

3. MÁXIMOS VALORES DE DIFERENCIAS DE VOLTAJE

Cuando se tienen instalaciones donde la presencia de personas es inevitable, entran en juego los dos criterios básicos mencionados siendo preponderante la seguridad de las personas. Como se mencionó anteriormente no se especifican valores máximos de voltaje para seguridad de las personas sino valores de corriente. De acuerdo a la situación de riesgo prevista en la instalación en cuestión es posible determinar una diferencia de potencial máxima para esta situación. Existen dos variables importantes para poder determinar esta diferencia de potencial: tiempo de exposición de la persona a la corriente eléctrica, impedancia del cuerpo humano al paso de la corriente eléctrica. Adicionalmente las últimas investigaciones indican que el camino de la corriente a través del cuerpo humano influencia el nivel de corriente para que ocurra fibrilación ventricular.

Tiempo de exposición

El tiempo de exposición de una persona a una corriente eléctrica depende de los dispositivos de protección e interrupción de las corrientes de falla a tierra: relés, interruptores, fusibles. De acuerdo al esquema de protecciones, se debe analizar la posibilidad de tomar en cuenta los tiempos de retardo para la contingencia de operación de la protección de respaldo. Cuando se tienen operaciones de recierre como alternativa se puede tomar todo el tiempo de las operaciones de recierre como tiempo de exposición. Hasta el momento no se ha evaluado el efecto de exposiciones sucesivas de corriente sobre las personas, cuando estos ocurren con cortos intervalos de separación.

Impedancia del cuerpo humano

La impedancia que presenta el cuerpo humano al paso de la corriente eléctrica depende del camino previsto para la circulación de corriente, y de la frecuencia. Los factores corporales de los cuales depende esta impedancia hasta la fecha no son conocidos totalmente. La norma IEEE-80-1986[2] asume un valor de impedancia resistiva de 1000 Ω constante en el tiempo e independiente del voltaje aplicado. Investigaciones hechas al respecto[1] parecen indicar que un valor único a una frecuencia determinada no es apropiado para la mayoría de las situaciones de choque eléctrico. Se ha propuesto un modelo de impedancia del cuerpo humano representado por un elemento resistivo y uno capacitivo no lineales.

El grupo de trabajo No. 4 de la IEC (TC64)[1] ha definido valores de impedancia del cuerpo humano de acuerdo al voltaje aplicado y a los puntos de contacto en el cuerpo humano, en la tabla 3.1 se resumen los valores acordados para los caminos mano - mano, y mano - pie. La impedancia inicial del cuerpo se refiere al valor transitorio inicial de la corriente cuando se aplica el voltaje al cuerpo humano. La impedancia especificada para cada voltaje en la tabla 3.1 corresponde al valor asociado a una frecuencia única en estado estacionario. A pesar de los estudios hechos el comportamiento de la impedancia que presenta el cuerpo humano al paso de la corriente es un tema abierto a la investigación, todavía no se ha alcanzado una comprensión total del fenómeno.

Tabla.3.1 Valores de impedancia sugeridos para caminos de la corriente mano - mano, y mano – pie

Voltaje de contacto V	Impedancia Ω		
	5% de probabilidad	50% de probabilidad	95% de probabilidad
25	1750	3250	6100
50	1450	2800	5100
75	1250	2550	4500
100	1200	2400	4150
125	1100	2200	3800
220	1000	1800	3000
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500
Valor asintótico	650	750	850

Impedancia inicial del cuerpo: 500 Ω

Para caminos diferentes de mano - mano, y mano - pie, multiplique los valores por los siguientes factores:

mano - ambos pies	0,75
ambas manos - ambos pies	0,50
mano - tronco	0,50
ambas manos - tronco	0,25

La influencia del camino de la corriente en el cuerpo humano sobre los niveles de fibrilación ventricular la reconoció el comité de la IEC[1]. En la tabla 3.2 se muestran los denominados *factores de corriente por el corazón* que toman en cuenta el efecto del camino de la corriente en la distribución de la corriente dentro del cuerpo humano. Es decir si el camino de la corriente es mano izquierda - pie izquierdo la cantidad de corriente que afecta al corazón será diferente si el camino de la corriente es mano derecha - mano izquierda.

Tabla 3.2 Factores de corriente por el corazón

Camino de la corriente	Factor de corriente por el corazón
Mano izquierda – pie izquierdo Mano izquierda – pie derecho Mano izquierda – ambos pies Ambas manos - ambos pies	1,0
Mano izquierda – mano derecha	0,4
Mano derecha - pie izquierdo Mano derecha – pie derecho Mano derecha – ambos pies	0,8
Espalda – mano derecha	0,3
Espalda – mano izquierda	0,7
Pecho – mano derecha	1,3
Pecho mano izquierda	1,5
Posaderas – mano izquierda Posaderas - mano derecha Posaderas – ambas manos	0,7

Es evidente que existen diferencias notables entre la práctica recomendada por la norma IEEE-80-1986 y las recomendaciones de la IEC 479. Por ejemplo de acuerdo a la norma IEEE para una persona de 50 kg y un tiempo de exposición de 1s la máxima corriente permitida es de 116 mA, si se toma el valor de impedancia del cuerpo de 1000 Ω la máxima diferencia de potencial permitida que pueda ser aplicada a una persona es de 116 V. Comparativamente de acuerdo a la normativa IEC para determinar el máximo valor de voltaje se debe especificar lo siguiente:

- Tiempo de exposición.
- Camino de la corriente.
- Máximo valor de corriente para no fibrilación(tabla 2.2, p. 24).
- Factor de corriente por el corazón(tabla 3.2).
- Nivel de voltaje para seleccionar el valor de impedancia.
- Impedancia del camino de la corriente(tabla 3.1).
- Factor de corrección de la impedancia de acuerdo al camino de circulación de la corriente(tabla 3.1).

De acuerdo a lo indicado para un camino mano izquierda - ambos pies y 1 s de exposición se tiene la siguiente información:

- Corriente para no fibrilación: 50 mA
- Factor de corriente por el corazón: 1,0
- Nivel de voltaje para la impedancia: 50 V
- Impedancia (5% de probabilidad): 1450 Ω
- Factor de corrección de la impedancia: 0,75

El máximo valor de voltaje permitido es igual al producto de la corriente por la impedancia y por los respectivos factores de corrección, lo cual da como resultado 54,38 V. La diferencia con la norma IEEE es obvia.

Situaciones de riesgo

Las situaciones de riesgo contempla los factores que dependen del entorno de la instalación. Estas situaciones pueden ser muy variadas de acuerdo a la naturaleza de la instalación: industrial, comercial, generación, transmisión, distribución etc. Sin embargo se han tomado como situaciones de riesgo típicas las que se ilustran en la Fig. 3.1, como se puede observar en ellas los camino de circulación de la corriente son los siguientes: mano – pie, mano - ambos pies, ambas manos – ambos pies, pie – pie. Para estas situaciones, adicional a la impedancia propia del cuerpo humano es necesario incluir las impedancias entre la partes del cuerpo(manos, pies, etc.) y los puntos de contacto con el terreno o partes metálicas de equipos conectados al SCT. La impedancia de contacto entre los pies de la persona y el terreno juega un papel importante en la limitación de la corriente que pueda circular por el cuerpo de una persona. Esta impedancia esta formada por la impedancia de los zapatos, la impedancia de contacto de la suela de los zapatos y el terreno. A su vez la impedancia de contacto entre la suela de los zapatos y el terreno es función de: la resistividad del suelo y de su heterogeneidad en los estratos mas cercanos a la superficie, el área de contacto con el terreno, la presión de la suela contra el terreno, humedad en la superficie del terreno, etc.

La resistencia de contacto entre los pies y el terreno se puede determinar asumiendo que cada pies se puede representar como un disco circular metálico. Para efectos de cálculo no se toma en consideración la impedancia de la suela de los zapatos ni la influencia de otras prendas de vestir como las medias, salvo que se garantice como *estricta norma de seguridad* que las personas posean por ejemplo botas de seguridad con una mínima impedancia de aislamiento estadísticamente conocida. En [3] se demuestra que las resistencias mutuas y propias de dos discos perfectamente conductores de radio **b**, separados una distancia **d** sobre una superficie de un terreno homogéneo de resistividad ρ están determinadas por las siguientes expresiones:

$$R_p = \frac{\rho}{4b} \quad (3.1)$$

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi d} \quad (3.2)$$

Donde:

ρ : resistividad del terreno en $\Omega\text{-m}$

b: radio del disco equivalente a un pie, se recomienda $b=0,08$ m [2]

d: distancia entre los pies, se recomienda $d=1,0$ m [2]

De acuerdo a la situación de riesgo el camino de la corriente puede ser a través de los dos pies actuando como caminos eléctricos en paralelo o en serie. Para caminos de circulación de corriente manos – pies los dos pies actúan como caminos eléctricos en paralelo como se ilustra en la Fig. 3.1 Para caminos de circulación pie – pie los dos pies actúan como caminos eléctricos conectados en serie, ver Fig. 3.2

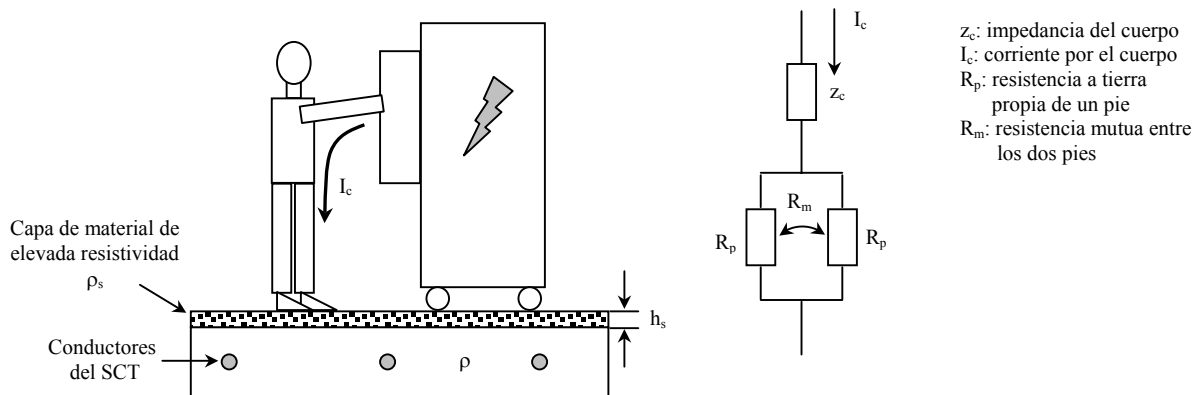


Fig. 3.1 Circuito equivalente para el camino de la corriente mano – ambos pies

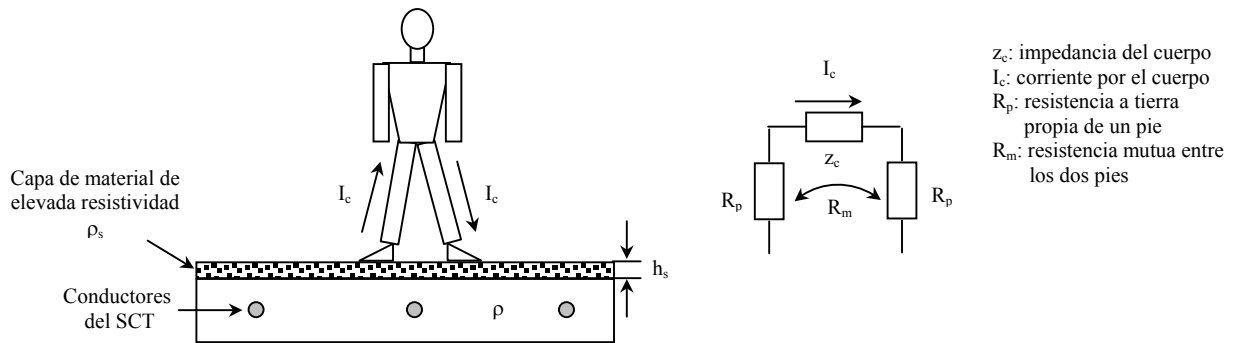


Fig. 3.2 Circuito equivalente para el camino de la corriente pie – pie

La resistencia equivalente de los dos pies en paralelo es igual a:

$$R_{pp} = \frac{R_p + R_m}{2} \tag{3.3}$$

Para los dos pies en serie la resistencia equivalente es igual a:

$$R_{ps} = 2(R_p - R_m) \tag{3.4}$$

En 3.3 y 3.4 no se ha tomado en cuenta el efecto de los conductores del SCT que puedan estar ubicados debajo de los pies de la persona. El efecto de estos conductores del SCT es disminuir la resistencia a tierra de los pies debido al efecto de resistencia mutua entre los pies y el SCT. Sin embargo en [4] se ha analizado esta situación llegando a la conclusión que el efecto de los conductores del SCT sobre la resistencia de los pies puede ser apreciable bajo las siguientes condiciones:

- La profundidad de los conductores del SCT por debajo de la superficie del terreno es mayor de 0,3 m.
- La relación ρ_s/ρ en menor de 2.
- La resistencia a tierra del SCT de la instalación y la resistencia mutua entre el pie y el SCT no es despreciable frente al valor de resistencia a tierra del conjunto de los dos pies en paralelo.

Estas condiciones se pueden presentar en SCT de instalaciones menores con SCT de tamaño relativamente pequeño, y donde no está previsto colocar una capa adicional de elevada resistividad en las inmediaciones de la instalación. Por lo general en instalaciones convencionales es muy extraño que se presenten las condiciones mencionadas.

Cuando se tienen situaciones críticas para la seguridad de las personas, una forma de incrementar la impedancia total que controla el paso de corriente por el cuerpo humano es agregar una capa de material de elevada resistividad sobre la superficie del terreno. Esta capa adicional incrementa la resistencia de los pies. Sin embargo bajo esta nueva condición las expresiones 3.3 y 3.4 dejan de ser válidas. Asumiendo que el terreno debajo de esta capa superficial es homogéneo de resistividad ρ , el efecto perturbador del terreno se puede incluir como un factor de corrección de la resistencia de los pies calculada con 3.3 y 3.4 utilizando la resistividad ρ_s de la capa superficial. Las expresiones deducidas bajo esta condición son las siguientes[2] :

$$R_p = \frac{\rho_s}{4b} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h_s}{b}\right)^2}} \right\} \quad (3.5)$$

$$R_m = \frac{\rho_s}{2\pi d} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h_s}{d}\right)^2}} \right\} \quad (3.6)$$

Donde:

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (3.7)$$

ρ_s : resistividad de la capa superficial de elevada resistividad en Ω -m

h_s : espesor de la capa superficial de elevada resistividad en m

ρ : resistividad del terreno en Ω -m

b: radio del disco equivalente a un pie, se recomienda $b=0,08$ m [2]

d: distancia entre los pies, se recomienda $d=1,0$ m [2]

Con la resistencia equivalente de los pies y la impedancia del cuerpo de acuerdo a los circuitos mostrados en las figuras 3.1 y 3.2 la máxima diferencia de potencial a que pueda estar sometida una persona queda determinada por:

$$V_c = I_c(z_c + R_{pp}) \quad (3.8)$$

$$V_p = I_c(z_c + R_{ps}) \quad (3.9)$$

Donde :

z_c : impedancia del cuerpo humano en Ω

I_c : máxima corriente para no fibrilación en A

R_{pp} : resistencia equivalente de los dos pies en paralelo

R_{ps} : resistencia equivalente de los dos pies en serie

Referencias

- [1] BRIDGES, J.E, VAIMBERG, M., WILLS, M.C.: "Impact of Recent Developments in Biological Electric Shock Safety Criteria", IEEE Trans. Vol. PWRD-2, No. 1, January 1987.
- [2] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding ANSI/IEEE std. 80-1986, New York, IEEE/Wiley, 1986.
- [3] SUNDE, E.J.: "Earth Conduction Effects in Transmission Systems", Dover, 1968.
- [4] THAPAR B., GEREZ V., EMMANUEL P. : "Ground Resistance of the Foot in Substation Yards", IEEE Trans. Vol. PWRD-8, No. 1, January 1993.