

풍력발전기 Fault-Ride Through 검토를 위한 과도안정도 해석

박진우*, 표기찬*, 이성규**, 이강완***
 서울대학교*, 한국전력공사**, (주)대화기술사***

Transient Stability Studies on Fault-Ride Through of Wind Turbine Generators

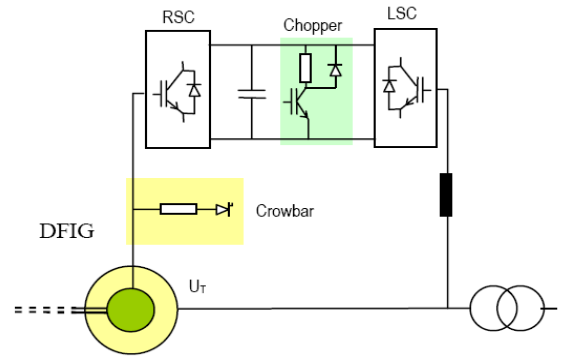
Jin-Woo Park*, Gi-Chan Pyo*, Seung-Keu Lee**, Kang-Wan Lee***
 Seoul National University*, KEPCO**, DAEHWA Engineering & Consultants Co., Ltd.***

Abstract - 신재생에너지인 풍력발전이 우수한 실효성 및 경제성으로 인하여 보급이 지속적으로 증가되고 있다. 전력계통에서 발생하는 단락 및 지락고장은 고장 인접 풍력발전 설비 보호를 위해 풍력발전기를 계통으로부터 분리한다. 전력공급 신뢰도와 계통운영의 안정도를 향상시키기 위해서 풍력발전기가 Fault-ride through 기능을 갖도록 하여 이를 보완한다. 본 논문에서 과도안정도 해석 프로그램을 이용하여 Fault-ride through 중요 변수인 전압저하 정도 및 고장지속 시간 등을 모의하여 실제 계통에 적용 가능한 모형을 제안한다.

환기로 회전자계를 조정하여 최적 상태로 유지할 수 있다. 반면에 전력 전자변환기의 특성으로 인하여 과전류에 매우 민감하다. DFIG 형태의 풍력터빈발전기에 인접한 전력계통에 단락 또는 지락 고장이 발생하게 되면 DFIG 형태의 풍력터빈발전기 단자전압이 저하되어 고정자와 회전자 전류가 과격하게 증가하게 된다. 이와 같은 과전류로부터 전력전자 변환기를 보호하기 위해 평상시 개방상태에 있는 스위치(crowbar)를 닫아 전류를 우회시킨다. 즉, crowbar와 DC-Link chopper는 DFIG 형태 풍력발전기의 fault-ride through 기능을 구현토록 하는 전력전자 설비다. <그림 2>는 Fault-ride through 기능을 구현한 DFIG 형태 풍력발전기 모델을 나타낸 것이다.

1. 서 론

풍력발전은 실효성 및 경제성이 우수한 신재생에너지로 보급이 확대되고 있다. 특히 제주도는 비교적 우수한 풍력 여건으로 인하여 풍력발전 점유율이 빠른 속도로 증가되고 있다. 풍력발전기는 대부분 비동기 형태의 유도발전기가 이용되고 있으며 고정자는 동기발전기와 같이 철심과 3상 권선으로 구성되어 있고 회전자는 유도전동기와 같은 농형 또는 권선형 구조로 되어있다. 농형은 SCIG(Squirrel Cage Induction Generator)이고 권선형은 대부분 DFIG(Double-Fed Induction Generator) 형태이다. 오늘날 널리 이용되고 있는 대부분의 풍력발전기들은 발전효율, 전력공급 신뢰도 및 전력품질 면에서 유리한 DFIG 형태 풍력발전기 들이다.

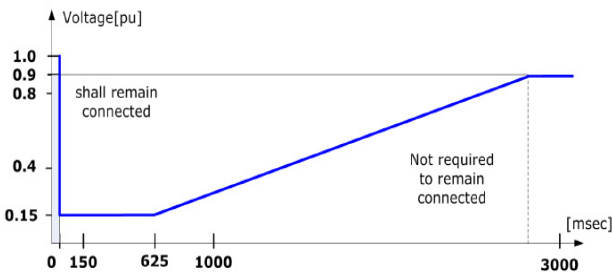


<그림 2> Fault-Ride Through 구현 DFIG형태 풍력발전기 모델

전력계통에 단락 또는 지락사고가 발생하면 인접 풍력발전기 단자전압이 저하되어 DFIG 형태의 발전기 컨버터와 인버터에 과도한 전류가 흐르게 된다. 따라서 DFIG 전력전자 설비를 보호하기 위해 풍력발전기를 정지 연계 계통으로부터 분리하게 된다. 풍력발전소 규모가 커지면서 이와 같이 풍력발전기를 정지하여 계통으로부터 분리하게 되면 전력공급 신뢰도와 안정도가 저하되는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 DFIG 형태의 발전기에 Fault-ride through 기능을 부여하여 어느 정도 전압강하와 지속시간을 설정하여 저전압 상태에서 계통연계가 지속되도록 한다. Fault-ride through 전압저하 정도와 이의 지속시간은 연계 전력계통 및 풍력발전기 특성에 따라 최적의 값이 정해질 수 있다. <그림 1>은 DFIG형태 풍력발전기 Fault-ride through 기능을 나타낸 것이다.

2.2 Fault-ride through 운전 실태

풍력발전소와 연계된 전력계통의 안정도 향상 등을 고려한 Fault-ride through 규정은 연계 전력계통 형태 및 규모에 따라 그리고 풍력발전기 특성에 따라 고장지속시간, 전압저하 정도 및 고장 회복시간 등이 다르다. <표 1>은 풍력발전에 비교적 적극적인 유럽 및 북미 전력계통에 적용되고 있는 Fault-ride through 기능을 요약한 것으로 발전 규모에 따라 배전 또는 송전계통에 연계되어 있다.



<그림 1> DFIG형태 풍력발전기 Fault-Ride Through

본 논문에서는 안정도 해석 프로그램으로 제주 전력계통 풍력발전소들이 연계되어 운전되는 환경에서 단락고장을 모의하여 적정 Fault-ride through 변수 들을 추정한다.

<표 1> 각국 Fault-ride through 기능

국가	연계 전압	고장지속 [msec]	전압저하 [%]	회복시간 [초]
덴마크	배전/송전	100	25	1
아일랜드	배전/송전	625	15	3
독일	배전/송전	150	0	1.5
영국	배전/송전	140	15	1.2
스페인	송전	500	20	1
이탈리아	35kV 이상	500	20	0.3
미국	송전	625	15	2.3
온타리오	송전	625	15	-

2. 본 론

2.1 Fault-Ride Through 기능

DFIG형태 풍력터빈발전기는 SCIG형태와 달리 별도의 소프트시동기(Soft starter) 없이 회전자 권선에 연결된 전력전자변환기 제어로 컷인 전류 걱정 없이 발전기를 안정되게 기동할 수 있다. 발전 역률도 IGBT(Insulation Gate Bipolar Transistor)를 통해 제어되는 전력전자변

2.3 풍력터빈발전기들을 포함한 전력계통 과도안정도 해석

전력계통 과도안정도 해석은 전력계통에 발생한 외란 즉, 단락고장, 전력설비 탈락 또는 개폐기 동작과 같은 사고가 발생한 경우 모션 또는 발전기의 전압, 주파수, 상차각, 유효전력, 무효전력 및 여자전압 등 전력계통의 상태변화를 해석하여 안정도를 판별하는 것이다. 안정도 평가는 전기고장으로 나타나는 설비의 열적 과부하, 전압 및 전류 등이 설비의 내력 이내로 유지될 것인지와 주파수, 전압 및 계통특성과 같은 동특성 등이 제어 가능한 계통운영 한계치 이내로 유지될 것인지를 판단하

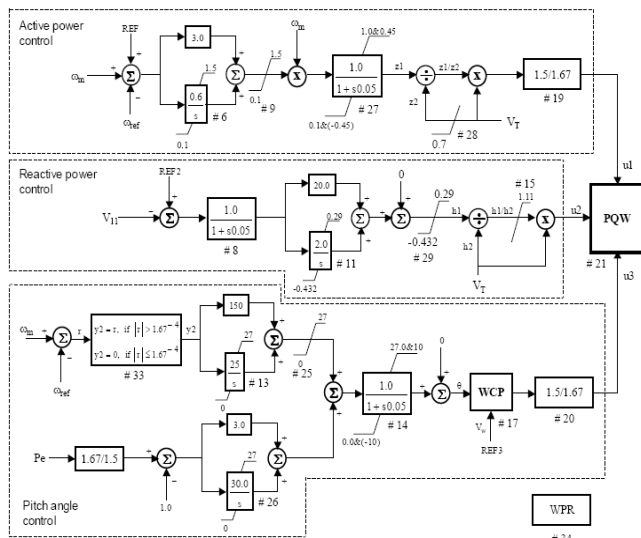
는 것이다. Fault-ride through에 관련한 안정도 평가는 풍력발전소 연계 송전계통 단락고장 발생시 계통이 동기화력을 유지할 수 있는 과도 안정도지표, 임계고장제거시간 및 전압저하 정도 등을 조사한다.

제주 전력계통은 450MW 부하수준을 가정하여 HVDC가 내륙과 연계되어 HVDC 최소 안정운전 조류인 40MW가 송전되는 것으로 모의하였다. <표 2>는 제주 전력계통에 이미 설치되어 운전되고 있거나 또는 앞으로 설치예정인 풍력발전소 연계 154kV변전소 및 발전용량을 나타낸 것으로 총 발전용량은 169.5MW를 가정한 것이다.

<표 2> 제주 기설 및 신설예정 풍력발전소

풍력발전소	연계변전소	발전용량[MW]	소계[MW]
남읍	신제주	3.0	3.0
한경#1	한림CC	6.0	
신창	한림CC	1.5	52.5
해상(삼부)	한림CC	30.0	
한경#2	한림CC	15.0	
행원#1	성산	9.0	
월정	성산	1.5	51.0
성산	성산	13.5	
난산	성산	15.0	
고덕	성산	12.0	
동북	조천	45.0	63.0
행원#2	조천	18.0	
	합계		

풍력발전시스템은 154kV 변전소에서 22.9kV 전용선로를 통하여 계통에 연계된 것으로 하고 각각의 풍력발전단지를 <그림 3>과 같이 단일 풍력터빈모델로 모의한 것으로 주요 기능은 주파수-유효전력 제어, 전압-무효전력 제어 및 기계출력-피치각(pitch angle) 제어 블록으로 구성된 것으로 하였다.



<그림 3> DFIG형태 풍력발전기 모델

2.4 송전계통 3상단락고장 안정도 평가

안정도 해석에서 단락 상정사고에 대한 전력계통 안정도를 평가하는 것으로는 과도안정도평가지표(Transient stability index), 임계고장제거시간(Critical fault clearing time) 및 계동지표(Damping index) 등이 있다. 여기서는 과도안정도지표와 임계고장제거시간을 이용하며, 과도안정도평가지표는 과도상태 하에서 감쇄운동에너지(Kinetic energy decreasing)와 증가운동에너지(Kinetic energy increasing) 간의 상관관계로부터 안정 또는 불안정 상태를 평가하는 방법이다. 임계고장제거시간은 계통에 발생한 고장을 보호계전기에 의해 제거하는 안정도가 유지되는 최대고장제거시간으로 보호계전기와 차단기 차단시간에 의해 정해진다.

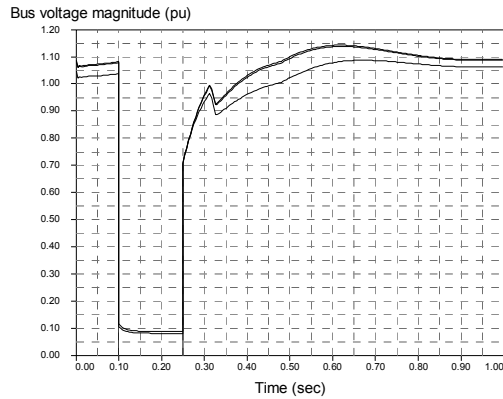
<표 3>은 과도안정도 해석 소프트웨어를 이용하여 조사한 제주 154kV 송전계통 3상단락 상정사고 안정도 평가 결과이다. 여기서 보여준 결과는 제주 전력계통의 순동예비력(spinning reserve)의 대부분을 담당하는 것으로 알려져 있는 HVDC 변환소 인접 전력계통 상정사고시

비교적 안정도가 취약한 상태이다.

<표 3> 154kV 3상단락사고 안정도 평가

154kV 3상단락고장	안정도평가지표	임계고장제거시간(Cycle)
제주 C/S	47.90	12.5068
제주 T/P	47.90	12.5068
동제주	49.03	13.1748
산지	50.67	13.8428
신제주	55.44	17.5166
안덕	58.58	23.1943
조천	58.69	20.8564
남제주	59.22	25.1982
한라	60.12	26.8682
성산	61.73	32.5459
한림 CC	63.90	180.00
신제주	64.22	180.00

<그림 4>는 안정도 해석으로 풍력발전소 들이 연계되어 있는 한림 CC 154kV 모선 3상단락고장을 모의 한 것으로 고장 지속시간은 150msec를 가정한 것이다. 모의 결과 시간에 따른 전압은 각각 한경#2 22.9kV 모선, 한림 CC 22.9kV 모선 및 한림 CC 154V 모선 전압을 나타낸 것이다. 이결과 풍력발전소가 연계된 154kV 모선 임계고장제거시간은 신제주, 조천, 성산 및 한림 CC 154kV 모선에서 각각 17.5266, 20.8564, 32.5456 및 180.0사이클이다.



<그림 4> 한림 CC 154kV 모선 3상단락고장 인접 모선 전압

3. 결 론

안정도 해석 결과 풍력발전소가 연계된 154kV 송전계통 3상단락고장 최소 임계고장제거시간은 신제주154kV 모선 3상단락고장에서 17.5266사이클이다. 우리나라 154kV 계통 보호계전 방안은 순시요소에 의해 고장이 제거되도록 규정하고 있다. 따라서 Fault-ride through 저전압 레벨은 제주와 같은 소규모 전력계통인 경우 정격전압의 0%에서 고장지속시간은 여유 시간 등을 감안하여 9사이클인 150msec로 규정하는 것이 바람직해 보인다.

앞으로 제주는 물론 내륙 전력계통에서도 풍력발전이 지속적으로 증가될 것임을 고려하여 예상 가능한 모든 전력계통의 적정 Fault-ride through 모형을 추정하는 지속적인 연구가 요구된다.

[참 고 문 헌]

[1] 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.
 [2] 이성규, 이준순, 박진우, 이강완, "소규모 전력계통에서 풍력발전 증대에 따른 계통주파수 영향", 대한전기학회, 2007년도 대한전기학회전력기술부문회 추계학술대회 논문집, 2007. 11
 [3] 이성규, 박진우, 이강완, "풍력발전시스템 보호계전방안 연구", 사단법인 전력계통보호제어연구회, 2008년도 전력계통보호제어연구회 학술 및 기술 발표회논문집, pp113-120, 2007. 11
 [4] DSATools, "TSAT Model Manual", Powertech Labs Inc., April 2007