

— Par desarrollado por los grupos de conductores del inducido de un motor.

Prácticamente no hay diferencia entre la manera de construir el inducido de un motor o de un generador. En la figura (a) se representan el inducido y los polos inductores de un motor bipolar y el par desarrollado por cada conductor individual. La figura (b) representa los mismos elementos para un motor de cuatro polos. La dirección del par desarrollado por cada grupo de conductores se indica con una flecha para cada grupo.

En inducidos de este tipo, sólo está sometido a conmutación en un instante cualquiera un número muy reducido del total de bobinas. Por lo tanto, la variación del número de conductores activos es tan pequeña que prácticamente el par que se desarrolla se mantiene constante para valores constantes de la intensidad de la corriente en el inducido y en el flujo principal.

Según las fórmulas anteriores, el par desarrollado por un inducido es $T = K_t' Z I_a \phi$ siendo,

K_t' = una constante que depende del número de polos; de los circuitos de paso de la corriente, en paralelo, a través del inducido; de las unidades elegidas, etc. .

Z = número de conductores en la superficie del inducido

I_a = corriente en el inducido, en amperios

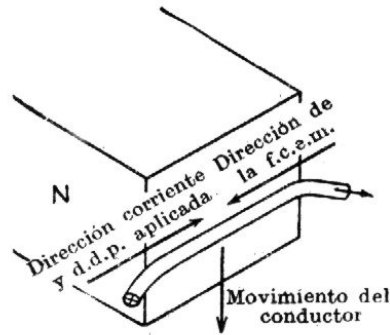
ϕ = flujo que entra en el inducido desde un polo N

Fuerza contraelectromotriz

La resistencia del inducido de un motor de tipo corriente de 10 caballos a 110 voltios es de unos 0,05 ohmios. Si este inducido se conectara directamente a una línea de suministro a 110 voltios, la corriente (Ohm) sería $I = 110/0,05 = 2200A$.

Este valor no sólo es excesivo, sino también ilógico, especialmente si se considera que la corriente de régimen de este motor se aproxima a los 90A. Cuando un motor está en marcha, la intensidad de la corriente que circula por el inducido no viene, evidentemente, determinada sólo por su resistencia óhmica.

El inducido del motor, es en muchos aspectos, muy semejante al de un generador. Los conductores situados en su superficie, además de conducir una corriente y desarrollar así un par motor, cortan un flujo. Por lo tanto, es forzoso que induzcan una f.e.m..



— Relación entre la dirección de la corriente y las f.e.m., en el conductor de un motor.

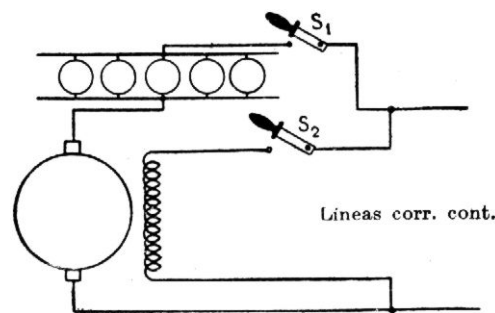
La figura representa un conductor del inducido de un motor, moviéndose hacia abajo frente a un polo N. Para que el movimiento sea de descenso es necesario que la dirección de la corriente en el conductor sea de izquierda a derecha.

Si se aplica la regla de la mano derecha, para determinar la dirección de la f.e.m. inducida en este conductor por su movimiento descendente, se encontrará que actúa de derecha a izquierda, o sea, oponiéndose a la corriente.

Si se determina la f.e.m. inducida en cualquier conductor del inducido de un motor, se hallará que actúa siempre en sentido opuesto al de la corriente. Es decir que se opone a que la corriente entre en el inducido. Esta f.e.m. inducida recibe el nombre de fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.). Como se opone a la corriente, se debe oponer también a la tensión de la línea. Por lo tanto la f.e.m. neta que actúa en el circuito del inducido es la diferencia entre la tensión de línea (V) y la f.c.e.m. (E). Si R_a es la resistencia del inducido, aplicando ohm se obtiene $E = V - I_a R_a$; fórmula que puede compararse a la del generador.

En un generador, la f.e.m. inducida es igual a la tensión entre terminales más la caída de tensión del inducido. En un motor, la f.e.m. inducida es igual a la tensión entre terminales menos la caída de tensión debida a la resistencia del inducido. La f.c.e.m. debe ser siempre menor que la tensión aplicada si circula corriente hacia el inducido, por el terminal positivo.

Un experimento interesante para demostrar la existencia de la fuerza contraelectromotriz se representa en la figura siguiente. Un grupo de lámparas se empalma en serie con el inducido de un motor shunt. Se cierra primero el interruptor S_2 , que cierra el circuito inductor. Después se cierra el S_1 . En el instante de cerrar S_1 las lámparas brillarán con intensidad, e incluso con luz superior a la normal. A medida que la velocidad del inducido aumenta, la iluminación dada por las lámparas es más débil, lo que demuestra que en el inducido se engendra una fuerza contraelectromotriz que se opone a la tensión de la línea dando origen a menor tensión en las lámparas.



— Demostración de la existencia de la fuerza contraelectromotriz.

Cuando el inducido alcanza su máxima velocidad, la luz de las lámparas es más débil. Si por el contrario, se abre el interruptor S_2 , el flujo y también la f.c.e.m. se reducen prácticamente a cero, lo que se atestigua porque las lámparas adquieren de nuevo su brillo completo. (en la práctica cuando un motor está en marcha, no debe abrirse el circuito inductor cualesquiera sean las condiciones que se produzcan).

Aplicando la fórmula de generadores, la f.c.e.m. vale: $E = \frac{\phi SPZ}{60 P' 10^8}$ voltios, siendo ϕ el flujo total que penetra en el

inducido desde un polo N, S la velocidad del inducido en r.p.m., P el número de polos, Z el número de conductores dispuesto en la superficie del inducido y P' el número de circuitos en paralelo de paso de la corriente a través del inducido.

Como Z, P y P' son constantes para un motor determinado, la f.c.e.m. será $E = K_1 \phi S$ idéntica a la correspondiente a generadores sustituyendo K por K_1 .

Despejando la velocidad y haciendo $K=1/K_1$, se obtiene $S=KE/\phi$. Reemplazando el valor de E por el de la ecuación de arriba se tiene $S = K \frac{V - I_a R_a}{\phi}$ relación muy importante que define la ley de variación de la velocidad de un motor cuya carga varía.

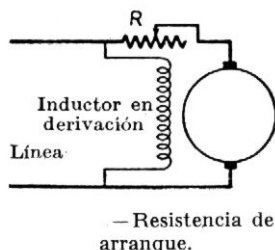
Resumen de la utilización de motores

Shunt	Compound diferencial	Compound acumulativo	Serie
Características			
Velocidad casi constante	Velocidad constante	Velocidad variable	Velocidad variable
Velocidad regulable . . .		Regulación de la velocidad	Regulación de la velocidad
Por medio de arranque . (hasta el 150 % del nominal)	Bajo par de arranque	Gran par de arranque	Par de arranque muy elevado
Aplicaciones			
Árboles de transmisión a velocidad constante		(Demandas intermitentes de gran par motor)	Tracción Locomotoras eléctricas
Máquinas herramienta			Locomotoras Diesel-eléctricas
Ventiladores		Cizallas	Líneas de servicio rápido
Bombas centrífugas		Punzonadoras	Trolebuses y autobuses
Bombas de émbolo		Prensas	Grúas
Trabajo de la madera		Aparatos de elevación	Montacargas
Máquinas para papel		Transportadores	Transportadores
Máquinas de impresión		Alimentadores de hogares	
		Laminadores	

Dispositivos de arranque de motores: reóstato de tres bornes

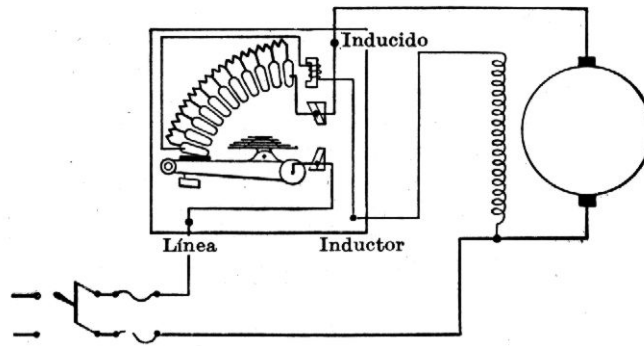
Se ha indicado que si un motor de 10HP a 110 voltios se conecta directamente a una línea de alimentación a 110 voltios, la corriente demandada es $110/0,05 = 2200A$, valor inadmisibles en la práctica industrial. Por consiguiente, debe intercalarse durante el arranque una resistencia en serie con el inducido del motor. Esta resistencia puede disminuirse progresivamente a medida que la velocidad del inducido aumenta y desarrolla una f.c.e.m..

La figura siguiente muestra la manera de emplear una sencilla resistencia R para el arranque de un motor shunt. Debe notarse que esta resistencia está en el circuito del inducido y que no afecta al inductor, conectado directamente a la línea.



Si el inductor estuviese directamente conectado a los terminales del inducido, de modo que la resistencia estuviera en serie con todo el motor, la tensión sería baja o nula en el inductor para el arranque, produciendo un par débil que haría difícil el arranque.

En la figura siguiente se muestra un reóstato de arranque de tres bornes, que no difiere de un modo esencial con el del esquema arriba citado.



GENERADORES DE ELECTRICIDAD

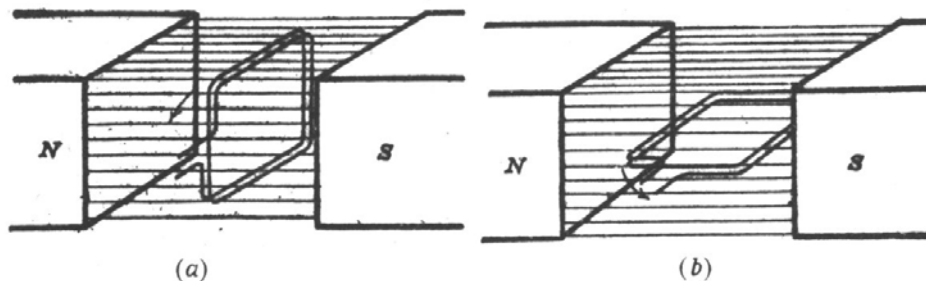
Definición

Los generadores eléctricos son máquinas destinadas a transformar la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre unos conductores eléctricos dispuestos sobre una armazón. Si mecánicamente se produce un movimiento relativo de los conductores y el campo, se generará una fuerza electromotriz, de modo que, si se enlazan a un circuito exterior, le suministrarán energía eléctrica.

En el generador de corriente continua, o dinamo el campo magnético es, ordinariamente, fijo y la armazón (inducido) la que gira. En muchos tipos de generadores de corriente alterna, la armazón está fija y es el campo el que gira. Lo mismo el inducido, en un caso, como el campo en el otro, se hacen girar por medio de una fuerza mecánica aplicada a su eje.

Fuerza electromotriz generada

Si se hace variar el flujo que abraza una, se induce una f.e.m. en esta última. El funcionamiento del generador está fundado en este principio. El flujo que abrazan las espiras del inducido se hace variar haciéndolo variar en el campo inductor.



(a) — Espira sencilla que gira en un campo magnético.
 a) Cantidad máxima de líneas a través de la espira.
 b) No pasa ninguna línea a través de la espira.

En la figura se representa una espira que gira en un campo magnético uniforme, producido por dos polos, N y S. En (a), el plano de la espira es perpendicular a la dirección del campo magnético y corta el máximo posible de flujo. Sea ϕ este flujo en maxwell.

Si la espira gira en sentido contrario al de las agujas del reloj, al efectuar un cuarto de revolución se encontrará en la posición representada en (b) con su plano paralelo a la dirección del campo, por lo que no abraza flujo alguno. Por lo tanto, en un cuarto de vuelta el flujo cortado ha disminuido ϕ maxwell. La f.e.m. media inducida en la espira durante este tiempo

es pues, para un arrollamiento de varias espiras, $E_{av} = N \frac{\phi}{t} 10^{-8}$ voltios.

Si N es el número de espiras y t el tiempo necesario para girar un cuarto de vuelta. Como $t=1/4s$, si s son las revoluciones de la espira por segundo, la f.e.m. media durante un cuarto de vuelta es $E_{av} = 4Ns\phi 10^{-8}$ voltios.

Y si el flujo se expresa en Weber (Φ), la f.e.m. valdrá $E_{av} = 4Ns\Phi$ voltios.

La f.e.m. inducida por un conductor de longitud l cm que corta un flujo de densidad de B gauss a una velocidad de v m/s, es $e=Blv 10^{-8}$ voltios.

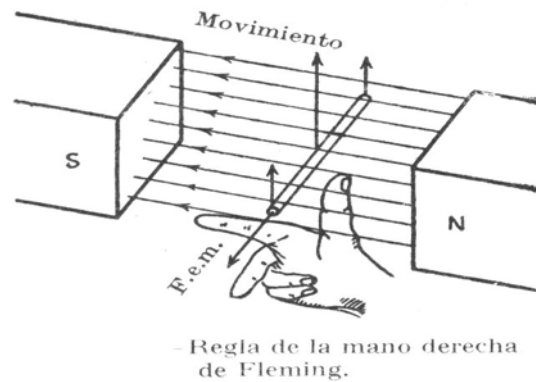
Siempre que B, l, y v sean perpendiculares entre sí. Si esto no ocurre, la fórmula anterior debe multiplicarse por el seno que formen dos cualesquiera de las tres cantidades B, l y v.

Si se usa el sistema internacional la ecuación anterior queda: $e=Blv$ voltios.

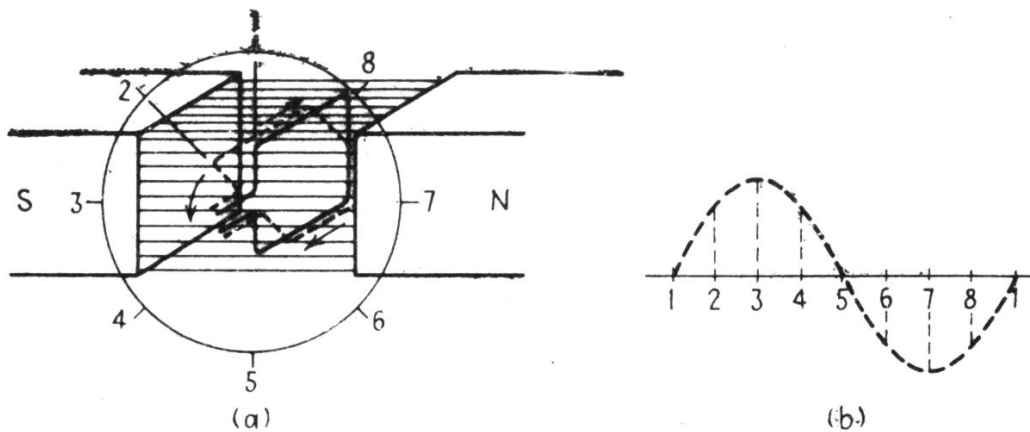
Dirección de la fuerza electromotriz inducida. Regla de la mano derecha de Fleming

Existe una relación definida entre la dirección del flujo, la dirección del movimiento del conductor y la dirección de la f.e.m. inducida en este último.

Una regla útil para determinar esta relación es la regla de la mano derecha de Fleming. Para su aplicación se utilizan como se indica en la figura los dedos de la mano derecha.



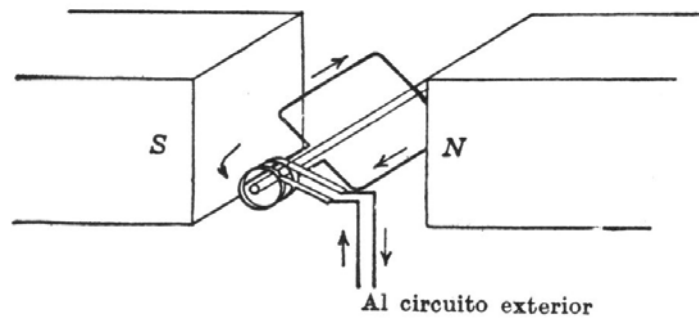
Fuerza electromotriz generada por la rotación de una espira



- Fuerza electromotriz inducida en una espira que gira a velocidad constante en un campo magnético uniforme.

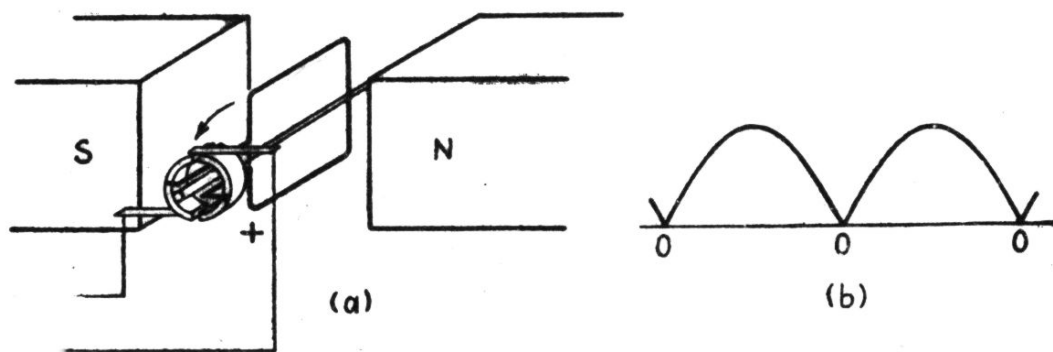
La figura (a) representa una espira que gira en sentido contrario al de las agujas de un reloj y a velocidad constante, en un campo magnético. Según la posición de la espira, la f.e.m. inducida en ella cambia de valor. Cuando está en la posición 1, no se genera f.e.m., porque ningún conductor corta líneas magnéticas, ya que se mueven paralelamente a ellas (para esta posición es nula la variación del flujo que abraza la espira). Cuando la espira alcanza la posición 2 (de trazos), sus conductores activos cortan oblicuamente las líneas y la f.e.m. tiene el valor indicado en 2 en la figura (b). Al llegar a la posición 3, los conductores cortan las líneas perpendicularmente y por consiguiente, el máximo número posible de ellas. Por lo tanto, la f.e.m. es máxima cuando la espira está en esta posición. En la posición 4, la f.e.m. disminuye porque el número de líneas cortadas se va reduciendo. En la posición 5 ya no corta ninguna línea y como en la 1 la f.e.m. es nula. En la posición 6, la dirección de la f.e.m. en los conductores se invertirá, puesto que se encuentran ahora frente a un polo de signo contrario al correspondiente a las posiciones 1 a 5. La f.e.m. crece hasta un máximo negativo, que se alcanza en 7 y luego decrece hasta que la espira ocupa de nuevo la posición 1. Después se va repitiendo el mismo ciclo. La región correspondiente a las posiciones 1 y 5, en las cuales el plano de la espira es normal a la dirección del campo inductor y no se induce f.e.m. en las bobinas giratorias, se llama zona neutra.

Esta f.e.m. inducida es alterna y sigue una ley de variación sinusoidal. Esta f.e.m. alternativa puede actuar sobre un circuito exterior conectado a dos anillos con escobillas.



Los anillos son de una pieza y están aislados entre sí y también del eje inducido. Las escobillas son de metal o de carbón y se apoyan sobre los respectivos anillos pasando a través de ellas la corriente que va al circuito exterior.

Si se desea obtener una corriente continua, es decir que tenga siempre la misma dirección, no se pueden utilizar los anillos. La corriente en las espiras es necesariamente alterna, puesto que lo es la f.e.m. que la produce, como se indicó en la parte (b) de la figura anterior. Es necesario por lo tanto, rectificar dicha corriente antes de enviarla al circuito exterior, lo que puede lograrse por medio de un colector con escobillas como se ve en la parte (a) de la siguiente figura.



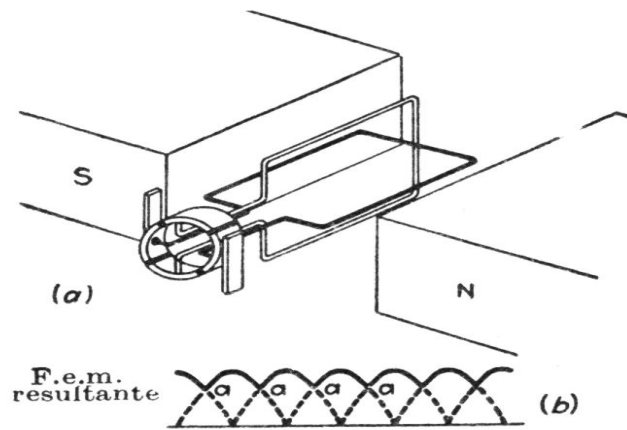
— Efecto de rectificación del colector.

En lugar de dos anillos como en la otra figura, se utiliza solamente uno solo, pero cortado según una generatriz en dos posiciones diametralmente opuestas y empalmado cada una de las mitades a uno de los extremos de la espira.

La figura muestra que, cuando se invierte la dirección de la corriente en la espira, las conexiones con el circuito externo se invierten también. Por lo tanto, la dirección de circulación de la corriente en el circuito exterior es invariable. Las escobillas pasan sobre los cortes del anillo cuando la espira es perpendicular al campo magnético, esto es, en el plano neutro, cuando no se produce ninguna f.e.m., como sucedía en los puntos 1 y 5 de la anterior figura. Estos puntos están marcados con 0 – 0 en la parte (b) de esta figura.

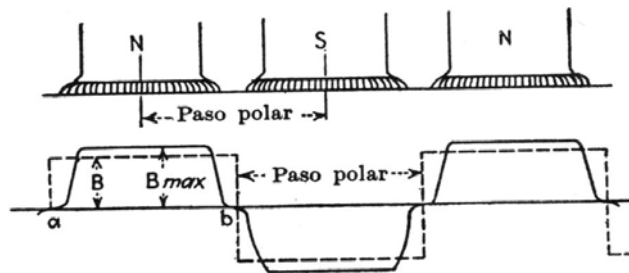
Comparando la parte (b) de ambas figuras se verá que la mitad negativa de la ondulación se ha invertido convirtiéndose en positiva.

Una f.e.m. que se anula dos veces en cada ciclo no se prestaría a las necesidades comerciales de un suministro con corriente continua. Una máquina con una sola espira tendría muy poco rendimiento para su tamaño y peso. Puede conseguirse que la f.e.m. ondulatoria de la figura tenga menores oscilaciones si se emplean dos espiras y cuatro segmentos o delgas en el colector, lo que da origen a un arrollamiento de circuito abierto, ya que es imposible partir de una delga cualquiera del colector y volver a ella después de seguir todo el arrollamiento. En este tipo de arrollamiento no se utiliza toda la f.e.m. producida por cada espira, debido a que una de ellas queda fuera de contacto cuando las escobillas pasan por los puntos a, a, a, de la parte (b) de la siguiente figura y la f.e.m. representada por las líneas de puntos no se emplea.



— Efecto de dos espiras y cuatro delgas del colector sobre la ondulación de la f.e.m.

Fuerzas en el inducido



— Distribución del flujo en una dínamo sin carga.

En la figura se representan dos polos N y uno S de un generador. Para simplificar se representa la superficie del inducido como si se hubiese desarrollado sobre un plano. En la parte inferior se ha dibujado la curva de densidad de flujo. Las ordenadas positivas corresponden al flujo del polo N que entra en el inducido y las ordenadas negativas al que sale de él para entrar en el polo S. El flujo total que sale del polo N viene dado por el área limitada por uno de los trozos positivos de la curva de distribución multiplicada por la longitud del polo según la dirección del eje. Análogamente, el flujo total que abandona el inducido para penetrar en el polo S, se determina por el área de uno de los ciclos negativos de la curva multiplicada por la longitud, en sentido axial, del polo. La máxima densidad de flujo corresponde a la ordenada B_{max} .

Cada una de las regiones positivas y negativas de la curva se puede reemplazar por un rectángulo de igual área, como los de líneas de trazos de la figura. La altura de este rectángulo será de B maxwell por centímetro cuadrado. Tratemos de determinar la f.e.m. media inducida en un solo conductor al quedar sometido al flujo de los polos sucesivos.

Sea ϕ el flujo total en maxwell que parte del polo N o que penetra en el polo S; l la longitud activa del conductor en centímetros, s la velocidad del inducido en revoluciones por segundo y P el número de polos.

Cuando el conductor recorre la distancia ab , igual al paso polar, la f.e.m. media inducida será: $E_{av} = Blv 10^{-8}$ voltios, siendo B la densidad media de flujo por paso polar, l la longitud activa del conductor en centímetros y v su velocidad en centímetros por segundo, que vale $v = ab/t$ cm/s.

Si t es el tiempo que necesita el conductor para recorrer la distancia ab , igual al paso polar. Se tendrá que

$$E_{av} = \frac{Bl(ab)}{t} 10^{-8} = \frac{\phi}{t} 10^{-8} \text{ voltios, ya que } Bl(ab) \text{ da el flujo total cortado por el conductor entre los puntos } a \text{ y } b, \text{ o sea}$$

ϕ , flujo por polo en maxwell.

El tiempo vale $t = l/sP$ segundos. Por lo tanto, la f.e.m. media por conductor es $E_{av} = sP10^{-8}$ voltios.

Si hay Z conductores y P' m circuitos de paso de corriente a través del inducido, deben existir Z/P' conductores en serie.

Por consiguiente, la f.e.m. total generada entre dos escobillas es $E = \frac{\phi s P Z}{P' 10^8}$ voltios.

Si la velocidad S viene dada en revoluciones por minuto, la ecuación anterior se transforma en $E = \frac{\phi S P Z}{60 P' 10^8}$ voltios. (*)

Si el flujo por polo Φ se da en weber, la fórmula anterior se escribirá: $E = \frac{\Phi S P Z}{60 P'}$ voltios.

Curva de saturación

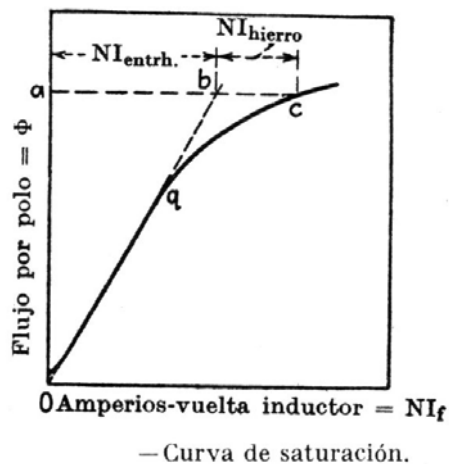
La expresión (*) puede también escribirse de la forma $E = \left(\frac{PZ}{60P'10^8} \right) \phi S$ voltios.

La cantidad encerrada en el paréntesis es constante para una máquina dada y puede ser representada por K. Por lo tanto $E = K\phi S$.

La f.e.m. inducida en un dínamo es directamente proporcional al flujo por polo y a la velocidad. Si la velocidad se mantiene constante, la f.e.m. inducida es directamente proporcional al flujo por polo.

El flujo es debido a los amperios – vueltas del inductor, y como el número de espiras de éstos es constante, el flujo es función de la intensidad de la corriente inductora. No es directamente proporcional a esta corriente, porque la permeabilidad del circuito magnético es variable.

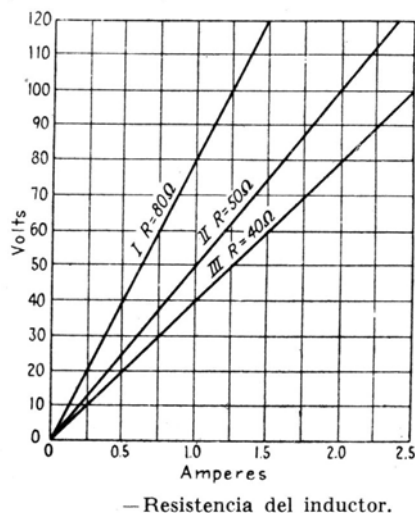
En la figura siguiente se representa la curva de saturación que da la relación entre los amperios - vuelta del inductor y el flujo por polo. El flujo no se inicia por lo regular desde el valor 0, sino desde un valor ligeramente superior, debido al magnetismo residual en el circuito magnético.



Para valores bajos de los amperios – vuelta inductores, la curva se transforma prácticamente en recta, porque la mayor parte de la reluctancia del circuito magnético corresponde al entrehierro. En el punto q, el hierro empieza a estar saturado y la curva se aparta de la alineación.

Resistencia del inductor

Según la ley de Ohm, la corriente en un circuito simple es proporcional a la tensión si la resistencia es constante. Si se grafica la tensión en función de la corriente se obtiene una recta que pasa por el origen. Por ejemplo, si la resistencia del circuito inductor es de 50 ohmios, la corriente será de 2 amperios cuando la tensión sea de 100 voltios; 1,5 amperios para 75 voltios y 1 amperio para 50 voltios.

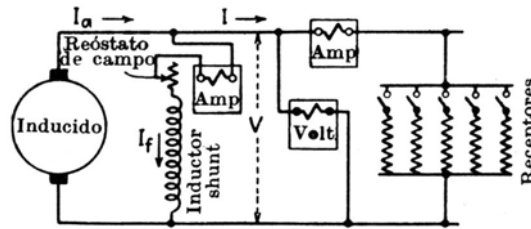


Esta relación corresponde a la recta II. La recta I representa la variación de la tensión con la intensidad para 80 ohmios de resistencia del inductor. Como se ve, a los 80 voltios la corriente es de 1 amperio y a 40 voltios es de 0,5 amperios, etc.. La recta III corresponde a una resistencia de 40 ohmios del circuito de excitación.

Puede observarse que cuanto mayor es la resistencia, mas pronunciada es la pendiente de la recta característica. De hecho, esta pendiente es igual a la resistencia en ohmios, puesto que la tangente del ángulo que la línea forma con el eje de abscisas es E/I .

Tipos de generadores

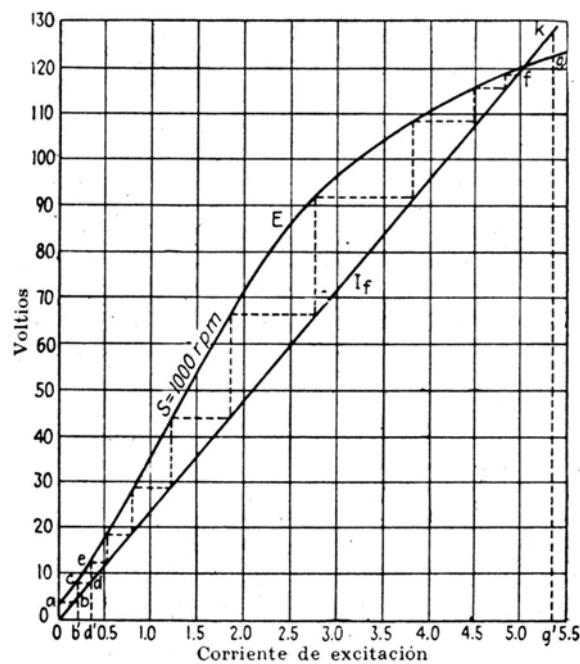
Existen tres tipos de generadores de corriente continua: en derivación o shunt, de excitación compuesta o compound y en serie. En el tipo de excitación en derivación, el circuito inductor se conecta entre los terminales del inducido, generalmente con un reóstato en serie.



— Conexiones de un generador en derivación.

El shunt, por lo tanto, debe tener una resistencia relativamente elevada, con el fin de que no se derive por él una parte excesivamente elevada de la corriente del generador. Los generadores compound son semejantes a los de excitación en derivación, pero llevan un arrollamiento adicional en el inductor, conectado en serie con el inducido y el circuito exterior. En los generadores con excitación en serie, ésta se produce totalmente mediante un arrollamiento de relativamente pocas espiras, conectado en serie con el inducido y el circuito exterior.

Generadores shunt



— Método de excitación de un generador en derivación

La figura represente la curva de saturación E de un generador shunt y la característica de resistencia I_f de su inductor en derivación, ambas referidas a las mismas coordenadas. Como el shunt se conecta a los terminales del inducido, las ordenadas de la característica de resistencia del inductor deben representar la tensión entre los terminales del generador. La resistencia del inductor, representada por su característica en la figura, es de 24 ohmios, de manera que a 120 voltios el campo absorbe 5 amperios y a 60 voltios 2,5 amperios, etc..

Cuando se pone en marcha un generador que esté parado, la f.e.m. es cero. La tensión generada puede aumentar de la manera siguiente: cuando el generador marcha a poca velocidad su f.e.m. es pequeña y está representada por oa en la figura, que equivale a unos 4 voltios, que se generan en el inducido a expensas del magnetismo remanente en el circuito

magnético. Estos 4 voltios, son también la tensión entre terminales del inductor, ya que están conectados a los del inducido. La intensidad de corriente excitatriz que se establece por esta tensión de 4 voltios se puede obtener trazando por a una horizontal prolongada hasta que encuentre la característica de resistencia en b. La corriente excitatriz, en este caso particular, es ob' es decir, unos 0,2 amperios. Fijándose en la curva de saturación se observa que, para este valor de la corriente, la f.e.m. inducida, $b'c$, es de unos 8 voltios. Los 8 voltios generan una corriente de unos 0,33 amperios en el inductor, como se ve proyectando c sobre la característica de resistencia, lo que da el punto d. Esta corriente de excitación od' genera un voltaje $d'e$, que a su vez incrementa el valor de la corriente en el shunt. Así se ve que cada nuevo valor de la corriente excitatriz produce un incremento de la f.e.m., el que a su vez produce un aumento de la corriente en el shunt, o sea que su acción es acumulativa. La f.e.m. continúa aumentando hasta alcanzar el punto f, en que la característica de resistencia corta la curva de saturación, sin que pueda pasar de él por las razones que siguen.

Consideremos un punto k mas allá de f sobre la característica de resistencia. Este punto representa una corriente excitatriz og' de unos 5,3 amperios. Para producir esta corriente se requiere una tensión de excitación de $g'k$ de unos 128 voltios. Pero esta corriente de 5,3 amperios produce una f.e.m. inducida que sólo es de 122 voltios. Si se necesitan 128 voltios para producir dicha corriente y el generador puede producir 122 voltios con la citada corriente, es evidente que no puede alcanzar el punto k.

En el generador, las variaciones de la excitación no se producen en la forma escalonada que se indica por las líneas de puntos de la figura anterior. El flujo no cambia instantáneamente, de modo que las indicaciones de un voltímetro conectado a los terminales de un generador crecen de una manera gradual y suave.

La excitación progresiva de los generadores shunt puede también estudiarse aplicando los principios de la geometría analítica. La f.e.m. E definida por la curva de saturación es función de la intensidad de la corriente inductora, por lo que puede escribirse $E = f(I_f)$ voltios (i).

Despreciando la pequeña caída de tensión en el inducido debida a la corriente inductora, $I_f = \frac{E}{R_f}$ amperios (ii), si R_f es la

resistencia del circuito inductor.

Resolviendo (i) e (ii), se obtendrán los valores los valores que la tensión y la intensidad de la corriente inductora adoptan al crecer progresivamente la excitación. Sin embargo, es difícil obtener la expresión analítica de la función (i). La solución puede obtenerse, no obstante, por intersección de los gráficos representativos de (i) e (ii), lo que da el punto f.

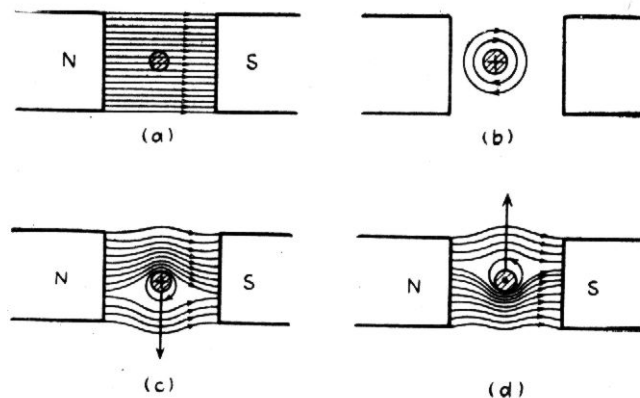
Es evidente que la saturación del hierro es la que impide que crezca indefinidamente la excitación.

EL MOTOR

Hemos visto que un generador es una máquina que convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

De una manera análoga, el motor es una máquina destinada a convertir le energía eléctrica en energía mecánica. La misma máquina no obstante, puede servir indistintamente como motor y como generador.

Principio del motor eléctrico



— Fuerzas que actúan sobre un conductor por el que circula una corriente sometido a la acción de un campo magnético.

La figura (a) representa un campo magnético de intensidad uniforme, en el cual está colocado un conductor rectilíneo y normal a la dirección del campo y al plano del papel, que no transporta corriente alguna. En (b) se supone que el conductor transporta una corriente que tiene la dirección del observador hacia el papel, pero se ha suprimido el campo debido a los dos polos S y N. El conductor queda entonces rodeado de un campo magnético cilíndrico, debido a la corriente que por aquel circula. La dirección de este campo, que puede determinarse por la regla del sacacorchos, es la de las agujas del reloj. En la figura (c) se representa el campo resultante, obtenido combinando el campo principal y el que produce la corriente en el conductor.

El campo debido a la corriente que circula por el conductor se suma al campo principal que queda por encima del conductor y se opone al campo que queda por debajo. Como resultado de ello se produce una concentración del campo en la región situada inmediatamente por encima del conductor y una disminución de la densidad del flujo en la región situada inmediatamente por debajo de él.

Puede verse que en este caso actuará una fuerza sobre el conductor, que lo empujará hacia abajo, como queda indicado por la flecha.

Es conveniente suponer que este fenómeno se debe a la concentración de las líneas de fuerza a uno de los lados del conductor. Las líneas magnéticas de fuerza pueden considerarse como si fueran cintas elásticas en tensión. Estas líneas están siempre tratando de contraerse para adquirir una longitud mínima. La tensión de estas líneas sobre la parte superior del conductor tiende a empujarlo hacia abajo, como se indica en la figura.

Si se invierte la corriente del conductor, la concentración de líneas tiene lugar por debajo del conductor, con tendencia a empujarlo hacia arriba, como se indica en la parte d de la figura.

El funcionamiento de un motor eléctrico depende del principio que se explica en la figura anterior. Todo conductor por el que circula una corriente y está situado en un campo magnético tiende a trasladarse en dirección normal a la del campo.

Fuerzas que se desarrollan sobre un conductor por el que circula una corriente

La fuerza que actúa sobre un conductor por el que circula una corriente cuando está sometido a la acción de un campo magnético es directamente proporcional a las tres magnitudes: intensidad del campo, intensidad de la corriente y longitud del conductor que queda dentro del campo. La fuerza en dinas viene dada por la expresión $F = BI \frac{l}{10}$ dinas; o si se expresa

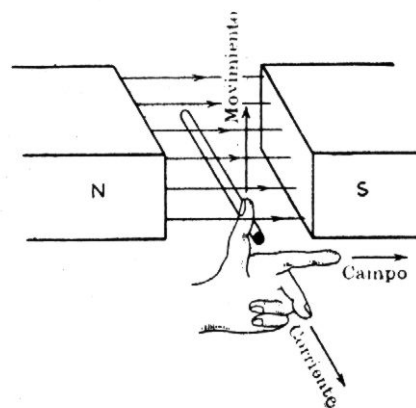
en el sistema mks $F=BIl$ newton.

En las dos fórmulas anteriores, B, l e I deben ser perpendiculares entre sí. Si el ángulo que forman dos cualesquiera de estas cantidades es distinto de 90°, las fórmulas deben multiplicarse por el seno del ángulo formado.

Regla de la mano izquierda de Fleming

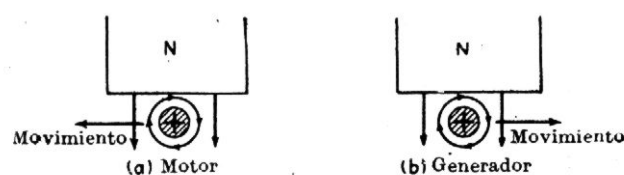
La relación entre la dirección del campo magnético, la dirección del movimiento del conductor y la dirección de la f.e.m. inducida en el conductor viene determinada por la regla de la mano derecha.

De una manera parecida, la relación entre la dirección de un campo magnético, la relación de una corriente que circule sometida a la acción de éste y la dirección del movimiento que se produce en el conductor por el que pasa la corriente, puede determinarse por medio de la regla de la mano izquierda.



— Regla de la mano izquierda, de Fleming.

Otro método conveniente para determinar esta relación es hacer uso del hecho que la concentración de las líneas de fuerza detrás del conductor tiende a empujarlo en sentido contrario. Es necesario simplemente trazar el campo principal y las líneas que rodean el conductor, como en la parte (a) de la figura siguiente.



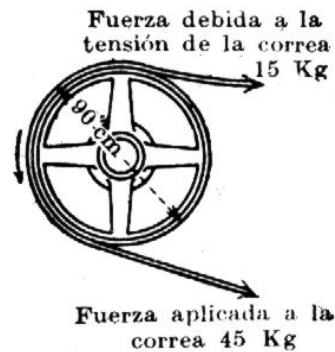
— Acciones en un motor y en un generador.

Es evidente que las líneas se concentran a la derecha del conductor, de modo que tenderán a moverlo hacia la izquierda.

En la figura (b) se representa el caso análogo para el generador, en el cual el conductor se mueve hacia la derecha. Por consiguiente, en un generador, los conductores deben moverse en dirección contraria a la que tiende a oponerse a este movimiento, lo que hace necesaria una fuerza mecánica exterior para moverlos, que suministra el motor al cual está acoplado el generador.

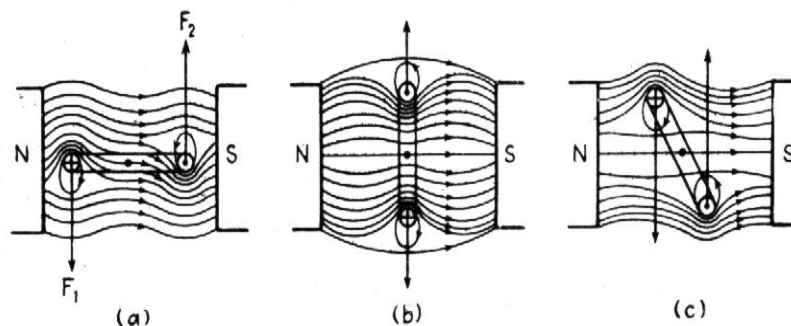
Par

Cuando una rueda, un volante u otro mecanismo cualquiera gira alrededor de un eje situado en su centro, es necesaria una fuerza tangencial para producir y mantener la rotación. Esta fuerza puede desarrollarla la propia máquina, como en los motores y máquinas de vapor o puede aplicarse mediante una polea, un árbol o una transmisión de engranajes.



Par que desarrolla una correa

Par desarrollado por un motor



— Par desarrollado para distintas posiciones de una bobina.

La figura (a) representa una bobina rectangular de una sola espira, cuyo plano es paralelo a la dirección del campo magnético. La corriente circula en dirección del lector hacia el papel en el conductor izquierdo y en el sentido opuesto en el conductor derecho de la espira; por lo tanto, sobre el conductor de la izquierda actúa una fuerza F_1 que tiende a moverlo hacia abajo y en el de la derecha otra F_2 que tiende a moverlo hacia arriba. Como la intensidad de la corriente en los conductores es la misma y los dos están sometidos a la acción de un campo de igual intensidad, será $F_1=F_2$. Estas dos fuerzas producen un momento que tiende a hacer girar la espira en sentido contrario a las agujas del reloj. En la figura (a), la espira está en la posición para la cual el par es máximo, porque el brazo es máximo.

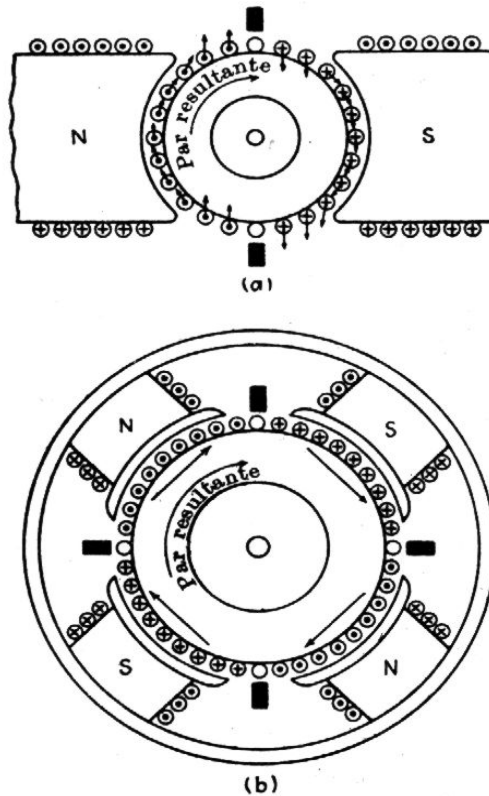
Cuando la espira alcanza la posición (b), ni un conductor ni el otro pueden moverse sin que la espira se deforme. Es una posición de par nulo, porque es nula la distancia del eje de rotación de la espira a la línea de acción de las fuerzas.

Si, no obstante, se invierte la dirección de la corriente en la espira cuando ésta llega a la posición (b) y se puede hacer que rebese el punto muerto, como en (c), se desarrolla un par que tiende a continuar la rotación en el sentido contrario a las agujas del reloj.

Para desarrollar un par que actúe continuamente en una dirección, la dirección de la corriente en la espira del inducido debe cambiar al pasar por el plano en que el par es nulo. Se requiere pues, un colector que haga la conmutación. El caso es análogo a la necesidad de emplear un colector en los generadores, con el fin de que la corriente suministrada al circuito exterior lleve siempre la misma dirección.

Un motor de una sola bobina, como el que se representa en la figura anterior, resultaría poco práctico, porque al tener puntos muertos el par desarrollado sería intermitente. Un inducido con dos bobinas eliminaría los puntos muertos, pero el par desarrollado continuaría siendo más o menos pulsatorio.

Los mejores resultados se obtienen cuando se aumenta el número de bobinas, como en los inducidos de los generadores.



— Par desarrollado por los grupos de conductores del inducido de un motor.

Prácticamente no hay diferencia entre la manera de construir el inducido de un motor o de un generador. En la figura (a) se representan el inducido y los polos inductores de un motor bipolar y el par desarrollado por cada conductor individual. La figura (b) representa los mismos elementos para un motor de cuatro polos. La dirección del par desarrollado por cada grupo de conductores se indica con una flecha para cada grupo.

En inducidos de este tipo, sólo está sometido a conmutación en un instante cualquiera un número muy reducido del total de bobinas. Por lo tanto, la variación del número de conductores activos es tan pequeña que prácticamente el par que se desarrolla se mantiene constante para valores constantes de la intensidad de la corriente en el inducido y en el flujo principal.

Según las fórmulas anteriores, el par desarrollado por un inducido es $T = K_t' Z I_a \phi$ siendo,

K_t' = una constante que depende del número de polos; de los circuitos de paso de la corriente, en paralelo, a través del inducido; de las unidades elegidas, etc.

Z = número de conductores en la superficie del inducido

I_a = corriente en el inducido, en amperios

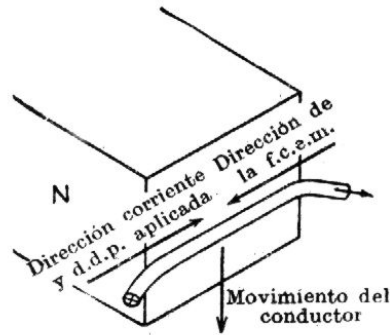
ϕ = flujo que entra en el inducido desde un polo N

Fuerza contraelectromotriz

La resistencia del inducido de un motor de tipo corriente de 10 caballos a 110 voltios es de unos 0,05 ohmios. Si este inducido se conectara directamente a una línea de suministro a 110 voltios, la corriente (Ohm) sería $I = 110/0,05 = 2200A$.

Este valor no sólo es excesivo, sino también ilógico, especialmente si se considera que la corriente de régimen de este motor se aproxima a los 90A. Cuando un motor está en marcha, la intensidad de la corriente que circula por el inducido no viene, evidentemente, determinada sólo por su resistencia óhmica.

El inducido del motor, es en muchos aspectos, muy semejante al de un generador. Los conductores situados en su superficie, además de conducir una corriente y desarrollar así un par motor, cortan un flujo. Por lo tanto, es forzoso que induzcan una f.e.m..



— Relación entre la dirección de la corriente y las f.e.m., en el conductor de un motor.

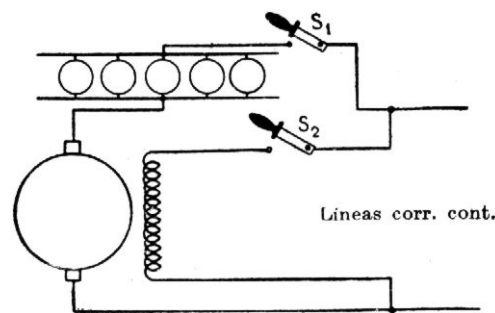
La figura representa un conductor del inducido de un motor, moviéndose hacia abajo frente a un polo N. Para que el movimiento sea de descenso es necesario que la dirección de la corriente en el conductor sea de izquierda a derecha.

Si se aplica la regla de la mano derecha, para determinar la dirección de la f.e.m. inducida en este conductor por su movimiento descendente, se encontrará que actúa de derecha a izquierda, o sea, oponiéndose a la corriente.

Si se determina la f.e.m. inducida en cualquier conductor del inducido de un motor, se hallará que actúa siempre en sentido opuesto al de la corriente. Es decir que se opone a que la corriente entre en el inducido. Esta f.e.m. inducida recibe el nombre de fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.). Como se opone a la corriente, se debe oponer también a la tensión de la línea. Por lo tanto la f.e.m. neta que actúa en el circuito del inducido es la diferencia entre la tensión de línea (V) y la f.c.e.m. (E). Si R_a es la resistencia del inducido, aplicando ohm se obtiene $E = V - I_a R_a$; fórmula que puede compararse a la del generador.

En un generador, la f.e.m. inducida es igual a la tensión entre terminales más la caída de tensión del inducido. En un motor, la f.e.m. inducida es igual a la tensión entre terminales menos la caída de tensión debida a la resistencia del inducido. La f.c.e.m. debe ser siempre menor que la tensión aplicada si circula corriente hacia el inducido, por el terminal positivo.

Un experimento interesante para demostrar la existencia de la fuerza contraelectromotriz se representa en la figura siguiente. Un grupo de lámparas se empalma en serie con el inducido de un motor shunt. Se cierra primero el interruptor S_2 , que cierra el circuito inductor. Después se cierra el S_1 . En el instante de cerrar S_1 las lámparas brillarán con intensidad, e incluso con luz superior a la normal. A medida que la velocidad del inducido aumenta, la iluminación dada por las lámparas es más débil, lo que demuestra que en el inducido se engendra una fuerza contraelectromotriz que se opone a la tensión de la línea dando origen a menor tensión en las lámparas.



— Demostración de la existencia de la fuerza contraelectromotriz.

Cuando el inducido alcanza su máxima velocidad, la luz de las lámparas es más débil. Si por el contrario, se abre el interruptor S_2 , el flujo y también la f.c.e.m. se reducen prácticamente a cero, lo que se atestigua porque las lámparas adquieren de nuevo su brillo completo. (en la práctica cuando un motor está en marcha, no debe abrirse el circuito inductor cualesquiera sean las condiciones que se produzcan).

Aplicando la fórmula de generadores, la f.c.e.m. vale: $E = \frac{\phi SPZ}{60 P' 10^8}$ voltios, siendo ϕ el flujo total que penetra en el

inducido desde un polo N, S la velocidad del inducido en r.p.m., P el número de polos, Z el número de conductores dispuesto en la superficie del inducido y P' el número de circuitos en paralelo de paso de la corriente a través del inducido.

Como Z, P y P' son constantes para un motor determinado, la f.c.e.m. será $E = K_1 \phi S$ idéntica a la correspondiente a generadores sustituyendo K por K_1 .

Despejando la velocidad y haciendo $K=1/K_1$, se obtiene $S=KE/\phi$. Reemplazando el valor de E por el de la ecuación de arriba se tiene $S = K \frac{V - I_a R_a}{\phi}$ relación muy importante que define la ley de variación de la velocidad de un motor cuya carga varía.

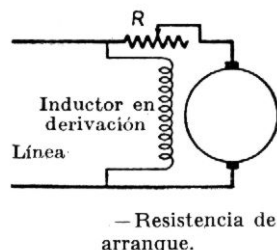
Resumen de la utilización de motores

Shunt	Compound diferencial	Compound acumulativo	Serie
Características			
Velocidad casi constante	Velocidad constante	Velocidad variable	Velocidad variable
Velocidad regulable . . .		Regulación de la velocidad	Regulación de la velocidad
Por medio de arranque . (hasta el 150 % del nominal)	Bajo par de arranque	Gran par de arranque	Par de arranque muy elevado
Aplicaciones			
Árboles de transmisión a velocidad constante		(Demandas intermitentes de gran par motor)	Tracción Locomotoras eléctricas
Máquinas herramienta			Locomotoras Diesel-eléctricas
Ventiladores		Cizallas	Líneas de servicio rápido
Bombas centrífugas		Punzonadoras	Trolebuses y autobuses
Bombas de émbolo		Prensas	Grúas
Trabajo de la madera		Aparatos de elevación	Montacargas
Máquinas para papel		Transportadores	Transportadores
Máquinas de impresión		Alimentadores de hogares	
		Laminadores	

Dispositivos de arranque de motores: reóstato de tres bornes

Se ha indicado que si un motor de 10HP a 110 voltios se conecta directamente a una línea de alimentación a 110 voltios, la corriente demandada es $110/0,05 = 2200A$, valor inadmisibles en la práctica industrial. Por consiguiente, debe intercalarse durante el arranque una resistencia en serie con el inducido del motor. Esta resistencia puede disminuirse progresivamente a medida que la velocidad del inducido aumenta y desarrolla una f.c.e.m..

La figura siguiente muestra la manera de emplear una sencilla resistencia R para el arranque de un motor shunt. Debe notarse que esta resistencia está en el circuito del inducido y que no afecta al inductor, conectado directamente a la línea.



Si el inductor estuviese directamente conectado a los terminales del inducido, de modo que la resistencia estuviera en serie con todo el motor, la tensión sería baja o nula en el inductor para el arranque, produciendo un par débil que haría difícil el arranque.

En la figura siguiente se muestra un reóstato de arranque de tres bornes, que no difiere de un modo esencial con el del esquema arriba citado.