

배전용 케이블의 종류와 형상에 따른 선로정수 모의 계산

곽주식, 우정욱  
한전 전력연구원

Caluation of line constants for distribution power calbes according to its shapes and geometrcal arrangements

J. S. Kwak, J. W. Woo  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - 본 논문에서는 한전 22.9kV 배전선로의 고장전류 및 선로손실 계산의 기초 자료로 활용하고 있는 배전선로 선종별 임피던스 값을 EMTP를 사용하여 계산하였다. EMTP와 그 보조 프로그램인 LINE CONSTANTS와 CABLE CONSTANTS의 간단한 계산 원리와 근거들을 각 항목들별로 자세히 기술하였다. 각 선종별로 기하학적 위치와 물리적인 제정수를 사용하여 계산을 하였으며, 가변 가능한 변수들은 모두 조정하여 상호 비교하였다.

1. 서 론

일반적으로 송전선로의 선로임피던스는 널리 사용되고 있는 EMTP(Electro-Magnetic Transients Program)내의 보조프로그램인 LINE CONSTANTS와 CABLE CONSTANTS를 이용하여 계산이 가능하다. 현재 한전에서 사용하고 있는 22.9 kV 배전선의 임피던스에 대한 재계산 및 계산근거를 확립하고자 하는 필요성 대두되었다. 또한 절연전선 및 신개발전선의 임피던스와 가공지선 설치 및 중성선을 나동선으로 사용한 경우 영상임피던스의 변화를 확인하고자 하였다.

본 논문에서는 한전 22.9kV 배전선로의 고장전류 및 선로손실 계산의 기초 자료로 활용하고 있는 배전선로 선종별 임피던스 값을 EMTP를 사용하여 계산하였다. EMTP와 그 보조 프로그램인 LINE CONSTANTS와 CABLE CONSTANTS의 간단한 계산 원리와 근거들을 각 항목들별로 자세히 기술하였다. 각 선종별로 기하학적 위치와 물리적인 제정수를 사용하여 계산을 하였으며, 가변 가능한 변수들은 모두 조정하여 상호 비교하였다.

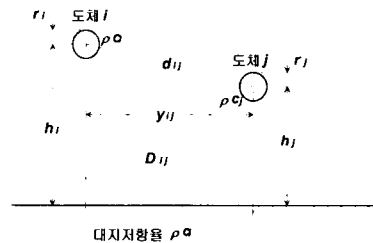
2. 본 론

2.1 선로정수의 기본 원리

송전선의 정상 및 과도특성을 계산하는데 필요한 임피던스 및 어드미턴스 등의 선로정수는 선로의 기하학적 및 물리적 정수에 의해 정해지는 선형소자이다. 그런데, 도체의 표피효과에 의해 선로임피던스 요소  $R=R(\omega)$ ,  $L=L(\omega)$ 은 주파수의 함수로 나타내진다.

상용주파수의 전기회로에서 무시되는 선로임피던스의 주파수의존효과(frequency dependent effect)는 수 MHz 이상의 고주파 영역에서는 주파수의 함수인 전파정수, 특성임피던스 등에 나타나며, 전력계통의 과도현상 등에 중대한 영향을 미친다.

선로도체, 공기층, 대지와 함께 일정한 모양의 매질로 되어 있는 n상의 다상선로를 나타낸 그림 1의 i번째 및 j번째의 선로에서 원형의 선로도체 단면에 대한 이론식과 임의단면에 대한 근사계산식을 설명한다.



대지저항률  $\rho_0$

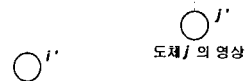


그림 1. 다상회로

2.2 임피던스

선로 직렬임피던스 Z는 전선자체의 도체 내부임피던스  $Z_c$  및 전선의 쿨로전류가 통과하여 나타나는 대지위로 임피던스  $Z_e$ 의 합으로 식 (1)과 같이 주어진다.

$$[Z] = [Z_c] + [Z_e] \quad [\Omega/m]$$

----- (1)

여기서, [ ]는  $n \times n$ 의 정방행렬을 나타낸다.

2.2.1 도체내부 임피던스

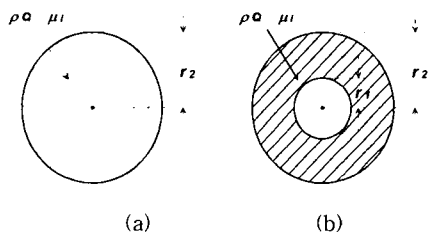


그림 2. 전선의 단면

전선도체의 단면은 그림 2와 같이 내실원주 또는 ACSR과 같이 내부에 강심이 있는 속이 빈 원통형으로 보는 중공원통이 있다. Gary, Deri 등이 Carson의 식을 단순화시킨 아래 식 (2)가 EMTP에서 가공송전선로의 정수를 구하는 보조프로그램인 LINE CONSTANTS에 사용되었다.

$$Z_{cii} = R_i + j\omega \left( \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h_i + p_c)}{r_i} + X_i \right) \quad [\Omega/m] \quad \text{----- (2)}$$

여기서,  $X_i = \frac{\mu_0}{8\pi}$ 는 도체 i의 내부인덕턴스이며 전체 인덕턴스에 비하여 매우 작은 값이므로 EMTP의 선로정

수 계산에서는 무시되었다. 또한 이 내부임피던스의 근사식으로는 식 (3)을 이용할 수 있다.

$$Z_c \cong R_{dc} \sqrt{1 + \frac{j\omega \mu_c S}{R_{dc} l^2}} \quad (3)$$

여기서  $R_{dc} = \frac{\rho_c}{S}$ : 직류저항,

$S = \pi(r_2^2 - r_1^2)$ : 도체단면적

$l = 2\pi r_2$ : 도체의 바깥둘레

위의  $Z_c$ 의 최대오차는 높게는 10 [%] 정도이다.

### 2.2.2 대지귀로 임피던스

대지귀로 임피던스의 주파수 의존효과를 고려한 정밀해는 Carson, Pollaczek에 의한 무한적분형으로 주어지고 있으나, 그 해는 컴퓨터에 의한 수치계산이 필요하다. 이에 대하여 Deri 등의 임피던스 계산식은 탁상계산기로 계산이 가능하고 그의 오차도 통상, 최대 4 [%] 정도로서 매우 실용적이다.

$$Z_{ei} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(h_i + h_i + 2p_c)^2 + y_{ij}^2}}{d_{ij}} \quad [\Omega/m] \quad (4)$$

여기서  $d_{ij} = \sqrt{(h_i - h_j)^2 + y_{ij}^2}$

$p_c = \sqrt{\frac{\rho_c}{j\omega\mu_0}}$ : 대지의 침투깊이

$h_i$ : 도체 i 의 높이,  $r_i$ : 도체 i 의 반경

### 2.2.3 어드미턴스

전류와 전압의 관계는 식 (5)와 같다.

$$[I] = [Z]^{-1} [V] = [Y][V] \quad (5)$$

여기서 어드미턴스  $[Y] = [G] + j\omega[C]$ 이다.

코로나 방전이나 애자의 누설전류에 의해 생기는 콘덕턴스 성분은 보통 무시되는데, 이는 매우 낮은 주파수에서  $\omega L$ 과  $\omega C$ 가 무시할 수 있을 정도로 작아서 선로의 특성이 R과 G에 따라 결정되는 경우를 제외하고는 가공송전선에 거의 영향을 미치지 않기 때문이다. 매우 높은 주파수에서는 커패시턴스도 대지통전효과의 영향을 받으나 보통 100 [kHz]에서 1000 [kHz] 이하에서는 무시할 수 있다. 따라서 가공송전선로의 어드미턴스 Y는 식 (6)이 된다.

$$[Y] \cong [Y_s] = j\omega[C_s] = j\omega[P]^{-1} [S/m] \quad (6)$$

그림 1의 다상회로에서 전위계수 행렬 P는, 대각요소  $P_{ii}$ 와 비대각요소  $P_{ij}$ 의 식 (7) 및 식 (8)를 이용하여 구할 수 있다.

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad (7)$$

$$P_{ij} = P_{ji} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad (8)$$

$$= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt{(h_i + h_j)^2 + y_{ij}^2}}{\sqrt{(h_i - h_j)^2 + y_{ij}^2}}$$

#### (1) 다도체선로

초고압 이상의 선로에서는 그림 3에 나타난 바와 같이 1상의 선로를 복수의 소도체로 만든 다도체 선로가 널리 이용되고 있다. 그림 3에 나타난 1상이 m도체에 의해 구성된 다도체 선로의 경우, 도체 내부임피던스는 1상분 m본의 평행회로가 되고 그 값은  $1/m$ 로 된다. 대지귀로 임피던스 및 공간 어드미턴스는 n상 x m도체 = nm본의 소도체에 관하여 계산하고, 다음에 선로양단에서 각 상별로 m본의 소도체가 단락되어 동전위가 되는 것으로 하여 nm차 행렬을 n차 행렬로 축소하여 n

상 선로의 임피던스 및 어드미턴스를 구할 필요가 있다.

이상의 계산은 매우 복잡하여 m본 소도체 선로를 식 (9)로 주어지는 등가반경  $r_c$ 를 가진 단도체 선로로 바꾸어 놓는다. 즉, 그림 1의 다상 선로에서 상도체 i의 반경을  $r_i$ 라 하고 등가반경  $r_c$ 를 이용하여 임피던스, 어드미턴스를 계산하는 것이 보통이다. 여기서,  $r_c$ 는 소도체 반경, s는 소도체 간격이다.

$$r_c = m \sqrt{r_1 s_{12} s_{13} \dots s_{1m}} \quad [m] \quad (9)$$

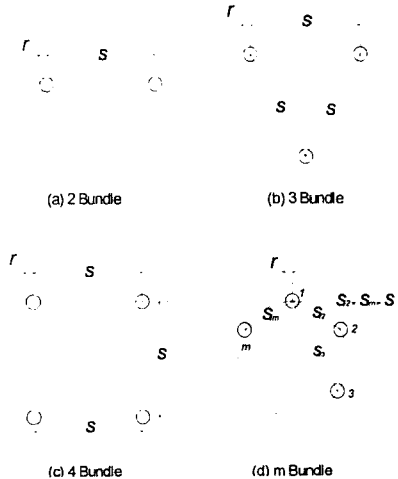


그림 3. 다도체 선로

#### (2) 가공지선의 영향

가공지선은 송전선에 대한 직격뢰를 방지하고 사고시 통신선 유도장해를 경감하기 위하여 전력선의 상부에 접지된 선을 가설한다. 이 가공지선은 보통 접지되어 있으며 그 대지전압은 거의 0이라고 생각해도 된다. 이 때문에 가공지선은 대지와 유사한 영향을 전력선에 미치고, 전력선의 임피던스는 가공지선의 유무에 따라서 크게 달라진다. 주파수  $f < 100$  [kHz]에서 가공지선의 전위는  $V_g=0$ 이 되어  $4 \times 4$  행렬은  $3 \times 3$  행렬로 축소하여도 된다. 지금 선로 임피던스행렬을 Z, 전압 V, 전류 I라 하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{ag} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bg} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} & Z_{cg} \\ Z_{ag} & Z_{bg} & Z_{cg} & Z_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_g \end{bmatrix} \quad (10)$$

위의 식에서  $V_g=0$ 가 되는 조건을 대입하면 가공지선의 영향을 고려하여 이것을 소거한 선로 임피던스 행렬이다. 어드미턴스의 경우에는  $4 \times 4$ 로 주어지는 행렬의 상부  $3 \times 3$  행렬이 가공지선을 소거할 때의 어드미턴스 행렬이 되는 것을 확실히 알 수 있다.

#### (3) 연가선로

500 kV 이하의 송전선에서는 임피던스, 어드미턴스를 평형시켜 전력선 특성을 향상시키고 동시에 통신선에의 유도장해를 저감할 목적으로 송전선의 각 상을 일정거리마다 연가를 한다. 연가를 2번 하면 3상 선로는 각 상이 거의 평형이 된다. 이 연가를 다수회(3의 배수) 반복하면 3상 선로는 완전 평형이 되고 이러한 선로를 완전연가선로라 한다.

#### (4) 임의단면도체

전력송전용 가공선 및 케이블의 도체단면은 원형이 일

반직이나 배전용 도체 또는 계측·통신용 도체는 원형단면이 아닌 경우가 많다. 임의의 단면을 가진 도체의 임피던스, 어드미턴스의 정밀한 이론식은 존재하지 않으며 이러한 경우에는 유한요소법에 기초한 수치계산에 의해 정밀해를 구하지 않으면 안된다.

지금 도체의 단면적을  $S$  [m<sup>2</sup>], 도체의 外周길이를  $l$  [m]라 하면, 이 도체는 중공원통도체로 보아, 식 (11)에서 주어지는 외반경  $r_2$  및 내반경  $r_1$ 을 가진 도체로 등가화 할 수 있다.

$$r_2 = \frac{l}{2\pi}, \quad r_1 = \sqrt{\left(\frac{l}{2\pi}\right)^2 - \frac{S}{\pi}} \quad [\text{m}] \quad \text{----- (11)}$$

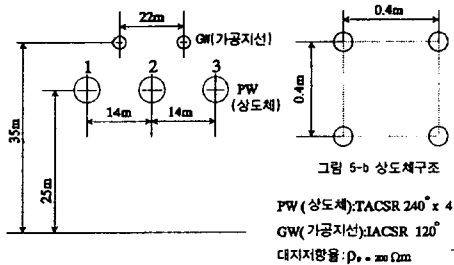
여기서  $l = 2\pi r_2$ ,  $S = 2\pi(r_2 - r_1)^2$

이 등가 도체를 이용하여 임피던스 및 어드미턴스 이론식을 적용하면 임의단면도체의 임피던스 및 어드미턴스를 구할 수 있다. 즉 도체내부의 임피던스만을 구하는 경우는 식 (5)를 직접 적용하면 된다. 이 근사 계산법에 의한 임피던스 계산결과와의 오차는 유한요소법에 의한 계산결과에 대비하여 자기 및 상호임피던스 모두  $f < 10$  [kHz]에서 2 [%] 이하,  $f < 1$  [MHz]에서 10~20 [%] 정도이다.

### 2.3 EMTP를 이용한 선로정수 계산

선로정수는 표, 공식 또는 EMTP를 이용하여 구할 수 있다. EMTP에는 선로정수를 계산하는 자체적인 루틴 "LINE CONSTANTS"가 있는데 주어진 공식을 이용하여 모든 인덕턴스와 정전용량을 계산한다. EMTP 내에서 사용되는 공식은 표피효과와 대지고유저항에 의해 발생되는(Carson의 공식을 이용) 주파수 의존 특성을 충분히 고려하고 있다. "LINE CONSTANTS"에 필요한 정보는 다음과 같다.

- 각 도체의 상대적인 위치
- 각 도체와 대지의 저항률
- 각 도체의 size
- 각 도체가 상도체 또는 대지에 연결되었는지 여부



## 2.4 Cable Constants

### 2.4.1 EMTP에서의 케이블 모델

#### (1) 정상상태 모델

케이블은 가공선로와 같이 공칭(또는 등가)  $\pi$ -회로로 나타낼 수 있다. 케이블 내의 전파속도가 느리기 때문에 동일 주파수에서 가공선로에 비해 파장이 짧아지고, 통상 가공선로의 공칭  $\pi$ -회로 모델은, 60 Hz에서 선로 길이가 100 km 이하인 경우에 적용할 수 있음에 반해, 케이블은 30 km 이하인 경우에만 적용할 수 있다. 그러나 파이프형 케이블의 경우에는 파이프의 투자율이 대단히 크기 때문에 파이프 커로 전류가 매우 크므로, 대략 1 km 이내인 경우에만 공칭  $\pi$ -회로 모델을 적용할 수 있다.

#### (2) 과도상태 모델

##### 가. 짧은 케이블

가공선로를 따라 진행해오던 수직상승파(Step파)가, 상대적으로 매우 짧은 케이블에 도달하면, 케이블 말단

은 집중 커패시턴스 효과를 나타내고, 케이블단의 전압은 시정수  $T = Z_{overhead} \cdot C_{cable}$ 를 갖는 지수 함수로 표현할 수 있다.

짧은 케이블 선로는 통상 공칭  $\pi$ -회로 모델이 적용되고 있는데, 이러한 모델은 주파수 의존성을 무시하게 된다. 공칭  $\pi$ -회로 모델도 단일 집중 커패시턴스 모델로도 충분한 경우에만 적용할 수 있다.

## 2.4 EMTP를 이용한 배전선 정수 계산결과

전력선	중성선	가공지선	정상,역상 % 임피던스	영상 % 임피던스		
		단면적 Ω · m	저항 RSI	리액턴스 XSI(상상)	RS0	XS0
ACSR-032	대지고유저항	22mm <sup>2</sup>	17.14552	8.69032	26.28039	22.69465
		300	17.14550	8.69034	26.50331	22.83252
ACSR-058	대지고유저항	22mm <sup>2</sup>	9.48094	8.26290	18.61580	22.26731
		300	9.48092	8.26292	18.83866	22.40518
ACSR-058	대지고유저항	22mm <sup>2</sup>	9.48085	8.26281	17.08245	20.60354
		300	9.48083	8.26283	17.24134	20.71147
ACSR-095	대지고유저항	22mm <sup>2</sup>	5.74505	7.90141	13.34666	20.24218
		300	5.74501	7.90143	13.50554	20.34992
ACSR-095	대지고유저항	22mm <sup>2</sup>	5.74495	7.90136	11.89701	19.49543
		300	5.74493	7.90137	12.01186	19.59745
ACSR-160	대지고유저항	22mm <sup>2</sup>	3.47669	7.43733	9.62876	19.03135
		300	3.47667	7.43737	9.74360	19.13331
ACSR-240	대지고유저항	22mm <sup>2</sup>	2.29715	7.13859	8.44923	18.73259
		300	2.29713	7.13861	8.56408	18.83460

## 3. 결 론

금번 연구에서는, 22.9kV 배전선로의 고장전류 및 선로손실 계산의 기초자료로 활용하고 있는 배전선로 선종별 임피던스값을 산출하기 위하여 동일한 프로그램을 사용하여 계산하였다. 현재 활용하고 있는 전선의 임피던스에 대한 근거가 명확하지 않아서 그 계산결과에 대한 근거를 확보하고자 하였다. 검토 내용은 요청된 내용들을 바탕으로 각 선종의 튜블로 기하학적 위치와 물리적인 제정수를 사용하여 결과를 얻었으며, 가변 가능한 변수들은 모두 조정하여 상호 비교하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] ATP, "EMTP Rule Book", Vol. 1, 2, 1987
- [2] IEC, "IEC 62271-100-2001",
- [3] J. Duncan Glover, "Power System Analysis and Design", Third edition, pp 356-360, 2001
- [4] 전력연구원, "송배전선로 제페로방식 최적화 연구", 최종보고서, 1998
- [5] 일본 전력중앙연구소, "UIIV 송전 특별위원회제통부회 보고서-UIIV 교류 송전계통의 특성", pp 35, 1982