

자동 재폐로기의 동작책무를 위한 아크전압 판정 및 사고거리 표정 알고리즘

논문
58-7-7

A Numerical Algorithm for Fault Location Estimation and Arc Faults Detection for Auto-Reclosure

김 병 만* · 채 명 석† · 정 태 영* · 강 용 철**
(Byeong-Man Kim · Myeong-Suk Chae · Tai-Ying Zheng · Yong-Cheol Kang)

Abstract - This paper presents a new numerical algorithm for fault discrimination and fault location estimation when occur to arcing ground and arcing line to line on transmission lines. The object of this paper is developed from new numerical algorithm to calculate the fault distance and simultaneously to make a distinction between transient and permanent faults. so the first of object for propose algorithm would be distinguish the permanent from the transient faults. This arcing fault discrimination algorithm is used if calculated value of arc voltage amplitude is greater than product of arc voltage gradient and the length of the arc path, which is equal or greater than the flashover length of a suspension insulator string[1-3]. Also, each algorithm is separated from short distance and long distance. This is difference to with/without capacitance between short to long distance. To test the validity of the proposed algorithms, the results of algorithm testing through various computer simulations are given. The test was simulated in EMTP/ATP simulator under a number of scenarios and calculate of algorithm was used to MATLAB.

KeyWord : Fault location, Fault detection, Shunt capacitance, Time-domain

1. 서 론

전력산업의 변화에 따라 송전설비는 전력시스템의 단순한 구성요소에서 중요한 관리 설비로 변화되어 가고 있다. 특히, 에너지 소비의 변화에 따른 전력시스템의 대형화로 인하여 고장 발생시 경제적 과급효과가 굉장하 큰 송전설비에 대한 관심이 점차 커져가고 있다. 이러한 전력시스템의 매커니즘 변화에 따라 보호설비 대한 개발이 빠르게 진행되어 가고 있다. 최근 전력 IT 기술의 발전에 따라 GPS, 디지털 계전기 등 사고 시 사고지점을 파악하고 빠른 사고 대응이 가능한 설비들이 계속적으로 개발 되어 가고 있다. 그러나 이러한 사고 검출 설비는 사고 발생시 일차적으로 대응하는 차단기 설비에 추가적인 설비를 설치하는 단점을 가지고 있다. 또한 최근 차단기의 동작책무를 결정하기 위한 연구들은 대부분이 전압, 전류, 저항이 변화하는 방식을 이용하여 작동하는 방식에서 디지털 방법, 전파의 속도를 이용하는 방법들로 연구 분야가 다양해져가고 있다.[1-9] 그러나 실제 물리적인 차단기는 전압, 전류, 저항 이용하는 차단기가 대부분을 차지하고 있어 최근의 연구와 더불어 지속적인 연구가 필요하다. 본 논문에서는 송전선로에서 발생하는 아크 동반사고를 대상으로 지락, 단락사고에 대한 사고위치, 사고

종류 판별 알고리즘을 제시한다. 과거 연구들에서는 송전선로에서 발생하는 70%이상의 아크 동반사고 사고에 대한 많은 연구를 수행하였다[8-9]. 특히 아크의 비선형적인 특성과 아크에 영향을 주는 여러 가지 형태의 환경, 시간에 따라 길이가 변화되는 동특성으로 인하여 정확한 모델링에 어려움을 가지고 있었다. 이러한 아크의 특성 때문에 아크를 정확하게 해석하기가 어려워 아크를 동반하는 많은 실험을 통해 아크를 모델링 하였으며, 근사적인 수학적 아크모델을 제시하게 되었다.[1-3] 본 논문에서는 아크에 대한 근사적인 수학적 모델링을 이용한다. 사고 시 발생하는 아크를 이용한 해석 방법론은 크게 3가지로 구별할 수 있다. 첫째, 사고 데이터를 받아들이는 방법에 따라 한쪽으로 전달되는 정보를 이용하는 방법과 양쪽으로 전달되는 정보를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 한쪽으로 전달되는 정보를 이용하는 방법은 후자의 방법보다 설비가 간소하며, 해석시간에서 장점을 가질 수 있다. 그러나 사고의 위치가 멀수록 정보의 변화에 의하여 사고판단 오차율은 증가하게 된다. 양쪽으로 전달되는 정보를 이용하는 방법은 양단의 데이터를 동기화하기 위하여 추가적인 장비를 설치해야하는 단점을 가지고 있으나, 사고판단 오차율은 적게 된다[5]. 둘째, 사고 데이터를 받아들이는 후 데이터를 가공하는 방법에 따라 시간 영역과 주파수 영역으로 나누어 질 수 있다[8]. 마지막으로 사고 데이터를 해석하는 방법에 따라 진행파를 이용하는 방법, 전파방정식을 이용하는 방법, 전압과 전류의 기본파 성분을 사용한 임피던스 방법, PMU, GPS를 이용한 방법으로 나눌 수 있다[6]. 본 논문에서는 물리적인 고속 재폐로기에서 사용할 수 있는 알고리즘을 제시하기 위하여 시간영역에서 양단으로 전달되는 전압과 전류의 기본파성분을 사용한 임피던스

† 교신저자, 정회원 : 군장대 전기전자과 조교수 · 공박
E-mail : mschae@kunjang.ac.kr

* 정 회 원 : 전북대 대학원 전기공학과 박사과정

** 시니어회원 : 전북대 대학원 전기공학과 부교수 · 공박

접수일자 : 2009년 5월 26일

최종완료 : 2009년 6월 23일

알고리즘을 제시한다. 본 논문에서는 양단으로 전파되는 사고를 모의하기 위하여 EMTP/ATP를 이용하여 데이터가 동기화 하였으며, 송전선로에서 가장 빈번하게 발생하는 지락, 단락사고에 대하여 단거리, 장거리 송전선로로 나누어 수치적 알고리즘을 제시한다.

2. 근사적 아크 모델링

대기 중 전기 아크는 플라즈마(plasma) 방전현상과 비선형 특성을 갖는다. 또한 송전선로에서 발생하는 아크사고의 특성은 송전선로의 양단에 전송되는 전압과 전류 파형의 심한 왜곡을 유발하고 낮은 전압과 높은 전류를 발생하며, 전류가 증가함에 따라 아크 양단의 전압이 감소하는 특징을 갖는다[1-3]. 아크사고에 의한 전력계통의 과도현상을 실제적으로 컴퓨터 시뮬레이션을 하기 위해서는 아크사고의 동특성이 고려되어야 하지만 아크의 랜덤한 비선형 동특성 성질 때문에 컴퓨터 시뮬레이션으로 실제 여러 가지 아크 특성을 만들어 내기는 힘들다. 많은 연구자들이 실험을 통해 얻은 자료를 이용하여 아크특성을 모델링하였고 동적인 특성을 표현하기 위한 수학적 아크모델에 대해 연구를 해왔다. 본 논문에서는 [2]에서 제시한 아크의 특성을 바탕으로 하여, 전압과 전류가 동상을 갖고, 아크전압이 구형파에 가까운 모형을 가정한다. 본 논문에서 [7]에서 제시한 수치해석적인 방법을 이용하여 아크 전압을 모델링한다.

3. 단거리 송전선로에서의 사고거리 추정 및 사고 판별 알고리즘

본 논문에서는 양 단자에서 받아들이는 정보가 PMU (Phasor Measurement Units)를 이용하여 동기화 되었다고 가정하며, 자동 재폐로기의 최초 정보만을 이용하여 단거리 및 장거리의 사고 거리를 추정할 수 있는 알고리즘을 II 등가회로를 이용하여 제시한다.

3.1 아크 길이를 이용한 사고종류 판별

아크는 비선형적인 특징을 가지고 있으며, 위치와 환경에 큰 영향을 받게 된다. 결국 많은 연구자들은 이러한 문제점을 해결하기 위해 무수히 많은 실험적인 방법을 통하여 아크를 근사적인 구형파 형태로 정의하였으며, 근사적인 아크의 크기를 정의하였다. 논문에서는 사고시 발생하는 아크 전압의 크기를 계산하는 알고리즘을 제시한다. 계산된 아크 전압의 크기를 이용하여 [4-6] 논문에서 제시한 자동 재폐로기의 동작책무 범위를 이용하여 일시, 영구사고의 종류를 구별한다. 논문에서는 계산된 사고전압의 크기가 평균 아크 전압의 크기와 송전선로에 설치되어 있는 현수예자의 길이의 곱보다 작으면 자동 재폐로기가 정상적으로 동작책무를 할 수 있으며, 이 범위를 벗어나면 자동 재폐로기는 동작을 할 수 없다고 정의하였다. 평균 아크전압의 크기 혹은 길이는 12에서 15 V/cm 이다. 이를 다시 수치적으로 표현하게 되면 식 (3)와 같다.

$$V_{ac} \geq E_a \times L_f \tag{3}$$

여기서, V_{ac} 는 계산된 아크전압의 크기, E_a 는 평균 아크 전압의 크기, L_f 는 현수 길이

계산된 아크전압(V_{ac})의 값이 평균 아크전압(E_a)과 현수의 길이(L_f)보다 작으면 자동 재폐로기의 동작책무가 가능하며, 그렇지 않으면 동작책무가 불가능한 영구 사고라 볼 수 있다.

3.2 일선 아크 지락사고

[7] 논문에서는 식 (4)와 같은 사고거리 추정 알고리즘, 식 (5)와 같은 아크전압 판별을 제시하였다.

$$\therefore \ell = \frac{\sum_{n=a,b,c} \sum_{k=1}^N A_n(k)}{\sum_{n=a,b,c} \sum_{k=1}^N B_n(k)} \tag{4}$$

식 (5)의 미지수는 3.3절과 같은 방식으로 풀이할 수 있다.

$$\therefore v_k = a_{k1} V_a + a_{k2} R_F + b_k + \xi_k \tag{5}$$

3.3 선간아크 단락사고

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

- 사고 유형 : a-b 상 혹은 b-c상에서만 발생

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

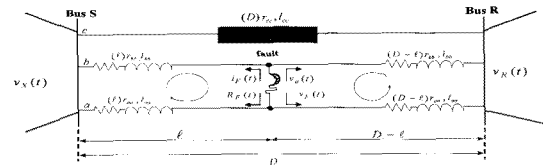


그림 1 송전선로 내에 발생한 아크단락사고
Fig. 1 Arc line-line fault on the transmission line

그림 1에서 볼 수 있듯이 두 상의 사고전압은 루프방정식을 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_{nF}(t) = \sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m v_{nS}(t) - \ell \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{nS}(t) + l_{np} \frac{di_{nS}(t)}{dt} \right\} \tag{6}$$

$$v_{nF}(t) = \sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m v_{nR}(t) - (D-\ell) \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{nR}(t) + l_{np} \frac{di_{nR}(t)}{dt} \right\} \tag{7}$$

식 (6)와 (7)을 정리 하면 사고 거리(ℓ) 식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$\therefore \ell = \frac{\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m \sum_{k=1}^N A_n(k)}{\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m \sum_{k=1}^N B_n(k)} \tag{8}$$

여기서,

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

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

본 논문에서는 그림 3에서는 단거리 송전선로에서의 선간 아크 단락사고가 발생하였을 경우, 사고위치를 판별하는 알고리즘을 이용하면, 식 (9)과 같이 전개할 수 있다.

$$\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m v_{nS}(t) = \ell \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pS}(t) + l_{np} \frac{di_{pS}(t)}{dt} \right\} + V_a \text{sgn}[i_F(t)] + R_F i_F(t) + \xi \quad (9)$$

여기서,

$$\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m : \text{단락사고가 발생한 두개의 상}$$

그림 4에서 볼 수 있듯이 사고 상 전압 $i_F(t)$ 는 식 (10)과 같이 정의 할 수 있다.

$$i_F(t) = \sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nS}(t) - \sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nR}(t) \quad (10)$$

식 (9)을 식 (10)에 대입하여 전개하면 식 (11)과 같이 방정식을 유도할 수 있다.

$$\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m v_{nS}(t) = \ell \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pS}(t) + l_{np} \frac{di_{pS}(t)}{dt} \right\} + V_a \text{sgn} \left[\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nS}(t) - \sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nR}(t) \right] + R_F \left[\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nS}(t) - \sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nR}(t) \right] + \xi \quad (11)$$

식 (11)을 시간영역내에서 k 번 샘플링으로 시간영역내에서의 전류 변화량을 표현하면 식 (12)과 같다.

$$\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m v_{nS}(k) = \ell \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pS}(k) + \frac{l_{np}}{\Delta t} (i_{pS}(k) - i_{pS}(k-1)) \right\} + V_a \text{sgn} \left[\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nS}(k) - \sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nR}(k) \right] + R_F \left[\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nS}(k) - \sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nR}(k) \right] + \xi \quad (12)$$

식 (12)을 미지수와 기지수를 나누어 정리하여 표현하면 식 (13)과 같이 간단한 형태로 표현이 가능하다.

$$v_k = a_{k1} V_a + a_{k2} R_F + b_k + \xi_k \quad (13)$$

$$a_{k1} = \text{sgn} \left[\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nS}(k) - \sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nR}(k) \right],$$

$$a_{k2} = \left[\sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nS}(k) - \sum_{\substack{n=a,m=b \\ n=b,m=c}}^m i_{nR}(k) \right],$$

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

식 (13)에서 미지수와 기지수의 형태로 나누어 정리하면 식(14)과 같이 표현 할 수 있다.

$$V = AX + B + \xi \quad (14)$$

즉, 식 (14)은 N 개의 샘플링을 위한 행렬 방정식 식 (15)과 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} v_{1s} \\ \vdots \\ v_{ks} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ \vdots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ R_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_k \end{bmatrix} \quad (15)$$

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

식 (15)을 미지수에 관한 행렬 방정식을 풀이하기 위하여 최소사승법(Least Error Square Method)을 이용하여 풀이하면 식 (14)과 같은 형태로 풀이가 가능하다.

$$X = (A^T A)^{-1} A^T (V - B) \quad (16)$$

$(A^T A)^{-1} A^T$:pseudo inverse

3.4 이선 아크 지락사고

3.2절에서는 송전선로 상에서 발생하는 일선 아크 지락사고에 대해서 설명하고 있다. 3.4절에서 3.2절의 기본 개념을 이용하여 2가지의 가정 하에 이선 아크 지락사고가 송전선로에서 발생 하였을 때를 풀이한다.

1) 이선 아크 지락사고 후에도 전력수급에는 영향을 받지 않는다.

- 이선 지락 사고가 발생하게 되면 수전단으로 공급되는 전력의 급감으로 전체 송전계통의 차단기가 2차적인 피해를 막기 위해서 작동할 가능성이 높다. 본 논문에서는 우리나라처럼 송전계통이 망구조를 가지고 있다고 가정하여 전력수급에는 영향을 받지 않는 것으로 가정한다.

2) 이선 아크 지락사고 시 단락사고는 발생하지 않는다.

- 그림 2에서 볼 수 있듯이 이선 지락사고가 동일한 지역에서 발생하게 되면 대지 혹은 송전선로의 접촉에 의해 두 상이 연결이 되어 지락 사고와 단락사고가 동시에 발생할 가능성이 있다. 이러한 단락형태가 발생하게 되면 자동재폐로기는 무조건적인 차단을 수행하여야 하며 단순한 전기적 해석과 더불어 환경적 요인 등의 다양한 변수를 고려하여야 한다. 또한, 고장 상에서 발생한 아크 전류는 정상 상과의 상호 인덕턴스, 상호 캐패시턴스에 의한 자기 현상의 영향으로 정상 상에 영향을 주는 현상이 발생한다. 이와 같이 사고 상에 발생한 아크 전류를 Primary arc current, 이차적인 현상에 의한 아크전류를 Secondary arc current라 한다. 본 논문에서는 Primary arc current로 한정한다. 본 논문에서는 이선 지락 사고는 동일한 지역 즉 대지를 통한 연결이 없다고 가정하여 논문의 범위를 한정한다.

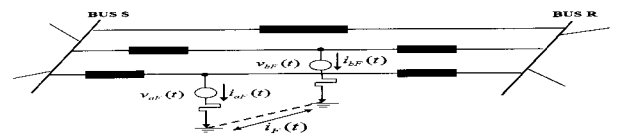


그림 2 대지에 의한 선로
Fig. 2 Earth pass by ground

그림 3에서 볼 수 있듯이 송전선로 상에서 이선 아크 지락사고가 발생하게 되면 식 (17-20)같이 4개의 사고 상 전압 방정식을 유도 할 수 있다.

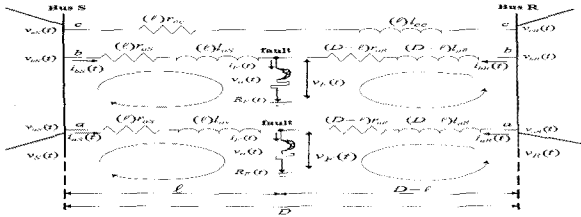


그림 3 송전선로 내에 발생한 이선 아크 지락사고
Fig. 3 Arc two-ground on the transmission line

이선 아크 지락 사고가 발생하게 되면 3.2절에서 풀이한 방식과 같은 형태로 방정식을 유도 할 수 있다.

$$v_{nF1} = v_{nS}(t) - \ell \left\{ r_{np} i_{pS}(t) + l_{np} \frac{di_{pS}(t)}{dt} \right\} \quad (17)$$

$$v_{nF1} = v_{nR}(t) - (D-\ell) \left\{ r_{np} i_{pR}(t) + l_{np} \frac{di_{pR}(t)}{dt} \right\} \quad (18)$$

$$v_{nF2} = v_{nS}(t) - \ell \left\{ r_{np} i_{pS}(t) + l_{np} \frac{di_{pS}(t)}{dt} \right\} \quad (19)$$

$$v_{nF2} = v_{nR}(t) - (D-\ell) \left\{ r_{np} i_{pR}(t) + l_{np} \frac{di_{pR}(t)}{dt} \right\} \quad (20)$$

여기서,

- $v_{nF}(t)$: t 시간에서의 사고 상 전압
- $v_{nS}(t)$: t 시간에서의 송전단 전류
- $i_{pS}(t)$: t 시간에서의 송전단 전압
- $v_{nR}(t)$: t 시간에서의 수전단 전압
- $i_{pR}(t)$: t 시간에서의 송전단 전류
- $n, p = a, b, c$: 송전선로의 상
- r_{pp}, r_{pn} : 자기/상호 저항 [$\Omega/\text{unit length}$]
- l_{pp}, l_{pn} : 자기/상호 인덕턴스 [$H/\text{unit length}$],

3.2절의 개념을 이용하여 일선 아크 지락사고와 같이 미지수와 기지수의 형태로 정리하여 풀이할 수 있다.

미지수(ℓ)에 관하여 정리를 하면 식 (21)와 같은 형태로 유도 할 수 있게 된다.

$$\therefore \ell_1 = \frac{\sum_{n=a,b,c} \sum_{k=1}^N A_n(k)}{\sum_{n=a,b,c} \sum_{k=1}^N B_n(k)}, \ell_2 = \frac{\sum_{n=a,b,c} \sum_{k=1}^N A_n(k)}{\sum_{n=a,b,c} \sum_{k=1}^N B_n(k)} \quad (21)$$

그림 3에서 볼 수 있듯이 이선 아크 지락사고가 발생하게 되면, 식(17)과 식 (19)에 아크 모델링 식 (3)을 이용하여 연립방정식을 유도하면 식 (22)를 유도할 수 있다.

$$v_{nS}(t) = \ell \sum_p \left\{ r_{np} i_{pS}(t) + l_{np} \frac{di_{pS}(t)}{dt} \right\} + V_n \text{sgn}[i_F(t)] + R_{nF} i_{nF}(t) + \xi_n \quad (22)$$

그림 3을 통하여 사고 전압 i_F 는 식 (23)과 같이 정의 할 수 있다.

$$i_{nF}(t) = i_{nS}(t) - i_{nR}(t) \quad (23)$$

사고 전류에 관한 식 (23)을 식 (17),(19)에 대입하여 사고 전압 v_{nS} 에 관하여 전개해보면 식 (24),(25)과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{nS}(t) = \ell \sum_p \left\{ r_{np} i_{pS}(t) + l_{np} \frac{di_{pS}(t)}{dt} \right\} + V_n \text{sgn}[i_{nS}(t) - i_{nR}(t)] + R_{nF} [i_{nS}(t) - i_{nR}(t)] + \xi_n \quad (24)$$

$$v_{nS}(k) = \ell \sum_p \left\{ r_{np} i_{pS}(k) + \frac{l_{np}}{\Delta t} (i_{pS}(k) - i_{pS}(k-1)) \right\} + V_n \text{sgn}[i_{nS}(k) - i_{nR}(k)] + R_{nF} [i_{nS}(k) - i_{nR}(k)] + \xi_n \quad (25)$$

식 (24)와 식 (25)을 이용하여 3.2절과 3.3절에서 소개한 최소자승법으로 풀이할 수 있다.

4. 장거리 송전선로에서의 사고거리 추정 및 사고 판별 알고리즘

4.1 일선 아크 지락사고

[7]논문에서는 그림 7과 같이 II모델을 이용하여 사고거리를 해석하였다. 그림 7은 선로어드미턴스를 고려한 II 모델을 나타내며, ℓ^* 는 사고 거리, Y 는 어드미턴스를 나타낸다.

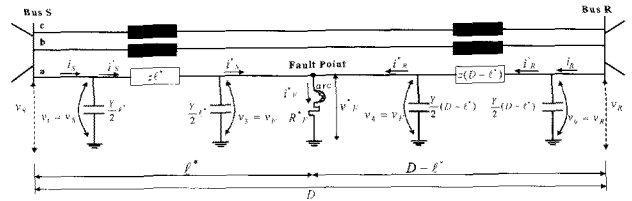


그림 4 선로어드미턴스를 고려한 아크지락사고
Fig. 4 Transmission line of arc ground fault with shunt capacitance

[7]논문에서는 선로 어드미턴스를 고려하지 않았을 때의 아크 일선지락 사고거리를 추정 하였다. 이를 근사적으로 이용하여 미지수를 기지수화 한다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 식 (26), (27)을 유도할 수 있다.

$$i'_S(t) = i_S(t) - \frac{Y}{2} \ell v_S(t) \quad (26)$$

$$i'_R(t) = i_R(t) - \frac{Y}{2} (D-\ell) v_R(t) \quad (27)$$

여기서

$i'_S(t), i'_R(t)$ 는 직렬 임피던스를 고려한 선로 전류

ℓ :선로어드미턴스를 고려하지 않았을 때의 사고추정거리

또한, 전압방정식을 이용하면 식 (28),(29)과 같이 유도 할 수 있다.

$$v_S(t) = i'_S(t) \frac{Y}{2} \ell^* + v_F^*(t) \quad (30)$$

$$v_R(t) = i'_R(t) \frac{Y}{2} (D-\ell^*) + v_F^*(t) \quad (31)$$

결국, 식 (16-31)를 연립하여 사고거리 ℓ^* 에 관하여 전개 하면 식 (32)와 같은 형태로 유도할 수 있다.

$$\therefore \ell^* = \frac{v_S(k) - v_R(k) + i_R(k) \frac{Y}{2} D}{i'_S(k) \frac{Y}{2} + i'_R(k) \frac{Y}{2}} \quad (32)$$

그림 4에서 볼 수 있듯이 장거리 송전선로에서의 상전류는 식 (33)과 식(34) 같이 정의 할 수 있다.

$$i_{nS}^*(t) = i_{nS}(t) - v_3(t) \frac{Y}{2} \ell^* \quad (33)$$

$$= \left\{ i_{nS}(t) - v_{nS}(t) \frac{Y}{2} \ell^* \right\} - \frac{Y}{2} \ell^* \{ v_{nS}(t) - i_{nS}(t) \mathcal{Z} \ell^* \}$$

$$i_{nR}^*(t) = i_{nR}(t) - v_4(t) \frac{Y}{2} (D - \ell^*) \quad (34)$$

$$= \left\{ i_{nR}(t) - v_{nR}(t) \frac{Y}{2} (D - \ell^*) \right\} - \frac{Y}{2} (D - \ell^*) \{ v_{nR}(t) - i_{nR}(t) \mathcal{Z} (D - \ell^*) \}$$

그림 4에서 볼 수 있듯이 장거리 송전선로에서의 사고 상 전류는 식 (35)과 같이 정의 할 수 있다.

$$i_F^*(t) = i_S^*(t) - i_R^*(t) \quad (35)$$

식 (35)에 식 (33), (34)을 대입하여 전개 하면 식 (36)과 같이 정의 할 수 있다.

$$i_F^*(t) = \left\{ i_{nS}(t) - v_{nS}(t) \frac{Y}{2} \ell^* \right\} - \frac{Y}{2} \ell^* \{ v_{nS}(t) - i_{nS}(t) \mathcal{Z} \ell^* \} \quad (36)$$

$$- \left[\left\{ i_{nR}(t) - v_{nR}(t) \frac{Y}{2} (D - \ell^*) \right\} - \frac{Y}{2} (D - \ell^*) \{ v_{nR}(t) - i_{nR}(t) \mathcal{Z} (D - \ell^*) \} \right]$$

식 (36)은 아크 전압식으로 정의하면 식 (37)과 같이 정의 할 수 있다.

$$v_{nS}(k) = i_{nS}(k) \frac{Y}{2} \ell^* + V_a^* \operatorname{sgn}[i_F^*(k)] + R_F^* i_F^*(k) + \xi_n^*(k) \quad (37)$$

식 (37)에서 미지수와 기지수를 분리하여 전개 해보면 V_F^* , R_F^* 을 제외한 모든 변수는 기지수라는 것을 알 수 있다. 이를 다시 연립방정식의 형태로 전개 하면 식 (38)과 같이 표현 할 수 있게 된다.

$$v_k = a_{k1} V_a^* + a_{k2} R_F^* + b_k + \xi_k \quad (38)$$

여기서, $a_{k1} = \operatorname{sgn}[i_F^*(k)]$, $a_{k2} = i_F^*(k)$, $b_k = i_{nS}(k) \frac{Y}{2} \ell^*$

4.2 선간 아크 단락사고

본 논문에서는 4.1절과 같은 미지변수를 기지수 화하는 방법을 이용하며, 3.2절과 같은 가정을 한다.

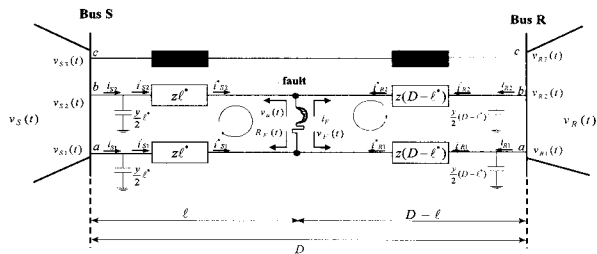


그림 5 선로어드미턴스를 고려한 아크단락사고
Fig. 5 Transmission line of Line-Line with shunt capacitance

그림 5에서 볼 수 있듯이 다음과 같이 식을 유도 할 수 있다.

$$i_{S1}(t) = i_{S1}(t) - \frac{Y}{2} \ell v_{S1}(t), \quad i_{R1}(t) = i_{R1}(t) - \frac{Y}{2} \ell v_{R1}(t), \quad (39)$$

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

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

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

결국, 식 (39)을 3.3절에서 소개한 방법과 같이 사고거리 ℓ^* 에 관하여 전개하면 식 (40)와 같은 형태로 유도할 수 있다.

$$\ell^* = \frac{\sum_{\substack{n=a, m=b \\ n=b, m=c}}^m v_{nS} + v_{nR} - i_{nR} \frac{Y}{2} D}{\sum_{\substack{n=a, m=b \\ n=b, m=c}}^m i_{nS} \frac{Y}{2} D + i_{nR} \frac{Y}{2} D} \quad (40)$$

그림 5에서 볼 수 있듯이 장거리 송전선로에서의 사고 상 전류의 크기는 식(41) 같이 정의 할 수 있다..

$$i_{aS}^*(t) = i_{aS}(t) - v_{aF}^S(t) \frac{Y}{2} \ell^* \quad (41)$$

$$= \left\{ i_{aS}(t) - v_{aS}(t) \frac{Y}{2} \ell^* \right\} - \frac{Y}{2} \ell^* \{ v_{aS}(t) - i_{aS}(t) \mathcal{Z} \ell^* \}$$

$$i_{bS}^*(t) = i_{bS}(t) - v_{bF}^S(t) \frac{Y}{2} \ell^*$$

$$= \left\{ i_{bS}(t) - v_{bS}(t) \frac{Y}{2} \ell^* \right\} - \frac{Y}{2} \ell^* \{ v_{bS}(t) - i_{bS}(t) \mathcal{Z} \ell^* \}$$

$$i_{aR}^*(t) = i_{aR}(t) - v_{aF}^R(t) \frac{Y}{2} (D - \ell^*)$$

$$= \left\{ i_{aR}(t) - v_{aR}(t) \frac{Y}{2} (D - \ell^*) \right\}$$

$$- \frac{Y}{2} (D - \ell^*) \{ v_{aR}(t) - i_{aR}(t) \mathcal{Z} (D - \ell^*) \}$$

$$i_{bR}^*(t) = i_{bR}(t) - v_{bF}^R(t) \frac{Y}{2} (D - \ell^*)$$

$$= \left\{ i_{bR}(t) - v_{bR}(t) \frac{Y}{2} (D - \ell^*) \right\}$$

$$- \frac{Y}{2} (D - \ell^*) \{ v_{bR}(t) - i_{bR}(t) \mathcal{Z} (D - \ell^*) \}$$

장거리 송전선로의 이선 단락 사고 시에 발생하는 사고 상전류는 식 (42)과 같이 정의 할 수 있다.

$$i_F^*(t) = \sum_{\substack{n=a, m=b \\ n=b, m=c}}^m i_S^*(t) - \sum_{\substack{n=a, m=b \\ n=b, m=c}}^m i_R^*(t) \quad (42)$$

여기서, n, m : 단락사고가 발생한 상

식 (41)과 식 (42)을 연립하여 방정식을 풀이하면 식 (43)과 같이 정의 할 수 있다.

$$i_F^*(t) = \left[\left\{ i_{aS}(t) + i_{bS}(t) \right\} - \left\{ v_{aF}^S(t) \frac{Y}{2} \ell^* + v_{bF}^S(t) \frac{Y}{2} \ell^* \right\} \right] \quad (43)$$

$$- \left[\left\{ i_{aR}(t) + i_{bR}(t) \right\} - \left\{ v_{aF}^R(t) \frac{Y}{2} (D - \ell^*) + v_{bF}^R(t) \frac{Y}{2} (D - \ell^*) \right\} \right]$$

식 (43)와 같은 형태로 표현할 수 있고, 이를 행렬식 형태의 미지수와 기지수로 나눌 수 있다.

$$v_{aS}(t) = i_{aS}(t) \frac{Y}{2} \ell^* + V_a^* \operatorname{sgn}[i_F^*(t)] + R_F^* i_F^*(t) + \xi_n^*(t) \quad (44)$$

4.3 이선 아크 지락사고

그림 6는 장거리 송전선로에서 아크 지락사고가 발생 하였을 때의 전력시스템을 나타내고 있다. 3.4절에서 사용하고 있는 단거리 송전선로의 사고거리를 초기 값으로 사용하여 문제를 해석한다. 또한 3.3절에서 제시한 이 두 가지의 가정을 그대로 적용한다.

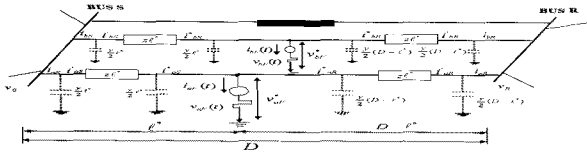


그림 6 선로어드미턴스를 고려한 아크 지락사고
Fig. 6 Arc two ground fault with shunt capacitance

그림 6에서 볼 수 있듯이 장거리 송전선로의 두상에서 사고가 발생하게 되면 식 (45),(46)과 같은 4개의 연립방정식을 유도할 수 있다.

$$i_{aS}^*(t) = i_{aS}(t) - \frac{y}{2} v_{aS}(t), \quad i_{aR}^*(t) = i_{aR}(t) - \frac{y}{2}(D-l)v_{aR}(t) \quad (45)$$

$$i_{bS}^*(t) = i_{bS}(t) - \frac{y}{2} \ell v_{bS}(t), \quad i_{bR}^*(t) = i_{bR}(t) - \frac{y}{2}(D-l)v_{bR}(t) \quad (46)$$

사고 상 전압에 관한 방정식은 식 (47), (48)과 같은 형태로 유도할 수 있다.

$$v_{aS}(t) = i_{aS}^*(t) \frac{y}{2} \ell^* + v_F^*(t), \quad v_{aR}(t) = i_{aR}^*(t) \frac{y}{2} (D-l^*) + v_F^*(t) \quad (47)$$

$$v_{bS}(t) = i_{bS}^*(t) \frac{y}{2} \ell^* + v_F^*(t), \quad v_{bR}(t) = i_{bR}^*(t) \frac{y}{2} (D-l^*) + v_F^*(t) \quad (48)$$

식 (47), (48)를 장거리 송전선로의 사고 거리 ℓ^* 에 관하여 정리하면 식 (49)와 같다.

$$\ell_1^* = \frac{v_{nS}(k) - v_{nR}(k) + i_{nR}(k) \frac{y}{2} D}{i_{nS}(k) \frac{y}{2} + i_{nR}(k) \frac{y}{2}}, \quad \ell_2^* = \frac{v_{nS}(k) - v_{nR}(k) + i_{nR}(k) \frac{y}{2} D}{i_{nS}(k) \frac{y}{2} + i_{nR}(k) \frac{y}{2}} \quad (49)$$

그림 6에서 볼 수 있듯이 장거리 송전선로에서의 상전류는 식 (50-51)과 같이 정의할 수 있다. 장거리 송전선로 중 a, b상에서 사고가 발생하였다고 가정한다.

$$i_{aS}^*(t) = i_{aS}(t) - v_{aF}(t) \frac{y}{2} \ell^* = \left\{ i_{aS}(t) - v_{aS}(t) \frac{y}{2} \ell^* \right\} - \frac{y}{2} \ell^* \left\{ v_{aS}(t) - i_{aS}(t) Z \right\}$$

$$i_{bS}^*(t) = i_{bS}(t) - v_{bF}(t) \frac{y}{2} \ell^* = \left\{ i_{bS}(t) - v_{bS}(t) \frac{y}{2} \ell^* \right\} - \frac{y}{2} \ell^* \left\{ v_{bS}(t) - i_{bS}(t) Z \right\} \quad (50)$$

$$i_{aR}^*(t) = i_{aR}(t) - v_{aF}(t) \frac{y}{2} (D-l^*) = \left\{ i_{aR}(t) - v_{aR}(t) \frac{y}{2} (D-l^*) \right\} - \frac{y}{2} (D-l^*) \left\{ v_{aR}(t) - i_{aR}(t) Z(D-l^*) \right\}$$

$$i_{bR}^*(t) = i_{bR}(t) - v_{bF}(t) \frac{y}{2} (D-l^*) = \left\{ i_{bR}(t) - v_{bR}(t) \frac{y}{2} (D-l^*) \right\} - \frac{y}{2} (D-l^*) \left\{ v_{bR}(t) - i_{bR}(t) Z(D-l^*) \right\} \quad (51)$$

그림 6에서처럼 장거리 송전선로에 사고가 발생하였을 시 사고 상전류는 식 (52)을 이용하여 식 (53)과 식 (54) 같이 유도할 수 있다.

$$i_F^*(t) = i_S^*(t) - i_R^*(t) \quad (52)$$

$$i_{aF}^*(t) = \left\{ i_{aS}(t) - v_{aS}(t) \frac{y}{2} \ell^* \right\} - \frac{y}{2} \ell^* \left\{ v_{aS}(t) - i_{aS}(t) Z \right\} - \left\{ i_{aR}(t) - v_{aR}(t) \frac{y}{2} (D-l^*) \right\} - \left[-\frac{y}{2} (D-l^*) \left\{ v_{aR}(t) - i_{aR}(t) Z(D-l^*) \right\} \right] \quad (53)$$

$$i_{bF}^*(t) = \left\{ i_{bS}(t) - v_{bS}(t) \frac{y}{2} \ell^* \right\} - \frac{y}{2} \ell^* \left\{ v_{bS}(t) - i_{bS}(t) Z \right\} - \left\{ i_{bR}(t) - v_{bR}(t) \frac{y}{2} (D-l^*) \right\} - \left[-\frac{y}{2} (D-l^*) \left\{ v_{bR}(t) - i_{bR}(t) Z(D-l^*) \right\} \right] \quad (54)$$

식 (47), (53)에서 제시한 사고 상 전압방정식과 사고 상 전류방정식을 이용하여 사고 상 전압 방정식을 다시 유도하면 식 (54), 식 (55)과 같이 유도할 수 있다.

$$v_{aS}(k) = i_{aS}^*(k) \frac{y}{2} \ell^* + V_a^* \text{sgn}[i_{aF}^*(k)] + R_{aF}^* i_{aF}^*(k) + \xi_{an}^*(k) \quad (54)$$

$$v_{bS}(k) = i_{bS}^*(k) \frac{y}{2} \ell^* + V_b^* \text{sgn}[i_{bF}^*(k)] + R_{bF}^* i_{bF}^*(k) + \xi_{bn}^*(k) \quad (55)$$

식 (54),(55)에서 미지수와 기지수를 분리하여 전개해보면 V_F^*, R_F^* 을 제외한 모든 변수는 기지수라는 것을 알 수 있다.

5. 사례연구

본 논문에서는 송전선로에서 발생하는 사고를 모의하기 위해서 EMTP/ATP를 이용하여 사고를 모의하였다.

EMTP/ATP는 전력시스템에서 발생하는 사고 및 고장에 대해서 다양한 모의가 가능한 시뮬레이터로 전력시스템의 다양한 분야에서 사용하고 있다. EMTP/ATP에서 모의된 사고 데이터를 바탕으로 본 논문에서 제시한 알고리즘을 MATLAB을 이용하여 타당성을 검증하였다. 본 논문에서는 사고시 발생하는 고장 저항과 고장 위상의 변동성을 고려하지 않는다.

5.1 단거리 송전선로의 사례연구를 위한 전력시스템

본 장에서는 단거리 송전선로에 대한 사례연구를 수행하기 위하여 그림 7,8,9과 같은 모의 시스템을 구성하였다 [7]. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 사례연구를 위한 모의 시스템은 400kV급 송전시스템으로 단거리 송전선로의 사례연구를 위하여 송전 커패시턴스는 무시한다. 단거리 송전선로(선로 어드미턴스 미고려선로) 변수 값은 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 $R_A=1 \Omega$, $L_A=0.064 HR_{A0}=2 \Omega$, $L_{A0}=0.128 H$. 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 sample/ T_o), $v_{S,R}$, $i_{S,R}$ 은 송전선 양단에서 전파되는 상 전압과 상전류를 의미한다. S는 sending-, R은 Receiving- 을 의미한다.

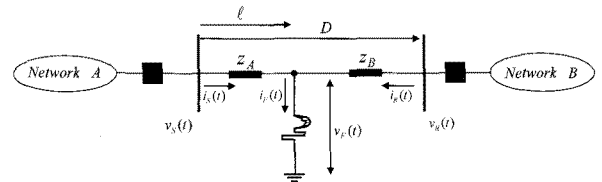


그림 7 단거리 선로의 아크 일선 지락사고를 위한 모의 시스템 (선로 어드미턴스 제외)

Fig. 7 Power system with arc one-line ground fault

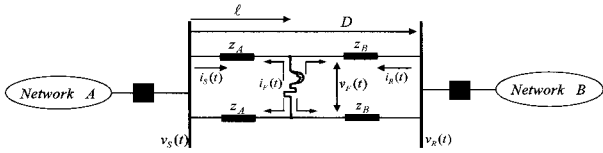


그림 8 단거리 선로의 아크 이선 단락사고를 위한 모의 시스템 (선로 어드미턴스 제외)
 Fig. 8 Power system with arc line-line fault

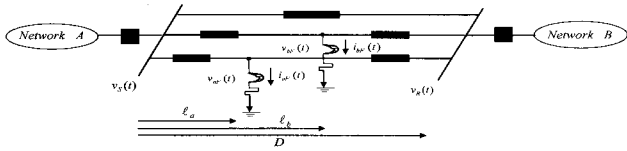


그림 9 단거리 선로의 아크 이선 지락사고를 위한 모의 시스템 (선로 어드미턴스 제외)
 Fig. 9 Power system with arc two-line ground fault

EMTP/ATP을 이용하여 사고 아크 전압은 4.5 kV로 가정하여 사례연구를 수행하였다. 또한 사고 개시 시간은 송전선로를 관측하는 최초 시간에서 33ms 후에 개시된다고 가정하였다. 또한 고장저항은 8Ω으로 가정한다.

5.1.1 일선 지락 사고 거리 추정 및 사고 판별 결과

그림 10은 본 논문에서 제시한 알고리즘을 이용하여 사고 거리 및 아크전압을 추정한 결과이다. 그림 10에서 보면 알 수 있듯이 최초 사고 개시 후 일부 구간까지는 사고 데이터를 취득한 후 본 논문에서 제안된 알고리즘을 통하여 해석을 실시한다. 사고거리 해석 결과는 약 0.06~0.08초 부근, 아크 전압은 0.08초 이후에 4.5kV 부근에서 수렴하고 있음을 알 수 있다. 즉 최초 데이터를 받아들인 후 0.08초 이후에는 자동 재폐로기의 동작책무를 결정 할 수 있는 결과를 도출 할 수 있다.

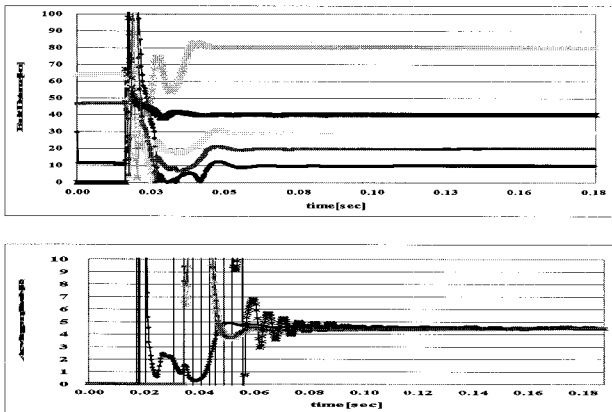


그림 10 사고거리 변화에 지락 아크사고의 거리 및 아크전압 추정 결과
 Fig. 10 Results of calculation fault distance and arc voltage amplitude by different of fault distance

5.1.2 선간 단락 사고 거리 추정 및 사고 판별 결과

그림 11에서 볼 수 있듯이 최초 사고가 발생한 이후 본 논문에서 제시한 알고리즘을 이용한 해석방법은 0.07초 이후에 사고 거리 추정이 수렴하고 있음을 알 수 있으며, 아크 전압 또한 0.09초 이후에는 수렴하고 있음을 알 수 있다. 즉 본 논문에서 제시한 알고리즘이 이선 단락사고에서 또한 자동 재폐로기가 최초 동작이후 다음 동작을 일시 사고와 영구 사고가 판별이 가능하며, 사고 복구에 신속한 대처가 가능하다.

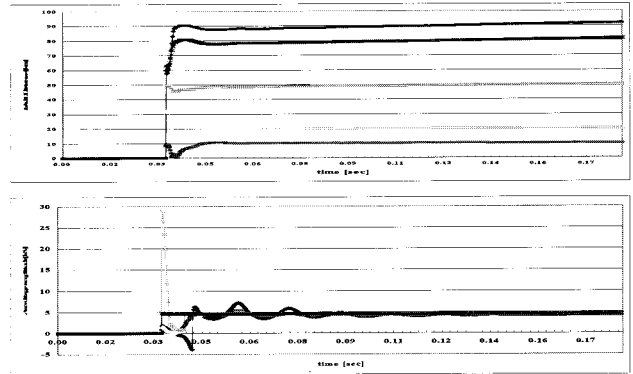


그림 11 사고거리 변화에 따른 단락 아크사고의 거리추정 결과
 Fig. 11 Results of line-line fault by different of fault distance and arc voltage amplitude

5.1.3 이선 지락 사고 거리 추정 및 사고 판별 결과

알고리즘의 타당성을 판별하기 위한 단거리 송전선로에서 발생한 사고 거리는 다음과 같다. 10/20, 20/50, 50/80, 80/90km 그림 12는 단거리 송전선로에서 사고거리의 변화에 따른 이선 지락 아크사고 거리 추정결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 사고가 발생한 후 전압, 전류의 데이터를 바탕으로 알고리즘이 사고거리 추정을 위한 해석을 수행한 0.08초 부근에서 사고거리 추정결과가 수렴하고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 본 논문에서 제시한 이선 지락 알고리즘의 타당성을 증명 할 수 있다.

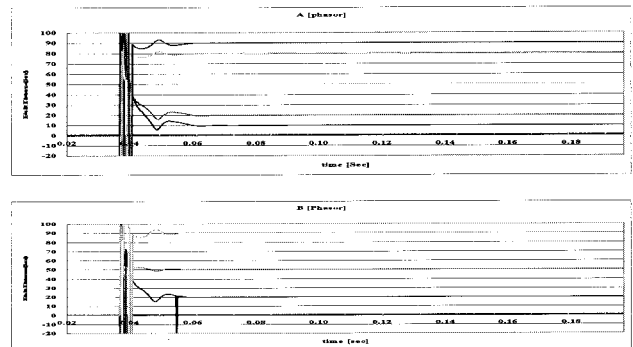


그림 12 사고거리 변화에 따른 이선 지락 아크사고의 거리 추정 결과
 Fig. 12 Result of two ground fault by different of fault distance

그림 13은 단거리 송전선로에서 발생한 아크전압의 판별 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 일선, 단락사고의 판별결과에 비하여 수렴 시간이 0.02초 정도 늦게 수렴되고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 자동 재폐로기의 최초 동작이후 두 번째 동작의 유무를 판별하기에는 충분한 시간이다.

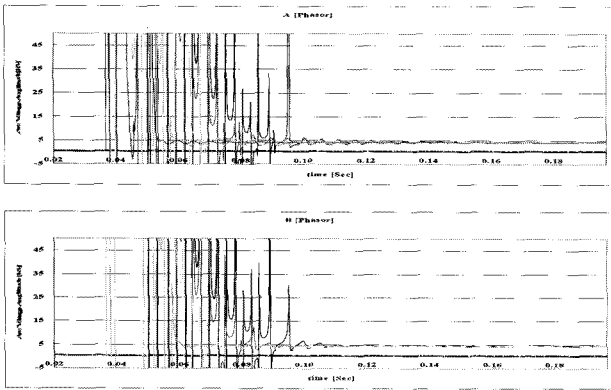


그림 13 사고거리 변화에 따른 아크전압 크기 판별 결과
Fig. 13 Estimation of arc voltage amplitude by different of fault distance

5.2 장거리 송전선로의 사례연구를 위한 전력시스템

본 논문에서는 장거리 송전선로의 사례연구를 수행하기 위하여 그림 14-16와 같은 전력시스템을 구성하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 장거리 송전 선로의 변수는 일정한 값으로 정의하며, $r = 0.1 \Omega/km, x = 0.36 \Omega/km, c = 3.0[\mu F]$
 $r_0 = 0.25 \Omega/km, x_0 = 0.6 \Omega/km, c_0 = 2.0[\mu F]$ 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 sample/ T_0). 고장발생 위치는 Network A에서 거리에 비례하게 분포하였다. 아크전압의 크기가 $v_a = 1000 [kV]$ 로 하였으며, 사고저항에 따른 영향을 분석하기 위해서 사고저항을 다양하게 구성하였으며, 사고 개시 시간은 33[ms]이다.

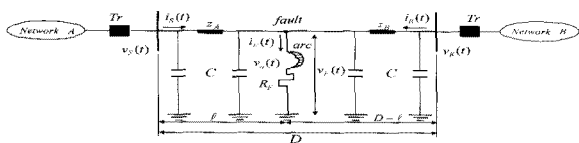


그림 14 장거리 선로의 아크 일선 지락사고를 위한 모의 시스템 (선로 어드미턴스 고려)

Fig. 14 Power system with arc one-line ground fault

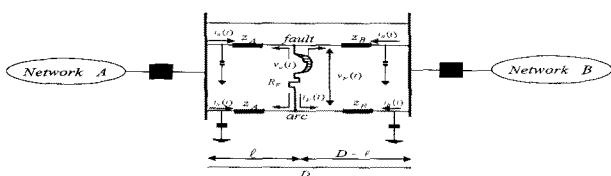


그림 15 장거리 선로의 아크 이선 단락사고를 위한 모의 시스템 (선로 어드미턴스 고려)

Fig. 15 Power system with arc line-line fault

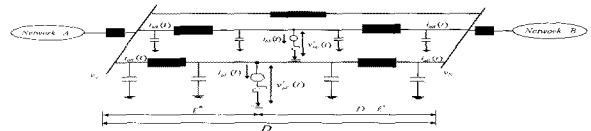


그림 16 장거리 선로의 아크 이선 지락사고를 위한 모의 시스템 (선로 어드미턴스 고려)

Fig. 16 Power system with arc two-line ground fault

본 논문에서는 장거리 송전선로의 모의 시스템을 기준으로 100, 200, 300km로 나누어서 사례연구를 수행한다. 또한 장거리 송전선로의 초기 값에 해당하는 단거리 알고리즘을 고려 하였을 때와 그렇지 않았을 때를 비교 분석환경으로 사용한다. 본 논문에서 제시한 장거리 송전선로의 사고거리 추정 및 사고 전압추정 알고리즘은 서론 및 본문에서 설명하였듯이 단거리 송전선로에서 사용한 알고리즘을 이용하여 사고거리를 초기 추정하여 이를 근사적인 초기 값으로 가정하여 장거리 송전선로의 사고거리 및 사고전압을 추정한다. 이러한 방법론은 알고리즘 상에서 제시되는 미지수를 지수화 하기위한 과정으로 상태추정 속도에 영향을 줄 수 있다. 하지만 이러한 사고 여파의 영향은 주로 단거리 송전선로에서 문제점을 나타내고 있다. 장거리 송전선로와 같은 경우는 사고 판별의 속도 보다는 사고 위치와 사고 종류의 정확도에 더 큰 비중을 두고 있다. 그러나 본 논문에서 제시한 장거리 송전선로 알고리즘의 경우, 비록 단거리 송전선로의 알고리즘을 이용하여 초기 값을 유도하고 있지만, 알고리즘의 해석 속도 또한 자동 재폐로기가 이차적인 동작을 하기 전에 사고형태를 판단 할 수 있는 속도적 우수성을 가지고 있다.

5.2.1 장거리 송전선로의 일선 지락사고

아래의 결과는 사고저항이 8Ω일때의 사고 결과이다. 표 1은 장거리 송전선로에서 어드미턴스를 고려하였을 때와 그렇지 않았을 때를 비교한 표이다. 어드미턴스를 미 고려할 때 즉, 오차율은 상당히 큰 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 표 1의 값은 수렴 후 평균값을 나타내고 있다.

표 1 사고거리의 변화에 따른 평균값 및 오차율(장거리 알고리즘 이용) (D=300km)

Table 1 Fault location mean and error value according different gault distance

사고거리 [km]	단거리알고리즘 미고려		단거리 알고리즘 고려	
	사고추정 거리[km]	오차율 [%]	사고추정 거리[km]	오차율 [%]
10	6.75676	1.0811	10.1896	0.0632
20	16.0836	1.3055	20.1773	0.0591
50	45.1420	1.6193	50.1411	0.0470
100	96.6154	1.1282	100.011	0.0037
150	150.588	0.1960	149.730	0.0900
200	205.118	1.7060	199.325	0.2250
250	257.858	2.6193	248.956	0.3480
280	287.574	2.5247	278.886	0.3713

표 2의 결과는 장거리 송전선로에서 일선지락 사고가 발생 하였을 때 아크 전압의 크기를 계산한 결과이다. 표의 결과를 통해 본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 증명하였다.

표 2 사고거리의 변화에 따른 사고전압(D=300km)

Table 2 Two-terminal fault voltage estimate for the different fault distance

사고거리 [km]	단거리 알고리즘 미교려 사고전압 [kV]	단거리 알고리즘 교려 사고전압 [kV]
10	895.580	1006.58
20	903.599	1005.08
50	932.487	1001.56
100	985.778	1000.48
150	1040.74	1006.58
200	1095.23	1020.43
250	1147.61	1043.01
280	1178.18	1060.23

5.2.2 장거리 송전선로의 선간 단락사고

표 3,4은 장거리 송전선로에서 선간 단락 사고가 발생 하였을 때 사고거리 및 사고 전압 추정 결과이다. 아래의 표 3,4을 통해 알 수 있듯이 본 논문에서 제시한 사고추정 알고리즘의 오차율이 상당히 작은 것을 알 수 있다. 이를 통해 본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 증명하였다.

표 3 사고거리의 변화에 따른 평균값 및 오차율(장거리 알고리즘 이용) (D=300km)

Table 3 Fault location mean and error value according different gault distance

사고거리 [km]	단거리 알고리즘 미교려		단거리 알고리즘 교려	
	사고추정거리 [km]	오차율 [%]	사고추정거리 [km]	오차율 [%]
10	7.55896	0.814	9.8547	0.048433
20	15.2417	1.586	19.3526	0.2158
50	44.9874	1.671	50.2487	0.0829
100	95.2365	1.588	100.6523	0.217433
150	152.3658	0.789	150.4587	0.1529
200	206.3255	2.109	200.897	0.299
250	254.2145	1.405	251.236	0.412
280	278.1459	0.618	281.9687	0.656233

표 4 사고거리의 변화에 따른 사고전압

Table 4 Two-terminal fault voltage estimate for the different fault distance

사고거리 [km]	단거리 알고리즘 미교려 사고전압 [kV]	단거리 알고리즘 교려 사고전압 [kV]
10	1102.6	998.47
20	1098.68	1002.5
50	912.83	1008.6
100	906.23	1006.2
150	987.6	1011.89
200	1064.2	1022.56
250	1124.9	1057.89
280	1165.89	10047.5

5.2.3 장거리 송전선로의 이선 지락사고

본 절에서는 장거리 이선 지락사고 알고리즘의 타당성을 증명하기 위하여 사례연구를 수행한다. 표 5는 이선 지락사고가 발생 하였을 때의 사고 추정 거리를 나타내고 있다. 아래의 표 5를 통해 알 수 있듯이 본 논문에서 제시한 사고 추정 알고리즘의 오차율이 상당히 작은 것을 알 수 있다.

표 5 사고거리의 변화에 따른 이선지락사고 거리 평균값 및 오차율(D=300km)

Table 5 Fault location mean and error value according different gault distance

사고거리 [km]	A상 사고		B상 사고	
	사고추정 거리[km]	오차율 [%]	사고추정 거리[km]	오차율 [%]
10, 20	10.254	0.085	19.012	0.329
20, 50	20.586	0.195	51.012	0.337
50, 100	50.124	0.041	101.325	0.442
100, 150	101.236	0.412	151.847	0.616
150, 200	151.245	0.415	202.654	0.885
200, 250	202.365	0.788	252.245	0.748
250, 280	251.987	0.662	282.246	0.749

표 6 사고거리의 변화에 따른 사고전압

Table 6 Two-terminal fault voltage estimate for the different fault distance

사고거리 [km]	A상 사고 사고전압 [kV]	B상 사고 사고전압 [kV]
10, 20	995.98	990.65
20, 50	996.20	995.26
50, 100	1000.89	1002.36
100, 150	1002.56	1003.58
150, 200	1001.65	1001.78
200, 250	998.54	998.25
250, 280	995.45	997.21

5. 결 론

본 논문에서는 단거리 송전선로와 장거리 송전선로에서 사고 발생 시 양단자로 전달되는 사고 데이터를 바탕으로 시간영역내에서 사고거리 및 사고 종류를 판별하는 알고리즘을 제시하였다. 본 논문에서는 차단기의 동작책무와 사고거리 추정을 위한 수치적 해석 기법을 제시하기위하여 데이터의 입력방법은 양 단자로 가정하였으며, 시간영역내에서 풀이하였다. 또한 전력계통의 모선전압의 크기와 위상각을 모선의 양 단자에 설치한 PMU를 이용하여 시각적 동기화되었다 가정하였다. 본 논문에서 제시한 수치해석 기법의 타당성을 증명하기 위해서, EMTP/ MATLAB을 이용하여 풀이하였으며, 다양한 사례 연구를 수행하였다.

1) 단거리 송전선로

본 논문에서는 송전선로에서 발생할 수 있는 사고의 종류를 일선지락, 이선지락, 이선단락으로 나누워서 사고위치와 사고전압을 판별할 수 있는 6개의 알고리즘을 제시하였으며, 사례연구를 통하여 알고리즘의 타당성을 증명하였다.

2) 장거리 송전선로

본 논문에서는 단거리 송전선로의 거리 추정기법을 이용하여 장거리 송전선로의 미지수를 기지수로 변환하였으며, 단거리 송전선로에서 무시되는 대지 커패시턴스를 고려하여 장거리 송전선로는 II 등가모형을 이용하여 풀이하여 송전선로에서 발생할 수 있는 사고종류를 일선지락, 이선 지락, 이선단락으로 구분하여 사고 위치와 사고 전압을 판별 할 수 있는 6개의 알고리즘을 제시하였다.

참 고 문 헌

[1] A. Maikapar, "Extinction of an Open Electric Arc", Elektrichestvo, Vol. 4, pp. 64-69, 1960.
 [2] 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.
 [3] 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
 [4] 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.
 [5] 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.
 [6] 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.
 [7] 김병만, 채명석, 강용철, "장거리 송전선로를 고려한 사고거리추정 수치해석 알고리즘", Vol. 57, pp. 2139-2146, 2008
 [8] 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.
 [9] 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
 [10] 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
 [11] 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

[12] Ying-Hong Lin, Chih-Wen Liu, Ching-Shan Chen, "A New PMU-Based Fault Dectection/Location Techique for Tranmission 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.

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(공학). 현재 군장대학 전기전자과 교수
 Tel: 063-450-8215, Fax: 063-450-8111
 E-mail : mschae@kunjang.ac.kr



정 태 영 (鄭太英)

1982년 4월 17일생. 2004년 중국 절강대 전기공학과 졸업. 2006년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 전북대 대학원 전기공학과 박사과정
 Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394
 E-mail : huanxiong417@hotmail.com



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(공학), 현재 전북대 공대 전기공학과 부교수
 Tel.: 063-270-2391, Fax: 063-270-2394
 E-mail : yckang@chonbuk.ac.kr