

풍력발전에 따른 신뢰도 및 계통 운영문제

■ 문 승 일 / 서울대학교 전기공학부 교수

1. 서론

풍력발전은 전 세계적으로 가장 많이 보급된 신재생 에너지 전원이다. 유럽에서는 이미 2006년 기준으로 48,027MW의 풍력발전이 보급되었으며, 이는 우리나라의 총 설비량에도 비견될 수 있는 규모이다. (그림1)

유럽 각국 등의 풍력발전 선진국들은 이미 오래 전부터 풍력발전을 계통에 연계하여 운영해온 경험과 많은 관련 연구를 바탕으로 계통 운영을 효율적으로, 그리고 안정적으로 수행하기 위하여 계통연계기준(Grid-Code)을 정비해왔다.

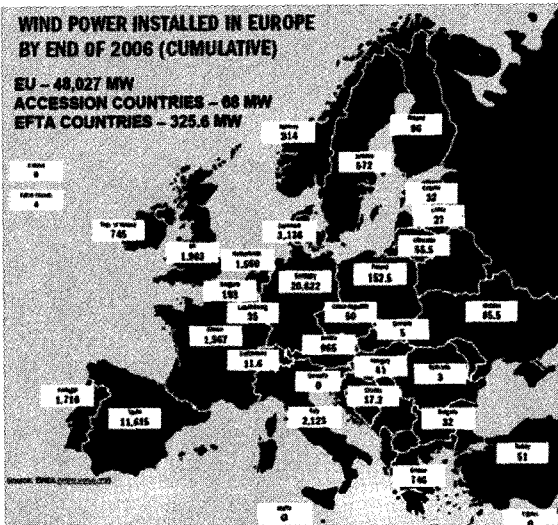


그림 1 유럽 풍력발전 도입용량(2006, EWEA Reports)

우리나라 역시 최근 신재생 에너지에 대한 관심이 높아지고 있는데, 2011년까지 총 1차에너지 중 신재생 에너지의 비율을 5%까지 확보할 것을 목표로 하고 있다. 특히 제주 지역의 경우 상대적으로 좋은 풍황과 지자체의 추진 의지 등이 결합되어 많은 풍력발전 관련 사업신청이 쇄도하고 있는 실정이다.

하지만, 우리나라의 경우 풍력발전에 대한 계통연계 기준이 별도로 마련되지 않았으며 대규모 풍력발전이 도입될 경우 계통운영방안에 대한 검토도 부족한 실정이다.

따라서, 해외의 주요 풍력선진국들의 Grid-Code 제정노력을 살펴보고, 오랜 경험에서 얻을 수 있는 정보들을 통해 우리나라 계통 운영에 시사하는 점을 검토해보고자 한다.

2. 각국의 주요 풍력발전 운영 사례

1) 독일계통과 풍력발전

독일은 2006년 기준, 약 20,622MW의 풍력발전이 보급되어있다. 이 중 약 42%에 달하는 양이 독일E.ON Netz Control Area에 집중되어 있다. (그림2)

풍력발전은 바람의 세기에 따라 그 출력의 변동이 영향을 받는 특성이 있다. 따라서 정확한 기상예측을 통해 풍력발전 예상량을 산정하는 것은 효율적인 급전 운영을 위해 중요한 문제이다. 유럽 각국에서는 이미

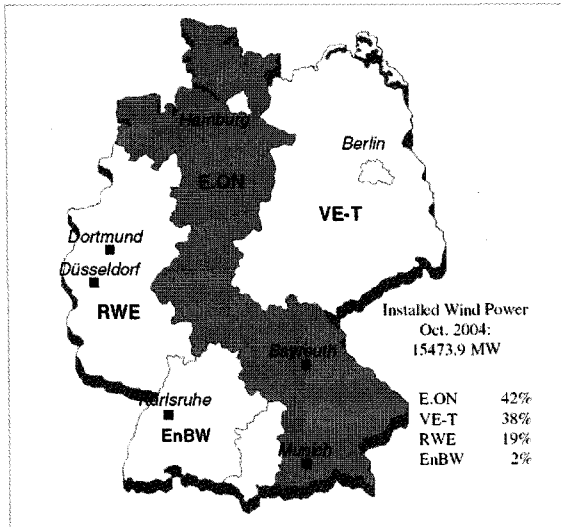


그림 2 독일의 4개의 Control Area(TSO)

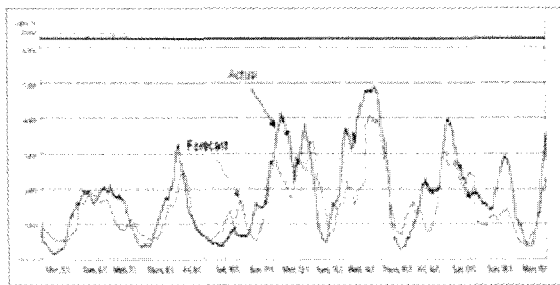


그림 3 E.on Netz 실제 출력과 예측량의 차이

Prediktor, Previento, eWind 등의 예측 소프트웨어를 통해 풍력발전량을 예측하려는 노력을 수행하고 있지만, 예측과 실제 출력의 편차는 결국 시간대별 예비력을 확보해야함을 의미한다.

E.on Netz의 경우 4800MW의 풍력발전량이 예측과 달리 15분안에 최대 500MW까지 갑작스러운 변화를 보인 사례가 관측된 바 있다. 따라서 독일 계통 운영자들은 수급균형을 상시 맞추기 위한 예비력을 Controlling Power라는 형태로 확보하고 있다.

다만 유럽의 경우 각 국가 간 계통연계가 잘 되어있는 관계로 이러한 Controlling Power를 대기 중인 발전기뿐만 아니라 확보할 필요는 없으며 언제든지 외부 Area로부터 필요량을 계약을 통해 구매할 수 있도록 충분한 선로 용량 확보에 더욱 신경을 쓰고 있다.

한편, 독일은 풍력발전기 자체의 기능상 요건에 대

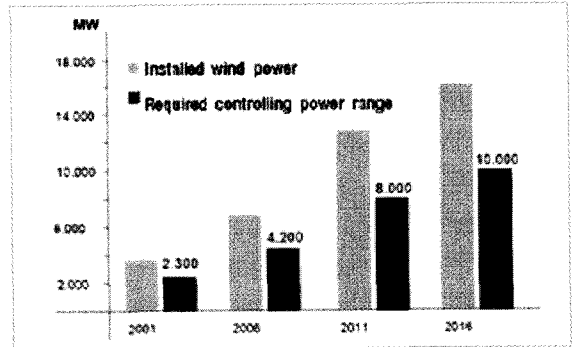


그림 4 독일 계통의 Controlling Power Range

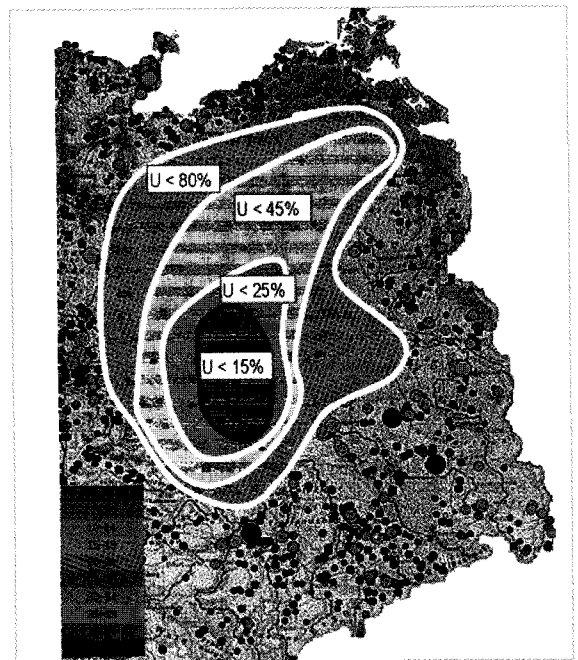


그림 5 3상단락사고 동안의 전압강하범위

한 기준도 마련하고 있는데 이는 각 국가의 계통 연계기준(Grid-Code)에서 유사하게 적용되고 있다.

최근 제작되는 풍력발전기들은 자체적으로 전력전자장치를 갖추고 있는데, 이 경우 많은 제어기능상의 효율을 가져올 수 있지만, 계통 사고 시 큰 사고전류가 흐르게 될 경우에 전력전자소자들의 안전을 위해 계통에서 즉각 분리할 수밖에 없다는 단점이 있다.

하지만, 풍력발전의 점유율이 높아짐에 따라 계통 사고로 인한 저전압 발생 시 풍력발전기를 차단할 경우 대규모의 풍력발전기가 동시에 탈락하는 상황이 벌

어질 수 있다. 다음 그림 5는 E.on Netz Control Area에서 3상 단락사고 발생시 영향을 받는 풍력발전기들의 범위를 보여준다. 0.8pu 이하의 저전압에서 차단을 허용하던 과거 독일의 계통운영기준을 적용할 경우 지역 용량의 약 60%에 달하는 2800MW의 풍력발전이 동시에 탈락하는 사태가 발생할 수 있다.

따라서 최근 풍력발전기들은 자체적으로 Fault Ride Through기능을 탑재하도록 설계되고 있으며, 이 기능을 갖출 것을 명시한 Grid-Code가 각국에서 제정된 바 있다.

2) 덴마크계통과 풍력발전

덴마크는 3,136MW의 풍력발전이 전국에 분포되어 있다. 상대적 양은 독일에 비해 적은 편이지만 작은 계통규모로 인해 풍력발전의 점유율은 더 높은 상황이다.

2005년 봄 덴마크에서 일어난 일은 대규모의 풍력발전을 운영할 때 발생할 수 있는 어려움을 잘 보여준다. 당시 덴마크 전 지역을 통과한 허리케인으로 인해 풍력발전기가 약 세시간여에 걸쳐 대부분의 용량이 운전 정지 상태에 들어간 사례를 살펴보자. 풍력발전기는 기기 보호의 차원에서 약 25m/s의 과풍속이 넘는 바람의 경우 운전을 정지하게 된다. 당시 덴마크 계통에서 운전 중이던 풍력발전기는 약 2,000MW 규모였으며,

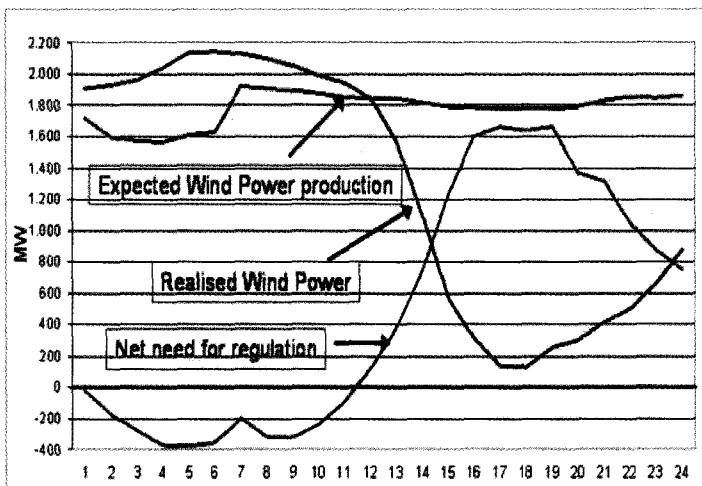


그림 6 허리케인이 통과하는 동안의 덴마크 시스템

이 중 대부분이 탈락하는 사태로 인해 약 1,700MW가 넘는 수급불균형이 갑자기 발생한 바 있다.

이는 여름철 태풍이 자주 지나가는 우리나라의 경우 고려해 볼 상황일 것이다.

3) Gotland 섬의 사례와 풍력발전

스웨덴의 Gotland섬은 최초의 HVDC가 설치된 곳으로 유명하다. 최근 Gotland섬은 새롭게 주목 받고 있는데, 약 90MW(160기)의 풍력발전기가 설치되어 안정적으로 운영 중이기 때문이다. 섬 전체 최대 부하가 160MW수준인 것을 감안하면 매우 높은 점유율이라고 볼 수 있다. Gotland 역시 풍력발전의 불규칙한 출력 변동 특성 때문에 주파수 제어에 어려움이 예상되었으며, 또한 대부분 고정속도 방식의 유도발전기형 풍력발전기가 설치된 관계로 각종 전압 이벤트에 상대적으로 취약한 특성이 있었다. 하지만, Gotland섬은 섬 내부에 VSC base HVDC를 설치하여 계통을 보강하여 주파수 및 전압 측면에서 계통의 안정성을 가져왔다.

대규모의 풍력발전을 성공적으로 운영 중인 Gotland는 일년중 일부의 시간은 부하량 보다도 많은 풍력발전량으로 인해 육지로 역송전을 하기도 한다.

특히 우리나라의 제주에 대규모의 풍력발전을 설치하게 된다면, Gotland섬에서의 적절한 계통 설비 증축 및 역송전 사례를 상당부분 참고할 수 있을 것이다.

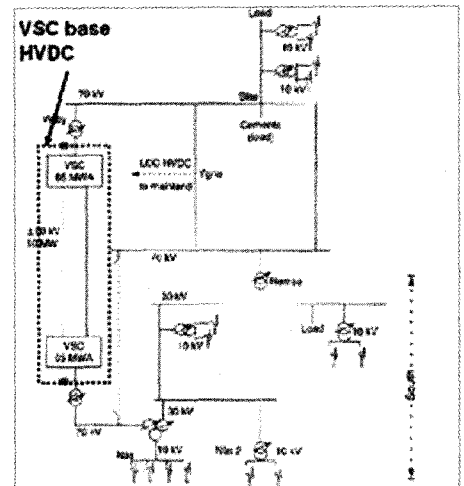


그림 7 Gotland Power System

3. 각국의 Grid-Code 정비 현황

풍력발전의 계통연계 시 계통 안정도 및 신뢰도를 보장하기 위해 풍력발전 선진국들은 각 국의 Grid-Code를 풍력발전을 고려하여 정비하였다. 이러한 노력은 지금까지도 계속되고 있는데 보다 원활한 계통운영을 위한 그들의 노력을 볼 수 있다.

Grid-Code에는 풍력발전기가 갖추어야 할 기술적 요건 뿐 아니라, 그 동안의 계통 운영 경험에서 비롯된 운영상의 어려움을 해결하기 위한 노력들이 담겨있다.

각 국의 Grid-code는 세부적인 항목에서 차이는 있지만, 공통적으로 Fault-Ride Through 기능에 대한 기준 제시, 역률 유지 범위 제시, 주파수에 따른 운전범위 제시, 그리고 주파수를 고려한 출력조정 등의 내용을 담고 있다.

따라서 각국의 Grid-Code 중 주요 사항에 대해 살펴해보도록 한다.

1) Fault Ride Through

앞서도 언급한 바와 같이 기존에는 계통에서 사고 발생에 따른 저전압 시(UN<80%) 풍력발전은 즉각적으로 계통에서 분리되는 것을 허용하였다. 하지만, 풍력발전 점유율이 높아질수록 대규모 발전력의 갑작스러운 탈락 가능성이 발생함에 따라 연이은 전압붕괴 발생의 가능성마저 우려되는 실정에 이르자, 각국은 풍력발전기가 Fault Ride Through 기능을 갖출 것을 요구하고 있다. 다음은 독일 Grid-Code에서의 Fault Ride Through에 관한 규정을 보여준다. 주목할 점은 독일의 경우 Fault Ride Through 뿐 아니라 사고발생후 발전기 유효전력 생산량의 회복속도도 규정으로 정하여 빠른 정상상태 회복을 꾀한다는 것이다.

2) 역률 유지 범위

역률 유지는 고정속도방식의 유도발전기형 풍력발전기를 사용할 경우 중요한 이슈가 될 수 있다. 이중여자 유도형 발전기와는 달리 무효전력을 제어할 수 있는 능력이 별도로 없고

별도의 보상장치를 이용해 무효전력을 보상해야하기 때문에 계통연계시 일정한 역률 유지 범위를 정해주는 것은 계통의 전압 안정도를 위해 중요한 문제이다.

3) 주파수에 따른 운전범위

각국의 Grid-Code는 공통적으로 계통 주파수가 정상범위에서 벗어날 경우 그 지속시간을 고려하여 풍력발전기의 계통 접속 유지/분리여부를 명시하고 있다.

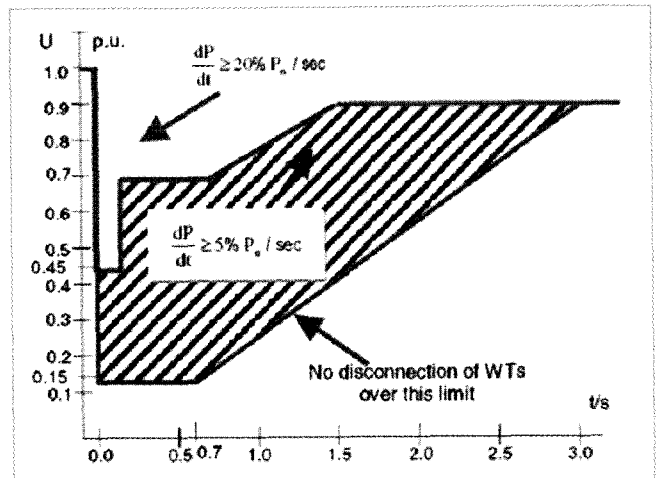


그림 8 Fault Ride Through & Active Power Recovery(독일)

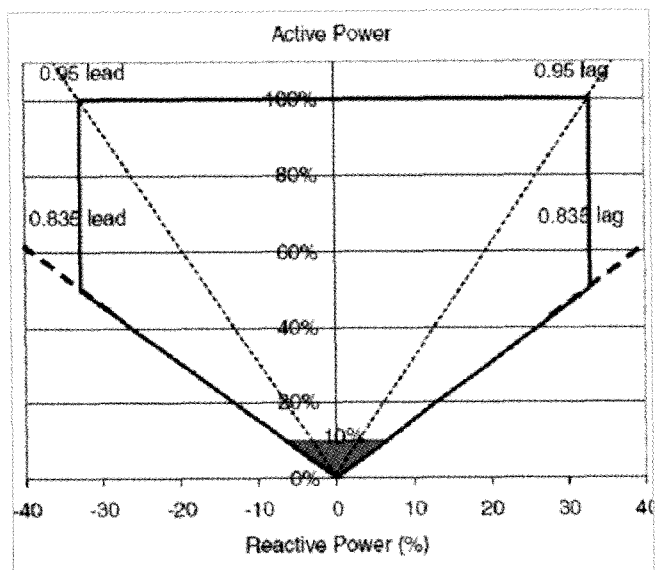


그림 9 풍력발전기의 역률유지범위 규정(아일랜드)

표 1 계통주파수와 지속시간에 따른 접속유지 규정(캐나다)

Frequency (Hz)	Duration
$F < 55.5$	Instantaneous
$55.5 \leq F < 56.5$	0.35 second
$56.5 \leq F < 57.0$	2 seconds
$57.0 \leq F < 57.5$	10 seconds
$57.5 \leq F < 58.5$	1.5 minutes
$58.5 \leq F < 59.4$	11 minutes
$59.4 \leq F \leq 60.6$	Permanent
$60.6 < F \leq 61.5$	11 minutes
$61.5 < F < 61.7$	1.5 minutes
$F \geq 61.7$	Instantaneous

4) 주파수를 고려한 출력 제어 규정

아일랜드의 경우 각 풍력발전단지는 TSO의 요청에 의해 유효전력출력을 조정할 수 있는 능력을 갖추도록 하고 있다. 이는 계통 주파수가 변동할 때 풍력발전기들이 출력조정에 참여하여 주파수를 정상범위로 회복시키도록 하는 일종의 의무를 부여하는 것이다.

주목할 점은 정상 주파수 범위에서도 가능한 유효전력 출력의 약 95%정도만을 내도록 정하고 있다는 것인데, 이를 통해 평상시 풍력발전이 예비력을 일정부분 제공하도록 하는 것이다.

5) 전압에 따른 무효전력 제어 기준

독일의 경우 연계점 전압이 정상범위를 벗어날 경우 이를 보상하기 위한 무효전력 제어동작을 풍력발전기가 수행하도록 하고 있다. 즉 저전압/고전압 발생 시는 2%의 전압변동 당 정격의 2%만큼의 무효분 전류를 공급/소모하도록 규정하고 있다.

이를 위해서는 풍력발전기에 적절한 무효전력 제어 능력이 요구된다고 할 수 있다.

4. 결 론

해외 풍력발전선진국들의 계통 운영 경험과 그에 따른 계통연계기준 제정현황을 간략하게 살펴보았다.

우리나라 역시 풍력발전을 대규모로 도입하고자하

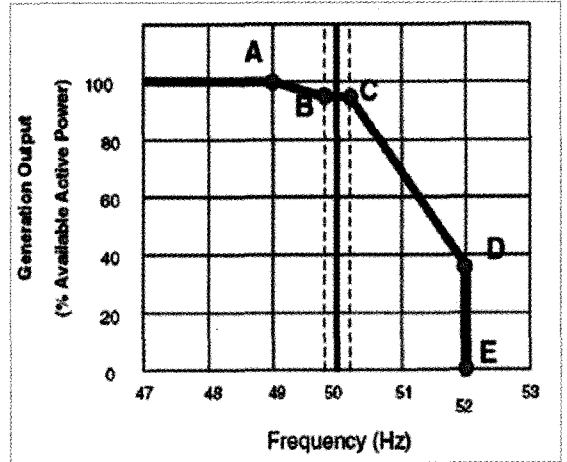


그림 10 주파수를 고려한 유효전력 출력제어(아일랜드)

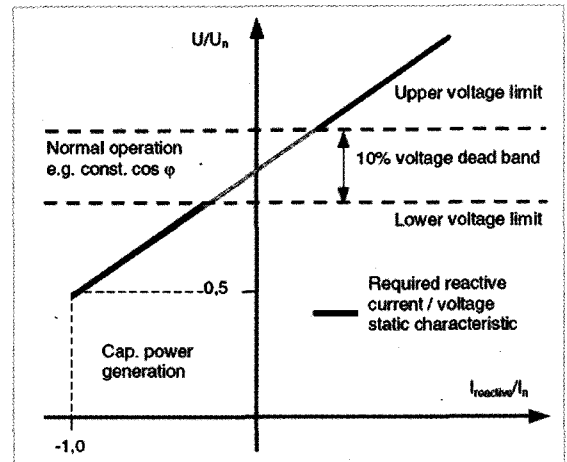


그림 11 전압범위에 따른 무효전력 제어(독일)

는 시점에 있어 이러한 해외 각국의 사례는 충분히 검토되어야 할 필요가 있다.

전력계통 운영의 큰 목적은 전력을 신뢰성 있게 공급하면서, 계통의 안정도를 유지하는 것이다. 따라서 풍력발전 역시 이러한 목적 하에서 계통에 연계, 운영되는 최적의 방안을 찾아야 할 것이다.

감사의 글

본 기획시리즈는 산업자원부 지정 '전력신뢰도/품질 연구센터'에서의 재정적인 지원을 받아 진행되었습니다. 본 센터에는 경상대, 서울대, 숭실대, 전북대, 한양대의 교수들과 대학원생들이 연구원으로 참여하고 있습니다.