

국내 변전소 접지설계를 위한 접촉전압식의 검토

최종기, 기현찬, 정길조, 김범진
한전 전력연구원*, 전력계통건설처**

An Examination of the Touch Voltage Equation for Safety in Substation Ground

J.K.Choi, H.T.Kee, G.J.Jung
KEPRI

1. 서론

변전소 접지설계시 접지망의 접지저항과 변전소 구내에서의 위험전압을 예측하는 것은 매우 중요한 작업이며, 이는 지락고장전류의 접지망 유입으로 인한 접지망과 지표면의 전위상승으로 인하여 인체에 인가될 수 있는 위험전압을 안전허용치 이내가 되도록 접지망을 구성하여야 하기 때문이다.

변전소 접지설계에는 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding(ANSI/IEEE Std 80)"이 널리 사용되고 있으며[1,2], 국내 변전소 접지설계기준[3]도 IEEE Std 80-1976을 기초로 한 것이다. 가장 최근판인 IEEE Std 80-1986에서는 등간격 매쉬접지망에 적용할 수 있는 접촉/보폭전압 계산식을 제시하고 있으나, 계산식의 각종 계수들(K_m, K_s, K_i)을 유도하는 과정에서 전제된 많은 가정들로 인하여 접지망 한편의 도체갯수는 25개를 초과하거나 도체간격이 2.5[m] 이하인 경우 적용하지 말 것을 권고하는 등 여러 가지 적용상 제한이 따른다[4]. 현재 개정이 진행중인 IEEE Std 80의 1996년 개정안에서는 K_i 계수식의 근거가 된 Koch의 수조실험을 컴퓨터 모의실험으로 대체함으로써 K_m, K_s, K_i 계수의 계산에 사용되는 도체갯수(n)식과 K_i 식이 수정되었으며, 상기 수정된 계산식들은 접지망의 한번 도체갯수가 41개 이하인 경우에 한하여 검증되었다는 기술이 있을 뿐, 1986년판의 계산식이 갖고있던 여러 적용한계에 관한 직접적인 언급은 삭제되었다[5,6,7].

본 연구진이 수집한 수십여건의 변전소 접지설계 사례들을 보면, 우리나라는 대지저항율이 비교적 높고 변전소 부지가 협소한 경우가 많아 위험전압을 안전허용치 이내로 유지하기 위해서 접지망의 도체간격을 촘촘하게 설계하는 경향이 있으며(154 kV 변전소의 경우 2.0~3.8 m, 이 중 도체간격이 3 m 미만인 경우가 70%), IEEE Std 80의 위험전압 계산식 적용한계를 벗어나는 경우가 자주 발생하였다.

본 논문은 IEEE Std 80-1996 개정안의 위험전압 계산식이 상기 언급한 우리나라의 특수상황, 특히 도체간격을 촘촘히 함으로써 접지망 한번 도체수가 41개를 초과하는 경우에도 적용할 수 있는지를 검토하고, 국내의 변전소 접지설계 조건에 맞는 보다 안전하고 정확한 위험전압 평가지침을 제시하고자 한 것이다.

2. IEEE Std 80 접촉전압식의 검증

본 절에서는 IEEE Std 80-1996 개정안의 접촉전압식과 국내 변전소 접지설계의 대표적 사례들을 참고한 컴퓨터 모의실험 결과 비교를 통하여, 한번 도체수가 41개

를 초과하는 경우에도 IEEE 계산식이 유효한지를 검토하고자 한다.

변전소 구내의 위험전압은 접촉/보폭전압을 들 수 있는데, 접촉전압이란 작업자가 접지된 외함을 접촉하고 있을 때 충전된 도체와 외함사이의 단락으로 인하여 작업자의 손과 발사이에 걸리는 전압을 말한다. 보폭전압은 지표면전위의 상승으로 인하여 작업자 양 발 사이에 인가되는 전압을 말하며, 전류가 심장을 관통하지 않으므로 접촉전압에 비하여 덜 치명적이다. 본 논문에서의 검토대상은 접촉전압에 국한하였다.

IEEE Std 80은 다음 형식의 접촉전압 계산식을 제시한다.

$$E_{touch} = \rho K_m K_i \frac{I}{L} \tag{1}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right) \tag{2}$$

(D:도체간격, h:매설깊이, d:도체직경, K_{ii} :1 or $1/(2n)^{2n}$, K_h : $\sqrt{1+h/h_0}$, h_0 :접지망 기준매설깊이(1m), ρ :대지저항율)

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n \tag{3}$$

$$n = \frac{2L_c}{L_p} \cdot \sqrt{\frac{L_p}{4VA}} \cdot \left(\frac{L_x L_y}{A} \right)^{\frac{0.1A}{L_x}} \cdot \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \tag{4}$$

(L:도체총길이, L_p :접지망 둘레길이, A:접지면적, L_x :가로축길이,

L_y :세로축길이, D_m :접지망의 대각선 최대길이)

(1)식에서 K_m 은 간략한 수학적모델에 기초하여 유도된 계수인 반면에 K_i 는 컴퓨터 모의실험에 의하여 구해진 접촉전압과 K_m 계수만으로 구해진 접촉전압과의 비교를 통하여 그 차이를 보정하기 위해 유도된 계수이다. 식(1)의 I는 접지망을 통해 대지로 누설되는 전류, L은 접지도체 총길이이다.

변전소 접지면적은 과거 154 kV 및 765 kV 변전소 접지설계 사례[8]를 참고하여 60x60, 80x60, 300x240, 300x300 m²를 대표적인 경우로 선정하였다(표1 참조). 접지봉의 포설여부에 따른 영향을 보기 위하여, 3 m길이의 접지봉을 접지망 외곽부분의 도체접속점마다 포설한 경우와 그렇지 않은 경우의 계산결과도 비교하였다. 접촉전압은 1 kA의 접지전류가 500 Ω m의 토양에 포설되어 있는 각각 다른 제원의 접지망으로 유입되는 경우를 계산하였다.

본 논문의 모의실험은 F.P.Dawalibi의 MALT[9,10,11,12]를 이용하여 수행하였으며, IEEE Std-80의 1996 개정

안의 접촉전압식 유도시에 사용된 RESIS[7] 및 기타 프로그램(SGSYS [13], J-P[14])과의 접촉전압 계산결과가 서로 잘 일치함을 확인하였다(표3참조).

표 1. 접지망 재원요약

	경우1	경우2	경우3	경우4
면적	300x240 m ²	300x300 m ²	80x60 m ²	60x60 m ²
도체간격	6-20 m	6.7-20 m	1.6-10 m	1.3-10 m
한변 도체수	16-51 개	16-46 개	9-51 개	7-46 개

표 2. IEEE Std 80의 모의실험[7]과의 주요 차이점

	IEEE Std 80-1996 개정안의 모의조건	본 논문에서의 모의조건
매설깊이	0.5 m	1.0 m
도체굵기	78 mm ²	150 mm ²
대지저항률	100 Ω-m	500 Ω-m
접지면적 (정방형)	20x20 m ² -150x150 m ² (도체간격 5-15m) (모의실험 횟수:10회)	60x60 m ² , 300x300 m ² (도체간격 1.3-20m) (모의실험 횟수:12회)
접지면적 (직사각형)	80x5 m ² -480x30 m ² (도체간격 5-20m) (모의실험 횟수:8회)	80x60 m ² , 300x240 m ² (도체간격 1.6-20m) (모의실험 횟수:12회)
모의조건 의 주요 차이점 (단, L형, T형 부지는 고려대상 에서 제외)	- 면적이 넓은 경우, 도체간격이 10-20m - 면적이 좁은 경우, 도체간격이 5-20m - 면적의 가로:세로비가 4-16으로 크다. - 모의실험의 약 80%가 도체간격이 10m 이상 - 매설깊이가 얇다.	- 면적이 넓은 경우, 도체간격이 6-20m - 면적이 좁은 경우, 도체간격이 1.3-10m - 면적의 가로:세로비가 최대 1.33으로 작다. - 모의실험의 약 80%가 도체간격이 10m 이하 - 매설깊이가 깊다.

표 2는 IEEE Std 80-1996의 RESIS를 이용한 컴퓨터 모의실험과 본 논문에서의 MALT를 이용한 모의실험 조건의 주요 차이점을 보인 것이다. 매설깊이의 경우 국내 변전소 접지망매설깊이는 대개 1 m 내외이며, 도체간격 또한 대부분 5 m 이하가 대부분인 반면, IEEE Std 80-1996의 모의실험은 매설깊이를 0.5m로 가정하였고 도체간격도 10 m 이상인 경우가 80%로 국내실험과는 다소 차이가 있음을 볼 수 있다. 특히 접지망의 매설깊이는 최대 접촉전압이 발생하는 위치와 크기에 큰 영향을 줄 수 있으며(그림1 참조), IEEE Std 80-1976년과 1986년판의 접촉전압 비교사례를 볼 때에도 도체간격이 좁아 질수록 오차가 커지는 사례가 있어[15], 이에 대한 검증이 반드시 필요하였다.

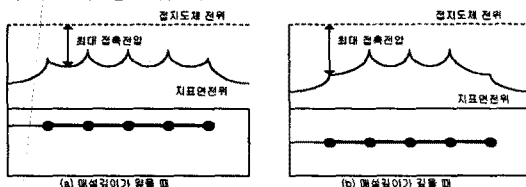


그림 1. 매설깊이와 지표면전위분포의 관계

표 3. 정방형 접지망의 접촉전압(단위:접지전위의 %)

접지망 크기[m]	n	d	h	최대 접촉전압			
				RESIS	SGSYS	J-P	MALT
8x8	1	14	0.50	45.54	47.00	-	45.73
24x24	9	14	0.50	28.12	28.70	-	28.21
30x30	1	10	0.50	55.56	56.93	58	55.77
40x40	16	10	0.25	29.28	30.12	32	29.51
50x50	25	10	0.25	27.18	27.88	28	27.41
60x60	36	10	1.00	22.40	22.94	23	23.77
70x70	49	10	1.00	21.18	21.80	21	23.05
80x80	64	10	1.00	20.22	20.87	-	22.13

(단, n:매쉬갯수, d:도체직경[mm], h:매설깊이[m])

아래 표4는 IEEE Std-80의 계산식(식1)과 MALT를 이용한 컴퓨터 모의실험 결과를 요약한 것이다.

표 4. 접촉전압 계산결과 요약(D:도체간격,n:한변도체수)

CASE1	N	D	IEEE		MALT		오차	접촉전압 오차	보정계수	
			값	값	값	값				
16	20.0	192.4	168.6	166.9	157.9	14.13	7.03	0.58	0.93	
21	15.0	161.3	147.2	146.4	131.6	9.58	6.61	0.91	0.94	
31	10.9	124.4	132.8	107.0	101.4	-6.38	5.54	1.07	0.95	
41	7.5	102.2	123.9	87.1	94.7	-17.58	-8.08	1.21	1.09	
51	6.0	86.7	117.6	73.4	69.6	-26.28	-18.18	1.36	1.22	
CASE2										
16	20.0	166.3	145.2	146.6	136.1	14.58	7.74	0.87	0.93	
21	15.0	139.7	127.2	122.1	113.7	9.48	7.48	0.91	0.93	
31	10.9	107.8	114.8	93.3	87.9	-6.18	6.24	1.06	0.94	
41	7.5	88.4	107.3	75.9	82.1	-17.58	-7.61	1.21	1.08	
46	6.7	81.2	104.4	69.3	79.7	-22.28	-13.08	1.29	1.15	
CASE3										
9	10.9	776.4	798.8	619.3	603.0	-2.58	2.74	1.03	0.97	
11	8.0	654.8	741.8	513.1	553.3	-11.78	-7.38	1.13	1.08	
16	5.3	499.0	671.8	379.6	496.5	-25.78	-23.58	1.35	1.31	
80x60	21	4.0	404.0	621.1	301.0	450.6	-35.08	-33.28	1.54	1.50
31	2.7	301.9	558.9	216.9	355.4	-46.58	-43.68	1.85	1.77	
41	2.0	230.8	522.3	175.2	349.9	-52.38	-48.88	2.08	1.95	
51	1.6	219.0	494.9	155.4	321.1	-55.78	-51.68	2.26	2.07	
CASE4										
7	10.0	954.3	971.0	754.2	752.6	-1.74	2.94	1.02	0.97	
11	6.0	662.6	837.8	502.1	613.6	-20.38	-18.08	1.26	1.23	
16	4.0	495.2	751.1	363.4	542.0	-34.18	-32.98	1.52	1.49	
60x60	21	3.0	404.2	637.2	290.4	432.0	-42.38	-40.68	1.72	1.68
31	2.0	309.3	630.0	217.1	419.4	-50.98	-48.28	2.04	1.93	
41	1.5	262.6	588.6	182.8	376.3	-55.48	-51.48	2.24	2.06	
46	1.3	247.6	573.2	172.3	360.6	-56.58	-52.28	2.32	2.09	

IEEE Std 80의 접촉전압 계산식과 컴퓨터 모의실험의 계산결과 비교 그래프는 부록을 참조하기 바란다. 표3의 접촉전압 계수는 모의실험과 IEEE 계산식의 차이를 보정하는 계수를 유도하기 위하여, 식(6)에 의하여 계산된 값이다.

$$\%오차 = \frac{IEEE\ 계산식의\ 접촉전압 - 컴퓨터\ 모의실험값}{컴퓨터\ 모의실험값} \quad (5)$$

$$접촉전압\ 보정계수 = \frac{컴퓨터\ 모의실험값}{IEEE\ 계산식에\ 의한\ 접촉전압} \quad (6)$$

표 3에서 볼 수 있듯이 접지극 형상과 관계없이 면적이 큰 경우(=도체간격이 넓은 경우), 접촉전압 보정계수는 1보다 작거나 유사하며, 이는 IEEE 계산식에 의한 값이 모의실험 값보다 다소 가혹하거나 거의 같은 것을 의미한다. 그러나 접지면적이 작은 경우(=도체간격이 좁은 경우), 보정계수는 매우 커지며 오차도 50%이상 커진다(표3, 부록1 참조).

이같은 차이는 표 2에서 요약한 것처럼, IEEE 계산식을 유도하기 위하여 수행된 컴퓨터 모의실험과 본 보고서에서 제시한 모의실험 조건이 다르기 때문이며, 특히 한변 도체수가 41개의 초과여부 보다는 도체간격이 좁아

점에 따라 IEEE Std 80-1996의 접촉전압 계산값이 부정확해짐이 확인되었다.

3. 접촉전압 보정계수

서론에서 기술하였듯이 우리나라는 변전소 부지가 협소한 경우가 많고 심층토양으로 갈수록 암반이 나타나는 등 대지저항율이 비교적 높기 때문에, 접지망의 도체간격을 충분히 설계하는 경우가 많다. 이 경우 IEEE Std 80-1996의 계산식을 그대로 사용하게 되면, 2절의 표 3과 부록1에서 볼 수 있듯이 접촉전압이 과소평가됨에 따라 접촉전압이 안전허용치를 초과하더라도, 허용치 이내인 것처럼 계산될 수 있다.

이러한 문제를 피해갈 수 있는 가장 좋은 방법은 유한 요소해석에 의하여 접촉전압을 계산하는 컴퓨터 프로그램들[9-14, 16, 17]을 이용하는 방법이다. 만일 IEEE 수계산식을 그대로 이용하고자 한다면, IEEE 계산식과 컴퓨터 모의실험의 접촉전압 결과와의 차이를 보정해주는 또 다른 계수를 만들어 적용하는 방법을 생각할 수 있다.

표3과 부록1의 계산결과로 볼 때, 이러한 접촉전압 보정계수는 한번 도체수보다는 도체간격과 깊은 관계가 있으므로, 도체간격의 함수로서 표현하기로 한다.

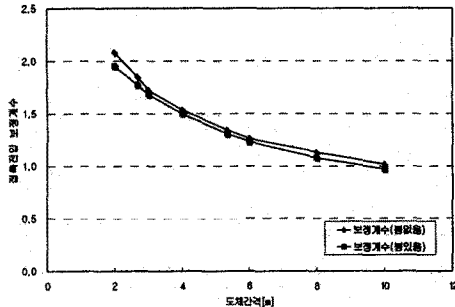


그림 2. 도체간격에 따른 접촉전압 보정계수

3.1 접촉전압 보정계수의 유도

표 3의 계산결과에서 얻어진, 도체간격에 따른 접촉전압 보정계수는 그림 2와 같은 경향을 보인다. 그림 2의 보정계수값의 경향과 가장 잘 일치하는 어떠한 형태의 도체간격의 함수를 찾아가자 할 때, 우선 생각할 수 있는 가장 간단한 형태는 식(7)의 1차함수 형태의 보정계수식이다(D는 도체간격). 식(8)-(10)은 각각 로그함수, 누승 및 2차함수 형식으로 나타낸 보정계수식들이다. 식(7)-(10)의 첨자 10은 10[m]를 의미하며, 그림 2의 도체간격이 2~10 [m] 사이의 보정계수값에 가장 잘 일치하도록 식별된 함수들의 예를 보인 것이 그림 3이다.

$$K_{10} = -0.1202 \cdot D + 2.0532 \quad (7)$$

$$K_{10} = -0.6215 \cdot \ln(D) + 2.3701 \quad (8)$$

$$K_{10} = 2.7159 \cdot D^{-0.4416} \quad (9)$$

$$K_{10} = 0.0144 \cdot D^2 - 0.2899 \cdot D + 2.447 \quad (10)$$

도체간격이 작아짐에 따라, 원래의 IEEE 계산식과 식 7-10의 보정계수식을 곱했을 때의 계산결과와 차이를 경향을 그림 3,4에 나타내었다.

그림 3,4에서 1차함수형태의 보정계수(식7)은 도체간격이 좁아지는데도 접촉전압이 커지는 구간이 여전히 존재한다. 로그함수형태의 보정계수(식8)은 도체간격이 좁아지면서 접촉전압 저감이 거의 없는 구간이 존재하며, 도체간격의 2차함수형식이나 누승형식이 보정계수 적용 전후(도체간격 10m)에 가장 부드럽게 접촉전압이 연속적으로 변한다(표5 참조). 그러나 2차함수(식10)보다는 누승식(식9)이 함수형태가 간단하고, 10 m 전후에서 접촉전압의 기울기 변화도 식9가 더 부드럽고, 선형에 가깝다. 따라서 접촉전압 보정계수 함수식은 식9의 K_{10} 이 가장 적합하였다.

※ 접촉전압 보정계수

$$K_{10} = 1.0 \quad (\text{도체간격이 } 10 \text{ m 초과})$$

$$= 2.7159 D^{-0.4416} \quad (\text{도체간격이 } 10 \text{ m 이하})$$

$$E_{touch} = K_{10} \cdot \rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot \frac{I_g}{L}$$

표 5. K_{10} 계수 적용시 접촉전압 계산치의 연속성

접지면적 [m ²]	1차(식7)	로그(식8)	누승(식9)	2차(식10)
60 x 60	X	⊙	⊙	⊙
80 x 60	X	△	⊙	△
300 x 240	X	△	⊙	⊙
300 x 300	X	△	⊙	⊙

(⊙): 연속적으로 감소, △: 연속적으로 감소하나 변화가 거의 없는 구간도 있음, X: 연속적으로 증가하는 구간이 있음)

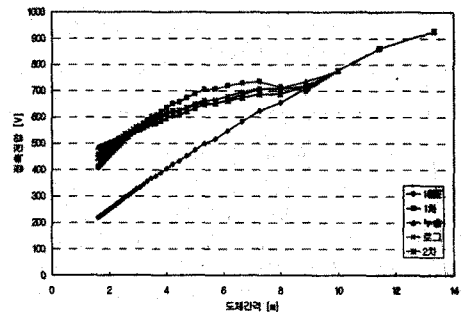


그림 3. 80x60m² 접지면에서 K_{10} 적용결과 ($\rho=500 \Omega \cdot m$)

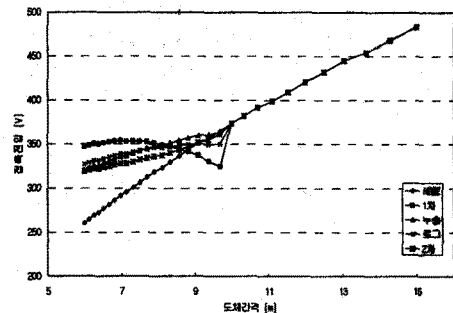


그림 4. 300x240m² 접지면에서 K_{10} 적용결과 ($\rho=1500 \Omega \cdot m$)

3.2 K_{10} 계수의 적용

본 절에서는 3.1절에서 구해진 접촉전압 보정계수 K_{10}

를 임의 접지망의 접촉전압 계산에 적용했을 때, 컴퓨터 모의실험 결과와의 오차가 얼마나 작아지는지를 표 5와 6에 요약하였다. K_{10} 계수의 유효성을 검증하기 위하여 면적이 $150 \times 100 \text{m}^2$ (도체간격 : 3.75~15m)인 접지망을 추가 검토 하였다.

표 5. K_{10} 계수 적용결과 요약(접지봉 없음)

접지면적 [m^2]	도체간격 축소에 따라 접촉전압이 연속적으로 감소하는가?	도체간격 10m 이하일 때 IEEE 계산식과 컴퓨터 모의실험의 접촉전압 계산치 최대오차율		비고 (도체간격 =D)
		K_{10} 적용 전	K_{10} 적용 후	
60x60	예	-56.8 %	-3.4 %	$D \geq 1.3 \text{ m}$
80x60	예	-55.7 %	-4.9 %	$D \geq 1.6 \text{ m}$
150x100	예	-41.4 %	-9.3 %	$D \geq 3.6 \text{ m}$
300x240	예	-26.2 %	-9.2 %	$D \geq 6.0 \text{ m}$
300x300	예	-22.2 %	-8.6 %	$D \geq 6.7 \text{ m}$

표 6. K_{10} 계수 적용결과 요약(접지봉 있음)

접지면적 [m^2]	도체간격 축소에 따라 접촉전압이 연속적으로 감소하는가?	도체간격 10m 이하일 때 IEEE 계산식과 컴퓨터 모의실험의 접촉전압 계산치 최대오차율		비고
		K_{10} 적용 전	K_{10} 적용 후	
60x60	예	-52.2 %	+14.3 %	접지봉(길이 3m)은 접지망 가장자리 도체 접속점마다 시공
80x60	예	-51.6 %	+6.8 %	
150x100	예	-37.3 %	-3.1 %	
300x240	예	-18.1 %	+3.7 %	
300x300	예	-13.0 %	+4.3 %	

4. 결론

국내의 변전소 접지설계 사례들을 참고하여 IEEE Std 80-1996 개정안의 접촉전압식 적용범위를 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- IEEE Std 80-1996 개정안의 접촉전압 계산식 적용 범위는 한번 도체갯수보다는 접지도체 간격과 관련이 있으며, 접지도체 간격이 10m를 초과하는 경우에는 컴퓨터 모의실험 결과와 비교적 잘 일치하였으나, 10m 이하에서는 모의실험 결과에 비하여 오차가 커지는 것으로 나타났다.

- 따라서 접지망 도체간격이 10m 이하인 경우에는 GDP [16,17] 등과 같은 유한요소해석에 의한 접촉전압 계산프로그램을 사용하거나, IEEE 접촉전압 계산식에 보정계수 K_{10} 을 곱하여 사용할 것을 권고한다.

참고문헌

- [1] F.P.Dawalibi, M.Bouchard, D.Mukedkar, "Survey on Power System Grounding Design Practices", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-99, No.4, July/Aug 1980
- [2] HARDY BBT Ltd., "Earth Resistivities of Canadian Soils", CEA Report No.143-T-250, Vol.1, 1988 pp.87-93
- [3] 한국전력공사, "설계기준-변전편 2602(접지설계지침)", 1984.3
- [4] ANSI/IEEE Std 80-1986, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", 1986, pp.117
- [5] ANSI/IEEE Std 80-1996(draft 10), "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", 1997, pp.110
- [6] J.Severak, "Progress in Step and Touch Voltage Equations of ANSI/IEEE Std 80 - Historical Perspective", IEEE Trans.on PD, Vol.13, No.3, July 1998
- [7] B.Thapar, V.Gerez, A.Balakrishnan, D.Blank, "Simplified Equations for Mesh and Step Voltages in an AC Substation", IEEE Trans. on PD, Vol.6, No.2, April 1991
- [8] 한전 전력연구원, "765 kV 신서산변전소 접지설계(안) -TM.95YJ12.P1998.751", 1998.10
- [9] F.P.Dawalibi, D.Mukhedkar, "Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure-Part I Analytical Study" IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-94, No.2, Mar/Apr, 1975
- [10] SES, MALT Users' Manual, 1998.12
- [11] F.P.Dawalibi, D.Mukedkar, D.Bensted, "Measured and Computed Current Densities in Buried Ground Conductors", IEEE Trans.on PAS, PAS-100, No.8, 1981