

아크지락사고에 대한 사고 판별 및 적응 재폐로 기법

김현홍*, 추성호*, 채명석**, 박종배*, 신중린*
 건국대*, 군장대**

Identification of Arcing Fault and Development of An Adaptive Reclosing Technique about Arcing Ground Fault

H.H. Kim, S.H. Choo, M.S. Chae, J.B. Park, J.R. Shin
 Dept. of Electrical Eng. Konkuk Univ. Kunjang Univ.

Abstract - This paper presents a new one-terminal numerical algorithm for fault location estimation and for faults recognition. The proposed algorithm are derived for the case of most frequent single-phase line to ground fault in the time domain. The arc voltage wave shape is modeled numerically on the basis of a great number of arc voltage records obtained by transient recorder. From the calculated arc voltage amplitude it can make a decision whether the fault is permanent or transient. In this paper the algorithm uses a very short data window and enables fast fault detection and classification for real-time transmission line protection. To test the validity of the proposed algorithm the Electro-Magnetic Transient Program(EMTP/ATP) is used.

1. 서 론

전력계통이 규모가 커지고 복잡화 되면서 선로 및 기기에 사고가 발생하였을 때, 그 사고의 파급효과는 전력계통 전체에 공급장치를 초래할 수 있을 뿐 만 아니라 엄청난 경제적 손실을 유발할 수 있다. 이러한 사고에 대응하여 보호계전기는 전력계통의 안전운전을 유지하기 위한 장치로서 전기적 사고의 제거와 사고의 영향을 경감시켜 전력공급의 신뢰도 확보에 아주 중요한 역할을 한다. 특히 많은 전기 사업자들이 신속한 사고복구 측면에서 보호계전시스템(Protective Relay System) 가운데 고속재폐로 방식을 송전 선로의 보호시스템으로 채택해 왔다. 이러한 고속재폐로 방식은 선로에서 발생한 사고의 대부분이 낙뢰나 수목접지등과 같은 일시 사고이고 신속한 사고대응을 요구하기 때문에 선로사고에 성공적으로 사용되어 왔다. 그러나 사고 시 재폐로의 오·부동작이 유발될 경우 그 사고의 파급효과는 전력설비 뿐만 아니라 계통 전체에 치명적인 피해를 가져올 수 있다. 따라서 전력계통에서 발생하는 사고에 대해서 신속히 대응하고 동시에 정확히 사고를 식별하여 전력설비의 소손 방지와 계통 안정 유지에 기여할 수 있는 보호계전시스템의 알고리즘 개발이 무엇보다도 중요하다.

본 논문에서는 한 단자의 정보를 이용한 고장 거리의 판단과 아크 고장 판별에 대하여 전력 계통 사고의 대부분인 1선 지락사고를 기준으로 하여 시간영역에서의 수치적 알고리즘을 제시한다. 또, 실제 아크 데이터를 얻기 위한 실험이나 현장 모의는 현실적 어려움으로 인하여, EMTP/ATP를 통하여 고장을 모의하였으며, MATLAB의 선형 최소자승법(Least Square Error Method)을 사용하여 알고리즘을 평가하고 시뮬레이션하였다.

2. 본 론

2.1 아크의 특성

일반적인 아크사고는 비선형의 구조를 갖고 있으며, 다른 방전 사고에 비해 작은 전압과 큰 전류를 가지게 된다. 아크 사고의 비선형 특성은 전압과 전류 파형의 왜곡을 가져오게 되며 아크 전압의 파형 모양은 근사적으로 구형파의 형태를 갖는다. 이러한 아크 파형을 해석하기 위해 DFT를 사용하였다. [1,2]

2.2 고장거리 추정 및 아크 전압 계산 알고리즘

송전선로에 발생하는 여러 가지 사고의 종류 중 1선 지락사고는 선로 사고의 70-90%에 해당하므로 이를 알고리즘 개발의 대상 사고로 가정하고 본 알고리즘에 적용시키려 한다.

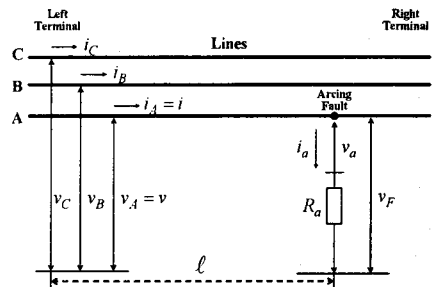


그림 1. 1선 지락 아크 사고

그림 1의 v_A, v_B, v_C 는 선로 전압이고 i_A, i_B, i_C 는 선로 전류, v_a 는 아크전압, R_a 은 고장 저항, v_F 는 사고 지점의 고장 전압이다. 이들은 본 알고리즘의 입력 자료가 되고 고장지점과 아크 전압의 크기는 본 알고리즘을 통하여 추정된다. 선로 고장 시 해석을 위해 그림 1의 삼상회로는 그림 2-4와 같이 각각 positive(p)-, negative(n)-, 그리고 zero(0) 세 개의 단상 시퀀스 등가 회로로 표현할 수 있다.

여기서 $v_p(t), v_n(t), v_0(t)$ 는 계전기에서 측정된 positive-, negative-, zero 시퀀스 전압이고 $i_p(t), i_n(t), i_0(t)$ 는 계전기에서 측정된 positive-, negative-, zero 시퀀스 전류, $v_{F_0}(t)$ 는 사고 부분에서의 zero 시퀀스 고장 전압, z_0 는 라인의 단위 거리당 zero 시퀀스 임피던스이다.

각 시퀀스 회로는 아래와 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$v_p(t) = z_p \ell i_p(t) + v_{F_p}(t) \tag{1}$$

$$v_n(t) = z_n \ell i_n(t) + v_{F_n}(t) \tag{2}$$

$$v_0(t) = z_0 \ell i_0(t) + v_{F_0}(t) \quad (3)$$

기본적인 대칭좌표법 표현은 다음과 같다.

$$v(t) = v_p(t) + v_n(t) + v_0(t) \quad (4)$$

$$v_F(t) = v_{F_p}(t) + v_{F_n}(t) + v_{F_0}(t) \quad (5)$$

식 (1), (2), (3)을 식 (4), (5)에 대입하면 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$v(t) = \{zi(t) + (z_o - z) i_0(t)\} \ell + v_F(t) \quad (6)$$

또, 시간 영역에서의 고장 전압(v_F)은 식 (7)로 표현된다. [3]

$$v_F(t) = V_a \text{sgn}[i_F(t)] + R_{F_0} i_F(t) + \varepsilon \quad (7)$$

여기서 V_a 는 아크전압크기, ε 는 측정오차 및 선로 및 아크 모델링의 오차이다.

식 (7)과 식 (6)을 이용하면 식 (8)과 같이 사고 상 전압을 풀이 할 수 있다.

$$v(t) = \{zi(t) + (z_o - z) i_0(t)\} \ell + V_a \text{sgn}[i_F(t)] + R_{F_0} i_F(t) + \varepsilon(t) \quad (8)$$

고장전압은 계전기로부터 식 (8)에 의해 측정되고 아래의 식 (9)로부터 선로의 단위 길이 당 저항 r 과 리액턴스 x 에 의한 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$v(t) = \left[r \{i(t) + K_R i_0(t)\} + \frac{xd}{\omega_0 dt} \{i(t) + K_L i_0(t)\} \right] \ell + V_a \text{sgn}\{i(t) - i_L(t)\} + R_e \{i(t) - i_L(t)\} + \varepsilon(t) \quad (9)$$

여기서, l : 고장지점, $i(t)$: 사고 후 전류, $K_L = (x_0 - x)/x$, $K_R = (r_0 - r)/r$, $i_L(t)$: 사고 전 전류, K_L , K_R : 선 계산 계수, x_0 : 선로의 단위길이 당 zero시퀀스 리액턴스, r_0 : 선로의 단위길이 당 zero시퀀스 저항, R_e : 등가 저항, ω_0 : 기본각속도, $\varepsilon(t)$: 측정오차 및 선로 및 아크 모델링의 오차.

식 (8)은 전류 포함수의 수치적 계산이 필요하고 그 근사식은 식 (9)로 이끌어진다.

$$\frac{di(t)}{dt} \approx \frac{i_{n+1} - i_{n-1}}{2T} \quad (10)$$

여기서 T 는 샘플링 간격이고 k 번째 이산 시간 식은 아래와 같다.

$$v_k = \left[r \{i_k + K_R i_{0k}\} + \frac{x}{2T\omega_0} \{(i_{k+1} - i_{k-1}) + K_L (i_{0(k+1)} - i_{0(k-1)})\} \right] \ell + V_a \text{sgn}(i_k - i_{Lk}) + R_e (i_k - i_{Lk}) + \varepsilon_k \quad (11)$$

식 (11)은 아래와 같은 행렬식으로 줄여 쓸 수 있다.

$$v_k = a_{k1} \ell + a_{k2} V_a + a_{k3} R_e + \varepsilon_k \quad (12)$$

여기서, 시간 종속 계수는

$$a_{k1} = r(i_k + K_L i_{0k}) + \frac{x}{2T\omega_0} \{(i_{k+1} - i_{k-1}) + K_L (i_{0(k+1)} - i_{0(k-1)})\}, a_{k2} = \text{sgn}(i_k - i_{Lk}), a_{k3} = i_k - i_{Lk} \text{이다.}$$

식 (12)에 의해 모든 N 개의 샘플에서 행렬의 형태로 일반화하면 식 (13)이다.

$$V = AX + \varepsilon \quad (13)$$

여기서, $V = [v_1, \dots, v_N]^T$, $X^T = [\ell, V_a, R_e]$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & a_{N3} \end{bmatrix}, \varepsilon = [\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N]^T$$

X^T 는 최소자승법을 이용하여 도출하였다.

$$X = (A^T A)^{-1} A^T V \quad (14)$$

3. 사례 연구

본 논문에 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 EMTP/ATP(Electromagnetic Transient Program)을 이용하여 사고를 모의하였다. 그림 2에서 보듯이 테스트를 위한 모의 전력 시스템은 400kV급 시스템이며, 송전선로의 캐패시터 값은 무시한다. $v(t)$, $i(t)$ 는 양단자의 전압과 전류를 나타낸다. 송전 선로의 변수는 일정한 값으로 정의하며, $d = 100[\text{km}]$, $r = 0.0325\Omega/\text{km}$, $x = 0.03\Omega/\text{km}$, $r_0 = 0.097\Omega/\text{km}$, $x_0 = 0.9\Omega/\text{km}$ 이다. Network A의 데이터는 $R_A = 1\Omega$, $L_A = 0.064H$, $R_{A0} = 2\Omega$, $L_{A0} = 0.128H$ 이고 Network B의 데이터는 $R_B = 0.5\Omega$, $L_B = 0.032H$, $R_{B0} = 1\Omega$, $L_{B0} = 0.064H$ 이다. Network A, B의 기전력은 $E_A = 400kV$, $E_B = 395kV$ 이다. 전력 시스템의 샘플링 주파수는 $f_s = 3840\text{Hz}(64\text{sample}/T_0)$ 이다.

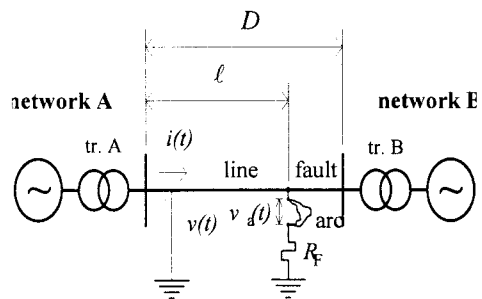


그림 2. 모의 테스트 시스템

아크 전압은 일정하지 않은 값이 포함된 크기가 $V_o = 4.5[kV]$ 인 수형파의 형태로 가정하였고, 고장 발생 위치는 Network A의 각 10, 20, 30, 80, 90 km지점에서 발생했다고 가정한다. 알고리즘의 타당성을 측정하기 위하여 MATLAB을 사용하여 모의 테스트 하였다.

그림 3-6은 EMTP/ATP를 이용하여 계산된 값들을 바탕으로 한 그래프이며 그림 3, 4는 3상 송전선로의 a-상, 10km지점에서 고장이 발생 시 측정된 전압과 전류의 변화량이고, 그림 5, 6은 사고 거리에 따른 a-상의 전

압과 전류의 변화량이다.

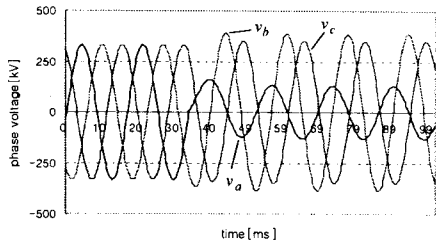


그림 3. 계전기지지점에서 측정된 사고 상 전압($l=10\text{km}$)

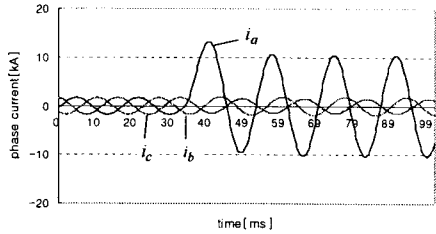


그림 4. 계전기지지점에서 측정된 사고 상 전류($l=10\text{km}$)

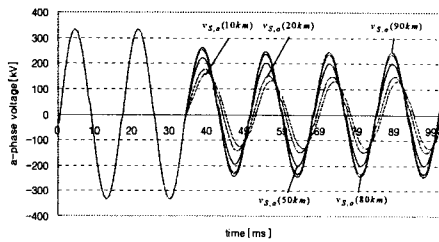


그림 5. a상 사고 상전압($l=10, 20, 50, 80, 90$)

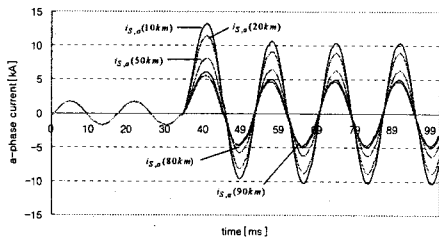


그림 6. a상 사고 상 전류($l=10, 20, 50, 80, 90$)

정확한 고장 거리와 아크 전압 크기는 각각 $l=10\text{km}$, $V_a=4.5\text{kV}$ 이고 그림 7에서 본 알고리즘에 의해 계산된 고장 거리와 아크 전압 크기는 $l=10\text{km}$, $V_a=4.5\text{kV}$ 로 각각 50ms, 60ms에서 수렴하였다. 그림 8은 5가지 경우($l_s=10, 20, 50, 80, 90$)의 계산된 거리를 보여준다. 그림 9은 오차를 계산한 그림으로 고장 시작으로부터 20ms내, 거리 계산 결과는 5%내로 수렴한다.

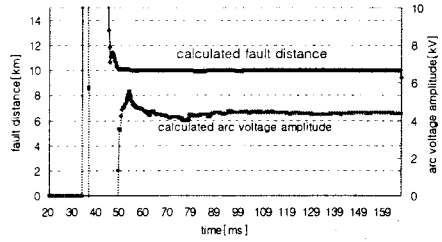


그림 7. 거리 계산과 아크 전압 크기

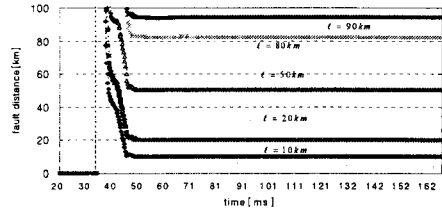


그림 8. 고장 거리에 따른 고장 거리 계산

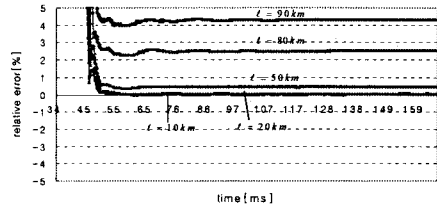


그림 9. 고장 거리 계산의 상대적인 오차

4. 결 론

본 논문에서는 사고거리 추정에 관해 선로의 한 단자에서 측정된 전압과 전류를 새로운 알고리즘의 입력데이터로 사용하였고 DFT 알고리즘을 사용하여 획득한 데이터를 분석하였으며, 사고 시 발생하는 비선형 아크 특성을 실제 아크 전압-전류 특성을 바탕으로 푸리에 시리즈를 이용하여 수치적으로 정의하였다. 측정된 전압, 전류 파형을 본 논문에 제시한 알고리즘에 적용하여 재페로기의 동작 책무와 사고 거리를 평가하였다. 본 논문에서 제시한 향상된 알고리즘의 타당성을 판단하기 위하여 사고의 모의는 EMTP/ATP를 사용하였으며, 알고리즘의 타당성은 MATLAB을 사용하여 증명하였다. 본 논문에서 제시한 알고리즘을 통해 사고 거리 및 사고 유형을 빠른 시간 내에 평가함으로써 송전선로의 빠른 복구와 적용 재페로기의 동작책무를 사고와 동시에 실시간으로 결정할 수 있을 거라 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Zoran Radojevic, Joong-Rin Shin, " A New One - Terminal Numerical Algorithm for Adaptive Autoreclosure and Fault Distance Calculation", Tran. KIEE, Vol. 53A, No. 8, Aug. 2004, pp438-445
- [2] M.B.Djuric, Z.M. Radojevic, V.V. Terzija, " Time Domain Solution of Fault Distance Estimation an Arcing Fault Detection on Overhead Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 14, No. 1, Januaty 1999.
- [3] C.J.Lee, H.H.Kim,j.b.Park, J.R.Shin, and Zoran Radojevic, " An Improved Two-Terminal Numerical Algorithm of Fault Location Estimation and Arcing Fault Detection for Adaptive AutoRecloure", Tran. KIEE, Vol. 54A , No. 11, NOV, 2005,