

SSSC로 보상된 송전 선로의 거리계전 알고리즘에 관한 연구

양진우*, 남순열*, 손진만*, 박종근*, 강용철**
 *서울대학교 전기공학부, **전북대학교 전기공학부

A Study on a Distance Relaying Algorithm for Transmission Line Compensated with SSSC

* J.W. Yang*, S.R. Nam*, J.M.Sohn*, J.K. Park*, Y.C. Kang**
 *Seoul National University, **Chonbuk National University

Abstract - This paper presents a distance relaying algorithm for transmission line compensated with Static Synchronous Series Compensator (SSSC). The compensation voltage driven by SSSC is calculated from the line current measured at a relaying point. Then the compensation voltage is subtracted from the voltage measured by the relay. We can apply conventional distance relaying algorithm with this subtracted voltage to locate a fault. The results of case studies using EMTP (Electro-Magnetic Transient Program) show the proposed algorithm has higher precision.

SSSC는 전류를 측정하기 위한 변류기, 전압을 생성하기 위한 인버터, harmonic neutralizer, 생성된 전압을 송전 선로에 인가하기 위한 변압기 등으로 구성된다. SSSC의 구성을 그림 1에 나타내었다.[3]

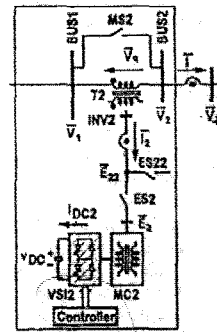


그림1 SSSC의 구성도

1. 서 론

최근 FACTS (Flexible AC Transmission System) 기기를 송전 선로에 투입하여 송전 용량을 증대시키고 안정도를 높이는 문제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 보호 계전의 측면에서는 FACTS 기기에 의한 영향을 고려하지 않은 채 기존의 거리계전 알고리즘을 그대로 적용할 수 없으며, 이에 따라 새로운 방식의 보호 계전 알고리즘의 개발이 필요하게 되었다.

지금까지 보상된 선로에서의 거리 계전에 대해 적지 않은 연구가 행해졌으나, 수동소자인 커패시터와 MOV (Metal Oxide Varistor)로 구성된 ASC (Advanced Series Compensator)를 FACTS기기로 사용한 경우에 대한 논문만이 주로 발표되었을 뿐 SSSC와 같이 능동소자를 이용한 FACTS기기를 사용한 경우에 대한 연구는 거의 없었다.[1,2]

본 논문에서는 SSSC로 보상된 송전 선로의 거리 계전 알고리즘을 제시하고 있다. 이 방식에서는 우선 SSSC가 만들어 내는 보상 전압을 계산하고, 그 값을 계전기가 관측한 전압에서 빼서 보상되기 이전의 전압을 계산한다. 이렇게 계산한 보상 이전의 전압과, 계전기가 관측한 전류 값을 이용해 기존의 거리계전 알고리즘을 적용하면 SSSC의 영향을 고려한 거리 계전이 가능하다. EMTP를 이용하여 SSSC가 투입된 선로에서의 사고 데이터를 생성하였으며 새로운 거리 계전방식을 이 데이터에 적용하여, 이 방식이 기존의 거리 계전방식보다 높은 정확도를 가지고 있음을 실험적으로 검증하였다.

2. 본 론

2.1 SSSC

SSSC는 송전 선로에 흐르는 전류의 위상을 측정해서, 그 위상보다 90° 앞서거나 뒤지는 전압을 만들어내어 선로에 직렬로 투입함으로써, 선로에 인덕턴스나, 커패시턴스를 투입하는 것과 같은 효과를 내는 FACTS기기의 한 종류이다.

2.2 SSSC의 영향을 고려한 거리계전 알고리즘

기존의 송전 선로의 거리 계전 알고리즘은 계전기가 측정하는 전류, 전압 파형을 이용해서 송전 선로의 R, L값을 계산하여 사고 거리를 추정하는 방식이다. 그러나 선로에 SSSC가 투입되면, 이 SSSC가 인가하는 전압의 영향으로 사고 거리를 잘못 추정하게 된다. 따라서 SSSC가 만들어 내는 전압을 계산하는 새로운 알고리즘이 필요하게 된다.

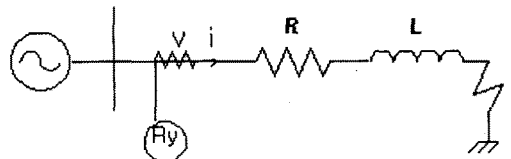


그림2 송전 선로 모델

통상적인 거리계전 알고리즘은, 그림2에 해당하는 송전선로 모델에서 다음과 같은 식을 이용하여 사고 거리를 추정한다.

$$v = xRi + xL \frac{di}{dt} \quad (1)$$

v: 계전기가 측정 한 전압

i: 계전기가 측정 한 전류

R: 전체 송전 선로의 저항 성분

L: 전체 송전 선로의 인덕턴스 성분

x: 전체 송전 선로길이에 대한 사고 거리의 비

위의 관계식에서, 미지수는 xR , xL 의 두 가지이므로, 임피던스를 추정하기 위해서는 두 개의 식이 필요하다. 디지털 계산방식에서 식 (1)은 다음과 같이 변환할 수 있다. [4]

$$v(k) = xRi(k) + xL \frac{i(k+1) - i(k-1)}{2\Delta T} \quad (2)$$

$$v(k+1) = xRi(k+1) + xL \frac{i(k+2) - i(k)}{2\Delta T} \quad (3)$$

$$\therefore \begin{bmatrix} v(k) \\ v(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(k) & \frac{i(k+1) - i(k-1)}{2\Delta T} \\ i(k+1) & \frac{i(k+2) - i(k)}{2\Delta T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} xR \\ xL \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\therefore \begin{bmatrix} xR \\ xL \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(k) & \frac{i(k+1) - i(k-1)}{2\Delta T} \\ i(k+1) & \frac{i(k+2) - i(k)}{2\Delta T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v(k) \\ v(k+1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

한편 SSSC가 투입된 송전 선로의 모델을 그림3에 나타내었다.

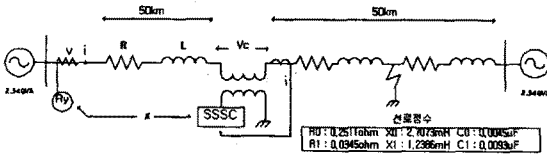


그림3 SSSC가 투입된 송전 선로 모델

그림3에서 사고는 계전기와 변압기사이의 선로나, 변압기 뒤쪽의 선로 어느 곳에서도 발생할 수 있다. 후자의 경우, SSSC가 사고 구간안에 포함되므로 변압기에 인가된 전압을 고려하는 방식인 식(6)을 이용할 수 있으나, SSSC가 사고 구간안에 포함되지 않는 전자의 경우에는 식(1)을 적용해야 한다. 본 논문에서는 후자의 경우만을 다루었다. 송전 선로에 SSSC가 투입된 그림3의 모델에서는 다음과 같은 식을 이용할 수 있다.

$$v - v_c = xRi + xL \frac{di}{dt}, \quad v_c = I_{amp} X \cos(\theta_i - \frac{\pi}{2}) \quad (6)$$

v_c : SSSC가 투입한 보상전압

I_{amp} : 전류의 크기 (amplitude)

X : 보상할 임피던스의 크기

θ_i : 전류의 위상

전류의 크기와 위상을 측정하는 방법은 다음과 같다. 우선 phase-locked loop을 이용하여 전압의 위상 θ 를 계산한 후, 전류의 순시값을 dq변환하여 real 성분 I_d 와 quadrature 성분 I_q 를 구한다. 이 값을 이용해 전류의 크기 I_{amp} , 전압과 전류의 위상각 차이 θ_{ir} 를 구할 수 있다. 전류의 위상 θ_i 는 전압의 위상 θ 와 θ_{ir} 를 더해 구한다. 이와 같은 과정을 거쳐 계산한 전류의 크기와 위상, 그리고 보상할 임피던스의 크기 X 로부터 v_c 를 계산할 수 있고, 계전기가 측정하는 전압 v 와 v_c 의 차이를 이용한 식(6)을 식(4), (5)의 v 대신 대입하여 통상적인 거리 계산 알고리즘을 적용할 수 있다. 즉, SSSC가 투입된 선로에서 식(5)는 다음의 식(7)과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$\therefore \begin{bmatrix} xR \\ xL \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(k) & \frac{i(k+1) - i(k-1)}{2\Delta T} \\ i(k+1) & \frac{i(k+2) - i(k)}{2\Delta T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v(k) - v_c(k) \\ v(k+1) - v_c(k+1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

그런데, 단상 지락 사고의 경우에는 영상 전류가 존재하므로 영상 보상이 이루어져야 한다. a상에서 발생한 단상 지락 사고에 대해 영상 보상을 하는 경우, 식(1)은 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$v_a = xRi_x + xL \frac{di_x}{dt} \quad (8)$$

$$i_x = i_a + \frac{R_0 - R_1}{R_1} i_0, \quad i_y = i_a + \frac{L_0 - L_1}{L_1} i_0 \quad (9)$$

i_a, i_b, i_c : a, b, c상의 전류

i_0 : 영상전류 ($= \frac{i_a + i_b + i_c}{3}$)

R_0, R_1 : 저항의 영상성분, 정상성분

L_0, L_1 : 인덕턴스의 영상성분, 정상성분

따라서 식(7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

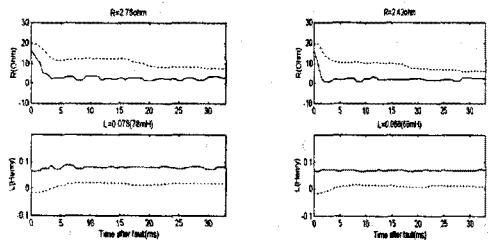
$$\begin{bmatrix} xR \\ xL \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_x(k) & \frac{i_x(k+1) - i_x(k-1)}{2\Delta T} \\ i_x(k+1) & \frac{i_x(k+2) - i_x(k)}{2\Delta T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v(k) - v_c(k) \\ v(k+1) - v_c(k+1) \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.3 사례 연구

본 논문에서 모의한 모델 계통은 그림3에 제시되어 있다. 모델 계통은 345kV급이며, 100km의 송전 선로 한 가운데에 SSSC와 변압기가 위치하므로, 앞쪽과 뒤쪽의 선로 길이는 각각 50km이다. SSSC는 24 pulse inverter와 harmonic neutralizer로 구성되며, EMTP의 TACS를 이용해 모의하였다. [3]

EMTP를 이용한 모의를 통해 송전 선로 3상의 각 계전점에서의 전압, 전류 파형을 얻은 뒤 low-pass 필터링 했다. 그 다음 전류의 크기와 위상을 계산하여 SSSC가 만들어 내는 전압 v_c 를 식(6)과 같이 계산한 후, 이 값을 식(10)에 적용해서 R값과 L값을 추정한다. 모의 결과, 계산된 R, L값은 일정한 값으로 어느 정도 수렴하였으나, 그 값을 중심으로 조금씩 진동하는 특성을 보였다. 따라서 이 진동 특성을 보상하기 위해 미디언 필터 (median filter)를 이용해 수렴성을 향상시켰다. [5] 미디언 필터는, 연속적인 세 개의 데이터 중에서 중간 크기의 값을 선택하는 필터로, 특정한 수렴값을 중심으로 조금씩 떨리는 값들을 가지고 그 수렴값을 찾아내는데 쓰인다.

변압기의 오른쪽에서 단상 지락 사고를 발생시켜 임피던스를 추정한 실험 결과가 그림 4, 그림 5에 나타나 있다. 계전기와 변압기사이의 선로 길이가 50km이며, 변압기 뒤쪽 선로에서의 사고거리를 10km 단위로 증가시키면서 각각 50, 60, 70, 80%에 대해 0도와 90도 사고를 모의했다.



(a) 80% 사고일 경우

(b) 70% 사고일 경우

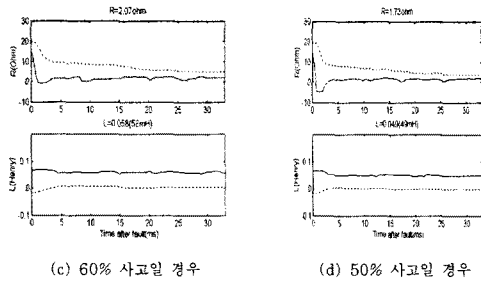


그림4. 사고각 0도일 때의 R, L값

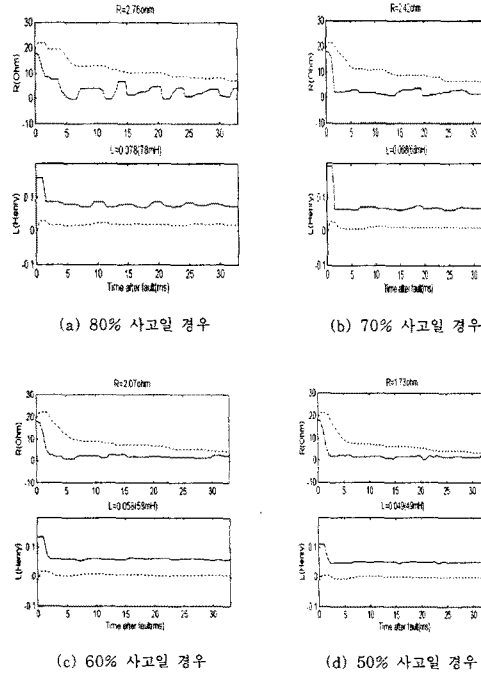


그림5. 사고각 90도일 때의 R, L값

그림에서 점선은 SSSC의 영향을 고려하지 않은 방식에 의한 임피던스 계산값이며, 실선은 제안된 계전방식에 의한 계산값으로, 모든 그림에서 R값은 실선이 점선보다 아래에 위치하고, L값은 실선이 점선보다 위에 위치하는 특성을 보여준다. 이것은 다음과 같이 설명할 수 있다.

기존의 방식에서는 SSSC가 보상하는 임피던스 성분을 고려하지 않은 채 인덕턴스를 추정하므로, 실제의 인덕턴스보다 더 작은 값으로 잘못 계산하게 된다. 반면 제안된 방식은 이 성분을 고려하여 보상되기 이전의 인덕턴스를 정확하게 추정하므로 기존의 방식에 비해 계산된 인덕턴스의 값은 더 크게 된다.

또한 이상적인 경우라면 두 가지의 방식에 있어서 저항성분은 차이가 없어야 하나, 실제로는 SSSC가 만들어내는 전압에는 전류와 위상이 같은 성분이 존재하며, 이 저항성분은 SSSC에서 손실이 발생함을 의미한다. [3] 따라서 기존의 방식은 실제 저항값과 SSSC에 의한 저항성분을 더한 값을 전체 사고 구간의 저항값으로 계산하므로, 실제의 저항값보다 크게 되며, 제안된

방식은 이 저항성분에 의한 영향을 고려하므로, 실제 저항값만을 정확하게 추정한다. 이와 같은 특성은 그림 4, 5 (a)-(d)의 모든 경우에 잘 나타나 있으며, 이것은 제안된 방식의 정확성을 잘 보여주는 것이라 할 수 있다.

그러나 그림 5 (a)의 경우, 제안된 방식으로 계산한 R, L값이 수렴성에 있어서는 오히려 기존의 방식에 비해 좋지 못한데, 이것은 추후 해결해야 할 과제이다.

3. 결 론

본 논문에서는 SSSC로 보상된 송전 선로에서 적용할 수 있는 새로운 거리 계전 알고리즘을 제시하였다. 이 알고리즘은 계전기가 측정한 전압과 전류로부터 SSSC가 인가하는 보상 전압을 추정한 후, 그 값을 계전기가 측정한 전압에서 뺀 뒤 거리 계전을 하는 방식이다. EMTP를 이용해 모의한 결과, SSSC의 영향을 고려하지 않는 기존의 방식보다 높은 정확성을 가지고 있음을 보였다. 앞으로는 계산한 임피던스 값의 수렴성을 높이는 방법과, fault loop 안에 SSSC가 포함되지 않는 경우와 포함되는 경우를 구별하여 적용할 수 있는 계전 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] A.A.Girgis, "An Adaptive Protection Scheme for Advanced Series Compensated(ASC) Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, April, pp. 414-420, 1998
- [2] Damir Novosel, "Algorithms for Locating Faults on Series Compensated Lines Using Neural Network and Deterministic Methods", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, October, pp. 1728-1736, 1996
- [3] K.K.Sen, "SSSC-Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling, and Applications", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January, pp. 241-246, 1998
- [4] A.T. Johns and S.K.Salman, "Digital Protection for Power Systems", Peter Peregrinus Ltd., pp. 111, 1995
- [5] M. Akke, J. S. Thorp, "Improved Estimates From the Differential Equation Algorithm By Median Post-Filtering", IEE 6th International Conference on "Development in Power System Protection", University of Nottingham, UK, 25-27 March 1997