Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2014) 28(6) : 60~67
http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2014.28.6.060 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)

논문 28-6-9

지중송전선로의 대칭분 임피던스 모델링에 관한 연구

(A Study on the Sequence Impedance Modeling of Underground Transmission Systems)

황영록* · 김경철**
(Young-Rok Hwang · Kyung-Chul Kim)

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. The majority of fault in transmission lines 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 groundwires in overhead transmission systems and through cable sheaths and earth in underground 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, EMTP-based sequence impedance calculation method was described and applied to 345kV cable transmission systems. 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 : Sequence Impedance, Underground Transmission Systems, Sheath Bonding, Grounding

1. 서 론

전력계통 고장해석은 대부분 계통요소들을 정상, 역상 및 영상임피던스로 표현하는 대칭좌표법에 기반하고 있으며, 따라서 정확한 고장계산을 위해서는 선로의 대칭요소 임피던스를 정확히 아는 것이 중요하다. 특히 선로고장의 대부분을 차지하는 지락사고의 해석에는 영상임피던스가 중요한 변수가 된다.

일반적으로 송전선로의 임피던스는 계산값을 사용하는 경우가 많으며 PSS/E 등과 같은 대부분의 계통해석 프로그램들에는 가공송전선 대칭요소 임피던스

* 주저자 : 홍익대학교 박사과정
** 교신저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
* Main author : Doctoral Course, Hongik University
** Corresponding author : Professor of Electrical Engineering Department, Hongik University
Tel : 044-860-2568, Fax : 044-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2014년 3월 4일
1차심사 : 2014년 3월 6일
심사완료 : 2014년 4월 11일

Copyright ⓒ 2014 KIIEE All right's reserved

계산기능이 있다. 그러나 지중송전선의 경우에는 별도의 대칭요소 임피던스 계산프로그램이 없기 때문에, 한전에서는 자체 연구과제를 통해 지중선로의 대칭요소 임피던스 계산알고리즘과 프로그램을 개발하여 현재까지 사용하고 있다[1].

한편 보다 정확한 선로임피던스값을 구하기 위해서는 해당선로를 휴전시키고 선로 임피던스를 실측하는 것이 필요한 경우가 있다. 국내에서도 2005년부터 상용 측정장비를 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[2]. 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(2,000㎟) 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. 지중송전선로의 임피던스 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 지중송전선에서 대칭요소 임피던스를 계산하는 절차를 기술하고 재검토함으로써 실계통에서 누락되는 요인이 있는지를 검토하였다.

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. 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 1에서 보인 것처럼 6×6이 된다.

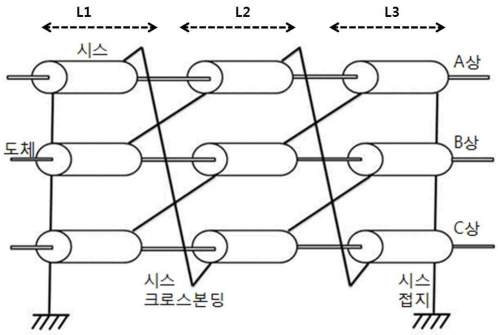


그림 1. 케이블 시스의 크로스본딩
Fig. 1. Cross-bondings of cable sheaths

대칭분 임피던스 계산절차는 식 (1)~(6)에 기술하였다. 식 (1)은 L_1, L_2, L_3 세 개의 소구간을 갖는 지중선로의 전체 임피던스를 표출한 식이다.

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \left(\begin{array}{ccc|ccc} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{a1} & z_{a2} & z_{a3} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{b1} & z_{b2} & z_{b3} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{c1} & z_{c2} & z_{c3} \\ \hline z_{1a} & z_{1b} & z_{1c} & z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{2a} & z_{2b} & z_{2c} & z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{3a} & z_{3b} & z_{3c} & z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{array}\right) \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

식 (1)의 전체 임피던스는 소구간으로 나누면 식 (2)와 같다.

$$\begin{pmatrix} Z_{aa} Z_{ab} Z_{ac} Z_{a1} Z_{a2} Z_{a3} \\ Z_{ba} Z_{bb} Z_{bc} Z_{b1} Z_{b2} Z_{b3} \\ Z_{ca} Z_{cb} Z_{cc} Z_{c1} Z_{c2} Z_{c3} \\ Z_{1a} Z_{1b} Z_{1c} Z_{11} Z_{12} Z_{13} \\ Z_{2a} Z_{2b} Z_{2c} Z_{21} Z_{22} Z_{23} \\ Z_{3a} Z_{3b} Z_{3c} Z_{31} Z_{32} Z_{33} \end{pmatrix}$$

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

(단 v_k : k상 전압 (k=a~c:심선/k=1~3:시스),
z_{ij} : ij상간 상호임피던스, z_{ii} : i상 자기임피던스,
i_k : k상 전류)

식 (2)는 식 (1)에 대입하여 정리하면, 식 (3)과 식 (4)로 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 (5)로 표현된다.

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

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

$$v_1 = v_2 = v_3 = 0$$

$$\leftrightarrow \quad \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} Z_{11} Z_{12} Z_{13} \\ Z_{21} Z_{22} Z_{23} \\ Z_{31} Z_{32} Z_{33} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Z_{1a} Z_{1b} Z_{1c} \\ Z_{2a} Z_{2b} Z_{2c} \\ Z_{3a} Z_{3b} Z_{3c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{aa} Z_{ab} Z_{ac} \\ Z_{ba} Z_{bb} Z_{bc} \\ Z_{ca} Z_{cb} Z_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}$$

$$- \begin{pmatrix} Z_{a1} Z_{a2} Z_{a3} \\ Z_{b1} Z_{b2} Z_{b3} \\ Z_{c1} Z_{c2} Z_{c3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{11} Z_{12} Z_{13} \\ Z_{21} Z_{22} Z_{23} \\ Z_{31} Z_{32} Z_{33} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Z_{1a} Z_{1b} Z_{1c} \\ Z_{2a} Z_{2b} Z_{2c} \\ Z_{3a} Z_{3b} Z_{3c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (5)$$

식 (5)을 다시 식 (3)에 대입하고 도체 전압(v_a, v_b, v_c)에 대해 정리하면 식 (6)이 된다. 이렇게 구해진 임피던스 행렬은 식 (6)과 같이 변환 행렬 연산을 통해 대칭분 임피던스를 구할 수 있다.

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

표 1은 이상에서 기술한 계산모델을 이용하여 본 논문의 검토대상인 345kV 4회선 선로의 정상 및 영상임피던스를 계산한 결과이다[3].

표 1. 선로정수 계산결과
Table 1. Calculation results of the line constants

회선	정상 임피던스 (Z1)			
	극좌표		직각좌표	
	Z1 (Ω)	위상 (°)	R1 (Ω)	X1 (Ω)
1	1.837	83.1	0.2202	1.8235
2	1.837	83.1	0.2202	1.8235
3	1.870	83.1	0.2238	1.8568
4	1.848	83.2	0.2190	1.8354

회선	영상 임피던스 (Z0)			
	극좌표		직각좌표	
	Z0 (Ω)	위상 (°)	R0 (Ω)	X0 (Ω)
1	1.278	54.0	0.7510	1.0343
2	1.278	54.0	0.7510	1.0343
3	1.278	53.2	0.7653	1.0236
4	1.281	54.4	0.7451	1.0415

3. 지중송전선로의 임피던스 측정

3.1 측정원리

선로정수 계산의 전제조건은 현실과 차이가 있다. 예를 들어 중성선과 시스는 접지되었더라도 접지저항은 0Ω이 아니므로 영(零)전위가 될 수 없으며, 상도체나 시스도 완벽히 연가되어 있지 않는 등 실제 선로조건과 차이가 있을 수 밖에 없다. 따라서 고장계산이나

거리계전기 동작의 정확성을 높이기 위해서 선로정수를 실측하는 것이 필요할 수 있다. 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 겉보기 임피던스(=전원단전압/고장전류)로부터 정상 및 영상임피던스는 식 (7)과 식 (8)로 각각 표현되며, 선로정수 측정회로에서 측정된 임피던스를 대칭요소 임피던스로 환산하는 수식은 그림 2의 등가회로와 식 (9)~(12)에 기술하였다.

$$I_{3PH}=\frac{E}{Z_1}=\frac{E}{Z_p-Z_m}$$

$$\leftrightarrow \quad \therefore Z_1=Z_p-Z_m \tag{7}$$

$$I_{1LG}=3I_0=\frac{3E}{(Z_0+2Z_1)}$$

$$\leftrightarrow \quad \therefore Z_0=(Z_p+2Z_m)-\frac{Z_{mn}^2}{3Z_n} \tag{8}$$

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

그림 2 (a)에서 루프방정식은 식 (9)이며 정상임피던스(Z1)은 상도체 자기임피던스(Zp)에서 상도체간 상호임피던스(Zm)을 뺀 값이므로 측정값(Zmeas)에 1/2을 곱 하여 정상임피던스를 산정한다(식 (10)).

$$V=I_{meas}\times(2Z_p-2Z_m) \tag{9}$$

$$Z_{meas}=\frac{V}{I_{meas}}=2(Z_p-Z_m)=2Z_1$$

$$\leftrightarrow \quad \therefore Z_1=\frac{1}{2}Z_{meas} \tag{10}$$

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

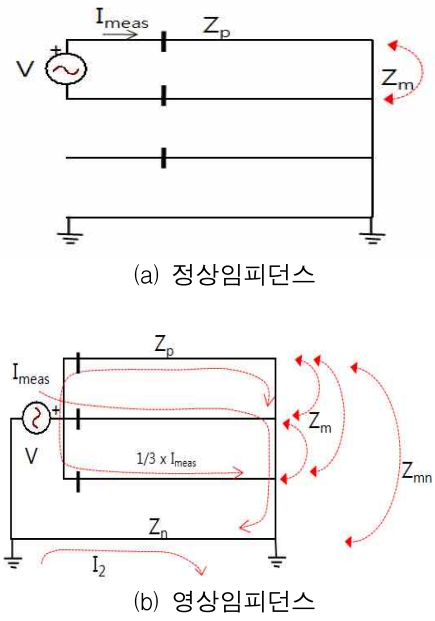


그림 2. 선로정수 측정 등가회로
Fig. 2. Measurement equivalent circuit of the line constants

그림 2 (b)에서 3상 병렬도체를 단일 도체로 간주하면 식 (11)~식 (13)의 루프방정식을 세울 수 있다. 식 (13)을 I2에 대해 정리(식 (14))하여 식 (11)에 대입한 후 V/Imeas에 대하여 정리하면 식 (16)으로 표현된다.

$$V+Z_{mn}(I_{meas}-I_2)+I_{meas}Z_{mn}$$

$$=I_{meas}Z_P'+(I_{meas}-I_2)Z_n \tag{11}$$

$$\text{단} \quad Z_P'=\frac{1}{3}(Z_p+2Z_m) \tag{12}$$

$$0=(I_{meas}-I_2)Z_n-Z_{mn}I_{meas} \tag{13}$$

$$I_2=(1-\frac{Z_{mn}}{Z_n})I_{meas} \tag{14}$$

$$V=(Z_P'-\frac{Z_{mn}^2}{Z_n})I_{meas}$$

$$=\left(\frac{1}{3}(Z_p+2Z_m)-\frac{Z_{mn}^2}{Z_n}\right)I_{meas} \quad (15)$$

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

$$\leftrightarrow \quad \therefore Z_0=3Z_{meas} \quad (16)$$

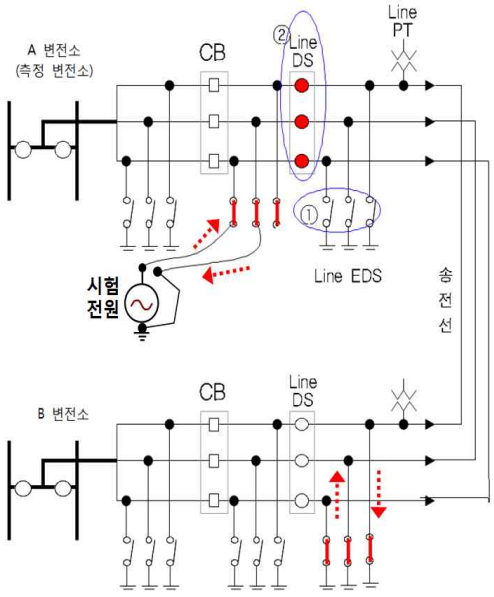
(단 V : 인가전압,
Z_{mn} : 상도체-중성선간 상호임피던스,
I_{meas} : 측정전류, I_2 : 대지귀로전류,
Z_n : 중성성 자기임피던스,
Z_P' : 3상 병렬도체를 단일도체로 환산했을 때 자기임피던스,
Z_p : 상도체 자기임피던스,
Z_m : 상도체간 상호임피던스)

3.2 345kV 케이블선로 임피던스 측정

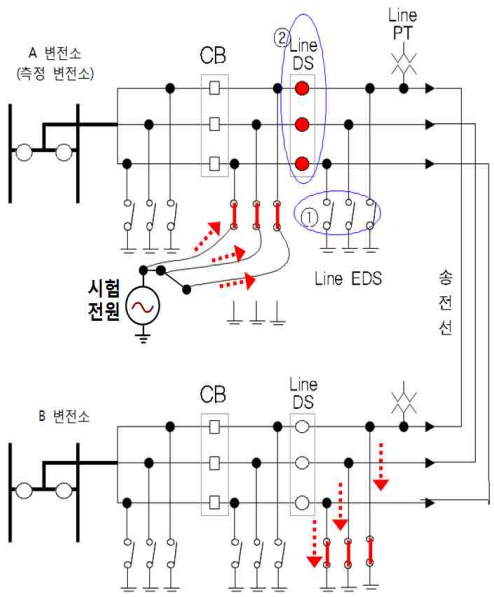
표 2. 선로정수 측정결과
Table 2. Measurement results of the line constants

회선	정상 임피던스(Z1)			
	극좌표		직각좌표	
	Z1(Ω)	위상(°)	R1(Ω)	X1(Ω)
1	2.120	79.4	0.3910	2.0840
2	2.125	79.4	0.3910	2.0890
3	2.146	79.4	0.3940	2.1100
4	2.123	79.1	0.4000	2.0850

회선	영상 임피던스(Z0)			
	극좌표		직각좌표	
	Z0(Ω)	위상(°)	R0(Ω)	X0(Ω)
1	1.828	65.7	0.7530	1.6660
2	1.958	63.9	0.8260	1.7580
3	1.956	65.3	0.8170	1.7770
4	1.666	63.1	0.7530	1.4860



(a) 정상 임피던스 측정



(b) 영상 임피던스 측정

그림 3. 선로정수 측정회로[4]
Fig. 3. Measurement circuits of the line constants

그림 3 (a)는 실계통에서의 정상임피던스 실측회로 예를 보인 것이다. B변전소 선로측 차단기와 단로기를 개방하고 단로기 앞단 접지스위치에서 삼상을 단락접지하고, A변전소에서는 차단기 및 단로기 개방상태에

서 단로기 A-B상간에 전원을 인가하면서 임피던스를 측정한다. A-B상, B-C상 및 A-C상간에 측정한 평균값의 1/2을 정상임피던스로 간주한다. 그림 3 (b)는 영상임피던스 실측회로를 보인 것이다. B변전소 결선은 정상임피던스 측정시와 동일하고 A변전소에서 ABC상 단락점과 대지간 시험전원을 인가하여 측정한 임피던스에 3을 곱하여 영상임피던스를 구한다[4].

본 논문의 검토대상인 345kV 지중선로는 총 길이가 16.8km이고 OF 2,000㎟ 4회선으로 구성되어 있으며, 이상에 기술한 절차에 따라 선로정수를 측정한 결과는 표 2와 같았다[3].

4. EMTP를 이용한 선로정수 시뮬레이션

표 3은 선로정수 실측결과 대비 선로정수 계산치(표 1) 오차이며 실측-계산치 사이에 최대 40%의 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이와 같은 계산오차의 원인으로는 2절의 계산식에 반영되지 않았거나 무시된 요인들, 즉 접속함 접지상태, 병행선로, 매설지선 영향 등을 생각해 볼 수 있다. 기존 계산식에 누락 또는 무시되었던 요인들을 정확히 고려하기 위하여 EMTP (Electro-Magnetic Transient Program)을 이용한 선로모델을 구성하고 선로정수 실측회로를 시뮬레이션을 하였다.

이상적인 조건에서는 시스 유기전압을 완벽히 상쇄하기 위해 접지함간 케이블 거리를 일정하게 하고 (ex. 그림 1 (a)에서 L_1=L_2=L_3) 크로스본딩 접속함 2개 양단에 접지된 보통접속함 1개를 설치(그림 1 (a) 참조) 시공한다. 그러나 현장 여건상 접속함간 거리가 일정하지 않거나 과다한 시스 순환전류 흐름을 방지하기 위해 편단접지나 비접지된 절연접속/보통접속함을 시공하는 사례가 불가피한 경우가 있다. 이러한 접속점들은 2절의 기존 계산방식에는 반영되지 못한 요소이며 지락고장 등 불평형전류의 경로에 큰 영향을 줄 수 있다. 특히 크로스본딩이 없는 절연접속함에서는 고장전류의 도전성 귀로가 없거나 접지저항이 삽입되므로 대칭요소 임피던스에 큰 영향을 줄 수 있다.

표 3. 실측치 대비 기존 선로정수 계산치(%)
Table 3. Line constants comparison with the existing values and measurements(%)

회선	정상 임피던스(Z1)			
	극좌표		직각좌표	
	Z1(Ω)	위상(°)	R1(Ω)	X1(Ω)
1	87%	105%	56%	88%
2	86%	105%	56%	87%
3	87%	105%	57%	88%
4	87%	105%	55%	88%

회선	영상 임피던스(Z0)			
	극좌표		직각좌표	
	Z0(Ω)	위상(°)	R0(Ω)	X0(Ω)
1	70%	82%	100%	62%
2	65%	85%	91%	59%
3	65%	81%	94%	58%
4	77%	86%	99%	70%

일반적으로 지중케이블 선로에는 보통 300m 내외 간격으로 케이블 접속함이 있으며 시스 절연여부에 따라 보통접속함과 절연접속함으로 구분된다. 절연접속함에는 시스 유기전압을 상쇄하기 위한 크로스본딩 접속함, 절연접속함 좌측 또는 우측 중 한쪽 만을 접지한 편단접지 및 비접지 등 4종류가 있다. 접속함 양쪽 시스가 절연되어있지 않은 보통접속함에는 시스를 접지하거나 비접지인 2종류의 접속함이 있다.

측정대상 회선과 인근 회선간 상호결합을 추가로 고려하였다. 이 모델에서는 접지된 보통접속함에서 전체 선로의 케이블 시스가 상호 접속되어 접지되므로 특성 케이블에 지락이 발생해도 고장 케이블 외에 다른 케이블 시스들도 전류귀환 경로가 되어 전체적인 선로임피던스가 감소하는 효과를 고려할 수 있다.

접속함 접지상태와 병행선로의 고려만으로는 실측치과 유사한 영상임피던스 계산값 산출이 곤란하다. 계산모델에 누락된 영상분 전류의 경로로 편단접지점

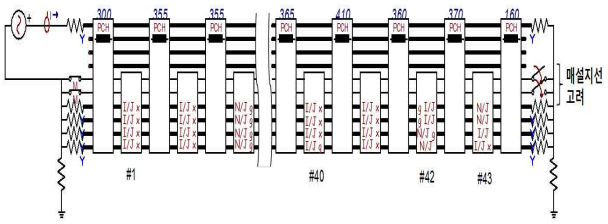


그림 4. 매설지선을 고려한 선로정수 측정모델
Fig. 4. Line constants measurement model

표 4. EMTP를 이용한 선로정수 계산값
Table 4. Line constants calculation results using EMTP

회선	정상 임피던스(Z1)			
	극좌표		직각좌표	
	Z1(Ω)	위상(°)	R1(Ω)	X1(Ω)
1	2.201 (104%)	84.0 (106%)	0.2301 (59%)	2.1889 (105%)
2	2.201 (104%)	84.1 (106%)	0.2262 (58%)	2.1893 (105%)
3	2.203 (103%)	84.1 (106%)	0.2265 (57%)	2.1913 (104%)
4	2.194 (103%)	83.9 (106%)	0.2331 (58%)	2.1816 (105%)

회선	영상 임피던스(Z0)			
	극좌표		직각좌표	
	Z0(Ω)	위상(°)	R0(Ω)	X0(Ω)
1	1.926 (105%)	67.1 (102%)	0.7495 (100%)	1.7742 (106%)
2	2.051 (105%)	68.0 (106%)	0.7683 (93%)	1.9017 (108%)
3	2.053 (105%)	68.2 (104%)	0.7624 (93%)	1.9062 (107%)
4	1.786 (107%)	65.5 (104%)	0.7406 (98%)	1.6252 (109%)

에서의 과전압 발생을 억제하기 위해 시공하는 병행지선(ECC; Earth Continuity Conductor)이나 터널식 전력구에 시공하는 매설지선을 고려해 볼 수 있다. 병행지선은 편단접지 양단의 접지점을 연결하는 도체로 국내 지중선로에 일부 시공한 사례가 있으나 본 논문의 검토대상 선로에는 설치되어 있지 않았다. 전력구 현장조사 결과, 터널 양쪽에 매설지선이 설치되어 접속함 접지용으로 사용하고 있음을 확인하고 이전 계산모델에 2조의 매설지선을 추가하여(그림 4) 선로정수를 계산하였다(표 4).

표 4는 실측치 대비 상기 모델의 계산치 오차이며 정상임피던스의 저항분을 제외하고 오차는 10% 미만으로 실측치와 비교적 잘 일치하는 결과가 나왔다. 이같은 사실은 영상분 전류의 통로에서 매설지선이 중요한 역할을 담당하고 있으며 따라서 선로정수 계산 시에 반드시 고려되어야 할 요소임을 의미한다.

5. 결 론

본 논문에서는 OF 2,000㎟ 케이블로 구성된 345kV 4회선 선로를 대상으로 EMTP를 이용한 선로정수 계산모델 구축절차와 실측치와 계산치의 비교검증 결과를 기술하였다. EMTP를 이용함으로써 기존의 행렬연산 계산방식에서는 곤란하였던 케이블 접속함의 접지상태와 병행선로의 영향 및 전력구 내에 시공된 매설지선의 효과를 고려하는 것이 가능하였다. 최종적으로 구축된 계산모델로부터 실측치와 잘 일치하는 계산치를 얻음으로써 계산모델의 신뢰성을 검증하였으며, 지중선로의 영상임피던스에서 매설지선이 중요한 역할을 할 수 있다는 점을 확인하였다.

이 논문은 2014학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

References

[1] CIGRE, SPECIAL BONDING OF HIGH VOLTAGE POWER CABLES, 2005.
[2] KEPCO, Underground Transmission Line Impedance and

Allowable Current Calculation Technique Study, 1991.
[3] KOEPCO, Measurement Results of Underground Transmission Line Constants, 2008.
[4] Korea Power Exchange, Power System Major Faults Report, 2010. 5.
[5] KEPCO, Ground System Design Standards of Underground Transmission Line, DS-6310, 2012.
[6] 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, 2005. 7.
[7] BS 7430, Code of practice for protective earthing of electrical installations, 2011.
[8] IEEE Guide for the Application of Sheath-Bonding Methods for Single-Conductor Cables and the Calculation of Induced Voltages and Currents in Cable Sheaths, IEEE Std. 575, 1988.
[9] J. G. Andrichak, G.E Alexander, Distance Relay Fundamentals, General Electric Co.

◇ 저자소개 ◇

황영록(黃永祿)
1964년 2월 23일생. 1991년 인천대학교 전기공학과 졸업. 1991~1995년 한전 영광원자력본부 QA. 1995~2000년 한국전기안전공사 기술부. 2000~2006년 서울유일엔지니어링 진단부. 현재 (주)한국전기기술 대표이사. 건축전기설비기술사.

김경철(金慶哲)
1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982년 국방과학연구소 연구원. 1982~1984년 NMSU 전기공학과 졸업(석사). 1984~1988년 UTA 전기공학과 졸업(박사). 1988~1991년 한국전기연구소 선임연구원. 1991년~현재 홍익대학교 전기공학과 교수.