

**아크 지락 사고를 고려한 양단자 사고거리 추정 알고리즘**

김현홍 · 이찬주 · 조기선\* · 박종배 · 신중린  
 건국대학교 전기공학과 · \*한국전기연구원

**Two-Terminal Fault Location Estimation Algorithm Considering Arcing Ground Fault**

Hyun-Houng Kim · Chan-Joo Lee · Ki-Sun Cho\* · Jong-Bae Park · Joong-Rin Shin  
 Dept. of Electrical Eng., Konkuk Univ. · \*Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - This paper presents a new numerical algorithm devoted to one window onto fault location calculation in time domain. It is based on two terminal data processing and it is derived on the synchronized phasor measured from the GPS connected the transmission line. The data is obtained by the testing through EMTP (Electromagnetic Transient Program). The proposed algorithm is estimated using linear least error squares method. The results of the algorithm testing through computer simulation (MATLAB) are presented.

이들 정보를  $\pm 1\mu s$  시간내에 받아들일 수 있다. 본 논문에서는 이러한 GPS의 기술을 바탕으로 고장시 발생하는 고장 전압과 고장 전류를 송전선로의 양 단자에서 동시에 받아들인다. 그림 1은 이러한 개념을 설명하고 있다.

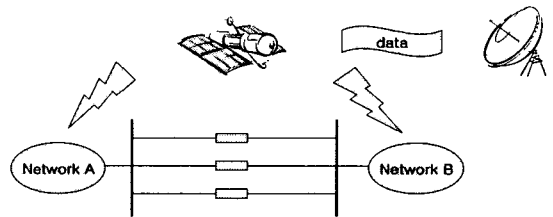


그림 1. 동기화를 위한 GPS 시스템

**1. 서 론**

현재의 전력 시스템은 고도로 발전되어 있으며, 전력수요의 증가와 함께 전력시스템의 규모는 점점 더 확장이 되어지고 있다. 이러한 전력 시스템의 확장은 전력 보호 시설의 신뢰성을 더욱 요구하게 되었다. 특히 전력시스템 내에서 고장이 발생할 경우 고장이 발생한 지점뿐만 아니라 고장 지점에 연결된 선로에도 고장 효과가 파급되어 심각한 피해가 초래 할 수 있다. 따라서 전력시스템의 안정성 측면에서 고장 지점을 정확히 판단하여 신속히 대처할 필요가 있다.

본 논문에서는 고장사고 발생 시 고장지점을 판단하는 새로운 알고리즘을 제시하고자 한다. 개발된 알고리즘은 양단자를 통해 전압과 전류 데이터를 GPS(Global Positioning System)를 사용하여 데이터를 획득한다. GPS는  $\pm 1\mu s$  시간 내에 정확한 데이터를 전송할 수 있으며, GPS를 이용한 전력 계통분야의 많은 연구가 보고 되고 있다. [1-3]. 동기화된 양단자 위상전압과 전류 데이터는 one-window 형태로 데이터를 처리하게 되며, 알고리즘을 수행을 위한 데이터는 RMS 값으로 처리된다.

실제 아크 데이터를 얻기 위한 실험이나 현장모의는 현실적 어려움으로 인하여, EMTP를 통하여 고장을 모의하였으며, MATLAB의 선형 최소자승법(Least Square Error Method)을 사용하여 알고리즘을 평가하고 시뮬레이션 하였다.

**2. 본 론**

**2.1 사고 모델의 추정 기술**

오늘날 GPS는 시간과 위치를 판단하기 위하여 많은 분야에서 사용 되고 있다. 24개의 인공위성이 지구의 대기권을 서로 다른 궤도로 회전하면서 지구상의 어느 곳

**2.2 아크의 특성 [4,5]**

일반적인 아크사고는 비선형의 구조를 갖고 있으며, 다른 방전사고에 비해 작은 전압과 큰 전류를 가지게 된다. 아크 사고의 비선형 특성은 전압과 전류 파형의 왜곡을 가져오게 되어 아크 전압의 파형 모양은 근사적으로 구형파를 갖는다. 아크 모델을 푸리에 급수를 사용하여 해석하면 오직 홀수 싸인파만을 갖는다. 고조파를 해석하기 위하여 DFT 알고리즘을 사용하였다.

**2.3 고장거리 추정 알고리즘**

가공선로에서 발생하는 고장 사고은 크게 2가지의 형태로 구별할 수 있다. 그 중 대략 70~90% 사고는 일시적인 사고이며 나머지 10~30%는 영구 사고이다.

본 논문에서는 고장의 종류를 a상에서 발생하는 지락사고로 가정한다. 그림 2는 a상 아크 지락사고를 나타낸 전력 시스템 이다.

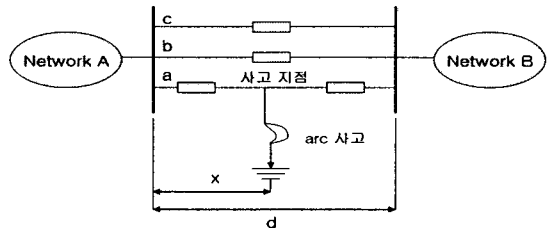


그림 2. 테스트 전력 시스템

본 논문에서는 동기 샘플링 기술을 사용하여 양단자 사고거리를 추정 알고리즘을 제시하고자 한다. 알고리즘은 그림 3에서 보듯이 고장사고 발생시 양 단자에 전달되는

전압과 전류  $v_S, v_R, i_S, i_R$  을 이용하여 알고리즘을 개발하였다. 송전선로는 단거리 송전선로로 가정하며, 선로 캐패시턴스는 무시한다.

그림 3은 3상 송전선로에서 a상 지락사고를 나타내고 있다.

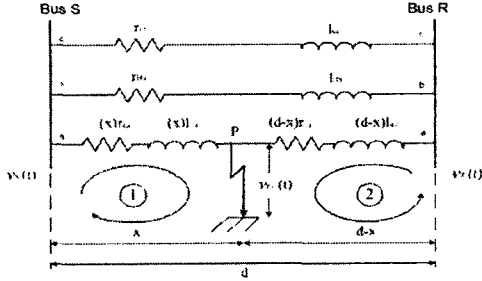


그림 3. 3상 송전선로 내의 a상 지락사고

여기서,  $d$ 는 송전선로의 길이.  $x$ 는 사고거리,  $S$ 와  $R$ 은 선로의 보내는 쪽과 받는 쪽의 모선이다.

그림 3에서 볼 수 있듯이 고장이 발생하면 다음과 같은 회로방정식을 유도 할 수 있다.

$$v_{nS} = v_{nS}(t) - x \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pS}(t) + l_{np} \frac{di_{pS}(t)}{dt} \right\} \quad (1)$$

$$v_{nR} = v_{nR}(t) - (d-x) \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pR}(t) + l_{np} \frac{di_{pR}(t)}{dt} \right\} \quad (2)$$

여기서,  
 $v_{nR}$ : 사고전압 (Fault Voltage)  
 $v_{nS}$ : 송전단전압 (Sending Voltage)  
 $v_{nR}$ : 수신단전압 (Receiving Voltage)

$n=a, b, c$  (상)  
 $p=a, b, c$  (상)  
 $r_{aa}, r_{bb}, r_{cc}, l_{aa}, l_{bb}, l_{cc}$ : 자기 저항/인덕턴스  
 $r_{ab}, r_{bc}, r_{ca}, l_{ab}, l_{bc}, l_{ca}$ : 상호 저항/인덕턴스

정식 (1)과 (2)를 이용하여 양단에 회로 방정식을 이용하면 정식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

정식 (3)은 다음과 같이 정리 된다.

$$v_{nS}(t) - v_{nR}(t) - d \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pR}(t) + l_{np} \frac{di_{pR}(t)}{dt} \right\} - x \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} (i_{pS}(t) + i_{pR}(t)) + l_{np} \frac{d(i_{pS}(t) + i_{pR}(t))}{dt} \right\} = 0 \quad (4)$$

정식 (4)에서 전류의 변화량은 시간영역내에서는 정식 (5)와 같이 풀이가 가능하다. 데이터를 처리할 때 One-Window 방식을 사용하였다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(k) - i(k-1)}{\Delta t} \quad (5)$$

여기서,  
 $i(k)$ :  $k$ 번째 sampling의 순시 전류값  
 $\Delta t$ : the sampling 간격

정식 (4)에 정식 (5)을 대입하면 사고 거리  $x$ 을 기준으로 다음과 같이 정리된다.

$$A_n(k) - xB_n(k) = 0 \quad (6)$$

여기서,  
 $A_n(k), B_n(k), n=a, b, c, k=1, 2, \dots, N$

$$A_n(k) = v_{nS}(k) - v_{nR}(k) - d \sum_{p=a,b,c} \left[ r_{np} i_{pR}(k) + l_{np} \frac{i_{pR}(k) - i_{pR}(k-1)}{\Delta t} - l_{np} \frac{i_{pR}(k-1) - i_{pR}(k-2)}{\Delta t} \right]$$

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

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

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

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

여기서,

$v_{nS}(k), v_{nR}(k)$ :  $k$ 번째 sampling의 각 상의 순시 전압값 ( $n=a, b, c$ )

$i_{nS}(k), i_{nR}(k)$ :  $k$ 번째 sampling의 각 상의 순시 전류값 ( $n=a, b, c$ )

$N$ : 총 sampling의 갯수

$\Delta T$ : sampling의 간격

사고 거리  $x$ 는 정식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = \frac{\sum_{n=a,b,c} \sum_{k=1}^N A_n(k)}{\sum_{n=a,b,c} \sum_{k=1}^N B_n(k)} \quad (7)$$

정식 (7)은 단거리 3상 송전선로의 사고 거리를 간단한 회로 방정식을 이용하여 풀이하였다. 또한 정식 (6)을 풀이하기 위하여 최소 자승법을 사용하여 풀이하면 정식 (8)처럼 나타낼 수 있다.

$$x = (B^T B)^{-1} B^T A \quad (8)$$

### 3. 사례연구

알고리즘을 타당성을 증명하기 위하여 EMTP (Electromagnetic Transient Program)을 사용하여 고장을 모의 하였다. 그림 2에서 보듯이 테스트를 위한 전력 시스템은 400kV급 시스템이다. 송전선로의 캐패시터 값은 무시한다.  $i(t), i'(t)$ 는 양 단자의 전압과 전류는 나타낸다. 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  $R_A=1\Omega$ ,  $L_A=0.064H$ ,  $R_{A0}=2\Omega$ ,  $L_{A0}=0.128H$  Network B의 데이터는  $R_B=0.5\Omega$ ,  $L_B=0.032H$ ,  $R_{B0}=1\Omega$ ,  $L_{B0}=0.064H$  Network A, B의 기전력은  $E_A=400kV$ ,  $E_B=335kV$ . 전력시스템의 샘플링 주파수는  $f_s=3840Hz$  ( $64\text{ sample}/T_s$ ). 고장발생 위치는 Network A의  $10\text{ km}$  지점에서 발생했다고 가정한다. 알고리즘의 타당성을 측정하기 위하여 MATLAB을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 그림 4~7은 a 상에 고장이 발생시 양 단자에서 측정된 전압과 전류를 나타내고 있다.

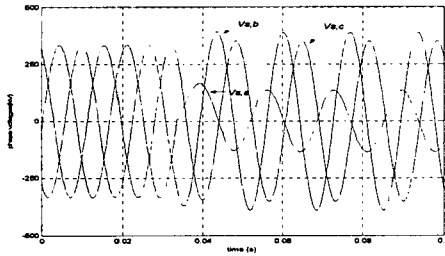


그림 4. Bus S의 끝단에서 측정된 사고 상 전압

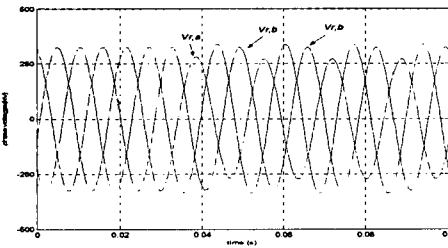


그림 5. Bus R의 끝단에서 측정된 사고 상 전압

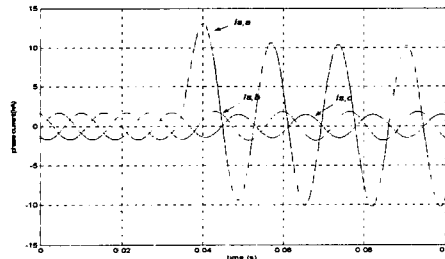


그림 6. Bus S의 끝단에서 측정된 사고 상전류

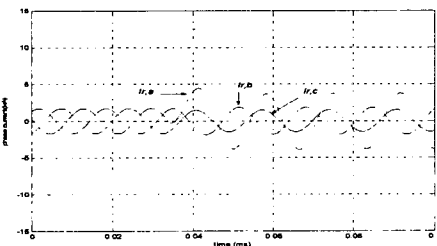


그림 7. Bus R의 끝단에서 측정된 사고 상전류

그림 8은 양 단자에서 측정된 전압과 전류를 이용하여 본 논문에서 제시한 알고리즘으로 해석한 결과이다. 그

림 8에서 보듯이 EMTP 시뮬레이션에서 가정한 사고거리  $10\text{ km}$  지점에서  $0.07\text{ S}$  만에 수렴하고 있다. 그림 8에서 보듯이 양단자의 동기여러가  $1\text{ ms}$  발생시 고장 위치의 판별 오차가 발생하는 것을 알 수가 있다. 시뮬레이션 결과를 통해 본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 증명하였다.

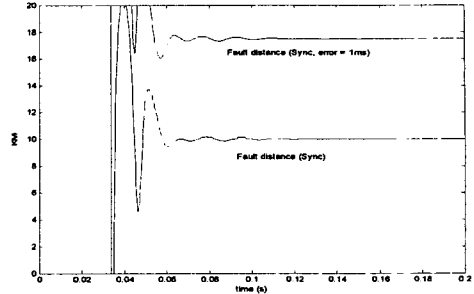


그림 8. 고장 위치 판별 결과

#### 4. 결 론

본 논문에서는 양 단자에서 동기화된 데이터를 이용하여 고장 위치를 판단하는 알고리즘에 제시하였다. 알고리즘은 간단한 회로방정식으로 풀이하였으며, 최소자승법을 사용하였다. GPS를 이용하여 송전선로 양 단자에서 동시에 데이터를 획득 할 수 있다는 가정으로부터 출발하였다. 데이터는 one-window 형태로 처리하여 양 단자에서 획득되는 데이터를 빠른 시간 내에 처리하였다. 이러한 기술을 통해 알고리즘이 빠른 시간 내에 고장 위치를 판별할 수 있음을 증명하였다. 알고리즘의 타당성은 시뮬레이션을 통하여 알고리즘의 정확도를 증명하였다. 본 논문에서 제시한 알고리즘은 전력시스템의 안정성 측면에서 많은 기여를 할 수 있을 거라 예상된다.

#### 감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1]Ying-Hong Lin, Chih-Wen Liu, Ching-Shan Chen, "A New PMU-Based Fault Detection /Location Technique for Transmission Line with Consideration of arcing Fault Discrimination-Part I:Theory and Algorithms", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 4, Oct. 2004, pp. 1587-1593.
- [2]Ying-Hong Lin, Chih-Wen Liu, Ching-Shan Chen, "A New PMU-Based Fault Detection /Location Technique for Transmission Line with Consideration of Arcing Fault Discrimination-Part II: Performance Evaluation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 4, Oct.2004, pp. 1594-1601.
- [3]Chi-Shan Yu, Chih-Wen Liu, Sun-Li Yu, and Joe-Air Jiang, "A New PMU-Based Fault Location Algorithm for Series Compensated Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 1, Jan. 2002, pp. 33-46.
- [4]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, pp. 438-445.
- [5]M.B.Djuric, Z.M. Radojevic, V.V. Terzija, "Time Domain Solution of Fault Distance Estimation an Arcing Faults Detection on Overhead Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 14, No. 1, January 1999.