

전력용 변전소에 설치된 메쉬 접지망의 고주파 임피던스 계산

한 풍, 최창혁
한국전력기술주식회사 전력기술개발연구소

High Frequency Impedance Calculation of Grounding Meshes Installed at Power Substations

Poong Han, Chang-hyek Choi
Power Engineering Research Institute, Korea Power Engineering Co.

Abstract - The ground potential rise generated by the switching surge or lightning stroke may be dangerous to personnel and cause damage to electronic control parts. For a first step to the transient performance analysis, high frequency impedances of grounding grids have been calculated and discussed. Grounding grids include 7 square grids from 10m×10m to 80m×80m. The high frequency current was injected into the center and a corner of the grounding grid. The calculation results indicate that the impedance of the grounding grid is significantly influenced by frequency and the point of injection of the current, and the effective radius of a large grounding grid may be represented in 15~20m.

1. 서 론

산업계에 전자제어 부품이나 디지털 신호기술이 더욱 더 많이 적용되어 감에 따라 전자제어 부품의 손상사고 또는 기능장애 문제를 해결하기 위하여 스위칭 써지나 뇌격에 의한 접지시스템의 과도 임피던스에 대한 관심이 증대되어 가고 있으나 우리 나라에서 접지설계시에 이에 대하여 별로 고려하고 있지 않은 실정이다. 그 이유는 과도 임피던스에 관한 각계의 연구결과가 많지만 [1~9] 이를 접지설계에 적용할 수 있도록 연구자체가 아직 미흡하고 연구결과도 체계화되지 않았기 때문일 것이다.

본 논문에서는 과도 임피던스에 관한 이론적인 설명이나 계산방법 등에 관하여 언급하기보다는 과도특성 해석에 접근하는 첫 단계로서 전력용 변전소에 설치된 메쉬 접지망의 고주파 임피던스 값을 계산하여 상용 주파수 접지용으로 설치된 접지망에 대한 고주파 특성을 파악하고자 한다. 이를 이용하여 메쉬 접지망의 고주파 임피던스를 측정하고 결과를 분석할 수 있을 것이며, 과도 임피던스 저감을 위한 보조 접지망 설계와 과도 임피던스 특성해석에 쉽게 접근할 수 있으리라고 생각한다.

고주파 임피던스를 계산하기 위하여 캐나다 SES사에서 개발한 HIFREQ 프로그램을 활용하였다 [10]. HIFREQ 프로그램은 전자계접근법에 의하여 전자계를 해석하는 것으로 알려져 있다 [1~3].

2. 본 론

2.1 메쉬 접지망 기본 구조

상용 주파수용으로 설치된 접지망은 포설면적이 10m×10m, 20m×20m, 30m×30m, 40m×40m, 50m×50m, 60m×60m, 80m×80m 이며, 접지망은 지하 1m에 매설되고, 접지리드선은 편의상 지중에만 존재하는 것으로 하여 1m로 가정한다. 접지도체의 굵기는 250mm²로 한다. 메쉬간격은 5m×5m를 기본으로 하

고, 10m×10m인 경우에 대하여 일부 검토한다.

2.2 검토 주파수

뇌써지전류는 보통 다음과 같이 가정할 때 이에 대한 주파수 스펙트럼을 구한 경우 가장 큰 주파수가 6.8MHz가 됨으로 [4] 본 논문에서는 계산시간을 줄여 기본적으로 특정한 주파수에 대한 임피던스를 계산하기 위하여 60Hz 상용주파수와 1, 10, 100, 500kHz와 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7MHz 주파수를 선택하여 검토한다.

$$I(t) = 30000 \times (e^{-14000t} - e^{-6000000t}) [A] \quad (1)$$

여기서 t : 시간 [초]

2.3. 임피던스 계산결과

2.3.1. 접지망 크기별 임피던스

고주파 임피던스를 계산하기 위하여 접지시스템은 다음과 같이 모델링 하였다. 접지망 크기는 2.1항에서 설명한 바와 같이 10m×10m ~ 80m×80m, 접지도체 간격은 5m×5m와 10m×10m, 토양은 보통 습한 것으로 간주하여 비유전율을 9로 [1,2,5], 비투자율은 1로, 대지고유저항은 1,000Ω·m로 가정하였다. 접지리드선은 접지망의 중앙에 위치하고 길이를 1m로 하며, 리드선의 시작점에 1A의 전류를 주입하는 조건으로 하였다.

임피던스 계산결과는 그림-1과 같다. 60Hz에서 100kHz까지는 주파수가 변동함에도 불구하고 접지 임피던스가 거의 변화하지 않으며, 접지망의 크기가 커지면 임피던스가 낮아짐을 나타내고 있다. 특히 60Hz 주파수에서의 접지저항은 다른 프로그램으로 계산한 결과와 일치한다.

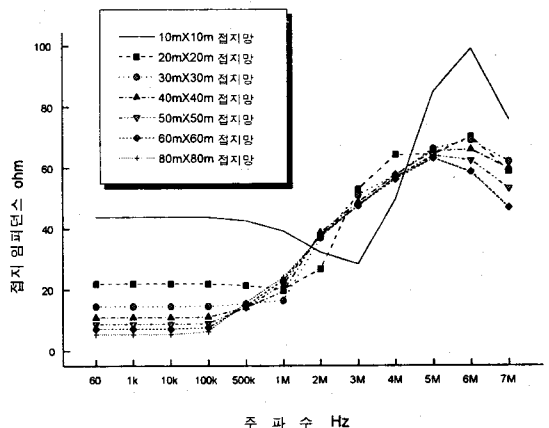


그림-1 주파수별 접지 임피던스 ($\epsilon_r = 9$, $\rho = 1,000\Omega \cdot m$, 도체간격 5m, 접지망 중심점 전류주입)

그러나 주파수가 증가함에 따라 접지임피던스가 변화

하는데 규모가 작은 10m×10m 접지망의 접지 임피던스는 3MHz에서 60Hz에서보다 낮아지다가 주파수가 증가하면 임피던스가 증가하며, 다른 규모의 접지망에 비하여 가장 높은 값을 나타내고 있다. 10m×10m 접지망의 임피던스 변화폭은 다른 규모의 접지망보다 심하다. 그 다음으로 20m×20m 접지망의 임피던스 변화폭이 약간 큰 편이나 나머지 접지망의 접지 임피던스의 변화 추세가 비슷하다.

그림-2는 그림-1에서 1k~100kHz 주파수를 제외하고, 10m×10m 접지망을 삭제하며, 도체간격 10m인 20m×20m, 40m×40m, 60m×60m 및 80m×80m 접지망의 접지 임피던스를 추가하여 그린 것이다. 3MHz 이하에서는 도체간격 10m인 접지망의 접지 임피던스가 도체간격 5m인 접지망의 접지 임피던스보다 높지만 4~6MHz 주파수에서는 오히려 낮아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 도체간격 10m인 접지망에서도 접지망 면적이 증가하더라도 접지 임피던스가 거의 40m×40m 접지망의 임피던스에 포화하고 있음을 알 수 있다.

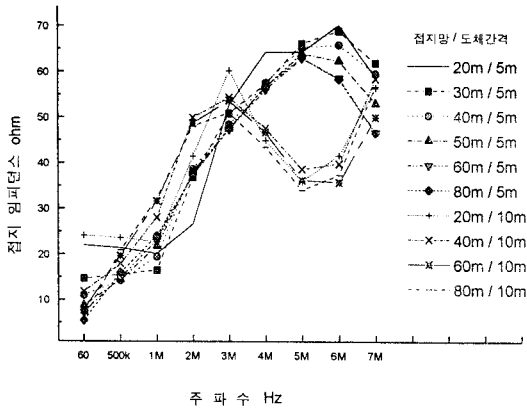


그림-2 주파수별 접지 임피던스
($\epsilon_r = 9$, $\rho = 1,000 \Omega \cdot m$, 도체간격 5m 및 10m, 접지망 중심점 전류주입)

결과적으로 대지고유저항이 $1,000 \Omega \cdot m$ 일 경우 접지망의 규모가 30m×30m 또는 40m×40m 이상을 초과하더라도 접지 임피던스 값이 거의 포화한다는 것을 알 수 있다. 따라서 고주파 임피던스를 계산할 경우에 비슷한 결과를 얻으면서 전산처리 시간을 단축시키기 위하여 대규모 접지망을 30m×30m 또는 40m×40m로 모델링할 수 있음을 나타내고 있다. 이와 같이 접지망의 규모가 커더라도 과도 임피던스 값이 전류주입점으로부터 일정 거리 이내에 있는 접지도체에 의해 결정되는 거리를 유효거리 또는 유효반경이라 하며[7,8] 상기 예에서는 15~20m가 되는 셈이다. 이 유효거리의 접지망의 구성, 대지고유저항, 토양의 비유전율, 주파수 등에 의하여 달라진다.

그림-1 또는 그림-2에 도시된 임피던스를 아주 단순화하여 그림-3과 같은 등가회로를 생각할 수 있다. L은 접지도체의 자기 인덕턴스이고, R과 C는 접지도체와 대지와의 저항과 커패시턴스를 나타낸다. 주파수가 60Hz 일 경우 L과 C를 무시하면 R만이 존재하여 접지 임피던스는 저항성분에 가까워진다. 주파수가 높아지면 L과 C값에 따라 합성 임피던스가 용량성도 되고 유도성도 될 수 있을 것이다. 실제로 그림-1에서 10m×10m 접지망의 임피던스가 4, 5, 6MHz 이외의 주파수에서 용량성이었고, 20m×20m 접지망에서는 100k, 500k, 1M, 7MHz에서 용량성이었다. 그리고 도체간격 5m인 모든 접지망이 7MHz에서 용량성을 나타내었다. 그림

-2의 도체간격 10m인 접지망에서는 20m×20m 접지의 임피던스가 500kHz와 1MHz에서 용량성이었고 4MHz 및 5MHz에서 도체간격 10m인 접지망의 접지 임피던스가 모두 용량성을 나타내었다.

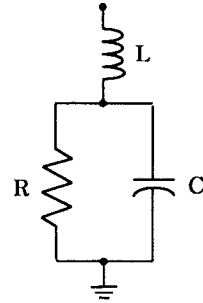


그림-3 접지망의 고주파 임피던스 등가회로

이상 검토된 내용을 종합하면 매쉬 접지망의 접지 임피던스는 접지도체의 구성과 크기 및 주파수에 따라 변화하나 접지망이 대규모가 될지라도 대략 30m×30m ~ 40m×40m 접지망 또는 유효반경 15~20m 인 접지망의 접지 임피던스 값에 포화한다. 또한 고주파 접지 임피던스는 접지도체의 구성과 크기 및 주파수에 따라 용량성도 되고 유도성이 될 수 있으며, 4~6MHz에서는 도체간격이 넓은 10m 접지망의 접지 임피던스가 도체간격 5m인 접지망의 임피던스보다 낮을 수 있다.

2.3.2. 대지고유저항별 접지 임피던스

2.3.1. 항의 계통조건에서 주파수를 60Hz와 5MHz (앞항에서 검토한 4~6MHz의 중간 주파수) 두 종류로 하고, 대지고유저항을 100, 500, 1,000, 1,500, 2,000 및 3,000 $\Omega \cdot m$ 로 변경시켜가면서 접지 임피던스를 계산하여 그림-4에는 접지도체 간격이 5m이고 주파수가 60Hz와 5MHz일 경우, 그림-5에서는 주파수가 5MHz이고 접지도체 간격이 5m 및 10m 일 경우의 각 접지망별 접지 임피던스를 나타내었다.

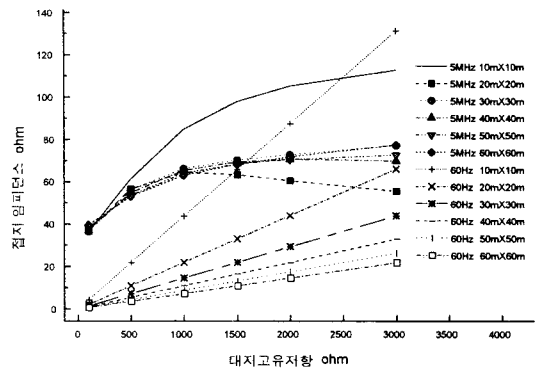


그림-4 대지고유저항별 60Hz 및 5MHz 접지 임피던스
($\epsilon_r = 9$, 도체간격 5m, 접지망 중심점 전류주입)

그림-4에서 60Hz 접지 임피던스는 예측한대로 대지 고유저항 값에 비례하고 있지만, 5MHz 접지 임피던스는 10m×10m 접지망을 제외하고 대지고유저항 1,500 $\Omega \cdot m$ 에서 어느 정도 포화하는 경향을 나타내고 있으며, 대지고유저항이 2,000 $\Omega \cdot m$ 일 경우 10m×10m 접지망의 60Hz 접지 임피던스보다 작은 결과를 나타내고 있다. 대지고유저항이 3,000 $\Omega \cdot m$ 일 경우 10m×10m 접지망의 60Hz의 접지 임피던스는 5MHz 접지 임피던스보다 큰 결과를 나타내고 있다

그림-5에서 접지도체 간격이 10m인 경우에도 40m×40m 접지망의 접지 임피던스가 가혹한 편이며, 대지고유저항이 1,500Ω·m일 때 접지 임피던스가 포화하는 경향을 나타내고 있다.

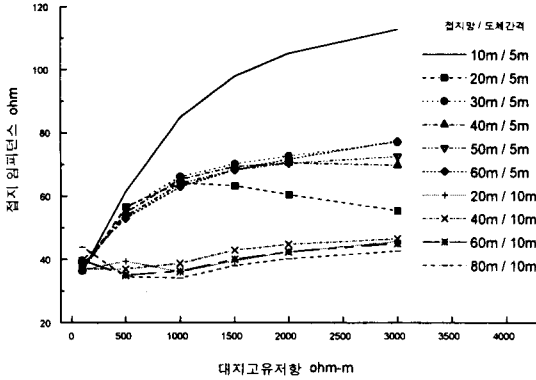


그림-5 대지고유저항별 5MHz 접지 임피던스 ($\epsilon_r = 9$, 도체간격 5m 및 10m, 접지망 중심점 전류주입)

종합적으로 대지고유저항이 높을 경우에는 고주파수에서의 접지 임피던스가 60Hz 접지저항보다 더 낮아질 수 있으며, 고주파수의 접지 임피던스는 대지고유저항이 높아져도 1,500Ω·m에서 포화되는 경향을 가지고 있다.

2.3.3. 전류 주입점별 접지 임피던스

그림-1, -2, -4 및 -5는 40m×40m 접지망의 중심점(0m, 0m, 0m)에 전류를 주입한 경우인 바 본 장에서는 40m×40m 접지망의 좌하귀의 점(-20m, -20m, 0m)에 5MHz 1A의 전류를 주입하고, 토양의 비유전율을 1(공기와 동일), 4(건조함) 및 9(보통 습함)로, 접지도체 간격을 5m와 10m로 한 경우를 검토하여 그 결과를 표-1 및 그림-6에 나타내었다.

검토번호 1 및 2에서 접지망의 중심점에 전류를 주입하였을 때의 접지 임피던스는 65.38Ω이었으나, 좌하귀에 주입하였을 경우에는 79.65Ω으로 21.8% 증가하였고, 검토번호 3 및 4에서는 접지도체 간격이 10m로 증가함에 따라 중심점에 전류를 주입한 경우에는 40.8%, 좌하귀에 전류를 주입한 경우에는 접지 임피던스가 24.2% 감소하고 모두 용량성이었다.

표-1 도체간격 및 전류 주입점별 접지 임피던스 ($\rho = 1,000\Omega \cdot m$, 접지망: 40m×40m, 주파수: 5MHz)

검토 번호	토양의 비유전율	도체 간격	전류 주입점	접지 임피던스	
				절대값(Ω)	위상각(도)
1	9	5m	중심점	65.38	32.14
2	9	5m	좌하귀	79.65	11.86
3	9	10m	중심점	38.72	-82.93
4	9	10m	좌하귀	60.38	-86.65
5	4	5m	중심점	69.57	45.58
6	4	5m	좌하귀	102.50	25.89
7	4	10m	중심점	60.78	20.30
8	4	10m	좌하귀	93.42	13.04
9	1	5m	중심점	75.16	56.11
10	1	5m	좌하귀	116.30	41.07
11	1	10m	중심점	78.59	42.72
12	1	10m	좌하귀	119.70	33.56

토양의 비유전율이 감소함에 따라 전류를 접지망의 중심점에 주입하고 접지도체 간격이 5m일 경우에는 임피

던스 증가율이 10% 미만이나, 좌하귀에 주입할 경우에는 증가율이 14~29%로 높아지고, 접지도체 간격이 10m일 경우에는 28~55%로 상당히 높아지고 있다. 이는 비유전율이 낮아지면 대지의 커패시턴스가 작아지기 때문이다.

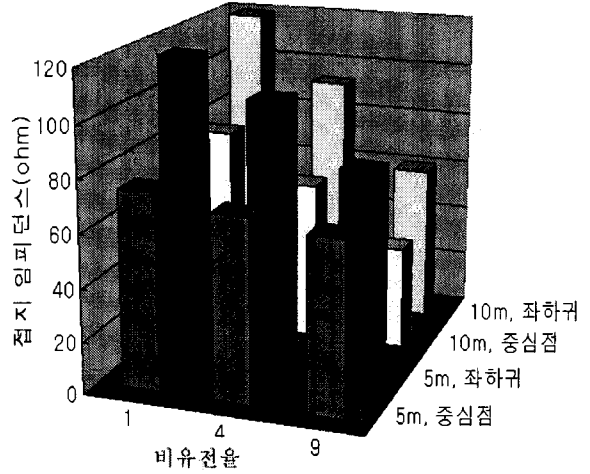


그림-6 비유전율 변화에 따른 접지 임피던스

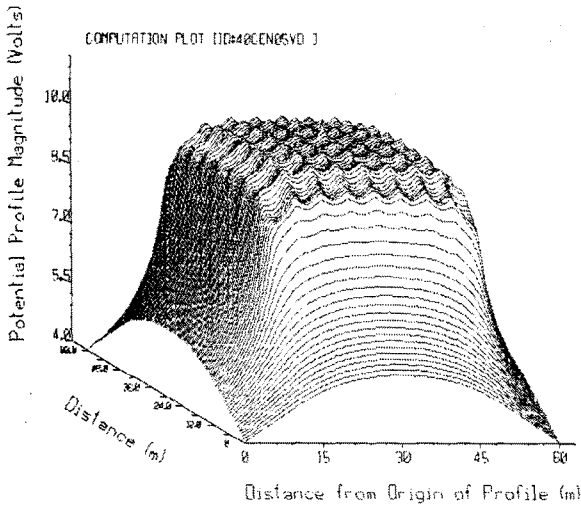
검토결과 접지 임피던스는 접지망의 중심점에 전류를 주입할 경우보다 모서리에 주입할 경우에, 또 토양의 비유전율이 크고 접지도체가 촘촘히 배열될수록 커지게 된다.

2.4. 대지전위 분포

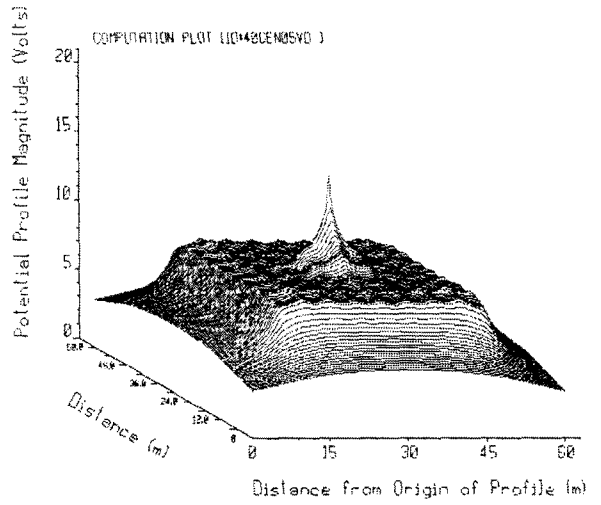
대지고유저항이 1,000Ω·m, 토양의 비유전율이 9, 접지망이 40m×40m, 접지도체 간격이 5m, 접지리드가 1m와 20m, 접지망의 중심점과 좌하귀에 주파수 60Hz, 1MHz, 5MHz인 1A의 전류를 주입한 경우의 대지표면(60m×60m) 전위분포 곡선을 그림-7에 나타내었다.

그림-7-1은 주파수 60Hz, 접지리드 1m, 접지망 중심점에 1A의 전류를 주입한 경우로서 최대 대지전위 상승전압은 10.97V이고, 접촉전압 2.5V 이내의 등전위면을 나타내고 있다. 그림-7-2는 주파수 1MHz 전류를 주입한 경우로서 접지리드의 전위는 19.49V까지 상승하나, 지표면의 최대전위는 15.70V이며, 중심점으로부터 반경 5m의 부근의 대지전위는 60Hz일 경우와 유사하고 그 이후는 약간 낮은 편이다. 그림-7-3은 주파수 5MHz 전류를 주입한 경우로서 접지리드의 전위는 65.38V까지 상승하나, 지표면의 최대전위는 47.09V이며, 중심점으로부터 반경 11m의 부근의 대지전위는 60Hz일 경우와 유사하고 그 이후는 급격히 감소하여 접지망 가장자리의 대지전위는 3V 이하로 떨어진다.

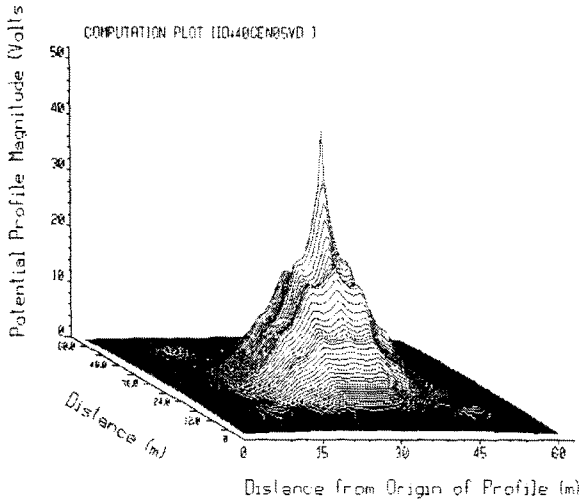
그림-7-4~5는 접지망 좌하귀에 전류를 주입할 경우이다. 주파수가 60Hz일 경우에는 접지도체의 인덕턴스 성분은 무시하기 때문에 그림-7-1과 동일한 결과를 얻게 되나, 주파수가 높아지면 결과가 달라진다. 그림-7-4는 1MHz 전류를 주입한 경우로서 접지리드의 전위가 49.59V까지 상승하여 그림-7-2와 비교하면 접지 임피던스가 2.5배로 급증함을 보여주고 있다. 지표면의 최대전위는 37.07V이며, 모서리로부터 27m 떨어진 지점의 대지전위가 60Hz일 경우와 유사하여 높은 대지전위 대역이 더 넓어진 셈이다. 그림-7-5는 5MHz 전류를 주입한 경우로서 접지리드의 전위가 79.65V까지 상승하여 그림-7-3과 비교하면 1.2배로 증가함을 보여주고 있다. 지표면의 최대전위는 51.57V이며, 모서리로부터 13m 떨어진 지점의 대지전위가 60Hz일 경우와 유사



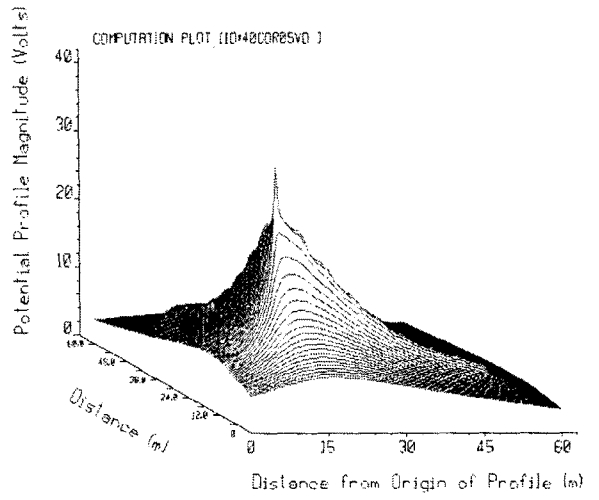
(1) 주파수: 60Hz, 중심점 전류주입, 접지리드: 1m



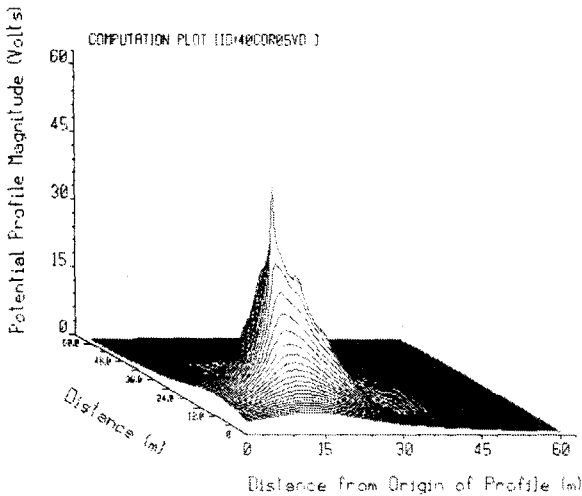
(2) 주파수: 1MHz, 중심점 전류주입, 접지리드: 1m



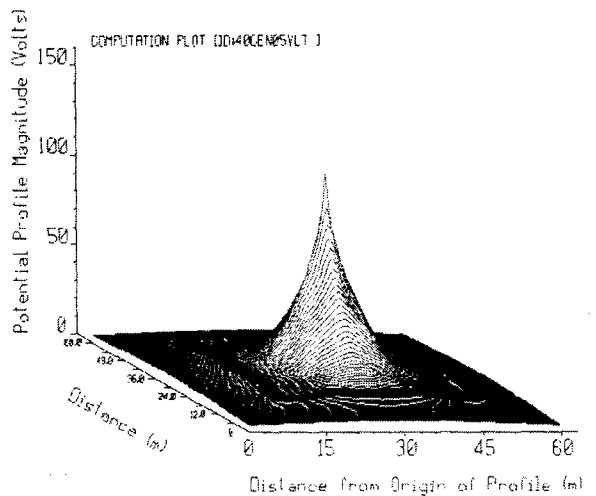
(3) 주파수: 5MHz, 중심점 전류주입, 접지리드: 1m



(4) 주파수: 1MHz, 좌하귀 전류주입, 접지리드: 1m



(5) 주파수: 5MHz, 좌하귀 전류주입, 접지리드: 1m



(6) 주파수: 5MHz, 중심점 전류주입, 접지리드: 20m

그림-7 대기전위 분포 곡선(비유전율: 9, 접지망: 40m×40m, 도체간격: 5m)

하고 그 이후는 급격히 감소하여 접지망 가장자리의 대지전위는 2V 이하로 떨어진다. 그림-7-4에서 60Hz일 경우의 대지전위보다 높은 대역이 1MHz를 주입한 그림-7-4와 비교하면 약 2배가 된다.

그림-7-6은 접지망 중심점에 5MHz 전류를 주입하되, 접지리드의 길이를 대기중으로 19m 더 연장한 경우이다. 접지리드의 최대전위가 771.7V, 접지리드의 지표면과 경계점에서의 전위가 136V까지 상승하여 지표상의 접지리드에서의 전위차가 635.7V가 되며, 그림-7-3과 비교하면 지중에 매설된 접지계통의 접지 임피던스가 약 2.1배 증가함을 보여주고 있다. 지표면의 최대전위는 119.1V이며, 접지망 중심점으로부터 15m의 부근의 대지전위는 급격히 감소하여 60Hz일 경우와 유사하게 된다.

검토결과 주입된 전류의 주파수가 높을수록 대지전위 곡선이 뾰족해지나 빨리 감소하고, 접지망 모서리에 전류를 주입하는 것이 접지망 중심에 주입하는 것보다 대지전위상승전압이 커지며, 대기중의 접지리드가 길어지면 접지 임피던스가 증가하는 추세를 나타내고 있다. 또한 40m×40m 접지망의 중심점에서 15~20m 떨어진 지점의 고주파수 대지전위가 60Hz일 때의 대지전위에 접근함으로써 40m×40m 또는 그 이상의 접지망의 유효반경을 15~20m로 보아도 실용상 지장이 없을 것으로 사료된다.

3. 결 론

접지도체 간격이 5m와 10m, 크기가 10m×10m ~ 80m×80m인 접지망에 주파수가 1~7MHz인 전류를 접지망의 중심점과 모서리에 주입하여 접지 임피던스를 계산하였다.

접지 임피던스는 주파수에 가장 민감하게 변화하고, 4~6MHz 대역에서는 접지도체의 간격에 따라서도 크게 변화하였다. 고주파수에 대한 접지 임피던스는 대지 고유저항에 대하여 그렇게 민감하지 않고 대략 1.500 또는 2,000Ω·m에서 포화하는 경향을 가지고 있다.

토양의 비유전율이 크면 접지 임피던스가 작아지고, 접지도체가 촘촘히 배열되어 있으면 접지 임피던스가 비유전율의 영향을 작게 받는다.

접지 임피던스는 고주파 전류를 접지망의 중심점에 주입할 경우에 접지망의 모서리에 주입할 경우보다 작아지며, 대지전위분포도 낮아진다.

여러 가지 경우를 검토한 결과 전력용 변전소에 설치된 대규모 메쉬 접지망의 고주파 임피던스를 계산할 경우에 전산처리 시간을 단축하기 위하여 해당 접지망을 30m×30m 또는 40m×40m 접지망으로 모델링하여도 실용상 지장이 없는 것으로 사료되었다. 바꿔말하면 변전소용 대규모 메쉬 접지망의 유효반경을 15~20m로 볼 수 있다는 것이다.

지금까지의 연구내용은 고주파 전류에 의한 접지 임피던스 계산에 대한 것이었으나, 40m×40m 접지망에 뇌서지 임펄스를 인가하여 과도 임피던스의 특성변화를 연구하고 과도 임피던스 저감을 위한 보조 접지망 설계의 최적화에 대한 연구가 진행 중에 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] W. Xiong, F.P. Dawalibi, "Transient Performance of Substation Grounding Systems Subjected to Lightning and Similar Surge Currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No.3, pp.1412~1420, July 1994
- [2] F.P. Dawalibi, W. Xiong, "Transient Performance of Substation Structures and Associated Grounding Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.31, No.3, pp.520~527, May/June 1995
- [3] L. Greev, F.P. Dawalibi, "An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.5, No.4, pp.1773~1781, November 1990
- [4] How to ... Engineering Guide : "Lightning Transient Study of a Communication Tower", Safety Engineering Services & technologies ltd., 1995
- [5] R. Verma, D. Mukhedkar, "Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.3, pp.1023~1030, March 1981
- [6] S. Karaki, T. Yamazaki, K. Yokota, H. Murase, H. Takahashi, S. Kojima, "Transient Impedance of Grounding Grid", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.2, pp.723~731, April 1995
- [7] B.R. Gupta, B. Thapar, "Impulse Impedance of Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No.6, pp.2357~2362, Nov/Dec 1980
- [8] B.R. Gupta, V.K. Singh, "Impulse Impedance of Rectangular Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7, No.1, pp.214~218, Jan 1992
- [9] 최 종기, 강 연옥, 정 길조, 김 정부, "과도 접지임피던스 저감을 위한 접지망 설계", 방전 및 고전압 연구회 춘계학술대회 논문집, pp.131~134, 1997년
- [10] HIFREQ User's Manual: Low and High Frequency Electromagnetic Analysis of High Voltage Systems, Safety Engineering Services & technologies ltd., 1997