

TECNOLOGÍA ELÉCTRICA. UNIDAD DIDÁCTICA 8

CONCEPTOS BÁSICOS A RETENER Y PROBLEMAS RESUELTOS

1.- ESQUEMAS DE DISTRIBUCIÓN EN BAJA TENSIÓN

El Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, ITC-BT-08, clasifica las instalaciones de baja tensión en tres grupos o esquemas de distribución atendiendo a la forma de realizar la puesta a tierra de las masas¹ de baja tensión y el neutro del transformador. Los diferentes esquemas se designan utilizando dos letras mayúsculas, la primera indica la situación del neutro del transformador respecto a tierra y la segunda indica la forma de conectar a tierra las masas de baja tensión:

<i>1ª letra</i>	<i>2ª letra</i>
T: neutro conectado a tierra	T: masas conectadas a tierra directamente
I: neutro aislado de tierra	N: masas conectadas a tierra a través del neutro del transformador

En las figuras 10.1, 10.4 y 10.5 del Manual se representan los esquemas más usuales.

Las principales características de cada esquema son las siguientes:

Esquema TT

- Los fallos de aislamiento fase-masa originan intensidades de defecto bajas (limitadas por las resistencias de puesta a tierra de las masas y del neutro)
- En el caso general requiere utilizar 5 conductores (3 fases+neutro+protección)
- Requiere la utilización de dispositivos específicos para la protección frente a contactos indirectos

Esquema TN

- Los fallos de aislamiento fase-masa originan fuertes intensidades de defecto equivalentes a un cortocircuito fase-neutro (la corriente sólo está limitada por la impedancia de los cables y del transformador)
- En parte de la instalación, la distribución se puede realizar con 4 conductores (3 fases + neutro-conductor de protección)
- No precisa de dispositivos específicos para la protección frente a contactos indirectos, ya que esta protección la realizan los mismos aparatos que protegen frente a sobrecorrientes
- El coste de esta instalación suele ser más bajo que la TT

Esquema IT

- Un primer fallo de aislamiento fase-masa o fase-tierra no origina corriente de defecto ni tensión de contacto apreciable. Si se produce un segundo fallo, la instalación se comporta como un esquema TN.
- Es recomendable que este tipo de instalaciones tengan un sistema de vigilancia de la impedancia del aislamiento a tierra, para que cuando disminuya por debajo de un determinado valor indique una alarma aunque la instalación continúe funcionando. Este sistema encarece la instalación.

¹ Partes metálicas de un aparato que, en condiciones normales, está alejada de las partes activas

- Es un esquema indicado en las instalaciones en las que la continuidad de servicio es un factor decisivo, ya que permite mantener la instalación en funcionamiento cuando se produce un fallo de aislamiento

2.- INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA: DEFINICIONES

Según las definiciones del REBT (ITC-BT-01):

Tierra: Masa conductora de la tierra en la que el potencial eléctrico en cada punto se toma, convencionalmente, igual a cero.

Toma de tierra: Electrodo, o conjunto de electrodos, en contacto con el suelo y que asegura la conexión eléctrica con el mismo.

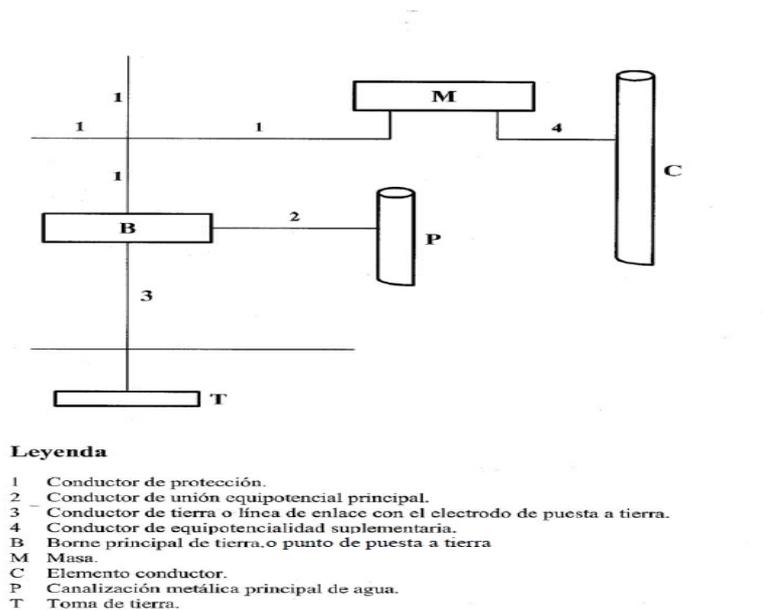
Instalación de puesta a tierra: Conjunto de conexiones y dispositivos necesarios para poner a tierra, individual o colectivamente, un aparato o una instalación.

Tensión de puesta a tierra (V): Tensión entre una instalación de puesta a tierra y un punto a potencial cero, cuando pasa por dicha instalación una corriente de defecto (I_d)

Resistencia de puesta a tierra: Relación entre la tensión que alcanza con respecto a un punto a potencial cero una instalación de puesta a tierra y la corriente que la recorre (R_t).

$$R_t = V/I_d = k_r * \rho$$

El cálculo de la resistencia de tierra requiere utilizar métodos numéricos para la resolución de ecuaciones, por este motivo se encuentran tabuladas, en función de la geometría del electrodo y de la resistividad del terreno (ρ) las expresiones de R_t para los electrodos más utilizados (tabla 10.1 del Manual, donde los valores de la resistividad se pueden tomar de las tablas 10.2 o 10.3, la constante k_r se puede determinar mediante la tabla 10.4).



Representación esquemática de un circuito de puesta a tierra (ITC-BT-18)

Otros parámetros importantes que se deben tener en cuenta en el dimensionado de la instalación de puesta a tierra son:

Tensión de contacto (V_c) : es la diferencia de potencial que aparece como consecuencia de un defecto de aislamiento entre “partes simultáneamente accesibles” (generalmente masa y tierra a una distancia de un metro) que en condiciones normales de utilización están a potencial 0 (Figura 10.9)

Tensión de paso (V_p): es la diferencia de potencial entre dos puntos del suelo, separados un metro, que puede ser puenteadas por los pies de una persona que camine por un terreno afectado por el funcionamiento de una puesta a tierra (Figura 10.9)

Tensiones aplicadas: cuando una persona entra en contacto con dos “partes simultáneamente accesibles” a distinto potencial, la tensión que se aplica a su cuerpo es menor que la diferencia de potencial entre las dos partes simultáneamente accesibles consideradas, debido a la resistencia del cuerpo humano, que se establece en 1000Ω , por este motivo se definen las tensiones de paso y de contacto aplicadas (V_{pa} , V_{ca} , Figura 10.10) que relacionan mediante las siguientes expresiones:

$$V_p = V_{pa} * (1 + 6\rho/1000)$$

$$V_c = V_{ca} * (1 + 1,5\rho/1000)$$

Es decir, estas tensiones son las máximas admisibles por el cuerpo humano.

3.- INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA: CONDICIONES DE PROTECCIÓN Y SEPARACIÓN

En el diseño de las puestas a tierra se limitan los valores de las tensiones de paso y de contacto admisibles para garantizar la seguridad de las personas y equipos. Estos valores máximos dependen, para una determinada instalación, de la resistividad del terreno y de la duración del defecto, t , que generalmente se toma igual al tiempo de actuación de las protecciones (t_a). En definitiva las condiciones que debe cumplir una instalación de puesta a tierra son:

Instalaciones en Baja Tensión

En este tipo de instalaciones se considera únicamente la tensión de contacto que viene limitada en la ITC-BT-18:

$$U_{c, \max} \geq I_{dBT} R_t$$

$$U_{c, \max} = 50 \text{ V en condiciones normales}$$

$$U_{c, \max} = 24 \text{ V en locales o emplazamientos conductores}$$

donde I_{dBT} es la intensidad de defecto en BT y R_t la resistencia de puesta a tierra

Instalaciones en Alta y Media Tensión (Centros de Transformación)

(Reglamento sobre Condiciones Técnicas y Garantías de Seguridad en Centrales Eléctricas Subestaciones y Centros de Transformación (1982) derogado recientemente por el Real Decreto 337/2014 Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión)

1.- Condiciones de diseño relativas a la seguridad de las personasTensión de paso

$$U_{p, \max} = 10 \cdot (K/t^n) \cdot (1 + 6\rho/1000) \geq I_{dAT} \rho k_p \approx I_{dAT} (R_t/4)$$

donde:

- los valores de K y n vienen tabulados en la Tabla 10.5 según el tiempo máximo de actuación de las protecciones, t
- el valor de k_p viene tabulado en la tabla 10.4 en función del tipo de instalación de puesta a tierra del centro de transformación
- si no se dispone de la tabla 10.4 se puede emplear la expresión aproximada en función de R_t que es más conservadora

Tensión de contacto

$$U_{c, \max} = (K/t^n) \cdot (1 + 1,5\rho/1000) \geq I_{dAT} \rho k_c \approx I_{dAT} (R_t/2)$$

donde:

- los valores de K y n vienen tabulados en la Tabla 10.5 según el tiempo máximo de actuación de las protecciones, t
- el valor de k_c viene tabulado en la tabla 10.4 en función del tipo de instalación de puesta a tierra del centro de transformación
- si no se dispone de la tabla 10.4 se puede emplear la expresión aproximada en función de R_t que es más conservadora

Tensión de paso en el acceso al CT

$$U_{p, \text{acc max}} = 10 \cdot (K/t^n) \cdot (1 + (3\rho + 3\rho')/1000) \geq I_{dAT} \rho k_{p, \text{acceso}} \approx I_{dAT} (R_t/2)$$

donde:

- ρ' es la resistividad del local del CT
- los valores de K y n vienen tabulados en la Tabla 10.5 según el tiempo máximo de actuación de las protecciones, t
- el valor de $k_{p, \text{acceso}}$ viene tabulado en la tabla 10.4 en función del tipo de instalación de puesta a tierra del centro de transformación
- si no se dispone de la tabla 10.4 se puede emplear la expresión aproximada en función de R_t que es más conservadora

2.- Condiciones de diseño relativas a la seguridad del material

Para evitar averías en el caso de defecto en el equipo de BT instalado en el CT, por ejemplo, cuadro de contadores, es necesario que su nivel de aislamiento a frecuencia industrial (U_{BTCT}) sea mayor que la máxima tensión a tierra posible en caso de defecto:

$$U_{BTCT} \geq I_{dAT} R_t$$

3.- Otras consideraciones a tener en cuenta en el diseño

Distancia mínima entre tierras para garantizar su separación eléctrica

Según el REBT ITC-BT-18 se considerará que las tomas de tierra son eléctricamente independientes cuando se cumplan todas y cada una de las condiciones siguientes:

- a) No exista canalización metálica conductora (cubierta metálica de cable no aislada especialmente, canalización de agua, gas, etc.) que una la zona de tierras del centro de transformación con la zona en donde se encuentran los aparatos de utilización.
- b) La distancia entre las tomas de tierra del centro de transformación y las tomas de tierra u otros elementos conductores enterrados en los locales de utilización es, al menos, igual a 15 metros para terrenos cuya resistividad no sea elevada ($<100 \Omega.m$). Cuando el terreno sea muy mal conductor, la distancia se calculará, aplicando la fórmula :

$$D = (I_{dAT}\rho)/(2\pi U)$$

siendo:

D: distancia entre electrodos, en metros

ρ : resistividad media del terreno en $\Omega.m$

I_{dAT} : intensidad de defecto a tierra, en amperios, para el lado de alta tensión, que será facilitado por la empresa eléctrica

U: 1200 V para sistemas de distribución TT, siempre que el tiempo de eliminación del defecto en la instalación de alta tensión sea menor o igual a 5 segundos y 250 V, en caso contrario. Para redes TN, U será inferior a dos veces la tensión de contacto máxima admisible de la instalación ($I_d R_t/2$)

- c) El centro de transformación está situado en un recinto aislado de los locales de utilización o bien, si esta contiguo a los locales de utilización o en el interior de los mismos, está establecido de tal manera que sus elementos metálicos no están unidos eléctricamente a los elementos metálicos constructivos de los locales de utilización.

Sólo se podrán unir la puesta a tierra de la instalación de utilización (edificio) y la puesta a tierra de protección (masas) del centro de transformación, si el valor de la resistencia de puesta a tierra única es lo suficientemente baja para que se cumpla que en el caso de evacuar el máximo valor previsto de la corriente de defecto a tierra (I_d) en el centro de transformación, el valor de la tensión de defecto ($V_d = I_d * R_t$) sea menor que la tensión de contacto máximo aplicada.

Dimensionado de los conductores de protección

Los conductores de protección sirven para unir eléctricamente las masas de una instalación a ciertos elementos con el fin de asegurar la protección contra contactos indirectos.

En el circuito de conexión a tierra, los conductores de protección unirán las masas al conductor de tierra. Las secciones mínimas de estos conductores vienen dadas en la ITC-BT-18 en función de la sección del conductor de fase (Tabla 10.6 del Manual).

4.- PROBLEMAS RESUELTOS

P1.- Calcular el valor de la corriente de defecto producida por un fallo de aislamiento fase-masa en una instalación eléctrica de Baja Tensión con esquema de distribución TT, alimentada desde un transformador de relación 20/0,66 kV, sabiendo que:

- el electrodo de puesta a tierra de las masas (Ra) es un conductor enterrado horizontalmente de 13 metros de longitud
- la puesta a tierra del neutro del transformador se realiza por medio de una pica de 5 metros de longitud (electrodo Rb).
- estas dos puestas a tierra pueden considerarse independientes. El valor de la resistividad del terreno es $\rho = 225 \Omega\text{m}$

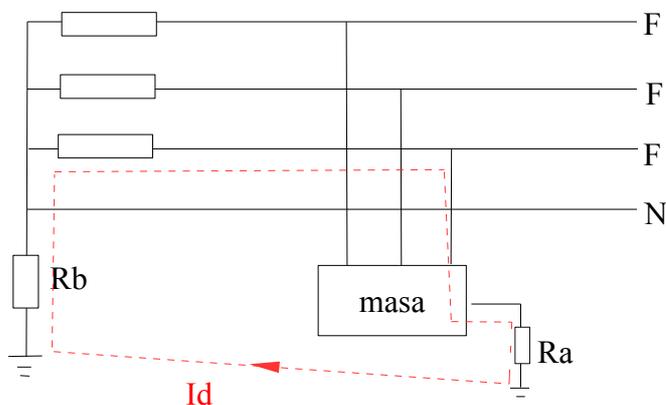
Calculamos las resistencias de puesta a tierra de las masas y del neutro del transformador empleando las expresiones de la tabla 10.1. En el primer caso, para el tipo de electrodo cable conductor enterrado horizontalmente:

$$R_a = 2 \cdot \rho / L = 2 \cdot 225 / 13 = 34,6 \Omega$$

En el segundo caso, para una pica vertical, tenemos:

$$R_b = \rho / L = 225 / 5 = 45 \Omega$$

De acuerdo con el esquema TT y como las tierras se pueden considerar independientes la resistencia resultante será la resistencia en serie de ambas:



$$R_t = R_a + R_b = 34,6 + 45 = 79,6 \Omega$$

y la tensión de puesta a tierra será la tensión fase-neutro, es decir:

$$V_t = 660 / \sqrt{3} = 381 \text{ V}$$

y la intensidad de defecto:

$$I_d = V_t / R_t = 381 / 79,6 = 4,79 \text{ A}$$

P2.- Una fábrica dispone de un centro de transformación (20000/400 V) en su propia parcela con las características que indica la figura. El suelo del CT puede considerarse equipotencial. La puesta a tierra de la protección está caracterizada por $k_r = 0,1$, $k_p = 0,0231$ y $k_c = 0,0506$:

- Hallar la máxima tensión a tierra que puede presentarse en el CT en caso de defecto fase-masa
- Comprobar las condiciones de seguridad de las tensiones de paso
- Hallar la distancia D mínima para colocar los electrodos de puesta a tierra del neutro del transformador

Otros datos:

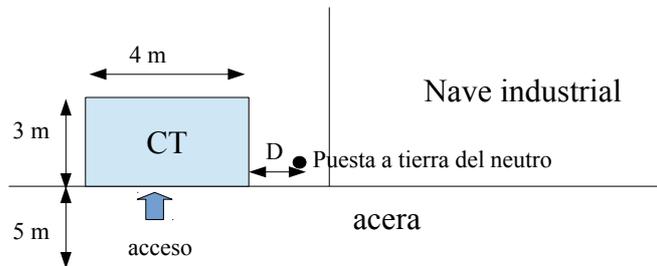
$$\rho_{\text{terreno}} = 100 \Omega\text{m}$$

$$\rho_{\text{superficie acera}} = 3000 \Omega\text{m}$$

$$\rho_{\text{superficie centro}} = 3000 \Omega\text{m}$$

Impedancia de puesta a tierra del neutro de la red de AT del CT = $25j \Omega$

Tiempo de disparo de las protecciones del CT 0,7 segundos



a) La resistencia de puesta a tierra viene dada por:

$$R_t = k_r \cdot \rho = 0,1 \cdot 100 = 10 \Omega$$

considerando la máxima tensión en el lado de AT, teniendo también en cuenta la impedancia de puesta a tierra del neutro de la red de AT del CT, calculamos la intensidad de defecto:

$$I_{dAT} = (V/\sqrt{3}) / \sqrt{(R_t + R_n)^2 + X_n^2} = (20000/\sqrt{3}) / \sqrt{(10+0)^2 + 25^2} = 428,9 A$$

donde hemos considerado la impedancia total de puesta a tierra (masas+neutro del transformador) luego la máxima tensión de defecto fase-masa:

$$V_d = I_d R_t = 428,9 \cdot 10 = 4289 V$$

b) Las tensiones de paso deben cumplir las siguientes expresiones:

$$U_{p,max} = 10 \cdot (K/t^n) \cdot (1 + 6\rho/1000) \geq I_{dAT} k_p \approx I_{dAT} (R_t/4)$$

donde para $t = 0,7$ y $K = 72$ y $n = 1$ (tabla 10.5)

$$U_{p,max} = 10 \cdot 72 / 0,7^1 \cdot (1 + 6 \cdot 100 / 1000) = 1646 V \geq 428,9 \cdot 100 \cdot 0,0231 = 990,7 V$$

y en el acceso:

$$U_{p, acc max} = 10 \cdot (K/t^n) \cdot (1 + (3\rho + 3\rho')/1000) \geq I_{dAT} \rho k_{p, acceso} \approx I_{dAT} (R_t/2)$$

$$U_{p, acc max} = 10 \cdot 72/0,7^1 (1 + (3 \cdot 3000 + 3 \cdot 3000)/1000) = 19542,8 \text{ V} \geq 428,9 \cdot 100 \cdot 0,0506 = 2170 \text{ V}$$

donde tanto la resistividad del suelo del CT como del suelo que lo circunda en el acceso (acera) tiene un valor de $3000 \rho_{superficie\ acera} = 3000 \Omega m$

c) La distancia mínima para calcular los electrodos de puesta a tierra del neutro del transformador vendrá dada por:

$$D = (I_{dAT} \rho) / (2\pi U) = (428,9 \cdot 100) / (2\pi \cdot 1200) = 5,7 \text{ m considerando esquema TT}$$

P3.- Se desea determinar la puesta a tierra necesaria en un centro de transformación prefabricado de 20kV/400 V sobre un terreno de resistividad $\rho = 350 \Omega m$, realizada con electrodo de puesta a tierra rectangular, de conductor de cobre de 50 mm^2 , de dimensiones $4 \times 3 \text{ m}$, a $0,5 \text{ m}$ de profundidad y con un cuadro de baja tensión de nivel de aislamiento correspondiente a 8000 V . El neutro de la instalación de baja tensión del centro de transformación está separado del neutro de la red de media tensión del transformador, cuya resistencia es de 35Ω .

Para los cálculos debe tenerse en cuenta que los relés de protección de defecto a tierra son de tiempo independiente de corriente $I_d = 40 \text{ A}$ y tiempo de actuación $t = 0,5 \text{ segundos}$. El suelo del CT está aislando y su resistividad es de $3000 \Omega m$.

Calculamos la corriente de defecto de AT que viene dada por la siguiente expresión:

$$I_{dAT} = (V/\sqrt{3}) / \sqrt{(Rt + Rn)^2 + Xn^2} = (20000/\sqrt{3}) / \sqrt{(Rt + 35)^2 + 0^2}$$

por otro lado de CT debe cumplir la condición de seguridad:

$$U_{BTCT} \geq I_{dAT} R_t \quad 8000 \geq I_{dAT} R_t$$

combinando las dos ecuaciones:

$$8000/R_t = (20000/\sqrt{3}) / (Rt + 35) \quad R_t = 79 \Omega \quad e \quad I_{dAT} = 101,3 \text{ A}$$

Comprobamos si la puesta a tierra actual mediante el conductor de cobre es suficiente:

$$R_t = 2\rho/L \text{ (tabla 10.1)}$$

$$R_t = 2 \cdot 350 / (2 \cdot 3 + 2 \cdot 4) = 50 \Omega < 79 \Omega \text{ que es el valor límite luego no son necesarias picas.}$$

También se puede comprobar mediante la expresión:

$$R_t = k_r \cdot \rho \text{ donde determinamos que el factor de resistencia es superior al necesario sin picas}$$

$$k_r = 79/350 = 0,22 > 0,137 \text{ (tabla 10.4)}$$

Verificamos las condiciones de seguridad para las personas:

Tensión de paso:

$$U_{p, \max} = 10 \cdot (K/t^n) \cdot (1 + 6\rho/1000) \geq I_{dAT} \rho k_p \approx I_{dAT} (R_t/4)$$

donde para $t = 0,5$ y $K = 72$ y $n = 1$ (tabla 10.5)

$$U_{p, \max} = 10 \cdot 72/0,5^1 (1 + 6 \cdot 350/1000) = 4464 \text{ V} \geq 101,3 \cdot 350 \cdot 0,0287 = 1017,6 \text{ V}$$

donde k_p se ha obtenido de la tabla 10.4

Tensión de contacto:

$$U_{c, \max} = (K/t^n) \cdot (1 + 1,5\rho/1000) \geq I_{dAT} \rho k_c \approx I_{dAT} (R_t/2)$$

con

$$U_{c, \max} = (72/0,5^1) \cdot (1 + 1,5 \cdot 350/1000) = 219,6 \text{ V} \not\geq 101,3 \cdot 350 \cdot 0,0868 = 3077,5 \text{ V}$$

donde k_c se ha obtenido de la tabla 10.4 y esta condición no cumple

Comprobamos la tensión de paso de acceso:

$$U_{p, \text{acc max}} = 10 \cdot (K/t^n) \cdot (1 + (3\rho + 3\rho')/1000) \geq I_{dAT} \rho k_{p, \text{acceso}} \approx I_{dAT} (R_t/2)$$

$$U_{p, \text{acc max}} = 10 \cdot 72/0,5^1 (1 + (3 \cdot 350 + 3 \cdot 3000)/1000) = 15912 \text{ V} \geq 101,3 \cdot 350 \cdot 0,0868 = 3077,5 \text{ V}$$

Para lograr cumplir la segunda condición se pueden aislar de tierra todas las masas metálicas accesibles del CT o añadir picas para disminuir la resistencia de tierra aunque esto incrementaría la tensión de defecto.