

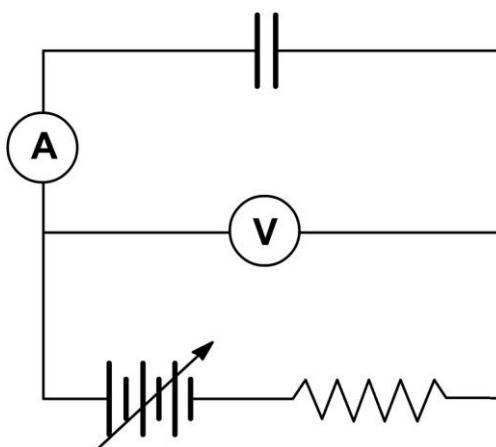
PERDIDAS EN UNA LÍNEA

Hasta ahora hemos supuesto que el aislante (aire) entre dos conductores de una línea aérea era perfecto, es decir, no había pérdidas por falta de aislamiento. En realidad esto no es totalmente cierto, ya que en algunos casos, cuando la tensión es relativamente grande respecto a la separación entre conductores, se producen unas corrientes de fuga cuyos efectos trataremos a continuación.

Descarga entre dos placas metálicas

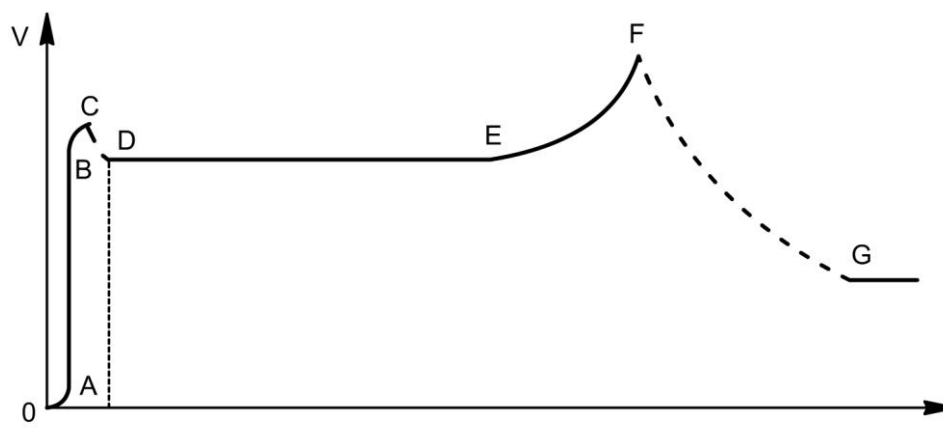
Sabido es que cuando a un átomo de gas se le comunica la energía suficiente es posible arrancarle uno o varios de sus electrones, pudiendo provenir esta energía de fuentes naturales o artificiales. Las fuentes naturales de energía capaces de ionizar un gas pueden ser los rayos ultravioletas procedentes de la luz solar, las partículas rápidas que se forman en la desintegración de sustancias radioactivas, de las cuales se encuentran trazas en todas partes, y los rayos cósmicos.

Aclaradas estas ideas, conectemos dos placas metálicas a una fuente de alimentación variable, según el esquema de la figura, y examinemos las variaciones que sufre la intensidad en función de la tensión.



Incrementando el potencial a partir de cero voltios, nos encontramos que para pequeñas tensiones unos pocos iones y electrones libres existentes en el aire son atraídos por las placas, iniciando una pequeña corriente que irá creciendo con los aumentos de potencial y cuya situación corresponde a la fracción (OA) de la curva indicada en la figura:

Un mayor incremento de la tensión a partir del punto A ya no es seguido por aumentos de intensidad, puesto que la tensión aplicada es suficiente para barrer todos los iones y electrones con la misma rapidez con que los crea la ionización natural. Si seguimos aumentando el potencial, la intensidad permanecerá constante durante la porción de curva (AB), creciendo no obstante la energía de los iones y electrones.



Al llegar al punto B, la energía ganada por los electrones es suficiente como para producir ionización por colisión con los átomos de gas, aumentando otra vez la corriente durante la fracción de curva (BC). Téngase en cuenta que por ser la ionización natural del aire muy pequeña, en condiciones normales, del orden de 0,5 iones por segundo y por centímetro cúbico, la corriente a que nos hemos referido es extraordinariamente pequeña. Esta porción de curva fue estudiada por J. S. Townsend y es conocida como descarga Townsend.

Si aumentamos el potencial correspondiente al punto C nos encontraremos con que la energía adquirida por los iones positivos de aire, es suficiente como para arrancar electrones secundarios del cátodo, que a su vez producen en su camino hacia el ánodo nuevos iones y electrones; en este instante se produce una descarga autónoma con la consiguiente luminosidad, aumento brusco de la intensidad y disminución de la caída de tensión.

A partir del punto D tendremos que a aumentos muy pequeños de la tensión le corresponden otros relativamente grandes de intensidad durante la fracción de curva (DE), aumentando también la luminosidad, que va progresivamente recubriendo el cátodo.

Sobrepasando el punto E va aumentando la densidad de corriente, que durante la porción de curva (DE) había permanecido prácticamente constante, creciendo así la caída de tensión en su interior de forma apreciable con los aumentos de intensidad. Los iones positivos del aire van adquiriendo con esto una gran energía, produciendo en su choque contra el cátodo un aumento considerable de temperatura y en consecuencia un gran número de electrones.

Al llegar al punto F la densidad de corriente se ha hecho tan grande que se produce un arco eléctrico entre los electrodos, disminuyendo la caída de tensión y aumentando aún más la intensidad quedando estas dos placas prácticamente en cortocircuito.

Tensión crítica disruptiva en una línea

Si los conductores de una línea eléctrica alcanzan un potencial lo suficientemente grande para que rebase la rigidez dieléctrica del aire, se producen pérdidas de energía debido a la corriente que se forma a través del medio. Es decir, que todo sucede como si el aire se hiciera conductor, dando lugar a una corriente de fuga.

En los conductores aéreos, el efecto es visible en la oscuridad, pudiéndose apreciar cómo quedan envueltos por un halo luminoso, azulado, de sección transversal circular,

es decir, en forma de corona, por lo que al fenómeno se le dio el nombre de efecto corona.

La tensión para la cual comienzan las pérdidas a través del aire, se llama tensión crítica disruptiva, y para ella el fenómeno no es aún visible. Los efluvios se hacen luminosos cuando se alcanza la tensión crítica visual; es decir, que la disruptiva es de valor menor que la visual. Las pérdidas empiezan a producirse desde el momento en que la tensión de la línea se hace mayor que la tensión crítica disruptiva.

El valor de esta tensión crítica, a partir del cual se inician las pérdidas, depende de diversos factores como son el diámetro, la separación y rugosidad de los conductores, el estado higrométrico del aire y su densidad.

La fórmula general, o fórmula de Peek, para calcular la tensión crítica, se fundamenta en que la del aire a una presión de 760 mmHg y a una temperatura de 25° C es de

$$V_c = 2,8 \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \text{ y } E_c = \frac{29,8}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{3} \cdot m_c \cdot m_t \cdot f_c \cdot r \cdot \ln \frac{d}{r} \text{ kV}$$

Como r es el radio del conductor, se puede expresar E_c en función del diámetro y realizando la operación de las constantes queda:

$$E_c = 36,5 \cdot m_c \cdot m_t \cdot f_c \cdot \frac{D}{2} \cdot \ln \frac{2d}{D} \text{ kV, En donde:}$$

E_c = tensión crítica compuesta en kV.

D = diámetro del conductor expresado en centímetros.

d = separación entre conductores en centímetros.

m_c = factor de corrección debido a la rugosidad del conductor.

$m_c = 1$ (hilos lisos y pulidos)

$m_c = 0,95$ (hilos oxidados y ligeramente rugosos)

$m_c = 0,85$ (cables)

m_t = factor de corrección debido al estado higrométrico del aire:

$m_t = 1$ (tiempo seco)

$m_t = 0,8$ (tiempo lluvioso)

f_c = factor de corrección debido a la densidad del aire:

$$f_c = \frac{3,926 \cdot h}{273 + t_m} \text{ siendo: } h = \text{presión barométrica en cm de Hg.}$$

$$t_m = \text{temperatura media en } ^\circ\text{C}$$

La presión barométrica en función de la altitud de paso de la línea, viene definida por la siguiente igualdad:

$$\ln h = \ln 76 - 2,3 \frac{\text{Alt}}{18336} \quad (\text{Alt} = \text{altitud en metros})$$

Es beneficioso que la tensión crítica E_c sea algo menor que la tensión de funcionamiento normal de la línea, ya que en caso de sobretensiones el efecto corona hace el papel de autoválvula de descarga.

Perditanancia

Las pérdidas en una línea se originan si la tensión de servicio es superior a la tensión crítica y aumentan rápidamente con la diferencia entre ambas.

Las pérdidas, expresadas en $\frac{\text{kW}}{\text{km} \cdot \text{fase}}$, pueden calcularse mediante la fórmula de Peek:

$$P_c = \frac{241}{f_c} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{d}} \cdot \left(\frac{E}{\sqrt{3}} - \frac{E_c}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 10^{-5}, \text{ en donde:}$$

f_c = factor de corrección debido a la densidad del aire y que está desarrollado en el apartado anterior.

f = la frecuencia expresada en ciclos por segundo.

r = el radio del conductor en centímetros.

d = la separación entre conductores en centímetros.

E = la tensión compuesta más elevada en kilovoltios.

E_c = la tensión crítica compuesta en kilovoltios.

Dado que nosotros empleamos siempre una frecuencia de 50 Hz, usando el diámetro de conductor D en lugar de su radio y operando las constantes queda:

$$P_c = \frac{0,06}{f_c} \cdot \sqrt{\frac{D}{2d}} \cdot (E - E_c)^2 \frac{\text{kW}}{\text{km} \cdot \text{fase}}$$

Esta fórmula sólo es aplicable para una tensión de servicio superior a la tensión crítica ($E - E_c > 0$), pues en caso contrario no habría pérdidas y la fórmula daría valores erróneos.

Ya hemos visto que hay una corriente de fuga en los conductores y como consecuencia, el cociente de la tensión simple U y la corriente de fuga kilométrica I_{fk} , nos proporciona el valor de la resistencia kilométrica de aislamiento R_{gk} de la línea. Su valor no es nunca infinito, aunque puede llegar a valores de muchos megaohmios por kilómetro:

$R_{gk} = \frac{U}{I_{pk}}$ La inversa de esta resistencia recibe el nombre de conductancia o perditan-

cia: $G_k = \frac{1}{R_{gk}} = \frac{I_{pk}}{U}$; $I_{pk} = G_k \cdot U$

Esta corriente debida a la conductancia del aislamiento está en fase con la tensión y por consiguiente es totalmente activa, lo que da lugar a una pérdida de potencia cuyo valor referido a una sola fase y por kilómetro, será el siguiente:

$$P_c = U \cdot I_{pk} = U \cdot U \cdot G_k = G_k \cdot U^2$$

Como U es la tensión simple, podemos expresarla en función de la tensión compuesta E :

$$G_k = \frac{P_c}{U^2} = \frac{P_c}{\left(\frac{E}{\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{3 \cdot P_c}{E^2} \text{ y finalmente, si admitimos que } P_c \text{ son las pérdidas de energ-}$$

ía en $\frac{\text{kW}}{\text{km}}$ fase. E es la tensión compuesta de la línea en kV tendremos que:

$$G_k = \frac{3 \cdot P_c}{E^2} \cdot 10^{-3} \frac{\text{siemens}}{\text{km} \cdot \text{fase}}$$

Ejemplo práctico

Hallar la tensión crítica y la perditanancia de una línea aérea de las características siguientes:

E = 145 kV. Tiempo = lluvioso

d = 9m. ; $t_m = 14^\circ\text{C}$

D = 15,7 mm. (Cable LA-140) Altitud = 220 m.

Para hallar la tensión crítica aplicamos la fórmula general:

$$E_c = 36,5 \cdot m_c \cdot m_t \cdot f_c \cdot \frac{D}{2} \cdot \ln \frac{2d}{D} \text{ kV}$$

Determinamos previamente los factores de corrección:

Como el conductor es cable: $m_c = 0,85$

Como el tiempo es lluvioso: $m_t = 0,8$

Para el cálculo de f_c tenemos que hallar la presión barométrica h:

$$f_c = \frac{3,926 \cdot h}{273 + t_m}$$

$$\ln h = \ln 76 - 2,3 \cdot \frac{\text{Alt}}{18336} = \ln 76 - 2,3 \cdot \frac{220}{18336} = 4,303, \text{ por lo tanto:}$$

$$h = e^{4,303} = 73,9 \text{ cm de Hg, con lo que resulta:}$$

$$f_c = \frac{3,926739}{273 + 14} = 1,01$$

Sustituyendo los valores en la fórmula obtenemos:

$$E_c = 36,5 \cdot 0,85 \cdot 0,8 \cdot 101 \cdot \frac{15,7 \cdot 10^{-1}}{2} \cdot \ln \frac{2 \cdot 9}{15,7 \cdot 10^{-3}} = 138 \text{ kV}$$

Dado que la tensión crítica E_c es igual a 138 kV. y la tensión de trabajo de línea es de 145 kV, existirán pérdidas. No es malo que haya pérdidas en tiempo lluvioso pues se crea un punto débil en la línea y así tendremos una derivación a tierra en caso de descargas atmosféricas.

Las pérdidas se calculan aplicando la fórmula general:

$$P_c = \frac{0,06}{f_c} \cdot \sqrt{\frac{D}{2d}} \cdot (E - E_c)^2 \frac{\text{kW}}{\text{km} \cdot \text{fase}}$$

Y dado que todos los valores son conocidos, podemos sustituir:

$$P_c = \frac{0,06}{f_c} \cdot \sqrt{\frac{15,7}{2 \cdot 9 \cdot 10^3}} \cdot (145 - 138)^2 = 0,085 \frac{\text{kW}}{\text{km} \cdot \text{fase}}$$

Observamos que las pérdidas son muy pequeñas, sobre todo si las comparamos con la potencia total que puede transportar esta línea, y que seguidamente vamos a calcular.

Puesto que para un diámetro del conductor de $D = 15,7 \text{ mm.}$, le corresponde una sección de $S = 146 \text{ mm}^2$, y teniendo en cuenta que el Reglamento marca una densidad máxima de corriente de $\delta = 2,5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$, tendremos que

$$I_{\text{máx}} = \delta \cdot S = 2,5 \cdot 146 = 365 \text{ A, siendo la potencia máxima aparente:}$$

$$W = \sqrt{3} \cdot E \cdot I = \sqrt{3} \cdot 145 \cdot 365 = 91\,668 \text{ kVA}$$

La perditanancia de la línea se calcula aplicando directamente la fórmula:

$$G_k = \frac{3 \cdot P_c}{E^2} \cdot 10^{-3} \frac{\text{siemens}}{\text{km} \cdot \text{fase}}$$

$$\text{Sustituyendo resulta: } G_k = \frac{3 \cdot 0,085}{145^2} \cdot 10^{-3} = 1,21 \cdot 10^{-8} \frac{\text{siemens}}{\text{km} \cdot \text{fase}}.$$

$$\text{La resistencia que supone el aire será de: } R_{gk} = \frac{1}{G_k} = \frac{1}{1,21 \cdot 10^{-8}} = 82 \frac{\text{M}\Omega}{\text{km} \cdot \text{fase}}$$

Si resolvemos este ejemplo para tiempo seco, observaremos que no hay pérdidas.