

풍력 발전기의 Fault Ride Through 연계 기준 수립에 관한 연구

표기찬*, 박진우*, 문승일*, 전영수**, 곽노홍**
 서울대학교*, 한전 전력연구원**

A Study on Determination of Fault Ride Through Capability for Wind Turbine Generators

Gi-Chan Pyo*, Jin-Woo Park*, Seung-Il Moon*, Young-Soo Jeon**, No-Hong Kwak**
 Seoul National University*, Korea Electric Power Research Institute**

Abstract - 풍력 발전기의 계통 연계 기준에서 Fault Ride Through 규정은 사고 시 계통의 응답 특성을 결정하기 때문에 해당 계통의 특성을 반영하여 결정되어야 한다. 이에 여기에서는 세계 각국의 풍력발전기에 적용되는 Grid code에 대해 분석하고, 이를 바탕으로 FRT 규정의 수립에 필요한 기술적 요건에 대해 검토한 후, 해당 규정 수립을 위한 방법론을 제시한다. 이때, 구체적인 parameter 설정은 제주계통을 대상으로 PSS/E를 이용한 안정도 모의 결과에 따라 사고 시 계통의 전압 특성을 반영할 수 있도록 하였다.

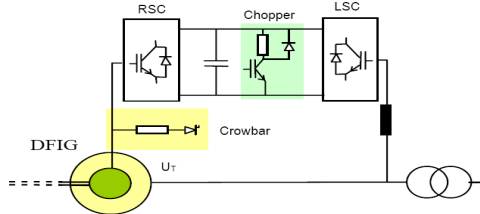
1. 서 론

일반적으로 Fault Ride Through(FRT) requirement는 세계 각국의 계통 연계 기준(Grid code)에서 정의하고 있는 발전기의 사고 시 계통보호 특성으로, 짧은 시간의 fault 등으로 기인하는 저전압과 같은 system의 abnormal condition에 대해 발전기가 계통의 안전한 복구를 위해 연계를 유지할 것을 의미한다. 이러한 FRT 특성은 발전기에 대한 추가적인 설비 및 제어를 필요로 하지만 사고 시 계통에 지속적으로 전력을 공급하여, 계통 회복 시 안정도를 상승시키게 되므로 신재생 에너지원에도 점차 그 적용이 확대되는 추세에 있다. 이에 따라 풍력 발전기 또는 풍력 발전 단지의 계통 연계 시 적용되는 각국의 Grid code는 기존과는 달리 풍력 발전기에 대해 사고 후 계통의 안정적인 복구를 위해 연계 운영을 유지할 것을 요구하고 있다. 우리나라의 경우도 풍력 발전을 비롯한 신재생 에너지원의 점유율이 높아짐에 따라 계통의 안정적인 운영을 위해 풍력 발전 단지의 계통 연계 기준(Grid code)을 제정하려는 움직임이 활발하게 진행되고 있으며, 같은 이유에서 FRT에 대한 구체적인 기준 설정이 중요한 문제로 부각되고 있다. 특히 우리나라에서는 풍력 발전 보급의 상당 부분이 제주 계통에 집중되어 있는데, 제주 계통의 경우 전체적인 발전 용량이 작고 각 풍력 발전 단지의 연계 모선에서의 SCR이 낮아서, 풍력 발전 점유율의 증가 시에 FRT 규정이 적절히 적용되지 않을 경우, 사고 시 풍력 발전 단지의 대규모 탈락에 의해 계통이 불안정해지고 광역 정전이 발생하는 등 문제가 발생할 수 있다. 이에 제주 계통을 포함한 한국 계통에서 전반적인 풍력 발전 점유율 확대를 위해서는, 적절한 FRT 규정을 수립, 적용하는 것이 필요하며, 이러한 FRT 규정은 사고 시 계통의 응답 특성을 결정하기 때문에 계통 연계 기준에 포함된 다른 어떤 규정보다도 각 계통의 특성을 반영하여 결정되어야 한다. 이에 여기에서는 세계 각국의 풍력 발전에 적용되는 Grid code에 대한 분석을 바탕으로, FRT 규정의 수립에 필요한 기술적 요건에 대해 검토하고 규정 수립을 위한 방법론을 제시할 수 있도록 한다. 또한 이를 제주 계통에 적용하여 PSS/E를 이용한 안정도모의를 진행하고 사고 시 계통의 전압 특성을 고려한 기초적인 FRT 규정을 제안하도록 한다.

2. 본 론

2.1 Fault Ride Through Capability

오늘날 가장 널리 이용되고 있는 풍력 발전기는 DFIG(Doubly Fed Induction Generator) 방식으로 Fault Ride Through protection device을 포함하면 아래의 <그림1>과 같은 형태로 구성된다.



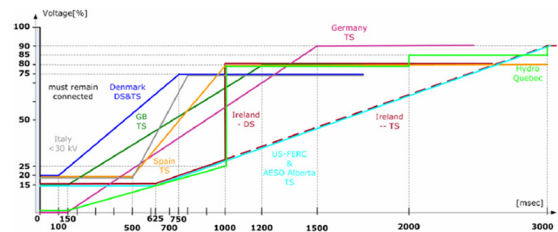
<그림 1> DFIG system with FRT protection

기존의 DFIG 방식의 풍력 발전기는 전력 계통의 short circuit 사고 등에 의해 풍력 발전기 또는 단지의 연계 지점 전압이 떨어지는 경우, 인버터와 컨버터의 단자 전압에 영향을 주어 전력 전자 기기에 과도한 사고 전류가 흐를 수 있다. 따라서 기존의 Grid Code에서는 DFIG 방식의 풍력 발전기들은 전력 전자 기기의 보호를 위해 사고 시 풍력 발전기를 계통에서 분리할 것을 규정하였다. 하지만 점차 풍력 발전기의 계통 점유율이 상승하고 대규모 풍력 발전 단지가 계통에 연계됨에 따라, 일시적인 사고에 대해 풍력 발전기를 계통에서 분리하는 것은 사고 후 계통의 안정적인 복구를 방해하게 된다. 이를 보완하기 위해 최근 DFIG 방식의 풍력 발전기는 위와 같이 Crowbar 등의 같은 사고 전류 우회 회로와 DC-chopper 등을 포함하고 있으며, 이를 이용하여 전력 전자 기기를 보호하면서 풍력 발전기가 계통에 연계 운영을 유지할 수 있도록 한다. 최근의 세계 각국의 풍력 발전기 연계 기준은 이를 적극적으로 활용하여, 단락 사고 시 전압 강하에도 풍력 발전기의 연계 유지를 위해 일정 범위의 전압 강하를 정의하였고, 이를 Fault Ride Through Capability라고 한다.

2.2 제주도의 계통 특성을 고려한 FRT 기준 설정

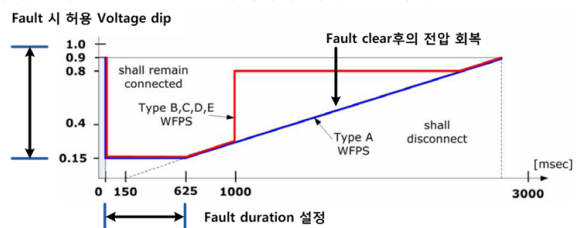
2.2.1 해외 FRT capability 기준 설정 사례

구체적인 fault ride through capability 설정을 위해서는 구체적인 논의에 앞서 해외의 해당 기준 설정 사례를 간략히 살펴보는 것으로 해당 규정이 가져야 하는 기본적인 특성에 대해 확인해 볼 필요가 있다. 이에 따라 위에서 정리한 세계 각국의 grid code의 내용을 바탕으로 fault ride through capability 특성을 정리하면 다음의 그림과 같이 요약할 수 있다.



<그림 2> 해외 각국의 Fault Ride Through Capability

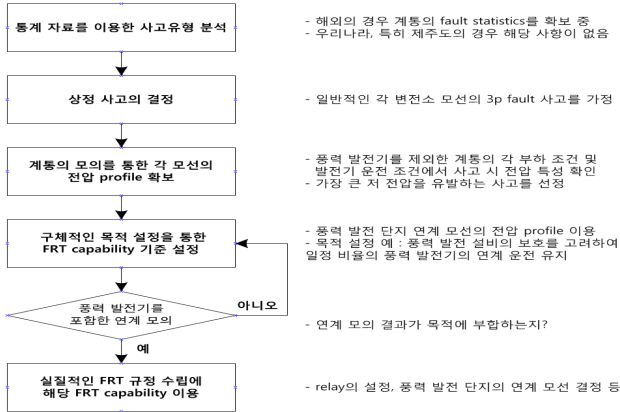
세계 각국의 Grid Code는 해당 국가 계통의 특성을 반영하여 저전압의 크기와 지속시간에 대해서 약간의 차이를 갖지만, 사고 시 최저 voltage dip, fault duration, fault clear 후의 전압회복을 고려한다는 점에서 공통점을 갖는다. 따라서 제주 계통의 fault ride through 기준 설정에서도 이러한 fault ride through capability의 특성을 기본으로 하고, 구체적인 parameter의 설정을 통해 제주 계통의 특성을 반영할 수 있도록 해야 한다. 다음의 그림은 Fault Ride Through capability 설정 시 고려해야 하는 주요 특성을 정리하여 나타낸 것이다.



<그림 3> FRT capability 결정 시 주요 고려사항

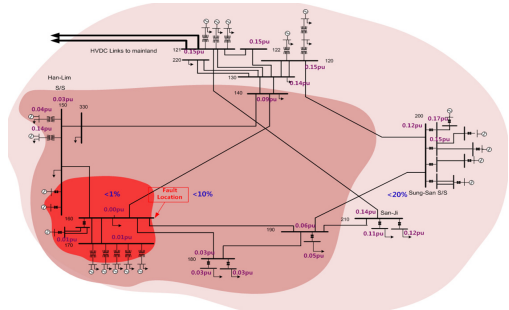
2.2.2 사고 시 제주도 계통의 전압 특성에 따른 FRT 기준 설정

이상적으로 FRT 기준에서 최저 전압이나 fault duration은 최대한 넓은 범위를 포함하는 것이 계통 측면에서는 좋으나, 이는 전력 전자 기기에 대한 무리한 동작 특성을 요구하게 되므로, 여기에서는 풍력 발전 단지의 fault ride through 기준 설정과 관련하여 사고 시 제주 계통의 전압특성을 이용한 parameter 결정 방법을 제안한다. 이는 해외의 사례를 따른 것으로 Denmark, France, Norway, Sweden 등의 선진국에서는 계통에서 발생하는 다양한 사고에 대한 종합적인 통계자료를 작성하고 있으며, fault ride through 기준의 설정에 이러한 통계 결과를 이용하고 있음을 명시하고 있다. 하지만 제주계통의 경우 통계 자료가 부족하여, 연계 모의를 통해 계통의 모든 변전소를 대상으로 각 변전소 사고 시 각 모선에서의 전압 강하를 확인하고 이를 이용하여 fault ride through 기준 설정에 필요한 parameter를 결정하였다. 이러한 fault ride through 규정의 parameter 결정 방법을 개략적으로 나타내면 다음의 그림과 같다.



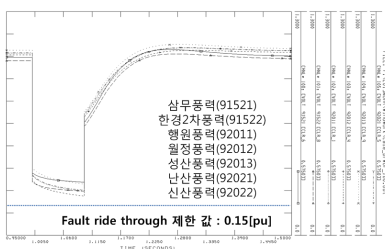
〈그림 4〉 FRT capability의 설정

이때, 상정사고는 모든 변전소 모선에 대해 주 보호 설비의 사고 차단 시간을 고려하여 6cycle 동안의 3p-fault를 가정하였으며, 다음은 안덕 변전소 모선의 사고를 상정하였을 때 계통 내 각 모선의 전압 profile을 나타낸다.



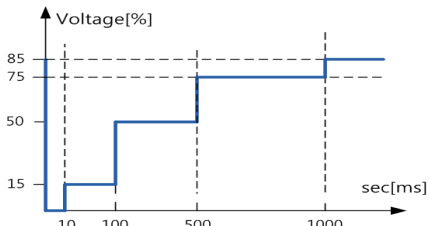
〈그림 6〉 사고 시 계통 전압 profile - 안덕모선 사고

위의 그림에서 확인할 수 있듯이, 안덕 변전소 모선의 사고는 계통 전체에 큰 전압 강하를 유발하며, 이는 계통의 모든 모선의 사고 중 가장 큰 경우가 된다. 따라서 안덕 모선의 사고를 기준으로, 앞서 설명한 parameter 설정 방법에 따라 안덕 모선 사고 시 풍력 발전 연계 모선에서의 전압 곡선을 이용하여 fault ride through 기준을 설정하도록 한다. 다음의 그림은 안덕 모선 사고 시 풍력 발전 연계 모선에서의 전압 곡선을 보여주며, 여기에서는 이를 이용하여 전압 회복률을 정의하였다.



〈그림 7〉 사고 시 계통의 전압 회복 특성

다음은 위의 예시에 따른 PSS/E에서 풍력 발전기의 전압 계전기 설정을 보여준다. 해당 설정에 따라 계통에 연계된 풍력 발전 단지는 0.15[pu]까지의 전압 강하를 유발하는 사고에 대해 0.1초의 fault duration 동안 및 1초까지의 전압 회복 시간 동안에 연계 운전을 유지하게 되며, 이를 풍력 발전기의 fault ride capability가 된다. 이때, fault duration은 제주 계통의 계전기 설정을 기준으로 6cycle의 을 설정하였다.

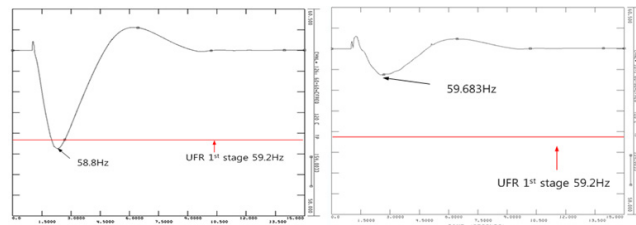


〈그림 8〉 FRT capability의 설정 예

또한, 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.

2.3 PSS/E를 이용한 FRT 기준 설정에 따른 응동 특성 비교 모의

이상에서는 사고 시 제주 계통의 전압특성을 고려한 기초적인 fault ride through 기준을 제시하였다. 이에 여기에서는 해당 fault ride through 기준의 변화가 계통의 안정도에 어떠한 영향을 주는 지 풍력 발전 단지와 제주 계통의 연계 모의를 통해 확인할 수 있도록 한다. 이를 위해 PSS/E를 이용하여 동일한 case와 상정 사고를 대상으로 PSS/E 기본 설정과 비교하여 모의를 진행하였으며 그 때의 주파수 변화 및 계통의 응동 특성 변화를 확인하였다. 아래의 그림은 각 경우에서 계통 주파수의 변화를 보여준다. 기존의 PSS/E 기본 설정을 이용한 모의에서는 9개의 풍력 발전 모두 탈락하며 load shedding이 있었지만, 그림에서 보는 바와 같이 새로 정한 fault ride through 기준을 이용한 모의에서는 사고 후에도 실제로 2개의 풍력 발전기를 제외한 모든 발전기가 연계 운전을 유지하고 있으므로, 보다 빠른 주파수 회복 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 사고 시 회복과 관련하여 계통의 안정도 특성이 향상되었음을 나타내며, 이에 따라 이상에서 제시한 fault ride through 기준 설정을 위한 방법론이 타당함을 보여준다.



〈그림 8〉 사고 시 계통의 주파수 변화

3. 결 론

본 논문에서는 해외의 연계 기준 제정 방식을 근거로 제주 계통의 전압 특성을 고려한 fault ride through 기준 설정에 대해 논의하며, 기초적인 fault ride through capability 설정을 위한 방법론을 제시하고 모의를 통해 이를 검증하였다. 하지만 이러한 방법론 역시 합리적인 fault ride through 기준 설정을 위한 하나의 예를 제시한 것이며, 보다 나은 결과를 위해 해외 사례와 같이 통계자료를 이용한 효율적인 기준 설정 및 풍력 발전 단지의 연계 구성에 필요한 구체적인 목적 설정이 필요할 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

[1] I. Erlich, H. Wrede, C. Feltes, "Dynamic Behavior of DFIG-Based Wind Turbines during Grid Faults", IEEJ Trans. IA, Vol. 128, No. 4, pp.396-401,2007
 [2] Frorin Iov, Anca Daniela Hansen, Poul Sorensen, Nicolas Antonrio Cutululis, "Mapping of grid faults and grid codes", Riso National Laboratory, Technical University of Denmark, July 2007.