

## A Line to Ground Fault Location Algorithm for Underground Cable System

崔 勉 松<sup>†</sup> · 李 德 洙<sup>\*</sup> · 楊 霞<sup>\*\*</sup>  
 (Myeon-Song Choi, Duck-Su Lee, Xia Yang)

**Abstract** - This paper proposes a line-to-ground fault location algorithm for underground cable system. A feature of the proposed method is a new algorithm based on the analytic research which has not been tried until now. The proposed method firstly makes voltage and current equations using analysis of distributed parameter circuit for each of cores and sheathes respectively, and then establishes an equation of the fault distance according to the analysis of the fault conditions. Finally the solution of this equation is calculated by Newton-Raphson iteration method. The effectiveness of this proposed algorithm has been proven through PSCAD/EMTDC(Ver. 4.1) simulations.

**Key Words** : Underground Cable, Fault Location, Distributed Parameter Circuit

### 1. 서 론

최근 경제 성장과 함께 첨단 정보화 시대로의 사회 환경변화는 많은 전력의 안정적인 전력공급을 요구하게 되었으며, 이러한 필요를 충족시키기 위하여 지중 케이블 시스템을 이용한 전력의 송전 및 배전이 이루어지고 있다. 또한 도심 지역 및 산업 계통에 적용하여 전력 공급의 신뢰도를 증가시키고 있으며 더욱이 주거 환경의 미관을 아름답게 만들고 있다.

지중 케이블 계통은 큰 전력을 송전할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 지중에 매설되어 있으므로 자연재해에 의한 위험을 피할 수 있으며, 또한 인적실수로 발생하는 다양한 사고를 줄일 수 있다. 그러나 눈에 보이지 않으므로 케이블 선로상에 어떤 고장이 발생하였을 경우 고장이 어디서 발생하였는지 찾기가 어렵고 고장을 수리하는 등의 운용 및 유지·보수하는 측면에서 많은 어려움이 있다.

현대의 송·배전 시스템은 더 빠르고 정확한 고장점 추정 방법을 요구한다. 그러나 지중 케이블 계통에서 어떤 고장이 발생할 경우 그 고장을 찾기 위해 지중 선로가 설치된 긴 하나의 구간을 파악하고 케이블의 표면을 보호하고 있는 보호층 및 시스 층을 확인해야하는 어려움이 있다. 따라서 지중 케이블 계통의 고장점 표정 및 고장을 복구하는 문제는 가공 송전 계통보다 어렵고 중요한 문제이며, 지중 계통에서 적용할 수 있는 빠르고 정확한 고장점 표정 방법이 요구되고 있다. 최근 고장 거리계산 알고리즘 및 고장점 표정 장치에 관

한 많은 연구가 수행되고 있으며 다양한 문헌에 발표되고 있다. 지중 케이블 고장점 표정 방법으로 터미널 방법과 트레이서 방법[1]으로 나눌 수 있다. 터미널 고장점 표정 방법은 지중 선로의 한 단자 또는 양 단자에서 수행되는 기술이다. 일반적으로, 이 방법은 근사적인 고장점 표정을 위해 사용되어진다. 트레이서 기법을 이용한 고장점 표정 방법은 정확한 고장점을 찾기 위해서 가칭 주파수 대역 또는 전자기 신호를 고장선로에 주입하여 고장회선을 트레이서 하는 방법으로 터미널 방법을 이용하여 고장구간을 찾은 후 정확한 고장 지점을 찾는 데 사용된다. 그리고 인공지능 기법을 적용한 방법으로는 선로에 고장 발생시 선로를 따라 진행되는 고조파 성분을 측정하여 고장거리를 계산하는 진행과를 이용한 방법 [2], 퍼지 로직과 웨이블릿 해석을 결합한 방법[3], 학습을 통하여 추론하는 뉴럴 네트워크와 확률에 의한 추론을 결합한 뉴로 퍼지를 이용한 방법[4] 등이 있다.

본 연구에서는 지중 케이블의 1선 지락고장에 적용할 수 있는 새로운 고장점 표정 방안을 제안한다. 제안한 방법은 해석적인 방법에 기초한 것으로서, 먼저 분포정수 회로 해석 방법을 이용하여 케이블 코어와 시스의 전압, 전류 방정식을 수립한다. 그리고 코어·시스 지락고장시 전체 시스템에 관한 고장 조건을 이용하여 고장 거리에 관한 방정식을 세운 다음 지중 케이블 계통 모의를 통해 얻을 수 있는 전원측 정보와 부하 정보를 이용하여 고장거리를 구한다. 제안한 방법을 검증하기 위하여 PSCAD/EMTDC Ver. 4.1을 이용하여 지중 케이블의 고장을 모의하였으며, 고장거리와 고장 저항을 변경하여 제안한 알고리즘을 검증하였다.

† 교신저자, 正會員 : 明知大學 電氣工學科 副教授 · 工博  
 e-mail : mschoi@mju.ac.kr

\* 正會員 : 明知大學 電氣工學科 NPTC 研究員

\*\* 正會員 : 明知大學 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2005年 1月 19日

最終完了 : 2005年 4月 19日

### 2. 지중 케이블 고장점 표정 알고리즘

제안한 지중 케이블 고장점 표정 알고리즘은 분포정수회로 해석[5]에 기초한 것이며, 본 연구의 핵심이다. 본 연구에서는

코어와 시스로 구성된 단심 동축 케이블을 대상으로 하였다. 일반적으로 지중 케이블의 인덕턴스는 가공 케이블 선로의 1/3 정도로 작지만 커패시터는 20~30배 정도로 상당히 크다. 따라서 지중 케이블 해석에서는 커패시터 성분을 무시할 수 없으므로, 커패시턴스 성분을 고려하기 위하여 장거리 송전선로 해석방법에 적용되는 분포정수회로 해석 이론을 응용하였다. 다음 절에 분포정수회로 해석방법과 본 연구에서 대상으로 한 케이블의 구조에 대하여 기술하였다.

2.1 분포정수회로 해석 방법

지중 케이블의 임피던스 및 어드미턴스는 케이블 선로의 각 미소구간 Δx에 분포해 있는 분산 파라미터이다. 미소변위 dx의 일반적인 형태는 그림 1과 같으며, 미소구간의 직렬 임피던스는 zdx이고, 병렬 어드미턴스는 ydx이다.

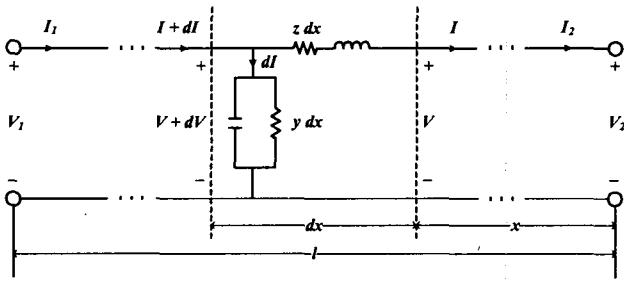


그림 1 분포정수회로의 케이블 모델  
Fig. 1 Cable model of the distributed parameter circuit

미소 구간에 대하여 키르히호프의 전압법칙(KVL)과 전류법칙(KCL)을 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} dV &= I z dx \\ dI &= (V + dV)ydx \approx Vydx \end{aligned} \quad (1)$$

방정식 (1)에서 미분되는 미지수들의 곱을 무시하면, 두개의 1차 선형 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dV}{dx} = zI, \quad \frac{dI}{dx} = yV \quad (2)$$

또한 2차 선형 미분방정식도 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2V}{dx^2} = yzV = \gamma^2V, \quad \frac{d^2I}{dx^2} = yzI = \gamma^2I \quad (3)$$

선형미분방정식의 전형적인 해법을 이용하면,  $s^2 - r^2 = 0$ 인 특성방정식이 정해지고, 특성방정식의 근을  $s_1, s_2 = \pm r$ 과 같이 구할 수 있다. 전압에 관한 일반적인 해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V &= k_1 e^{\gamma x} + k_2 e^{-\gamma x} \\ &= (k_1 + k_2) \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} + (k_1 - k_2) \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \\ &= K_1 \cosh \gamma x + K_2 \sinh \gamma x \end{aligned} \quad (4)$$

그리고 같은 방법으로 전류에 관한 해를 구하면 다음과 같다.

$$I = K_3 \cosh \gamma x + K_4 \sinh \gamma x \quad (5)$$

2.2 지중 케이블의 구조 및 특성

본 연구에서, 코어와 시스로 구성된 두개의 도체를 갖는 지중 전력 케이블을 대상으로 하였으며, 각 도체 사이에 상호 임피던스 및 어드미턴스가 존재한다. 즉, 각 상의 코어와 코어 사이에 존재하는 성분, 코어와 시스 사이에 존재하는 성분, 그리고 시스와 시스 사이에 존재하는 성분이다. 그리고 3상 단심 동축 케이블이 등 간격 3각 배열 및 수평 배열로 지중에 설치되어 있다고 고려하였다. 그림 2는 본 연구에서 대상으로 하는 지중 케이블의 구성 및 설치된 배치를 나타낸다.

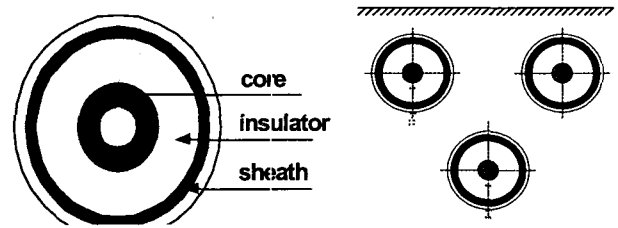


그림 2 케이블의 구성 및 설치 방법  
Fig. 2 Configuration and installation of the cable

2.3 분포정수회로 해석방법에 기초한 지중 케이블 고장점 표정 알고리즘

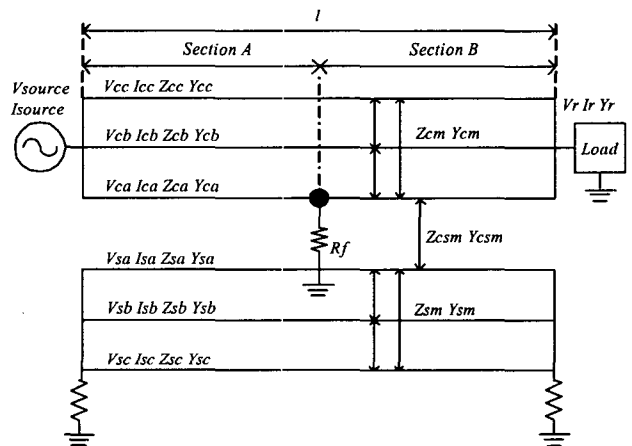


그림 3 케이블 시스템의 등가회로 모델  
Fig. 3 Equivalent circuit model of the cable system

그림 3은 지중 케이블 시스템에 고장 발생시 등가 회로 모델을 나타낸 것이다. 대상으로 한 고장종류는 코어와 시스가 함께 땅에 접지된 코어·시스 지락고장을 대상으로 하였다. 그림 3에서 고장 점을 중심으로 두 구간으로 나눌 수 있다. 먼저 'A 구간'은 전원 단으로부터 고장 점까지의 부분이다.

며, 'B 구간'은 고장 점으로부터 부하 앞 말단까지의 부분이다. 첫 번째로 분포정수회로 해석 방법을 응용하여 A 구간에 대해 해석을 수행한다. A 구간의 전압 및 전류 방정식은 식 (6), (7), (8), 그리고 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$-\begin{pmatrix} \partial V_{ca} / \partial x \\ \partial V_{cb} / \partial x \\ \partial V_{cc} / \partial x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{ca} & Z_{cm} & Z_{cm} \\ Z_{cm} & Z_{cb} & Z_{cm} \\ Z_{cm} & Z_{cm} & Z_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ca} \\ I_{cb} \\ I_{cc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_{csa} & Z_{csm} & Z_{csm} \\ Z_{csm} & Z_{csb} & Z_{csm} \\ Z_{csm} & Z_{csm} & Z_{csc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$-\begin{pmatrix} \partial V_{sa} / \partial x \\ \partial V_{sb} / \partial x \\ \partial V_{sc} / \partial x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{csa} & Z_{csm} & Z_{csm} \\ Z_{csm} & Z_{csb} & Z_{csm} \\ Z_{csm} & Z_{csm} & Z_{csc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ca} \\ I_{cb} \\ I_{cc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_{sa} & Z_{sm} & Z_{sm} \\ Z_{sm} & Z_{sb} & Z_{sm} \\ Z_{sm} & Z_{sm} & Z_{sc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$-\begin{pmatrix} \partial I_{ca} / \partial x \\ \partial I_{cb} / \partial x \\ \partial I_{cc} / \partial x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{ca} & Y_{cm} & Y_{cm} \\ Y_{cm} & Y_{cb} & Y_{cm} \\ Y_{cm} & Y_{cm} & Y_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Y_{csa} & Y_{csm} & Y_{csm} \\ Y_{csm} & Y_{csb} & Y_{csm} \\ Y_{csm} & Y_{csm} & Y_{csc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$-\begin{pmatrix} \partial I_{sa} / \partial x \\ \partial I_{sb} / \partial x \\ \partial I_{sc} / \partial x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{csa} & Y_{csm} & Y_{csm} \\ Y_{csm} & Y_{csb} & Y_{csm} \\ Y_{csm} & Y_{csm} & Y_{csc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Y_{sa} & Y_{sm} & Y_{sm} \\ Y_{sm} & Y_{sb} & Y_{sm} \\ Y_{sm} & Y_{sm} & Y_{sc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{pmatrix} \quad (9)$$

- 여기서,  
 $Z_{ca}, Z_{cb}, Z_{cc}$  : a, b, c 상 코어의 자기 임피던스  
 $Z_{csa}, Z_{csb}, Z_{csc}$  : 코어와 시스의 같은 a, b, c 상간 상호 임피던스  
 $Z_{csm}$  : 코어와 시스의 다른 a, b, c 상간 상호 임피던스  
 $Z_{sa}, Z_{sb}, Z_{sc}$  : a, b, c 상 시스의 자기 임피던스  
 $Y_{ca}, Y_{cb}, Y_{cc}$  : a, b, c 상 코어의 자기 어드미턴스  
 $Y_{csa}, Y_{csb}, Y_{csc}$  : 코어와 시스의 같은 a, b, c 상간 상호 어드미턴스  
 $Y_{csm}$  : 코어와 시스의 다른 a, b, c 상간 상호 어드미턴스  
 $Y_{sa}, Y_{sb}, Y_{sc}$  : a, b, c 상 시스의 자기 어드미턴스  
 $V_{ca}, V_{cb}, V_{cc}$  : a, b, c 상 코어 전압  
 $V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : a, b, c 상 시스 전압  
 $I_{ca}, I_{cb}, I_{cc}$  : a, b, c 상 코어 전류  
 $I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$  : a, b, c 상 시스 전류

식 (6)~(9)를 간단히 정리하면 식 (10), (11), (12), (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\partial V_{cabc} / \partial x = Z_{cabc} I_{cabc} + Z_{scabc} I_{sabc} \quad (10)$$

$$-\partial V_{sabc} / \partial x = Z_{scabc} I_{cabc} + Z_{sabc} I_{sabc} \quad (11)$$

$$-\partial I_{cabc} / \partial x = Y_{cabc} V_{cabc} + Y_{scabc} V_{sabc} \quad (12)$$

$$-\partial I_{sabc} / \partial x = Y_{scabc} V_{cabc} + Y_{sabc} V_{sabc} \quad (13)$$

식 (10)~(13)에 영상분, 정상분, 역상분으로 대칭변환을 적용한 후 매트릭스 형태로 정리하면 식 (14)와 같다.

$$-\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{L012} \\ \mathbf{Z}_{S012} \\ \mathbf{L}_{012} \\ \mathbf{I}_{c012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \mathbf{Z}_{c012} & \mathbf{Z}_{sc012} \\ 0 & 0 & \mathbf{Z}_{sc012} & \mathbf{Z}_{s012} \\ \mathbf{Y}_{c012} & \mathbf{Y}_{sc012} & 0 & 0 \\ \mathbf{Y}_{sc012} & \mathbf{Y}_{s012} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{c012} \\ \mathbf{V}_{s012} \\ \mathbf{I}_{c012} \\ \mathbf{I}_{s012} \end{bmatrix} \quad (14)$$

식 (14)은 영상, 정상, 그리고 역상분 회로를 위한 식이다.

영상분 시퀀스 회로를 위한 특성 근을  $a_0, \beta_0$ , 정상분 시퀀스 회로를 위한 특성 근을  $a_1, \beta_1$ , 그리고 역상분 시퀀스 회로를 위한 특성 근을  $a_2, \beta_2$  라고 정의하면, 분포정수회로 해석 방법에 의해서 A 구간의 전압, 전류 방정식을 구할 수 있다.

식 (15), (16), (17), (18)은 영상분 전압, 전류 식이며, 수식 각항의 아래첨자 0은 영상분을 표시하는 것이다.

$$V_{cA0}(x) = A_0 \cosh \alpha_0 x + B_0 \sinh \alpha_0 x + C_0 \cosh \beta_0 x + D_0 \sinh \beta_0 x \quad (15)$$

$$V_{sA0}(x) = A_0' \cosh \alpha_0 x + B_0' \sinh \alpha_0 x + C_0' \cosh \beta_0 x + D_0' \sinh \beta_0 x \quad (16)$$

$$I_{cA0}(x) = a_0 \cosh \alpha_0 x + b_0 \sinh \alpha_0 x + c_0 \cosh \beta_0 x + d_0 \sinh \beta_0 x \quad (17)$$

$$I_{sA0}(x) = e_0 \cosh \alpha_0 x + f_0 \sinh \alpha_0 x + g_0 \cosh \beta_0 x + h_0 \sinh \beta_0 x \quad (18)$$

정상분과 역상분에 관한 전압, 전류식은 식(15)~(18)과 같이 나타낼 수 있으며, 수식 각항의 아래첨자만 1과 2로 바뀌게 된다. 위와 같이 A 구간에 대한 코어와 시스의 전압, 전류 방정식을 유도할 수 있으며, 미지수는 영상분 16개, 정상분 16개, 그리고 역상분 16개이다.

다음으로 A 구간에 대한 쌍곡선 함수의 해를 구하기 위해서는 48개의 계수를 구해야 한다. 그런데 이중 케이블 시뮬레이션 프로그램으로부터 주어지는 값은 전원 측 각 시퀀스 성분의 전압과 전류이므로 6개이며, B 구간을 포함한 케이블 계통의 1선 지락고장시 고장조건은 전원 측 전압, 전류로 표현되는 24개이다. 따라서 A 구간을 해석하기 위해서는 64개의 계수를 12개로 줄여야만 한다. 본 논문에서는 계수를 줄이기 위하여 분포정수회로 해석으로 구해진 전압, 전류의 미분방정식(식 (10)~(13))과 쌍곡선 함수 변환을 통해 얻은 각 시퀀스 방정식(식 (15)~(18))의 관계를 이용하여 12개로 정리하였다. 쌍곡선 함수를 미분방정식에 대입하고 양변을 정리하여 영상분은  $A_0, B_0, C_0, D_0$ 에 관한 식으로, 정상분은  $A_1, B_1, C_1, D_1$ 에 관한 식으로, 그리고 역상분은  $A_2, B_2, C_2, D_2$ 에 관한 식으로 정리하였다.

위 과정을 통하여 48개의 계수를 12개로 축약하였으며, 각 계수를 정리하면 표 1과 같다.

표 1 각 시퀀스 함수의 계수  
 Table 1 Coefficients of each sequence equation

영상분	정상분	역상분
$A_0' = C_{10} A_0$	$A_1' = C_{11} A_1$	$A_2' = C_{12} A_2$
$B_0' = C_{10} B_0$	$B_1' = C_{11} B_1$	$B_2' = C_{12} B_2$
$C_0' = C_{20} C_0$	$C_1' = C_{21} C_1$	$C_2' = C_{22} C_2$
$D_0' = C_{20} D_0$	$D_1' = C_{21} D_1$	$D_2' = C_{22} D_2$
$a_0 = C_{30} B_0$	$a_1 = C_{31} B_1$	$a_2 = C_{32} B_2$
$b_0 = C_{30} A_0$	$b_1 = C_{31} A_1$	$b_2 = C_{32} A_2$
$c_0 = C_{40} D_0$	$c_1 = C_{41} D_1$	$c_2 = C_{42} D_2$
$d_0 = C_{40} C_0$	$d_1 = C_{41} C_1$	$d_2 = C_{42} C_2$
$e_0 = C_{50} B_0$	$e_1 = C_{51} B_1$	$e_2 = C_{52} B_2$
$f_0 = C_{50} A_0$	$f_1 = C_{51} A_1$	$f_2 = C_{52} A_2$
$g_0 = C_{60} D_0$	$g_1 = C_{61} D_1$	$g_2 = C_{62} D_2$
$h_0 = C_{60} C_0$	$h_1 = C_{61} C_1$	$h_2 = C_{62} C_2$

그리고 위 관계를 대입하여 A 구간의 전압, 전류 방정식을 매트릭스 형태로 나타내면 다음식과 같다.

$$\begin{pmatrix} V_{c0}(x) \\ V_{s0}(x) \\ I_{c0}(x) \\ I_{s0}(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh\alpha_0 x & \sinh\alpha_0 x & \cosh\beta_0 x & \sinh\beta_0 x \\ C_{10} \cosh\alpha_0 x & C_{10} \sinh\alpha_0 x & C_{20} \cosh\beta_0 x & C_{20} \sinh\beta_0 x \\ C_{30} \sinh\alpha_0 x & C_{30} \cosh\alpha_0 x & C_{40} \sinh\beta_0 x & C_{40} \cosh\beta_0 x \\ C_{50} \sinh\alpha_0 x & C_{50} \cosh\alpha_0 x & C_{60} \sinh\beta_0 x & C_{60} \cosh\beta_0 x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \\ C_0 \\ D_0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{pmatrix} V_{c1}(x) \\ V_{s1}(x) \\ I_{c1}(x) \\ I_{s1}(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh\alpha_1 x & \sinh\alpha_1 x & \cosh\beta_1 x & \sinh\beta_1 x \\ C_{11} \cosh\alpha_1 x & C_{11} \sinh\alpha_1 x & C_{21} \cosh\beta_1 x & C_{21} \sinh\beta_1 x \\ C_{31} \sinh\alpha_1 x & C_{31} \cosh\alpha_1 x & C_{41} \sinh\beta_1 x & C_{41} \cosh\beta_1 x \\ C_{51} \sinh\alpha_1 x & C_{51} \cosh\alpha_1 x & C_{61} \sinh\beta_1 x & C_{61} \cosh\beta_1 x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ D_1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{pmatrix} V_{c2}(x) \\ V_{s2}(x) \\ I_{c2}(x) \\ I_{s2}(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh\alpha_2 x & \sinh\alpha_2 x & \cosh\beta_2 x & \sinh\beta_2 x \\ C_{12} \cosh\alpha_2 x & C_{12} \sinh\alpha_2 x & C_{22} \cosh\beta_2 x & C_{22} \sinh\beta_2 x \\ C_{32} \sinh\alpha_2 x & C_{32} \cosh\alpha_2 x & C_{42} \sinh\beta_2 x & C_{42} \cosh\beta_2 x \\ C_{52} \sinh\alpha_2 x & C_{52} \cosh\alpha_2 x & C_{62} \sinh\beta_2 x & C_{62} \cosh\beta_2 x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \\ C_2 \\ D_2 \end{pmatrix} \quad (21)$$

A 구간 해석 방법을 동일하게 적용하면, B 구간에 대해서도 쌍곡선 함수 형태의 전압, 전류 방정식을 얻을 수 있다. B 구간의 전압, 전류 방정식은 식 (19)~(21)과 같이 나타낼 수 있으며, A, B, C, D 4개의 미지수 대신 E, F, G, H 4개의 미지수로 표현된다.

$A_0, B_0, C_0, D_0, E_0, F_0, G_0, H_0$ 는 영상분 미지수 파라미터이고,  $A_1, B_1, C_1, D_1, E_1, F_1, G_1, H_1$ 는 정상분 미지수 파라미터이고, 그리고  $A_2, B_2, C_2, D_2, E_2, F_2, G_2, H_2$ 는 역상분 미지수 파라미터이다. 계수 축약과정에서 계산된 각 시퀀스 성분 상수는 표 2와 같다.

표 2 쌍곡선 함수의 각 상수

Table2 Constants of the hyperbolic equations

영상분	$C_{10} = \frac{\alpha_0^2 - Z_{c0} Y_{c0} - Z_{cs0} Y_{cs0}}{Z_{c0} Y_{cs0} + Z_{cs0} Y_{s0}}, C_{40} = -\frac{Y_{c0} + Y_{cs0} C_{20}}{\beta_0}$ $C_{20} = \frac{\beta_0^2 - Z_{c0} Y_{c0} - Z_{cs0} Y_{cs0}}{Z_{c0} Y_{cs0} + Z_{cs0} Y_{s0}}, C_{50} = -\frac{Y_{cs0} + Y_{s0} C_{10}}{\alpha_0}$ $C_{30} = -\frac{Y_{c0} + Y_{cs0} C_{10}}{\alpha_0}, C_{60} = -\frac{Y_{cs0} + Y_{s0} C_{20}}{\beta_0}$
정상분	$C_{11} = \frac{\alpha_1^2 - Z_{c1} Y_{c1} - Z_{cs1} Y_{cs1}}{Z_{c1} Y_{cs1} + Z_{cs1} Y_{s1}}, C_{41} = -\frac{Y_{c1} + Y_{cs1} C_{21}}{\beta_1}$ $C_{21} = \frac{\beta_1^2 - Z_{c1} Y_{c1} - Z_{cs1} Y_{cs1}}{Z_{c1} Y_{cs1} + Z_{cs1} Y_{s1}}, C_{51} = -\frac{Y_{cs1} + Y_{s1} C_{11}}{\alpha_1}$ $C_{31} = -\frac{Y_{c1} + Y_{cs1} C_{11}}{\alpha_1}, C_{61} = -\frac{Y_{cs1} + Y_{s1} C_{21}}{\beta_1}$
역상분	$C_{12} = \frac{\alpha_2^2 - Z_{c2} Y_{c2} - Z_{cs2} Y_{cs2}}{Z_{c2} Y_{cs2} + Z_{cs2} Y_{s2}}, C_{42} = -\frac{Y_{c2} + Y_{cs2} C_{22}}{\beta_2}$ $C_{22} = \frac{\beta_2^2 - Z_{c2} Y_{c2} - Z_{cs2} Y_{cs2}}{Z_{c2} Y_{cs2} + Z_{cs2} Y_{s2}}, C_{52} = -\frac{Y_{cs2} + Y_{s2} C_{12}}{\alpha_2}$ $C_{32} = -\frac{Y_{c2} + Y_{cs2} C_{12}}{\alpha_2}, C_{62} = -\frac{Y_{cs2} + Y_{s2} C_{22}}{\beta_2}$

고장거리를 p라고 가정하면, 케이블의 총 길이는 l이고, A 구간의 말단 지점인 x=p이고 B 구간의 시작점인 y=0이다.

## 2.4 고장 조건 분석

케이블에 다양한 고장이 발생할 수 있지만, 가장 대표적인 고장인 코어·시스 지락고장을 고려하면 그림 4와같이 나타낼 수 있다.

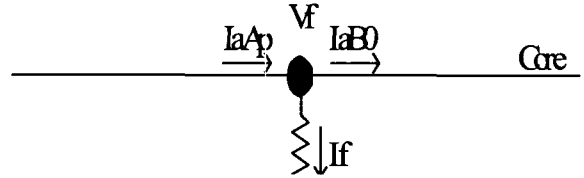


그림 4 a상 코어·시스 지락 고장

Fig. 4 Core-to-sheath to ground fault in phase a

2.3절에서 구한 24개의 미지수를 구하기 위하여, 고장 시스템 전체의 조건을 분석한다. 분석한 조건은 다음과 같다.

(a) 각 시퀀스에서 성립하는 조건들

▷ 다음 조건들은 전원 단에서 성립하는 것이다.

i) Core voltage is equal to source voltage.

ii) Core current is equal to source current.

iii) If the grounding resistance is zero, the sheath voltage is equal to zero. Otherwise, the sheath voltage is equal to three times of the multiplication of the grounding resistance and the sheath current.

▷ 다음 조건은 고장 점에서 성립하는 조건들이다.

iv) Core voltage of section A is equal to that of section B.

▷ 다음 조건들은 부하 단에서 성립하는 조건들이다.

v) Core current is equal to the multiplication of the load admittance and the core voltage.

vi) If the grounding resistance is zero, the sheath voltage is equal to zero. Otherwise, the sheath voltage is equal to three times of the multiplication of the grounding resistance and the sheath current.

(b) 각 상에서 성립하는 조건들

▷ 다음 조건들은 고장 점에서 성립하는 조건들이다.

i) In the faulted phase a, the sheath voltage of section A is equal to zero.

ii) The sheath voltage of the faulted phase a in the section B is equal to zero.

iii) In the non-faulted phase b, core current of section A is equal to that of section B.

iv) In the non-faulted phase c, core current of section A is equal to that of section B.

v) In the non-faulted phase b, sheath current of section A is equal to that of section B.

vi) In the non-faulted phase c, sheath current of section A is equal to that of section B.

위 모든 조건을 정리하면 표 3과 같이 24개의 수식으로 나타낼 수 있다.

표 3 코어·시스 지락 고장시 고장 조건

Table3 Fault conditions of a core to sheath to ground fault

시퀀스 조건 (18개)		
$V_{cA0}(0) = V_{s0}$	$V_{cA1}(0) = V_{s1}$	$V_{cA2}(0) = V_{s2}$
$I_{cA0}(0) = I_{s0}$	$I_{cA1}(0) = I_{s1}$	$I_{cA2}(0) = I_{s2}$
$V_{sA0}(0) = 0$	$V_{sA1}(0) = 0$	$V_{sA2}(0) = 0$
$V_{cA0}(p) = V_{cB0}(0)$	$V_{cA1}(p) = V_{cB1}(0)$	$V_{cA2}(p) = V_{cB2}(0)$
$I_{cB0}(l-p) = Y_{r0}V_{cB0}(l-p)$	$I_{cB1}(l-p) = Y_{r1}V_{cB1}(l-p)$	$I_{cB2}(l-p) = Y_{r2}V_{cB2}(l-p)$
$V_{sB0}(l-p) = 0$	$V_{sB1}(l-p) = 0$	$V_{sB2}(l-p) = 0$
상조건 (6개)		
$V_{sA0}(p) = 0$	$V_{sB0}(0) = 0$	$I_{cAb}(p) = I_{cBb}(0)$
$I_{cAc}(p) = I_{cBc}(0)$	$I_{sAb}(p) = I_{sBb}(0)$	$I_{sAc}(p) = I_{sBc}(0)$

그리고 위 24개의 조건을 이용하면, 모든 미지수 파라미터를 구하기 위한 24개의 방정식을 세울 수 있고, 그 방정식들은 고장거리  $p$ 에 관한 식으로 표현된다.

2.5 뉴턴-랩슨 방법에 의한 고장거리 계산

그림 4에서 고장점의 전압은 고장전류와 고장저항의 곱으로 구할 수 있으며 다음식과 같다.

$$V_f = I_f \times R_f \tag{22}$$

식 (22)을 지중 케이블의 고장 상에 적용하면 다음과 같은  $p$ 와  $R_f$ 에 관한 함수를 얻을 수 있다.

$$f(p, R_f) = Va_{Ap} - (Ia_{Ap} - Ia_{B0})R_f = 0 \tag{23}$$

여기서,  $Va_{Ap} = V_{cA0}(p) + V_{cA1}(p) + V_{cA2}(p)$

$$Ia_{Ap} = I_{cA0}(p) + I_{cA1}(p) + I_{cA2}(p)$$

$$Ia_{B0} = I_{cB0}(0) + I_{cB1}(0) + I_{cB2}(0)$$

그리고 식 (23)의 해를 구하기 위하여 실수부와 허수부로 분리하면 다음식과 같다.

$$f(p, R_f) = f_r(p, R_f) + jf_i(p, R_f) = 0 \tag{24}$$

위 식은 실수부와 허수부가 각각 0을 만족해야 하는 식이다.

$$f_r(p, R_f) = 0, f_i(p, R_f) = 0 \tag{25}$$

마지막으로 고장거리  $p$ 를 구하기 위하여 뉴턴-랩슨 반복 방법을 적용하여 고장거리에 대한 수렴치가 0.0001이하 일 때까지 반복한다.

3. 사례 연구

3.1 지중 케이블 시스템 모델

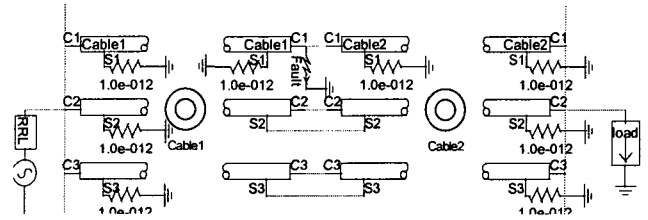
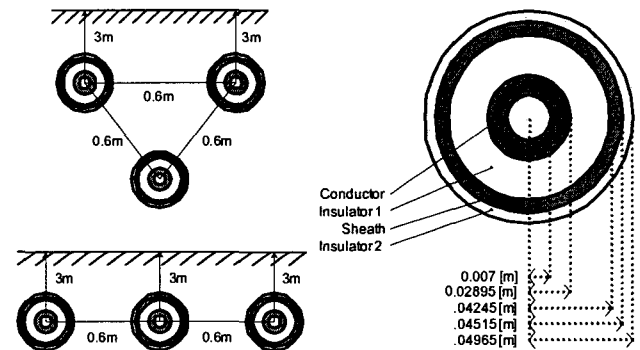


그림5 PSCAD/EMTDC를 이용한 케이블 모의 시스템  
Fig. 5 Simulation model system in PSCAD/EMTDC

케이블의 타입은 코어와 시스로 구성된 단심 동축 케이블이며(2000mm<sup>2</sup>, kraft) [6], 지중 케이블 계통의 전압은 154[kV]이다. 케이블의 총 길이는 4km이며, 대상 케이블의 임피던스 및 어드미턴스는 PSCAD/EMTDC Ver.4.1 서브루틴을 이용하여 얻었다. 그림 6은 3상 단심 동축 케이블의 단면과 배치를 보여주며, 이러한 형태의 케이블이 지중 3[m] 아래 매설되어서 운전되고 있다. 케이블의 설치 배열은 등 간격 삼각 구조와 수평배열 두 가지를 고려하였다.



여기서, 코어의 저항률: 1.7241E-8[Ωm], 비 투자율: 1.0  
절연체의 비 투자율: 1.0, 비 유전율: 3.4  
시스의 저항률: 2.84 E-8[Ωm], 비 투자율: 1.0  
외피의 비 투자율: 1.0, 비 투자율: 3.5

그림6 3상 단심 동축 케이블의 단면 및 배열

Fig. 6 Disposition and cross-section of 3-phase SC coaxial cables

3.2 모의 결과

케이블의 고장 종류로는 코어·시스 지락고장을 상정하였으며, 고장상은 A 상이다. 그림 6과 같이 두 가지의 케이블 배열에 대하여 고장 거리를 0.1[pu]부터 0.9[pu]까지 0.1[pu]씩 증가시키며 9가지로 고장거리를 달리하고, 고장 저항을 0.1[Ω], 10[Ω], 30[Ω], 50[Ω]등 4가지로 달리하여 총 36가지의 경우를 PSCAD/EMTDC로 모의 하였다. 각각의 경우 전원 단에서 코어 전압과 전류를 취득하고 한 주기 데이터 원

도우를 갖는 DFT(Discrete Fourier Transform)를 이용하여 페이지를 구하였다. 고장거리제안 오차는 다음 식으로 산출하였다.

$$Error(\%) = \frac{|\text{estimated distance} - \text{actual distance}|}{\text{total length of cable}} \times 100 \quad (26)$$

그림 7은 케이블의 배열이 등 간격 삼각배열인 경우에 각 고장 지점에서 고장저항을 변화시키며 고장거리를 계산한 결과 각 지점에서의 추정 오차를 나타낸다. 고장 저항이 50[Ω]으로 큰 경우에도 최대 오차가 0.6[%] 이내로 제안한 알고리즘을 이용한 경우 정확하게 고장거리를 추정함을 알 수 있다.

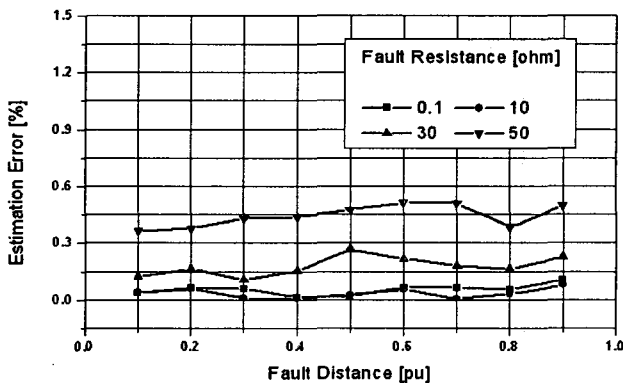


그림7 삼각배열의 경우 고장점 추정 오차 [%]

Fig. 7 Error [%] of the fault location of triangle disposition

그림 8은 케이블의 배열이 등 간격 수평배열인 경우에 각 고장 지점에서 고장저항을 변화시키며 고장거리 계산을 수행한 결과를 나타낸다. 고장 저항이 30[Ω] 이하인 경우 최대 고장점 추정 오차는 0.8[%]이하를 나타냈으며, 고장저항이 큰 50[Ω]인 경우에도 최대 고장점 추정 오차가 0.9[%] 이내로 지중 케이블 각 상의 상호임피던스가 평형하지 않은 배열에서도 제안한 알고리즘을 이용한 경우 정확하게 고장거리를 추정함을 알 수 있었다. 결과적으로 제안한 방법은 지중 케이블 시스템 고장점 표정에 있어서 케이블의 배열 및 고장저항이 변하는 경우에도 정확하게 고장거리를 추정함을 알 수 있다.

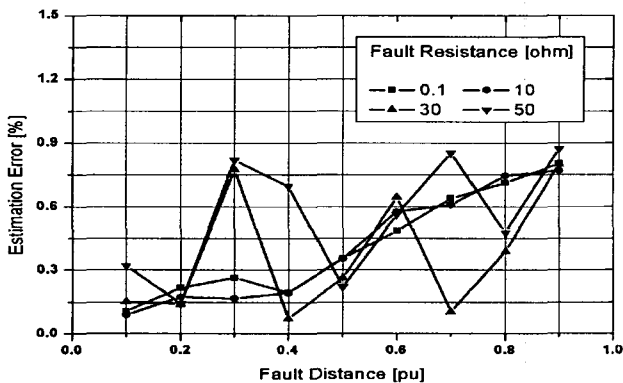


그림8 수평배열의 경우 고장점 추정 오차 [%]

Fig. 8 Error [%] of the fault location in level disposition

#### 4. 결 론

본 연구는 분포정수 회로 해석에 기초한 새로운 지중 케이블 1선지락 고장거리 계산 알고리즘을 제안한다. PSCAD/EMTDC Ver.4.1 서브루틴을 이용하여 케이블 파라미터를 얻었으며, 두 가지 케이블의 배열에 대하여 다양한 고장을 모의하여 제안한 방법을 검증한 결과 0.9[%] 이내의 정확한 결과를 얻었다. 이것은 지중 케이블 계통을 해석할 때 분포정수회로 해석 방법을 적용하는 것이 정확한 해석 방법이며, 고장 발생 지점을 추정하는데 있어서도 더 정확하게 할 수 있다는 것을 의미하는 것이다. 앞으로의 연구방향은 지중 케이블과 가공송전선로가 복합되어있는 복합선로를 고려하는 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 2004년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력기술기초연구에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] E.C. Bascom, "Computerized Underground Cable Fault Location Expertise," Proceedings of the 1994 IEEE Power Engineering Society, pp. 376-382, April 1994.
- [2] J. H. Sun, "Fault Location of Underground Cables Using Travelling Wave," Trans. KIEE, pp. 1972-1974, July 2000.
- [3] J. Moshtagh, R. K. Aggarwal, "A new approach to fault location in a single core underground cable system using combined fuzzy logic & wavelet analysis," The Eighth IEE International Conference on Developments In Power System Protection, pp. 228-231, April 2004.
- [4] K. H. Kim, J. B. Lee, Y. H. Jeong, "Fault Location Using Neuro\_Fuzzy for the Line-to-Ground Fault in Combined Transmission Lines with Underground Power Cables", Trans. KIEE, pp. 602-609, October 2003.
- [5] Seung-Ju Jeong, "Circuit Theory," Dong-il Press, pp. 302-316, January 1986.
- [6] "EMTP course book", Korea Electrical Engineering & Science Research Institute, Korean EMTP Committee, 2002

저 자 소 개

**최 면 승(崔勉松)**



1967년 4월생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 Pennsylvania State Univ. 방문 연구원. 1992년 기초전력공학 공동연구소 전임연구원. 현재 명지대학교 공대 전기정보제어공학부 부교수.

Tel : 031-336-6367

Fax : 031-330-6816

E-mail : mschoi@mju.ac.kr

**양 하(楊霞)**



1979년 중국생. 2002년 중국 동북대학교 자동제어과 졸업, 2004년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

Tel : 031-336-3290

Fax : 031-330-6816

E-mail : yangxia9@hotmail.com

**이 덕 수(李德洙)**



1977년 11월생. 2000년 명지대 공대 전기공학과 졸업, 2002년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(석사). P&C Tech. 연구원(02. 3~ 04. 3). 현재 명지대학교 차세대전력기술연구센터 전임연구원

Tel : 031-333-1542

Fax : 031-330-6816

E-mail : dslee@mju.ac.kr