



Cálculo Red de Tierras

Método de una Capa



Ejemplo del diseño de una red de tierra para una subestación de 400/230 kV, con potencia de cortocircuito de 7500 MVA.

A continuación se presentan los datos para el desarrollo del Sistema de Tierras de una Subestación, por el método de una capa.

Para el diseño se toma como área básica de la red, la que ocupa el equipo eléctrico y las estructuras.

Datos para el cálculo:

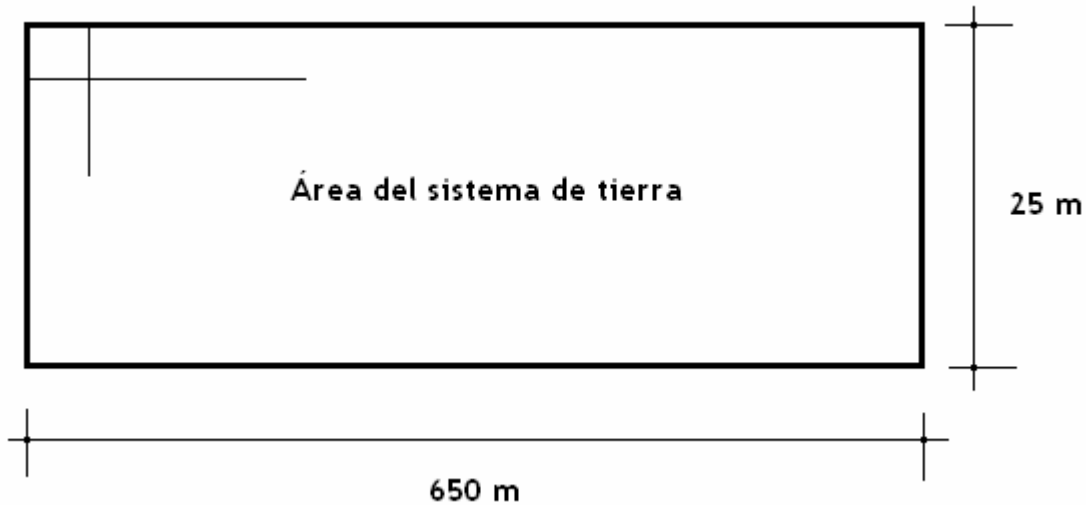
Potencia de cortocircuito máximo	7500 MVA (trifásica a tierra)
Corriente de cortocircuito máximo	21,300 Amp
Resistividad de terreno (ρ)	50 Ω -m
Resistividad superficial (piedra) (ρ_s)	2500 Ω -m
Profundidad de la red (h)	0.30 m
Tiempo de duración de la falla	20 ciclos
Longitud de la red de tierra	650 m
Frecuencia	60 ciclos/segundo
Ancho de la red de tierra	25 m
Relación x/R en el bus (para $x''/R = 20$)	1.03
Hilos de guarda	12
Resistencia del hilo de guarda conductor PIGEON	



Solución:

Cálculo del diseño preliminar

Superficie cubierta por la red de tierra



$$A = (650 \times 25) \text{ m} = 16,250\text{m}^2$$

1. Corriente de cortocircuito

$$I_{cc} = 21.3 \text{ KA}$$

2. Cálculo de número de conductores

La separación entre conductores será de 5m lado corto y 25m lado largo, entonces se tiene:

Lado corto:

$$\frac{25}{5} + 1 = 6 \text{ (Lado longitudinal)}$$

Lado largo:

$$\frac{650}{25} + 1 = 27 \text{ (Lado transversal)}$$



3. Radio equivalente de la superficie del terreno

$$r = \sqrt{\frac{\text{área del terreno}}{p}}$$

$$r = \sqrt{\frac{16,250 \text{ m}^2}{p}} = 71.92 \text{ m}$$

4. Longitud total de conductor

$$L_T = 650\text{m} \times (6 \text{ conductores}) + 25\text{m} \times (27 \text{ conductores}) = 4575\text{m}$$

5. Corriente de diseño I_D

$$I_D = I_{CC} \times F_C \times F_D$$

$$F_C = 1.5$$

$$\text{tiempo que dura la falla} = \frac{\# \text{ ciclos}}{\text{frecuencia } (f)}$$

$$t = \frac{20 \text{ ciclos}}{60} = 0.33 \text{ seg}$$

Interpolando para encontrar x''/R se tiene:

T(duración de la falla)	x''/R
0.30	1.08
0.33	x
0.50	1.03

Encontrando el valor x :

$$\frac{0.30 - 0.33}{0.33 - 0.50} = \frac{1.08 - x}{x - 1.03}$$

$$\frac{-0.03}{-0.17} = \frac{1.08 - x}{x - 1.03}$$

$$-0.33(x - 1.03) = -1.07(1.08 - x)$$

$$-0.33x - 0.0309 = -0.1836 - 0.17x$$

$$-0.2x = -0.2145$$

$$x = \frac{0.2145}{0.2}$$

$$x = 1.07 = \text{factor de decremento } (F_D)$$



Introduciendo datos a la ecuación:

$$I_D = I_{CC} \times F_C \times F_D$$

$$I_D = (21.3 \text{ KA})(1.5)(1.07) = 34.19 \text{ KA}$$

6. Resistencia de la red

$$R_{red} = \frac{r}{4r} + \frac{r}{L_T}$$

$$R_{red} = \frac{50}{4(71.92)} + \frac{50}{4575} = 0.1847 \Omega$$

7. Radio equivalente de la superficie de cada torre, tomando en cuenta que las bases de las torres son de 8 x 8 m:

$$r_T = \sqrt{\frac{A_{\text{torre}}}{p}}$$

$$r_T = \sqrt{\frac{8 \times 8}{p}} = 4.51 \text{ m}$$

8. Resistencia de cada torre:

$$R_{To} = \frac{r}{2pr_T}$$

$$R_{To} = \frac{50}{2p(4.51)} = 1.76 \Omega$$

9. Resistencia por kilómetro de línea

$$R_{Km} = \frac{R_{To}}{\# \text{ torres / Km}}$$

$$R_{Km} = \frac{1.76 \Omega}{3} = 0.59 \Omega$$

10. Impedancia equivalente

$$Z_e = \sqrt{Z_I R_{Km}}$$

$$Z_e = \sqrt{(0.472)(0.59)} = 0.53 \Omega$$

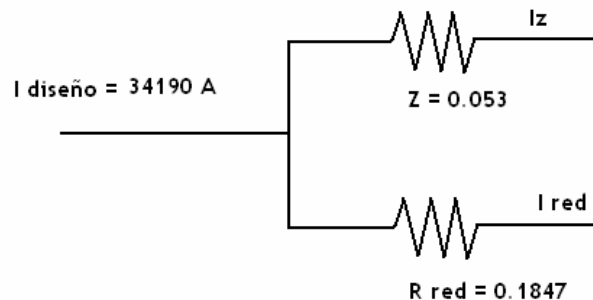


* $0.472\Omega / \text{Km}$. dato equivalente de tabla para un conductor **PIGEON** para el cual se tiene una resistencia de $0.144\Omega / 1000\text{ft}$.

11. Impedancia resultante al utilizar 10 hilos de guarda

$$Z = \frac{Z_c}{10}$$

$$Z = \frac{0.53}{10} = 0.053\Omega$$



12. Corriente de red, para este cálculo podemos hacerlo de dos formas.

a) *por divisor de corriente*

$$I_z = \frac{34190 \text{ A} \times 0.1847\Omega}{0.053\Omega + 0.1847\Omega} = 26566.65 \text{ A}$$

$$I_{\text{red}} = \frac{34190 \text{ A} \times 0.053\Omega}{0.053\Omega + 0.1847\Omega} = 7623.35 \text{ A}$$

b) *por el cálculo*

$$I_{\text{red}} = I_D \times \%_{\text{red}}$$

$$\%_{\text{red}} = \frac{Z}{Z + R_{\text{red}}}$$

Introduciendo datos: $\%_{\text{red}} = \frac{0.053\Omega}{0.053\Omega + 0.1847\Omega} = 0.2229701$

$$I_{\text{red}} = (34.19\text{KA})(0.2229701) = 7.62 \text{ KA}$$



13. Potencia de la malla de la red

$$E_{\text{malla}} = K_m \times K_i \times r \times \frac{I_{\text{red}}}{L_T}$$

Calculando K_m

$$K_m = \frac{1}{2p} \ln \left(\frac{D^2}{16hd} \right) + \frac{1}{p} \ln \left[\frac{3}{4} \times \frac{5}{6} \times \dots \times \left(\frac{2n-3}{2n-2} \right) \right]$$

Donde

D: separación longitudinal de los conductores

d: diámetro del conductor en este caso se trata de un PIGEON
(0.1672 in = 0.00424688 m)

h: profundidad de enterramiento

n: número de conductores longitudinales (n = 6)

Introduciendo los anteriores datos se tendrá:

$$K_m = \frac{1}{2p} \ln \left(\frac{25^2}{16 \times 0.30 \times 0.004246} \right) + \frac{1}{p} \ln \left[\frac{3}{4} \times \frac{5}{6} \times \frac{7}{8} \times \frac{9}{10} \right] = 1.4919$$

Calculando K_i

$$K_i = 0.65 + 0.172(n)$$

$$K_i = 0.65 + 0.172(6) = 1.682$$

Calculando E_{malla} se tendrá:

$$E_{\text{malla}} = 1.419 \times 1.682 \times 50 \, \Omega \cdot \text{m} \times \frac{7.62 \text{KA}}{4575 \text{m}} = 198.77 \text{v}$$

14. Potencial de paso

$$E'_{\text{paso}} = K_s \times K_i \times r \times \frac{I_{\text{red}}}{L_T}$$

Calculando K_s

$$K_s = \frac{1}{p} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots + \frac{1}{(n-1)D} \right]$$

Donde:

D: separación transversal de los conductores

h: profundidad de enterramiento

n: número de conductores transversales (n = 27)



Introduciendo los anteriores datos se tendrá:

$$K_s = \frac{1}{p} \left[\frac{1}{2 \times 0.30} + \frac{1}{5 + 0.30} + \frac{1}{2 \times 5} + \frac{1}{3 \times 5} + \frac{1}{4 \times 5} + \frac{1}{5 \times 5} + \frac{1}{6 \times 5} + \frac{1}{7 \times 5} + \frac{1}{8 \times 5} + \frac{1}{9 \times 5} + \frac{1}{10 \times 5} + \frac{1}{11 \times 5} + \frac{1}{12 \times 5} + \frac{1}{13 \times 5} + \frac{1}{14 \times 5} + \frac{1}{15 \times 5} + \frac{1}{16 \times 5} + \frac{1}{17 \times 5} + \frac{1}{18 \times 5} + \frac{1}{19 \times 5} + \frac{1}{20 \times 5} + \frac{1}{21 \times 5} + \frac{1}{22 \times 5} + \frac{1}{24 \times 5} + \frac{1}{25 \times 5} + \frac{1}{26 \times 5} \right] = 0.772$$

Calculando E'_{paso} se tendrá:

$$E'_{\text{paso}} = 0.772 \times 1.682 \times 50 \, \Omega\text{m} \times \frac{7.62 \text{KA}}{4575\text{m}} = 108.14\text{v}$$

15. Potenciales tolerables al cuerpo humano

Potencial de paso:

$$E_{\text{paso}} = \frac{116 + 0.7r}{\sqrt{t}}$$

$$E_{\text{paso}} = \frac{116 + 0.7(50)}{\sqrt{0.33\text{seg}}} = 262.86\text{v}$$

Potencial de contacto:

$$E_c = \frac{116 + 0.17r}{\sqrt{t}}$$

$$E_{\text{contacto}} = \frac{116 + 0.17(50)}{\sqrt{0.33\text{seg}}} = 216.73\text{v}$$

16. Longitud de seguridad

$$L_{\text{seguridad}} = \frac{K_m \times K_i \times r \times \sqrt{t} \times I_{\text{red}}}{116 + 0.17r_s}$$

$$L_{\text{seguridad}} = \frac{1.419 \times 1.682 \times 50 \times \sqrt{0.33} \times 7.62 \text{KA}}{116 + 0.17(2500)} = 965.59 \text{ m}$$



17. Conclusiones de resultados

Para que la red de tierra sea segura se debería cumplir los siguientes aspectos:

$$\begin{aligned}L_{seguridad} &< L_T \\ E_{malla} &< E_c \\ E'_p &< E_{paso}\end{aligned}$$

Tomando en cuenta lo anterior procedemos a las comparaciones de los resultados de los cálculos realizados y obtenemos:

$$\begin{aligned}L_{seguridad} &< L_T \\ E_{malla} &< E_c \\ E'_p &< E_{paso}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}965.59 \text{ m} &< 4,575 \text{ m} \\ 198.77 \text{ v} &< 316.73 \text{ v} \\ 108.14 \text{ v} &< 262.86 \text{ v}\end{aligned}$$

♦ *De las anteriores comparaciones podemos decir que el sistema de tierra es seguro.*