

## 2단 장주로 구성된 배전선로의 인접 통신선에 대한 유도전압 계산

김현수\*, 이상봉\*, 김철환\*, 류승현\*\*  
성균관대학교\*, 영동대학교\*\*

### An Induced Voltage Calculation on Telecommunication Line of Two Step Type Pole in Distribution Lines

Hyoun-Su Kim\*, Sang-Bong Rhee\*, Chul-Hwan Kim\*, Seung-Heon Lyu\*\*  
Sungkyunkwan University\*, Youngdong University\*\*

**Abstract** - This paper presents a calculation method of an induced voltage on telecommunication lines using primitive impedance matrix. The advantages of the method are using actual neutral current value and not using screening factor for considering the overhead ground wire and neutral wire. To verify the effectiveness and accuracy of the method, case studies are performed with EMTP (Electro-Magnetic Transient Program).

의 상시유도전압,  $w$ 는 60[Hz]에 대한 각속도,  $M$ [H/km]은 전력선과 통신선의 상호인덕턴스,  $\ell$ [km]은 전력선과 통신선의 병행거리,  $I_N$ 은 중성선 전류[A],  $K_{21}$ 은 중성선의 차폐계수,  $K_3$ 는 통신선의 차폐계수,  $K_7$ 은 통신선 케이블 조수에 의한 유도 저감계수이다.  $K_{21}$ 은 계통의 중성선이 2조이거나 가공지선을 시설하였을 경우 차폐계수이며 다음과 같다[2, 3].

$$K_{21} = 1 - \frac{Z_m}{Z_s}, \quad (0 \leq K_{21} \leq 1) \quad (2)$$

#### 1. 서 론

유도장해는 송배전선로 또는 전기철도 등의 전압에 의한 정전유도 작용과 전류에 의한 전자유도 작용으로 구분할 수 있으며 이러한 유도장해는 인근 통신선로에 미치는 영향이 지나쳐 통신시설의 절연파괴나 운용방해를 유발하고 인체에 직접간접으로 위협을 초래한다. 특히, 전력선의 강전류에 의한 전자유도 작용에 의한 인접 통신선의 전압 유도는 통신선에 이상전압 또는 전류를 흐르게 하여 통신선로에서 원치 않는 잡음을 유발하므로 통신장해의 중요한 원인중의 하나가 된다. 따라서 정확한 유도전압의 계산은 송배전 선로의 건설, 중설, 운용 및 유지 보수 시 중요한 고려 사항이다[1].

기존 배전계통의 유도전압 계산 방법은 중성선과 가공지선을 차폐계수로 산정한 후 중성선에 흐르는 전류는 상전류의 20[%]로 하여 유도전압을 계산하였다. 그러나 차폐계수의 산정 방법에 유도, 피유도 기관간의 이견이 항상 문제로 대두되었으며 또한, 중성선 전류의 실제 값이 아닌 임의의 값 사용으로 실제 유도되는 전압간의 오차가 존재해 왔다[2].

본 논문에서는 유도전압의 계산에 있어서 차폐계수를 사용하지 않고 선로 구성에 의한 중성선, 가공지선과 통신선의 상호 임피던스를 사용하고 실제 부하 불평형에 의한 중성선 전류를 변수로 이용하여 유도전압을 계산하였다. 또한 이를 이용하여 현재 한국전력의 배전 운용 시 많이 사용되고 있는 2단 장주에서의 유도전압을 계산하였으며 유도전압 계산식의 신뢰성을 확인하고자 EMTP(Electro-Magnetic Transient Program)을 이용하여 모의시험 후 결과를 비교하였다.

#### 2. 통신선에서의 유도전압

##### 2.1 기존 배전선로 유도전압 계산

$$V_L = \sum V_E = \sum [jw \cdot M \cdot I_N \cdot \ell \cdot K_{21} \cdot K_3 \cdot K_7] \quad (1)$$

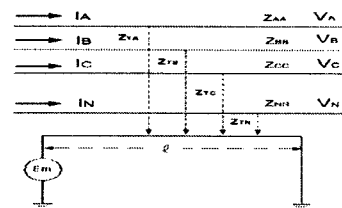
식 (1)은 기존의 배전선로 유도전압 계산식이며 여기서,  $V_L$ [V]는 배전선로의 상시 유도 종전압,  $V_E$ [V]는 1 구간

여기서,  $Z_m$ 은 전력선과 중성선간의 상호 임피던스,  $Z_s$ 은 중성선의 대지 귀로 자기 임피던스이다. 본 논문에서는  $K_3$ 과  $K_7$ 은 1로 적용하고 모의시험과 계산식에 이용하였다[1].

기존 유도전압 계산식인 식 (2)에서 보면 배전계통의 가공지선과 중성선의 영향을 차폐계수로 계산하여 통신선의 유도전압 저감의 개념으로 적용하였으나 실제 유도를 피유도 기관간의 사용 값이 다르고 계산상에 상당한 어려움을 갖고 있다. 또한  $I_N$ 의 선정에 있어서는 단순히 계통 상전류의 20[%]를 사용하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 통신선에 대한 유도전압을 계산함에 있어 차폐계수를 사용하지 않는 방법인 선로 임피던스 모델을 사용하였으며, 중성선 전류의 선정에 있어서도 실제 중성선 전류를 계산하여 사용하였다. 특히, 최근 일반적인 배전장주 형태인 2단 장주에서의 유도전압을 해석하기 위하여 기존 선로 임피던스 행렬을 2단 장주에 관한 선로 임피던스로 확장하여 유도전압을 계산하였다.

##### 2.2 선로 임피던스 행렬을 이용한 유도전압 계산



<그림 1> 배전선로의 전자유도

<그림 1>에서 전력선 및 중성선의 전류가 흐르고 있는 경우, 이와 병행해서 가설된 통신선의 유도 전압은 전력선, 중성선, 그리고 통신선에서의 전류와 상호간의 임피던스  $Z_{ij}$ 을 이용해서 전압과 전류의 관계로 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 상호 임피던스 행렬을 구하기 위하여 Carson의 공식을 적용하였다. 여기서,  $Z_{ii}$ 는 자기임피던스,  $Z_{ij}$ 는 상호 임피던스이다[4].

$$Z_i = R + 0.00158836f + j0.00202237f \left( \ln \frac{1}{GMR} + 7.6786 + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) [\Omega/\text{mile}]$$

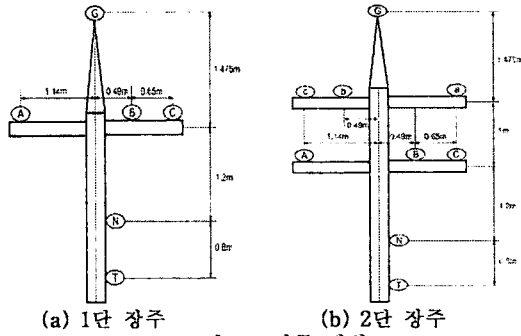
$$= R + 0.0592 + j(6.74592 - \ln GMR) [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_j = 0.00158836f + j0.00202237f \left( \ln \frac{1}{D} + 7.6786 + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) [\Omega/\text{mile}]$$

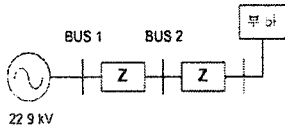
$$= 0.0592 + j(6.74592 - \ln D) [\Omega/\text{km}] \quad (3)$$

여기서,  $R$ 은 도체의 직류저항,  $GMR$ 은 도체 기하평균 반지름,  $D$ 는 선로간 기하평균 거리,  $f$ 는 주파수,  $\rho$ 는 대지고유저항이다. 본 논문에서는 주파수는 60[Hz], 대지고유저항은 100[ $\Omega \cdot \text{m}$ ], 병행하는 통신선의 길이는 길이는 1[km]로 계산하였다.

### 2.2.1 1단 장주의 유도전압 계산



<그림 2> 장주 제형



<그림 3> 배전 계통

그림 2(a)는 가공배전선로의 1단 장주도이고, 그림 2(b)는 가공배전선로의 2단 장주도이다. 선종은 가공지선 ACSR 32mm<sup>2</sup>, 전력선 ACSR 160mm<sup>2</sup>, 중성선 ACSR 95mm<sup>2</sup>, 통신선 FS 22mm<sup>2</sup>를 적용하였고, 그림 3은 모의 시험은 배전계통도이다. 구간별의 간격은 1[km]이다.

1단 장주에서 전류와 전압의 관계는 선로 임피던스 행렬을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_G \\ V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_N \\ V_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{GG} & Z_{GA} & Z_{GB} & Z_{GC} & Z_{GN} & Z_{GT} \\ Z_{AG} & Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} & Z_{AN} & Z_{AT} \\ Z_{BG} & Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} & Z_{BN} & Z_{BT} \\ Z_{CG} & Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & Z_{CN} & Z_{CT} \\ Z_{NG} & Z_{NA} & Z_{NB} & Z_{NC} & Z_{NN} & Z_{NT} \\ Z_{TG} & Z_{TA} & Z_{TB} & Z_{TC} & Z_{TN} & Z_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_G \\ I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_N \\ I_T \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, 가공지선은 낙뢰 방지목적으로 설치되므로 전력선 상부에 가설되고 접지가 되어 있어 거의 영전위라고 가정할 수 있다.

$$V_C = Z_{CG}I_G + Z_{CA}I_A + Z_{CB}I_B + Z_{CC}I_C + Z_{CN}I_N = 0 \quad (5)$$

식 (5)를 이용해서 1단 장주에서의 가공지선 전류는 다음과 같다.

$$I_G = - \frac{Z_{CA}I_A + Z_{CB}I_B + Z_{CC}I_C + Z_{CN}I_N}{Z_{CG}} \quad (6)$$

1단 장주의 중성선 전류는 식 (7)과 같다.

$$I_N = I_A + I_B + I_C \quad (7)$$

식 (4)를 이용해서 1단 장주에서의 통신선 유도전압 ( $V_T$ )은 다음과 같다.

$$V_T = Z_{TG}I_G + Z_{TA}I_A + Z_{TB}I_B + Z_{TC}I_C + Z_{TN}I_N \quad (8)$$

### 2.2.2 2단 장주의 유도전압 계산

배전계통의 장주가 2단으로 구성된 경우는 그림 2(b)와 같으며 사용된 선종은 1단 장주의 경우와 같다. 1단 장주에서의 경우와 같이 2단 장주에서의 유도전압은 다음과 같은 선로 임피던스 행렬을 사용하여 구할 수 있다 [5].

$$\begin{bmatrix} V_G \\ V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_N \\ V_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{GG} & Z_{Ga} & Z_{Gb} & Z_{Gc} & Z_{GA} & Z_{GB} & Z_{GC} & Z_{GN} & Z_{GT} \\ Z_{Ga} & Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{Aa} & Z_{Ab} & Z_{Ac} & Z_{AN} & Z_{AT} \\ Z_{Gb} & Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{Ba} & Z_{Bb} & Z_{Bc} & Z_{BN} & Z_{BT} \\ Z_{Gc} & Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{Ca} & Z_{Cb} & Z_{Cc} & Z_{CN} & Z_{CT} \\ Z_{AG} & Z_{Aa} & Z_{Ab} & Z_{Ac} & Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} & Z_{AN} & Z_{AT} \\ Z_{BG} & Z_{Ba} & Z_{Bb} & Z_{Bc} & Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} & Z_{BN} & Z_{BT} \\ Z_{CG} & Z_{Ca} & Z_{Cb} & Z_{Cc} & Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & Z_{CN} & Z_{CT} \\ Z_{NG} & Z_{Na} & Z_{Nb} & Z_{Nc} & Z_{NA} & Z_{NB} & Z_{NC} & Z_{NN} & Z_{NT} \\ Z_{TG} & Z_{Ta} & Z_{Tb} & Z_{Tc} & Z_{TA} & Z_{TB} & Z_{TC} & Z_{TN} & Z_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_G \\ I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_N \\ I_T \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$V_G = Z_{GG}I_G + Z_{Ga}I_a + Z_{Gb}I_b + Z_{Gc}I_c + Z_{GA}I_A + Z_{GB}I_B + Z_{GC}I_C + Z_{GN}I_N = 0 \quad (10)$$

2단 장주에서의 가공지선 전류는 식(11)과 같다.

$$I_G = - \frac{Z_{Gabc}I_{abc} + Z_{GABC}I_{ABC} + Z_{GN}I_N}{Z_{GG}} \quad (11)$$

여기서,  $Z_{Gabc}I_{abc} = Z_{Ga}I_a + Z_{Gb}I_b + Z_{Gc}I_c$   
 $Z_{GABC}I_{ABC} = Z_{GA}I_A + Z_{GB}I_B + Z_{GC}I_C$

2단 장주의 중성선 전류는 상단, 하단의 상전류 합이며 식(12)와 같다.

$$I_N = I_a + I_b + I_c + I_A + I_B + I_C \quad (12)$$

2단 장주에서의 유도전압은 식(13)에 의해 구할 수 있다.

$$V_T = Z_{TG}I_G + Z_{Ta}I_a + Z_{Tb}I_b + Z_{Tc}I_c + Z_{TA}I_A + Z_{TB}I_B + Z_{TC}I_C + Z_{TN}I_N \quad (13)$$

## 3. 사례연구

### 3.1 1단 장주 사례연구

1단 장주의 사례연구를 위해 표 1과 같이 평형, 1상 불평형, 그리고 3상 불평형 부하를 사용하였고 기존의 계산방법인 식(1)과 임피던스 행렬을 이용한 식 (4)의 결과를 서로 비교하였다.

<표 1> 1단 장주 사례연구

|        | case 1 | case 2 | case 3 |
|--------|--------|--------|--------|
| 부하 [S] | $P_A$  | 1000   | 1000   |
|        | $P_B$  | 1000   | 900    |
|        | $P_C$  | 1000   | 800    |

표 2은 계산값과 모의시험 결과이다. 여기서  $V_i$ 는 기존의 유도전압 계산방법,  $V_T$ 는 본 논문에서 사용한 임피던스를 이용한 계산 방법, 그리고 EMTP 모의시험 결과는  $V_{EMTP}$ 이다. 오차율은  $V_T$ 를 기준으로 계산하였다. 사례 연구 결과 임피던스 행렬을 이용한 방법의 계산 오차는 최대 6[%]로 유도전압의 계산에 있어서 기존 방법보다 정확한 방법임을 알 수 있다.

<표 2> 1단 장주 사례연구 결과

|                    |                | case 1      | case 2      | case 3       |
|--------------------|----------------|-------------|-------------|--------------|
| 전류 [A]             | la             | 13.22∠0°    | 13.22∠0°    | 13.22∠0°     |
|                    | lb             | 13.22∠-120° | 13.22∠-120° | 14.69∠-120°  |
|                    | lc             | 13.22∠120°  | 18.89∠120°  | 16.53∠120°   |
|                    | ln             | 0∠0°        | 5.67∠120°   | 2.87∠146.31° |
| $V_i$ [V] rms      |                | 0.491       | 0.701       | 0.613        |
| $V_T$ [V] rms      |                | 0.0713      | 4.35        | 2.226        |
| $V_{EMTP}$ [V] rms |                | 0.07594     | 4.3295      | 2.216        |
| 오차율                | $V_i$ [%]      | 588.64      | 83.89       | 72.46        |
|                    | $V_{EMTP}$ [%] | 6.51        | 0.47        | 0.45         |

### 1단 장주 병행 거리에 따른 유도 종전압

표 3은 1단 장주의 통신선 병행 거리에 대한 유도 종전압의 모의시험 결과이며 표 2의 case 3을 적용하여  $V_T$  기준으로  $V_i$ 와  $V_{EMTP}$ 에 대한 오차율을 구하였다. 유도 종전압의 경우에서도 임피던스를 이용한 방법이 기존 방법보다 정확함을 알 수 있다.

<표 3> 유도 종전압 결과(1단 장주)

| 병행거리 [km] | $V_T$ | $V_i$  |        | $V_{EMTP}$ |        |
|-----------|-------|--------|--------|------------|--------|
|           |       | 계산값[V] | 오차율[%] | 계산값[V]     | 오차율[%] |
| 1         | 2.226 | 0.613  | 72.46  | 2.2160     | 0.45   |
| 2         | 4.452 | 1.226  | 72.46  | 4.4109     | 0.92   |
| 3         | 6.678 | 1.839  | 72.46  | 6.5839     | 1.41   |
| 4         | 8.904 | 2.452  | 72.46  | 8.7339     | 1.91   |
| 5         | 11.13 | 3.065  | 72.46  | 10.862     | 2.41   |

### 3.2 2단 장주 사례연구

2단 장주의 유도전압 사례연구를 위하여 상, 하단의 부하를 표 1의 부하로 동일하게 선정하였다. 즉, case 4의 경우에는 상, 하단 모두 부하 평형인 상태, case 5의 경우에는 상, 하단 1상(C상) 부하 불평형, 그리고 case 6의 경우에는 case 3과 같이 상, 하단 모두 부하 불평형인 상태이다.

<표 4> 2단 장주 사례연구 결과

|                    |                | case 4      | case 5      | case 6       |
|--------------------|----------------|-------------|-------------|--------------|
| 전류 [A]             | la, la         | 13.22∠0°    | 13.22∠0°    | 13.22∠0°     |
|                    | lb, lb         | 13.22∠-120° | 13.22∠-120° | 14.69∠-120°  |
|                    | lc, lc         | 13.22∠120°  | 18.89∠120°  | 16.53∠120°   |
|                    | ln             | 0∠0°        | 11.34∠120°  | 5.74∠146.31° |
| $V_i$ [V] rms      |                | 0.967       | 1.901       | 0.877        |
| $V_T$ [V] rms      |                | 0.108       | 8.728       | 4.465        |
| $V_{EMTP}$ [V] rms |                | 0.1152      | 8.633       | 4.4045       |
| 오차율                | $V_i$ [%]      | 739.37      | 78.22       | 80.36        |
|                    | $V_{EMTP}$ [%] | 6.67        | 1.09        | 1.35         |

표 4는 2단 장주 유도전압의 계산값과 모의시험 결과이다. 여기서  $V_i$ 는 기존 유도전압 계산방법의 결과이고  $V_T$ 는 본 논문에서 사용한 임피던스 행렬을 이용한 계산 결과이다. EMTP 모의시험 결과는  $V_{EMTP}$ 이다. 오차율 계산에 있어서는  $V_T$ 를 기준으로  $V_i$ 와  $V_{EMTP}$ 를 구하였다. 사례연구 결과 오차율에서는 1단 장주의 계산 결과

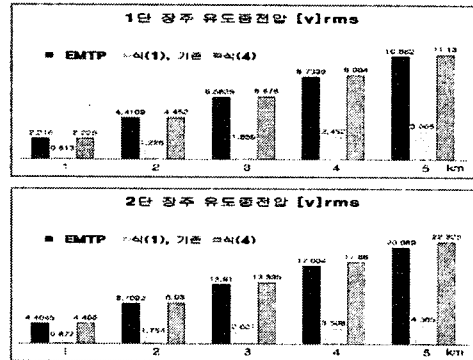
와 마찬가지로 행렬을 이용한 방법이 정확함을 알 수 있었다.

### 2단 장주 병행 거리에 따른 유도 종전압

표 5와 그림 3은 2단 장주의 병행 거리에 대한 상시유도 종전압의 결과이며 case 6의 경우에  $V_T$ 를 기준으로  $V_i$ , 그리고  $V_{EMTP}$ 에 대한 오차율을 구하였으며 기존 방법보다 적은 오차율을 갖음을 알 수 있었다.

<표 5> 유도 종전압 결과(2단 장주)

| 병행거리 [km] | $V_T$  | $V_i$  |        | $V_{EMTP}$ |        |
|-----------|--------|--------|--------|------------|--------|
|           |        | 계산값[V] | 오차율[%] | 계산값[V]     | 오차율[%] |
| 1         | 4.465  | 0.877  | 80.36  | 4.4045     | 1.35   |
| 2         | 8.930  | 1.754  | 80.36  | 8.7092     | 2.47   |
| 3         | 13.395 | 2.631  | 8036   | 12.910     | 3.62   |
| 4         | 17.860 | 3.508  | 80.36  | 17.004     | 4.79   |
| 5         | 22.325 | 4.385  | 80.36  | 20.989     | 5.98   |



<그림 4> 1단 및 2단 유도 종전압 결과

## 4. 결론

본 논문에서는 기존 배전선로에서의 유도전압 계산식의 단점을 보완한 선로 임피던스 행렬을 이용하여 유도전압을 계산하였다. 또한, 2단 장주 배전선로에서의 유도전압을 계산하기 위하여 선로 임피던스 행렬을 확장하여 적용이 가능토록 하였다.

EMTP 모의시험을 이용한 사례연구 결과, 유도전압의 계산에 있어서 본 논문에서 사용한 방법은 기존의 방법보다 오차가 적음을 확인 할 수 있었으며 또한 실제 중성선에 흐르는 전류값을 고려하여 적용하므로 좀 더 정확한 방법이라고 판단된다.

향후 2단 장주 선로 임피던스 행렬의 정확한 모델링을 통해 고장 발생시 통신선의 유도전압 계산, 분석에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사, "배전설계(1)" 1992. 1
- [2] 이상무, 김용환, 조병동, "통신선에 대한 정격유도장에발생 근접유도분석", 전자통신동향분석, 제18권 제2호, 2003년 4월
- [3] Ghada M. Amer, "Novel technique to calculate the effect of electromagnetic field of HVTL on the metallic pipelines by using EMTP program", The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol.26, No.1, 2007
- [4] William H. Kersting, "Distribution SyStem Modeling and Analysis", CRC Press, 2002
- [5] William H. Kersting, "The Modeling and Analysis of Parallel Distribution Lines", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, No. 5, Sep/Oct., 2006