화되지 않는다. 오히려 계통에 연결된 발전기에 대한 지침이자 적용 가능한 규칙에 불과하다.

법적 지위와 무관하게, 발전기가 전력망 운영규칙 요건을 준수하는지 확인하는 프로세스가 있어야 한다. 전력망 운영규칙 준수 여부를 확인하고 인증하려면 기술적 및 법적 역량을 포함한 다양한 자원이 필요하다. 이상적으로는 계획, 설치 및 시운전에서 운영 수명 만료까지 VRE 프로젝트 전반에 걸쳐 규칙준수 검증을 수행해야 한다.

인증은 VRE 발전기가 전력 판매허가를 받기 전에 전력망 운영규칙 요건을 충족하도록 보장하는 동시에 준수 비용을 최소화하고 VRE 를 보급을 권장하는 중요한 도구이다(IRENA, 2016). 계통접속을 희망하는 모든 발전기를 검사하는 대신, 계통운영자는 개발사업자가 특정 표준을 충족함을 입증하는 국제 인증서를 제시하도록 요구할 수 있다(모든 발전기를 검사하는 것은 비효율적이다). 그런 다음 일부 발전기만 검사하여 모든 장치가 필요한 특성을 충족하는지 확인해야 한다. 운전 중, 계통운영자는 실제 조건에 대한 발전기의 응답 결과를 기반으로 전력망 운영규칙 준수여부를 검증한다. VRE 발전소 개발의 다양한 단계에 대한 인증 절차는 전력망 운영규칙에 명시되어야 한다.

VRE 프로젝트 개발사업자가 전력망 운영규칙을 준수함에 있어 추가 비용이 발생할 수 있으며, 이로 인해 프로젝트 개발이 지연될 수 있다. 이를 피하고 전력망 운영규칙 준수를 장려하기 위해 정책 당국자들은 필요한 추가 투자에 대한 세금 우대 같은 재정적 인센티브를 채택할 수 있다. 전력망 운영규칙 초안 작성 시 이해관계자들에게 자신들의 의견과 피드백을 제출할 수 있는 플랫폼이 제공되어야 한다.

전력망 운영규칙은 VRE 비중이 증가함에 따라 변화하는 전력계통의 요구에 적합하도록 지속적으로 개정되며, 재생에너지 및 배출량 감소 목표 등과 같은 에너지 및 기후 정책 변화에 발맞추기 위해서도 지속적으로 개정된다. 또한, 계통운영자의 운영 경험이 축적됨에 따라 변화가 필요한 부분이 드러날 것이다. 전력망 운영규칙 개정 빈도는 전력계통과 에너지 부문이 얼마나 빠르게 발전하고 있는지에 따라 달라진다. 한 가지 명심해야 할 사항은 규칙개정이 너무 자주 발생하면 제조사가 이를 따라잡기 어려울 것이라는 점이다. 반면, 규칙개정이 VRE 개발속도에 미치지 못하면 전력계통에 바람직하지 않은 영향을 미칠 수도 있다.

용어 사전

유효전력 제어(Active power control): 송전망과 배전망에서 전력 흐름을 지원하는 무효전력과 달리, 일을 하기 위해 사용하는 유효 전력의 출력을 제어하는 발전소 기능과 관련이 있다.

Page | 77

차단(Curtailment): 발전소 출력의 일부 또는 전부를 계통운영자가 수용하지 않는 것.

사이클링(Cycling): 계통 부하(수요) 변화에 대응하여 기동정지를 포함한 발전소의 다양한 출력변화. VRE 보급률 증가에 따른 순 부하 변동성 증가에 직면하여 전통적인 발전소는 공급/수요 균형을 유지하기 위해 많이 출력을 빈번하게 변화시킬 가능성이 높으며, 이는 결국 발전설비의 마모 및 파손을 증가시킬 가능성이 있다.

중앙급전 발전소(Dispatchable power plants): VRE 발전소(위 참조)와는 대조적으로 중요한 운영 및 경제성 범위 내에서 필요에 따라 기동, 정지할 수 있는 발전소.

송전선로 동적 열용량(Dynamic line rating): 외기 온도에 따라 송전선로의 전송능력(전력을 전달할 수 있는 것으로 간주되는 용량)을 변경하는 방법. 외기 온도는 전송능력에 중요한 영향을 미친다.

고장시 계속 운전(FRT, Fault ride through) 능력: 고장 상황(예: 갑작스러운 전압 강하)에서도 계속 전력을 생산할 수 있는 발전소 능력.

유연송전시스템(FACTS, Flexible AC Transmission Systems): FACTS는 주어진 모선에 주입 혹은 흡수된 무효전력을 유연하게 조절하여 전력전송능력을 증가시킴으로서, 전력계통의 안정도와 제어가능성을 향상시킬 수 있는 전력 전자 장치이다.

유연성(Flexibility): 몇 분에서부터 몇 시간까지의 시간 동안 비용 효율적인 방식으로 전력 공급/수요 균형의 상향 또는 하향 변화에 대응할 수 있는 전력계통의 능력. 유연성은 보통 계통 내 중앙급전 발전소의 출력증감발 기능과 관련이 있지만, 저장장치, 수요자원 관리 및 전력망 인프라를 비롯한 다른 자원도 그에 해당된다.

전력망 운영규칙(Grid code): 전력망 운영규칙은 전력계통과 시장에 연결된 자산이 반드시 준수해야 하는 광범위한 집합 또는 규칙을 모두 포함하는 만능(catch-all) 용어이며, 그 목적은 전력계통과 전력시장의 비용 효율적이고 안정적인 운영을 지원하는 것이다. 이 문서는 접속 규칙(이 문서에서 설명됨), 운영 규칙, 계획수립 규칙 및 전력시장 규칙 등 4개의 주요 부분으로 구성된다.

전력망 강건성(Grid strength): 비상시에도 전력을 생산지에서 소비지까지 안정적으로 운반하는 송배전망의 능력.

관성(Inertia): 전통적인 발전소의 대형 발전기 및 터빈의 회전 관성과 관련된 전력계통의 특성으로 전력계통의 안정도(stability)를 증가시킨다.

연계선로(Interconnection): 각각 전력수급 균형 책임이 있는 전력계통을 서로 연결해주는 교류 또는 직류 송전선로.

순 부하(Net load): 계통 부하(수요)에서 VRE 발전소 출력을 제외한 값.

유지보수(O&M, Operation and maintenance): 발전기, 송전선로 및 저장 시설과 같은 전력계통 자산의 일상적인 작업과 관련된 광범위한 활동이며, 프로젝트의 초기 투자와 구별된다. O&M 비용은 연료비, 부품 교체, 인건비 및 기타 비용을 포함할 수 있다.

전력구매계약(PPA, Power purchase agreement): 발전소 소유주와 발전소가 생산하는 전력 구매자 간에 전력 구매 계약이 체결될 수 있다.

전력 품질(Power quality): VRE 연계와 관련된 전력 품질의 주요 측면에는 파형 왜곡 및 단기 변동과 관련하여 발생하는 고조파와 플리커가 포함된다.

출력증감발(Ramp): 전력계통 맥락에서 출력증감발은 발전소 출력 변화, 부하(수요)의 변화 또는 순 부하(수요 - VRE 출력)의 변화를 나타낼 수 있다. 출력증감발률은 변화의 속도이다. 단위 시간에 따른 상향 혹은 하향 MW 로 측정된다.

주파수 변동률(RoCoF, Rate of change of frequency): 전력계통의 주파수가 변경되는 속도를 측정한다. RoCoF 는 계통 관성이 낮을수록 증가한다(위 참조).

신뢰도(Reliability): 전력계통의 신뢰도는 정상 상태 또는 합리적으로 예상할 수 있는 계통고장 상황 하에서 소비자에게 안정적으로 전력을 공급할 수 있는 전력계통의 능력을 의미한다.

예비력(Reserves): 수요 및 VRE 출력 불확실성과 같은 정상적인 운영조건 및 주요 발전기 또는 송전선로 상실과 같은 비상사태를 관리하기 위해 예비 상태로 유지되는 발전 용량.

고장파급방지장치(Special protection system): 더 넓은 네트워크에 영향을 미칠 수도 있는 (발생가능성이 높은) 송전선로 고장의 영향을 관리하기 위해 계통운영자가 준비한 제어 방법. 비용이 더 많이 드는 설비 보강을 피하기 위해 사용할 수 있다.

안정도(Stability): 물리적 또는 전기적 외란으로부터 (천분의 1 초 단위 시간대 이내에) 즉시 복구하여 운영 평형 상태를 회복하는 전력계통의 능력.

동기 발전/연계(Synchronous generation/interconnection): 전력계통의 동기 교류(AC) 설비들은 해당 설비의 운영이 전기-기계적으로(electro-mechanically) 함께 연결되어 있는 경우를 말한다; 이 설비들은 서로 (직류 VRE 발전기를 전력망에 연결시키는 데 사용되는) 컨버터 형태로 분리되어 있지 않다.

계통운영자(System operator): 전력계통의 일부 또는 전체 운영을 담당하는 조직. 원래 고압 전력망을 담당하지만, 점증하는 분산(주로 태양광) 전원을 관리하기 위해 적극적인 저압 전력망 운영이 대두되고 있다. 이상적인 경우, 계통운영은 송전 및 배전망 자산 소유와 분리된다.

변동성 재생 에너지(VRE, Variable renewable energy) 발전소: 풍력, 태양광 및 유역식 수력발전소(run-of-river hydropower)와 같은 발전소. 이들 발전소 생산량은 기존 발전소에 비해 변동성과 불확실성이 크다.

참조문헌

- AREMI (2016), *Australian Renewable Energy Mapping Infrastructure*, <http://nationalmap.gov.au/renewables/> (accessed 24 February 2017).
- Cochran J., D. Lew and N. Kumarb (2013), *Flexible Coal Evolution from Baseload to Peaking Plant*, report for the 21st Century Power Partnership, <http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60575.pdf>
- CSIR (2016), *Wind and Solar PV Resource Aggregation Study for South Africa*, Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria.
- DECC (2012), *The Future of Heating: A strategic framework for low carbon heat in the UK*, Department of Energy and Climate Change, London.
- Enervis/anemos (2016), *Market Value Atlas*, www.marketvalueatlas.com
- Fraunhofer ISE (2017), *Monthly electricity generation in Germany in 2014*, www.energy-charts.de/energy.htm (accessed 24 February 2017).
- Geary R., T. Condon, T. Kavanagh, O. Armstrong and J. Doyle, *Introduction of high temperature low sag conductors to the Irish transmission grid (2012)*, ESB International, Dublin.
- GSE (2015), *Rapporto statistico energia da fonti rinnovabili 2014* [Statistical report on renewable energy 2014], Gestore dei Servizi Energetici, Rome.
- Ibanez, E. et al. (2012), *A Solar Reserve Methodology for Renewable Energy Integration Studies Based on Sub-Hourly Variability Analysis*, Proceedings of the 2nd Annual International Workshop on Integration of Solar Power into Power Systems, November 2012, Lisbon.
- IEA (2016a), *Next Generation Wind and Solar Power – From cost to value – full report*, OECD/IEA, Paris.
- IEA (2016b), *World Energy Outlook 2016*, OECD/IEA, Paris.
- IEA (2016c), *Re-powering Markets*, Electricity Market Series, OECD/IEA, Paris.
- IEA (2016d), *Medium-Term Renewable Energy Market Report 2016*, OECD/IEA, Paris.
- IEA (2015), *Energy Technology Perspectives 2015*, OECD/IEA, Paris.
- IEA (2014), *The Power of Transformation*, OECD/IEA, Paris.
- IEA PVPS (2014), *High Penetration of PV in Local Distribution Grids: Sub-Task 2: Case-Study Collection*. OECD/IEA, Paris.
- IEA RETD (2013), *RES-E-NEXT, Next Generation of RES-E Policy Instruments*, OECD/IEA, Paris.
- IEA Wind (2013), *Wind Integration Studies*, IEA Wind Technology Cooperation Program, Task 25, http://www.ieawind.org/index_page_postings/100313/RP%2016%20Wind%20Integration%20Studies_Approved%20091213.pdf
- IRENA (2016), *Scaling up variable renewable power: The role of grid codes*, Abu Dhabi http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Grid_Codes_2016.pdf
- Mills, A. and R. Wiser (2014), *Strategies for Mitigating the Reduction in Economic Value of Variable Generation with Increasing Penetration Level*, Berkeley National Laboratory, Berkeley, <https://emp.lbl.gov/sites/all/files/lbnl-6590e.pdf>

- Mills, A. and R. Wiser (2010), *Implications of wide area Geographic diversity for short term variability of solar power*, Berkeley National Laboratory, Berkeley, <https://emp.lbl.gov/publications/implications-wide-area-geographic>
- Mills A., R. Wiser and K. Porter (2009), *The Cost of Transmission for Wind Energy: A Review of Transmission Planning Studies*, Berkeley National Laboratory, Berkeley <https://emp.lbl.gov/sites/all/files/report-lbnl-1471e.pdf>
- NREL (2016), *Technologies to increase PV hosting capacity in distribution feeders*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, <http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65995.pdf>
- NREL (2015), *The Role of Smart Grids in Integrating Renewable Energy*, ISGAN Synthesis Report, Annex 4, Task 3.2, <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63919.pdf>
- NREL (2013), *The Western Wind and Solar Integration Study Phase 2*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/55588.pdf>
- NREL (2012), *Power Plant Cycling Costs*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/55433.pdf>
- Poeller M., M. Obert and G. Moodley (2015), *Analysis of options for the future allocation of PV farms in South Africa*, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Eschborn.
- REE (2016), *Safe integration of renewable energies*, Red Eléctrica de España, http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/folletocecre_v5_ingles.pdf (accessed 07 March 2017)
- Spatuzza, A. (2015), “Brazilian wind’s big problem”, *Recharge New Energy*, No. 08/15, pp. 29-33, Horncastle.
- Terna (2017), *Ex post data on the actual generation*, <https://www.terna.it/it-it/sistemaelettrico/transparencyreport/generation/expostdataontheactualgeneration.aspx> (accessed 24 February 2017).

축약 및 약어

AC (교류)	alternating current
AGC (자동발전제어)	automatic generation control
AREMI (호주 재생에너지지도 인프라)	Australian Renewable Energy Mapping Infrastructure
CCGT (복합가스터빈)	combined cycle gas turbine
CECRE (재생에너지관제센터)	Control Centre For Renewable Energy
CSIR (과학 및 산업연구 위원회)	Council for Scientific and Industrial Research
CSP (태양열발전)	concentrated solar power
DC (직류)	direct current
DLR (송전선로 열용량)	dynamic line rating
DSO (배전계통운영자)	distribution system operator
DSR (수요자원)	demand side response
FACTS (유연송전시스템)	Flexible AC Transmission Systems
FRT (고장시 운전능력)	fault ride through
ISO (독립계통운영자)	independent system operator
KPI (핵심성과지표)	key performance indicator
LMP (지역한계가격)	locational marginal prices
NWP (수치 일기 예보)	numerical weather prediction
OCGT (개방형 가스 터빈)	open cycle gas turbine
PPA (전력구매계약)	power purchase agreement
PV (빛에너지는 전기에너지로 바꿔주는)	photovoltaic
PUCT (텍사스 공익서비스 규제위원회)	Public Utilities Commission of Texas
SCADA (원방감시제어)	Supervisory Control And Data Acquisition
SPS (고장파급방지장치)	special protective schemes
TSO (송전계통운영자)	transmission system operator
VRE (가변재생에너지)	variable renewable energy

측정단위

GW	gigawatt
km	kilometre
kV	kilovolt
kW	kilowatt
MW	megawatt
MWh	megawatt hour

Online bookshop

www.iea.org/books

PDF versions at 20% discount

E-mail: books@iea.org

International Energy Agency
iea

Secure Sustainable Together

Global Gas
Security
series

Energy
Technology
Perspectives
series

World
Energy
Outlook
series

Energy
Policies
of IEA
Countries
series

World
Energy
Investment
series

Energy
Statistics
series

Oil

Medium-
Term Market
Reports
series

Energy
Policies
Beyond IEA
Countries
series

Gas

Coal

Renewable
Energy

Energy
Efficiency
Market
Report

Korean Translation of Getting Wind and Sun onto the Grid © OECD/IEA, 2019

No reproduction, translation or other use of this publication, or any portion thereof, may be made without prior written permission. Applications should be sent to: rights@iea.org

‘태양과 바람의 전력망 수용’ 한국어 번역본은 공식 출판물인 영어 원본에서 번역되었다. IEA는 본 출판물의 영어 원본의 저자인 반면, IEA는 이 번역의 정확성이나 완전성 그리고 레이아웃에 대한 책임을 지지 않는다. 이 출판물은 한국전력거래소의 단독 책임 하에 번역 및 디자인 되었다.

This publication reflects the views of the IEA Secretariat but does not necessarily reflect those of individual IEA member countries. The IEA makes no representation or warranty, express or implied, in respect of the publication's contents (including its completeness or accuracy) and shall not be responsible for any use of, or reliance on, the publication. Unless otherwise indicated, all material presented in figures and tables is derived from IEA data and analysis.

This document and any map included herein are without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries and to the name of any territory, city or area.

IEA PUBLICATIONS,
International Energy Agency
Website: www.iea.org
Contact information: www.iea.org/aboutus/contactus

Cover design: IEA.
Photo credits: © Graphic Obsession
Typeset in France by IEA, March 2017



INTERNATIONAL ENERGY AGENCY

INSIGHTS SERIES 2017