

풍력발전단지의 계통 연계 운전에 따른 보호 계전기 설정치 정정에 관한 고찰

장성일* · 최돈만* · 최정환* · 김광호* · 오종률** · 김주열**
 *강원대학교 전기전자정보통신공학부/차세대전력기술연구센터, **한국전력공사

The Study on Correction of Protective Relaying Set Value for the Power Electric Network Paralleled with Wind Farm

Sung-Il Jang* · Don-Man Choi* · Jeong-Hwan Choi* · Kwang-Ho Kim* · Jong-Youl Oh** · Joo-Yearl Kim**
 *Kangwon National University/Next-Generation Power Technology Center, **KEPCO

Abstract - Wind farm paralleled with electric power network can supply the power into a power network not only the normal conditions, but also the fault conditions of distribution network. If the fault happened in the power line with wind farm, the fault current level measured in a relaying point might be lower than that of distribution network without wind turbine generator. Consequently, it is difficult to detect the fault happened in the distribution network connected with wind generator. This paper describes the influence of wind turbine generator on the protective relaying system for detecting the fault occurred in a power line network. Simulation results shows that the fault current depends on the fault impedance, location, and the capacity of wind farm and distribution network load.

전계통에서 사고가 발생하였을 경우, 이들 풍력발전단지가 배전선 보호계전에 미치는 영향을 기술하였다. 풍력발전기의 사고 검출에 대한 영향을 검토하기 위하여 분산전원 설치 유·무에 따른 부하용량별, 사고지점별, 사고점 저항 크기별로 사고를 모의하였다. 그리고 풍력발전기 용량에 따른 계전점 사고전류의 크기변화에 대해서도 살펴보았다. 모의 결과 풍력발전기가 연계운전되고 있는 배전계통의 사고전류는 그렇지 않은 경우에 비하여 일반적으로 작았으며, 풍력발전기의 용량이 커질수록 계전점 사고전류는 더욱 작아지는 특성을 나타내었다. 따라서 배전선 사고 검출용 계전기 정정시, 연계된 풍력발전단지가 배전선 사고검출에 미치는 영향을 충분히 고려하여야 할 것으로 사료된다. 풍력발전기와 다양한 배전선 사고는 과도 현상 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하였으며, 연계 배전계통으로는 우리나라의 일반적인 22.9 [kV] 선로와 부하데이터를 이용하여 구성하였다.

1. 서론

근래의 경제성장과 산업 및 사회활동이 고도화됨에 따라 증대하는 전력수요와 전력수급의 안정적인 확보를 위하여 대규모 발전설비의 투자보다는 소규모 분산전원(Distributed Generation)의 도입 및 설치가 대안으로 주목받고 있다[1]. 특히, 에너지 생산비용이 타 발전설비에 비하여 적은 풍력발전단지의 보급은 최근 급격히 확대되고 있다. 풍력발전단지가 연계 운전되고 있는 배전선에서 지락, 단락사고가 발생했을 경우에는 계전점에서 사고 전류가 상당히 크기 때문에 풍력발전단지의 연계 유·무에 관계없이 보호계전기들은 이들 사고를 쉽게 검출할 수 있다. 그러나, 사고저항이 큰 고저항 사고의 경우는 계전점에서의 사고 전류가 지락, 단락사고에 비하여 크지 않으므로 검출이 용이하지 않다. 특히, 풍력발전단지가 연계 운전되고 있는 배전계통에서 고저항 사고가 발생한 경우, 사고전류의 일부를 풍력발전단지에서 담당하므로 계전점 전류가 더욱 작아져 사고 검출이 불가능한 경우가 있을 수 있다.

일반적인 사고에 대한 계전점 사고전류는 사고가 발생하는 지점의 사고저항의 크기와 사고 발생 위치 및 부하의 용량에 따라서 크게 변동하는데 사고점 저항이 작고 부하용량이 크며 전원에서 가까운 곳에서 사고가 발생했을 경우 비교적 큰 사고전류가 계전점으로 흐르므로 쉽게 이를 검출할 수 있다. 그러나 고저항 사고 또는 부하발단의 사고인 경우 큰 사고점 임피던스와 선로임피던스의 영향으로 사고전류가 크지 않아 사고검출이 용이하지 않을 수 있다. 그리고, 풍력발전단지가 연계 운전되고 있는 배전선에서의 이러한 사고는 풍력발전단지의 용량에 따라 사고전류의 크기가 크게 달라지므로, 경우에 따라 계통사고를 정상적인 부하변동으로 오인하는 경우도 발생할 수 있다.

본 논문에서는 풍력발전단지가 연계 운전되고 있는 배

2. 풍력발전단지가 도입된 배전계통의 보호방식

풍력발전단지가 연계된 배전계통의 일반적인 보호방식을 그림 1에 나타내었다. 배전계통에서 발생하는 사고를 검출하기 위해 사용되는 보호기기로는 과전류 계전기(51), 지락 과전류 계전기(51G), 저전압 계전기(27), 재폐로 계전기(79), 리클로저(R), 퓨즈로 구성되어 있다. 여기서, 과전류 계전기는 사고전류가 설정치 이상이 되면 사고를 검출하는 보호기이며, 저전압 계전기는 2회 재폐로 방식을 적용한 계전기로서 재폐로 및 비동기 투입 방지를 목적으로 사용된다. 그리고, 리클로저는 계통에 일시적인 사고와 영구사고를 구분하기 위해 사용되는 보호기로서, 동작전류는 발전기 기동전류에 오동작하지 않고 재폐로 시간은 발전기의 잔류전압 소멸시기 이상이 되도록 규정하고 있다[4].

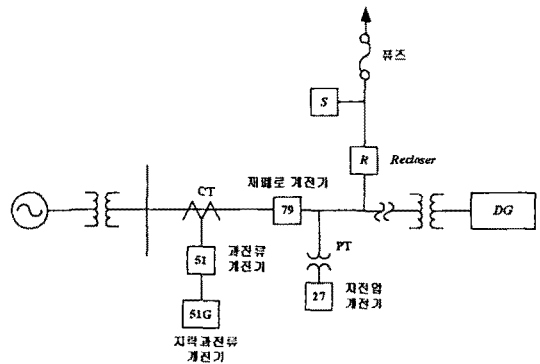


그림 1 풍력발전단지가 연계 운전되는 배전계통의 보호방식

3. 풍력발전단지가 연계된 배전계통 모델링

본 논문에서는 풍력발전기 계통 연계에 대한 배전선 사고모의를 위하여 과도현상 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 농형 풍력 유도 발전기를 모델링 [3]하였으며, 우리나라의 22.9 [kV] 실 계통 데이터를 이용하여 연계 배전 시스템을 구성하였다.

3.1 연계 배전계통의 모델링

풍력발전단지가 연계 운전 될 배전계통은 단락용량이 100[MVA]인 22.9[kV] 계통이고, 일반적인 ACSR 160mm²와 95mm²의 배전선으로 구성되었다. 모션에는 서로 다른 부하용량을 가진 5개의 간선들로 이루어져 있고, 각 구성요소는 실제 계통 데이터를 이용하여 모델링되었다. 그리고, 다양한 사고를 모의하기 위하여 임의의 사고지점 a, b, c를 선정하였다. 그림 2는 사고 모의에 사용된 모델 계통의 단선도이며, 표 1은 모션에 연결되어 있는 간선에 대한 최대부하와 최소부하일 경우의 부하 용량을 나타내고 있다. 표 2는 간선 B의 노드에 연결된 각 노드에서의 부하용량을 나타내었다.

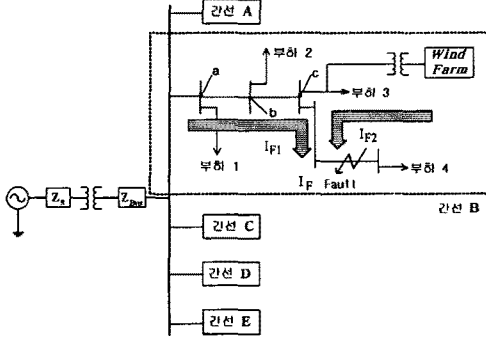


그림 2 풍력발전단지가 연계 된 배전계통 모델

표 1 간선별 최대부하와 최소부하시의 부하용량

간선	최대부하		최소부하	
	MW	MVAR	MW	MVAR
간선 A	4.4	0.062	0.8	0.084
간선 B	2.5	0.035	1.0	0.105
간선 C	1.1	0.016	1.7	0.179
간선 D	5.1	0.072	1.9	0.200
간선 E	6.5	0.092	1.4	0.147

표 2 간선 B의 각 노드에 대한 부하용량

부하	최대부하(MW)	최소부하(MW)
부하 1	0.56	0.24
부하 2	0.46	0.18
부하 3	0.48	0.19
부하 4	0.96	0.38

3.2 풍력발전단지의 모델링

본 연구에서 이용한 농형 풍력 유도 발전기 형태는 그림 3과 같다. 그림 우측의 A, B, C는 계통에 연결되는 3상 전원을 의미하며, 좌측 W, S, T는 발전기의 출력을 조절하는 외부 제어 단자를 표현한다. W는 풍력 유도 발전기의 회전속도를, S는 발전기 출력특성 제어 변수를, 그리고 T는 음의 값으로 유도발전기의 외부의 기계적 입력이 된다. 농형의 경우 내부 용량이 주어지지 않은 일반적인 내부파라미터를 생성하므로 750 [kVA]의 일반적인 풍력발전기로 모델링하였다. 본 논문에서는 4대의 750[kVA] 농형 풍력 유도발전기로 구성된 풍력발

전단지를 모델링하여 다양한 배전선 사고에 대한 풍력발전단지의 영향을 살펴보았다.

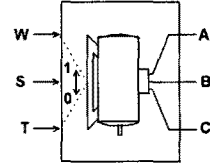


그림 3 EMTDC 농형 유도 발전기 모델

4. 풍력발전단지가 연계된 배전계통 사고시의 특성

배전계통에서의 사고 발생 시, 계전점 사고전류에 대한 연계 풍력발전단지의 영향을 살펴보기 위하여 그림 2에서 제시한 배전계통에서 풍력발전단지 유·무에 따라 지락사고, 단락사고 및 고저항 사고를 모의하였다. 특히, 고저항 사고의 경우 사고점 저항, 사고 위치, 부하 용량 및 풍력발전단지의 용량에 따른 다양한 조건의 사고에 대하여 분석하였다.

4.1 배전계통 사고전류

풍력발전단지가 연계된 배전계통에서 사고가 발생하였을 때, 사고전류의 일부분을 풍력발전단지가 담당하므로 계전점의 사고전류는 풍력발전단지가 설치되어 있지 않은 경우에 비하여 적게 증가하는 것이 일반적이다. [6] 이와 같은 사고 특성은 그림 2에서 설명되어 질 수 있다. 부하 4의 근처에서 사고가 발생하여 사고 지점으로 사고전류 I_F 가 흐른다고 가정하자. 그림에서 알 수 있듯이 I_F 는 전원에서 공급하는 사고 전류 I_{F1} 과 풍력발전단지에서 공급하는 사고전류 I_{F2} 의 합으로, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_F = I_{F1} + I_{F2} \quad (1)$$

만약, 풍력발전단지의 용량이 커져 같은 사고용량의 I_F 에 대해 큰 I_{F2} 를 공급하면 상대적으로 전원에서 담당하는 사고전류 I_{F1} 이 적게 흐르게 된다. 따라서 풍력발전단지가 설치되거나 또는 설치된 풍력발전단지의 용량이 커짐에 따라 계전점의 사고전류는 크게 증가하지 못하고, 이에 배전선 사고 검출이 곤란하게 된다.

4.2 지락, 단락 사고

그림 2와 같은 배전계통 b지점에서 지락, 단락 사고를 모의하였다. 여기서, 풍력발전단지는 1기의 유도발전기만 운전한다고 가정하고, 0.5초에서 배전계통에 투입하고 사고는 1초에서 발생시켰다. 그림에서 계전점 사고전류는 22.9 [kV] 배전계통에서 담당할 수 있는 최대 부하용량인 10 [MVA]를 기준으로 pu형태로 나타낸 것이다. 배전선 사고 검출용 과전류 계전기 설정치는 최대부하전류의 1.5배로 설정하였다 [2]. 그림 4, 5에서 볼 수 있듯이 풍력발전기 연계 유·무에 관계없이 지락 및 단락사고의 전류가 설정치의 5배이상으로 지락, 단락 사고 검출이 가능하다.

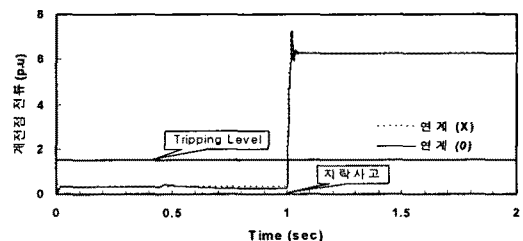


그림 4 최대 부하 시 지락사고에 의한 계전점 전류

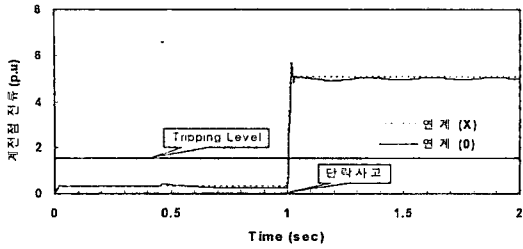


그림 5 최대 부하 시 단락사고에 의한 계전점 전류

4.3 고 저항 사고

고저항 사고는 사고저항의 크기에 따라 계전점 전류의 크기가 심하게 변동할 수 있다. 본 연구에서는 사고발생 지점이 진흙, 모래와 자갈 등으로 형성된 곳에서의 사고로 가정하여, 사고점 저항을 25~40(Ω)로 변화시켜 다양한 고저항 사고를 모의하였다(5). 계통조건이 지락, 단락사고일 경우와 같도록 구성하고 사고점 저항과 사고 위치 및 계통 부하의 크기를 달리하여 고저항 사고를 수행하였으며, 또한 풍력발전기의 용량을 변화시키면서 이들이 계전점 사고전류에 미치는 영향을 살펴보았다.

A. 사고 저항에 따른 계전점 전류

그림6에서 9까지는 최대 부하와 최소 부하의 조건에서 사고점 저항의 크기 변화에 따른 계전점 사고 전류의 변동을 나타낸 것이다. 사고지점 a에서 사고저항의 크기가 35(Ω)과 37(Ω)인 고저항 사고를 모의 비교하였다. 그림6은 최대부하조건을 갖는 배전계통에서 사고저항의 크기가 35(Ω)일 때의 배전선 사고로 풍력발전단지 연계 유·무에 관계없이 모두 사고전류가 설정치를 초과하여 사고로 검출된다. 그러나, 그림 7에서와 같이 37(Ω)의 사고 저항을 가지는 고저항 사고는 풍력발전단지가 연계되어 있지 않으면 사고검출이 가능하지만 풍력발전단지가 배전계통에 연계 운전되고 있으면 풍력발전기의 원인으로 사고 검출이 불가능해진다. 그림 8, 9는 최소부하로 운전되는 배전계통에서의 고저항 사고에 대한 모의로써 사고점 저항이 달라짐에 따라 최대부하시와는 상이한 사고 검출 특성을 가진다.

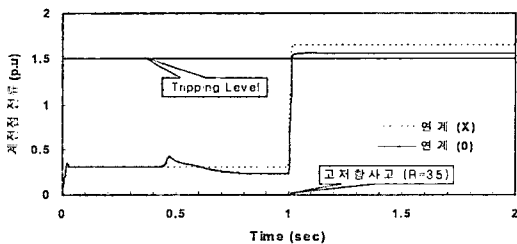


그림 6 최대 부하 시 고 저항 (35 Ω) 사고의 모의

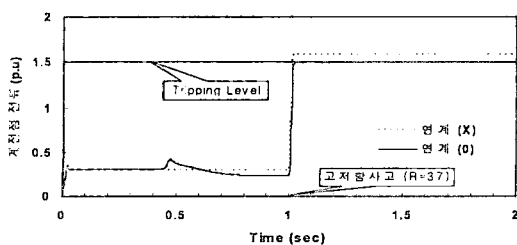


그림 7 최대 부하 시 고 저항 (37 Ω) 사고의 모의

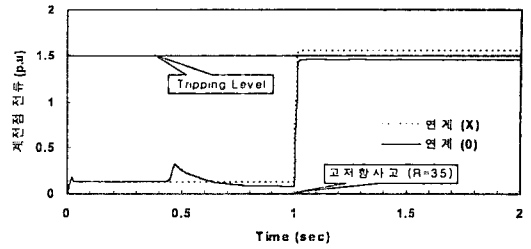


그림 8 최소 부하 시 고 저항 (35 Ω) 사고의 모의

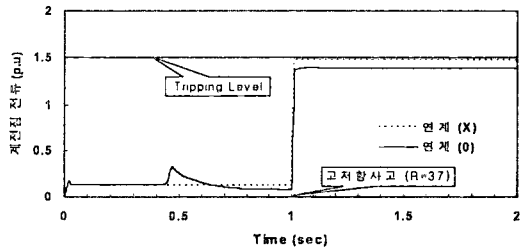


그림 9 최소 부하 시 고 저항 (37 Ω) 사고의 모의

B. 사고 지점별 계전점 사고 전류

A절에서와 같이 최소부하의 계통 조건을 갖는 배전선에서 고저항 사고가 발생하였을 때, 사고 발생 지점에 따른 계전점 전류의 변동을 그림 10, 11에 나타내었다. 사고지점 a~c에서 사고저항 32(Ω)의 고저항 사고를 모의하였다. 전원에 가까운 곳에서 사고가 발생하였을 경우 검출이 가능하지만, 전원에서 먼 거리에서 발생한 사고와 풍력발전단지가 연계되었을 경우에 대해서는 계전점 전류가 크게 증가하지 않으므로 사고 검출이 쉽지 않다.

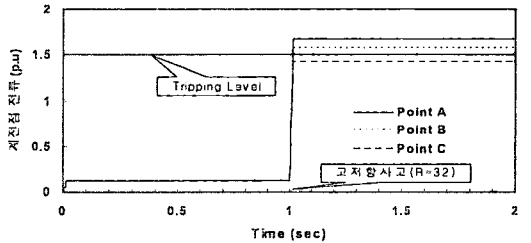


그림 10 풍력발전단지 비연계시 사고 지점별 고저항 사고

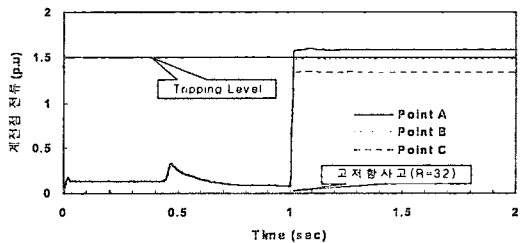


그림 11 풍력발전단지 연계시 사고 지점별 고저항 사고

풍력발전단지의 연계 유·무, 부하용량과 사고점 저항 및 사고 발생 위치의 조건을 달리했을 경우의 배전선 사고 검출 결과를 표 3, 4에 요약하였다. 표에 의하면 풍력발전단지가 연계되어있으며, 부하용량과 사고 저항이

크고, 전원측에서 먼 거리의 배전선 사고가 발생하면 계전점의 사고전류가 크지 않으므로 사고 검출에 어려움이 큰 것을 표를 통해 알 수 있다.

표 3 최대부하시 사고 저항, 위치별 계전기 동작

사고저항	사고지점	풍력발전단지 미연계시	풍력발전단지 연계시
31Ω	a	○	○
	b	○	○
	c	○	×
33Ω	a	○	○
	b	○	○
	c	×	×
35Ω	a	○	○
	b	○	×
	c	×	×
37Ω	a	○	×
	b	×	×
	c	×	×
39Ω	a	○	×
	b	×	×
	c	×	×

표 4 최소부하시 사고 저항, 위치별 계전기 동작

사고저항	사고지점	풍력발전단지 미연계시	풍력발전단지 연계시
27Ω	a	○	○
	b	○	○
	c	○	×
29Ω	a	○	○
	b	○	○
	c	×	×
31Ω	a	○	○
	b	○	○
	c	×	×
33Ω	a	○	×
	b	○	×
	c	×	×
35Ω	a	○	×
	b	×	×
	c	×	×

C. 풍력발전단지 용량에 따른 사고전류의 특징

풍력발전단지의 용량에 따른 계전점 사고전류의 특징을 살펴보기 위하여 사고지점 a, 저항 30[Ω]의 고저항 사고를 연계 배전 시스템에서 발생시켰다. 그림 12, 13에서 알 수 있듯이, 풍력발전단지의 용량이 커짐에 따라 배전선 사고시 계전점 전류는 더욱 크게 감소하여 사고 검출이 불가능한 경우도 발생할 수 있다. 다른 사고의 경우와 마찬가지로 계통부하의 조건이 사고검출에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

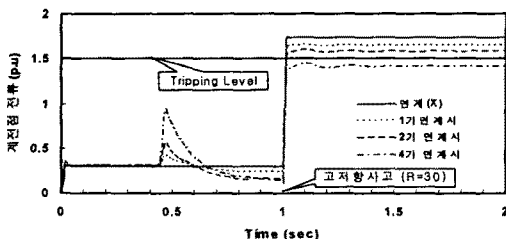


그림 12 최대 부하시 풍력발전단지 용량별 사고 특성

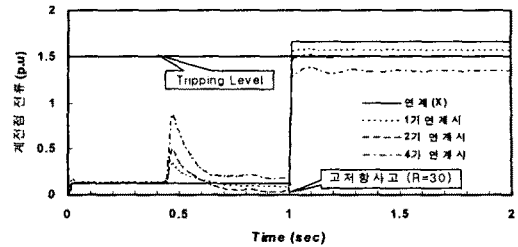


그림 13 최소 부하시 풍력발전단지 용량별 사고 특성

3. 결 론

본 논문에서는 풍력발전단지가 연계 운전되고 있는 배전계통에서 사고가 발생하였을 경우, 이들 풍력발전단지가 배전선 사고검출에 미치는 영향을 기술하였다. 우리나라의 22.9(kV) 실계통 데이터를 이용하여 연계배전 시스템을 구성하고, 농형 풍력 유도 발전기를 계통에 투입하여 다양한 사고모의를 수행하였다. 일반적인 지락, 단락사고는 풍력발전단지 설치 유·무에 관계없이 사고 전류가 커 쉽게 이를 검출할 수 있다. 반면, 큰 용량의 풍력발전단지가 연계되어 있고, 사고점 저항이 크며, 그리고 부하용량이 작은 경우에는 계전점 사고전류의 증가가 적어 사고검출이 쉽지 않게 된다. 선로 임피던스의 영향이 큰 부하말단에서 발생한 사고도 위와 같은 특성을 갖는다. 따라서 배전선에서 발생한 사고 검출용 보호계전기 정정시, 이러한 풍력발전단지의 사고전류에 대한 영향을 충분히 고려하여 결정하는 것이 바람직하다고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] H. L. Willis, W. G. Scott, "Distribute Power Generation", Marcel Dekker, 2000.
- [2] 한국전력공사, "변전설비 현장 Guide Book", 2001
- [3] Manitoba HVDC Research Centre, "EMTDC V3 User's Manual"
- [4] 한국전력공사 계통운영처, "타사 발전기 병렬운전 연계선로 보호업무 지침" 1996. 8.
- [5] R.J. Gustafson, R. pursley, V.D. Albertson, "Seasonal Grounding Resistance Variations on Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.5, No.2, April 1990.
- [6] Philip P. Barker, Robert W. de Mello, "Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part1- Radial Distribution Systems." IEEE, No. 0-7803-6420-1/00, 2000