

# 실계통 345kV 지중송전선 대칭좌표 임피던스의 해석

## Analysis of Sequence Impedances of 345kV Cable Transmission Systems

최 중 기<sup>†</sup> · 안 용 호<sup>\*</sup> · 윤 용 범<sup>\*\*</sup> · 오 세 일<sup>\*\*\*</sup> · 광 양 호<sup>§</sup> · 이 명 희<sup>§§</sup>

(Jong-Kee Choi · Yong-Ho Ahn · Yong-Beum Yoon · Sei-ill Oh · Yang-Ho Kwak · Myoung-Hee Lee)

**Abstract** - Power system fault analysis is commonly based on well-known symmetrical component method, which describes power system elements by positive, negative and zero sequence impedance. In case of balanced fault, such as three phase short circuit, transmission line can be represented by positive sequence impedance only. The majority of fault in transmission lines, however, is unbalanced fault, such as line-to-ground faults, so that both positive and zero sequence impedance is required for fault analysis. When unbalanced fault occurs, zero sequence current flows through earth and skywires in overhead transmission systems and through cable sheaths and earth in cable transmission systems. Since zero sequence current distribution between cable sheath and earth is dependent on both sheath bondings and grounding configurations, care must be taken to calculate zero sequence impedance of underground cable transmission lines. In this paper, conventional and EMTP-based sequence impedance calculation methods were described and applied to 345kV cable transmission systems (4 circuit, OF 2000mm<sup>2</sup>). Calculation results showed that detailed circuit analysis is desirable to avoid possible errors of sequence impedance calculation resulted from various configuration of cable sheath bonding and grounding in underground cable transmission systems.

**Key Words** : Zero sequence impedance, Cable transmission systems, Sheath bonding, Grounding

### 1. 서 론

전력계통 고장해석은 대부분 계통요소들을 정상, 역상 및 영상임피던스로 표현하는 대칭좌표법에 기반하고 있기 때문에 대칭요소 임피던스를 정확히 아는 것이 매우 중요하다. 특히 선로고장의 대부분을 차지하는 지락사고의 해석에는 영상임피던스가 중요한 변수가 된다. 일반적으로 송전선로의 임피던스는 계산값을 사용하는 경우가 많으며 PSS/E 등과 같은 대부분의 계통해석 프로그램들은 가공송전선 대칭요소 임피던스 계산기능은 제공하고 있으나 지중송전선용 계산프로그램은 없다. 이런 이유로 국내에서는 지중선로의 대칭요소 임피던스 계산알고리즘과 프로그램을 자체 개발하여 현재까지 사용하고 있다[1]. 한편 정확한 선로임피던스값을 구하기 위해서는 해당선로를 휴전시키고 선로 임피던스를 실측하여야 한다. 이에 국내에서도 '05년부터 상용 측정장비[2]를 도입하여 선로정수를 측정하기 시작하였는데 가공송전선은 선로임피던스 측정값과 계산값에 큰 차이가 없는 것으로 확인되었으나 지중송전선에서는 계산-실측치의 오차가 큰 경우가 많고 특히 영상임피던스의 오차가 큰 경우가

다수 발생하였다[3]. 이에 따라 지중송전선에서 선로임피던스의 계산-실측치의 오차발생 원인을 규명하고 기존 계산모델을 개선할 필요성이 대두되었다. 본 논문에서는 기존의 행렬연산에 기초한 대칭요소 임피던스 계산방법 및 측정원리 재검토를 통해 현행 계산기법의 문제점을 파악하고, 실계통 지중송전선을 상세히 모델링할 수 있는 EMTP(Electro-Magnetic Transient Program)를 이용하여 대칭요소 임피던스를 계산하는 방법을 제시하고자 한다. 이를 위해 약 17km에 달하는 345kV 실계통의 OF케이블 4회선 지중선로를 단계별로 상세히 모델링하였으며, 해당 선로의 임피던스 실측값과 EMTP 계산값을 비교·검증하였다. 이 과정을 통해 기존 계산방법의 누락요소들을 식별하였고 각 회선별로 실측치와 잘 일치하는 EMTP 모델을 찾음으로써 영상전류 경로가 가공송전선에 비해 상대적으로 복잡한 지중송전선에서는 기존 행렬연산 기반이 아닌 상세 회로해석 기반의 대칭요소 임피던스 계산이 필요함을 확인하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 대칭요소 임피던스의 계산

대칭요소 임피던스는 송전선로의 회로모델 임피던스를 여러 단계에 걸쳐 가공하여 도체간 커플링이 없는, 즉 대각요소 외의 나머지는 0인 대각행렬 임피던스로 변환하는 과정을 통해 구하게 된다. 본 절에서는 가공 및 지중송전선에서 대칭요소 임피던스를 계산하는 절차를 기술하고 재검토함으로써 실계통에서 누락되는 요인이 있는지를 검토하였다.

<sup>†</sup> Corresponding Author : KEPCO Research Institute, Senior Researcher

E-mail : jkchoi@kepcoco.kr

\* KEPCO Research Institute, Principal Researcher

\*\* KEPCO Research Institute, Chief Researcher

\*\*\* KEPCO Facility Diagnosis Center, Senior Manager

§ KEPCO Transmission Operation Department, Senior Manager

§§ KEPCO Transmission Operation Department, General Manager

Received : April 8, 2013; Accepted : June 25, 2013

2.1.1 가공송전선

가공송전선의 임피던스 행렬을 이용한 대칭요소 임피던스 계산절차는 식 1~6에 기술하였다. 식 1은 가공송전선의 임피던스 행렬을 표시한 것인데 3상 도체와 가공지선으로 구성된 4x4 크기의 행렬이다.

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{an} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bn} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cn} \\ z_{na} & z_{nb} & z_{nc} & z_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + z_{nn} \begin{pmatrix} i_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$v_n = (z_{na} \ z_{nb} \ z_{nc}) \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + z_{nn} i_n \quad (3)$$

(단,  $v_k$  : k상 전압,  $z_{ij}$  : ij상간 상호임피던스,  $z_{ii}$  : i상 자기임피던스,  $i_k$  : k상 전류)

식 1은 식 2와 식 3으로 분할하여 표시할 수 있으며, 식 3에서 접지된 가공지선의 전압( $v_n$ )을 0으로 가정하고 가공지선 전류( $i_n$ )에 대해 정리하면 식 4로 표현된다.

$$i_n = -\frac{1}{z_{nn}} (z_{na} \ z_{nb} \ z_{nc}) \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (4)$$

(단,  $v_n = 0$ )

식 4를 다시 식 2에 대입하면 식 5와 같이 3x3크기의 행렬로 축약되며, 대칭요소 임피던스는 식 6과 같이 변환행렬 연산을 통해 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} - \frac{1}{z_{nn}} (z_{na} \ z_{nb} \ z_{nc}) \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$= \begin{pmatrix} z'_{aa} & z'_{ab} & z'_{ac} \\ z'_{ba} & z'_{bb} & z'_{bc} \\ z'_{ca} & z'_{cb} & z'_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} z_0 & 0 & 0 \\ 0 & z_1 & 0 \\ 0 & 0 & z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} z_{aa}' & z_{ab}' & z_{ac}' \\ z_{ba}' & z_{bb}' & z_{bc}' \\ z_{ca}' & z_{cb}' & z_{cc}' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

(단,  $z_0$  : 영상임피던스,  $z_1$  : 정상임피던스,  $z_2$  : 역상임피던스,  $a : e^{j120} = 1/2 + j\sqrt{3}/2$ )

2.1.2 지중송전선

가공송전선의 경우는 영상전류가 대지와 가공지선을 통해서만 귀환하나 지중송전선은 대지와 케이블 시스(sheath)가 영상전류의 주요한 귀로가 된다. 특히 지중송전선에서는 선로임피던스의 평형을 유지하고 시스의 유도전압 또는 전류를 저감하기 위해 케이블 접속점에서 3상 케이블의 시스를 서로 연가하는 크로스본딩(cross-bonding)을 하고 있어 가공송전선보다 영상임피던스 계산이 다소 복잡해진다. 참고로 국내외 관련문헌 조사결과, 지중케이블 자체의 임피던스 계산에 대한 연구사례들은 있었으나[4,5], 지중송전선의 대칭

요소 임피던스 계산방법을 상세히 기술한 문헌들은 찾아보기 힘들었다. 지중송전선은 그림 1에서 보인 것처럼 각 케이블의 시스에 유도되는 전압을 상쇄하기 위하여 일정 구간마다 시스를 연가하는 크로스본딩을 시행하며 각 케이블마다 시스가 있기 때문에 임피던스 행렬의 크기는 그림 2에서 보인 것처럼 6x6이 된다.

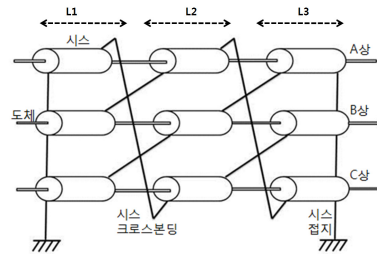


그림 1 케이블 시스의 크로스본딩  
Fig. 1 Cross-bondings of cable sheaths

그림 2는 그림 1에서 보인 지중송전선의 케이블 접속점에서 시행하는 크로스본딩을 고려하기 위한 임피던스 행렬연산을 그림으로 표현한 것이다. 각 소구간의 길이를  $L_1 \sim L_3$  라고 하면 전체 구간의 임피던스는 식 7과 같이 표현할 수 있다.

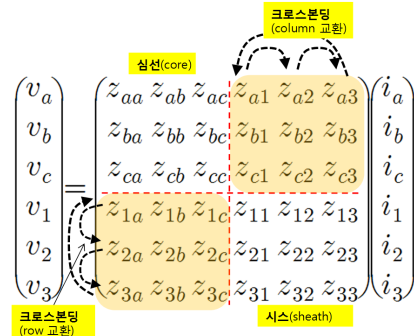


그림 2 크로스본딩을 위한 임피던스 행렬연산  
Fig. 2 Impedance matrix operations for cross-bondings

식 7의 좌항 임피던스 행렬은 식 8과 식 9로 분할하여 표현할 수 있는데, 접지된 각 케이블 시스의 전압( $v_1, v_2, v_3$ )을 0으로 가정하면 시스 전류( $i_1, i_2, i_3$ )는 식 10으로 표현된다.

$$\begin{pmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{a1} & Z_{a2} & Z_{a3} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{b1} & Z_{b2} & Z_{b3} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{c1} & Z_{c2} & Z_{c3} \\ Z_{1a} & Z_{1b} & Z_{1c} & Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{2a} & Z_{2b} & Z_{2c} & Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{3a} & Z_{3b} & Z_{3c} & Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{pmatrix} = L_1 \begin{pmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{a1} & z_{a2} & z_{a3} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{b1} & z_{b2} & z_{b3} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{c1} & z_{c2} & z_{c3} \\ z_{1a} & z_{1b} & z_{1c} & z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{2a} & z_{2b} & z_{2c} & z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{3a} & z_{3b} & z_{3c} & z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{pmatrix} + L_2 \begin{pmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{a1} & z_{a2} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{b1} & z_{b2} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{c1} & z_{c2} \\ z_{3a} & z_{3b} & z_{3c} & z_{31} & z_{32} \\ z_{2a} & z_{2b} & z_{2c} & z_{21} & z_{22} \end{pmatrix} + L_3 \begin{pmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{a1} & z_{a2} & z_{a3} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{b1} & z_{b2} & z_{b3} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{c1} & z_{c2} & z_{c3} \\ z_{2a} & z_{2b} & z_{2c} & z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{3a} & z_{3b} & z_{3c} & z_{31} & z_{32} & z_{33} \\ z_{1a} & z_{1b} & z_{1c} & z_{11} & z_{12} & z_{13} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_{a1} & Z_{a2} & Z_{a3} \\ Z_{b1} & Z_{b2} & Z_{b3} \\ Z_{c1} & Z_{c2} & Z_{c3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{1a} & Z_{1b} & Z_{1c} \\ Z_{2a} & Z_{2b} & Z_{2c} \\ Z_{3a} & Z_{3b} & Z_{3c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Z_{1a} & Z_{1b} & Z_{1c} \\ Z_{2a} & Z_{2b} & Z_{2c} \\ Z_{3a} & Z_{3b} & Z_{3c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (10)$$

(단,  $v_k$  : k상 전압 ( $k=a\sim c$ :심선,  $k=1\sim 3$ :시스),  
 $z_{ij}$  : ij상간 상호임피던스,  $z_{ii}$  : i상 자기임피던스,  
 $i_k$  : k상 전류,  $L_k$  : k번째 소구간 길이)

식 10을 다시 식 8에 대입하고 도체전압( $v_a, v_b, v_c$ )에 대해 정리하면 식 11이 된다. 이렇게 구해진 임피던스 행렬은 가공송전선과 마찬가지로 식 6의 변환행렬 연산을 통해 대칭요소 임피던스로 변환된다.

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_{a1} & Z_{a2} & Z_{a3} \\ Z_{b1} & Z_{b2} & Z_{b3} \\ Z_{c1} & Z_{c2} & Z_{c3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Z_{1a} & Z_{1b} & Z_{1c} \\ Z_{2a} & Z_{2b} & Z_{2c} \\ Z_{3a} & Z_{3b} & Z_{3c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (11)$$

(단,  $v_k$  : k상 전압 ( $k=a\sim c$ :심선,  $k=1\sim 3$ :시스),  
 $z_{ij}$  : ij상간 상호임피던스,  $z_{ii}$  : i상 자기임피던스,  
 $i_k$  : k상 전류,  $L_k$  : k번째 소구간 길이)

지금까지 기술한 계산과정을 보면 케이블 시스는 완전히 접지되어 있으며 따라서 시스의 전압은 zero이며, 전 구간에 걸쳐 시스가 연속되어 있음을 전제를 하고 있다. 이러한 계산방법으로는 크로스분딩 접속점간 거리의 불평형은 고려가 가능하지만 크로스 분딩이 없는 절연접속함, 즉 시스의 연속 경로가 끊어져 있거나 접지저항이 0이 아닌 접지점을 통해 귀로하는 전류는 고려할 수 없음을 보여주는 것이다.

표 1은 이상에 기술한 계산방법을 이용하여 본 논문의 검토대상인 345kV 4회선 지중송전선의 정상 및 영상임피던스를 계산한 결과이다[6].

표 1 선로정수 계산결과

Table 1 Sequence impedance calculation result

회선	정상 임피던스 ( $Z_1$ )				영상 임피던스 ( $Z_0$ )			
	극좌표		직각좌표		극좌표		직각좌표	
	$Z_1(\Omega)$	위상( $^\circ$ )	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$Z_0(\Omega)$	위상( $^\circ$ )	$R_0(\Omega)$	$X_0(\Omega)$
#1	1.837	83.1	0.2202	1.8235	1.278	54.0	0.7510	1.0343
#2	1.837	83.1	0.2202	1.8235	1.278	54.0	0.7510	1.0343
#3	1.870	83.1	0.2238	1.8568	1.278	53.2	0.7653	1.0236
#4	1.848	83.2	0.2190	1.8354	1.281	54.4	0.7451	1.0415

## 2.2 대칭요소 임피던스의 측정

### 2.2.1 측정 원리

선로정수 계산의 전제조건은 실제통과는 차이가 있다. 예를 들어 중성선과 시스는 접지되었더라도 접지저항은 0  $\Omega$ 이 아니므로 영(零)전위가 아니며, 상도체나 시스도 완벽히 연결되어 있지 않는 등 실제 선로조건과 차이가 있을 수 밖에 없다. 따라서 고장계산이나 거리계전기 동작의 정확성을 높

이기 위해서 선로정수를 실측하는 것이 필요할 수 있다[7]. 선로정수 측정은 한쪽 변전소 상도체를 단락시켜 접지한 후 다른 쪽 변전소에서 상도체간 또는 상도체와 접지간에 전원을 인가하면서 흐르는 전류를 측정함으로써 수행된다. 송전선로에서 3상단락 및 1선지락시 결보기 임피던스(=전원단전압/고장전류)로부터 정상 및 영상임피던스는 식 12와 식 13으로 각각 표현되며, 선로정수 측정회로에서 측정된 임피던스를 대칭요소 임피던스로 환산하는 수식은 그림 3의 등가회로와 식 14~20에 기술하였다.

$$I_{3\phi} = \frac{E}{Z_1} = \frac{E}{Z_p - Z_m} \Leftrightarrow \therefore Z_1 = Z_p - Z_m \quad (12)$$

$$I_{1\phi} = 3I_0 = \frac{3E}{(Z_0 + 2Z_1)} \Leftrightarrow \therefore Z_0 = (Z_p + 2Z_m) - \frac{Z_{mn}^2}{3Z_n} \quad (13)$$

(단,  $I_{3\phi}$  : 3상단락전류,  $I_{1\phi}$  : 1선지락전류,  $E$  : 전원전압,  
 $Z_1$  : 정상임피던스,  $Z_p$  : 상도체 자기임피던스,  
 $Z_m$  : 상도체간 상호임피던스,  $Z_{mn}$  : 상도체-중성선 상호임피던스,  $Z_n$  : 중성선 자기임피던스)

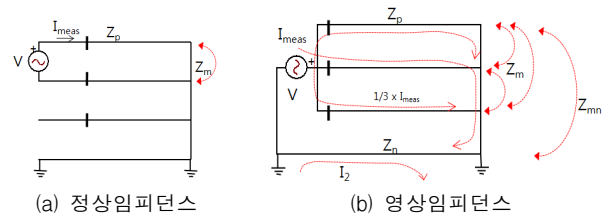


그림 3 선로정수 측정 등가회로

Fig. 3 Equivalent circuit of sequence impedance testing

그림 3(a)로부터 수립한 루프방정식이 식 14 이며, 정상임피던스( $Z_1$ )은 상도체 자기임피던스( $Z_p$ )에서 상도체간 상호임피던스( $Z_m$ )을 뺀 값이므로, 식 15에서와 같이 측정값( $Z_{meas}$ )에 1/2을 곱하면 정상임피던스가 구해진다.

$$V = I_{meas} \times (2Z_p - 2Z_m) \quad (14)$$

$$Z_{meas} = \frac{V}{I_{meas}} = 2(Z_p - Z_m) = 2Z_1 \Leftrightarrow \therefore Z_1 = \frac{1}{2} Z_{meas} \quad (15)$$

(단,  $V$ :인가전압,  $I_{meas}$ :측정전류,  $Z_p$ :상도체 자기임피던스,  
 $Z_m$ :상도체간 상호임피던스,  $Z_1$ :정상임피던스,  
 $Z_{meas}$ :측정임피던스(=  $V/I_{meas}$ ))

그림 3(b)에서 3상 도체를 합성하여 단일 도체로 간주하면 식 16~식 18의 루프방정식을 세울 수 있다. 식 17을  $I_2$ 에 대해 정리하여 식 18을 얻고, 이를 식 16에 대입한 후  $V/I_{meas}$ 에 대하여 정리하면 식 20으로 표현된다.

$$V + Z_{mn}(I_{meas} - I_2) + I_{meas}Z_{mn} = I_{meas}Z_p' + (I_{meas} - I_2)Z_n \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \text{(단, } Z_p' = \frac{1}{3}(Z_p + 2Z_m) \text{)} \\ 0 &= (I_{meas} - I_2)Z_n - Z_{mn}I_{meas} \end{aligned} \quad (17)$$

$$I_2 = (1 - \frac{Z_{mn}}{Z_n})I_{meas} \quad (18)$$

$$V = (Z_p' - \frac{Z_{mn}^2}{Z_n}) I_{meas} = \left( \frac{1}{3} (Z_p + 2Z_m) - \frac{Z_{mn}^2}{Z_n} \right) I_{meas} \quad (19)$$

$$Z_{meas} = \frac{V}{I_{meas}} = \frac{1}{3} (Z_p + 2Z_m) - \frac{Z_{mn}^2}{Z_n} \leftrightarrow \therefore Z_0 = 3Z_{meas} \quad (20)$$

(단,  $V$  : 인가전압,  $Z_{mn}$  : 상도체-중성선간 상호임피던스,  $I_{meas}$  : 측정전류,  $I_2$  : 대지귀로전류,  $Z_n$  : 중성성 자기 임피던스,  $Z_p'$  : 3상 도체를 단일도체로 환산했을 때의 자기임피던스,  $Z_p$  : 상도체 자기임피던스,  $Z_m$  : 상도체 간 상호임피던스)

### 2.2.2 345kV 케이블선로 임피던스 측정

그림 4(a)는 실계통에서의 정상임피던스 실측회로 예를 보인 것이다. B변전소 선로측 차단기와 단로기를 개방하고 단로기 앞단 접지스위치에서 삼상을 단락접지하고, A변전소에서는 차단기 및 단로기 개방상태에서 단로기 A-B상간에 전원을 인가하면서 임피던스를 측정한다. A-B상, B-C상 및 A-C상간에 측정한 평균값의 1/2을 정상임피던스로 간주한다. 그림 4(b)는 영상임피던스 실측회로를 보인 것이다. B변전소 결선은 정상임피던스 측정시와 동일하고 A변전소에서 ABC상 단락접과 대지간 시험전원을 인가하여 측정된 임피던스에 3을 곱하여 영상임피던스를 구한다[7].

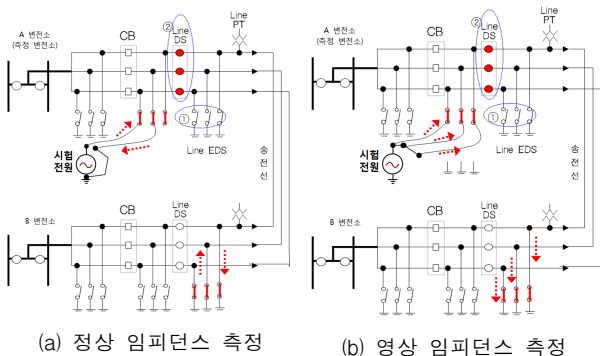


그림 4 실계통 선로에서 선로정수 측정회로  
Fig. 4 Sequence impedance measuring circuit

본 논문의 검토대상인 345kV 지중선로는 총 길이가 16.8 km이고 OF 2000 mm<sup>2</sup> 4회선으로 구성되어 있으며, 각 회선별로 접속함이 43개가 있다. #1,#2,#4 회선에는 크로스본딩이 없이 한쪽만 접지된 절연접속함이 1개씩 있으며, #3회선의 경우 크로스본딩이 없고 비접지된 절연접속함이 1개가 있다. 절연접속되었으나 크로스본딩에 의해 시스 전류경로가 연속이 되는 접속함은 26~28개이다(표 4 참조). 해당 선로에 대해 선로정수를 측정된 결과는 표 2와 같았다[6].

### 2.3 EMTP를 이용한 선로정수 계산

표 3은 표 2의 선로정수 실측값을 100으로 했을 때 표 1의 선로정수이며 실측-계산치 사이에 최대 40%의 큰 차이가 나고 있음을 알 수 있다. 이같은 계산오차의 원인으로는 2.1절의 계산식에 반영되지 않았거나 무시된 요소들, 즉 접속함 접지상태, 병행선로 영향 등을 생각해 볼 수 있다. 본

표 2 선로정수 측정결과

Table 2 Measurement results of sequence impedance

회선	정상 임피던스 (Z1)				영상 임피던스 (Z0)			
	극좌표		직각좌표		극좌표		직각좌표	
	Z1(Ω)	위상(°)	R1(Ω)	X1(Ω)	Z0(Ω)	위상(°)	R0(Ω)	X0(Ω)
#1	2.120	79.4	0.3910	2.0840	1.828	65.7	0.7530	1.6660
#2	2.125	79.4	0.3910	2.0890	1.958	63.9	0.8260	1.7580
#3	2.146	79.4	0.3940	2.1100	1.956	65.3	0.8170	1.7770
#4	2.123	79.1	0.4000	2.0850	1.666	63.1	0.7530	1.4860

절에서는 EMTP모델링에서 지중송전선의 전류귀로 경로로 생각되는 요소들을 단계적으로 추가해가면서, 대칭요소 임피던스 측정하는 회로를 시뮬레이션하였다. 모델링에 추가하는 요소는 절연접속함→타 회선 케이블→매설지선의 순서로 고려하였으며, 접지저항 변동에 따른 영향도 검토하였다.

표 3 실측치 대비 기존 선로정수 계산치

Table 3 Normalized calculation results corresponding to measured sequence impedances

회선	정상 임피던스 (Z1)				영상 임피던스 (Z0)			
	극좌표		직각좌표		극좌표		직각좌표	
	Z1(Ω)	위상(°)	R1(Ω)	X1(Ω)	Z0(Ω)	위상(°)	R0(Ω)	X0(Ω)
#1	87 %	105 %	56 %	88 %	70 %	82 %	100 %	62 %
#2	86 %	105 %	56 %	87 %	65 %	85 %	91 %	59 %
#3	87 %	105 %	57 %	88 %	65 %	81 %	94 %	58 %
#4	87 %	105 %	55 %	88 %	77 %	86 %	99 %	70 %

### 2.3.1 접속함 접지상태 고려

이상적인 조건에서는 시스 유기전압을 완벽히 상쇄하기 위해 접지함간 케이블 거리를 일정하게 하고(ex. 그림 2(a)에서 L1=L2=L3) 크로스본딩 접속함 2개 양단에 접지된 보통 접속함 1개를 설치한다. 그러나 현장 여건상 접속함간 거리가 일정하지 않거나 과도한 시스 순환전류 흐름을 방지하기 위해 크로스본딩이 없는, 즉 시스의 전류경로가 끊어져있는 절연접속함을 시공하는 경우가 있다. 이러한 접속점들은 2.1절의 기존 계산방식에는 반영되지 못한 요소이며 지락고장 등 불평형전류의 경로에 큰 영향을 줄 수 있다. 특히 크로스본딩이 없는 절연접속함에서는 고장전류의 귀로에 접지저항이 삽입되므로 대칭요소 임피던스에 큰 영향을 주게 된다.

표 4는 본 논문의 검토대상인 345kV 4회선 선로의 각 회

표 4 접속함 종류와 개수

Table 4 Types and numbers of joint boxes

접속함 종류	절연접속				보통접속	
	크로스본딩(I/J x)	편단접지 (g I/J)	편단접지 (I/J g)	비접지 (I/J)	비접지 (N/J)	접지 (N/J g)
접속함 심볼						
접속함 개수	#1: 28	#1: 1	#1: 1	#1: 1	#1: 1	#1: 13
	#2: 28	#2: 1	#2: 1	#2: 1	#2: 1	#2: 13
	#3: 28	#3: 1	#3: 1	#3: 1	#3: 1	#3: 14
	#4: 26	#4: 1	#4: 1	#4: 1	#4: 1	#4: 13

선별 접속함 종류 및 개수를 표시한 것이며, 크로스본딩이 없는 절연접속함이 모든 회선에 설치됐음을 알 수 있다.

그림 5는 측정대상 선로의 #4 T/L에서 총 43개의 접속함 접지조건을 고려한 선로정수 측정회로를 재현한 EMTP모델이다. 변전소와 접속함 접지저항은 각각 1 Ω, 10 Ω을 상정했을 때의 선로정수 계산결과를 표 5에 보였다. 실측값(표 2)과 비교시 특히 영상임피던스 계산치가 실측치의 6~7배로 매우 큰 차이가 발생하였다.

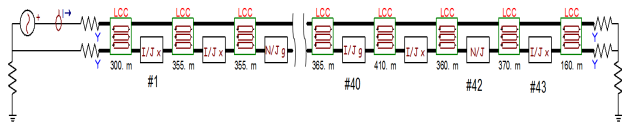


그림 5 접속함 접지상태를 고려한 선로정수 측정모델  
Fig. 5 Sequence impedance testing simulation model considering grounding types of joint boxes

표 5 EMTP를 이용한 선로정수 계산값

Table 5 Calculated sequence impedance from EMTP

회선	정상 임피던스 (Z <sub>1</sub> )				영상 임피던스 (Z <sub>0</sub> )			
	극좌표	위상(°)	직각좌표	직각좌표	극좌표	위상(°)	R <sub>0</sub> (Ω)	X <sub>0</sub> (Ω)
#1	2.345 (111%)	84.3 (106%)	0.2329 (60%)	2.3334 (112%)	11.853 (648%)	33.5 (51%)	9.8840 (1313%)	6.5421 (393%)
#2	2.345 (110%)	84.3 (106%)	0.2329 (60%)	2.3334 (112%)	11.853 (605%)	33.5 (52%)	9.8840 (1197%)	6.5421 (372%)
#3	2.355 (110%)	84.4 (106%)	0.2298 (58%)	2.3438 (111%)	11.872 (607%)	33.5 (51%)	9.8999 (1212%)	6.5526 (369%)
#4	2.354 (111%)	84.4 (107%)	0.2297 (57%)	2.3428 (112%)	13.015 (781%)	39.7 (63%)	10.0137 (1330%)	8.3136 (559%)

이처럼 기존 계산방법에 비해 영상임피던스가 커지는 원인은, 기존 계산방법에서는 그림 6(a)처럼 크로스본딩이 있는 절연접속만을 고려할 수 있으나, 그림 5의 모델에서는 그림 6(b)에서 보인 바와 같이 편단접지된 절연접속함으로 인해 시험전류가 시스 도체를 통과하지 못하고 접지저항을 통해 대지로 빠져나가야 하는 현상이 고려되기 때문이다.

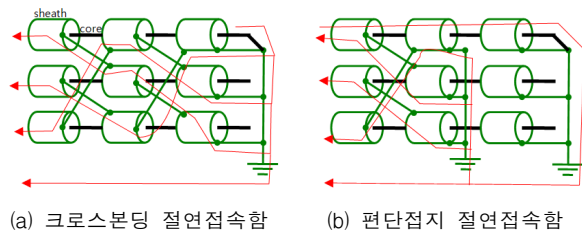


그림 6 크로스본딩 여부에 따른 시험전류 분포  
Fig. 6 Test current distributions at insulated joint box with and without crossbonding

그림 6(b)에서 보인 바와 같이 전류가 접지점을 통해 대지로 빠져나가므로 선로임피던스는 접지저항 크기에 따라 크게 달라지게 된다. 실측치와 유사한 계산모델을 찾기 위해 초기 가정치인 변전소와 접속함 접지저항을 각각 0.1 Ω과 1 Ω 까지 가변하면서 #4 T/L의 영상임피던스를 계산하

였다(그림 7). 그러나 접지저항을 낮추더라도 계산값과 실측값 사이에는 여전히 큰 차이가 있어 현 모델에 반영되지 않고 있는 시험전류 귀로의 추가 등 계산모델의 수정이 필요함을 확인하였다.

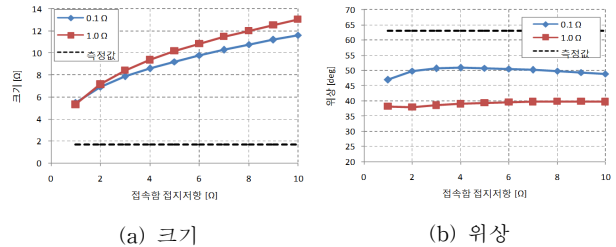


그림 7 접지저항에 따른 영상임피던스 계산값 (#4 T/L)  
Fig. 7 Zero sequence impedances according to ground resistance variation (#4 T/L)

2.3.2 병행선로 고려

그림 8은 그림 5의 계산모델에 측정대상 회선과 인근 회선간 상호결합을 추가로 고려했을 때의 선로정수 측정을 시뮬레이션하기 위한 모델이다. 이 모델에서는 접지된 보통접속함에서 전체 선로의 케이블 시스가 상호 접속되어 접지되므로, 그림 9에서 보인 바와 같이 특정 케이블에 지락이 발생했을 때 고장난 회선의 케이블 외에 타 회선의 케이블 시스들도 전류귀환 경로가 되어 전체적인 선로임피던스가 감소하는 효과가 반영된다.

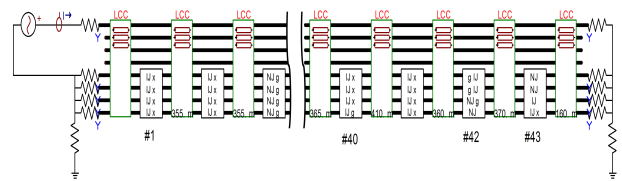


그림 8 인근 케이블의 영향을 고려한 선로정수 측정모델  
Fig. 8 Sequence impedance testing simulation model considering adjacent cables

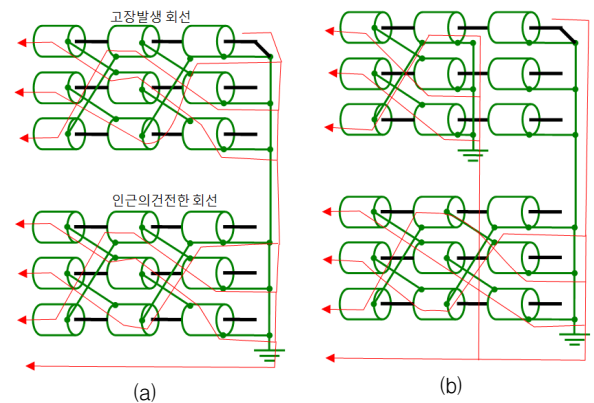


그림 9 인근 회선 케이블 시스를 통한 시험전류 분포 사례  
Fig. 9 Test current distributions at adjacent cable sheath

그림 8의 EMTP모델에서 변전소와 접속함 접지저항은 각각 1 Ω과 10 Ω으로 상정했을 때 상기 모델의 선로정수 계산결과를 표 6에 보였다. 병행선로 추가로 인해 정상임피던스가 약 5%, 영상임피던스는 약 15% 감소(#4 T/L)한 것을 볼 수 있다. 실측치와 유사한 모델을 찾기 위해 접속함 접지저항을 1 Ω을 가정하더라도 영상임피던스가 약 4 Ω으로 실측치(1.6~2 Ω)와는 큰 차이가 있으며 임피던스 위상도 실측치와 큰 차이가 있다(그림 10 참조). 이는 접지저항이 아닌 다른 도전성 경로가 모델에 추가되어야 함을 의미한다.

표 6 EMTP를 이용한 선로정수 계산값

Table 6 Calculated sequence impedance from EMTP

회선	정상 임피던스 (Z1)				영상 임피던스 (Z0)			
	극좌표		직각좌표		극좌표		직각좌표	
	Z <sub>1</sub> (Ω)	위상(°)	R <sub>1</sub> (Ω)	X <sub>1</sub> (Ω)	Z <sub>0</sub> (Ω)	위상(°)	R <sub>0</sub> (Ω)	X <sub>0</sub> (Ω)
#1	2.202 (104%)	84.1 (106%)	0.2263 (58%)	2.1903 (105%)	10.767 (589%)	30.3 (46%)	9.2962 (1235%)	5.4322 (326%)
#2	2.202 (104%)	84.0 (106%)	0.2302 (59%)	2.1899 (105%)	10.767 (550%)	30.5 (48%)	9.2772 (1123%)	5.4647 (311%)
#3	2.205 (103%)	84.0 (106%)	0.2305 (59%)	2.1929 (104%)	10.778 (551%)	30.4 (47%)	9.2962 (1138%)	5.4540 (307%)
#4	2.195 (103%)	83.9 (106%)	0.2332 (58%)	2.1826 (105%)	10.926 (656%)	31.7 (50%)	9.2960 (1235%)	5.7413 (386%)

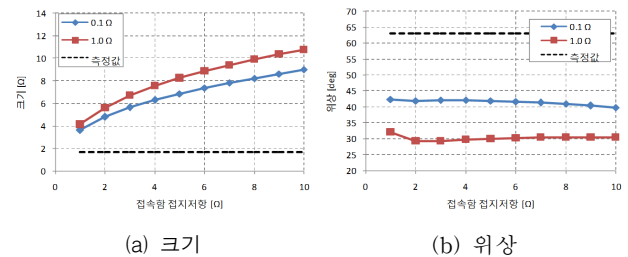


그림 10 접지저항에 따른 영상임피던스 계산값 (#4 T/L)  
Fig. 10 Zero sequence impedances according to ground resistance variation (#4 T/L)

2.3.3 매설지선 고려

접속함 접지상태와 병행선로의 고려만으로는 실측치와 유사한 영상임피던스 계산값 산출이 곤란하였다. 계산모델에 누락된 영상분 전류의 경로로 판단접지점에서의 과전압 발생을 억제하기 위해 시공하는 병행지선(Earth Continuity Conductor)이나 중간 접속이 어려운 터널식 전력구에 시공하는 매설지선을 고려해 볼 수 있다. 병행지선은 판단접지 양단의 접지점을 연결하는 도체로 국내 지중선로에 일부 시공한 사례가 있으나 본 논문의 검토대상 선로에는 설치되어 있지 않았다. 전력구 현장조사 결과, 터널 양쪽에 매설지선이 설치되어 전력구내 접속함 접지용으로 사용하고 있음을 확인하고 그림 7의 계산모델에 2조의 매설지선을 추가한 그림 11의 계산모델을 구성하고 선로정수를 재계산하였다.

그림 11의 모델에서는 그림 12에 보인 것과 같이 크로스본딩이 없는 절연접속함, 즉 시스를 통한 도전성 귀로가 끊어져 있는 접속점에서 매설지선이라는 도전성 경로를 통해 전류가 귀로하는 경우가 고려된다. 앞서 그림 6(b)의 사례에서 매설지선이 없어 접지를 통해 전류가 귀환하는 경우와 비교해 보면 그림 11의 모델에서는 매설지선이라는 도전성

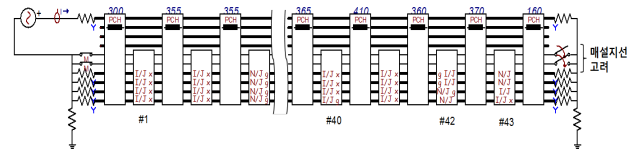


그림 11 매설지선을 고려한 선로정수 측정모델  
Fig. 11 Sequence impedance testing simulation model considering groundwires

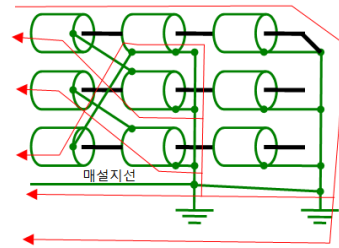


그림 12 크로스본딩 없는 절연접속함 인근 매설지선을 통한 시험전류 분포  
Fig. 12 Test current distributions around insulated joint box without cross-bonding and groundwires

귀로로 인해 선로 임피던스값이 크게 감소하는 효과가 반영된다.

표 7은 실측치 대비 상기 모델의 계산치 오차이며 정상임피던스의 저항분을 제외하고 오차는 10% 미만으로 실측치와 비교적 잘 일치하는 결과가 나왔다. 이같은 사실은 시스의 연속된 경로가 끊어져있는 크로스본딩 없는 절연접속함에서 고장전류 우회경로로서 매설지선이 중요한 역할을 담당할 수 있음을 의미한다.

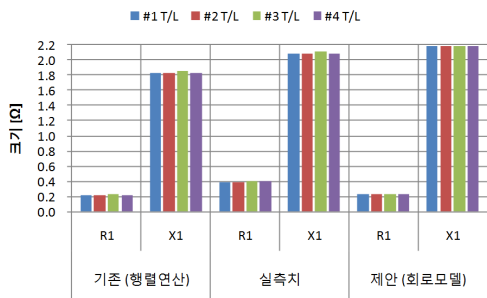
표 7 EMTP를 이용한 선로정수 계산값

Table 7 Calculated sequence impedance from EMTP

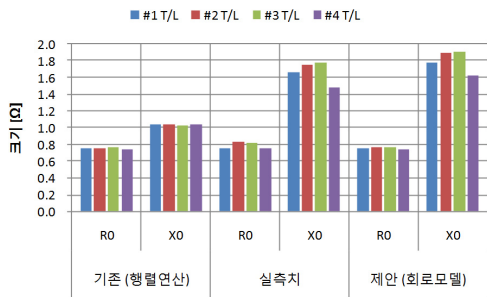
회선	정상 임피던스 (Z1)				영상 임피던스 (Z0)			
	극좌표		직각좌표		극좌표		직각좌표	
	Z <sub>1</sub> (Ω)	위상(°)	R <sub>1</sub> (Ω)	X <sub>1</sub> (Ω)	Z <sub>0</sub> (Ω)	위상(°)	R <sub>0</sub> (Ω)	X <sub>0</sub> (Ω)
#1	2.201 (104%)	84.0 (106%)	0.2301 (59%)	2.1889 (105%)	1.926 (105%)	67.1 (102%)	0.7495 (100%)	1.7742 (106%)
#2	2.201 (104%)	84.1 (106%)	0.2262 (58%)	2.1893 (105%)	2.051 (105%)	68.0 (106%)	0.7683 (93%)	1.9017 (108%)
#3	2.203 (103%)	84.1 (106%)	0.2265 (57%)	2.1913 (104%)	2.053 (105%)	68.2 (104%)	0.7624 (93%)	1.9062 (107%)
#4	2.194 (103%)	83.9 (106%)	0.2331 (58%)	2.1816 (105%)	1.786 (107%)	65.5 (104%)	0.7406 (98%)	1.6252 (109%)

그림 13은 그림 11의 계산모델과 기존 행렬연산 기반 계산방법의 계산치와 실측치를 비교한 것이다. 제안 모델에서 첫째, 도전성 귀로(시스)가 끊어져 있는 선로(그림 6(b) 참조), 즉 크로스본딩이 없는 절연접속함 인근의 접지 귀로, 둘째, 자기 회선 외의 타 회선 케이블 시스 귀로(그림 9 참조) 그리고 세 번째로 매설지선 귀로(그림 12 참조)를 모두 고려했을 함으로써 특히 영상임피던스 계산치와 실측치의 오차가 기존 방법에 비해 감소한 것을 확인할 수 있다.

이는 고장전류가 도체에만 흐르게 되는 회로에서 정상임피던스는 기존 방법이나 제안 방법에 큰 차이가 없지만, 고



(a) 정상임피던스  
(a) positive sequence impedance



(b) 영상임피던스  
(b) zero sequence impedance

그림 13 대칭요소 임피던스 계산-실측치 비교

Fig. 13 Comparison of calculated and measured sequence impedance

장전류가 시스, 접지 및 대지를 통해 귀환하는 경우의 임피던스 계산에서는 상기 전류경로가 모두 반영되는 회로해석 기반의 모델이 실제통과 유사하여 실측치와 더 유사한 계산값을 산출할 수 있기 때문이다. 특히 지락사고시 고장해석 및 거리계전기 세팅에 중요한 영상리액턴스( $X_0$ )는 기존에 40%를 초과했던 오차율이 10% 미만으로 대폭 감소하였다. 그러나 제안 모델에서도 정상임피던스 저항성분은 계산치와 실측치 오차는 큰 차이가 없는데, 이에 대한 원인으로선 선로정수 측정시 전류주입용 케이블의 저항성분이 반영되는 것으로 생각되며 향후 추가적인 확인이 필요한 사항이다.

2.4 거리계전기 동작특성 영향

본 논문의 검토대상 선로의 #4 T/L은 2006년 말에 선로 중간 #25 접속함 부근에서 고장이 발생한 적이 있었다[8]. 사고 당시 환쪽 변전소 차단기가 열린 상태로 다른 쪽 변전소에서 가압 시험 중이었므로 주보호인 전류차동계전기는 동작하지 않고 후비보호인 거리계전기가 동작하여 고장을 차단하였다. 그러나 실제 고장지점인 #25 접속함은 전체 선로의 약 58% 지점 (9.8 km)으로 지락사고 Zone-1 세팅값인 75% 이내였으므로 순시Trip되었어야 했으나 거리계전기는 고장점 위치를 Zone-2 로 인식하여 지연차단됨으로써 27 cycle 동안 고장이 지속되었다.

표 1의 최초 선로정수 계산치를 이용하여 동일 기준 계전기를 정정하고 사고당시 고장기록기에 저장된 파형을 계전

기 입력하면서 Zone 1요소 동작시점을 실험하였다. 즉, Zone 1세팅치를 100%부터 점차 줄여가면서 계전기 Trip신호 발생을 체크한 결과, Zone-1세팅치가 88% 이하부터 Trip신호가 발생함을 확인하였다. 이는 사고 당시 계전기가 인식한 고장점이 실제 고장점인 58%가 아니라 88% 로 인식하였고, Zone 1요소는 동작하지 않고 Zone 2 요소가 동작하여 지연Trip되었음을 보여준다.

반면, 선로정수 실측치(표 2)로 계전기를 정정한 경우에는 Zone 1 세팅치가 68%이하에서 트립신호가 발생하였다. 상기 실험결과로부터 사고파형 입력시 계산 및 실측한 선로정수로 정정한 거리계전기가 인식하는 걸보기 임피던스값은 1.36~1.4Ω 범위라는 것을 알 수 있다(식 21~22 참조). 이를 토대로 EMTP 계산값을 정정치로 입력했을 때의 사고파형 입력시 거리계전기가 인식하는 고장점은 68~70% 범위임을 유추할 수 있다(식 23~24).

$$X_{app} = \frac{1}{3}(X_0 + 2X_1) \times 88\% \quad (21)$$

$$= \frac{1}{3}(0.57 \times 1.8568 + 2 \times 1.8658) \times 0.88 = 1.4 \Omega$$

$$X_{app} = \frac{1}{3}(X_0 + 2X_1) \times 68\% \quad (22)$$

$$= \frac{1}{3}(0.84 \times 2.11 + 2 \times 2.11) \times 0.68 = 1.36 \Omega$$

$$\frac{1}{3}(X_0 + 2X_1) \times x = 1.4 \Omega \quad (23)$$

$$x = \frac{3 \times 1.4}{0.74 \times 2.1816 + 2 \times 2.1816} = 68\%$$

$$\frac{1}{3}(X_0 + 2X_1) \times x = 1.36 \Omega \quad (24)$$

$$x = \frac{3 \times 1.36}{0.74 \times 2.1816 + 2 \times 2.1816} = 70\%$$

(단,  $X_{app}$  : 고장점까지의 걸보기 선로 리액턴스,  
 $X_0$  : 전체 선로의 영상분 리액턴스,  
 $X_1$  : 전체 선로의 정상분 리액턴스,  
 $x$  : EMTP계산치로 정정치 계전기 인식 고장점(%))

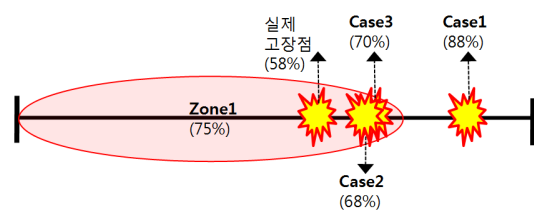


그림 14 거리계전기 응답특성 시험결과

Fig. 14 Distance relay response test results

표 8 거리계전기 응답특성 비교

Table 8 Distance relay response test result

구분	계전기 인식 고장위치	Zone1 동작	계전기 입력값		비고 (계전기 정정 방법)
			$X_1$	$X_0/X_1$	
CASE 1	88%	X	1.8568 Ω	0.57	기존 계산값 (표 1) 사용
CASE 2	68%	O	2.1100 Ω	0.84	선로정수 실측치 (표 2) 사용
CASE 3	68~70%	O	2.1816 Ω	0.74	EMTP계산치 (표 7) 사용

### 3. 결 론

본 논문에서는 지중송전선에서 대칭요소 임피던스 측정치와 계산치의 오차원인을 규명하기 위해서 기존의 임피던스 산정방법을 분석하였다. 그 결과 기존 계산방법에서는 크로스본딩이 없는 절연접속함 인근의 접지, 인근 회선 케이블스 및 매설지선을 통한 고장전류 귀환경로에 대한 고려가 누락됨을 확인하였다.

기존 계산방법의 제약을 극복하기 위하여 EMTP를 이용하여 345kV 4회선 실제통 지중선로 모델을 구성하여 기존 계산방법에서 누락된 요소들을 단계적으로 모델에 추가해가면서 접지저항값 변동에 따른 대칭요소 임피던스 측정회로를 시뮬레이션하였다. 그림 6, 그림 9 및 그림 12의 사례에 보인 전류분포를 모두 고려할 수 있는 EMTP 모델로부터 각 회선별로 실측치와 비교적 잘 일치하는 임피던스 계산치를 얻을 수 있었다.

본 논문의 검토대상 선로에서 실제 사고가 발생했을 때 취득한 고장전류 파형을 이용한 거리계전기 응답특성 영향을 분석한 결과, EMTP로 계산한 선로정수로 거리계전기를 정정했을 때 계전기가 인식한 고장위치의 오차가 감소함을 확인하였다. 이로써 가공송전선에 비해 고장전류 귀로가 복잡한 지중송전선에서는 기존 행렬연산 기반이 아닌 상세 회로해석 기반의 대칭요소 임피던스 계산이 필요함을 확인하였으며, 향후 지중송전선의 선로정수 계산에 EMTP 활용을 확대하기 위한 EMTP용 전처리기를 개발 중에 있다.

### References

- [1] KEPCO, Study of Calculation Method of Underground T/L Impedances and Capacity (Final Report), 1991
- [2] Omicron, CPC-100+CP CU-1 measuring system, 2005
- [3] KEPCO, Report on Measurement of Sequence Impedances of 154kV Underground T/L, 2005
- [4] Phil Nichols, Jeremy Yarnold, "A Sensitivity Analysis of Cable Parameters and Their Influence on Design Choices for Minimum Sheath Voltage Limiter Specification in Underground Cable Systems," Power Engineering Conf. AUPEC 2009, pp. 1-6, 1992.
- [5] B. Gustavsen, J. A. Martinez, and D. Durbak, "Parameter Determination for Modeling System Transients. Part II: Insulated Cables," IEEE Trans. on PD, vol. 20, No. 3, pp.2045-2050, 2005.
- [6] KEPCO, Report on Measurement of Sequence Impedance of Shinseongdong and Kuri T/L, 2008
- [7] Michael Kruger, Measurement of overhead line and cable impedane values, earth impedance of large substations and electromagnetic interference between overhea lines and signal cables, using a new technology, 8th IEE International Conf. on DPSP, vol.1, pp.240-243, 2004
- [8] KPX, Case Studies of Power System Faults, 2010
- [9] KEPCO, Power System Protection Standards, 2012

## 저 자 소 개



#### 최 종 기 (崔 鍾 基)

1969년 2월 1일생, 1993년 동국대 전기공학과 졸업, 1995년 홍익대 대학원 전기공학 석사, 2007년 동대학원 전기공학과 졸업(박사), 1995년~현재 한전 전력연구원 선임연구원  
E-mail : jkchoi@kepcoco.kr



#### 오 세 일 (吳 世 侁)

1959년 10월 1일생, 1987년 과기대 전기공학과 졸업, 1987년 한전 입사, 2013년 현재 기술엔지니어링본부 설비진단센터 차장, 관심분야: 전력계통 설비고장 해석  
E-mail : seiilloh@kepcoco.kr



#### 안 용 호 (安 勇 豪)

1961년 8월 5일생, 1984년 인천대 전기공학과 졸업. 2000년 전북대 전기공학과 졸업(석사). 2013년 동대학원 전기공학과 졸업(박사), 1995년~현재 한전 전력연구원 책임연구원  
E-mail : anyeoh@kepcoco.kr



#### 윤 용 범 (尹 用 範)

1958년 9월 28일생, 1984년 부산대 전기공학과 졸업, 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년 동대학원 전 졸업(박사), 2012년~현재 한전 전력연구원 차세대변전그룹장  
E-mail : yunybon@kepcoco.kr



#### 곽 양 호 (郭 陽 浩)

1972년 6월 14일생, 1998년 경남대 전기공학과 졸업, 2013년 현재 한전 송변전운영처 계통보호팀 차장  
E-mail : kyh98@kepcoco.kr



#### 이 명 희 (李 明 熙)

1964년 4월 22일생, 1993년 부경대 전기공학과 졸업, 2006년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2013년 현재 한전 송변전운영처 계통보호팀장  
E-mail : eelmhee@kepcoco.kr