

변압기의 선간 단락사고 보호를 위한 지락비율차동 계전 알고리즘의 성능향상 방법

강해권*, 김진호*, 김세창*, 박종수*, 박종은*
(주) 비츠로테크*

Improved Ground differential relaying algorithm for the protection of a line-to-line fault of transformer

Hae-Gweon Kang*, Jin-Ho Kim*, Se-Chang Kim*, Jong-soo Park*, Jong-Eun Park*
Vitzrotech*

Abstract - Ground differential relay is used to provide fast, sensitive, and selective protection for the wye connected and grounded electrical power equipment such as generators, power transformers, and grounding transformers. The ground differential protection only protects the ground faults within the protection zone, so that it can't protect the line-to-line fault. This paper proposes the algorithm to provide the protection for the line-to-line fault through the ground differential protection. The proposed algorithm detects the line-to-line fault of transformer using the comparison between the positive and the negative current, when the ground differential relay dose not operate. The performance of the algorithm is verified using a PSCAD/EMTDC simulator under various case studies.

1. 서 론

지락비율차동 계전기는 와이 결선된 전력장치의 지락사고 보호에 대해 타계전기와와의 코디네이션 없이 빠르고 민감한 동작의 보호를 제공한다[1]. 지락비율차동 계전방식은 배전계통에서 사고전류를 제한하기 위해 변압기 와이 측에 고저항 접지를 사용하여 비율차동이나 지락과전류 보호 요소의 동작에 충분한 사고전류가 제공되지 못하는 경우, 또는 델타 결선 회로의 접지를 제공해 주기 위해 사용되는 접지 변압기의 보호에 대안이 될 수 있다[2]. 또한, 산업용이나 배전계통에서 사용되는 저용량 델타-와이-접지 변압기 보호 시, 경제성을 고려하여 고압인 델타 측에 변류기가 없을 경우 절충안으로 변압기 델타 측은 주로 퓨즈를 사용하여 보호하며, 와이 측은 지락비율차동 계전 방식이 사용된다[3]. 이 경우 지락비율차동 계전기는 지락사고에 대한 보호만을 제공 하며, 보호범위 내의 선간단락 사고를 검출 할 수 없다.

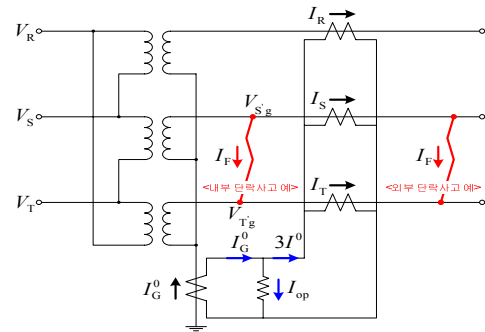
본 논문은 지락비율차동 계전 방식을 통해 변압기의 선간단락 사고를 검출 할 수 있는 알고리즘을 제안하여, 지락비율차동 계전 방식을 이용한 변압기 보호의 성능향상 방법을 구현한다. 제안한 알고리즘은 지락비율차동 계전 알고리즘이 동작하지 않았을 때, 각 상전류의 대칭성분 비교를 통해 단락사고를 판단한다. 제안한 알고리즘의 성능평가를 위해 과도현상 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC 시뮬레이터를 사용하여 배전계통과 변압기를 모델링 하였고, 다양한 사례모의를 통해 제안한 알고리즘의 성능을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 변압기 내부 선간단락 사고 보호를 위한 지락비율차동 계전 알고리즘 제안

지락비율차동계전 방식은 산업용이나 배전계통에서 사용되는 델타-와이-접지 변압기에 적용 될 경우, 변압기의 와이-접지 측의 내부 지락사고에 대한 보호를 제공하며, 델타 측은 주로 퓨즈를 이용하여 보호한다. 그림 1은 지락비율차동계전 방식을 통한 변압기 보호를 위한 결선을 나타낸다. 정상상태 시에는 R, S, T 3상 전류가 더해진 영상전류 값($3I^0$)과 와이-접지 측에서 측정된 N상의 전류 값(I_G^0)이 같다. 반면, 보호범위 내에서 지락사고가 발생하면, 보호범위 내에 사고로 인한 접지점이 발생하여 I_G^0 와 $3I^0$ 가 달라진다. 그런데 보호범위 내에서 발생한 단락사고의 경우는 사고로 인한 접지점이 발생하지 않아 사고에도 불구하고 I_G^0 와 $3I^0$ 가 같아서 동작하지 않는다.

본 논문은 기존의 지락비율차동계전 알고리즘과 R, S, T 각 상 전류의 대칭성분 비교를 통한 단락사고 판단 알고리즘을 이용하여 변압기 보호의 성능향상 방법을 제안한다. 제안한 알고리즘은 먼저 변압기 와이-접지 측의 3상 전류와 N상 접지 전류 값을 각각의 변류기를 통해 취득한다. 지락비율차동 계전 동작을 위해 취득한 R, S, T 3상 전류를 이용하여 영상전류 $3I^0$ 를 계산하고, 이 값을 변압기 N상 접지에서 취득한



〈그림 1〉 지락비율차동계전 방식을 통한 변압기 보호를 위한 결선

영상전류 I_G^0 와 비교하여 차동전류가 발생할 경우 트립을 발생시킨다. 또한, 제안한 알고리즘은 기존 방식으로 불가능한 보호범위 내의 단락사고 검출을 위해 I_G^0 와 $3I^0$ 의 차동전류가 발생하지 않은 경우 R, S, T 각 상 전류의 정상분과 역상분의 비교를 수행한다. 보호범위 내의 단락사고 발생 시, 나머지 건전상의 정상전류와 역상전류의 크기와 위상이 같아지는 특징을 이용하여 각 상의 정상 및 역상 전류를 계산한 후, 두 값이 같아질 경우 트립을 발생 시킨다.

2.1.1 지락비율차동 계전 알고리즘 동작

제안한 알고리즘의 지락비율차동 계전 동작의 두 가지 조건은 다음과 같다.

$$\text{조건1: } |I_{op}| \geq \text{동작전류TAP} \quad (1)$$

$$\text{조건2: } \frac{I_{op}}{I_r} \times 100 \geq \text{비율조정TAP}$$

여기서, 그림 1의 전류 방향을 고려하여 $I_{op} = I_G^0 - 3I^0$, $I_r = I_G^0 + 3I^0$ 이다.

2.1.2 전류 대칭성분 비교를 통한 내부 단락사고 판단 알고리즘 동작

제안한 알고리즘은 지락비율차동 계전 알고리즘이 동작하지 않았을 때, 각 상전류의 정상 성분과 역상성분 비교를 통해 두 값이 같게 될 경우 단락사고라고 판단하여 트립을 발생시킨다.

3상 전류를 이용하여 R상 전류의 정상분과 역상분을 구하는 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_R^+ &= (I_R + \alpha I_S + \alpha^2 I_T) / 3 \\ I_R^- &= (I_R + \alpha^2 I_S + \alpha I_T) / 3 \end{aligned} \quad (2)$$

그림 1에서 예로 표현한 외부 단락사고의 경우, 계전점의 S상과 T상 전류는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$I_S = I_F, \quad I_T = -I_F \quad (3)$$

식(3)을 식(2)에 대입하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_R^+ &= (I_R + \alpha I_F + \alpha^2 I_F) / 3 \\ I_R^- &= (I_R - \alpha^2 I_F - \alpha I_F) / 3 \end{aligned} \quad (4)$$

이 때, I_R 이 I_F 보다 비교적 작으면 $I_R^+ \approx -I_R^-$ 이 성립한다.

그림 1의 내부 단락사고의 경우, 사고로 인해 계전점의 S상과 T상의 상전압은 $V_{Sg} = V_{Tg}$ 의 관계가 성립한다. 따라서 부하가 평형이면 계전점의 S상과 T상 전류는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$I_S = I_T \quad (5)$$

식(5)를 식(2)에 대입하면 식(6)이 성립한다.

$$I_R^+ = I_R^- \quad (6)$$

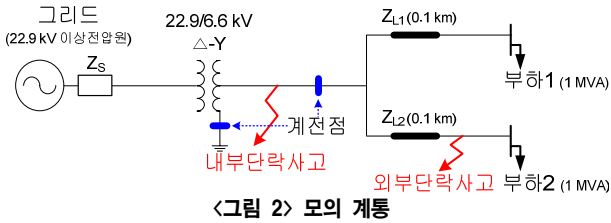
이러한 관계식은 RS상 단락 사고의 경우 T상 전류, RT상 단락사고의 경우 S상 전류에 동일하게 적용된다.

제안한 알고리즘은 정상상태, 내부 및 외부지락사고, 외부단락사고의 경우와 달리, 내부단락 사고 시에만 식(6)과 같은 특징을 이용하여, 식(7)의 조건을 만족하면 트립을 발생시킨다.

$$\left| \frac{I^+ - |I^-|}{|I^+|} \right| \times 100 \leq \text{설정값} \cap \left| \frac{\angle I^+ - \angle I^-}{\angle I^+} \right| \times 100 \leq \text{설정값} \quad (7)$$

3. 사례 연구

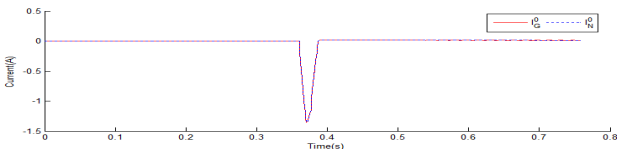
제안한 알고리즘을 검증하기 위해 그림 2와 같은 모의 계통을 PSCAD/EMTDC를 통해 구성하여 사례연구를 실시하였다. 모의 계통은 22.9 kV 이상전압원에서 델타-와이-접지 변압기와 선로를 거쳐 2 MVA의 부하에 전원을 공급하는 배전계통을 모델링 하였다. 22.9/6.6 kV, 3.5 MVA용량의 변압기는 내부권선의 지락사고 모의를 위해 각 상간 및 권선 간의 자기결합이 고려된 변압기를 사용 하였다. 다양한 사고모의(내부 지락·단락사고, 변압기 권선 지락 사고, 지락·단락지락사고)를 통해 제안한 알고리즘의 정동작 및 정부동작을 검증하였고, 본 논문에서는 제안한 알고리즘의 특징을 잘 나타내는 두 사례에 대해 설명한다.



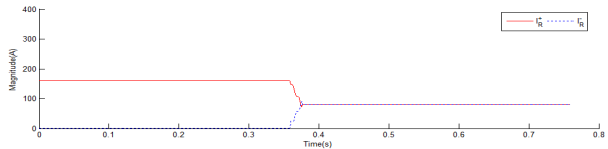
〈그림 2〉 모의 계통

3.1 사례1: 내부 S상-T상 선간 단락사고

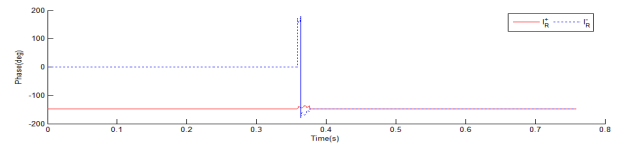
그림 3은 사례1에 대해 제안한 알고리즘의 성능평가 결과를 나타내며 사고 발생 시간은 0.358s 이다. 그림 3(가)는 변압기 와이-접지 측 N상에서 측정된 전류와 변압기 2차 측의 3상 전류를 이용하여 계산된 영상전류이다. 보호 범위내의 사고임에도 두 값이 거의 일치함을 확인 할 수 있다. 그림 3(나), (다)는 각각 R상의 정상 및 역상 전류의 크기와 위상을 비교하여 나타낸다. 정상상태에서는 R상 전류의 정상분과 역상분이 각각 다르지만, S상-T상의 선간단락 사고 후 같게 되는 것을 알 수 있다. 그림 3(라)는 제안한 알고리즘의 트립을 나타낸다. 보호범위 내의 S상-T상 선간 단락 사고에 대해 식(1)의 조건이 만족되지 않아 지락비율차동 계전이 동작하지 않았지만, 제안한 알고리즘은 전류대칭성분 비교를 통해 식(7)이 만족하여 사고 후 2주기 이내에 정동작 하였다.



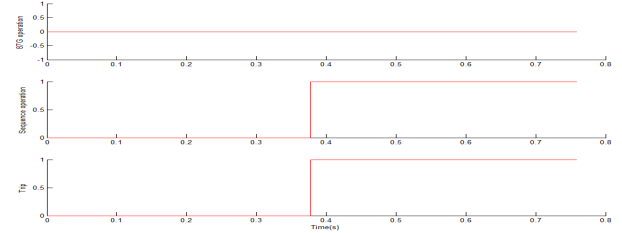
(가) 측정된 N상 전류, 계산된 영상전류



(나) R상의 정상 및 역상 전류의 크기

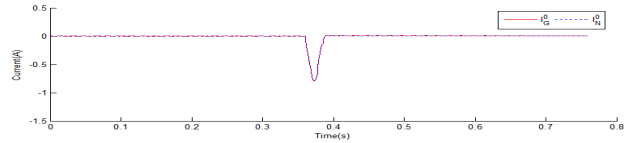


(다) R상의 정상 및 역상 전류의 위상

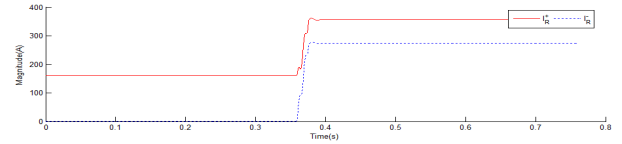


(라) 트립

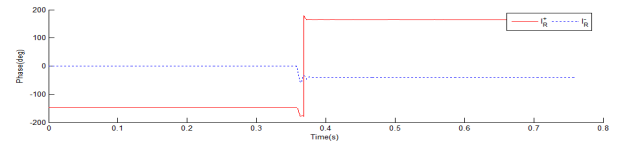
〈그림 3〉 사례 1의 결과



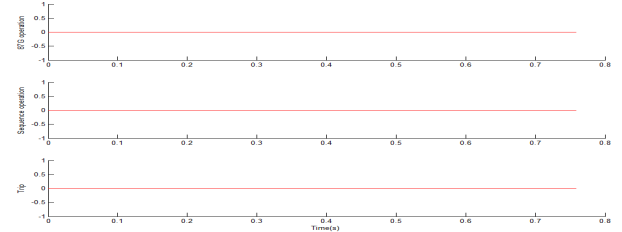
(가) 측정된 N상 전류, 계산된 영상전류



(나) R상의 정상 및 역상 전류의 크기



(다) R상의 정상 및 역상 전류의 위상

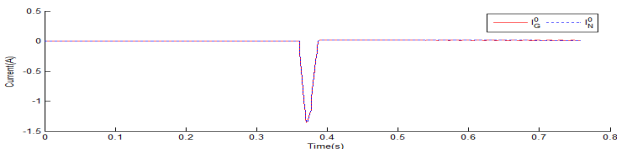


(라) 트립

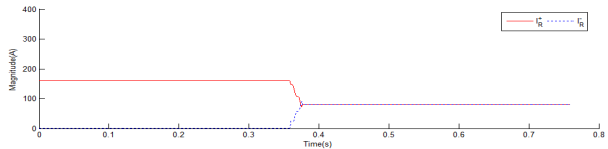
〈그림 4〉 사례 2의 결과

3.2 사례2: 외부 S상-T상 선간 단락사고

그림 4는 사례1에 대해 제안한 알고리즘의 성능평가 결과를 나타낸다. 그림 4(가)에서 I_G^0 와 $3I^0$ 는 사고 전·후 두 값이 거의 일치함을 확인할 수 있다. 그림 4(나), (다)의 R상의 정상 및 역상 전류의 크기와 위상은 사고 전·후 모두 각각 다를 수 있다. 그림 4(라)는 제안한 알고리즘의 트립을 나타낸다. 보호범위 외부에서 발생한 S상-T상 선간 단락 사고에 대해 제안한 알고리즘은 식(1)의 조건이 만족되지 않아 지락비율차동 계전이 동작하지 않았고, 식(7)의 전류대칭성분 비교 또한 만족하지 않아 정부동작 하였다.



(가) 측정된 N상 전류, 계산된 영상전류



(나) R상의 정상 및 역상 전류의 크기

4. 결론

본 논문은 한국전력공사 주관 전력기반기술개발사업, IED개발 연구과제의 일환으로 변압기 보호 계전 알고리즘 개발을 위해 진행된 연구로써, 변압기의 선간 단락사고 보호를 위한 지락비율차동 계전 알고리즘의 성능향상 방법을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 지락비율차동 계전 알고리즘이 동작하지 않았을 때, 각 상전류의 정상 성분과 역상 성분 비교를 통해 단락사고를 판단 한다. 성능평가 결과, 제안한 알고리즘은 보호범위 내의 지락 및 단락 사고에 대해 빠르게 동작하며, 외부사고를 구분하여 정부동작 함을 확인 하였다. 제안한 알고리즘은 지락비율차동 계전 방식의 장점을 유지하면서 기존의 성능을 향상 시켜 보다 신뢰성 있는 변압기 보호를 구현할 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] N. T. Stringer and G. Dalke, "Ground-Differential Protection Revisited", IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 6, no. 2, pp. 53-58, 2000.
- [2] P. E. Sutherland, "Application of Transformer Ground Differential Protection Relays", IEEE Tans. on Industry Applications, Vol. 36, no. 1, pp. 16-21, 2000.
- [3] J. L. Blackburn, T. J. Domin, "Protective Relaying Principles and application 3rd edition", CRC press, 2007