

접지도체의 간격배치에 따른 개선된 접지설비 모델

(An Improved Method for Mesh Grounding System Using Spaced Arrangement of Grounding Conductor)

최홍규 · 송영주*

(Hong-Kyoo Choi · Young-Joo Song)

요 약

등간격 접지 Grid의 설계에서는 대부분의 전류가 외곽접지도체로 누설되어 Grid 구석 접촉전압이 중심 접촉전압보다 높아지는 문제점이 있다. 비등간격 접지 Grid의 설계는 이러한 문제점을 극복할 수 있으나 적절한 비등간격 접지 Grid의 설계방법이나 간격결정 방법은 논의되고 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 비등간격 접지 Grid의 장점을 설명한 다음 비등간격 접지 Grid의 수식을 유도 비교·평가하여 최적의 비등간격 접지 Grid 간격비율을 제시한다.

Abstract

No matter how well the equally spaced grounding grid is designed, there are questions keep rising, such as leakage of current from corner conductor, high voltage of touch voltage in corners of grid than in center, and high material cost for grounding grid. The best-fitted design for unequally spaced grounding grid is a part that must be considered. Explain advantages of unequally spaced grounding grid and lead formula by dividing the number of grid division, j , into 20, instead of 7. Then, present D_{ij} , which is optimum rate for unequally spaced grounding grid and verify safety and economy of the unequally spaced grounding grid by computer simulation with a poly-nominal function form.

Key Words : Mesh grounding system, Unequally spaced grounding grid, Poly-nominal function form

1. 서 론

접지도체의 접지 Grid 간격 설계는 접지시스템에서 중요한 역할을 한다. 일반적으로, 접지시스템의 접지도체 간격은 ANSI/IEEE Standard 80-1986의

표준 순서를 사용하여 등간격으로 설계되고 격자로 매설된 평행도체로 구성되어있다[1][2]. 접지도체 간격 설계의 목적은 안전 허용값 이내로 보폭전압과 접촉전압을 유지하고 접지저항을 낮게 유지하는 것이다[1]~[7].

지금까지의 접지도체 간격 설계는 접지도체의 개수, 길이, 직경, 간격, 접지봉과 접지도체의 구성 등과 같은 여러 요소를 고려한 등간격 접지 Grid의 최적 설계를 통한 접촉전압과 보폭전압, 접지저항에

* 주저자 : 홍익대학교 전기설비연구센터 연구원
Tel : 041-860-2610, Fax : 041-863-7605

E-mail : dewangell@dreamwiz.com

접수일자 : 2005년 1월 18일

1차심사 : 2005년 1월 21일

심사완료 : 2005년 2월 7일

접지도체의 간격배치에 따른 개선된 접지설비 모델

미치는 영향에 대해서 설명하고 있다[8]~[10]. 그리고 안전하고 경제적인 등간격 접지 Grid의 최적 설계를 얻기위해 전문가 시스템이나 유전자 알고리즘을 적용하기도 한다[12]~[14].

그러나 등간격 접지 Grid의 설계는 설계를 아무리 잘한다고 할지라도 오음의 법칙과 도체의 표피효과 때문에 대부분의 전류가 외곽접지도체로부터 누설되고, Grid 구석에서의 접촉전압이 중심의 접촉전압보다 높아지는 문제점이 있다. 또한, 접지도체의 위험전압 산정시 Grid 구석에서의 접촉전압을 기준으로 산정함으로써 접지 Grid의 재료비가 많아져 경제적인 불이익을 가져온다[11]~[14]. 비등간격 접지 Grid의 설계는 이러한 등간격 접지 Grid 설계의 문제점과 불이익을 극복할 수 있으나 접지도체의 간격을 결정하는 방법과 적절한 비등간격 접지 Grid의 설계는 논의되고 있지 않다.

따라서 본 논문에서는 먼저 비등간격 접지 Grid 설계의 장점을 설명한 다음 일정비율에 따른 비등간격 접지 Grid 수식과 컴퓨터 모의실험을 통한 비등간격 접지 Grid 수식을 유도, 비교·평가하고 최적의 수식과 최적의 비등간격 비율을 제시하여 국제화 추세에 부응하고 건설현장에서 엔지니어들이 쉽게 적용할 수 있는 새로운 접지도체 간격 산출방식을 연구하는데 목적이 있다.

2 본 문

2.1 비등간격 접지 Grid의 장점

접지도체를 통하여 대지로 빠져나가는 전류의 통로는 접지도체가 넓게 배열되어 있거나 접지 Grid의

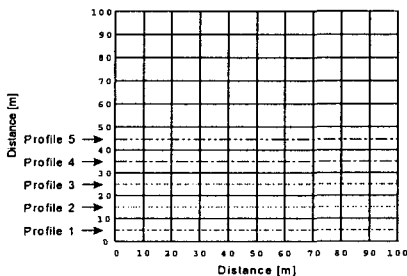


그림 1. 등간격 접지 Grid(100x100[m], n=11(개))
Fig. 1. The equally spaced grounding grid

구석일수록 저항이 작아져 넓고, 좁게 배열된 부분일수록 저항이 커져 좁다. 따라서 통로가 넓은 쪽으로 전류를 흘려보내면 전압이 낮아지게 되고 이로 인한 접지저항과 GPR 값도 낮출 수 있다. 그러므로 접지도체를 넓게 배열하는 것 보다 좁게 배열하는 것이 효과적이며, 도체간격을 등간격으로 좁게 배열하는 것 보다 도체간격을 비등간격으로 구석을 좁게 하고 중앙을 넓게 배열하는 것이 더욱더 효과적이다.

본 절에서는 비등간격 접지 Grid의 장점을 설명하기 위하여 CDEGS의 MALT를 이용하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 접촉전압은 접지면적 100x100 [m]에, 1[kA]의 접지전류가 500[Ωm] 토양에 포설되어 있는 제원의 접지망으로 유입되는 경우를 계산하였고 접지망의 제원을 나타내면 표 1과 같다. 그림 1과 2는 한번의 매설 도체개수와 접지면적이 같은 2개의 접지 Grid 설계를 나타낸 것으로 등간격의 경우 접지도체 간격을 10[m]로하여 모의실험하였고, 비등간격의 경우 등간격과 같은 한번의 도체개수 11개를 본 논문에서 제안한 다항함수 수식을 적용하여 구한 최적 접지 Grid 간격을 사용하여 모의실험 하였다.

표 1. 접지망의 제원
Table 1. The specification of grounding grid

접지망의 제원	내 용
접지 전류(I_G)	1[kA]
대지 저항률(ρ)	500[Ωm]
도체 굵기(A)	100[mm ²]
도체 직경(d)	0.00564[m]
매설 깊이(h)	1.0[m]
도체 간격(D)	10[m]
한번의 도체개수(n)	11[개]

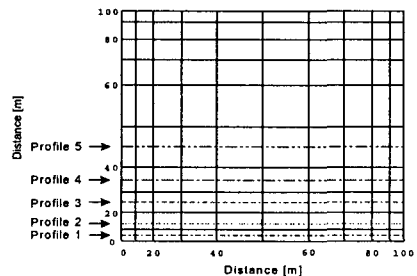


그림 2. 비등간격 접지 Grid(100x100[m], n=11(개))
Fig. 2. The unequally spaced grounding grid

2.1.1 접지 Grid의 전위와 전압

중심 Mesh 전위는 Grid 중심 Mesh에서의 Mesh 전위이고 외곽 Mesh 전위는 Grid 외곽 Mesh에서의 Mesh 전위이다. Mesh전압은 Grid 지표면전위상승(GPR)과 Mesh 전위의 차이로 비등간격 접지 Grid의 Mesh 전압은 등간격 접지 Grid의 Mesh 전압보다 낮아 인간과 장비에 대한 안전성 레벨을 향상시킨다. 표 2는 등간격과 비등간격 접지 Grid의 전위, 전압 차이를 시뮬레이션하여 나타낸 것으로 비등간격 접지 Grid의 중심과 외곽 전위차는 등간격 접지 Grid의 전위차보다 11.09[%] 낮으며, 비등간격 접지 Grid의 중심과 외곽의 전압차는 등간격 접지 Grid의 전압차보다 176.04[%] 낮다.

표 2. 접지 Grid 간격에 따른 전위와 전압 비교
Table 2. The comparison of potential with voltage

Grid 간격		등간격	비등간격
Mesh 전 위	최대[V]	1886.67	2067.36
	최소[V]	2147.06	2045.76
	오차[%]	12.13	1.04
Mesh 전 압	최대[V]	400.7	224.8
	최소[V]	140.3	203.2
	오차[%]	185.65	9.61

2.1.2 접지 Grid의 GPR과 접지저항

비등간격 접지 Grid의 지표면 전위상승(GPR)과 접지저항(R)은 등간격 접지 Grid의 지표면 전위상승과 접지저항보다 낮아 인간과 장비에 대한 안전성 레벨을 향상시킨다. 표 3은 등간격과 비등간격 접지 Grid의 지표면 전위상승, 접지저항 차이를 나타낸 것으로 비등간격 접지 Grid의 지표면 전위상승이 등간격 접지 Grid의 지표면 전위상승보다 0.74[%] 낮으며, 접지저항도 0.749[%] 낮다.

표 3. 접지 Grid 간격에 따른 GPR과 접지저항의 비교
Table 3. The comparison of GPR with ground resister

Grid간격	GPR	접지저항
등간격	2287.33[V]	2.287[Ω]
비등간격	2270.53[V]	2.270[Ω]

2.1.3 비등간격 접지 Grid의 재료비

그림 1과 같이 10[m] 등간격 접지 Grid인 경우 최대접촉전압인 외곽 Mesh전압은 400.7[V]이고 접지 망을 구성하기 위해 사용된 접지도체의 전체길이는 2200[m]이다. 그러나 비등간격 접지 Grid를 사용할 경우 등간격 접지 Grid의 최대접촉전압인 400.7[V]에 근접하거나 낮게 최대접촉전압을 유지하면서 접지 Grid의 재료비를 줄일 수 있으며 이것을 나타낸 것이 그림 3이다.

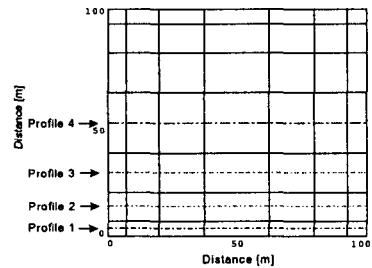


그림 3. 비등간격 접지 Grid의 형태
Fig. 3. The shape of unequally spaced grounding grid

그림 3에서 제시한 비등간격 접지 Grid를 구성하기 위해 필요한 접지도체의 전체길이는 1400[m]이다. 이것은 등간격 접지 Grid의 접지도체 전체길이인 2200[m]와 비교할 때 접지 Grid 재료비가 약 36.36[%] 절약된 것이며 접지 설치비용도 줄일 수 있다. 이때 비등간격 접지 Grid의 최대접촉전압이 352.8[V]이다.

2.2 비등간격 접지 Grid 수식

앞 절에서 비등간격 접지 Grid는 지표면 전위상승을 감소시킬 뿐만 아니라 경제적이며 안전한 설계가 된다는 것을 증명하였다. 그러나 비등간격 접지 Grid의 도체간격을 결정하거나 적절한 비등간격 Grid 설계에 대한 논의는 되지 않았으므로 이절에서는 비등간격 Grid의 도체간격을 결정하기 위한 일련의 수식을 유도하고 제시한다.

2.2.1 비등간격 접지 Grid의 수식 전제조건

비등간격 접지 Grid의 수식유도를 위한 비등간격

접지도체의 간격배치에 따른 개선된 접지설비 모델

접지 Grid의 형태는 접지도체 개수가 홀수(구획이 짝수)인 그림 4와 짝수(구획이 홀수)인 그림 5로 나뉠 수 있다.

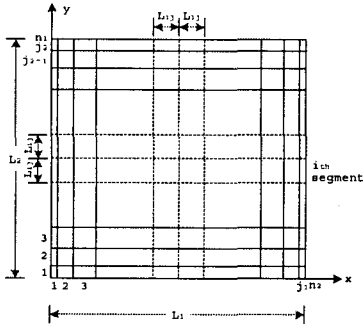


그림 4. 접지도체가 홀수인 비등간격 접지 Grid의 형태
Fig. 4. Unequally spaced grounding grid(odd)

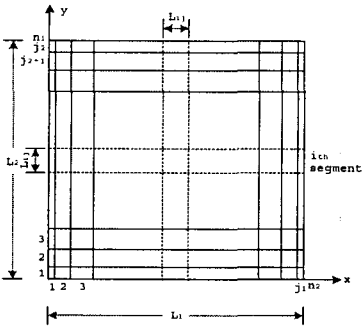


그림 5. 접지도체가 짝수인 비등간격 접지 Grid의 형태
Fig. 5. Unequally spaced grounding grid(even)

표 4. 비등간격 접지 Grid 형태에 대한 제원
Table 4. The specification unequally spaced grounding

기호	정의
L_1	X축 한변의 접지도체 길이[m]
L_2	Y축 한변의 접지도체 길이[m]
n_1	X축과 평행인 접지도체의 개수[개]
n_2	Y축과 평행인 접지도체의 개수[개]
j_1	X축 방향의 접지도체 구획 수($n_2 - 1$)
j_2	Y축 방향의 접지도체 구획 수($n_1 - 1$)
i	구획의 순서
L_{ij}	i 번째 구획의 접지도체 길이[m]

비등간격 접지 Grid 형태에 대한 제원을 나타내면

표 4와 같다. 비등간격 접지 Grid의 도체간격은 접지도체 구획 개수인 j_1 나 j_2 , 구획순서 i , 그리고 X축과 Y축 방향에 대한 한 변의 접지도체 길이 L_1 이나 L_2 와 관계가 있다는 것을 그림 4, 5와 표 4를 통해서 알 수 있다.

2.2.2 일정비율의 배수에 따른 비등간격 수식유도

일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지 Grid의 수식은 접지면적을 일정비율로 구획하기 위해 필요한 비등간격 접지 Grid의 최소비율을 구한다음 최소비율에 각 구획값을 곱하여 최적비율을 구한다. 접지 Grid의 최소비율을 구하기 위한 방법은 접지도체 개수 n 이 홀수(구획 j 는 짝수)인 경우와 짝수(구획 j 는 홀수)인 경우로 나누어서 생각할 수 있다.

1) 접지도체 개수가 홀수(구획 j 는 짝수)인 경우
접지도체 개수 n 이 홀수(구획 j 는 짝수)인 경우를 나타낸 것이 그림 4이다. 여기에서, 비등간격 접지 Grid의 형태는 접지망 가운데를 중심으로 Y축 대칭이므로 접지 Grid의 최소 비율은 접지 Grid 형태의 절반만 계산하여 구한다. 이것을 나타낸 것이 수식 (1)이다.

$$\begin{aligned} \frac{L}{2} &= a_1 + a_2 + \dots + a_{\frac{j}{2}} \\ &= a_1(1 + 2 + \dots + \frac{j}{2}) \\ &= a_1 \sum_{i=1}^{\frac{j}{2}} i \end{aligned} \tag{1}$$

여기서

L : 한변의 접지도체 길이($L = L_1 = L_2$)

수식 (1)을 접지 Grid 간격 최소 비율인 a_1 에 대해서 다시 정리하면 수식 (2)와 같다.

$$a_1 = \frac{L}{2 \sum_{i=1}^{\frac{j}{2}} i} \tag{2}$$

수식 (2)를 적용하여 각 구획의 접지 Grid 간격 비율을 나타내면 수식 (3)과 같다.

$$D_{ij} = a_1 \times i \times 100 [\%] \quad (3)$$

2) 접지도체 개수가 짝수(구획 j 는 홀수)인 경우 접지도체 개수 n 이 짝수(구획 j 는 홀수)인 경우를 나타낸 것이 그림 5이다. 여기에서, 비등간격 접지 Grid의 형태는 접지망 중앙이 가장 넓은 비율을 가지며 구석으로 갈수록 좁은 비율을 가진다. 접지도체 개수가 짝수인 경우의 접지 Grid 최소 비율을 구하기 위한 접지 Grid 간격을 나타내면 수식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} L &= b_1 + b_2 + \dots + b_{\frac{j+1}{2}} + \dots + b_{j-1} + b_j \\ &= 2b_1 + 2b_2 + \dots + 2b_{\frac{j+1}{2}-1} + b_{\frac{j+1}{2}} \\ &= 2b_1 + 4b_1 + \dots + 2\left(\frac{j+1}{2} - 1\right)b_1 + \frac{j+1}{2}b_1 \quad (4) \\ &= b_1 \left(\sum_{i=1}^{\frac{j+1}{2}-1} 2i + \frac{j+1}{2} \right) \end{aligned}$$

수식 (4)를 적용하여 각 구획의 접지 Grid 간격 비율을 나타내면 수식 (5)와 같다.

$$D_{ij} = b_1 \times i \times 100 [\%] \quad (5)$$

3) 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지 Grid 수식 접지 Grid 구획 개수(j)를 7개에서 20개까지 변화시켰을 때 수식 (3)과 수식 (5)를 적용한 구획의 순서와 각 구획의 접지 Grid 간격 비율인 $i - D_{ij}$ 의 상관관계는 그림 6과 같다.

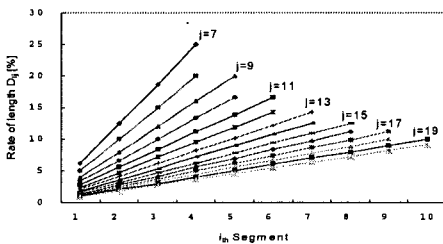


그림 6. $i - D_{ij}$ 상관관계(일정비율의 배수)
Fig. 6. The $i - D_{ij}$ by multiple at a set rate

일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지 Grid의 수식은 $i - D_{ij}$ 의 상관관계인 그림 6을 Curve fitting하여 수식화한 것으로 이것을 표현하면 일차함수 형태인 수식 (6)과 같고 접지 Grid 구획 개수(j)에 따른 계수 a 는 표 5와 같다.

$$D_{ij} = ai \quad (6)$$

표 5. 비등간격 $j - a$ 상관관계(일정비율의 배수)
Table 5. The $j - a$ by multiple at a set rate

j	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
a	6.25	5.00	4.00	3.33	2.78	2.38	2.04	1.79	1.56	1.39	1.23	1.11	1.00	0.91

2.2.3 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 수식 유도

컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지 Grid의 수식을 유도하기 위하여 CDEGS의 MALT를 이용하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 접촉전압은 접지 면적 100x100[m²]에, 1[kA]의 접지전류가 500[Ωm] 토양에 포설되어 있는 제원의 접지망으로 유입되는 경우를 계산하였고 그때의 접지 Grid의 구획개수는 7~20개이며 한번의 도체개수는 8~21개 이다. 또한, MALT를 이용하여 Grid 위의 최대 Mesh전위와 최소 Mesh전위차가 2[%] 이내가 되도록 각 구획의 접지 Grid 간격 비율(D_{ij})을 구하였다. 접지 Grid 구획 개수(j)를 7개에서 20개까지 구획할 때 구획의 순서와 각 구획의 접지 Grid 간격 비율인 $i - D_{ij}$ 의 상관관계는 그림 7과 같다.

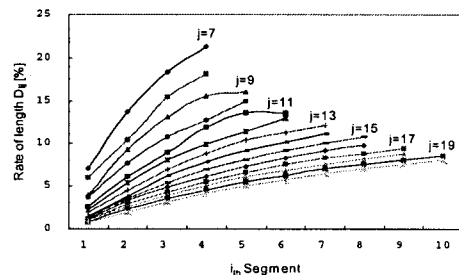


그림 7. $i - D_{ij}$ 상관관계(컴퓨터 모의실험)
Fig. 7. The $i - D_{ij}$ by computer simulation

컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지 Grid의 수

접지도체의 간격배치에 따른 개선된 접지설비 모델

식은 $i - D_{ij}$ 의 상관관계인 그림 7를 Curve fitting하여 수식화한 것으로 이것을 표현하면 루트함수 형태인 수식 (7)과 다항함수 형태인 수식 (8)과 같다. 그리고 접지 Grid 구획 개수(j)에 따른 다항함수 수식의 계수 a, b, c, 상관관계는 표 6과 같다.

$$D_{ij} = a \ln(i) + b \quad (7)$$

$$D_{ij} = ai^2 + bi + c \quad (8)$$

표 6의 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지 Grid의 접지 Grid 구획 개수(j)와 계수의 상관관계를 살펴보면 다음과 같다. 다항함수는 접지 Grid 구획 개수가 7에서 20으로 점점 증가할 때 계수 a, b, c가 일정한 형식을 가지지는 않지만 접지 Grid 구획 개수가 7일 때 상관계수가 제일 좋은 1.0로 표준오차가 0.0[%]이고, 접지 Grid 구획 개수가 11일 때 상관계수가 제일 나쁜 0.9949로 상당히 정확하다. 그러므로 본 논문에서는 일정한 형식을 가지지는 않지만 표준오차가 적은 다항함수 수식 (8)과 접지 Grid 구획 개수에 따른 다항함수 수식의 계수 표 6을 권고한다.

표 6. j -계수 상관관계(컴퓨터모의실험-다항함수)
Table 6. The j -factor by computer simulation (polynomial)

j	a	b	c	상관계수
7	-0.9150	9.3030	-1.2250	1.0000
8	-0.4453	6.3880	-0.1308	0.9957
9	-0.8000	7.8700	-3.2000	0.9998
10	-0.3514	4.8626	-0.7220	0.9973
11	-0.3929	5.0374	-2.2060	0.9949
12	-0.2280	3.7094	-1.1910	0.9984
13	-0.2049	3.3351	-1.2343	0.9997
14	-0.1763	3.0007	-1.3886	0.9991
15	-0.1305	2.5017	-1.0079	0.9989
16	-0.1061	2.1689	-0.8054	0.9989
17	-0.0915	1.9453	-0.7485	0.9987
18	-0.0730	1.6903	-0.5855	0.9993
19	-0.0628	1.5403	-0.6245	0.9993
20	-0.0509	1.3606	-0.5245	0.9996

2.3 접지도체 접지 Grid 간격 비교

접지도체의 접지 Grid 간격을 비교하기 위하여 등간격 접지 Grid와 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지 Grid 그리고 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지 Grid의 Mesh전위와 Mesh전압을 비교하였다. 이때 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지 Grid의 Mesh 전위와 Mesh 전압은 일차함수 형태인 수식 (5)와 계수인 표 5를 사용하여 얻은 각 구획의 접지 Grid 간격 비율을 적용하여 구한 것이고 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지 Grid의 Mesh 전위와 Mesh 전압은 다항함수 형태인 수식 (8)과 계수인 표 6을 사용하여 얻은 각 구획의 접지 Grid 간격 비율을 적용하여 구한 것이다.

2.3.1 접지도체 접지 Grid 간격 비교(Mesh전위)

접지 Grid 구획 개수(j)를 7개에서 20개까지 구획할 때 등간격 접지 Grid와 일차함수 형태인 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지 Grid, 다항함수 형태인 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지 Grid의 최대 Mesh전위, 최소 Mesh전위, 전위차를 비교하면 표 7과 같다. 표 7의 Δ_{pm} 은 최대 Mesh전위와 최소 Mesh전위차를 구하기 위해 수식 (9)에 의하여 계산된 값이다.

$$\Delta_{pm} = \frac{\text{최대 Mesh전위} - \text{최소 Mesh전위}}{\text{최대 Mesh전위}} \times 100[\%] \quad (9)$$

등간격 접지 Grid는 접지 Grid 구획 개수가 7개에서 20개로 점점 증가할 때 접지 Grid 구획 개수가 19개인 경우를 제외하고 Δ_{pm} 이 점점 작아지는 일정한 형식을 가진다. 또한, 접지 Grid 구획 개수가 7개일 때 Mesh전위차가 가장 큰 12.51[%]이고 19개일 때 가장 적은 6.12[%]이며, 19개, 20개를 제외한 7~18개의 경우 Mesh전위차가 10[%] 이상 되는 것을 알 수 있다.

일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지 Grid는 접지 Grid 구획 개수가 7개에서 20개로 점점 증가할 때 일정한 형식을 가지지는 않지만 접지 Grid 구획 개수가 18개일 때 Mesh전위차가 가장 적은 1.91[%]이고, 접지 Grid 구획 개수가 9개일 때 Mesh전위차가 가장 큰 3.92[%]로 등간격 접지 Grid에 비해 Mesh전위차

가 많이 감소한 것을 알 수 있다. 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지 Grid는 접지 Grid 구획 개수가 7개에서 20개로 점점 증가할 때 일정한 형식을 가지지는 않지만 접지 Grid 구획 개수가 7개일 때 Mesh전위차가 가장 적은 0.61[%]이고, 접지 Grid 구획 개수가 18개, 20개일 때 Mesh전위차가 가장 큰 1.99[%]이다. 또한 접지 Grid 구획 개수 19개를 제외한 모든 구획에서 Mesh전위차가 등간격 접지 Grid와 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지 Grid에 비해 적으며 Mesh전위차가 2[%]이내인 것을 알 수 있다.

표 7. 접지도체 접지 Grid 간격 비교(Mesh전위)
Table 7. The comparison of grounding grid (potential)

구획 개수 (j)	등간격 접지 Grid			비등간격 접지 Grid					
	최대	최소	차 _{vm}	일정비율의 배수			컴퓨터 모의실험		
7	2131.1	1865.4	12.51	2031.8	1958.4	3.61	2014.8	2002.4	0.61
8	2140.9	1875.2	12.41	2075.6	2001.4	3.58	2038.9	2023.4	0.76
9	2143.1	1884.4	12.07	2073.0	1991.8	3.92	2061.3	2028.7	1.58
10	2147.1	1886.7	12.13	2069.2	2016.4	2.58	2067.4	2045.8	1.04
11	2147.8	1895.5	11.75	2071.2	2011.7	2.87	2068.6	2043.7	1.21
12	2151.9	1900.5	11.69	2077.9	2033.5	2.14	2181.9	2047.2	1.67
13	2149.5	1905.8	11.34	2081.9	2025.3	2.71	2071.7	2044.4	1.32
14	2151.4	1910.4	11.20	2086.3	2044.3	2.01	2079.1	2044.8	1.65
15	2149.2	1914.2	10.93	2085.9	2037.1	2.34	2069.9	2043.3	1.29
16	2150.0	1919.0	10.74	2090.9	2046.3	2.13	2081.0	2046.5	1.66
17	2147.5	1922.8	10.46	2092.7	2045.8	2.24	2078.3	2044.4	1.63
18	2148.4	1926.1	10.34	2092.5	2052.5	1.91	2084.8	2043.2	1.99
19	2159.2	2027.0	6.12	2093.5	2050.9	2.03	2086.1	2048.3	1.81
20	2144.8	1930.6	9.97	2095.2	2050.4	2.14	2087.5	2046.0	1.99

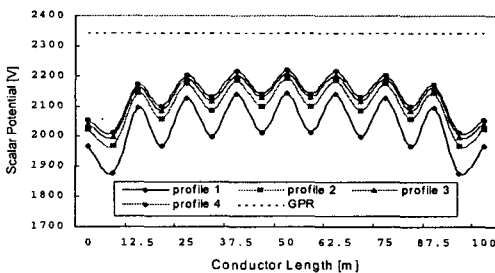


그림 8. 등간격 접지 Grid의 Mesh 전위
Fig. 8. The mesh potential of equally spaced ground grid

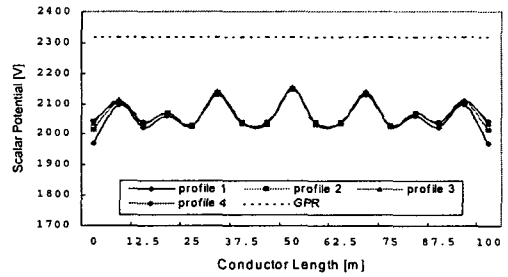


그림 9. 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 Mesh 전위
Fig. 9. The mesh potential by computer simulation

그림 8과 9는 접지 Grid 구획개수가 8일때 등간격 접지 Grid와 컴퓨터 모의실험에 따른 접지 Grid의 Mesh전위를 나타낸 것이다.

2.3.2 접지도체 접지 Grid 간격 비교(Mesh전압)

접지 Grid 구획 개수(j)를 7개에서 20개까지 구획할 때 등간격 접지 Grid와 일차함수 형태인 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지 Grid, 다항함수 형태인 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지 Grid의 최대 Mesh전압, 최소 Mesh전압, 전압차를 비교하면 표 8과 같다. 여기서, 차_{vm}은 최대 Mesh전압과 최소 Mesh전압차를 구하기 위해 수식 (10)에 의하여 계산된 값이고 차_{vc}는 중앙 Mesh전압과 구석 Mesh전압과의 차를 구하기 위해 수식 (11)에 의해서 계산된 값이다.

$$\text{차}_{vm} = \frac{\text{최대 Mesh전압} - \text{최소 Mesh전압}}{\text{최대 Mesh전압}} \times 100[\%] \quad (10)$$

$$\text{차}_{vc} = \frac{\text{구석 Mesh전압} - \text{중앙 Mesh전압}}{\text{구석 Mesh전압}} \times 100[\%] \quad (11)$$

표 8의 등간격 접지 Grid와 비등간격 접지 Grid의 Mesh전압차를 비교한 결과는 다음과 같다. 등간격 접지 Grid는 접지 Grid 구획 개수가 16개와 19개인 경우를 제외하고 차_{vm}이 점점 커지는 일정한 형식을 가진다. 또한 접지 Grid 구획 개수가 7개일 때 Mesh전압차가 가장 적은 51.85[%]이고 20개일 때 가장 큰 80.5[%]이다. 그리고 접지 Grid 구획 개수가 점점 증가할 때 최대 Mesh전압은 점점 작아지는 반면 구석 Mesh전압과 중앙 Mesh전압과의 전압차인 차_{vc}는 점

접지도체의 간격배치에 따른 개선된 접지설비 모델

접 커지는 것을 알 수 있다. 즉 접지 Grid 구획 개수가 많아지면 최대 Mesh전압은 작아지지만 최대 Mesh전압과 최소 Mesh전압과의 전압차인 V_{vm} 과 구석 Mesh전압과 중앙 Mesh전압과의 전압차인 V_{vc} 는 커진다. 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지 Grid는 접지 Grid 구획 개수가 7개일 때 Mesh전압차가 가장 적은 18.53[%]이고, 접지 Grid 구획 개수가 20개일 때 Mesh전압차가 가장 큰 36.74[%]로 등간격 접지 Grid에 비해 Mesh전압차가 많이 감소한 것을 알 수 있다. 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지 Grid는 접지 Grid 구획 개수가 7개일 때 Mesh전압차가 가장 적은 3.50[%]이고, 접지 Grid 구획 개수가 20개일 때 Mesh전압차가 가장 큰 31.98[%]이다. 또한, 접지 Grid의 모든 구획에서 등간격 접지 Grid와 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지 Grid에 비해 최대 Mesh전압과 최소 Mesh전압과의 차인 V_{vm} 이 적은 것을 알 수 있다.

표 8. 접지도체 접지 Grid 간격 비교(Mesh전압)
Table 8. The comparison of grounding grid (voltage)

구획 개수 (j)	등간격 접지 Grid				비등간격 접지 Grid					
					일정비율의 배수			컴퓨터 모의실험		
	최대	최소	V_{vm}	V_{vc}	최대	최소	V_{vm}	최대	최소	V_{vm}
7	514.4	247.7	51.85	107.7	395.7	322.4	18.53	352.8	340.5	3.50
8	469.7	204.0	56.57	130.3	316.1	241.9	23.48	298.0	282.4	5.22
9	433.8	175.0	59.66	147.8	298.6	217.4	27.19	264.2	231.6	12.33
10	400.7	140.3	64.99	185.7	248.7	195.8	21.24	224.8	203.2	9.61
11	383.5	131.2	65.79	192.3	239.9	180.4	24.81	206.7	181.8	12.06
12	363.7	112.2	69.15	224.1	203.9	159.5	21.78	190.0	155.2	18.31
13	346.0	102.3	70.43	236.5	197.6	141.1	28.60	180.7	153.4	15.10
14	330.3	89.3	72.96	258.4	168.6	126.6	24.88	166.1	131.8	20.62
15	316.1	81.2	74.31	280.5	168.0	119.1	29.07	161.0	134.3	16.54
16	311.3	80.3	74.2	287.6	148.5	103.9	30.33	147.8	113.3	23.34
17	293.3	68.7	76.58	327.3	144.5	97.6	32.45	144.8	110.9	23.43
18	290.0	67.8	76.62	337.8	129.0	89.1	30.93	139.6	98.1	29.77
19	176.9	44.7	74.7	295.8	126.9	84.3	33.58	128.7	91.0	29.32
20	266.0	51.8	80.5	409.3	121.9	77.1	36.74	126.2	84.7	31.98

그러므로 접지도체의 매설시 등간격 접지 Grid 보

다는 컴퓨터 모의실험을 통해서 구한 다항함수 형태의 접지 Grid 간격 최적비율을 사용한 비등간격 접지 Grid를 적용하는 것이 안전성과 경제성 면에서 우수한 공법이라고 사료된다.

3. 결론

본 논문에서는 안전하고 경제적이며 효율적인 최적의 접지시스템을 구축하기 위해 등간격과 비등간격 접지 Grid의 전위, 전압, 접지저항, GPR, 재료비 등을 비교·검토하여 비등간격 접지 Grid의 우수성을 설명하였고 컴퓨터 모의실험을 통한 최적의 접지 Grid 간격 비율을 제시하였다. 이것을 정리하면 다음과 같다.

3.1 비등간격 접지 Grid의 우수성을 검증

표 9. 접지 Grid의 비교
Table 9. The comparison of grounding grid

비교 대상	등간격	비등간격	비 고	
전 위	최대[V]	2147.06	2067.36	비등간격이 11.09[%] 낮음
	최소[V]	1886.67	2045.76	
	오차[%]	12.13	1.04	
전 압	최대[V]	400.7	224.8	비등간격이 176.04[%] 낮음
	최소[V]	140.3	203.2	
	오차[%]	185.65	9.61	
GPR[V]	2287.33	2270.53	0.74[%] 낮음	
접지저항[Ω]	2.287	2.270	0.749[%] 낮음	
재료비(L)[m]	2200	1400	36.35[%] 절약	

3.2 비등간격 접지 Grid의 수식유도

표 10. 비등간격 접지 Grid의 수식
Table 10. The formula of unequally spaced ground grid

비등 간격 수식	일정비율배수	컴퓨터 모의실험	
	일차함수	루트함수	다항함수
	$D_j = ai$	$D_{ij} = a \ln(i) + b$	$D_{ij} = ai^2 + bi + c$

3.3 최적의 접지 Grid 간격비율 제시

컴퓨터 모의실험에 따른 다항함수 형태의 비등간격 접지 Grid는 접지 Grid 구획 개수가 7일 때 상관 계수가 제일 좋은 1.0으로 표준오차가 0.0[%]이고, 접지 Grid 구획 개수가 11일 때 상관계수가 제일 나쁜 0.9949로 표준오차가 0.0051[%]으로 상당히 정확하므로 본 논문에서는 최적의 접지 Grid 간격 비율로 다항함수 형태의 비등간격 접지 Grid 수식인 수식 (8)과 계수값인 표 6을 제시한다.

References

- [1] ANSI/IEEE Std. 80-1986, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1986.
- [2] ANSI/IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2000.
- [3] 高橋建彦외, "接地設計入門", 東逸出版社, 1993.
- [4] 최홍규외, "전력사용시설을 설비 및 설계", 성안당, 2001.
- [5] 최홍규외, "접지설비 및 설계", 성안당, 2004.
- [6] 이복희외, "접지의 핵심 기초 기술", 의제, 1999.
- [7] 高橋建彦, "그림해설 접지시스템입문", 성안당, 2003.
- [8] 최병숙, "Pattern Search법을 이용한 전력설비의 최적화 접지설계", 홍익대, 2001.
- [9] J. G. Sverak, "Progress in Step and Touch Voltage Equations of ANSI/IEEE Std. 80 - Historical Perspective", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, 1998.

- [10] B. Thapar, "Simplified Equations for Mesh and Step Voltages in an AC Substation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, 1991.
- [11] L. Huang, "Study of Unequally Spaced Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, 1995.
- [12] M. C. Costa, "Optimization of Grounding Grids by Response Surfaces and Genetic Algorithms", IEEE Transactions on magnetics, Vol. 39, No. 3, 2003.
- [13] A. F. Otero, "Genetic Algorithm Based Method for Grounding Grid Design", IEEE, 1998.
- [14] J. Yuan, "Simulation of Substation Grounding Grids with Unequal-Potential", IEEE Transactions on magnetics, Vol. 36, NO. 4, 2000.

본 연구는 2004학년도 홍익대학교 교내 연구비로 수행되었음.

◇ 저자소개 ◇

최홍규 (崔洪圭)

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

송영주 (宋榮柱)

1970년 11월 21일생. 1993년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995~2001년 포스콘 기술연구소 연구원. 2004년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004년~현재 홍익대학교 전기설비연구센터 연구원.