

풍력발전단지가 연계된 배전계통에서의 보호방안

김경호* 이종범 서재호
울광대학교

A Protective Scheme for Wind Farm Interconnected to Distribution System

Kyoung-Ho Kim · Jong-beom Lee · Je-Ho Seo
Wonkwang University

Abstract - Wind energy can be converted into electrical power using wind generator. Wind farm is made up of many wind generators, and it is often interconnected into distribution system to supply power for utilities. There are many protection problems on distribution system connected with Wind farm. It can effect on power quality severely when faults are occurred on distribution line or Wind farms. Therefore the correct protective scheme must be set for distribution system which has a Wind farm. In this paper, A wind farm connected into distribution line is simulated with several fault types which can be occurred on distribution line and Wind farm using PSCAD/EMTDC. And this paper proposes necessary relays to protect both sides of distribution system and wind farm.

연계되고 풍력발전지는 연계변압기를 통하여 상위 계통에 연계 되었으며, 전압·전류 신호는 풍력단지 연계변압기의 상위 계통측과 배전선로의 변전소를 계전점으로 정하고 해석하였다. 또한 배전계통과 풍력단지에서의 모든 지락·단락고장은 1초에 발생하여 지속된다고 가정하였다. 본 논문에서 모의한 풍력단지 내에서의 고장은 전압과 주파수가 일정할 때에 Collection Circuit과 LV 케이블에서 고장이 발생한 것으로 하였다(5).

1. 서론

전력계통의 전원설비 방식은 대규모 집중전원방식과 소규모 분산전원방식으로 크게 분류할 수 있으나 지금까지의 우리나라 전원방식은 대규모 집중방식 위주로 전원계획을 수립하여 왔으나, 최근에 분산전원 설비인 태양광, 연료전지 및 풍력발전 등 환경 친화적인 전원방식이 소규모 분산전원으로 급증하고 있는 추세이고 국가적으로도 이러한 전원설비를 장려하고 있다(1). 그 중 풍력발전은 바람이 가지고 있는 에너지를 이용하여 전기를 생산하는 기술로서 환경친화성 무한정의 자원성 그리고 다른 대체에너지와의 경제성 등이 풍부해 주목받는 에너지원으로 평가되고 있으며, 발전소와 같은 역할을 할 수 있도록 대규모 풍력발전단지를 건설하여 기존 전력계통에 연계시켜 전력을 공급할 수 있도록 하고 있다(2).

그러나 분산전원에 해당하는 풍력발전단지를 계통에 연계할 때에는 보호계통방식과 보호협조, 단독운전 등으로 인한 안전 문제와 긴급시 연락 및 복구체제 등의 공급신뢰도 문제와 전력압변동, 역률저하, 고조파 발생 등의 전력품질의 문제 등 여러 가지 사항들을 고려해야 하는데 그 중에서도 연계 시 운전 중 고장이 발생되면 연계용 발전설비의 고장영향이 계통에 파급되지 않도록 발전설비를 분리하고, 연계된 전력계통의 고장에 대해서는 신속하고 확실하게 계통으로부터 발전설비를 분리하여 단독운전을 방지해야 한다(3). 그러나 국내에서는 일반적인 분산전원의 보호방식에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있으나 풍력단지의 계통연계에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 유도발전기로 구성된 풍력단지가 국내에 건설될 경우를 대비하여 풍력단지에 연계되어 있는 배전계통의 보호방안을 검토하였다. 이를 위해서 먼저 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델계통을 구성한 뒤, 지락고장 및 단락고장을 배전계통과 풍력발전단지 양측에서 각각 모의하여 얻어진 결과로부터 풍력단지가 연계된 배전계통에 필요한 보호방안을 제시하였다.

2. 풍력단지가 연계된 계통에서의 고장 분석

풍력발전단지(wind park 또는 wind farm)는 여러 대의 풍력발전기를 병렬로 연계하여 생산된 전력을 계통에 공급하는 방식으로서 1기의 용량이 1,500kW인 풍력발전기 20기를 설치된 풍력발전단지의 용량은 30MW가 되어 기존발전소를 대체하는 발전소가 된다(2). 이러한 풍력단지를 계통과 연계할 때에는 일반 분산전원의 보호방식과 마찬가지로 상위계통측에서 고장이 발생하면 그 고장의 영향으로부터 풍력발전기를 보호하기 위해서 계통에서 분리시키고 또, 풍력단지 측의 고장으로 인한 영향이 상위계통에 파급되지 않도록 확실하게 계통으로부터 분리해야 하는데 이러한 분산전원의 보호에 관한 내용들은 문헌에 잘 나타나 있으므로 본 논문에서는 이를 기본으로 하여 유도발전기를 사용한 풍력단지에서의 보호방식에 적용을 하였다(1)(3)(4).

국내에서는 대안위 풍력단지가 아직 건설되지 않았기 때문에 PSCAD/EMTDC를 이용하여 그림 1의 계통도에 나타난 것처럼 1(MW) 유도발전기 10기가 LV 케이블로 연결된 각각의 변압기를 거쳐 MV 케이블로 구성된 Collection Circuit에

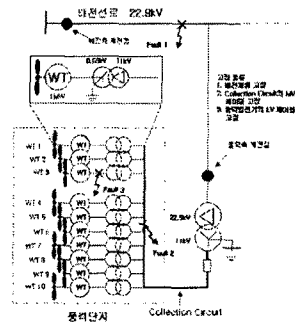
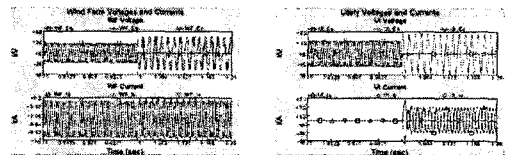


그림 1. 풍력단지 연계계통도 및 고장지점

2.1 상위계통 측의 고장 분석

2.1.1 지락고장

그림 2는 1선지락고장시 풍력단지와 배전계통 양측의 계전점에서 전압·전류를 해석한 것이다. 배전계통에서는 모든 지락고장의 검출이 가능한 전압·전류 파형을 측정되므로 배전측 계전점에서 측정된 파형은 1선지락만을 나타내었다. 1선지락고장에서 고장상의 전압이 풍력단지 측에서는 상승하고 배전계통에서는 저하되는 것을 알 수 있다.



(a) 풍력측 계전점

(b) 배전측 계전점

그림 2. 배전계통에서의 1선지락고장시 전압·전류파형

2.1.2 단락고장

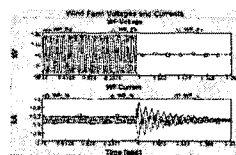


그림 3. 배전계통에서의 3상단락고장시 전압·전류파형

모의조건은 지락고장과 동일하게 한 뒤, 3상단락고장시 풍력단지 연계점에서 해석한 전압·전류파형을 그림 3에 나타내었다. 단락고장 역시 지락고장과 마찬가지로 배전계통측에서는 고장검출이 가능하므로 풍력측 계전점에 나타나는 전압·

전류파형을 나타내었다. 풍력단지 측에서 큰 고장전류가 배전측으로 유출되는 것을 알 수 있다.

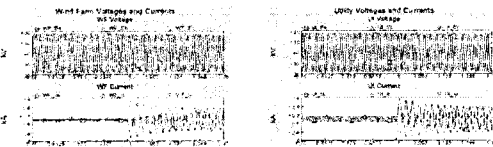
2.2 풍력단지측의 고장 분석

고장이 풍력 단지에 발생한다면 각 풍력터빈은 개개의 제어 시스템에 있는 주파수나 전압 센서를 사용하여 차단될 것이다. 또한 풍력단지로부터 상위계통을 보호하는 것 역시 필요하다(6).

풍력단지는 수십 또는 수백개의 풍력발전기들로 구성되므로 풍력발전기들을 상위계통에 연결시켜주는 Collection Circuit을 갖게 된다. 그러므로 Collection Circuit을 구성하는 MV 케이블에서의 고장을 고려해야 한다.

2.2.1. Collection Circuit에서의 고장 분석

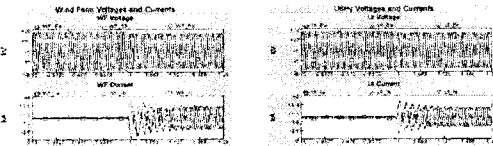
가. 지락고장
여기서의 지락고장은 상위계통에서의 지락고장과 동일한 조건으로 하였고, 1선지락고장은 그림 1에 나타난 Fault 2 지점에서 5번과 6번 풍력발전기 사이에 위치한 MV 케이블에서 발생하였으며 그림 4에는 고장발생시 풍력단지와 배전계통에서 해석된 전압·전류의 파형을 나타내었다. Collection Circuit에서 지락고장이 발생하면 배전계통 측에서 풍력단지 내의 지락지점으로 고장전류가 유입되는 것이 배전측 계전점과 풍력측 계전점을 통해서 알 수 있다.



(a) 풍력측 계전점 (b) 배전측 계전점

그림 4. MV 케이블 1선지락고장시 전압·전류파형

나. 단락고장
모의조건은 지락고장과 동일하게 하였고 풍력단지 측과 배전계통 측의 계전점에서 해석한 고장시의 전압·전류 파형을 그림 5에 나타내었다. 여기서 사용된 모델에서의 단락고장으로 인하여 나타난 전압에서는 배전계통과 풍력단지 양측 모두 약간 저하되었지만 고장전류의 크기는 모두 크게 증가하는 것으로 나타났다.



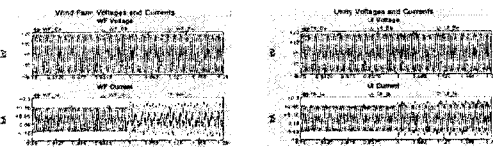
(a) 풍력측 계전점 (b) 배전측 계전점

그림 5. MV 케이블에서의 3상단락고장시 전압·전류파형

2.2.2 풍력발전기의 LV 케이블의 고장 분석

개개의 풍력발전기가 가지고 있는 LV 케이블에서는 고장확률이 지극히 적으므로 1선지락고장과 선간단락고장만을 고려하였고 모의조건으로는 3번 풍력발전기의 LV 케이블에서 1초에 고장이 발생한 것으로 하여 그 결과를 그림 6과 7에 나타내었다.

가. 1선지락
LV 케이블에서의 1선지락고장은 그림 6과 같이 풍력단지뿐만 아니라 배전계통에서도 큰 고장전류가 나타나는 것을 알 수 있다.

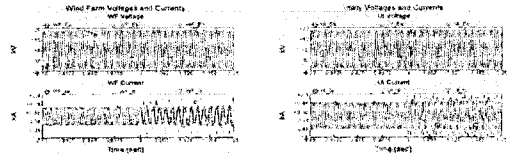


(a) 풍력측 계전점 (b) 배전측 계전점

그림 6. LV 케이블에서의 1선지락고장시 전압·전류파형

나. 선간단락
LV 케이블의 선간단락고장은 지락고장과 동일한 조건에서 모의한 결과를 그림 7에 나타내었다. 이 때에도 마찬가지로

풍력단지와 배전계통 측에 과전류가 발생하였다.



(a) 풍력측 계전점 (b) 배전측 계전점

그림 7. LV 케이블에서의 선간단락고장시 전압·전류파형

3. 보호방안

본 논문에서는 일반적인 분산전원 보호에 사용되는 과전압 계전기, 부속·과전압계전기 및 부속·과주파수계전기를 PSCAD/ EMTDC에 포함되어 있는 요소들을 사용하여 구성한 뒤, 배전계통과 풍력단지에서 발생하는 지락·단락고장의 차단이 가능한지를 검토하였다.

3.1 지락고장 대책

배전계통에서의 지락고장 - 분산전원을 특고압계통에 연계한 경우에는 접지방식에 따라 지락고장시의 현상이 다르게 나타나므로 접지방식에 따라 보호방식을 달리 해야 한다. 일반적인 소형 분산전원과는 달리 풍력단지의 경우는 배전계통에서의 1선지락고장시 고장을 검출하기에 충분한 고장전류가 풍력단지에서 배전계통측으로 유출된다. 만약 1선지락고장시 풍력단지 측에서 유출되는 고장전류가 작아서 OCR이 부동작 할지라도 이는 배전계통의 변전소 차단기의 동작으로 정전이 되면 단독운전방지를 위한 보호시스템이 동작하여 풍력단지를 계통으로부터 분리시키게 된다.

Collection Circuit에서의 지락고장 - 풍력단지 내에 위치한 MV 케이블로 구성된 Collection Circuit에서 지락고장이 발생하게 되면 풍력단지 측과 배전계통 측의 계전점에서 큰 고장전류가 검출되고 이 고장전류는 풍력단지 내로 유입된다. 본 논문에서 사용한 모델에서 얻어진 고장전류의 크기는 배전계통과 풍력단지에서 지락과전류계전기로 검출이 충분하지만 풍력단지에서 먼저 배전계통의 차단기가 동작하기 전에 연계를 차단한다면, 배전계통에서의 정전을 피할 수 있게 된다. 그림 8은 MV 케이블에서 1선지락고장이 발생하자 풍력단지측의 계전기가 바로 고장을 검출하여 계통으로부터 풍력단지를 차단하였을 때의 전압·전류파형을 나타낸 것으로서, 이를 통해서 풍력단지의 차단으로 배전계통으로의 고장파급을 막을 수 있다는 것을 알 수 있다.

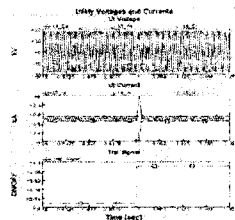


그림 8. MV 케이블의 1선지락고장을 차단한 배전계통의 전압·전류

3.2 단락고장 대책

· 배전계통에서의 단락고장 - 일반 소형분산전원은 발전용량이 작기 때문에 발전기에서 계통으로 유출하는 단락전류는 비교적 작으므로 계통측에 단락고장이 발생하여도 과전류계전기가 이를 검출할 수 없는 경우가 발생할 수 있으나 풍력단지는 단락고장시 계통으로 유출하는 단락전류가 과전류계전기로 검출하기에 충분하므로 과전류계전기로 검출이 가능하다. 만약 이를 검출하지 못하는 상황이 발생하더라도 발전기 전압의 이상 저하를 검출하고 계통과 분리할 수 있는 부속지압계전기의 작동으로 고장을 제거하는 것이 가능하며 부속지압계전기가 동작하지 아니하여 상위계통이 정전되는 경우 단독운전과 유사한 상태에 돌입하여 단독운전방지를 위한 보호시스템이 동작하게 된다.

· Collection Circuit에서의 단락고장 - 모의결과, 단락고장 역시 풍력단지나 배전계통 측에서 과전류계전기로 고장검출이 가능하였고 풍력단지 측에서 고장을 먼저 제거하면 배전계통의 전압·전류는 곧바로 정상상태로 돌아온다. 그림 9는 Collection Circuit에서 3상단락고장이 발생하자 계전점에서 고장을 검출하여 바로 트립신호를 보내 풍력단지를 계통으로부터 분리한 경우의 배전계통에서의 전압·전류파형을 나타낸 것이다.

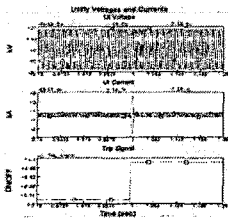
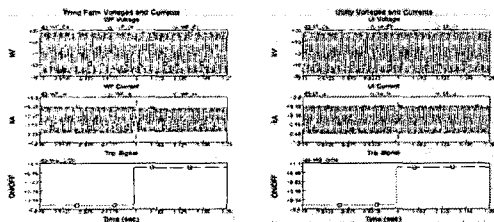


그림 9. MV 케이블의 3상단락고장을 차단한 배전계통의 전압·전류

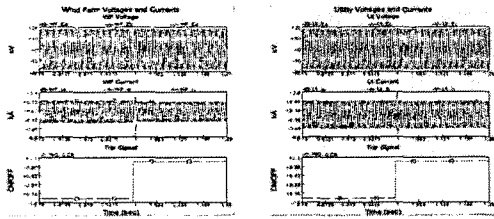
3.3 LV 케이블에서의 지락·단락고장 대책

개개의 풍력발전기에서 고장이 발생하면 발전기를 풍력단지에서 분리시켜서 고장의 파급을 방지해야 하는데 이는 풍력발전기가 자체적으로 가지고 있는 보호시스템으로 충분히 해결할 수 있다.



(a) 풍력측 계전점 (b) 배전측 계전점

그림 10. LV 케이블의 1선지락고장 제거



(a) 풍력측 계전점 (b) 배전측 계전점

그림 11. LV 케이블의 3상단락고장 제거

그림 10과 11은 이미 앞에서 모의한 것과 같은 LV 케이블에서의 지락·단락고장이 발생하자 풍력발전기 자체에서 고장전류를 검출하여 Collection Circuit으로부터 고장을 일으킨 풍력발전기를 분리시켰을 때 풍력단지와 배전계통에서의 전압·전류파형을 보여준다. 풍력발전기를 Collection Circuit에서 분리시키자 풍력단지와 배전계통 양측의 전압·전류가 정상상태로 되는 것을 알 수 있다.

3.4 풍력단지 연계시 배전계통 보호방안

계통 측 고장은 풍력단지 측이나 배전계통 측에서 과전압계전기를 사용하여 충분히 검출할 수 있고, 만약 풍력단지 측에서 검출하지 못하더라도 일반 분산전원에 사용하는 단독운전 방지시스템을 구성하는 계전기들(과전압·저전압계전기, 과주파수·저주파수계전기)로 배전계통측의 차단동작으로 발생하는 정전으로 인한 단독운전 방지시스템이 작동하여 상호 계통간의 고장 영향을 피할 수 있다. 풍력단지의 Collection Circuit에서의 지락·단락고장은 배전계통에서의 지락과전류/과전류계전기(51N, 51)로 검출하기에 충분히 큰 고장전류 유입을 야기시켰고 풍력단지측에서 먼저 계통과의 연계를 차단하여 배전계통을 정상상태로 되돌려 놓아 정전을 막을 수 있었다.

개개의 풍력발전기의 LV 케이블에서의 고장은 배전계통에 좋지 않은 영향을 미치지만 해당 풍력발전기의 연계차단으로 고장 영향을 피할 수 있다. 즉, Collection Circuit와 LV 케이블에서 발생한 고장의 영향은 배전계통과 풍력단지 양측에서 검출이 가능하고 풍력단지 또는 해당 풍력발전기의 분리로 배전계통으로의 고장 파급 방지가 가능하다. 그림 12는 본 논문에서 모의한 고장을 풍력단지와 배전계통 상호간의 파급을 방지하기 위해서 필요한 계전기들을 나타낸 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 풍력단지가 정속도로 운전되고 있다는 전제 하에서 PSCAD/EMTDC로 배전계통과 풍력단지에서의 고장을 모의한 뒤, 그에 따른 해석결과를 근거로 보호방안을 제시하였으며 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 배전계통에서의 고장
 - 지락고장 - 배전계통과 풍력단지 양쪽에 설치된 지락과전류계전기로 발생 가능한 고장전류를 충분히 검출한다.
 - 단락고장 - 과전류계전기로 검출하기에 충분한 단락전류가 발생한다.
 - 배전계통에서 발생한 고장전류를 풍력단지 측에서의 검출이 불가능한 경우에는 배전계통측의 차단기 동작으로 인하여 발생한 정전으로 단독운전 방지시스템인 과전압·저전압계전기·저주파수·과주파수계전기가 작동하여 고장의 검출·차단이 가능하다.
- (2) Collection Circuit의 MV 케이블 고장
 - 지락고장-배전계통 측에서 풍력단지로 큰 고장전류가 유입하고 이 전류는 과전류계전기로 검출이 가능하다.
 - 단락고장-지락고장이 마찬가지로 풍력단지와 배전계통 측의 과전류계전기로 고장검출이 가능하다.
 - 고장파급방지-Collection Circuit의 MV 케이블에서 고장이 발생한 경우에는 풍력단지를 계통으로부터 분리시켜 고장의 파급을 막을 수 있다.
- (3) 풍력발전기의 LV 케이블 고장
 - 지락 및 단락고장-고장이 발생한 풍력발전기의 자체 보호시스템으로 고장검출이 가능하고 고장발생 풍력발전기를 Collection Circuit에서 분리시켜서 고장파급을 막을 수 있다.

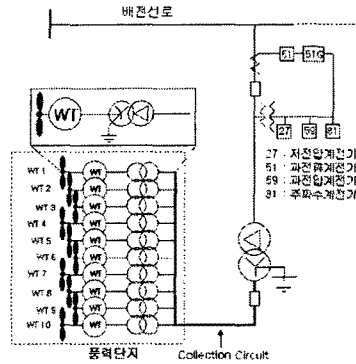


그림 12. 풍력단지연계시 보호방식

본 논문에서 다룬 지락고장과 단락고장 이외에도 풍력단지에서는 심한 풍속변화와 갑작스런 돌풍처럼 바람에 의한 부분과 전체 풍력단지의 분리, 풍력단지의 일부분 분리, 전체 풍력단지의 계통 투입과 일부분만을 투입하는 경우 등 여러 가지 상황이 고장과 유사한 전압 주파수 변동을 일으키는 요소들과 함께 연계계통과 인근계통에서의 고장구분 등에 대한 많은 연구가 계속 진행되어야 한다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사 지원에 의하여 기초전력공학공동 연구소 주관으로 수행되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] 김일동 외 7명, "신에너지 분산전원의 계통연계 보호 및 협조 에 관한 연구" 전력계통보호기술연구회논문집, pp. 133~143, 1999.
- [2] 김두훈, 유지윤, "해의풍력발전기술의 동향과 전망" 전기학회지 제 50권 6호, pp. 19~24, 2001
- [3] 김용상, 김승기, "대체에너지전원의 배전계통 연계기술", 전기학회지 제 50권 6호, pp. 34~40, 2001
- [4] 김일동, 정창호, 김용상, "배전선로 자동재폐로와 분산전원 연계 보호협조", 전력계통 보호학회 연구회 기술세미나 논문집, Vol. 4, No. 1, pp 18~27, 2000
- [5] S J Haslam, P A Crossley, N Jenkins, M Burt, A Borrill, "DESIGN AND EVALUATION OF A NEW TYPE OF PROTECTION FOR WIND FARMS" IEE, No. 434, pp. 99~102, March, 1997.
- [6] Jenkins, N., "Engineering wind farms" Power Engineering Journal, Vol. 7 Issue 2, pp. 53~60, April 1993