

Corriente continua

Ing. Alberto Luis Farina
alberto@ingenierofarina.com.ar
www.ingenierofarina.com.ar

Introducción

Los tipos de tensión continua y alterna, a través de la historia de la energía eléctrica, han pasado por diversas épocas de relativas supremacías y de convivencia; desde que Thomas Alba Edison comenzara con su distribución en tensión continua para alimentar los circuitos de iluminación en un sector de Nueva York, la aplicación siguió creciendo aún a pesar del hecho de que George Westinghouse impulsara la idea de Nicola Tesla referente a la conveniencia de la corriente alterna, de modo que inició un período de aplicación compartido. Aunque por sus características funcionales las máquinas de corriente continua tienen su fuerte en lo que hace a la regulación de velocidad y par, el desarrollo tecnológico en el campo de la electrónica ha hecho que se pudieran hacer aplicaciones de potencia con los motores de corriente alterna, con lo cual se produjo un cambio irreversible en favor de estos últimos en lo que hace a su aplicación.

Aun así, en la actualidad es notorio, aun desde el ámbito de la enseñanza, cómo no se le presta la debida atención a los temas relacionados con las aplicaciones de la tensión continua, a pesar de que los estudios de la electrotécnica comienzan justamente con ella, con la ley de Ohm, para luego continuar con los de la tensión alterna.

Indudablemente, la conveniencia de utilizar uno u otro tipo de tensión para cada una de las aplicaciones es el resultado de estudios específicos, de acuerdo a las exigencias funcionales de las cargas.

A continuación, veremos algunos aspectos del empleo de la tensión continua, así como de algunos de los fenómenos que se producen en lo que hace a las instalaciones eléctricas para este tipo de tensión destinadas a ciertos tipos de circuitos como pueden ser los de control o de otras aplicaciones comunes.

Aunque por sus características funcionales las máquinas de corriente continua tienen su fuerte en lo que hace a la regulación de velocidad y par, el desarrollo tecnológico en el campo de la electrónica ha hecho que se pudieran hacer aplicaciones de potencia con los motores de corriente alterna, con lo cual se produjo un cambio irreversible en favor de estos últimos en lo que hace a su aplicación.



Circuitos de la corriente continua

La distribución y el consiguiente uso de la tensión continua tienen plena vigencia en el ámbito de las instalaciones eléctricas de los sistemas de generación y distribución de la energía eléctrica, así como también en algunas aplicaciones de las plantas industriales, como puede ser el control.

Estos usos se hacen en distintos tipos de circuitos, los cuales a su vez presentan de alguna manera distintas jerarquías funcionales, aunque todos ellos deben ser eficientes, confiables y seguros, por eso es necesario calcular, proyectar y seleccionar cada uno de los componentes a fin de poder cumplir con estos objetivos.

Tipos

Se puede considerar la aplicación de tensiones continuas en los siguientes tipos de circuitos:

- » Tracción: ferrocarriles, vagones cargadores, etc.
- » Elevación: ascensores, puentes grúas, etc.
- » Laminación: stands de laminación, transportadores, bobinadoras tanto para acero redondo como para chapas.
- » Procesos electrolíticos: galvanizado, latonado, etc.
- » Vehículos fuera de ruta: autoelevadores, zorras, etc.
- » Auxiliares en los circuitos de control que emplean PLC.

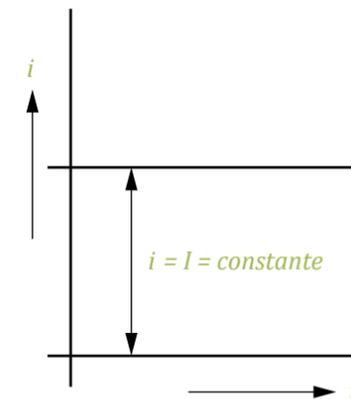


Figura 1. Corriente continua

- » Control de máquinas y equipos, en general.
- » Circuitos de servicios generales de estaciones transformadoras y de maniobra; y comando y control de subestaciones transformadoras y plantas generadoras.
- » Instalaciones fotovoltaicas.
- » Iluminación de emergencia.
- » Sistemas de seguridad: vigilancia, protección, alarmas, etc.
- » Sistemas de comunicaciones en sus distintas tecnologías.

Fuentes de corriente continua

La fuente de tensión continua por excelencia es la batería de acumuladores, aunque también hay convertidores estáticos de distintos tipos y máquinas eléctricas como las dinamos (menos frecuentes). En algunos casos se utilizan combinaciones adecuadas de los dos primeros.

Tensiones

Las tensiones empleadas varían según las aplicaciones, salvando aquellas especiales o de producción (procesos electrolíticos o industriales varios), se puede decir que en general pueden ser:

- » Tracción: 700 a 3.000 V.
- » Vehículos fuera de ruta: 24 V.
- » Iluminación de emergencia: 12 V.

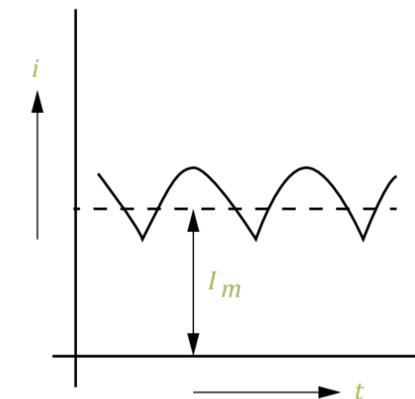


Figura 2. Corriente pulsante

- » Para servicios generales de estaciones transformadoras y de maniobra: 220, 110 y 48 V.
- » Sistemas de alarmas por incendio o intrusión: 12 V.

Formas de la tensión continua

Se define a la corriente eléctrica continua como el desplazamiento de los electrones en un mismo sentido a lo largo de un determinado circuito en forma invariable con el tiempo (ver figura 1).

La necesidad de convertir la tensión alterna en continua hizo que se utilizaran los denominados "rectificadores", los cuales, dependiendo del tipo, entregan una corriente que no es exactamente invariable con el tiempo y que se denomina "pulsante" (ver figura 2). En este caso, la corriente eléctrica en lugar de tener un valor constante tendrá un valor medio (I_m) que deberá ser tenido en cuenta de acuerdo a la aplicación que se haga.

Instalaciones eléctricas para la distribución y uso

Las instalaciones eléctricas que utilizan tensión continua están construidas con el mismo tipo funcional de materiales que las de alterna. Se debe resaltar que las diferencias se encuentran en los elementos destinados a realizar la interrupción y protección, fundamentalmente en estos últimos, los cuales presentan características constructivas acordes con este tipo de tensión y de corriente eléctrica.

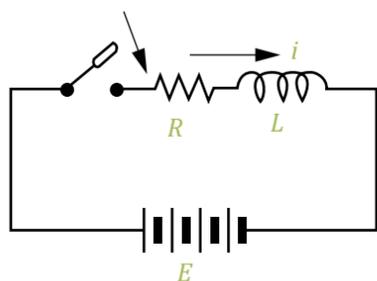


Figura 3. Circuito R-L serie

Parámetros de los circuitos eléctricos

En los circuitos eléctricos, los parámetros tales como resistencia, inductancia y capacidad nunca existen en estado puro, es decir, son combinaciones de estos, aunque en ciertos casos alguno de ellos puede ser más preponderante que otros. En los más simples o que nos pueden interesar en forma especial, es la combinación de resistencia e inductancia, como el caso de los relés, o determinadas canalizaciones eléctricas.

Circuitos eléctricos con resistencia e inductancia

Los circuitos eléctricos destinados a los sistemas de tensión continua tienen dos valores que interesan especialmente para tener en cuenta:

- » La corriente eléctrica que circula en forma permanente.
- » El pico o máximo valor que esa corriente eléctrica pueda llegar a alcanzar en el régimen transitorio debido al cierre del circuito o en caso de cortocircuito.

Las instalaciones eléctricas que utilizan tensión continua están construidas con el mismo tipo funcional de materiales que las de alterna.

Para llegar a comprender el origen y el mecanismo de la evolución de estos valores con el tiempo de la corriente eléctrica continua, se hace necesario analizar un circuito eléctrico formado por una resistencia y una inductancia conectadas en serie, comúnmente denominado "circuito tipo R-L", alimentado con una tensión continua, como nos muestra la figura 3. En ella podemos ver en forma esquemática la fuente de tensión (E), una resistencia que representa a toda la del circuito (R), de la misma manera, una autoinducción (con su correspondiente coeficiente de autoinducción L) y un interruptor, todos unidos por los cables. Así, se ha formado un circuito eléctrico R-L serie.

Mientras el interruptor se encuentre abierto, no hay tensión aplicada al circuito eléctrico o sobre los elementos (R y L) que lo componen, con lo cual la corriente eléctrica a través de ellos es nula ($i = 0$).

Cuando se cierre el interruptor, circulará una corriente eléctrica y , durante los primeros instantes, tendrá lugar lo que se denomina como "proceso transitorio" y, luego de haber transcurrido un determinado tiempo, la corriente eléctrica habrá alcanzado un valor constante en el tiempo, mientras el interruptor se encuentre cerrado.

Al cerrar el interruptor (consideraremos que $t = 0$), la corriente eléctrica comienza a variar en cantidades infinitesimales (o sea, diferencialmente), tendiendo a alcanzar el valor final o estable que será:

$$I = E/R \tag{1}$$

Si llamamos a la variación diferencial de corriente eléctrica como " d_i " y a la variación diferencial del tiempo como " d_t ", el periodo de variación de la corriente eléctrica será:

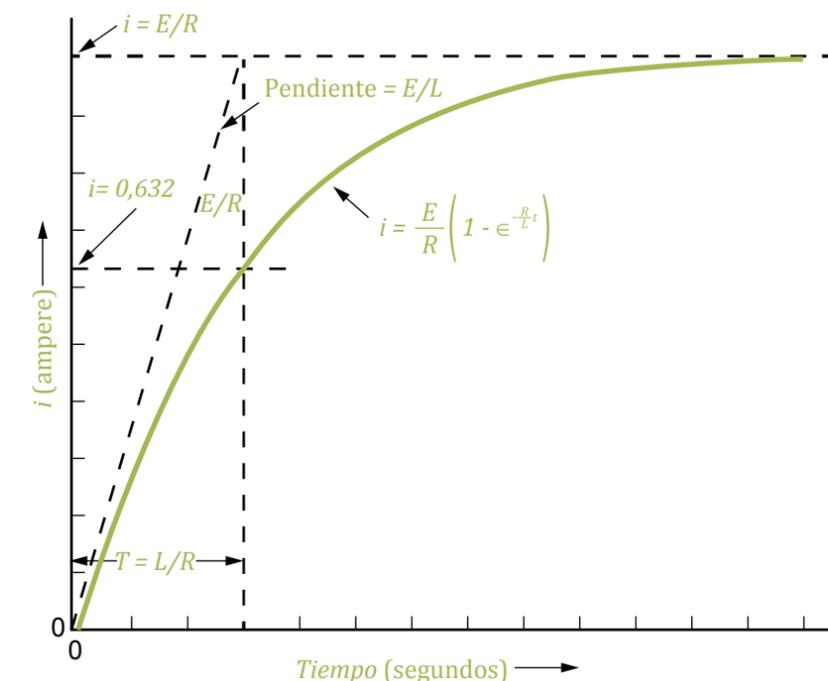


Figura 4. Variación de la corriente en el circuito R-L.

$$d_t = d_i/d_t \tag{2}$$

Ahora bien, toda variación de la corriente eléctrica en un circuito inductivo es acompañada por una fuerza electromotriz que se opone a la tensión aplicada, cuya expresión es:

$$E = L (I/t) [V] \tag{3}$$

en donde:
 L : inductancia o autoinducción en henry
 I : corriente eléctrica en amperes
 t : tiempo en segundos

Con lo cual, nos quedará la siguiente ecuación diferencial:

$$E = i R + L (d_i/d_t) \tag{4}$$

Es necesario destacar que para $t = 0$, o sea, cuando $i = 0$, la caída de tensión será:

$$i R = 0 \tag{5}$$

Entonces, la fem inducida es:

$$L (d/d_t) = E \tag{6}$$

Y también, que cuando la corriente eléctrica i alcanza el valor E/R :

$$L (d/d_t) = 0 \tag{7}$$

Resolviendo esta ecuación, se obtiene como expresión de la corriente:

$$i = E/R (1 - e^{-(R/L)t}) \tag{8}$$

siendo $e = 2,718$ la base de los logaritmos neperianos.

La figura 4 es la representación de esta última ecuación.

La relación L/R , que se representa con la letra griega τ (tau), y es la que caracteriza al circuito eléctrico, se denomina "constante de tiempo del circuito". Si se reemplaza esta relación en la ecuación anterior y se resuelve, se obtendrá que:

$$i r = E/R (1 - e^{-(R/L)(L/R)}) = E/R [1 - (1/e+1)] = 0,632 E/R \tag{9}$$

Esta fórmula expresa que la corriente eléctrica aumentará hasta el 63,2% de su valor final E/R en

un tiempo igual a L/R segundos, a partir del instante en que se cierra el interruptor.

La rapidez inicial de la variación de la corriente eléctrica constituye también una medida importante de las propiedades inductivas de un circuito. Si se supone que la corriente eléctrica continúa variando con la rapidez inicial, y alcanza el valor final L/R en segundos, se deduce que:

$$(d/d_t)_{at=0} = (E/R)/(L/R) = E/L \tag{10}$$

También es posible ver, a través de estas fórmulas y de su representación gráfica, que el aumento del valor de la resistencia R no afecta el régimen inicial, aunque acelera la llegada al valor de E/R , mientras que un aumento de L tiende a disminuir el régimen inicial del crecimiento de la corriente eléctrica sin afectar el valor final E/R .

Efectos en los circuitos eléctricos

Luego de haber analizado la forma en que evoluciona la corriente eléctrica con el tiempo en un circuito R-L, veremos los efectos que produce en los circuitos eléctricos de tensión continua en general, que son los siguientes:

- » Térmico
- » Caída de tensión
- » Cortocircuito

El efecto térmico está relacionado con la capacidad térmica (absorber calor) de los elementos que

componen el circuito eléctrico, o sea que el calor generado por las corrientes eléctricas que circulan por ellos no produzca elevaciones tales que superen a las admisibles de las diversas partes de los distintos componentes, como contactos o aislamientos.

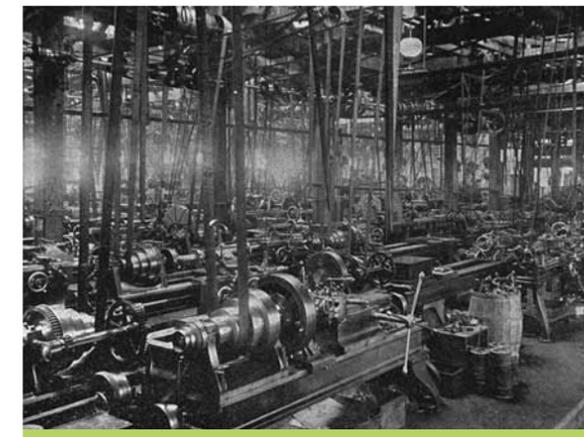
La caída de tensión se produce como consecuencia de la circulación de la corriente eléctrica por las partes conductoras, pero debido a que estas ofrecen una resistencia eléctrica a su paso, no se debe superar el porcentaje establecido por el consumo para su normal funcionamiento, o sea, puede continuar brindando las prestaciones nominales (potencia, velocidad, etc.).

El cortocircuito, en cambio, es un fenómeno extraordinario, derivado de alguna situación accidental y es muy preocupante, ya que cuando se produce se genera calor y esfuerzos electrodinámicos derivados de la corriente de cortocircuito, ambos proporcionales al cuadrado de esta última. Debe tenerse presente el hecho de que los arcos producidos por la corriente continua se mantienen en el tiempo, ya que no hay paso por cero como ocurre con la corriente alterna, que lo hace cien veces por segundo. La actuación prolongada implica una mayor cantidad de calor generado, el cual deteriora el material de los contactos y al circundante, lo cual puede hacer entrar en combustión a este último, provocando un incendio.

El efecto térmico está relacionado con la capacidad térmica (absorber calor) de los elementos que componen el circuito eléctrico

Efecto térmico

La circulación de la corriente eléctrica por los diversos elementos que componen los circuitos, y debido a la resistencia que tienen estos, hace que se genere calor, que depende del valor de la intensidad de aquella y es proporcional a su cuadrado, lo cual hace que se destruyan o deterioren los aisla-



Brush Electric Company en 1880

mientos (dependiendo del valor), lo que disminuye la vida útil. Asimismo, en los contactos puede producir un efecto de soldadura o deteriorar sus superficies.

Cada tipo de elemento que compone una instalación (cables, interruptores, etc.) tiene una corriente eléctrica nominal o asignada que no debe ser sobrepasada por la circulante, de esta manera se asegura que el calor generado no lo deteriore.

La caída de tensión se produce como consecuencia de la resistencia específica de las partes conductoras a la circulación de la corriente eléctrica.

Caída de tensión

La determinación de la caída de tensión en los circuitos de corriente continua resulta de la aplicación directa de la ley de Ohm, es decir:

$$\Delta U = r \cdot I \tag{11}$$

$$(\Delta U / U_n) 100 = \Delta U \tag{12}$$

En donde " ΔU " es la caída de tensión a lo largo del cable, en volts; " r ", la resistencia del conductor del circuito, en ohms; " I ", la longitud del conductor,



en milímetros o metros según se trate; " U_n ", la tensión nominal, en volts, y " ΔU ", la caída de tensión expresada por ciento de la nominal.

Las secciones de los cables más utilizados en los circuitos de control que emplean tensión continua -220 o 110 V- son de 1,5 y 2,5 mm², en cambio, para los de comunicaciones -24 o 48 V- es de 0,5 mm² (0,8 mm de diámetro).

Los cables fabricados según la Norma IRAM MN-247-3 (450-750 V) del tipo unipolar para estas secciones presentan los valores característicos siguientes:

- » $S = 1,5 \text{ mm}^2 > R = 13,30 \text{ ohm/km}$ a 20 °C, medido en corriente continua
- » $S = 2,5 \text{ mm}^2 > R = 7,98 \text{ ohm/km}$ a 20 °C, medido en corriente continua
- » $S = 4 \text{ mm}^2 > R = 4,95 \text{ ohm/km}$ a 20 °C, medido en corriente continua

Se consideran estos valores para tres cables unipolares, dentro de un caño embutido en mampostería con una temperatura ambiente de 40 °C, y de 70 en el conductor.

Para los cables fabricados según la Norma IRAM 2178 (0,6/1,1 kV) para todas las formaciones, los valores de resistencia de acuerdo a las secciones son:

- » $S = 1,5 \text{ mm}^2 > R = 15,90 \text{ ohm/km}$, a 70 °C medido a 50 Hz

- » $S = 2,5 \text{ mm}^2 > R = 9,55 \text{ ohm/km}$, a 70 °C medido a 50 Hz
- » $S = 4 \text{ mm}^2 > R = 5,92 \text{ ohm/km}$, a 70 °C medido a 50 Hz

Estos valores se dan para tres cables unipolares colocados sobre una bandeja portacables con una temperatura ambiente de 40 °C en una cañería embutida en mampostería

Los valores de resistencia anteriores han sido extraídos de un catálogo de cables y conductores producidos por un fabricante nacional, y acá se expusieron a modo de orientación.

La caída de tensión producida a lo largo de los cables del circuito tiene su incidencia directa en la carga conectada; dado que nuestra atención está en los circuitos de control, es importante conocer que las bobinas de los relés y contactores trabajan normalmente cuando se les aplica tensiones comprendidas entre un 10% por encima y un 15% por debajo de la tensión nominal.

Como complemento, la tensión de una batería varía por cada elemento entre 2,35 y 1,8 V, o sea, entre un 17 y un -10%.

El cortocircuito es un fenómeno extraordinario, derivado de alguna situación accidental

Cortocircuito

En un ítem anterior se vio la mecánica o forma de evolución de las corrientes eléctricas en el tipo de circuito que estamos tratando y su forma de calcularla. Al respecto, hay que señalar que no se ha tenido en cuenta la resistencia interna de las fuentes de tensión, así como que la tensión de alimentación se mantiene constante mientras dura el fenómeno transitorio. Mediante ese mecanismo, se puede determinar la corriente de cortocircuito en los distintos puntos de la instalación eléctrica, por ejemplo, en las barras del tablero principal de tensión continua o en los bornes de una determinada carga.

En este caso, se ha supuesto que la fuente de la tensión es única, pero puede ocurrir que no sea así, que haya más de una. En tal situación, el tratamiento sería similar, o sea, se haría el cálculo en forma independiente de los sistemas de resistencia e inductancia para aplicar el método de superposición, para hacer luego una composición de los efectos.

Con estos valores calculados se debe seleccionar la protección y la regulación.

Otra consideración importante a tener en cuenta es que, al producirse un cortocircuito, es natural que se incremente la corriente eléctrica que estaba circulando normalmente (o sea, la corriente eléctrica nominal del circuito), y será esta la que debe hacer actuar el dispositivo de protección por la sobretensión asociada a ese circuito. Como hemos

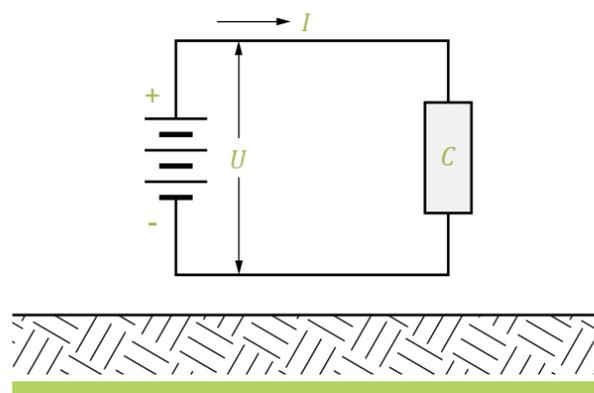


Figura 5

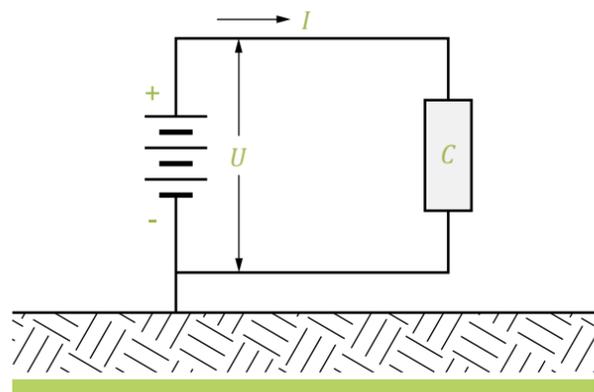


Figura 6

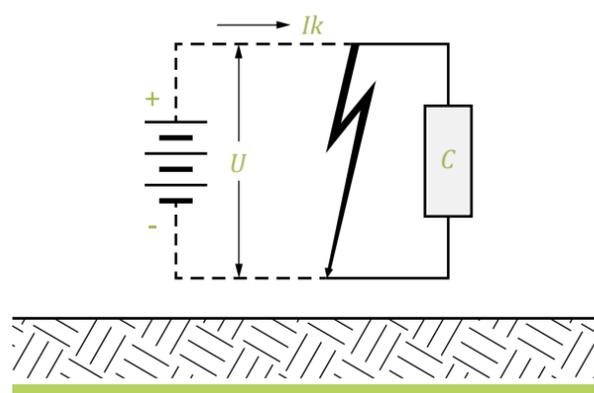


Figura 7

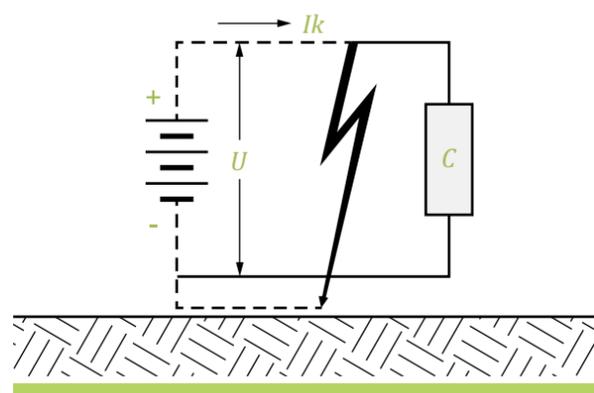


Figura 8

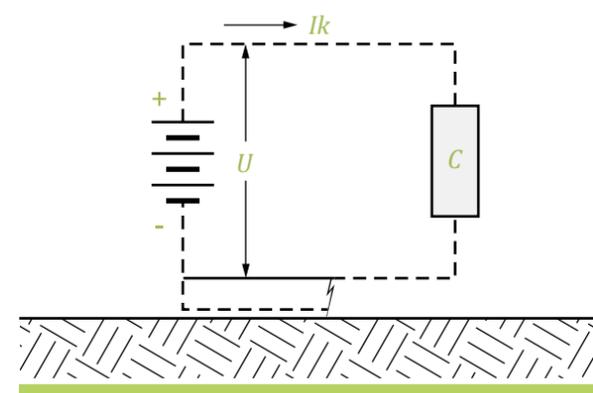


Figura 9

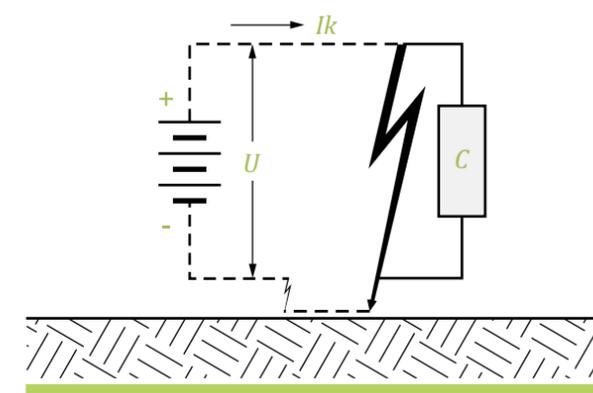


Figura 10

visto, esta sobrecorriente dependerá de la resistencia del circuito de la falla. La mayor resistencia corresponderá al extremo más alejado del tablero en donde se encuentra la protección y, en consecuencia, será la menor corriente de falla que se pueda establecer. Esta corriente eléctrica debe ser tal que haga actuar al dispositivo de protección correspondiente.

Como regla general, se puede establecer que la intensidad mínima de disparo es igual a dos veces la corriente nominal del interruptor automático de protección de alimentación del circuito:

$$R_{tot} < U / (2 \cdot I_n) \tag{13}$$

donde " R_{tot} " es la resistencia del lazo de la falla, en ohms; " U ", la tensión de control, en volts, e " I_n ", la corriente nominal del interruptor automático de protección del circuito, en amperes.

Circuitos

Los circuitos son alimentados con una tensión continua proveniente de una fuente que, dependiendo de la forma como se la vinculan con tierra, serán las características de la circulación de las corrientes de cortocircuitos que se establezcan con esta última. Esto adquiere relevancia importante cuando se trata de determinar la protección a emplear, cuestión esta que será tratada más adelante.

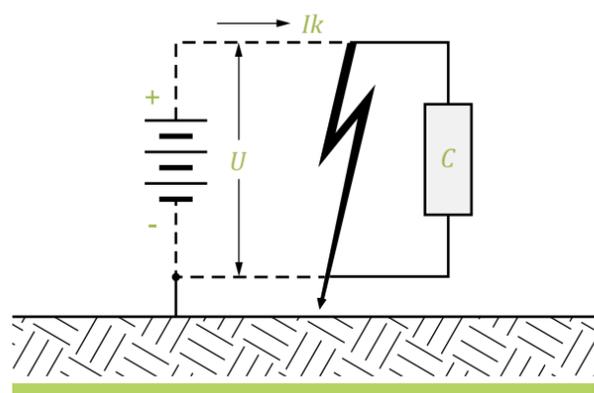


Figura 11

Las vinculaciones entre la fuente de tensión y tierra que se pueden presentar habitualmente son:

- » no conectada
- » por el negativo

Conexiones de las fuentes

En lo que sigue se considerará un circuito elemental formado por una fuente de tensión continua U , los cables que permiten la conexión de una determinada carga única C , por el que circulará la corriente eléctrica normal I y eventualmente se presentará la corriente de cortocircuito I_k .

- » Fuente no conectada a tierra: La figura 5 ilustra el caso y se puede apreciar la independencia de la fuente con tierra y, por lo tanto, de la corriente eléctrica I . Es preciso señalar que para la fuente se puede considerar a esta disposición como IT , de acuerdo a lo expuesto en la Norma IEC 60.364-1.
- » Fuente conectada a tierra a través su propio polo negativo. En la figura 6, se representa esquemáticamente el circuito. Se muestra la vinculación de la fuente U con tierra.

Fallas en los circuitos

En lo que sigue, y debido a la importancia que tiene dentro de las fallas el cortocircuito, para cada una de las dos situaciones posibles para la conexión del negativo de las fuentes de tensión continua se

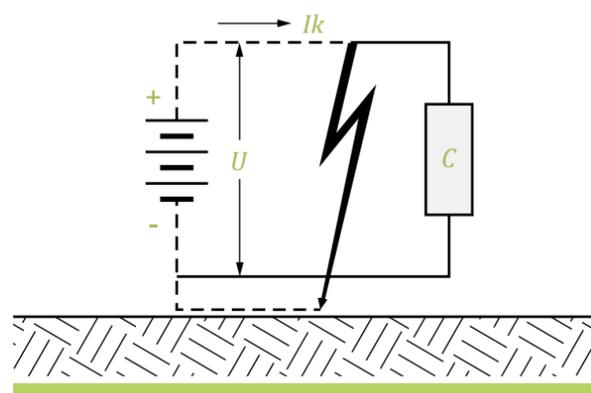


Figura 12

describirán las características funcionales que se pueden dar.

En cada caso, deberá calcularse el valor que asume la corriente de cortocircuito a los fines de poder seleccionar la capacidad de ruptura del elemento de protección utilizado para esta última corriente eléctrica. Es así que los casos serán los que se describen a continuación.

Fuente no conectada a tierra

- » Primer caso: En el caso de producirse una falla como la mostrada en la figura 7, se establecerá la corriente de cortocircuito I_k , la cual quedará determinada por el valor de la tensión U y la resistencia eléctrica de los cables circuito involucrado.
- » Segundo caso: La figura 8 muestra esquemáticamente el circuito que se establecerá para la corriente de cortocircuito I_k , que no retornará a la fuente por no haber vinculación.
- » Tercer caso: En la figura 9, se ha esquematizado el recorrido de la corriente eléctrica de cortocircuito I_k . En ella misma, es fácilmente observable que la atraviesa la carga C , circula por parte de los cables, pero no hay retorno a la fuente.
- » Cuarto caso: Esta situación (figura 10) involucra un doble contacto a tierra por lo cual el circuito de la corriente I_k también comprenderá a los cables y al camino que recorra fuera de estos,

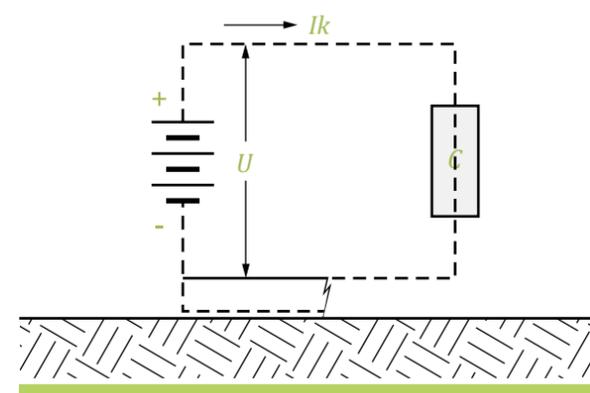


Figura 13

produciéndose un retorno a la fuente ya que hay un camino a través de la circulación por tierra.

Fuente con el negativo conectado rígidamente a tierra

- » Primer caso: El valor de la corriente de cortocircuito I_k dependerá del valor de la tensión U y de la resistencia de los cables involucrados en el circuito de esta, como se puede apreciar en la figura 11. No se observa la influencia de la conexión a tierra.
- » Segundo caso: En este caso (figura 12), el valor que adquiere la corriente de cortocircuito I_k no solo está influenciado por el valor de la tensión U , la resistencia de los cables involucrados, sino también por la resistencia del circuito que se forme por tierra.
- » Tercer caso: La figura 13 muestra el circuito correspondiente a este caso, en donde se puede apreciar que la corriente de cortocircuito I_k , aparte de circular por los cables, el camino por tierra. ■

Bibliografía:

- [1] ABB, notas técnicas.
- [2] Seip, Günter (1989) *Instalaciones eléctricas*. Munich, Siemens
- [3] Siskind, Charles (1965) *Circuitos eléctricos*. Buenos Aires, Hispano-Americana
- [4] Sobrevila, Marcelo A. (2008) *Electrotecnia*. Santa Fe, Editorial Alsina.