

계통연계 풍력발전의 해외 기준 분석 및 검토

최영도, 광노홍, 전영수, 전동훈
한전 전력연구원

Global Reference and Analysis of Wind Tubines Connected to Grid

Young-Do Choy, No-Hong Kwak, Young-Soo Jeon, Dong-Hoon Jeon
Korea Electric Power Research Institute (KEPRI)

ABSTRACT

현재 풍력발전 기술은 전 세계에서 가장 빠르게 성장하고 있는 기술로서 2010년도에 세계 보급량은 200GW를 넘을 것으로 추정되고 있다. 이에 우리나라도 풍력발전 기술 집약에 전력하고 있지만 풍력단지에 대한 운영 경험은 매우 제한적이며, 연계 기준 수립에 대한 기초가 부족한 실정이다. 따라서 한국 계통의 특성을 고려한 연계 기준 및 최적 운영 방안 수립을 위한 다양한 국가에서 적용하고 있는 풍력 발전 단지에 대한 연계 및 운영 기준에 대한 검토가 필요한 실정이며 세계 각국에서 적용되고 있는 풍력 발전기의 계통 연계 기준을 분석 및 검토하였다.

1. 서론

세계 각국의 풍력 발전기의 계통연계 운영 경험에 비해 아직까지 우리나라의 풍력 발전 단지에 대한 운영 경험은 매우 제한적이며, 연계 기준 수립에 대한 기초가 부족한 실정이다. 따라서 국내 계통의 특성을 고려한 연계 기준 및 최적 운영 방안의 수립을 위해서는 다양한 국가에서 적용하고 있는 풍력 발전 단지에 대한 연계 및 운영 기준에 대한 검토가 필요한 실정이며 이에 독일, 덴마크, 아일랜드 등 세계 각국에서 적용되고 있는 풍력 발전기의 계통 연계 기준에서 주요 내용을 분석하고 이를 통해 국내 풍력 발전기의 계통 연계 및 운영 기준 수립 시 필요한 기술적 또는 운영상의 요건들을 확인 할 필요성이 있다. 풍력 발전기에 적용되는 grid code는 크게 static requirement와 dynamic requirement로 나눌 수 있는데, 이 중 static requirement는 풍력 발전기의 연속적인 운전에서 적용되는 사항들로 구성되며 전압 조정, 전압 품질, 역률 제어, 유효 전력 출력 제어, 주파수 및 flicker 제어가 이에 해당한다. Dynamic requirement는 계통에 fault와 같은 disturbance가 발생하는 경우 fault 동안 또는 이후에 적용되는 사항으로, fault ride through capability와 fault recovery capability가 이에 포함된다. 이에 따라 본 논문에서 각 grid code는 해당 항목으로 구분하여 각각에 대해 풍력발전기 측면에서 가장 크게 제한되는 경우를 확인하였고 이러한 각 grid code에 대한 비교 분석을 통해 일반적인 풍력 발전기의 계통 연계에 대한 기술적인 고려사항을 확인할 수 있었다.

또한 최근의 풍력 발전기의 대형화 추세와 기술 개발에 따라 점차 늘어나고 있는 대규모 풍력 발전 단지의 송전 계통 연

계와 함께 도입 초기 소형 발전기들의 배전 계통 연계가 혼재되어 나타나고 있는 Denmark, Eltra and Elkraft system의 grid code중 송전계통을 대상으로 하는 유효 무효전력에 대한 규정 및 풍력발전단지 연계 계통 특성을 분석하고 향후 우리나라 풍력 발전 단지의 계통 연계 기준 수립에 적절히 활용할 계획이다.

2. 해외 풍력발전 계통연계 기준

2.1 Power factor regulation

Power factor regulation은 풍력 발전기의 무효전력 출력에 대한 운영 기준으로 풍력 발전 단지가 정상적인 운전 조건에서 주어진 power factor를 만족하며 운전하도록 규정하고 있고, 그림 1은 각국의 power factor regulation 규정을 정리하고, 비교한 그림이다. 정격 용량의 유효 전력 출력에서는 가장 넓은 범위의 power factor regulation 규정을 가지고 있는 나라는 Canada임을 확인할 수 있으며, 0.9 lagging에서 0.95 leading의 범위에서 무효 전력 제어 규정을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 유효 전력 출력이 일정(70%) 이하로 감소하면 Ireland의 grid code가 가장 넓은 범위의 역률 제어를 규정하고 있음을 확인할 수 있다.

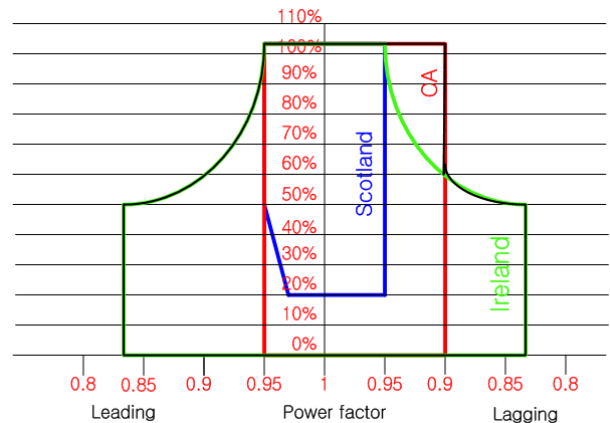


그림 1. 각국의 무효 전력 제어 규정 비교

2.2 유효전력 출력제한 규정

풍력 발전 단지의 유효 전력 제어는 풍력 발전기의 출력 변동이 계통에 연계된 기존 발전기들의 운전 예비력에 의한 보상 범위를 벗어날 경우 필요하며, 이 경우 계통의 안정적인 운

영을 위해 풍력 발전 단지의 유효 전력 출력을 제한하게 된다.

독일의 E.ON Netz는 유효 출력 제어에 대해 풍력 발전 단지가 계통으로부터의 분리 없이 적어도 연계 용량의 10%/min 이상의 출력 제어가 가능해야 함을 규정하고 있다. 또한 일반적으로 계통에서 발전량이 부하량에 비해 큰 경우 이는 주파수의 증가로 확인할 수 있으므로, 계통의 주파수가 50.5Hz 이상으로 증가할 경우 유효 전력 출력을 그림 2와 같이 감소할 것을 규정하고 있으며, 주파수의 변동이 감소할 경우 그에 따라 다시 유효 전력 출력을 회복할 것을 규정한다.

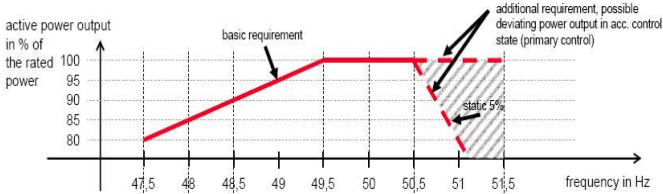


그림 2. E.ON Netz의 유효 전력 제한 규정

덴마크의 Eltra and Elkraft system의 grid code는 계통에 연계되는 풍력 발전 단지에 대해 Farm controller에 의한 유효 전력 출력 제어를 요구하고 있으며, 이에 따라 각 풍력 발전 단지는 정격 출력의 20~100% 범위에서 set point로 유효 전력 출력을 제어할 수 있어야 한다. 또한 5분내 평균 출력 오차가 정한 출력의 5%내로 제어되어야 하며, 분당 조정 범위가 정격 출력의 10%~100%로 조정 가능해야 한다. 단, 이러한 규정은 풍력 발전기의 풍속에 따른 실제 출력 가능량을 전제로 하며, 그 내에서 수행될 수 있도록 한다. 이를 위해 풍력 발전 단지에 적용될 수 있는 유효 전력 출력 제어를 위한 각 function들은 다음과 같다.

2.2.1 Absolute production constraint

풍력 발전 단지의 출력량의 절대량을 제한한다. 이에 따라 풍력 발전 단지는 계통 운영자가 요구할 경우, 정격 용량의 20~100% 범위에서 특정 출력량 이하로 풍력 발전 단지의 출력을 제한해야 한다.

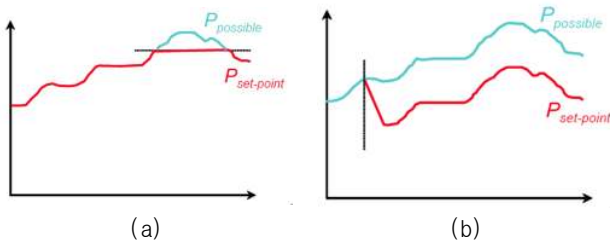


그림 3 (a) Absolute production constraint 예시
(b) Delta production constraint 예시

2.2.2 Delta production constraint

전력 계통의 예비력 확보를 위해 풍력 발전 단지의 가능한 최대 출력량에서 일정 부분을 감발하여 운전하며, 이때 각 풍력 발전 단지의 출력 감발량은 계통 운영자의 지시에 따르며, 전력 계통의 각 발전기들은 수급 균형을 유지하기 위해서 일정 부분 출력을 감소하여 운전하고, 부하가 급작스럽게 증가하는 경우 출력을 증가시키게 된다.

2.2.3 Balance & Stop regulation

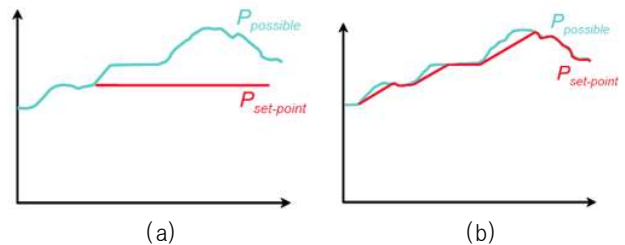
Balance regulation는 풍력 발전 단지가 계통운영자의 지령에

따라 출력량을 증발/감발 할 수 있어야 하며, 이때 계통 운영자의 지령은 풍력발전단지의 증감발 속도를 고려하여 설정된다. 이를 통해 풍력 발전 단지는 기존 발전기와 같이 급전 지시의 대상이 되며, 이러한 제어 지령은 시스템의 비상 상황에서의 행동 지침에는 우선순위가 뒤지지만, 수급 균형을 맞추기 위한 절차 중에는 최상위에 위치한다.

Stop regulation 풍력 발전 단지가 현재의 출력을 유지한다. 다만, 풍속이 현재 수준보다 감소할 경우에는 적용되지 않으며, 풍속이 증가할 때에 풍력 발전 단지의 출력을 해당 시점의 수준으로 유지하는 목적으로 사용된다.

2.2.4 Power gradient constraint

풍속의 급격한 변화에 따라 풍력 발전 단지의 출력이 변동할 때 이러한 출력 변동 속도를 계통 운영자가 정한 값으로 제한한다. 이는 우선적으로 풍속이 4~5m/s를 넘어 풍력 발전 단지가 연계 운전을 시작한 이후 급격하게 출력이 증가하는 것을 제한하는 목적을 가지고 있다.



(a) Stop regulation 예시
(b) Power gradient constraint 예시

2.3 voltage range and control

계통에 연계된 풍력 발전 단지는 정격 전압과 함께 일정하게 정해진 전압 범위 내에서 정상 운전을 유지해야 한다. 이때 전압 범위는 송전 계통의 전압 수준에 따라 정해지게 되며, 이에 따라 각 국가마다 서로 다르게 정의되고 있다. 아래의 표는 이렇게 각국의 grid code에서 정의된 풍력 발전 단지의 운전 유지를 위한 전압 범위를 정리한 것이다.

표 1 각 전압 범위에 따른 풍력 발전기 연계 운영 유지 기준

	Continuous operation		Limited time periods*	
Denmark	400kV	-10% ~ 5%	400kV	-20% ~ 10%
	150kV	-3% ~ 13%	150kV	-10% ~ 20%
	132kV	-5% ~ 10%	132kV	-10% ~ 18%
Germany	400kV	-8% ~ 10%	X	
	220kV	-13% ~ 12%		
	110kV	-13% ~ 12%		
Ireland	400kV	-13% ~ 5%	X	
	220kV	-9% ~ 12%		
	110kV	-10% ~ 12%		
Scotland	400kV	±5%	400kV	±10%
	275kV	±10%	275kV	±15%
	132kV	±10%	132kV	±20%
UK	400kV	-10% ~ 5%	400kV	±10%
	275kV	±10%	275kV	±10%
	132kV	±10%	132kV	±10%
Canada	아직까지 정해진 기준이 없음			

이는 주어진 각 기준 전압 수준에 대해 풍력 발전 단지의 안정적인 운영 범위를 의미하며, 풍력 발전 단지는 정해진 전압 범위 및 시간 기준에서 연속적인 운전이 가능해야 한다

2.4 fault ride through capability

fault ride through capability는 각국의 Grid code에서 정의하고 있는 발전기의 사고 시 발전기 보호 특성으로, 짧은 시간의 fault 등으로 기인하는 저전압과 같은 system의 abnormal condition에 대해 발전기가 계통의 안전한 복구를 위해 연결을 유지할 것을 의미한다. 이에 따라 해당 특성을 적용한 발전기는 계통 사고 시 계통에 지속적으로 전력을 공급하며 광역 정전을 유도하지 않고 계통의 빠른 회복에 기여할 수 있게 된다. 그림 5는 세계 각국의 grid code 해당 국가 계통의 특성을 반영하여 저전압의 크기와 지속시간에 대해서 약간의 차이를 갖지만, 일반적으로 fault duration 동안의 0~20% 정도 전압강하를 고려하고 있으며, fault clear 후 500~1000ms 정도의 전압 회복 시간을 설정하고 있다는 점에서 공통점을 갖는다. 따라서 제주 계통의 fault ride through 기준 설정에서도 이러한 fault ride through capability의 특성을 기본으로 하고 있고, 이 밖에도 독일과 스페인의 경우는 fault ride through capability와 관련하여 사고 시 무효 전력 생산을 의무화하고 있으며, 덴마크, 아일랜드의 경우는 fault의 종류를 세분화하여 규정을 적용하는 등 세부 규정을 특별히 정의하기도 하는데, 한국의 연계 기준 수립 시에도 이와 같이 세부 규정의 제정을 통해 계통의 안정적인 운영을 확보할 수 있어야 한다.

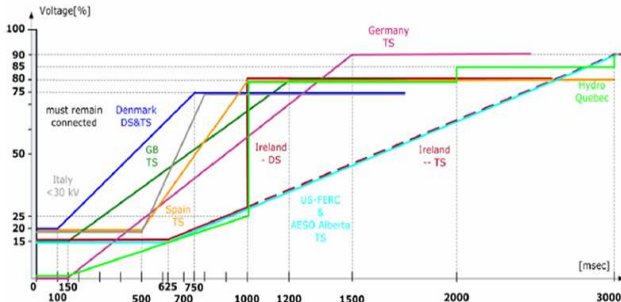


그림 5. 세계 각국의 FRT 규정의 비교

2.5 기타 연계 기준

2.5.1 주파수/전압에 따른 운전 영역

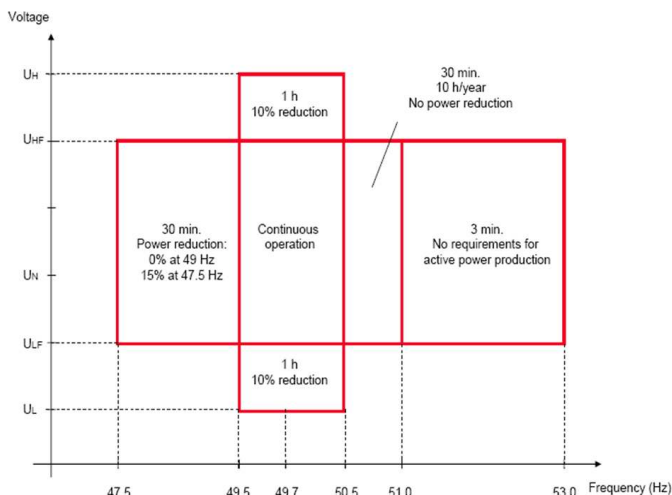


그림 6. 주파수/전압에 따른 운전 영역

덴마크의 grid code는 풍력 발전 단지에 대해 계통의 전압 및 주파수가 정상 범위에서 벗어나는 경우에도 일정 시간 동안 정격 운전을 유지해야 함을 규정하고 있고 이를 Dimensioning Voltage and Frequency라고 하며, 그림 6은 이러한 규정을 나타낸다.

2.5.1 Voltage Flicker

Flicker는 연계 지점의 RMS 전압의 순간적이고 급격한 변동으로 정의할 수 있으며, 발전기, 선로, 변압기 또는 capacitor bank등의 순간적인 switching에 의해 일어나는 송전 계통의 step change에 대해 연계된 부하의 전압 변동이 정의하는 범위에서 벗어나게 되면 이를 voltage flicker로 판단할 수 있다.

계통에 연계된 풍력 발전 단지의 전압 flicker에 대한 기여도는 short term flicker 지수(Pst: 10분 동안 flicker contribution의 weighting average) 측면에서 0.3 이하로 할 것을 규정하고 있으며, long term flicker 지수(Plt: 2시간 동안 flicker contribution의 weighting average) 측면에서는 0.2 이하로 할 것을 규정하고 있다. 이러한 flicker에 대한 실제 규정을 포함하고 있는 계통은 Denmark가 거의 유일하며, Ireland와 Germany의 경우는 거의 이에 대한 규정이 없다.

3. 결론

본 논문에서는 해외의 계통연계 기준을 분석하고 대규모 풍력 발전 단지의 계통 연계에 필요한 각 규정에 대해 구체적으로 비교 분석을 수행하였다. 이를 통해 각국의 grid code의 각 규정들은 기술적인 측면에서 차이가 있었음을 알 수 있었고, 송전 계통의 지역적 특성 차이를 반영하고 있음을 알 수 있었다. 풍력 발전 단지에 대한 체계적인 연계 기준 수립을 위해서는 각각의 규정에 대한 개별적인 적용만을 고려할 것이 아니라, 하나의 전체적인 기준에서 협조를 고려해야 하며, 대상 계통의 특성에 대한 고려가 필요할 것이다.

참고 문헌

- [1] Bernard, S.; Beaulieu, D.; Trudel, G. "Hydro-Quebec gridcode for wind farm interconnection" Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, Page(s):1248 - 1252
- [2] Fagan, E.; Grimes, S.; McArdle, J.; Smith, P.; Stronge, M. "Gridcode provisions for wind generators in Ireland" Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE Page(s):1241 - 1247
- [3] Erlich,.; Bachmann, U. "Gridcode requirements concerning connection and operation of wind turbines in Germany" Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE / Page(s):1253 - 1257
- [4] Rabelo, B.; Hofmann, W. "Simple fault ride-through capability analysis for wind power plants under different gridcode requirements" Power Electronics and Applications, 2007 European Conference Page(s):1 - 10