

장거리 송전선로를 고려한 사고거리추정 수치해석 알고리즘

論 文

57-12-1

A Numerical Algorithm for Fault Location Estimation Considering Long-Transmission Line

金 秉 萬* · 蔡 明 錫[†] · 姜 龍 徹**

(Byeong-Man Kim · Myeong-Suk Chae · Yong-Cheol Kang)

Abstract - This paper presents a numerical algorithm for fault location estimation which used to data from both end of the transmission line. The proposed algorithm is also based on the synchronized voltage and current phasor measured from the PMUs(Phasor Measurement Units) in the time-domain. This paper has separated from two part of with/without shunt capacitance(short/long distance). Most fault was arc one-ground fault which is 75% over [1]. so most study focused with it. In this paper, the numerical algorithm has calculated to distance for ground fault and line-line fault. In this paper, the algorithm is given with/without shunt capacitance using Π parameter line model, simple impedance model and estimated using DFT(Discrete Fourier Transform) and the LES (Least Error Squares Method). To verify the validity of the proposed algorithm, the EMTP(Electro-Magnetic Transient Program) and MATLAB did used.

Key Words : Fault location, PMU, Two-terminal, Two-domain, Shunt capacitance

1. 서 론

1차 에너지의 변화에 따라 전력계통의 규모는 점점 증가하고 있으며, 전력계통이 단순한 전력 운송수단이 아닌 2차적인 에너지수단으로 진화해 가고 있다. 이러한 전력 사용의 증가는 전력계통의 복잡화와 대형화로 이어지게 되며, 송전선로의 고장과 같은 외란에 막대한 경제적 손실을 유발하게 된다. 결국 전력계통의 대형화와 함께 사고 시에 대한 설비 또한 빠르게 개발되어 왔다. 특히 사고대응 설비 중 보호계전기는 사고 발생 시 송전선로를 보호하는 설비로 전력시스템의 보호에 큰 역할을 수행하여 왔으며, 고속 재폐로 차단기는 사고 시 발생하는 전류와 저항의 변화를 감지하여 신속하게 차폐를 할 수 있는 장치로 신속한 대응력과 설비의 단순함으로 인하여 송전선로 감시 장치로 중요한 역할을 담당하고 있다. 또한, 설비의 발달로 인하여 최근에는 단순히 전류와 전압의 변화를 이용하는 방법뿐만 아니라 디지털 방법, 전파의 속도를 이용하는 방법 등 다양한 방법에 의한 고속 재폐로 차단기가 개발되고 있다. 그러나 이러한 최신의 방법은 실제 송전선로에 설치되어 있는 대부분의 고속 재폐로 차단기 즉 위상의 변화를 이용하는 장치에 추가적인 설비를 설치해야하는 단점을 가지고 있다. 따라서 최신의 방법과 더불어 위상의 변화를 이용하는 방법 또한 지속적인 연구가 필요하다. 송전선로의 사고 시 사고의 종류에 따른

차폐와 더불어 사고 위치를 신속하게 판별하여 대응할 수 있는 사고 위치 판별 알고리즘 또한 중요하다. 따라서 본 논문은 송전선로에서 발생하는 사고의 대부분을 차지하는 아크 동반사고를 대상으로 위상의 변화에 따른 사고위치를 판별하는 알고리즘을 제시한다.

과거 많은 연구자들은 송전선로에서 발생하는 아크의 특성과 사고종류의 판별, 사고위치를 판별하는 알고리즘 등을 제시하였다.[1-9]. 그러나 아크를 동반하는 사고의 경우 아크의 비선형적인 특성 뿐 만 아니라 아크에 영향을 주는 여러 가지의 형태의 환경과 시간에 따라 길이가 변화되는 동특성으로 인하여 정확한 모델링에 어려움을 가지고 있었다. 따라서 많은 연구자들은 이러한 아크를 정의하기 위해 많은 실험을 실시하였으며, 근사적인 수학적 아크 모델을 제시하였다[1-5]. 결국 비선형의 아크를 근사적인 선형의 문제로 재해석하여 이를 이용한 알고리즘을 제시하였다.

이러한 연구는 크게 일련의 정보를 한단에서 받아 해석하는 방법과 양단에서 정보를 받아 해석하는 방법으로 구분할 수 있다. 이를 다시 진행파를 이용하는 방법, 전파방정식을 이용하는 방법, 전압과 전류의 기본과 성분을 사용한 임피던스 방법, PMU, GPS를 이용한 방법으로 나눌 수 있다[6-9]. 한 단자를 이용하는 방법은 설비의 추가적인 설치할 필요는 없으나, 한 단자에서 거리가 멀수록 사고의 오차율이 증가하는 단점을 가지게 된다. 양단자의 경우에는 시간의 동기 즉 추가적인 설비를 설치해야한다는 단점을 가지고 있다. 최근에는 이러한 문제를 해결할 수 있는 비동기 양 단자에 관한 연구도 진행되고 있다. 본 논문에서는 사례연구를 통하여 양 단자에 시간 동기의 중요성을 증명한다.

본 논문에서는 PMU를 이용한 동기 기술을 이용하여 사고 시 양 단자로 전파되는 전압과 전류의 파형이 동기화되었다 가정하며[8-9], 이를 시간영역에서 해석하여 단거리 선

* 正 會 員 : 全 北 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

[†] 교 신 저 자 , 正 會 員 : 群 長 大 電 氣 電 子 科 助 教 授 · 工 博

E-mail : mschae@kunjang.ac.kr

** 正 會 員 : 全 北 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2008 年 7 月 7 日

最 終 完 了 : 2008 年 9 月 22 日

로와 장거리 선로로 나누워 사고 위치를 판별할 수 있는 알고리즘을 제시한다. 또한 송전선의 사고 유형 가운데 가장 빈번한 1선 지락사고와 2선 단락사고를 중심으로 선로 어드미턴스를 고려하였을 때와 그렇지 않았을 때(단기/장기)에 대한 알고리즘을 유도하였다. 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 EMTP/ATP을 통해 모의 하였으며, 알고리즘의 타당성을 판별하기 위하여 MATLAB을 사용하여 사례연구 결과를 비교분석 하였다. 본 논문은 2장에서 아크의 비선형 동특성에 대한 모델링, 3장에서는 선로 어드미턴스를 고려하지 않았을 때와 고려하였을 때의 사고 거리 추정 알고리즘, 4장에서는 사례연구 마지막으로 결론 순으로 설명한다.

2. 아크 사고 모델링

2.1 아크 비선형 동특성

송전선로에 발생하는 사고의 종류로는 1선 지락사고, 2선 지락사고, 선간단락사고, 3상사고, 고 저항 지락사고 등을 들 수 있다. 이 가운데 1선 지락사고가 선로사고의 70-90%를 차지하고 있으며, 또한 대부분이 아크 일시사고(transient fault)에 해당한다[2]. 사고 시 발생하는 아크는 양단에 전파되는 전압과 전류에 많은 영향을 주어, 낮은 전압과 높은 전류의 특성을 가지게 된다. 또한 시간, 주변 환경 등에 많은 영향을 받아 아크에 대한 정확한 모델링이 어렵다. 그래서 많은 연구자들이 다양한 환경변수를 고려한 실험을 통해 얻은 자료를 토대로 확률적 방법을 통해 아크특성을 근사적으로 모델링하였다[10-11].

본 논문에서는 [11]에서 제시한 아크의 특성을 바탕으로 하여, 전압과 전류가 동상을 갖고, 아크전압이 구형파에 가까운 모형을 가정한다. 그림 1와 같이 구형파에 가까운 아크전압을 이용하여 아크전압 모델링에 수치적 접근자료로 활용하였다.

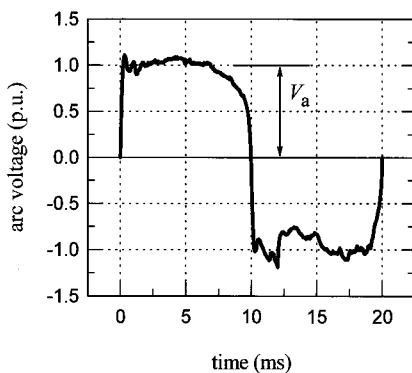


그림 1 아크 전압 모델링
Fig. 1 Arc voltage wave modeling

[11]에서는 그림 1의 아크 전압을 푸리에 시리즈를 이용하여 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$v_a(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_{ah}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} k_h V_a \sin(h\omega t) \quad (1)$$

여기서, h =고조파 성분(홀수파), $v_{ah}(t)$ 는 h 차 고조파의 아크전압, k_h 는 h 차 고조파의 계수이다.

k_h 의 아크전압의 계수는 표 1과 같이 정의하였다.

표 1 h 차 고조파의 아크전압의 계수
Table 1 Coefficients of the h -th harmonics of the arc voltage

h	1	3	5	7
k_h	1.23	0.393	0.213	0.135

3. 사고거리 추정 알고리즘

본 논문에서는 송전선로 상에서 발생하는 가장 빈번한 아크사고를 알고리즘 개발의 대상 사고로 가정하고 양단에서 동기화된 전압과 전류 패이저를 이용하여 시간영역에서 이를 유도하였다. [12]에서는 선로 어드미턴스를 고려하지 않는 아크 사고 발생 시 회로 방정식을 이용하여 문제를 해석하였다. 본 논문에서는 이러한 개념을 이용하여 아크사고에 대한 회로 방정식을 정의한다.

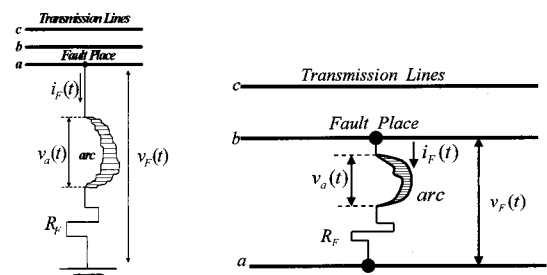


그림 2 시간영역내에서의 사고 모델링
Fig. 2 Fault model given in time domain

그림 2에서 볼 수 있듯이 사고 상 전압 v_F 는 정식 (2)과 같은 회로 방정식으로 정의할 수 있다.

$$v_F(t) = v_a(t) + R_F i_F(t) \quad (2)$$

여기서,

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

3.1 일선 아크 지락사고 (선로 어드미턴스 미고려)

본 논문에서 그림 3에서 볼 수 있듯이 사고 상 전압을 루프방정식을 이용하여 정식 (3)과 (4)와 같이 유도하였다. 이를 전개하여 식 (8)과 같은 사고거리를 추정 하였다. 그림 3는 3상 송전선로의 단상 아크지락 사고를 나타내고 있다.

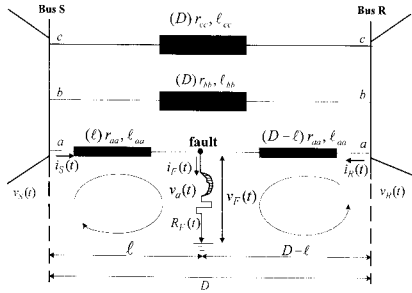


그림 3 3상송전선로 내에 발생한 단상 아크지락사고
Fig. 3 single-phase to arc ground fault on the transmission line

여기서, S, R 각각 송전단측과 수신단측 나타내며, l 는 사고 거리, D 는 총 선로의 길이를 나타낸다.

그림 3에 볼 수 있듯이 송전선로에 발생하는 사고 전압은 루프 방정식을 이용하여 정식 (3), (4)와 같이 유도할 수 있다.

$$v_{nF}(t) = v_{nS}(t) - l \sum_p \left\{ r_{np} i_{pS}(t) + l_{np} \frac{di_{pS}(t)}{dt} \right\} \quad (3)$$

$$v_{nF}(t) = v_{nR}(t) - (D-l) \sum_p \left\{ r_{np} i_{pR}(t) + l_{np} \frac{di_{pR}(t)}{dt} \right\} \quad (4)$$

여기서,

v_{nF} : 사고 전압, v_{nS} : 송전단 전압, v_{nR} : 수신단 전압,
 $n, p = a, b, c$,

r_{pp}, r_{pn} : 자기/상호 저항, l_{pp}, l_{pn} : 자기/상호 인덕턴스

정식 (3),(4)의 시간영역내에서의 전류의 변화량은 아래의 정식을 이용하여 전개할 수 있다.

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

여기서,

i^k : k -번째 샘플링의 순시 전류 값

Δt : 샘플링 간격

정식 (3)과 (4)을 전개하여 연립방정식을 유도할 수 있으며, 정식(5)같은 형태로 미지수와 기지수로 나누워 다시 정리 할 수 있다.

$$A_n(k) - lB_n(k) = 0 \quad (5)$$

여기서,

$n = a, b, c, k = 1, 2, \dots, N$

$$A_n(k) = v_{nS}(k) - v_{nR}(k) - D \sum_{p=a,b,c} \left[\left(r_{np} + l_{np} \frac{1}{\Delta t} \right) i_{pR}(k) - l_{np} \frac{1}{\Delta t} i_{pR}(k-1) \right] \quad (6)$$

$$B_n(k) = \sum_{p=a,b,c} \left[\left(r_{np} + \frac{l_{np}}{\Delta t} \right) (i_{pS}(k) + i_{pR}(k)) - \frac{l_{np}}{\Delta t} (i_{pS}(k-1) + i_{pR}(k-1)) \right] \quad (7)$$

여기서,

N : 총 샘플링의 개수

ΔT : 샘플링의 간격

결국, 미지수(l)에 관하여 정리를 하면 식 (8)과 같은 형태로 유도 할 수 있게 된다.

$$\therefore l = \frac{\sum_{n=a,b,c} \sum_{k=1}^N A_n(k)}{\sum_{n=a,b,c} \sum_{k=1}^N B_n(k)} \quad (8)$$

3.2 2선 아크 단락사고 (선로 어드미턴스 미고려)

본 논문에서 제시하는 아크 단락사고 고장거리 추정 알고리즘은 다음과 같은 가정을 전제한다.

■ 사고 유형 : a-b 상 혹은 b-c 상에서만 발생 (단락 사고 시 다른 한상과는 접촉하지 않는다).

위와 같은 가정은 단락 사고시 차단기의 재폐로 인하여 발생하는 2차적인 현상에 대하여, 본 논문의 범위를 아크 단락사고 거리 추정으로 한정하기 위함이다.

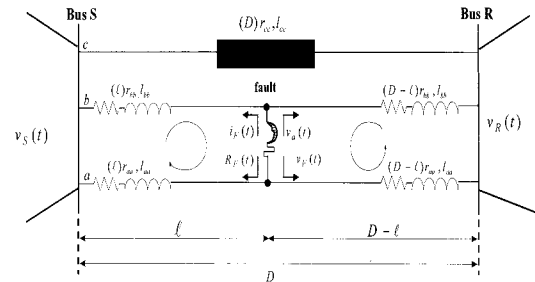


그림 4 송전선로 내에 발생한 아크단락사고
Fig. 4 Arc line-line fault on the transmission line

그림 4에서 볼 수 있듯이 두 상의 사고전압은 루프방정식을 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_{nF}(t) = \sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m v_{nS}(t) - l \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{nS}(t) + l_{np} \frac{di_{nS}(t)}{dt} \right\} \quad (9)$$

$$v_{nF}(t) = \sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m v_{nR}(t) - (D-l) \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{nR}(t) + l_{np} \frac{di_{nR}(t)}{dt} \right\} \quad (10)$$

정식 (9)과 (10)을 3.1절에서 소개한 시간영역내에서의 전류의 변화량으로 정의한다음, 정식(5)과 같은 개념으로 나누

위서 정리 할 수 있다. 사고 거리(ℓ) 정식 (11)과 같이 정리 할 수 있다.

$$\therefore \ell = \frac{\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m \sum_{k=1}^N A_n(k)}{\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m \sum_{k=1}^N B_n(k)} \quad (11)$$

여기서,

$$A_n(k) = \sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m \{v_{nS}(k) - v_{nR}(k)\} \quad (12)$$

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

$$B_n(k) = \sum_{p=a,b,c} \left[\left(r_{np} + \frac{l_{np}}{\Delta t} \right) (i_{pS}(k) + i_{pR}(k)) \right. \quad (13)$$

$$\left. - \frac{l_{np}}{\Delta t} (i_{pS}(k-1) + i_{pR}(k-1)) \right]$$

3.3 일선 아크 지락사고 (선로 어드미턴스 고려)

장거리 송전선로에서 선로 어드미턴스를 고려하지 않을 경우 높은 전압 내에서 사고거리 판별 오차는 점점 증가하게 될 것이다. 본 논문에서는 그림 (5)와 같이 II모델을 집중정수(ABCD)를 이용하여 사고거리를 해석한다. 그림 (5)는 선로어드미턴스를 고려한 II 모델을 나타내며, ℓ^* 는 사고 거리, Y 는 어드미턴스를 나타낸다. 본 논문의 2장에서는 아크 모델의 비선형 특성을 근사적인 방법을 이용하여 선형으로 구현하였다. 이와 같은 개념으로 선로 어드미턴스 또한 정의한다.

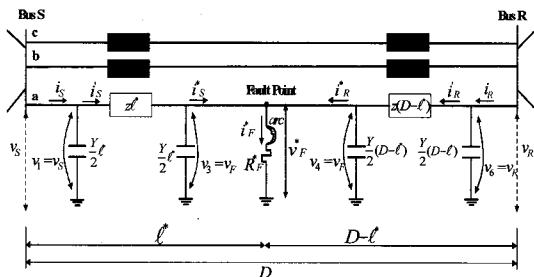


그림 5 선로어드미턴스를 고려한 아크지락사고
Fig. 5 Transmission line of arc ground fault with shunt capacitance

정식(8)로부터 선로 어드미턴스를 고려하지 않았을 때의 아크 일선지락 사고거리를 추정 하였다. 이를 근사적으로 이용하여 미지수를 기지수화 한다. 그림 (5)에서 볼 수 있듯이 정식 (14), (15)을 유도할 수 있다.

$$i_S(t) = i_S(t) - \frac{Y}{2} \ell v_S(t) \quad (14)$$

$$i_R(t) = i_R(t) - \frac{Y}{2} (D-\ell) v_R(t) \quad (15)$$

여기서,

$i_S(t), i_R(t)$ 는 직렬 임피던스를 고려한 선로 전류
 ℓ : 선로 어드미턴스를 고려하지 않았을 때의 사고 추정 거리
또한, 전압방정식을 이용하면 정식 (16),(17)과 같이 유도 할 수 있다.

$$v_S(t) = i_S(t) \frac{Y}{2} \ell^* + v_F^*(t) \quad (16)$$

$$v_R(t) = i_R(t) \frac{Y}{2} (D-\ell^*) + v_F^*(t) \quad (17)$$

여기서,

ℓ^* : 선로 어드미턴스를 고려하였을 때의 사고 추정거리
정식 (16)과 정식(17)으로 정식 (18)을 유도할 수 있다.

$$v_S(k) - v_R(k) = i_S(k) \frac{Y}{2} \ell^* - i_R(k) \frac{Y}{2} (D-\ell^*) \quad (18)$$

결국, 정식 (18)을 사고거리 ℓ^* 에 관하여 전개하면 정식 (19)와 같은 형태로 유도할 수 있다.

$$\therefore \ell^* = \frac{v_S(k) - v_R(k) + i_R(k) \frac{Y}{2} D}{i_S(k) \frac{Y}{2} + i_R(k) \frac{Y}{2}} \quad (19)$$

3.4 2선 아크 단락사고 (선로 어드미턴스 고려)

2선 아크 단락사고는 또한 3.3절과 같은 미지변수를 기지수 화하는 방법을 이용하며, 3.2절과 같은 가정을 한다.

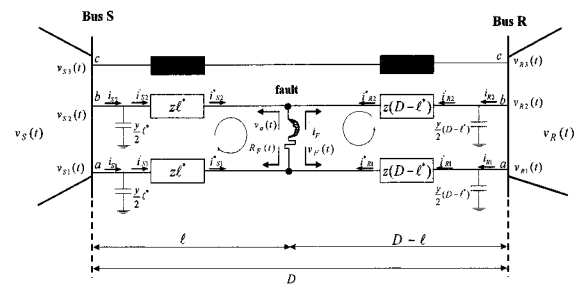


그림 6 선로어드미턴스를 고려한 아크단락사고
Fig. 6 Transmission line of Line-Line with shunt capacitance

정식 (11)의 사고거리 추정 알고리즘을 이용하여, 그림 6에서 볼 수 있듯이 다음과 같이 정식을 유도 할 수 있다.

$$i_{S1}(t) = i_{S1}(t) - \frac{Y}{2} \ell v_{S1}(t) \quad i_{R1}(t) = i_{R1}(t) - \frac{Y}{2} \ell v_{R1}(t)$$

$$i_{S2}(t) = i_{S2}(t) - \frac{Y}{2} \ell v_{S2}(t) \quad i_{R2}(t) = i_{R2}(t) - \frac{Y}{2} \ell v_{R2}(t) \quad (20)$$

$$v_{S1}(t) = i_{S1}(t) \frac{Y}{2} \ell^* + v_F^*(t) \quad v_{R1}(t) = i_{R1}(t) \frac{Y}{2} (D-\ell^*) + v_F^*(t)$$

$$v_{S2}(t) = i_{S2}(t) \frac{Y}{2} \ell^* + v_F^*(t) \quad v_{R2}(t) = i_{R2}(t) \frac{Y}{2} (D-\ell^*) + v_F^*(t)$$

결국, 정식 (20)을 3.2-3절에서 소개한 방법과 같이 사고 거리 ℓ^* 에 관하여 전개하면 정식 (21)과 같은 형태로 유도할 수 있다.

$$\ell^* = \frac{\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m v_{nS} + v_{nR} - i_{nR} \frac{Y}{2} D}{\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nS} \frac{Y}{2} D + i_{nR} \frac{Y}{2} D} \quad (21)$$

4. 사례연구

본 논문의 타당성을 검증하기 위하여 EMTP/ATP를 이용하여 사고환경을 모의하였으며, MATLAB을 이용하여 송전선로에서 발생한 사고거리를 해석하였다[3]. 그림 8은 알고리즘의 검증을 위한 모의 전력시스템으로, 사례연구에 따라 송전선로의 어드미턴스 값을 고려하거나 무시하며, $v(t), i(t)$ 는 양단자의 전압과 전류를 나타낸다. 아크전압의 크기는 $v_a = 4.5 [kV]$ 이며, 사고 개시 시간은 $33[ms]$ 이다. 그림 7은 a상을 기준으로 사고거리의 변화에 따른 사고 상 전압을 나타내고 있다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 사고 시 상 전압이 감소하게 되면서 사고 상전류는 증가하게 된다. 또한, Bus S를 기준으로 사고거리가 멀어질수록 사고 상 전압은 증가하게 되며, Bus R은 이와 반대의 현상이 나타나게 된다.

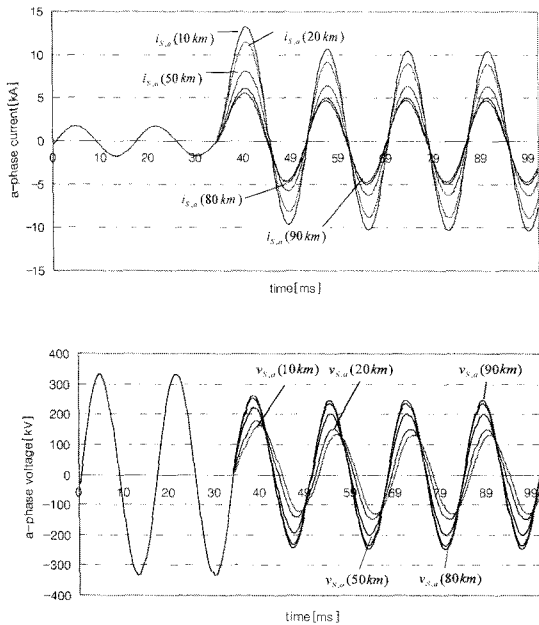


그림 7 사고 거리의 변화에 따른 양단의 사고 상 전압의 변화
Fig. 7 Change of fault voltage with two-terminal according to fault distance

4.1 단거리 선로의 일선 지락·단락사고 (선로어드미턴스 미고려)

그림 8은 단거리 선로의 지락·단락사고를 위한 모의 시스템이다. 본 사례연구에서는 사고저항을 8Ω 으로 고정한다.

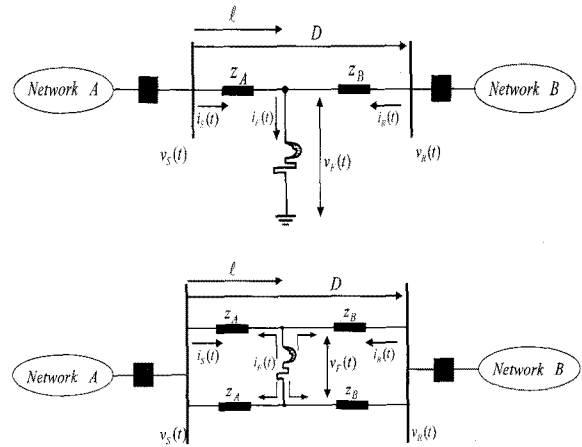


그림 8 단거리 선로의 아크 일선 지락·단락사고를 위한 모의 시스템

Fig. 8 Power system with arc one-line ground and Line-Line fault (without capacitance)

단거리 송전선로(선로 어드미턴스 미고려 선로) 변수값은 일정한 값으로 정의하며, $d=100[km], r=0.0325 \Omega/km, x=0.3 \Omega/km, r_0=0.0975 \Omega/km, x_0=0.9 \Omega/km$ 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 $f_s=3840 Hz (64 \text{ sample}/T_0)$.

그림 9, 10은 사고거리의 변화에 따른 지락·단락사고의 판별 결과이다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 지락사고의 경우는 0.08 초 부근부터 거의 사고거리 판별의 변화가 나타나지 않는다. 결국 지락사고의 경우 0.08초 후에서 부터는 추가적인 계산이 필요 없다.

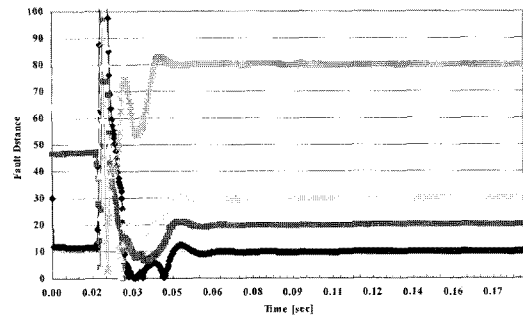


그림 9 사고거리의 변화에 따른 지락사고의 판별 결과
Fig. 9 Calculated of ground fault distance by change of fault distance

그림 10에서 볼 수 있듯이 기준 모선에서 멀어질수록 수렴의 시간이 증가하며, 오차율이 상대적으로 증가한다. 이는 지락 사고와 달리 사고 전압과 전류가 버스 양단의 나누워져서 전파되기 때문이다.

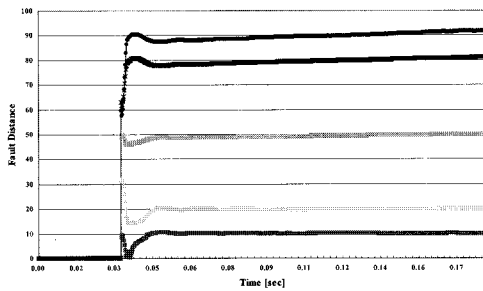


그림 10 사고거리의 변화에 따른 단락사고의 판별 결과
 Fig. 10 Calculated of line-line fault distance by change of fault distance

송전선로에서의 사고거리 판별은 사고시 발생하는 사고저항에 따라 영향을 받게 된다. 표 1은 단거리 송전선로에서 일선 지락시 사고저항의 변화에 따른 오차율의 변화를 나타낸 표이다. 표 1에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제시한 알고리즘이 사고저항의 변화에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 오차율은 정식(22)와 같이 계산하였다.

$$error[\%] = \left| \frac{\ell_c - \ell_a}{D} \right| \times 100 \quad (22)$$

표 1 일선 지락시 사고저항의 변화에 따른 사거 추정거리의 오차율

Table 1 Ground fault location error for various values of fault resistance

사고 저항 $R_F[\Omega]$	사고 추정거리의 오차율 [%]			
	10 [km]	20 [km]	30 [km]	80 [km]
2	0.0053	0.0122	0.0142	0.0031
4	0.0066	0.0141	0.0153	0.0041
8	0.0054	0.0152	0.0143	0.0042
20	0.0076	0.0147	0.0176	0.0043
80	0.0083	0.0131	0.0144	0.0026

4.2 장거리 선로의 일선 지락·단락사고
 (선로어드미턴스 고려)

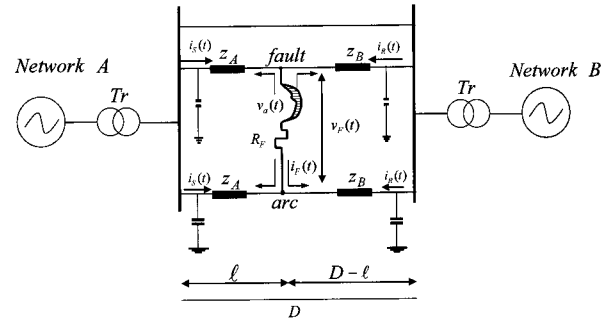
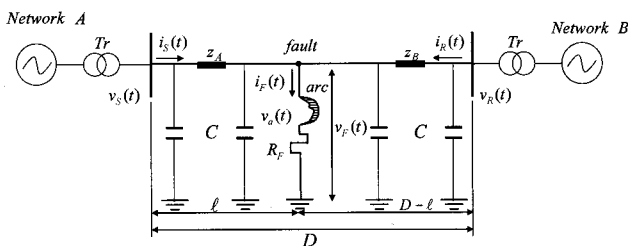


그림 11 장거리 선로의 아크 일선 지락·단락사고를 위한 모의 시스템

Fig. 11 Power system with arc one-line ground and Line-Line fault (with capacitance)

장거리 송전 선로의 변수는 일정한 값으로 정의하며, $r = 0.1 \Omega/km, x = 0.36 \Omega/km, c = 3.0[\mu F]$ 이고 $r_0 = 0.25 \Omega/km, x_0 = 0.6 \Omega/km, c_0 = 2.0[\mu F]$ 이다. Network A의 데이터는 $Z_{Ap} = 5 + j13, Z_{An} = 4 + j10, Z_{Ao} = 3 + j6$. Network B의 데이터는 $Z_{Bp} = 5 + j18, Z_{Bn} = 4 + j14, Z_{Bo} = 3 + j19$. Network A, B의 기전력은 $E_A = 133 kV, E_B = 100 kV$. 전력시스템의 샘플링 주파수는 $f_s = 3840 Hz$ ($64 \text{ sample}/T_o$). 고장발생 위치는 Network A에서 거리에 비례하게 분포하였다. 아크전압의 크기가 $v_a = 4.5 [kV]$ 로 하였으며, 사고저항에 따른 영향을 분석하기 위해서 사고저항을 다양하게 구성하였으며, 사고 개시 시간은 $33[ms]$ 이다.

본 논문에서 사용하는 장거리 선로에 대한 사고거리 추정 방법은 3.3절에서 설명 하였듯이 선로 어드미턴스를 고려하지 않는 방식에 의해 사고거리를 추정하고 이를 근사적으로 사용하여 다시 계산하는 방법이다. 사고거리를 추정하는 문제는 일시 혹은 영구사고 후에 송전선로의 이상 유·무를 확인하는 것이므로 근사적으로 사용하여 다시 계산하더라도 문제를 없앨 것이다. 표 2, 3에서 볼 수 있듯이 어드미턴스를 고려하지 않는 장거리 선로에서는 오차율이 상당히 높은 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 추정 값을 이용하여 어드미턴스를 고려한 결과에서는 오차율이 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

표 2 일선 장거리 선로에서의 지락 사고 추정거리 및 오차
 Table 2 Calculated location and error for Ground fault of long transmission line

사고 거리	어드미턴스 미고려		어드미턴스 고려	
	추정거리[km]	오차율[%]	추정거리[km]	오차율[%]
50	44.876	1.708	50.234	0.078
100	97.133	0.956	99.213	0.262
150	151.189	0.396	149.325	0.225
200	208.322	2.774	201.321	0.440
250	261.845	3.948	249.213	0.262

표 3 일선 장거리 선로에서의 단락사고 추정거리 및 오차율

Table 3 Calculated location and error for line-line fault of long transmission line

사고 거리	어드미턴스 미고려		어드미턴스 고려	
	추정거리[km]	오차율[%]	추정거리[km]	오차율[%]
50	43.123	2.292	51.125	0.375
100	94.987	1.671	102.547	0.849
150	153.123	1.041	152.123	0.708
200	209.432	3.144	202.854	0.951
250	261.326	3.775	252.912	0.971

본 논문에서는 양 단자에서 동기화된 데이터를 이용한 알고리즘을 제시하였다. 양 단자에서 취득한 데이터를 이용하여 판별하는 알고리즘은 한 단자에서 데이터를 취득하는 알고리즘보다 데이터의 정보로 인하여 보다 높은 정확도를 가지게 된다. 이는 취득되는 데이터가 시간적인 오차를 계속적으로 증가시키기 때문이다. 그러나 이러한 방법론은 보다 많은 정보를 취득하고, 시간의 동기를 맞추기 위해서 본 논문에서 이용 하는 것과 같은 추가적인 설비기기를 설치 되어야한다. 그림 12는 본 논문에서 제시한 알고리즘에 양 단자에서 취득한 데이터가 동기가 이루어 지지 않았을 때의 수렴결과이다. 그림 12에서 볼 수 있듯이 동기가 이루어지지 않을 경우 사고추정거리의 수렴이 느려지며, 정확도가 점점 낮아지는 것을 알 수 있다. 결국 양 단자에서 전류, 전압의 변화를 이용하는 방법론은 한 단자에 비해 정확도와 수렴 속도의 장점을 가질 수 있으나, 동기의 문제를 가지고 있다. 최근 일부 논문에서 이러한 문제를 수치적인 해석으로 해결책을 제시하고 있다. 그러나 이러한 방법 또한 장거리 송전선로에는 오차율이 급속도로 증가하는 문제가 있다. 결국 향후 이러한 문제를 해결할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

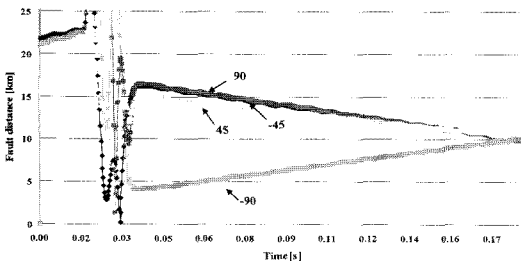


그림 12 비동기에 따른 수렴결과
Fig. 12 fault location estimation using unsynchronized data

5. 결 론

본 논문에서는 양 단자를 통해 취득한 데이터를 PMU를 이용하여 동기화되었다는 가정 하에 시간영역내에서 사고위

치를 판별한 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 사고 발생률이 가장 빈번한 아크 일선지락사고와 아크 단락사고를 기준으로 단거리 송전선로와 장거리 송전선로를 구분하여 어드미턴스의 고려 시와 미고려 시로 나누워 알고리즘을 제시하였다. 사고시 전압과 전류의 변화를 전압방정식을 이용하여 알고리즘을 제시하였으며, EMTF와 MATLAB을 이용하여 알고리즘을 구현하였다. 또한 본 논문에서 제시한 알고리즘에 시간 동기에 따른 결과를 비교함으로써 양 단자 알고리즘의 보완점을 제시하였다. 결국 양 단자를 이용한 방법론은 한 단자를 이용한 방법론보다 정확도와 오차율에서는 장점을 가지 수 있으나, PMU, GPS을 이용한 데이터 동기 문제점을 가질 수 있다. 현재 대부분의 재 폐로기는 한단으로 전달되는 사고의 전압과 전류 즉 저항의 변화를 감지하여 동작 책무를 결정하는 방식을 사용하고 있으며, 일정한 횟수를 통한 반복적인 재 폐로를 실시하고 있다. 그러나 이러한 방법은 전력계통의 신뢰도 측면에서 문제가 될 수 있다. 결국 일시사고와 영구사고를 초기 데이터를 바탕으로 판별하는 알고리즘의 개발이 시급하다. 향후 본 논문에서 제시한 알고리즘에 사고 종류를 판별할 수 있는 알고리즘을 추가할 예정이며, 본 사례연구에서 제시하였던 비동기시의 오차율을 극복할 수 있는 방법론을 추가할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] M. B. Djuric, Z.M. Radojevic, V.V. Terzija, "Arcing Faults Detection on Transmission Lines using Least square Technique", ETEP, Vol. 8, No. 6, pp. 437-443, Nov/Dec 1998.
- [3] Z.M. Radojevic, C.J. Lee, J.R. Shin, J.B. Park, "Numerical Algorithm for Fault Distance Calculation and Blocking Unsuccessful Reclosing onto Permanent Faults", IEEE PES Gen., June 2005.
- [4] M.B. Djuric, Z.M. Radojeic, V.V. Terzija, "Numerical Algorithm for Arcing Faults Detection and Fault Distance Calculation on overhead line", Electric Machines and Power System, pp. 939-953. 1977.
- [5] 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
- [6] H. Lee, A.M. Mousa, "Gps Traveling Wave Fault Locator System: Investigation into the Anomalous Measurements Related to lightning Strikes", IEEE Trans Power Delivery, Vol. 11, pp.1214-1223, Jul.1996
- [7] A.H. Osman, O.P.Malik, "Protection of Parallel Transmission Lines using Wavelet Transform", IEEE Trans Power Delivery, Vol. 11, No.1, pp.49-55, Jan. 2004

[8] Ying-Hong Lin, Chih-Wen Liu, Ching-Shan Chen, "A New PMU-Based Fault Detection/Location Techique for Transmission Line with Consideration of Arcing Fault Discrimination-Part I:Theory and Algorithms", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 4, pp. 1587-1593, Oct. 2004.

[9] Ying-Hong Lin, Chih-Wen Liu, Ching-Shan Chen, "A New PMU-Based Fault Detection/Location Techique for Transmission Line with Consideration of Arcing Fault Discrimination-Part II:Performance Evaluation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 4, pp.1594-1601, Oct. 2004.

[10] A. Maikapar, "Extinction of an Open Electric Arc", Elektrichestvo, Vol. 4, pp. 64-69, 1960.

[11] A.T. Johns, R.K. Aggarwal, Y.H. Song, "Improved Techniques for Modeling Fault Arcs on Faulted EHV Transmission Systems", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 141, No. 2, pp. 148-154, March 1994.

[12] M. Kezunovic, B. Pernunicic, "Automatic Transmission Line Fault Analysis using Synchronized Sampling at Two End", IEEE Trans on Power System, Vol 11, No. 1, pp 441-447, Feb 1996



강 용 철 (姜 龍 徹)

1964년 8월 2일생. 1991년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 현재 전북대 공대 전기공학과 부교수
 Tel : 063-270-2391
 Fax : 063-270-2394
 E-mail : yckang@chonbuk.ac.kr

저 자 소 개



김 병 만 (金 秉 萬)

1962년 7월 21일생. 1995년 호원대 공대 전기공학과 졸업, 1997년 전북대 산업기술대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.
 Tel : 063-465-9223
 Fax : 063-466-8605
 E-mail : mireaelec@chol.com



채 명 석 (蔡 明 錫)

1968년 10월 30일생. 1992년 원광대학교 전기공학과 졸업, 1994년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 군장대학 전기전자과 교수
 Tel : 063-450-8215
 Fax : 063-450-8111
 E-mail : mschae@kunjang.ac.kr