

아크 지락 사고에 대한 사고거리추정 및 사고판별에 관한 자동 적응자동재폐로 기법

김현홍 · 이찬주 · 채명석* · 박종배 · 신중린
 Konkuk대학교 전기공학과 · *군장대학교 전기공학과

Adaptive AutoReclosure Technique for Fault Location Estimation and
 Fault Recognition about Arcing Ground Fault

Hyun-Houng Kim · Chan-Joo Lee · Myung-Sen Chae* · Jong-Bae Park · Joong-Rin Shin
 Dept. of Electrical Eng., Konkuk Univ. *Dept. of Electrical Eng., Kunjang College

Abstract - This paper presents a new two-terminal numerical algorithm for fault location estimation and for faults recognition using the synchronized phasor in time-domain. The proposed algorithm is also based on the synchronized voltage and current phasor measured from the PMUs(Phasor Measurement Units) installed at both ends of the transmission lines. Also 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 is given and estimated using DFT(Discrete Fourier Transform) and the LES(Least Error Squares Method). 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) and MATLAB is used.

알고리즘에 적용하여 사고 위치와 재폐로의 동작책무를 결정하는 알고리즘을 제시한다. 또한 송전선로의 사고 유형 가운데 가장 빈번한 1선 지락사고를 중심으로 알고리즘을 유도하였으며, 시간영역내에서 이를 해석하였다. 본 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 EMTP/ATP를 통해 모의 수행하였다. 또한 왜곡된 전압과 전류 파형을 DFT를 사용하여 처리하였으며, 알고리즘의 타당성을 판별하기 위하여 MATLAB을 사용하여 사례연구 결과를 비교분석 하였다.

2. 사고거리 및 아크전압 크기 계산 알고리즘

송전선로에 발생하는 가장 빈번한 1선 지락사고에 대한 재폐로의 성공여부는 매우 중요하며, 성공적인 재폐로 투입여부에 대한 정확한 사고검출 및 사고거리추정 알고리즘의 개발이 시급하다. 더욱이 신속한 사고처리를 위한 실시간 사고처리 알고리즘이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 송전선로 상에서 발생하는 가장 빈번한 1선 아크지락사고를 알고리즘 개발의 대상 사고로 가정하고 영단에서 동기된 전압과 전류 페이지를 이용하여 시간영역에서 이를 유도하였다. 그림 1은 3상 송전선로에서 발생한 a-상 아크지락사고를 나타낸다.

1. 서 론

전력계통이 규모가 커지고 복잡화 되면서 선로 또는 기기에 사고가 발생하였을 때, 그 사고의 파급효과는 전력계통 전체에 공급장상을 초래할 수 있을 뿐만 아니라 엄청난 경제적 손실을 유발할 수 있다. 이러한 사고에 대응하여 보호계전기는 전기적 사고의 제거와 사고의 영향을 경감시켜서 전력계통의 안전운전을 유지하기 위한 장치로서 전력공급의 신뢰도 확보에 아주 중요한 역할을 해왔다. 과거 수년 동안 송전선로사고에 따른 재폐로의 동작책무를 결정하는 기법과 아크의 동특성에 관한 연구가 보고되어 왔다. 특히 아크를 동반하는 사고의 경우 아크가 비선형적인 전압-전류 특성 뿐만 아니라 아크에 작용하는 여러 가지 형태의 힘과 시간에 따라 길이가 가변되는 동특성을 지니기 때문에 실제 여러 가지 아크 특성을 고려하여 정식화하기가 어렵다. 따라서 많은 연구자들이 실험을 통해 수학적 아크모델을 제시하였고, 더불어 성공적인 재폐로 수행을 위한 많은 알고리즘을 제시하였다[1-3]. 전력시스템의 경우 상태벡터에 해당하는 모션전압의 크기(voltage magnitude)는 계량실비를 통해 직접 계량할 수 있으나, 위상각(phasor angle)의 경우 직접 계량할 실효성 있는 수단이 없었다. 하지만 고정밀 GPS(Global Positioning System) 시각정보를 활용함으로써 근본적인 해결이 가능하게 되었으며, 현재 모션의 상태벡터를 동시에 측정하는 계량실비가 PMU이다. PMU는 고정밀 시각기를 통해 전력계통의 상태를 감시하는데 유용하게 사용되고 있다. 본 논문에서는 이러한 동기기술을 이용하여 사고 동안 양 단자에서 측정되는 왜곡된 전압과 전류의 파형을 새로운 수치 해석적

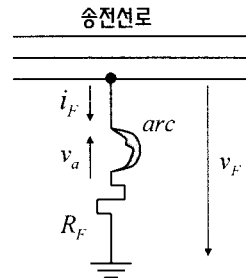


그림 1 사고 모델

그림 1에서 볼 수 있듯이 사고 상전압 v_F 는 정식 (1)와 같이 회로방정식을 이용하여 표현할 수 있다.

$$v_F(t) = v_a(t) + R_F i_F(t) \tag{1}$$

여기서,

$v_a(t)$: 아크 전압, R_F : 사고 저항, $i_F(t)$: 사고 전류

본 논문에서 제시하는 동기 기술을 이용한 새로운 고정밀 거리 및 재폐로의 동작책무를 판별하는 알고리즘은 다음과 같은 가정을 한다.

- 사고 유형 : a-상의 아크지락사고
- 선로 길이 : 단거리 선로 (선로의 캐패시턴스 무시)

그림 2는 3상 송전선로의 단상 아크지락 사고를 나타내고 있다.

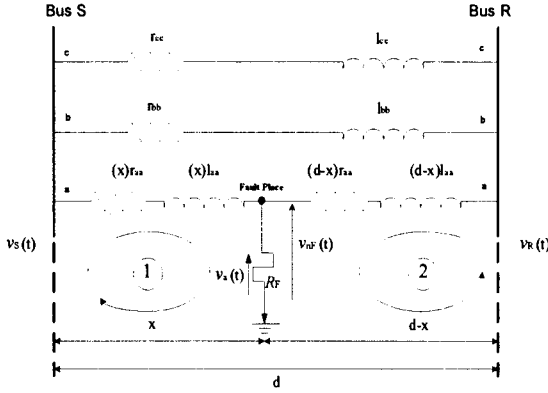


그림 2 3상송전선로 내에 발생한 단상 아크지락사고

본 논문에서는 동기 기술을 이용한 새로운 고장거리 추정 알고리즘은 정식(2)와 같이 나타낼 수 있다[4]. 시간 영역내에서 양단자로 전달되는 전압과 전류를 이용하여 사고 발생 시 전력계통을 회로방정식으로 풀이가 가능하다.

$$x = \frac{\sum_{n=a,b,c} \sum_{k=1}^N A_n(k)}{\sum_{n=a,b,c} \sum_{k=1}^N B_n(k)} \quad (2)$$

여기서,

$$A_n(k) = v_{nS}(k) - v_{nR}(k) - d \sum_{p=a,b,c} \left[\left(r_{np} + l_{np} \frac{1}{\Delta t} \right) i_{pR}(k) - l_{np} \frac{1}{\Delta t} i_{pR}(k-1) \right]$$

$$B_n(k) = \sum_{p=a,b,c} \left[\left(r_{np} + \frac{l_{np}}{\Delta t} \right) (i_{pS}(k) + i_{pR}(k)) - \frac{l_{np}}{\Delta t} (i_{pS}(k-1) + i_{pR}(k-1)) \right]$$

본 논문에서 사고거리 추정 알고리즘뿐만 아니라 사고 판별에 관한 알고리즘을 아크사고 모델 식을 이용하여 유도하였다[4]. 송전단을 기준으로 아크사고를 가진 송전단 전압은 정식 (3)와 같다.

$$v_{nS}(t) = x \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pS}(t) + l_{np} \frac{di_{pS}(t)}{dt} \right\} + v_{nF} \quad (3)$$

아크전압과 아크전류를 동상인 순수한 구형파의 형태로 가정하면, 정식 (1)에서 표현된 아크전압을 정식 (4)과 같은 수학적인 형태로 표현할 수 있다.

$$v_a = V_a \operatorname{sgn} [i(t)] + \xi(t) \quad (4)$$

여기서, ξ : 가우시안 노이즈, sgn : 시그넘 함수

정식 (1) 와 정식 (4)이 이용하여 아크전압을 표현하면 정식 (5)과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{nF} = V_a \operatorname{sgn} [i_F(t)] + R_F i_F(t) + \xi(t) \quad (5)$$

여기서, 사고전류는 키르히호프 제 1법칙을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_F = i - i_L \quad (6)$$

정식 (6)을 정식 (5)에 대입하면 정식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{nF}(k) = V_a \operatorname{sgn} [i(k) - i_L(k)] + R_F \{i(k) - i_L(k)\} + \xi_k \quad (7)$$

정식 (7)을 정식 (3)에 대입하면 정식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$v_{nS}(k) = x \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pS}(k) + \frac{l_{np}}{\Delta t} (i_{pS}(k) - i_{pS}(k-1)) \right\} + V_a \operatorname{sgn} [i(k) - i_L(k)] + R_F \{i(k) - i_L(k)\} + \xi_k \quad (8)$$

사고 거리는 정식 (2)을 통하여 이미 계산되었기 때문에 정식 (8)을 미지의 변수에 대하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{kS} = a_{k1} V_a + a_{k2} R_F + b_k + \xi_k \quad (9)$$

여기서,

$$a_{k1} = \operatorname{sgn} [i(k) - i_L(k)]$$

$$a_{k2} = \{i(k) - i_L(k)\}$$

$$b_k = x \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pS}(k) + \frac{l_{np}}{\Delta t} (i_{pS}(k) - i_{pS}(k-1)) \right\}$$

정식 (9)은 N 개의 샘플링을 위한 행렬 방정식의 형태로 표현하면 정식 (10)과 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{1S} \\ \vdots \\ v_{kS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ \vdots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ R_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_k \end{bmatrix} \quad (10)$$

정식 (10)에서 가우시안 노이즈항을 무시하고 행렬형태로 정식화하면 정식 (11)과 같이 간단히 정리할 수 있다.

$$V = A \cdot X + B \quad (11)$$

여기서, V 는 $N \times 1$ 행렬, A 는 $N \times 2$ 행렬, X 는 2×1 행렬, 그리고 B 는 $N \times 1$ 행렬

정식 (11)을 풀이기 위하여 최소 자승법(Least Error Square Method)을 사용하여 풀이하면 정식 (12)과 같다.

$$X = (A^T A)^{-1} A^T (V - B) \quad (12)$$

아크전압을 계산한 후 아크를 가진 사고인지(일시 사고) 아니면 아크가 없는 사고(영구사고) 인지를 결정할 수 있다. 만약 계산된 아크전압의 크기가 아크전압의 그라디언트(voltage gradient)와 아크길이의 곱보다 크다면 과도사고 이다. 여기서 아크 길이는 애자의 역설각 길이 보다 크거나 같다. 평균 아크 전압의 그라디언트는 12-15 V/cm이다[2].

3. 사례연구

본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 EMTP(Electromagnetic Transient Program)을 이용하여 사고를 모의하였다. 그림 3에서 보듯이 테스트를

위한 모의 전력시스템은 400kV급 시스템이며, 송전선로의 캐패시터 값은 무시한다. $v(t)$, $i(t)$ 는 양단자의 전압과 전류는 나타낸다.

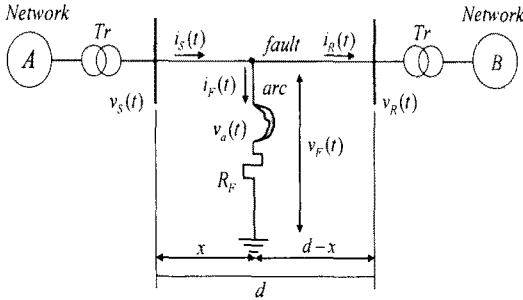


그림 3 모의 테스트 시스템

송전 선로의 변수는 일정한 값으로 정의하며, $d = 100 [km]$, $r = 0.0325 \Omega/km$, $x = 0.3 \Omega/km$ 이고 $r_0 = 0.0975 \Omega/km$, $x_0 = 0.9 \Omega/km$ 이다. Network A의 데이터는 $R_A = 1 \Omega$, $L_A = 0.064 H$, $R_{A0} = 2 \Omega$, $L_{A0} = 0.128 H$. Network B의 데이터는 $R_B = 0.5 \Omega$, $L_B = 0.032 H$, $R_{B0} = 1 \Omega$, $L_{B0} = 0.064 H$. Network A, B의 기전력은 $E_A = 400 kV$, $E_B = 395 kV$. 전력시스템의 샘플링 주파수는 $f_s = 3840 Hz$ ($64 \text{ sample}/T_o$). 고장발생 위치는 Network A의 각 10, 20, 30, 80km 지점에서 발생했다고 가정한다. 알고리즘의 타당성을 측정하기 위하여 MATLAB을 사용하여 모의 테스트 하였다. 사고 개시 시간은 $33 [ms]$ 이며 사고 저항은 $R_F = 8 [\Omega]$ 이다.

표 1은 양 단자에서 측정된 전압과 전류를 이용하여 본 논문에서 제시한 알고리즘으로 해석한 결과를 나타낸다. 표1에서 보듯이 EMTP에서 가정한 사고거리와 아크전압의 크기가 오차를 내에서 일치하는 것을 확인할 수 있다.

표 1 알고리즘을 통해 해석된 결과

EMTP		제시한 알고리즘 결과	
사고거리 [km]	아크전압 [kV]	사고 추정거리 [km]	아크전압 [kV]
10	4.5	10	4.49
20	4.5	20.01	4.51
30	4.5	30.02	4.51
80	4.5	80.02	4.51

그림 4-5에서 볼 수 있듯이 사고 개시시점에서 0.03s 만에 수렴하고 있으며 표 1의 결과를 통해 사고 추정거리와 아크전압크기가 오차를 0.1내에 모두 수렴하고 있음을 알 수 있다. 이러한 모의 테스트 결과를 통해 본 논문에서 제시하고 있는 알고리즘이 사고거리와 아크전압의 크기를 정확하게 신속하게 판단하고 있음을 증명하였다.

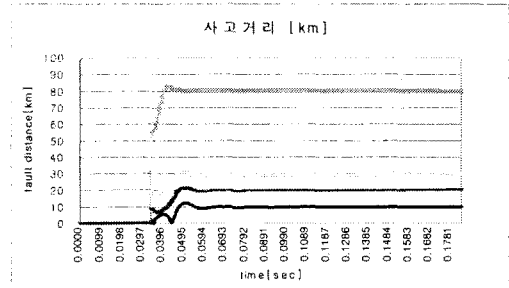


그림 4 사고거리 판별결과

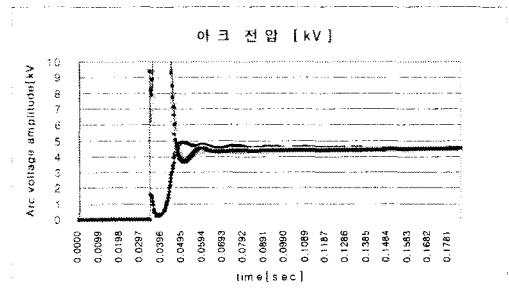


그림 5 계산된 아크전압의 크기

4. 결 론

본 논문에서는 시간 영역 내에서 양 단자를 통해 동기화된 데이터를 기준으로 재폐로기의 동작책무를 결정하고 사고의 위치를 판별하는 새로운 수치 알고리즘을 제시하였다. 새로운 알고리즘을 제시하기 위하여 송전선로의 양단에서 PMU로부터 측정된 동기 데이터를 가정하였으며, 이를 이용하여 알고리즘의 입력데이터로 사용하였다. DFT 알고리즘을 사용하여 획득한 데이터를 분석하였다. 양 단자에서 측정된 왜곡된 전압, 전류파형을 본 논문에서 제시한 알고리즘에 적용하여 재폐로기의 동작책무와 사고 거리를 평가하였다. 본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 판단하기 위해서 사고의 모의는 EMTP를 사용하였으며, 알고리즘의 타당성은 MATLAB을 사용하여 증명하였다. 본 논문에서 제시한 알고리즘을 통해 사고거리 및 사고 유형을 빠른 시간내에 평가함으로써 송전선로의 빠른 복구와 적응 재폐로기의 동작책무를 사고와 동시에 실시간으로 결정할 수 있을 거라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ge, Y., Sui, F., Xiao, Y., "Prediction methods for preventing single-phase reclosing on permanent fault", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 114-121, 1989.
- [2] M. B. Djuric, V.V. Terzija, "A New Approach to the Arcing Faults Detection for Autoreclosure in Transmission Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 4, pp. 1793-1798, 1995.
- [3] Ruben D. Garzon, "High Voltage Circuit Breakers", Marcel Dekker Inc., pp. 2-18, 1997.
- [4] 김현홍, 이찬규, 조기선, 박종배, 신중원, "아크 지막사고를 고려한 양 단자 사고거리 추정 알고리즘", 대한전기학회 하계학술대회, pp. 166-168, 7월, 2005