

# P.C.에 의한 GIS형 AC Substation의 접지계 설계

論 文
3-4-3

(Grounding System Design of GIS type AC Substation using Personal Computer)

任 漢 錫\* · 金 王\*\*  
(Han-Suck Yim · Wang Kim)

### 요 약

GIS(Gas-Insulated Switchgear)형 옥내변전소에 있어서 접지계의 구성은 접지도체를 포설할 수 있는 면적이 협소하기 때문에 특별한 설계방법이 요구된다.

본 논문에서는 접지망의 전위해석과 축소형 변전소의 접지계 설계기법을 제시하였고, 아울러 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 프로그램을 작성하고, 그 시뮬레이션 결과를 측정치와 비교하여 프로그램의 타당성을 입증하였다.

### Abstract

The structure of grounding system in GIS type indoor substation requires special design methods for the limited area of switchyard.

This paper presents the mathematical analysis of gradient problem and the grounding system design techniques of the compact substation.

A computer program is developed for the design of grounding system and the simulation results are compared with the field measurement to prove the effectiveness of the program.

### 1. 서 론

전력계통에 지락사고가 발생하면 고장전류가 대지속으로 유입하여 변전소 구내 및 주변에 있는 인축에 위험을 초래하게 되며, 접지한 철구나 기기의 외함 또는 지지물 부근의 대지간에 위험한 전위차

가 발생할 수 있다.<sup>1),2)</sup>

최근 송변전 설비의 대용량화, 축소화라는 상반된 여건 속에서 여하히 유효한 접지설계를 도모하느냐 하는 것은 중대한 문제가 아닐 수 없다.

따라서, 본 논문에서는 지금까지 부분적으로 발표된 악조건(부지협소, 고저항율지대) 하에서의 접지계 설계기법을 정리하고, 실제 설계에 적용 가능한 일반적으로 사용될 수 있는 프로그램을 개발하

\*正會員: 建國大 電氣工學科 教授 · 工博  
\*\*正會員: 東新專門大學 電子科 教授

여 전산처리 결과와 실측치를 비교하여 제시함으로써 그 타당성을 입증하고자 한다.

### 2. 접지망의 전위해석

일반적으로, 고유저항  $\rho$ 인 무한 균질매체내에서는 단위길이당 전류  $i$ 가 분산되는 선전류원(line source)으로부터 각각 거리  $r_1$ 과  $r_2$ 의 위치에 있는 두점  $X_1$ 과  $X_2$ 간의 전위차는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>3)</sup>

$$E_{12} = \frac{\rho i}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} (1/r) dr = \frac{I_i}{2\pi} \ln(r_2/r_1) \quad (1)$$

만일, 그림 1과 같이 선전류원이 지표면하의 깊이  $h$ 에 매설되어 있으며, 전체 공간이 고유저항  $\rho$ 인 매체로 채워져 있다고 가정할 때, 지표(여기서,  $X = Xi, i = 1, 2$ )상의 임의의 점  $X(x, 0)$ 에서는 도체 (1)과 영상도체(1\*)로부터 양쪽으로 흐르는 전류  $i$ 에 기인한 단위면적  $\delta_s$ 당 표면전류밀도는 공간 내에서의 벡터로써

$$\delta_s = \frac{i}{2\pi r} (\cos\alpha + j\sin\alpha) + \frac{i}{2\pi r^*} (\cos\alpha - j\sin\alpha) \quad (2)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서,  $\alpha$ 는 전류벡터  $\delta$  및  $\delta^*$ 의 방향과 수평면간의 각도이고

$$abst(r) = abst(r^*) = (X^2 + h^2)^{1/2}, \text{ 그리고 } \cos\alpha = X/r, \sin\alpha = y/r$$

이므로, 두점  $X_1$ 과  $X_2$ 간의 전위차는 스칼라로써 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_x(1) = \rho \int_{x_1}^{x_2} \delta_s ds = \frac{\rho i}{\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{xdx}{x^2 + h^2} = \frac{1}{2\pi} \rho i \ln \left[ \frac{x_2^2 + h^2}{x_1^2 + h^2} \right] \quad (3)$$

그림 2에 보인 바와 같이  $N$ 개의 등간격 평행도체와 그 도체들의 영상분의 한 set를 고려해 보면, 지표면상에 주어진 두점  $O(0, 0)$ 과  $X(-1/2D, 0)$ 간의 거리는  $1/2D$ 이고, 임의의 두 선전류원간의 거리는  $D$ 이다.

그림 2에서,  $k$ 번째 도체와 그 도체의 영상분에 의한  $O$ 에서  $X$ 까지의 지표상의 전위차는 식(4)와 같다.

$$E_x(k) = \frac{\rho i}{\pi} \int_0^{-1/2D} \frac{x(k) dx}{x(k)^2 + h^2}; x(k) = (k-1)D + x; k=1, 2, \dots \quad (4)$$

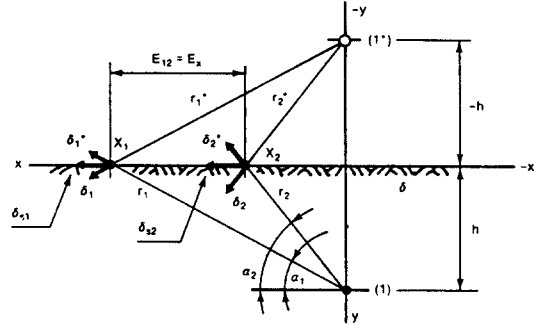


그림 1  $E_x(1)$ 의 계산을 위한 모델  
Fig. 1 Model for computation of  $E_x(1)$

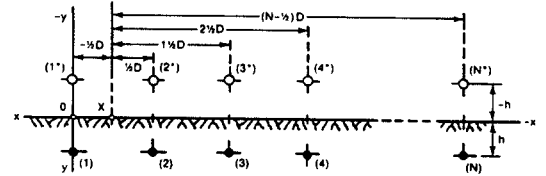


그림 2 모서리 메쉬와 병행도체의 중심선과 각 도체의 영상분간의 간격  
Fig. 2 Distances between the centerline of corner mesh and parallel conductors and their images

만일, 각 도체의 전계가 타 도체의 존재에 의해 영향을 받지 않는다고 가정하면,

$$E_x = \sum_1^N E_x(k) = \rho i K_{mx}(1, N) \quad (5)$$

로 된다.

여기서  $K_{mx}(1, N)$ 는 식(6)과 같다.

$$K_{mx}(1, N) = \frac{1}{2\pi} \sum_0^{N-1} \ln \left[ \frac{4h^2 + (2k-1)^2 D^2}{4h^2 + 4(kD)^2} \right] \quad (6)$$

한편,  $N$ 개의 도체와 그 도체들의 영상분 모두가 지락사고시 전위  $E_0$ 로 된다고 가정하면  $E_0$ 는 식(7)과 같이 된다.

$$E_0 = R_0 I_0 \quad (7)$$

여기서,

$R_0$ : 접지계 저항

$I_0$ : 대지로 유입하는 총합전류, 즉  $I_0 = i \cdot L$  ( $L$ : 매설도체의 총길이)

그리고, 첫번째 도체와 그 도체의 영상분에 의한  $o$

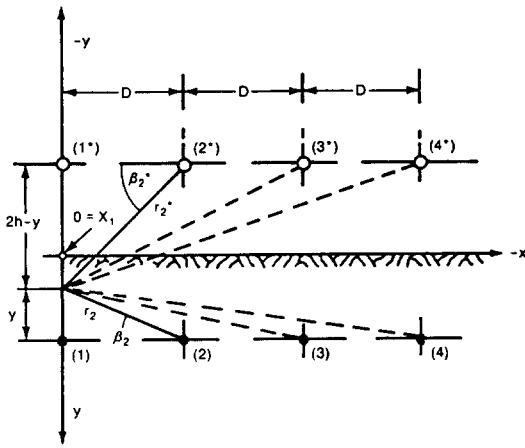


그림 3  $E_y(k)$ 의 계산을 위한 모델  
Fig. 3 Model for computation of  $E_y(k)$

지점에서의 전압은

$$V_o(1) = E_o - E_y(1)$$

여기서,

$$E_y(1) = \frac{1}{2\pi} \rho i \left[ \int_{\frac{1}{2}d}^h \frac{1}{y} dy + \int_{2h-\frac{1}{2}d}^h \frac{1}{y^*} dy^* \right] \quad (9)$$

같은 방법으로, 첫번째 이외의 임의의 다른 도체에 의한  $o$ 지점에서의 전압은 일반적으로 식(10)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$V_o(k) = E_o - E_y(k); k=2, 3, \dots, N \quad (10)$$

$E_y(k)$ 의 일반형은 식(11)과 같이 쓸 수 있다.

$$E_y(k) = c \int \frac{1}{r_k} dr + c \int \frac{1}{r_k^*} dr^* \quad (11)$$

여기서, (그림 3 참조)

$$r_k = \sqrt{y^2 + (k-1)^2 D^2}; dy = dr \sin \beta_k = y \frac{dy}{rk}; C = \frac{\rho i}{2\pi} \quad (12)$$

$$r_k^* = \sqrt{(2h-y)^2 + (k-1)^2 D^2}; dy = -dr^* \sin \beta_k^* = (y-2h) \frac{dy}{r_k^*} \quad (13)$$

따라서,  $E_y(k)$ 에 대한 적분해는

$$E_y(k) = \frac{\rho i}{2\pi} \int_{\frac{1}{2}d}^h \frac{y dy}{y^2 + (k-1)^2 D^2} + \frac{\rho i}{2\pi} \int_{\frac{1}{2}d}^h \frac{(y-2h) dy}{(2h-y)^2 + (k-1)^2 D^2} \quad (14)$$

$$= \frac{\rho i}{4\pi} \ell n \left[ \left\{ \frac{(k-1)^2 D^2 + h^2}{(k-1)^2 D^2 + 1/4d^2} \right\} \cdot \left\{ \frac{(k-1)^2 D^2 + h^2}{(k-1)^2 D^2 + (2h-1/2d)^2} \right\} \right]$$

각  $N$ 개인 실·허수 선전류원의 영향에 기인한  $o$ 지

점에서의 전압은 각각의 중첩에 의해 식(15)와 같다.

$$V_o = E_o - \sum_1^N E_y(k) = E_o - \rho i K_{my}(1, N) = E_o - E_y; E_y = \sum_1^N E_y(k) \quad (15)$$

여기서,

$$K_{my}(1, N) = \frac{1}{4\pi} \sum_0^{N-1} \ell n \left[ \frac{(kD)^2 + h^2}{(kD)^2 + 1/4d^2} \cdot \frac{(kD)^2 + h^2}{(kD)^2 + (2h-1/2d)^2} \right] \quad (16)$$

지금,  $X$ 지점에서의 전위는 (5)식에 의해 역시 (17)식과 같이 결정할 수 있다.

$$V_x = E_o - (E_x + E_y) = E_o - \rho i \left\{ K_{mx}(1, N) + K_{my}(1, N) \right\} \quad (17)$$

모든 접지된 구조체의 전위는  $E_o$ 이므로 그 접지된 물체와 지표면상의 임의의 점간의 접촉전압  $V_t$ 는

$$V_t = E_o - V_x = E_x + E_y \quad (18)$$

이러한  $N$ -도체 모델에 있어서는 실 모서리(true corner)가 없음에 유념하여  $V_t$ 는 " $N$ -도체 set"의 모서리 메쉬전압(corner mesh voltage)  $E_{mesho(N)}$ 라 간주할 수 있다. 따라서,

$$E_{mesho(N)} = E_x + E_y = \rho i K_m \quad (19)$$

여기서,

$$K_m = \text{메쉬전압계수}; K_m = K_{mx}(1, N) + K_{my}(1, N)$$

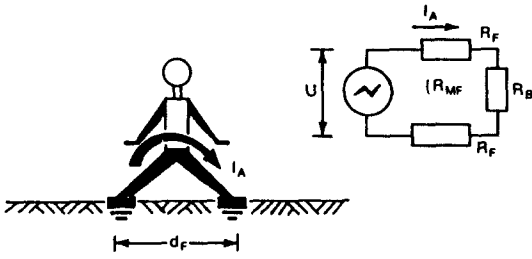
### 3. GIS형 옥내 변전소의 접지계 설계기법

GIS형의 옥내 변전소는 Switchyard가 협소하기 때문에 대지고유저항  $\rho$ 가 높을 경우에는 저임피던스 접지계를 얻기가 쉽지 않다. 따라서, 축소형 옥내 변전소의 접지계의 설계는 특별한 기법이 요구된다고 하겠다.

#### 3.1 Mesh형 접지

발변전소에서 널리 채택하고 있는 접지방식이지만, 부지가 협소하고 대지고유저항이 높을 경우에는 타 방법과 병행하여 사용하여야 더욱 효과적인 설계가 가능할 것이다.

임의의 사고회로의 최대 구동전압은 아래에 주어진 한계치를 초과하지 않아야 하며<sup>1),2)</sup> 보폭 및 접



$$d_F = 1(\text{m})$$

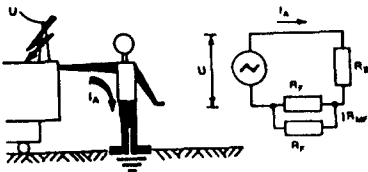
$$R_A = R_B + 2R_F - 2R_{MF}$$

$$I_A = U/R_A$$

(단,  $I_A$  및  $R_A$ : 각각 사고회로의 전류 및 총저항)

그림 4 보폭전압 등가회로

Fig. 4 Equivalent circuit of step voltage



$$R_A = R_B + \frac{1}{2}(R_F + R_{MF})$$

그림 5 접촉전압 등가회로

Fig. 5 Equivalent circuit of touch voltage

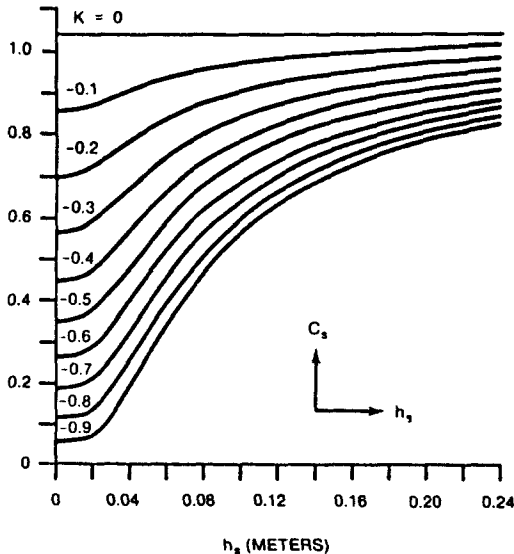


그림 6 감소계수( $C_s$ )

Fig. 6 Reduction factor( $C_s$ )

촉전압의 등가회로는 각각 그림 4 및 5와 같다.

먼저, 보폭전압에 대한 한계는

$$Estep = [R_B + 2(R_F - R_{MF})] I_B \quad (20)$$

여기서,

$R_B$ 는 인체의 저항(약 1,000)( $\Omega$ ),

$R_F$ 는 footing resistance( $\Omega$ ),

$R_{MF}$ 는 직렬로 된 양발간의 상호저항( $\Omega$ )이며,

$I_B$ 는 인체허용전류(A)이다.

따라서,

$$Estep = (1000 + 6C_s(h_s, K)\rho_s)\lambda/\sqrt{t_s} \quad (21)$$

(단,  $\lambda$ 값은 체중이 50kg인 경우 0.116, 70kg인 경우 0.157)

여기서,

$C_s$ : 보호층이 없는 경우 1, 보호층이 있는 경우는 그림 6으로부터 결정

$\rho_s$ : 지표면 보호재질의 고유저항( $\Omega\text{-m}$ )

$t_s$ : 고장지속시간(S)

$h_s$ : 접지자갈층의 두께(그림 6 참조)

$K$ : 반사계수( $K = \rho - \rho_s / \rho + \rho_s$ )

유사한 방법으로, 접촉전압 한계치는

$$Etouch = [R_B + \frac{1}{2}(R_F + R_{MF})] I_B \quad (22)$$

여기서,  $R_F$ 는 footing resistance이고,  $R_{MF}$ 는 병렬로 된 양발간의 상호저항이다. 따라서,

$$Etouch = (1000 + 1.5C_s(h_s, K)\rho_s)\lambda/\sqrt{t_s} \quad (23)$$

또한, 수평(그리드)과 수직(접지봉) 전극의 합성으로 이루어진 접지계의 총합저항  $R_\theta$ 는 Schwarz's eq.을 이용하면 식(24)와 같이 구할 수 있다.

$$R_\theta = \frac{R_{11}R_{22} - R_{12}^2}{R_{11} + R_{22} - 2R_{12}} \quad (24)$$

여기서,

$$R_{11}(\text{그리드의 저항}) = (\rho_1/\pi l_1)\{\ell_n(2\ell_1/h) + K_1(\ell_1/\sqrt{A}) - K_2\} \quad (25)$$

$$R_{22}(\text{접지봉의 합성저항}) = (\rho_a/2n\pi\ell_2)\{\ell_n(8\ell_2/d_2) - 1 + 2K_1(\ell_2/\sqrt{A})(\sqrt{n} - 1)^2\} \quad (26)$$

$$R_{12}(\text{수평·수직도체간의 상호저항}) = (\rho_a/\pi l_1)\{\ell_n(2\ell_1/\ell_2) + K_1(\ell_1/\sqrt{A}) - K_2 + 1\} \quad (27)$$

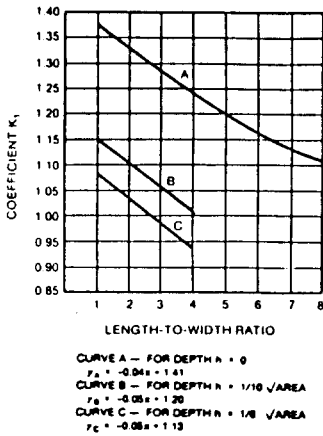
단,  $\rho_1$ : 그리드 매설지점의 고유저항( $\Omega\text{-m}$ )

$\rho_a$ : 접지봉 타입지점의 고유저항( $\Omega\text{-m}$ )

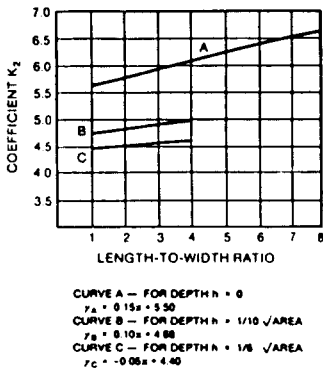
$\ell_1$ : 그리드 도체의 총길이[m]

$\ell_2$ : 접지봉의 평균길이[m]

$h$ : 그리드 도체 매설깊이[m]



(a)  $K_1$



(b)  $K_2$

그림 7 Schwarz식의 계수

Fig. 7 Coefficients  $K_1$  and  $K_2$  of Schwarz's formula

$h'$ : 깊이  $h$ 에 매설된 도체는  $\sqrt{d_1 h}$ ,  $h=0$ (지표상)에 포설된 도체는  $0.5d_1$

$d_1$ : 그리드 도체의 직경[m]

$d_2$ : 접지봉의 직경[m]

$A$ : 그리드 점유면적[m<sup>2</sup>]

$n$ :  $A$ 내의 접지봉 수효

$K_1, K_2$ : 접지계의 기하학적 구조에 관련된 상수 (그림 7참조)

### 3.2 구조체 접지

콘크리트는 보통의 암석보다 흡습성이 크므로 습윤상태에서는 저항률이 매우 낮기 때문에, 건축구

체(일종의 입체적 전기회로망)를 접지전극으로써 이용(미국의 H.G. Ufer가 제창한 것으로 "Ufer Electrode"로 알려져 있다) 하는 것은 매우 경제적이라 할 수 있으며, 접지의 본래 목적인 안전상 항상 관점에서 바라봐도 바람직하다고 할 수 있다.<sup>4)</sup>

구조체 지하부분의 연표면적을  $A(m^2)$ 라 하고 이것을 반구로 치환하여 놓으면

$$2\pi r^2 = A$$

이 되고, 구조체의 등가반경은

$$r = (A/2\pi)^{1/2}$$

따라서, 다음 식에 의해 접지저항을 간접적으로 결정할 수 있다.

$$R_U = \rho / 2\pi r = \rho / (2\pi A)^{1/2} = 0.4\rho / \sqrt{A} \quad (28)$$

또한, 콘크리트에 싸여진 전선 또는 금속봉은 땅속에 직접 매설된 유사전극보다 더 낮은 저항을 갖는데, 이것은 토양의 화학적 취급에서와 같이 금속 성분 주위에 있는 물질의 고유저항을 저감시키기 때문인데, 이러한 콘크리트 속에 넣어진 수직봉의 저항을 구하기 위해서는 다음 식을 이용한다.<sup>2)</sup>

$$R_{CE-rod} = \frac{1}{2\pi\ell} \left[ \rho_c \{ \ell_n(D/d) \} + \rho \{ \ell_n(8\ell/D) - 1 \} \right] \quad (29)$$

여기서,

$\rho_c$ : 콘크리트 저항률[ $\Omega \cdot m$ ]

$\ell$ : 접지봉 길이[m]

$d$ : 접지봉 직경[m]

$D$ : 콘크리트 틀의 직경[m]

### 3.3 접지전극의 심타

대지저항율은 일반적으로 층상구조를 이루고 있다. 지표 부근의 대지저항율이 높더라도 그 밑에는 비교적 저항률이 낮은 지층이 존재하는 경우가 많은데, 이러한 장소에 심타공법을 적용한다.

그림 8에 계절에 따른 접지극 매설깊이와 접지저항치간의 관계를 보였다.<sup>5)</sup>

### 3.4 저감제의 이용

접지저항 저감제에 의한 저감저항 접지방법은 도전성 물질을 대지에 고정하여 낮은 저항을 유지케 할 수 있는 화학처리에 의한 토양개량 방법인데, 이 방법은 시간이 경과함에 따라 그 신뢰도가 저하됨으로 유도(Safety Margin)로 간주하고 효율식등

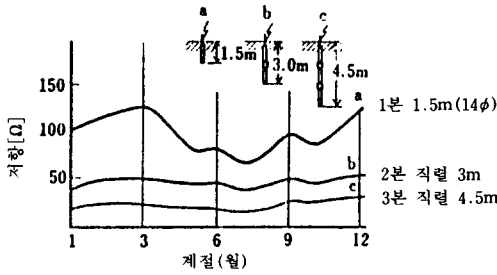


그림 8 매설깊이와 접지저항  
Fig. 8 Buried depth and resistance

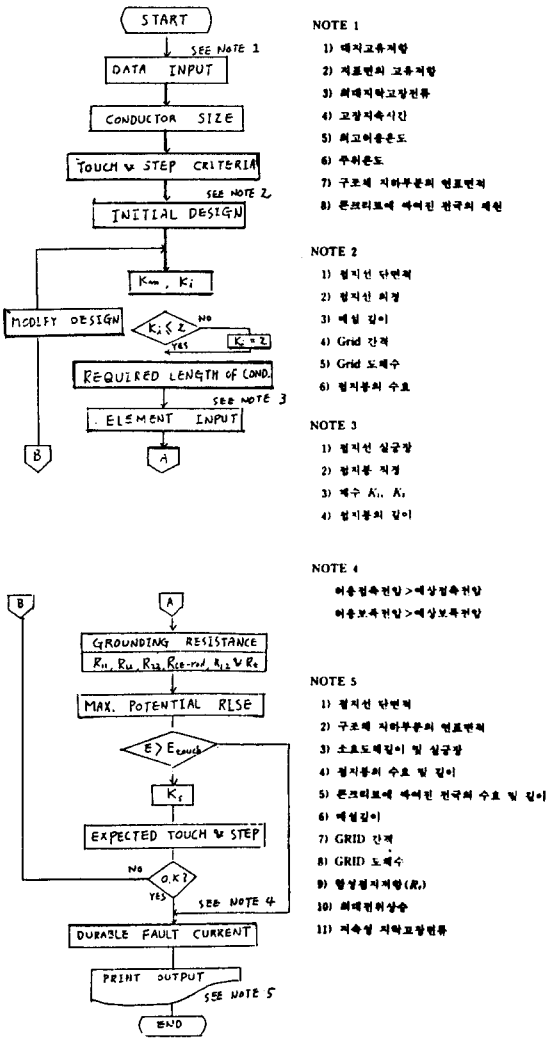


그림 9 프로그램의 흐름도  
Fig. 9 Flow chart

의 산출은 생략한다.

### 4. 시뮬레이션

#### 4.1 프로그램의 개요

일반적인 수치계산용 프로그램은 계산속도, 기억용량 절감등이 중요사항이라고 할 수 있겠지만 최적설계를 위한 본 접지설계용 프로그램과 같은 경우는 접지계에 주어지는 조건변경에의 적응성이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 이러한 적응성을 제고하기 위해서 본 프로그램은 단말장치를 통해서 인간-기계간의 상시대화를 확보토록하여 조작상의 오류를 즉시 확인할 수 있을 뿐만 아니라 나아가서는 단순한 집계나 통계를 내는 것과 그 성질이 근본적으로 다른 전문기술이 요구되는 접지설계 계산을 설계자가 의도하는대로 유도할 수 있게 하였다.

그림 9는 프로그램의 흐름도이며 프로그램은 IBM-PC/XT를 이용하여 개발하였으며, 프로그래밍 언어는 BASIC을 사용 하였다.

#### 4.2 적용사례

본 논문에서 개발한 프로그램의 타당성을 입증하기 위해 대표적인 154KV급 GIS형 옥내변전소를 선정하여, 그 전산처리 결과치와 실측치를 비교하였다. 표1은 계산제원이고 표2는 전산처리 결과치인데, 실측치와의 동조건에서의 비교를 위해서 실제 설계에 적용한 Mesh에 접지봉을 부가한 것으로 상정하여 계산하였다. (모델변전소 : 여수 s/s)

### 5. 결과의 고찰

시뮬레이션을 위한 모델변전소로 선정된 여수 s/s는 GIS형 옥내변전소이므로 부지가 협소(57×24(m))하기 때문에 그리드 간격을 최소화한 3(m)로 하였는데도 불구하고 소요길이를 포설하는데 문제(소요길이 : 1,400(m), 실제길이 : 1,263(m))가 있었으므로 Mesh에 심타방법의 일관된 접지봉 2개를 직렬연결하여 타설하므로써 문제를 해결하였으나, 대지저항을 지대인 경우라면 앞에서 제안(§ 3.1~3.4)한 모든 기법을 설계에 복합적으로 반영

표 1 입력자료  
Table 1 Input Data

Item	Data
Switchyard size(m)	57×24
Grid interval(m)	3
Buried depth(m)	2.1
Soil resistivity( $\rho$ -m)	150
Surface layer resistivity( $\rho$ -m)	3,000
Max. ground fault current(A)	22,500
Fault duration(sec)	1
Max. allowable temp.(°C)	880
Rod diameter(cm)	1.4
Surround temp.(°C)	40
Coefficient 1( $K_1$ )	1.08
Coefficient 2( $K_2$ )	4.7

표 2 전산출력과 실측치  
Table 2 Ouput & Measurement Data

Item	Data
Conductor size(mm <sup>2</sup> )	120 (200)
Required length of conductor(m)	1,400
Actual length of conductor(m)	1,263
Number of rods(ea)	196
Length of rods(m)	1.93
Grid interval in short side(m)	3
Grid interval in long side(m)	3
Number of conductors in short side(ea)	9
Number of conductors in long side(ea)	20
Max. potential rise(V)	35,344
Durable fault current(A)	2,085
Total resistance( $\rho$ )	1.57
Measured resistance( $\rho$ )	0.92

※ ( )의 숫자: 실제 적용도체 규격

하여 안전설계를 도모하여야 할 것이다.

또한, 최대지락전류의 선정은 일반적으로 여수 s/s와 같이 3상단락용량(154KV급: 10(GVA), 345KV급: 15(GVA))을 최대치로 간주하여 산출하는 것이 보통이나, 이러한 계산법은 안전한 설계는 될 수 있겠지만 과다설계가 되기 쉬우므로, 정

확한 계산에 의한 최대지락전류치의 선정이 요망된다.

마지막으로, 실측치는 전산처리 결과치와 잘 일치하고 있으며, 약간의 오차는 여유도로 처리한 저감제 등에 의한 효과로 생각된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 GIS형 옥내변전소의 효과적인 접지계 설계기법을 실용화 할 수 있도록 이론 및 실측자료를 정리하여 제시하였고, 시뮬레이션을 위한 프로그램은 단말장치를 통해 대화를 확보하므로써 단순한 계산에 그치지 않고 조작상의 오류를 즉시 확인하고 설계조건 변화에 대응한 적응성을 높임으로써 접지계 설계업무에 직접 활용될 수 있도록 하였으며 사례적용을 통해서 전산처리 결과치와 실측치를 비교하여 제시하므로써 설계기법과 프로그램의 타당성을 확인하였다.

각종 접지계 설계에의 실용화를 목표로한 본 연구의 주요성과는 아래와 같이 요약될 수 있다.

- i) 옥내 GIS형 변전소의 경제적이고 효과적인 접지계 설계기법을 제시하였다.
- ii) 고저항울지대에서의 안전설계를 유도할 수 있는 접지방법을 제시하였다.
- ii) 인간-기계간의 상시 대화를 확보하도록 일반화된 프로그램을 개발하므로써 각종 접지계 설계시 적용 가능하게 하였다.

앞으로, 과도저항 저감대책 및 토양이온화의 동적 효과 등에 대해서 검토되어야 할 것이며, 덧붙여서 접지계의 설계는 지락전류, 대지고유저항, 접지도체, 매설깊이, 접지망의 구성방법 그리고 보조접지극 등의 종합적인 결정 및 선정문제가 최적설계의 관건이 된다고 할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 1) KEPCO : 접지계 설계지침, 1984, pp.1~30
- 2) The Substation Committee of the IEEE : Guide for Safety in AC Substation Grounding, ANSI/IEEE Std 80~1986
- 3) J.G. Sverak, "Simplified Analysis of Electrical Gradient above a Ground Grid I-How Good Is

P.C에 의한 GIS형 AC Substation의 접지계 설계

- the Present Method ? ", IEEE Trans., Vol. PAS-103, No.1, pp.7~1984
- 4) 오ム社 : 地絡保護 と 接地技術, 1979
- 5) 電氣設備工事技術研究會 : 接地工社(設計・施工) マニュアル, 오ム社, pp.198~240, 1979