

풍력발전소 고장전류 해석

김종겸\*, 이성규\*\*, 이상민\*\*\*, 이강완\*\*\*  
 강릉대학교\*, 한국전력공사\*\*, (주)대화기술사\*\*\*

Fault Analysis at a Wind Power Plant in the Transmission Network

Jong-Gyeum Kim\*, Seung-Keu Lee, Sang-Min Lee\*\*\*, Kang-Wan Lee\*\*\*  
 Kangnung National University\*, KEPCO\*\*, Daehwa Engineering & Consultants Co., Ltd.\*\*\*

**Abstract** - 전력계통에서 풍력발전 점유율이 지속적으로 확대되고 있다. 고장전류 계산은 풍력발전소 및 연계 전력계통 보호계전 방안 수립 등을 포함한 전력계통 구성 방안 수립 등에 이용되는 기초 자료이다. 현재 건설되고 있는 풍력발전소 관련 자료를 토대로 고장전류를 계산하여 실효성 있는 계통계획 기초 자료로 이용하고자 한다.

1. 서 론

청정에너지 필요성 증대에 따라 풍력발전 보급이 지속적으로 확대되고 있다. 규모의 대화가 이루어지고 있는 풍력발전소를 안정적으로 운전하기 위해 적정 보호계전 방안이 채택되어야 한다. 보호계전 방안 수립 및 보호계전기 최적 운영을 위한 정정은 전력계통 특성과 계통의 고장전류 크기 및 분포에 따라 정해진다. 전력계통에서 보호계전기에 의한 고장 구간 또는 고장설비 판단은 고장전류, 전압, 위상각 및 방향 등으로 알 수 있다. 전력계통의 고장전류는 대부분 발전기 및 전동기와 같은 회전자기에 의해 발생된다.

풍력발전소 고장전류 크기는 풍력발전 규모와 연계 지점의 등가 고장전류 크기에 따라 결정된다. 현재 건설되고 있는 풍력발전소 관련 자료를 조사하여 풍력발전소 및 연계 전력계통의 고장전류를 계산함으로써 실제적이고 실효성 있는 최적 보호계전 방안 수립은 물론 앞으로의 보호계전기 정정에 이용하고자 한다.

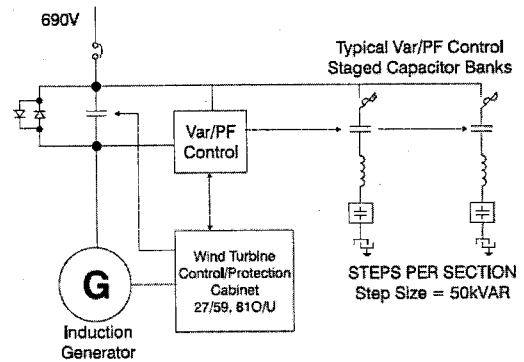
2. 본 론

2.1 풍력발전기 특성

풍력발전은 자연현상으로 얻어지는 밀도가 낮고 매우 불규칙한 풍력에너지를 기계에너지로 변환 이를 발전기와 연결하여 전력을 생산하는 것이다. 풍력발전기는 크게 3가지로 분류할 수 있다. 풍력발전 초기 단계에 대부분의 풍력발전에 널리 이용되었던 발전기는 구조가 간단하고 설치비용이 저렴한 반면 발전효율 및 전력품질 면에서 비교적 불리한 SCIG(Squirrel Cage Induction Generator), 최근에 설치되는 대부분의 풍력발전 형태인 전력전자변환기를 설치하여 회전자 권선에 공급되는 전류를 제어할 수 있어 발전 효율도 높고 전압 제어가 용이한 DFIG(Doubly-Fed Induction Generator), 그리고 오늘날 빠른 기술개발에 힘입어 설치 점유율이 점점 증가되는 동기발전기 형태 즉, 대형 전력전자변환기를 이용하여 동기발전기에서 생산된 불규칙한 전압과 주파수의 교류전력을 직류전력으로 변환하고 다시 이 같은 직류전력을 연계 전력계통 전압과 주파수에 적합하도록 교류전력으로 변환하는 동기발전기 형태이다. 우리나라의 기존 풍력발전은 대부분 SCIG와 DFIG 형태이며 앞으로 신설될 풍력발전은 효율이 좋고 전력품질 면에서도 유리한 DFIG 형태가 주류를 이룰 것으로 판단된다. 다음은 SCIG 및 DFIG 특성을 열거한 것이다.

2.1.1 SCIG 풍력발전기

SCIG 풍력발전기는 풍속이 4 내지 5m/sec 이상에서 자동으로 기동된다. 자동 기동은 게이트(Gate)제어로 동작되는 사이리스터소프트기동기가 이용된다. 이와 같은 소프트기동기는 컷인(Cut-in)전류를 저감하여 발전기가 안정적으로 계통에 투입되게 한다. 풍력터빈발전기가 기동된 다음에 발전기 단자 전압과 주파수가 연계 전력계통과 일치하면 발전기 연계 접점이 폐로되고 소프트기동기는 발전기로부터 분리되어 발전기가 정상 운전상태가 된다. <그림 1>은 SCIG 형태 풍력발전기 단선도이다. 유도발전기는 대부분 무효전력을 받아들이는 진상역률 92%정도로 운전된다. 전력용콘덴서는 발전기 단자에서 지상역률 98~99%정도로 유지시켜 발전기 단자전압이 적절히 유지되도록 한다.



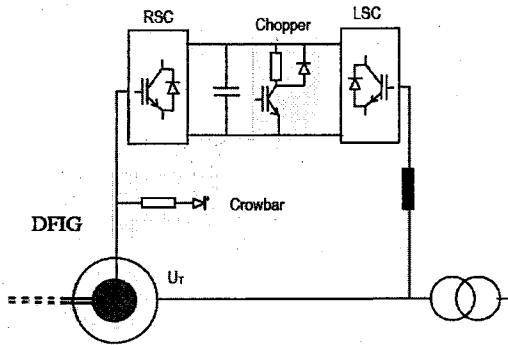
<그림 1> SCIG 형태 풍력발전기 단선도

2.1.2 DFIG 풍력발전기

DFIG 풍력발전기는 별도의 소프트기동기 없이 회전자 권선에 연결된 전력전자변환기 제어로 컷인 전류 걱정 없이 발전기를 안정되게 기동할 수 있다. 발전기 역률은 전력전자변환기로 회전자계를 조정하여 최적 상태로 유지할 수 있다. 일반적으로 전력전자변환기는 과전압 및 과전류에 매우 민감하다. 단락 또는 지락고장에 의해 계통전압이 저하하면 짧은 순간 유도발전기 고장자와 회전자 전류가 과격하게 증가한다. 이와 같은 과전류로부터 전력전자변환기를 보호하기 위해 평상시 개방상태에 있는 Crowbar스위치를 닫아 전류를 우회시킨다. 단락 또는 지락과 같은 고장으로 회전자에 과전류가 가해지면 이와 같은 스위치 작용으로 짧은 순간 회전자전류에 단락전류가 흘러 SCIG와 같은 특성을 갖게 된다.

이울러 외부 전력계통 단락 및 지락과 같은 고장에서 전력전자변환기 보호는 물론 전력공급의 신뢰성과 계통 운영의 안정성을 높일 수 있도록 고장으로 풍력발전기

전압이 저하되어도 즉각 계통에서 분리되지 않고 일정 시간동안 계통연계를 지속시키는 Fault ride through 기능을 갖추어야 한다. <그림 2>는 DFIG 형태 풍력발전기 단선도이다.



<그림 2> DFIG 형태 풍력발전기 단선도

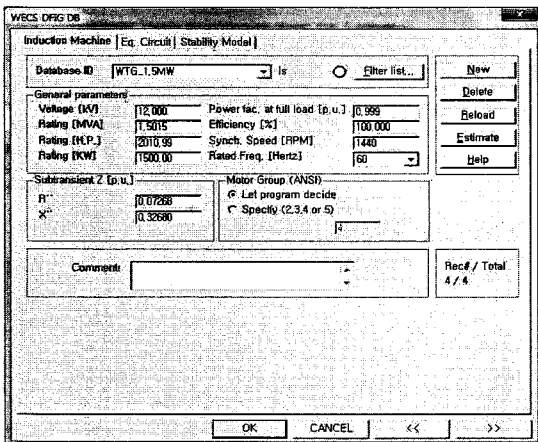
### 2.2 모의 풍력발전기 및 풍력발전소

모의 풍력발전소는 용량 1.5MW DFIG(Doubly-Fed Induction Generator)형태의 풍력발전기 51대가 병렬로 연결되어 총 발전용량 76.5MW이다. <표 1>은 대상 풍력발전기 제원을 나타낸 것이다.

<표 1> 풍력발전기 제원

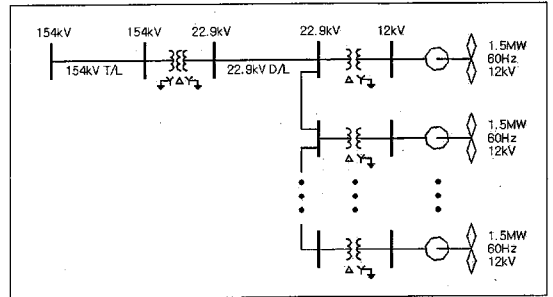
풍력터빈	정격회전수	16.7rpm
	운전풍속	4~25m/s
	로터직경	77m
	허브높이	80m
	출력제어 방식	Pitch adjustment
발전기	종류	유도발전기, DFIG
	정격용량	1.5MW
	전압, 전류	12kV, 72.2A
	역률	99.9%
	과도임피던스 X'd	0.3268p.u.
	차과도임피던스 X"d	0.3268p.u.

<그림 3>은 풍력발전소를 모의하기 위한 풍력발전기 데이터베이스를 나타낸 것이다.



<그림 3> 1.5MW 풍력발전기 데이터베이스

풍력발전기 단자전압은 12kV이며 발전기 출력은 1.5MVA 승압변압기(Step-up transformer)를 거친 다음 22.9kV배전선로를 통해 풍력집합변전소(Wind farm collector substation) 22.9kV모선에 연결된다. 전력계통과는 22.9/154kV 배전변압기에 의해 송전전압으로 승압하여 ACSR 330mm<sup>2</sup>, 공장 16km, 154kV송전선로 1회선으로 연계되고, 전력회사와의 154kV연계 지점 등가고장 MVA는 3상단락인 경우 1,601MVA  $\angle 82.5^\circ$ 로 가정한다.



<그림 4> 풍력발전소 개요

이와 같은 등가고장MVA는 일반적인 우리나라 154kV 모선 등가고장MVA에 비해 작다. 이는 검토 대상 모의 풍력발전소가 전원으로부터 비교적 멀리 떨어져있어 연계 지점의 등가임피던스가 크기 때문인 것으로 판단된다. <그림 4>는 모의 풍력발전소 개요를 나타낸 것이다.

### 2.3 고장전류 계산 종류

전력계통 고장전류는 이의 적용 대상 및 계산 방법에 따라 북미대륙에서 적용되는 IEEE규정을 따르는 것과 유럽 등에서 적용되는 IEC규정을 따르는 2가지가 있으며 계산 결과는 약간의 차이가 있다. 본 연구에서는 상대적으로 풍력발전 비중이 더 많은 유럽을 고려하여 IEC규정에 의한 고장전류를 계산하였다. IEC규정에 의한 고장전류는 이용 목적 및 계산 방법에 따라 다음과 같은 4가지 종류로 분류한다.

- Initial short circuit current : 단락 및 지락고장 발생 직후 나타나는 RMS대칭고장전류,
- Maximum asymmetrical fault current : 직류 성분이 포함된 최대 비대칭고장전류,
- Breaking fault current : 차단기 개방시간이 고려된 RMS대칭고장전류,
- Steady state fault current : 과도특성이 사라진 후 동기임피던스에 의해 나타나는 RMS대칭고장전류

보호계전기 정정에 이용되는 고장전류는 차단기 개방 시간을 고려한 RMS대칭고장전류인 Breaking fault current이다. 우리나라에서 이용되고 있는 고압 및 특고압 차단기 차단시간은 대부분 3사이클이다. 따라서 3사이클 차단기 Breaking fault current를 계산한다.

### 2.4 고장전류 계산 결과

고장전류 계산은 3상단락 및 1상지락고장을 모의하였다. <표 2>는 고장전류 계산 결과를 나타낸 것이다. 고장전류 계산 결과 풍력발전소 또는 풍력발전기에서 발생하는 고장전류 보다는 연계전력계통 또는 풍력발전기로 유입되는 고장전류가 상대적으로 크게 나타났다. 앞에서 제시된 것과 같은 풍력발전소 연계지점의 등가임피던스가 비교적 큰 형태인 경우와 반대로 연계지점 등가임피던스가 작은 경우는 풍력발전소로부터 또는 고장 풍력발전기로부터 유입되는 고장전류가 상대적으로 매우 작게 될 것이다.

**<표 2> 76.5MW 풍력발전소 고장전류 계산 결과 [단위:A]**

고장점	고장전류 원	3상단락	1상지락
계통 연계점 154kV 모선	고장점 고장전류	6,402	4,647
	연계 전력계통으로부터	6,002	4,453
	풍력발전소로부터	401	194
풍력발전소 154kV 모선	고장점 고장전류	4,287	2,858
	연계 전력계통으로부터	3,871	2,673
	풍력발전소로부터	416	185
풍력발전소 22.9kV 모선	고장점 고장전류	14,042	9,652
	연계 전력계통으로부터	10,779	8,155
	풍력발전소로부터	3,294	1,510
풍력발전기 12kV 모선	고장점 고장전류	1,356	1,328
	풍력발전기로 유입	1,213	1,234
	풍력발전기로부터	144	94

앞에서 제시된 고장전류는 직접 풍력에너지가 있다는 가정 하에서 모든 풍력발전기들이 발전운전 상태에서 나타날 수 있는 최대 고장전류이다. 만일 풍력에너지 상태에 따라 일부 발전기들만 발전 형태인 경우는 해당 발전기에서만 고장전류를 발생시킨다.

풍력발전소 및 연계 전력계통에 고장이 발생하면 비교적 많은 고장전류가 연계 전력계통으로부터 유입되고 풍력발전소 또는 풍력발전기에서 유입되는 고장 전류는 상대적으로 작다. 또한 풍력발전소 연계 선로 외부에 고장이 발생한 경우 풍력발전소로부터 유입되는 고장전류가 매우 작아 연계선로 보호에 과전류계전기를 적용하여도 될 것으로 판단된다. 즉, 풍력발전소 연계선로 및 풍력발전소 배전선로가 양방향 전원구성 형태이지만 풍력발전소 용량이 작아 풍력발전소로부터 공급되는 고장전류가 상대적으로 작은 경우 풍력발전소 연계선로 및 풍력발전소 배전선로 보호를 위해 전력방향계전기(67S 및 67G) 대신 과전류계전기(50/51 및 50/51G) 적용이 가능할 것으로 판단된다.

### 3. 결 론

풍력발전 보급은 지속적으로 확대될 것이다. 풍력발전소 적정 설계 및 원활한 운전을 위해서는 고장전류 계산과 같은 전력계통 해석이 요구되고 있는 바, 현재 건설되고 있는 풍력발전소 자료를 이용하여 실제와 유사한 실효성 있는 고장전류 계산결과를 산출하였다.

계산 결과 풍력발전소 및 연계 전력계통에 고장이 발생하면 비교적 많은 고장전류가 연계 전력계통으로부터 유입되고 풍력발전소 또는 풍력발전기에서 유입되는 고장 전류는 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

앞으로 풍력발전 보급 확대 및 규모의 대형화 등을 고려하여 풍력발전을 포함한 전력계통 최적 구성 및 운영을 위해서 고장전류 계산을 포함한 전력계통 해석이 지속적으로 요구된다. 특히 실제 계통에서 운전되고 있는 풍력발전소 현장 실측 등을 수행하여 정밀도 높은 자료를 취득 이를 전력계통 해석 기초자료로 이용하여 전력계통 해석 결과의 정밀도를 높일 필요가 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 이성규, 박진우, 이강완, "풍력발전시스템 보호계전 방안 연구", 사단법인 전력계통보호제어연구회, 2008년도 전력계통보호제어연구회 학술 및 기술 발표회 논문집, pp113-120, 2008.3.13
- [2] 박진우, 표기찬, 이성규, 이강완, "풍력발전기 Fault-Ride Through 검토를 위한 과도안정도 해석", 대한전기학회, 2008년도 대한전기학회학술대회 논문집, 2008, 7, 17
- [3] "Short-Circuit(ANSI & IEC), Arc Flash, CYMBREAK User's Guide Reference Manual", CYME International T & D Inc., March 2006