

외부 배전선 사고에 대한 분산전원 보호 알고리즘의 동작 수준 평가

장성일^{*}, °김세근^{**}, 박용업^{***}, 김광호^{***}, 최정환^{***}
^{*}서울대학교, ^{**}강원대학교, ^{***}KEPRI

Assessment of the Protection Algorithm Applied in Distributed Generations for Faults Occurred in the Interconnected Distribution Networks

S. I. Jang^{*} °S. G. Kim^{**} Y. U. Park^{***} K. H. Kim^{***} J. H. Choi^{***}
^{*}Seoul National Univ. ^{**}Kangwon National Univ. ^{***}KEPRI

Abstract - This paper describes the operational characteristics of protection algorithm applied in distributed generations (DG) for faults occurred in the interconnected distribution networks. The DG can be influenced by abnormal grid conditions such as disturbances occurring in the neighboring distribution feeders as well as the interconnected power line. Particularly, in case of the fault happening in the neighboring distribution feeders emanated from the substation to which DG is connected, the protective devices in the DG might mis-operate. The mis-operation of protective devices can be varied by the fault conditions. The simulation results for Hoenggye substation model composed of five feeders using PSCAD/EMTDC showed that the number of mis-operation of protective devices applied in DG is about 0.66 times per one year.

연구 결과는 향후 분산전원에 설치될 보호계전 알고리즘의 동작 정도를 결정하는데 유용하게 사용되리라 예상된다.

2. 본 론

2.1 배전선 사고의 해석

배전선에서 발생하는 사고는 일반적으로 1상, 2상, 3상 사고로 나뉘어 진다. 3상 평형사고의 경우 임피던스의 비를 이용하여 전압강하를 간단하게 구할 수 있지만 1상, 2상 사고와 같은 불평형 사고의 경우에는 전압강하를 구하기가 쉽지 않다. 이에 본 논문에서는 대칭 좌표법을 이용하여 전압강하 및 phase angle surge를 계산하였다.

2.1.1 3상 단락 사고

3상 평형사고의 경우 모선 전압의 크기는 전압분배 법칙에 의하여 간단하게 구해질 수 있는데 그 식은 다음과 같다.

$$V_p = 1 - \frac{Z_s}{Z_s + Z_f + Z_l} \tag{1}$$

여기서 V_p 는 계전점 전압이며, Z_s 는 전원임피던스, Z_f 는 사고지점까지의 선로 임피던스, Z_l 는 사고 저항이며 모든 임피던스는 정상 성분이다. 식 (1)에 대한 도식적인 해석은 그림 1과 같다.

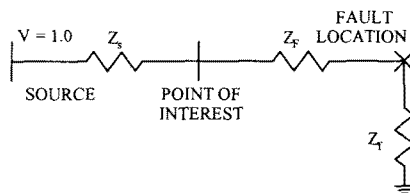


그림 1 3상 지락 사고에 의한 모선 전압

2.1.2 1선 지락 사고

1선 지락 사고의 경우 그림 2와 같은 대칭성분을 이용한 등가회로를 이용하여 해석할 수 있다. 제시된 등가회로를 통해 사고 위치에 따른 모선의 전압에 대한 대칭성분을 구하면 식 (2)~(4)와 같고 이것을 상성분으로 변환 해주면 식 (5)~(7)과 같이 된다. 식에서 Z_{S1} , Z_{S2} , Z_{S0} 는 각각 전원임피던스의 정상, 역상, 영상 성분이며, Z_{F1} , Z_{F2} , Z_{F0} 는 사고 지점까지의 선로 임피던스에 대한 대칭 성분이다. 그리고 V_a , V_b , V_c 는 대칭성분에 대한 상성분 변환 값이다.

1. 서 론

우리나라의 발전사업 민영화 계획과 세계적인 에너지 환경변화 및 대규모 발전설비 비용의 증가에 따라 대체 에너지 형태의 분산전원이 최근 많은 관심을 끌고 있다. 특히, 에너지 생산비용이 타 발전설비에 비하여 적은 풍력발전시스템은 우리나라의 경우, 여러 풍력발전단지 형태로 건설이 추진되고 있다. 과거 섬이나 도서지역에 편중되었던 풍력 발전시스템은 점차적으로 독립된 전원이 아닌, 기존 전력시스템과 연계하여 생산된 전력을 계통으로 공급하는 형태로 발전되고 있다. 이러한 계통 연계 분산전원은 계통 조건에 따라 민감하게 반응하는데, 특히, 계통 사고로 인한 전압강하, 주파수 변동, 위상 변위 등은 분산전원 내에 설정된 보호 알고리즘에 의해 단독 운전으로 판단되어 발전을 계통으로부터 분리시키는 원인이 된다 [1]. 이에 외부 사고에 대한 분산전원 보호 기기들의 동작 수준을 고찰하여 차단기의 오동작을 예방하는 것이 필요하리라 예상된다.

본 논문에서는 우리나라의 연간 배전선 사고 건수를 조사한 후 배전선의 사고 정도를 계산하여 분산전원 보호 기기들의 동작 수준을 고찰하였다 [2]. 대칭좌표법을 이용하여 1선 지락과 2선 단락 및 3선 단락 시 계통에서 발생하는 전압강하를 계산하였으며, 동시에 Phase angle jump도 산출하였다 [3-5]. 얻어진 결과를 대관령 풍력 실증 단지에 설치된 풍력발전기의 단독운전 알고리즘에 적용하여 연간 보호기기의 오동작 횟수를 산정하였다. 계산 결과 전압강하 기준으로는 연간 0.66 회 정도 발생하였으며, vector surge 기준으로는 연간 0.3 회 정도 발생하는 것으로 산정되었다. 여기서, 모선으로부터 30 km 떨어진 지점에서 발생한 외부 사고에 대해서도 분산전원의 보호기기는 오동작을 하였다. 특히, 2선 사고의 경우 Phase angle jump가 심각하게 발생하여 3선 사고에 비해 차단기의 오동작 수준이 높게 나타났다. 본 논문의

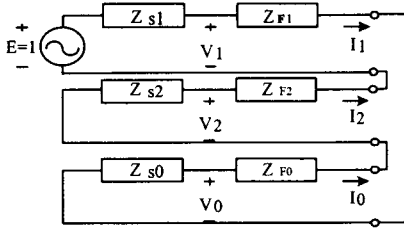


그림 2 1선 지락 사고 시 대칭성분 등가회로

$$V_1 = 1 - \frac{Z_{S1}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (2)$$

$$V_2 = - \frac{Z_{S2}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (3)$$

$$V_0 = - \frac{Z_{S0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (4)$$

$$V_a = 1 - \frac{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (5)$$

$$V_b = \alpha^2 - \frac{\alpha^2 Z_{S1} + \alpha Z_{S2} + Z_{S0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (6)$$

$$V_c = \alpha - \frac{\alpha Z_{S1} + \alpha^2 Z_{S2} + Z_{S0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (7)$$

2.1.3 2선 단락 사고

2선 단락사고의 경우도 그림 3과 같은 대칭성분을 이용한 등가회로로 해석할 수 있으며 모선의 전압에 대한 대칭성분의 크기를 구하면 식 (8)~(10)과 같다. 이것을 다시 상성분으로 변환하면 식 (11)~(13)과 같이 된다.

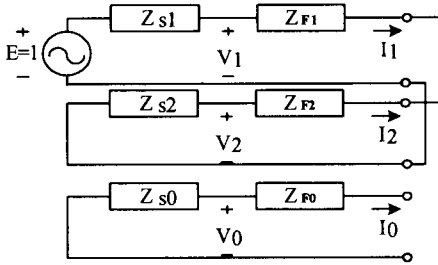


그림 3 2선 단락 사고시 대칭성분 등가회로

$$V_1 = 1 - \frac{Z_{S1}}{(Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{S2})} \quad (8)$$

$$V_2 = \frac{Z_{S2}}{(Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{S2})} \quad (9)$$

$$V_0 = 0 \quad (10)$$

$$V_a = 1 - \frac{Z_{S1} - Z_{S2}}{(Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{S2})} = 1 \quad (11)$$

$$V_b = \alpha^2 - \frac{\alpha^2 Z_{S1} - \alpha Z_{S2}}{(Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{S2})} \quad (12)$$

$$= \alpha^2 - \frac{(\alpha^2 - \alpha) Z_{S2}}{2Z_{F1} + 2Z_{S1}}$$

$$V_c = \alpha - \frac{\alpha Z_{S1} - \alpha^2 Z_{S2}}{(Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{S2})} \quad (13)$$

$$= \alpha - \frac{(\alpha^2 - \alpha) Z_{S2}}{2Z_{F1} + 2Z_{S1}}$$

2.1.4 Phase angle jump 해석

시스템에 사고가 발생하면 계통조건이 변동하므로 전압 크기뿐만 아니라 위상도 변하게 된다. 이러한 위상 변화는 전압의 변화만큼 계통에 큰 영향을 미칠 수 있다. 사고에 의한 위상 변화는 아래의 식 (14)~(16)에 의해서 구할 수 있다.

$$\overline{V_{sag}} = \frac{\overline{Z_s}}{\overline{Z_s} + \overline{Z_F}} \quad (14)$$

$$\overline{Z_s} = R_s + jX_s, \overline{Z_F} = R_F + jX_F \quad (15)$$

$$\Delta\theta = \arg(\overline{V_{sag}}) = \arctan\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \arctan\left(\frac{X_s + X_F}{R_s + R_F}\right) \quad (16)$$

2.2 분산전원 연계 계통 모델링

본 논문에서는 실제로 풍력발전기가 연계되어 운전되고 있는 대관령 횡계 변전소 주변의 22.9 kV의 실제풍 데이터를 이용하여 모델링 하였다.

2.2.1 풍력발전기 및 대관령 실제계통 모델링

분산전원이 연계 운전 될 배전계통은 단락용량이 100 MVA인 22.9 kV 계통이고, 모선은 서로 다른 부하용량을 가진 5개의 간선들로 이루어져 있으며 각 구성요소는 실제계통 데이터를 이용하였다. 그리고 feeder C에 연계되어 있는 분산전원은 750 KVA 용량의 AC/DC/AC 인버터형 풍력발전기이다. 본 연구에서 구성한 계통 단선도를 그림 4에 나타내었다.

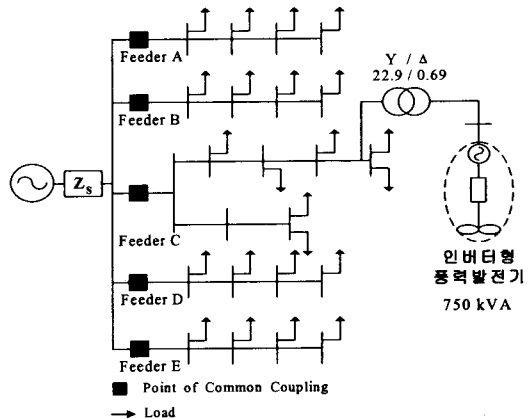


그림 4 분산전원 연계 계통 단선도

2.2.2 인버터형 풍력발전기 보호 알고리즘

분산전원이 연계되어있는 전력시스템의 차단기 동작으로 인해 계통의 전력공급이 중단되었을 경우 (Loss of Mains), 분산전원이 계속해서 운전되면서 전력을 공급하게 된다면, 인명 피해, 리콜로저의 재투입 시 상 불평형으로 인한 기기 손상, 전력품질의 저하 및 계통 복구의 어려움 등 많은 문제를 일으킬 가능성이 높다. 따라서 리콜로저의 재투입 및 고립운전으로 인한 분산전원 제어 알고리즘의 동작 이전에, 분산전원의 고립 운전을 신속

히 검출하여 계통으로부터 분산전원을 절체시키는 것이 매우 중요하다. 대관령에 설치된 풍력발전기도 같은 기능을 하는 보호 알고리즘을 가지고 있다. 전압의 경우에는 계통 전압이 정격전압을 기준으로 80 % 이하로 감소하거나 혹은 110 % 이상으로 증가한 경우, Vector surge의 경우 4.8 도 이상으로 변동했을 경우 단독운전으로 판단하여 발전기를 정지시키고 차단기를 동작시켜 계통으로부터 분리시킨다. 여기서 전압 및 위상이 계통 파라미터 설정치를 계속해서 100 msec 이상 초과하였을 경우에 차단기가 동작한다.

2.3 배전선 사고 특성 분석

본 절에서는 전절에서 기술한 대칭좌표법을 이용하여 사고 위치에 따른 각 사고별 모션 전압과 Phase angle jump를 계산하였다.

2.3.1 3상 단락 사고

3상 단락 사고 시 고장 위치에 따른 모션 전압강하와 Phase angle jump를 그림 5와 6에 제시하였다. 사고 지점이 모션으로부터 멀어짐에 따라 임피던스의 영향으로 전압강하는 작게 나타나며 Phase angle jump도 같은 특성을 갖는다. 대관령 풍력 발전기의 단독운전 설정치를 기준으로 계산 결과를 분석하면, 모션으로부터 25 km 이전 사고에 대해 차단기가 오동작할 수 있다.

2.3.2 1선 지락 사고

그림 7과 그림 8은 배전선 A상 1선 지락사고에 대한 모션 전압과 Vector surge의 크기를 사고발생 지점 거리별로 나타낸 그림이다. 사고 지점별 전압강하와 phase angle jump 특성은 3상사고와 유사한 특징을 가진다. 반면 80 % 이하로 전압강하가 발생하는 사고지점은 모션으로부터 12 km 떨어진 곳이다. 그러나 Phase angle jump가 매우 커 24 km 지점 이내의 사고는 분산전원의 보호계전 알고리즘이 동작 할 수 있다.

2.3.3 2선 단락 사고

다음의 그림10과 그림11은 배전선의 B-C상에 단락사고가 발생했을 때 모션의 전압과 Vector surge의 크기를 거리별로 나타낸 것이다. 이전 시뮬레이션의 결과와 같이 사고발생 지점의 거리가 모션으로부터 멀어질수록 전압강하와 Phase angle jump가 적게 일어났다. 특이한 점은 두 사고상의 전압강하가 사고 순간의 위상의 영향으로 인하여 크기가 다를 수 있다. 여기서 C상의 영향으로 모션으로부터 16 km 이전 사고에 대해서는 분산전원 보호 계전기가 동작할 수 있다. Phase angle jump에 대한 계전기 오동작 영역은 모션으로부터 33 km 지점까지 확대되었다.

2.4 분산전원 보호계전기의 오동작 발생 수준 예측

본 절에서는 외부 배전선 사고에 대한 분산전원의 계전기 오동작 수준을 분석하였다. 우리나라 전체 배전선에서 발생하는 총 사고건수는 2000년도에 2191건으로 1km당 0.00624건의 사고가 발생하였다. 본 연구에서는 총 사고 발생 건수 중 3상 단락사고를 10%, 2선 단락사고 20%, 그리고 1선 지락사고는 70%로 가정하여 분산전원 보호계전 알고리즘을 평가하였다. 여기서, 분산전원이 단독운전으로 판단하는 기준은 대관령 풍력 발전기의 보호 계전 알고리즘으로써 계통전압의 20 % 이상 떨어졌을 때 혹은 4.8° 이상의 Vector surge가 발생하였을 때 동작하는 것으로 가정하였다. 계산 결과, 그림 11과 12에서 알 수 있듯이 대관령 풍력단지 보호 계전기의 연간 오동작 빈도수는 전압에 의해서는 0.66건, phase angle jump에 의해서는 0.3 건이 발생하는 것으로 예측되었다.

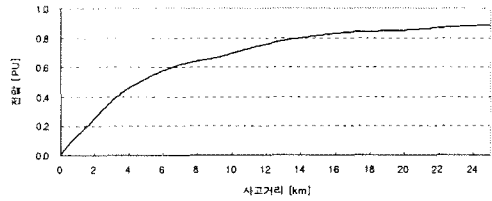


그림 5 3상 단락사고 시 전압 크기

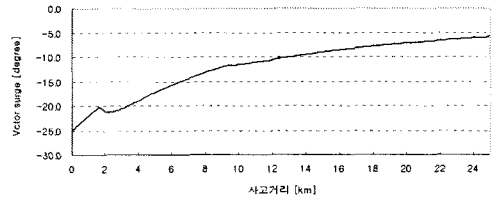


그림 6 3상 단락사고 시 Vector surge의 크기

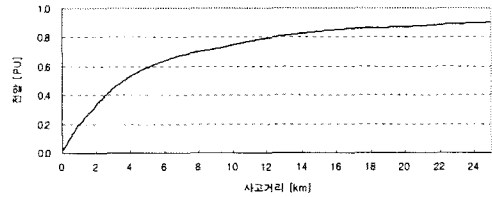


그림 7 1선 지락사고 시 전압 크기

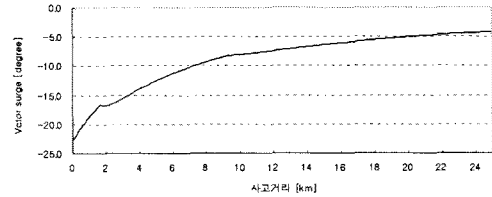


그림 8 1선 지락사고 시 Vector surge의 크기

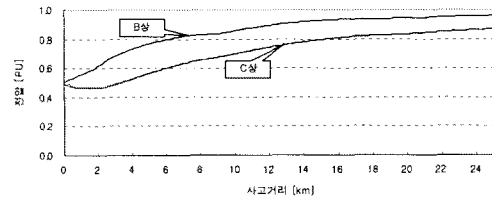


그림 9 2선 단락사고 시 전압 크기

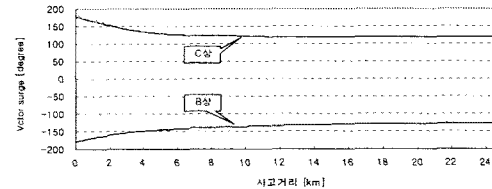


그림 10 2선 단락사고 시 Vector surge의 크기

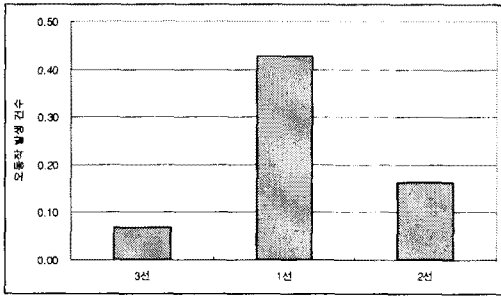


그림 11 전압 강하를 기준으로 외부사고에 대한 분산전원 보호계전기의 오동작 발생 횟수

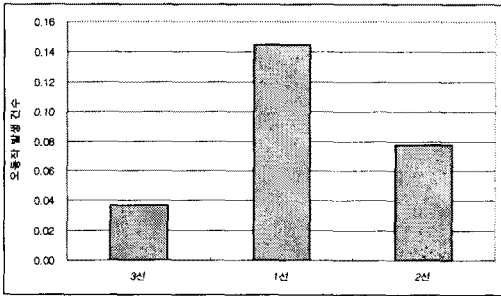


그림 12 Phase angle jump를 기준으로 외부사고에 대한 분산전원 보호계전기의 오동작 발생 횟수

3. 결 론

본 논문에서는 우리나라의 연간 배전선 사고 건수를 조사한 후 배전선의 사고 정도를 계산하여 분산전원 보호기들의 동작 수준을 고찰하였다. 대칭좌표법을 이용하여 1선 지락과 2선 단락 및 3선 단락 시 계통에서 발생하는 전압강하를 계산하였으며, 동시에 Phase angle jump도 산출하였다. 얻어진 결과를 대관령 풍력 실증 단지에 설치된 풍력발전기의 단독운전 알고리즘에 적용하여 연간 보호기기의 오동작 횟수를 산정하였다. 계산 결과 전압강하 기준으로는 연간 0.66 회 정도 발생하였으며, vector surge 기준으로는 연간 0.3 회 정도 발생하는 것으로 산정되었다. 여기서, 모선으로부터 30 km 떨어진 지점에서 발생한 외부 사고에 대해서도 분산전원의 보호기기는 오동작을 하였다. 특히, 2선 사고의 경우 Phase angle jump가 심하게 발생하여 3선 사고에 비해 오동작 수준이 높게 나타났다. 다음의 연구 결과는 향후 분산전원에 설치될 보호계전 알고리즘의 동작 시간을 결정하는데 유용하게 사용되리라 예상된다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

[1] 장성일, 김광호, "분산전원의 고립 운전 검출 기법의 개발" 대한전기학회 논문지, 제50A권 제11호, 2001년 11월, pp. 506-513

- [2] 김호표, 한상섭, 박용주, "전력계통의 고장 및 보호계전기 동작에 대한 분석" 2001년도 대한전기학회 전력기술부문 춘계학술대회 논문집, pp. 27-29
- [3] T. S. Key, Diagnosing power-quality related computer problems IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 15, no. 4, July 1979, pp. 381-393
- [4] R. Wilkins and M. H. J. Bollen, The role of current limiting fuses in power quality improvement, 3rd Int. Conf. on Power Quality: End-use applications and perspectives, October 1994, Amsterdam
- [5] 최정환, 장성일, 박제영, 김광호, 김재언, 박종근, "대칭성분을 이용한 3상 배전계통 조류계산 기법" 대한전기학회 논문지, 제51A권 제1호, 2002년 1월, pp. 15-22