

## 메쉬접지극의 내부도체 배치에 따른 개선된 메쉬접지극 모델

(Improved Mesh Grounding Electrode Model by Changing Arrangements of Internal Conductors of the Mesh Grounding Electrode)

심용식\* · 최홍규 · 김태훈 · 송영주\*\*

(Yong-Sik Shim · Hong-Kyoo Choi · Tae-Hoon Kim · Young-Joo Song)

### 요 약

국내·외 메쉬접지극은 격자형태의 등간격 접지Grid로 설계하고 있다. 격자형 접지Grid의 경우 구석의 접촉전압이 중심 부분에 비해 높아지는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 사선형태의 접지Grid를 사용하면 메쉬전압이 발생하는 구석부분의 면적이 감소함으로써 메쉬전압이 감소한다. 따라서 본 논문에서는 기존의 격자형태의 접지Grid의 형태와 다르게 사선형태의 접지Grid를 제안하며, 격자형태의 접지Grid와 사선형태의 접지Grid로 설계된 메쉬접지극에 동일한 접지설계제원을 적용하고 메쉬전압, GPR, 접지저항, 접지도체의 총길이를 비교 검토하여 사선형태 접지Grid의 우수성을 검증하였다.

### Abstract

Mesh grounding electrodes in Korea and abroad are designed as lattice-shaped equidistance grounding grids. In case of a lattice-shaped grounding Grid, however, there is a problem of higher touch voltage at the corner of the grid relative to the center. To overcome this problem, we used oblique-shaped equidistance grounding grid to reduce the area of the corner where mesh voltage occurs. As a result the mesh voltage was reduced. Therefore, this paper suggests the use of oblique-shaped grounding grid instead of the existing lattice-shaped ones. It applied the same grounding design dimensions for both lattice-shaped and oblique-shaped grounding grids, compared and analyzed mesh voltage, GPR, ground resistance, total length of grounding conductor, verified that oblique-shaped grounding grid is superior to the lattice-shaped.

Key Words : Oblique-Shaped Equidistance Grounding Grid, Mesh Voltage, GPR, Ground Resistance

\* 주저자 : 홍익대학교 대학원 전기공학과 박사과정  
\*\* 교신저자 : 동신대학교 교수  
Tel : 041-860-2610, Fax : 041-863-7605  
E-mail : yong@taeyoung.com  
접수일자 : 2010년 1월 21일  
1차심사 : 2010년 1월 26일, 2차심사 : 2010년 3월 30일  
심사완료 : 2010년 4월 22일

### 1. 서 론

메쉬접지극의 접지Grid의 설계는 접지시스템에서 중요한 역할을 한다. 일반적으로 접지시스템의 형태는 ANSI/IEEE Standard 80-2000의 표준 순서를

사용하여 격자형태 등간격 접지Grid로 설계되고 있다[1].

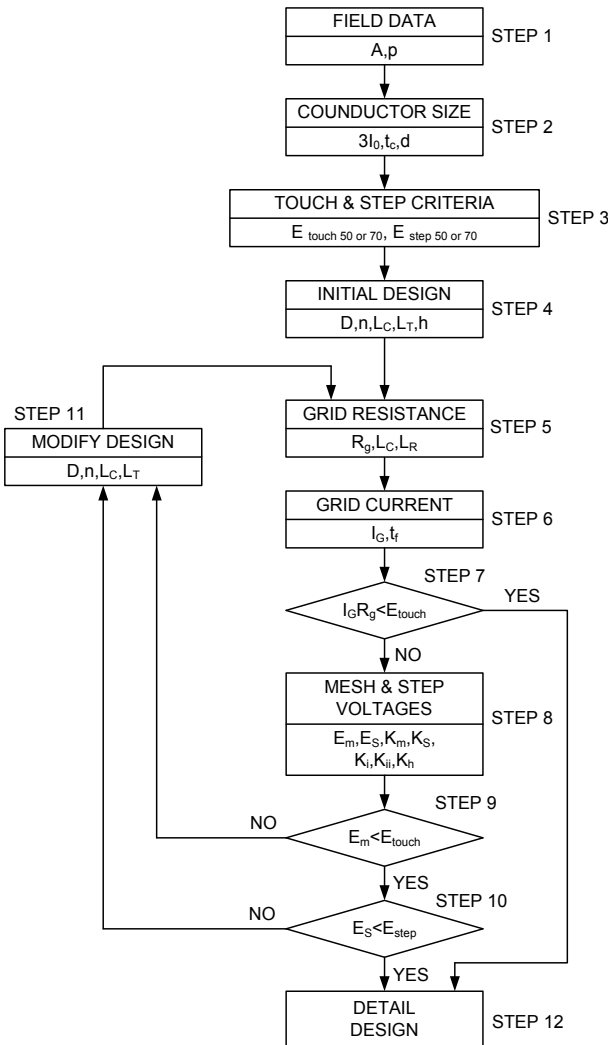


그림 1. 설계 절차 블록 다이어그램[1]  
Fig. 1. Block diagram of grounding design process[1]

접지Grid 형태설계의 목적은 안전 허용값 이내로 보폭전압과 메쉬전압을 유지하고 접지저항을 낮게 유지하는 것이다[1-5]. 지금까지의 접지Grid설계는 위험전압을 안전한계전압 이하로 낮추기 위해, 접지 Grid의 형태를 변화하는 방법보다 접지도체의 개수, 길이, 직경, 간격, 접지봉 구성 등을 증가시키는 방법을 사용하였다.

그러나 기존 메쉬접지극의 설계 방법인 격자형태 접

지Grid는 오음의 법칙과 도체의 표피효과 때문에 Grid 구석부분에서의 접촉전압이 중심부분의 접촉전압보다 높아지는 문제점이 있다. 또한 접지도체의 접촉전압 산정시 대부분 접지Grid의 구석부분이 가장 높게 나타나기 때문에, 이 부분을 최대예상 접촉전압으로 선정하고, 이 부분의 접촉전압을 감소시키기 위해 접지도체의 개수, 길이, 직경 및 접지봉의 수를 증가하게 된다. 이는 재료비가 많아져 경제성이 낮은 문제점이 있다[4-7].

따라서, 본 논문에서는 IEEE std.80-2000에 제안된 접지설계 절차(그림 1)에 따라 격자형태 접지Grid와 사선형태 접지Grid의 메쉬접지극을 설계하고, 동일한 접지설계제원을 적용한 뒤, 접지저항, GPR, 메쉬전압 그리고 총 도체 길이를 비교하여 사선형태 접지Grid의 우수성을 검증하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 Grid 형태에 따른 위험전압 특성

접지도체를 통하여 대지로 빠져나가는 전류의 통로는 접지도체가 넓게 배열되어 있거나 접지Grid의 구석일수록 저항이 작아서 넓고, 좁게 배열된 부분일수록 저항이 커서 좁다. 따라서 통로가 넓은 쪽으로 전류를 흘려보내면 전압이 낮아지게 되고 그로인한 접지저항과 GPR 값도 낮출 수 있다.

그러므로 접지도체를 넓게 배열하는것 보다 좁게 배열하는 것이 위험전압을 감소시킬수 있고, 경제성을 고려한다면 그림 3과 같이 격자형태 접지Grid보다 구석 부분의 도체수를 증가시켜 도체 간격을 좁게 하는 사선형태 접지Grid가 위험전압을 감소시키는데 더 효과적이다.

그림 2와 그림 3은 현재 사용되고 있는 격자형태 접지Grid와 본 논문에서 제안한 사선형태 접지Grid를 설계한 것이다. 그림에서 빗금친 부분은 메쉬전압이 발생하는 부분으로써 격자형태 접지Grid의 경우 모서리 4부분에서 나타나고, 사선형태 접지Grid의 경우 모서리 8부분에서 나타난다.

사선형태 접지Grid의 메쉬전압이 격자형태 접지

Grid의 메쉬전압에 비해 낮아지는 이유는 메쉬전압이 나타나는 부분의 면적을 통해 생각해 볼 수 있다.

격자형태 접지Grid의 빗금친 부분은 면적은 49[m<sup>2</sup>] 이고, 사선형태 접지Grid의 빗금친 부분의 면적은 34.04[m<sup>2</sup>]로 사선형태 접지Grid를 적용할 경우 메쉬전압이 발생하는 면적이 감소된다. 면적의 감소는 접지도체를 좁게 배치한 것을 의미하고, 좁게 배치한 접지도체는 메쉬전압을 감소시켰다.

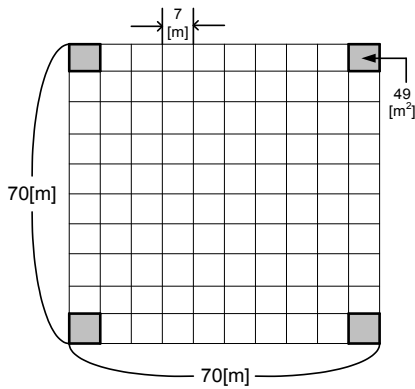


그림 2. 격자형태 접지Grid  
Fig. 2. Lattice-shaped grounding grid

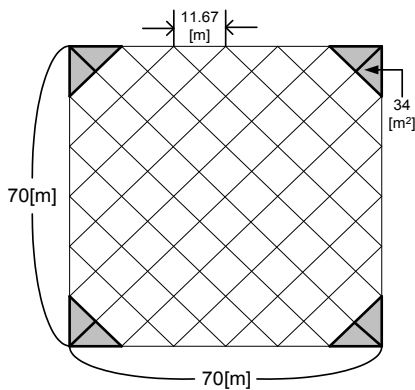


그림 3. 사선형 접지Grid  
Fig. 3. Oblique-shaped grounding grid

## 2.2 시뮬레이션을 위한 접지설계제원

표 1의 접지설계제원은 IEEE std.80-2000의 Annex B에 제시된 것으로, 격자형태 접지Grid와 사선형태 접지Grid의 비교를 위해 동일하게 적용할 접지설계 제원이다.

표 1. 접지설계 제원

Table 1. Grounding design dimensions

접지설계의 제원	내용
접지공사 가능구역(S)	70×70[m <sup>2</sup> ]
대지 저항률( $\rho$ )	400[ $\Omega \cdot m$ ]
자갈(표면층)의 저항율( $\rho_s$ )	2,500[ $\Omega \cdot m$ ]
자갈(표면층)의 두께( $h_s$ )	0.102[m]
매설깊이(h)	0.5[m]
고장지속시간( $t_s$ )	0.5[s]
지락시 정상 임피던스( $Z_1$ )	4.0+j10.0[ $\Omega$ ]
지락시 영상 임피던스( $Z_0$ )	10.0+j40.0[ $\Omega$ ]
변압기 임피던스( $Z_1=Z_0$ )	4.0+j10.0[ $\Omega$ ]
분류계수( $S_f$ )	0.6
선간전압(E)	115[kV]
도체 전류 분류율( $\alpha$ )	1.0
격자형태 접지Grid의 총 도체 길이( $L_T$ )	1540[m]
사선형태 접지Grid의 총 도체길이( $L_T$ )	1467.9[m]

### 2.2.1 접지도체의 굵기(A)

도체 재료는 경동선을 사용하고, 재료의 물리적인 정수는 표 2를 적용해 접지도체의 굵기를 산정하였다. 식 (1)을 통해 구한 접지도체의 굵기인 17.277[mm<sup>2</sup>]의 경우 KSC IEC 60364에 맞는 25[mm<sup>2</sup>]을 선정하는 것이 바람직하나, 본 논문에서는 IEEE std. 80-2000 Annex B를 그대로 사용하여 22[mm<sup>2</sup>]로 선정하였다.

표 2. 접지도체 상수 (경동선)[1]

Table 2. Grounding conductor constant(Hard-drawn copper wire)

도전율[%]	97.0
$\alpha_r$ 온도계수 20[°C]	0.00381
$K_0$ 1/ $\alpha_r$ 0[°C]	242
$T_m$ 용단온도 [°C]	1,084
$\rho_r$ 고유저항 20[°C]	1.7774
TCAP 열용량계수[J/cm <sup>3</sup> /°C]	3.422

$$A = I \sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \times 10^4}{TCAP}}{\ln 1 + \left( \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_0} \right)}} \quad (1)$$

$$= 6.814 \sqrt{\frac{\frac{0.5 \times 0.00381 \times 1.7774 \times 10^4}{3.422}}{\ln 1 + \left( \frac{1084 - 40}{242 + 40} \right)}}$$

$$= 17.277 \approx 22 [mm^2]$$

### 2.2.2 지락전류 계산(IG)

대지전류는 최대지락전류(I<sub>F</sub>), 비대칭분에 대한 감소계수(D<sub>f</sub>), 계통확장계수(C<sub>p</sub>), 분류계수(S<sub>f</sub>)의해 결정된다. 사고형태에 따라 달라지는 최대지락전류는 식(2)와 같이 장기 계통확장에 의한 1선 지락전류계산식을 사용하여 계산하였다.

$$I_F = \frac{3E}{3R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + (X_1 + X_2 + X_0)} [A] \quad (2)$$

$$= \frac{3 \times 115000 / \sqrt{3}}{3(0) + (4.0 + 4.0 + 10.0) + (10.0 + 10.0 + 40.0)} [A]$$

$$\approx 3180 [A]$$

분류계수(S<sub>f</sub>)는 0.6으로, 계통확장계수(C<sub>p</sub>)와 비대칭분에 대한 감소계수(D<sub>f</sub>)는 1.0을 적용하여 계산한 대지전류는 식(3)과 같이 1,908[A]로 산정하였다.

$$I_G = S_f \cdot D_f \cdot C_p \cdot I_F \quad (3)$$

$$= 0.6 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 3180 = 1908 [A]$$

### 2.2.3 접지도체의 총 길이(LT)

70×70[m<sup>2</sup>]의 접지공사구역에 그림 2와 같이 격자형태 접지Grid의 메쉬접지극을 설계할 경우 접지도체의 총길이는 1,540[m]이고, 그림 3과 같이 사선형태 접지Grid의 메쉬접지극을 설계할 경우 접지도체의 총 길이는 1,467.9[m]로 사선형태 접지Grid의 접지도체 총 길이가 약 72.1[m] 감소되게 설계하였다.

## 2.3 IEEE std. 80-2000을 통한 메쉬전압, 접지저항의 계산

### 2.3.1 메쉬전압의 계산(E<sub>m</sub>)

식(4)는 격자형태 접지Grid(그림 2)로 설계한 메쉬 접지극의 메쉬전압을 IEEE std.80-2000 Annex B에서 제안한 수식을 적용해 구한 것으로 메쉬전압(E<sub>m</sub>)은 1,119.21[V]이다.

표 3. 메쉬전압 계산 제원

Table 3. Dimensions for calculating mesh voltage

대지 저항률(ρ)	400[Ω · m]
간격계수(K <sub>m</sub> )	0.994
전위경도 보정계수(K <sub>i</sub> )	2.272
대지전류(I <sub>G</sub> )	1,908[A]
접지도체 전체길이(L <sub>M</sub> )	1,540[m]

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (4)$$

$$= \frac{400 \cdot 0.994 \cdot 2.272 \cdot 1908}{1540}$$

$$= 1119.21 [V]$$

### 2.3.3 접지저항 계산(R<sub>g</sub>)

IEEE std.80-2000 Annex B에는 격자형태 등간격 접지Grid를 가진 메쉬접지극의 접지저항 계산을 식(5)와 같이 제안하고 있다.

$$R_g = \rho \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20S}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{S}}} \right) \quad (5)$$

$$= 400 \frac{1}{1540} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 4900}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0.5 \sqrt{\frac{20}{4900}}} \right)$$

$$= 2.7756 \approx 2.78 [\Omega]$$

접지저항 계산을 위한 제원으로 접지망 매설깊이(h=0.5[m]), 접지망 포설면적(S=4,900[m<sup>2</sup>]), 대지 저항률(ρ=400[Ωm])과 접지도체의 총 길이(L<sub>T</sub>=1,540[m])

메쉬접지극의 내부도체 배치에 따른 개선된 메쉬접지극 모델

가 있으며, 이를 적용해 구한 접지저항은 2.7756[Ω]이다[1].

## 2.4 CDEGS를 통한 시뮬레이션 접지결과

사선형태 접지Grid는 아직까지 적용된 사례가 없고, 접지저항 및 메쉬전압을 계산하는 수식이 없기 때문에 CDEGS를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 메쉬전압, GPR, 접지저항, 접지도체의 총 길이를 구하였다 (IEEE std. 80-2000에서 제안한 메쉬접지극의 접지저항, 메쉬전압 등의 수식은 사선형태에 적용 안됨). 또한 CDEGS의 신뢰성을 검증하기 위해 IEEE std. 80-2000 Annex B의 예제를 컴퓨터 시뮬레이션하여, 2.3절에서 구한 메쉬전압, 접지저항과 비교하였다.

### 2.4.1 격자형태 접지Grid 시뮬레이션 결과

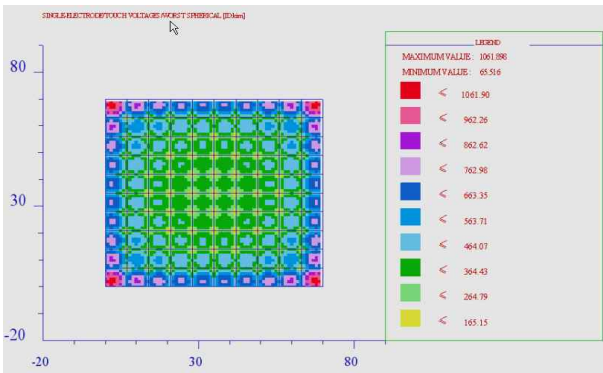


그림 4. 격자형태 접지Grid의 메쉬전압  
Fig. 4. Mesh voltage of lattice-shaped grounding grid

Original Electrical Current Flowing In Electrode...	1988.0	amperes
Current Scaling Factor (SPLITS/FCDIST/specified)...	1.0000	
Adjusted Electrical Current Flowing In Electrode...	1988.0	amperes
Number of Conductors in Electrode.....	22	
Resistance of Electrode System.....	2.6532	ohms
SUBDIVISION		
=====		
Grand Total of Conductors After Subdivision..	220	
Total Current Flowing In Main Electrode.....	1988.0	amperes
Average Current Density of Conductor Segments:	1.2390	amperes /meter
Total Buried Length of Main Electrode.....	1540.0	meters

그림 5. 격자형태 접지Grid의 접지저항 및 총 도체길이  
Fig. 5. Ground resistance of lattice-shaped grounding grid, and its total conductor length

그림 4와 그림 5는 CDEGS의 MALT를 이용해 시뮬레이션한 결과로 접지저항( $R_g$ ), 도체의 총길이( $L_T$ ), 메쉬전압( $E_m$ )을 나타낸 것이다.

2.2절의 접지설계 체원을 격자형태의 접지Grid로 설계한 메쉬접지극에 적용해 시뮬레이션한 결과, 접지저항은 2.6532[Ω], 사용된 총 도체의 길이는 1540[m], 메쉬전압( $E_m$ )은 1061.90[V]로 나타났다.

### 2.4.2 사선형태 접지Grid 시뮬레이션 결과

그림 6과 그림 7은 CDEGS의 MALT를 이용해 사선형태 접지Grid를 시뮬레이션한 결과로 접지저항( $R_g$ ), 도체의 총길이( $L_T$ ), 메쉬전압( $E_m$ )을 나타낸 것이다.

2.2절의 접지설계 체원을 사선형태 접지Grid의 메쉬접지극에 적용할 경우 접지저항은 2.6359[Ω], 사용된 총 도체의 길이는 1467.9[m], 메쉬전압( $E_m$ )은 847.75[V]로 나타났다.

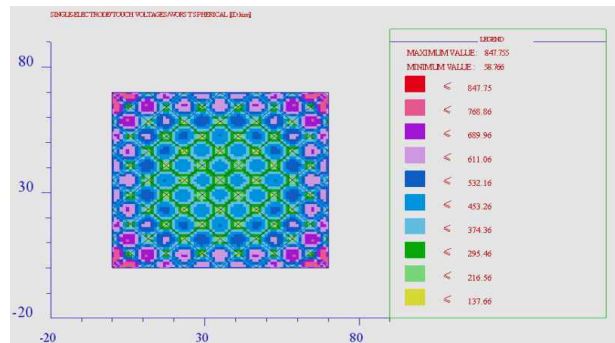


그림 6. 사선형태 접지Grid의 메쉬전압  
Fig. 6. Mesh voltage of oblique-shaped grounding grid

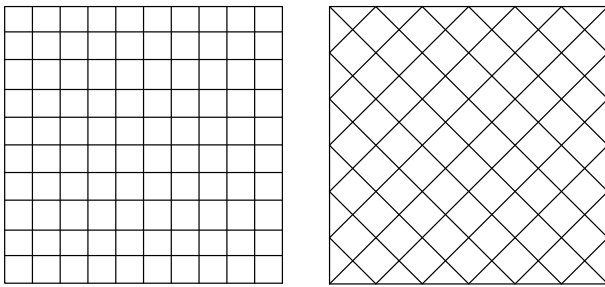
CONFIGURATION OF MAIN ELECTRODE		
=====		
Original Electrical Current Flowing In Electrode...	1988.0	amperes
Current Scaling Factor (SPLITS/FCDIST/specified)...	1.0000	
Adjusted Electrical Current Flowing In Electrode...	1988.0	amperes
Number of Conductors in Electrode.....	26	
Resistance of Electrode System.....	2.6359	ohms
SUBDIVISION		
=====		
Grand Total of Conductors After Subdivision..	168	
Total Current Flowing In Main Electrode.....	1988.0	amperes
Average Current Density of Conductor Segments:	1.2998	amperes /meter
Total Buried Length of Main Electrode.....	1467.9	meters

그림 7. 사선형태 접지Grid의 접지저항 및 총 도체길이  
Fig. 7. Ground resistance of oblique-shaped grounding grid, and its total conductor length

### 3. 결 론

본 논문에서는 안전하고 경제적이며 효율적인 최적의 메쉬접지극 시스템을 구축하기 위해 격자형태 접지Grid와 사선형태 접지Grid를 컴퓨터 모의실험을 통해 메쉬전압, GPR, 접지저항, 접지도체의 총 길이를 비교 · 검토하였다.

그림 8의 좌측 그림은 ANSI/IEEE std. 80-2000에서 제안하고 있는 격자형태 접지Grid이고 우측 그림은 본 논문에서 제안한 사선형태 접지Grid이다. 그림 8의 두 가지 접지Grid 방식에 표 4의 접지설계 제원을 동일하게 적용하여 표 5와 표 6의 결과를 얻었다.



격자형태 등간격 접지 Grid

사선형태 등간격 접지 Grid

그림 8. 메쉬접지극의 Grid의 설계  
Fig. 8. Designing grid of mesh grounding electrode

표 4. 접지설계 제원  
Table 4. Dimensions of grounding design

접지설계의 제원	내 용
접지공사 구역(S)	70×70[m <sup>2</sup> ]
대지 저항률(ρ)	400[Ω · m]
매설깊이(h)	0.5[m]
대지전류(I <sub>G</sub> )	1908[A]
접지도체의 굵기(A)	22[mm <sup>2</sup> ]

격자형태 접지Grid에 대해, IEEE std. 80-2000에서 제안된 식을 통해 구한 메쉬전압, 접지저항과 CDEGS의 MALT를 이용해 시뮬레이션한 메쉬전압, 접지저항을 비교하였다. 메쉬전압, GPR, 접지저항은 약 5[%]

차이를 보였고, 접지도체의 총 길이는 일치하였다.

표 5. 메쉬전압, GPR, 접지저항, 총 도체길이의 비교 (IEEE std.80-2000 and simulation)  
Table 5. Comparison of mesh voltage, GPR, ground resistance, total conductor length using equations of IEEE std.80-2000 and simulation

분류	IEEE std.80-2000의 수식을 이용한 접지설계 결과	CDEGS를 이용한 시뮬레이션	변화율
E <sub>m</sub>	1119.21[V]	1061.9[V]	5.12[%]
GPR	5295.84[V]	5062.31[V]	4.41[%]
R <sub>g</sub>	2.7756[Ω]	2.6532[Ω]	4.41[%]
L <sub>T</sub>	1540[m]	1540[m]	-

표 6. 시뮬레이션 프로그램을 이용한 접지결과 비교 (Lattice-shaped grounding grid and oblique-shaped grounding grid)

Table 6. Comparison of mesh voltages of lattice-shaped and oblique-shaped grounding grids, GPR, ground resistance and total conductor length using simulation program

분류	격자형태 접지Grid 시뮬레이션	사선형태 접지Grid 시뮬레이션	감소율
E <sub>m</sub>	1061.9[V]	847.75[V]	20.16[%]
GPR	5062.31[V]	5029.29[V]	0.65[%]
R <sub>g</sub>	2.6532[Ω]	2.6359[Ω]	0.65[%]
L <sub>T</sub>	1540[m]	1467.9[m]	4.68[%]

두 번째로 기존의 접지Grid설계방식인 격자형태 접지Grid의 접지설계 결과와 본 논문에서 제안한 사선형태 접지Grid의 접지설계 결과를 비교하였다. 메쉬전압(E<sub>m</sub>)은 20.16[%] 감소하였고, GPR은 0.65[%], 접지저항(R<sub>g</sub>)은 0.65[%], 총 도체 길이(L<sub>T</sub>)는 4.68[%]가 감소하였다. CDEGS의 MALT모듈을 통해 시뮬레이션한 결과 사선형태 접지Grid는 기존의 격자형태 접지Grid에 비해 접지도체의 총 길이(L<sub>T</sub>)가 짧아 졌으나,

메쉬전압(Em)과 접지저항(Rg)이 감소하는 현상을 보였다. 시뮬레이션 결과 사선형태 접지Grid가 격자형태 접지 Grid에 비해 우수한 성능을 나타내었으나, 추후 실증 실험을 통해 시뮬레이션 결과와의 비교가 필요하다.

### References

- [1] ANSI/IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2000.
- [2] 최홍규외, "접지설비 및 설계", 성안당, 2004.
- [3] 이복희외, "접지의 핵심 기초 기술", 의제, 1999.
- [4] L. Huang, "Study of Unequally Spaced Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, 1995.
- [5] M. C. Costa, "Optimization of Grounding Grids by Response Surfaces and Genetic Algorithms", IEEE Transactions on magnetics, Vol. 39, No. 3, 2003.
- [6] A. F. Otero, "Genetic Algorithm Based Method for Grounding Grid Design", IEEE, 1998.
- [7] J. Yuan, "Simulation of Substation Grounding Grids with Unequal-Potential", IEEE Transactions on magnetics, Vol. 36, No. 4, 2000.

### ◇ 저자소개 ◇



**심용식**(沈龍植)

1962년 6월 26일생. 2006년 고려대학교 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



**최홍규**(崔洪圭)

1950년 1월 7일생. 현재 홍익대학교 전자·전기공학과 교수. 전기설비연구센터 소장.



**김태훈**(金泰勳)

1983년 7월 27일생. 2008년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2010년 홍익대학교 일반대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



**송영주**(宋榮柱)

1970년 11월 21일생. 1993년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1995년 홍익대학교 일반대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 홍익대학교 일반대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 동신대학교 교수.