



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**



**DISEÑO, PUESTA EN MARCHA, CONTROL Y
MANTENIMIENTO DE MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA**

**PRINCIPIOS DE OPERACION DE UN MOTOR DE
CORRIENTE CONTINUA**

TRABAJO DE SEMINARIO

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :

GUSTAVO LEON DE LOS SANTOS

ASESOR DE TESIS:

ING. SABAS FLORES ASCENCIO

CUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MEXICO.

1996.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
PRESENTE.



AT'N: ING. RAFAEL RODRIGUEZ CEBALLOS
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES-C.

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautitlán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Diseño, Puesta en Marcha, Control y Mantenimiento de Motores de Corriente Directa;
Principios de Operación de un Motor de Corriente Continua.

que presenta el pasante: Gustavo León de los Santos

con número de cuenta: 8314352-4 para obtener el Título de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

ATENTAMENTE.
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, a 27 de marzo de 19 96

MODULO:	PROFESOR:	FIRMA:
<u>1</u>	<u>Ing. Esteban Corona Escamilla</u>	
<u>3</u>	<u>Ing. Sabás Flores Ascencio</u>	
<u>4</u>	<u>Ing. Victor Hugo Landa Orozco</u>	

DEP/VORSEN

A MIS PADRES:

CON
OLGA Y GUSTAVO. CON CARINO Y AGRADECIMIENTO POR
EL EJEMPLO Y APOYO QUE ME HAS BRINDADO. YA QUE
GRACIAS A ELLOS HE REALIZADO LO QUE NUNCA
IMAGINE LLEGAR A ALCANZAR

Contenido

Capítulo 1

Comentarios	Página
Introducción.....	9
Antecedentes.....	11
Funcionamiento.....	11
Importancia de los Motores de Corriente Continua.....	12

Capítulo 2

Principios del Funcionamiento y Operación del Motor de Corriente Continua

Principios de un Motor de Corriente Continua.....	13
Descubrimiento de Faraday.....	15
Ley de Faraday.....	16
Regla de Fleming de la Mano Derecha.....	18
Ley de Lenz.....	19
Regla del Pulgar de la Mano Derecha.....	20
Generador de Corriente Continua.....	21

Capítulo 3

Analogías y Diferencias entre el Generador y el Motor de Corriente

Continua

Voltaje Contraelectromotriz.....	22
Regla de la Mano Derecha para Generador.....	25
Regla de la Mano Izquierda para Motor.....	26
Circuito Generador.....	27
Circuito Motor.....	28

Capítulo 4

Principales Partes de un Motor de Corriente Continua

Partes Principales de un Motor.....	29
- Rotor.	
- Araña.	
- Núcleo del Rotor.	
- Devanado del Rotor.	
- Colector.	
- Delgas.	
- Escobillas.	
- Portaescobillas.	
- Carcaza.	
- Polos de Excitación.	
- Devanado de Excitación.	
- Interpolos.	

Capítulo 5

Deducción de la Ecuación de la Velocidad y del Par

Deducción de la Fórmula de la Ecuación de la Velocidad.....	34
Deducción de la Fórmula de la Ecuación del Par.....	36

Capítulo 6

Tipos de Motores de Corriente Continua

El Motor Tipo Paralelo.....	38
El Motor Tipo Serie.....	41
El Motor Tipo Compuesto.....	44

Capítulo 7

Control de la Velocidad en los Motores de Corriente Continua

Control de la Velocidad en Motores de Corriente Continua.....	46
Control de la Velocidad en Motores de Corriente Continua por Resistencia en el Circuito del Rotor.....	48
Observación.....	51
 Bibliografía.....	 55

Prólogo

El presente trabajo fué desarrollado con el fin de poder facilitar la comprensión de los principios de operación del motor de corriente continua; éstos están explicados detalladamente mediante esquemas sencillos que tratan de ilustrar los Principios y Leyes que nos llevan a la deducción de los circuitos eléctricos del generador y motor de corriente continua así como a sus respectivas ecuaciones de la velocidad y del par.

Capítulo 1

Comentarios

INTRODUCCIÓN

El motor de corriente continua es una máquina de polos salientes que se encuentran en el estator, en ellos se colocarán diversas bobinas de estator que pueden ser conectadas de diferentes maneras a un suministro de corriente continua. Estos polos producen un campo magnético principal fijo y constante. El rotor es la parte móvil de la máquina, en éste se alojan bobinas distribuidas en ranuras que se conectan a las delgas del conmutador.

Las corrientes en las bobinas del rotor son alternas y son rectificadas por la combinación conmutador-escobillas que además controlan la distribución de corriente y produce un campo magnético que es constante en el espacio y en el tiempo, con el campo principal. Para que la máquina funcione como motor la corriente del rotor debe ser suministrada desde una fuente externa.

La interacción entre el campo del estator y el campo del rotor produce el par motor, que hace girar la flecha y convierte la energía eléctrica en energía mecánica.

Los tipos normales de motores de corriente continua son los llamados comunmente en paralelo, en serie y compuesto.

El motor en serie tiene un circuito de campo conectado en serie con el rotor, de tal manera que la corriente del rotor pasa a través de las bobinas de estator.

El motor en paralelo ha sido llamado de esta manera porque los devanados del estator están diseñados para ser conectados en paralelo (shunt o derivación) con el rotor, de tal manera que el voltaje a través del rotor es también el voltaje a través del circuito del estator.

El motor compuesto tiene dos juegos de bobinas en el estator, una diseñada para conexión en paralelo y la otra para conexión en serie. Con un diseño y conexiones convenientes este " compuesto " puede proporcionar algunas características deseables que no poseen los motores en paralelo o serie.

La gran mayoría de los motores se usan en aplicaciones en que la característica importante es el funcionamiento de estado permanente. Para los motores las dos características más importantes del funcionamiento de estado permanente son la capacidad de producir el par necesario y la capacidad de mantener (o variar) la velocidad cuando la carga varía.

ANTECEDENTES

Las primeras fuentes artificiales de corriente eléctrica fueron las baterías, y por tanto, las primeras máquinas electromagnéticas que se desarrollaron fueron las máquinas de corriente continua.

Thomas A. Edison estableció la primera planta de control de energía eléctrica para el suministro de una parte de la ciudad de Nueva York empleando generadores de corriente continua.

FUNCIONAMIENTO

El principio del funcionamiento del motor de corriente continua está basado en la primera Ley del Magnetismo, que expresa que polos iguales se repelen y polos opuestos se atraen. La corriente que circula por las bobinas del Estator (Inductor o Campo) produce la polaridad magnética de éste, mientras que la que circula por el devanado del Rotor (Inducido o Armadura) origina polos magnéticos a la mitad, entre los polos del estator. La atracción y repulsión de los mismos produce la rotación.

IMPORTANCIA DE LOS MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA.

Actualmente, los motores de corriente continua representan del 25 al 30 % de las ventas y la construcción de motores eléctricos.

En primer lugar, la mayoría de los vehículos usan baterías de plomo-ácido para almacenar la energía eléctrica. Los motores de arranque y los que accionan limpiadores de parabrisas, ventiladores y otros accesorios en los vehículos, son motores de corriente continua

En segundo lugar, en las aplicaciones que requieren un control preciso de la velocidad, del par o de ambos, el motor de corriente continua es insuperable.

A pesar de su costo, relativamente alto, y de sus exigencias de mantenimiento, los motores de corriente continua se eligen casi universalmente para mover las máquinas excavadoras de gran potencia, los talleres de laminación de acero y de aluminio, elevadores eléctricos, tren ligero, locomotoras, trolebús, vagones del metro, hiladoras, grandes equipos para movimiento de tierra y en aplicaciones en las que se requieran las características de control preciso propias de los motores de corriente continua

Capítulo 2

Principios del Funcionamiento y Operación del Motor de Corriente Continua

PRINCIPIOS DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

Los motores eléctricos son máquinas que convierten energía eléctrica en mecánica. La atracción y repulsión de los polos magnéticos producidos por las corrientes del estator y rotor causan la rotación de este último. Tales fuerzas dan lugar a un efecto llamado par o momento de rotación.

Regla de la mano izquierda, de Fleming para motores. Coloquense el pulgar, el índice y el cordial perpendiculares entre sí. Poniendo el índice en la dirección y sentido del flujo magnético; el cordial en la dirección y sentido de la corriente de inducido, el pulgar indicará el sentido de rotación.

Tal sentido puede invertirse en todo motor de corriente continua intercambiando las conexiones del devanado del rotor o del estator (pero no de ambos). Es práctica normal cambiar las conexiones del rotor para invertir la rotación de un motor.

La magnitud del par desarrollado por un motor es proporcional a la intensidad magnética de los polos del rotor y del estator.

Si aumenta la intensidad de la corriente del rotor o del estator, aumentará también el par del motor.

En los conductores del rotor que atraviesan el flujo magnético se genera un voltaje opuesto a la tensión aplicada, que recibe el nombre de fuerza contraelectromotriz ($F_{c.e.m.}$) y actúa como regulador de la corriente del motor de corriente continua. Para efectos de esta tesis, a la fuerza contraelectromotriz la llamaremos " voltaje contraelectromotriz " (V_c). Una vez que éste alcanza la velocidad normal, la corriente del rotor quedará regulada por el V_c generado en el devanado. Su valor es siempre proporcional a la carga mecánica del motor.

La tensión aplicada es el voltaje de línea (V_s). La tensión efectiva es la utilizada para hacer pasar corriente por la resistencia del devanado del rotor. Su valor se determina multiplicando la resistencia por la intensidad de la corriente. Para hallar el valor de la resistencia midase la caída de potencial en el rotor y la intensidad, luego empleese la Ley de Ohm:

$$R_{rot} = \frac{V_s}{I_{rot}} \text{ (ohms)} \quad \text{Ec. 2.1}$$

R_{rot} Resistencia del rotor (ohms).

V_s Voltaje aplicado (volts).

I_{rot} Corriente del rotor (amperes).

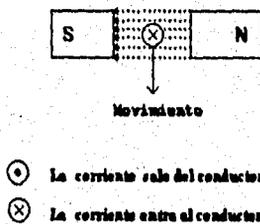
La velocidad (r.p.m.) de un motor de corriente continua puede ser variada en un intervalo amplio. La velocidad tangencial máxima de seguridad para un motor de corriente continua promedio es de 1,800 r.p.m./min. (6000 pie/min). Pueden diseñarse motores para que funcionen con seguridad a 4,500 r.p.m./min. (1,5000 pie/min) de velocidad periférica ó tangencial (velocidad en su superficie exterior).

DESCUBRIMIENTO DE FARADAY

Faraday descubrió que con el movimiento relativo de un conductor eléctrico entre un campo magnético se generaba un voltaje en el conductor.

Fig. 2.1

Descubrimiento de Faraday



$$V_{\text{gen}^{\text{ind-med.}}} = \frac{\Phi}{t} * 10^{-8} \text{ (volts)}$$

Ec. 2.2

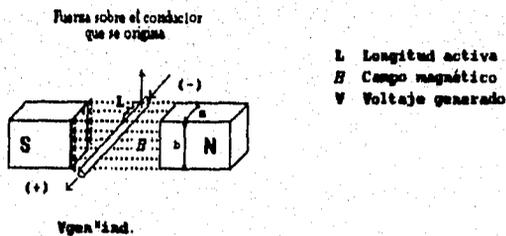
$V_{gen}^{ind-med.}$	Voltaje medio generado en una sola espira (voltios).
\emptyset	Número de líneas de fuerza magnética concatenadas con la espira.
t	Tiempo en segundos que concatena una espira dentro de un campo magnético.
10^{-9}	Número de líneas que una sola espira debe concatenar cada segundo a fin de producir una tensión de un voltio.

LEY DE FARADAY

El valor del voltaje generado por inducción en una sola espira de conductor es proporcional a la velocidad de variación de las líneas de fuerza que la atraviesan (ó concatenan con ella).

Fig. 2.2

Ley de Faraday



$$A = a * b \text{ (cm}^2\text{)} \quad \text{Ec. 2.3}$$

$$\emptyset = B * A \text{ (líneas)} \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$V_{\text{gen}^{\text{ind-med}}} = \frac{\emptyset}{t} * 10^{-8} \text{ (volts)} \quad \text{Ec. 2.5}$$

$V_{\text{gen}^{\text{ind-med}}}$ Voltaje medio generado en una sola espira (voltios).

\emptyset Número de líneas de fuerza magnética concatenadas con la espira.

t Tiempo en segundos que son concatenadas ϕ líneas.

10^{-8} Número de líneas que una sola espira debe concatenar cada segundo a fin de producir una tensión de un voltio.

En las máquinas rotatorias, la variación de concatenación de flujo, es más conveniente expresarla en relación con la densidad de flujo medio (supuesta constante).

$$V_{\text{gen}^{\text{ind-inst}}} = B / v * l * 10^{-8} \text{ (volts)} \quad \text{Ec. 2.6}$$

$V_{\text{gen}^{\text{ind-inst}}}$ Voltaje generado por inducción instantáneo (volts).

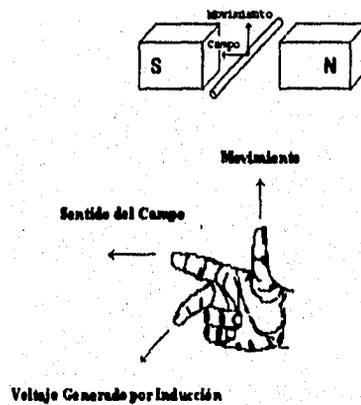
B Densidad de flujo en gauss (líneas / cm²).

v Velocidad relativa entre el conductor y el campo (cm / seg).

l Longitud de la parte activa del conductor que concatena el flujo (cm).

Fig. 2.3

Regla de Fleming de la Mano Derecha



" Sentido del Voltaje Inducido "

(corriente convencional)

Una observación que debe remarcarse de la Ley de Faraday es que el movimiento de un conductor en un campo magnético es el resultado de una fuerza mecánica (trabajo) aplicada al conductor.

La energía eléctrica producida por inducción electromagnética exige, por consiguiente, un consumo de energía mecánica de acuerdo con el principio de conservación de la energía.

LEY DE LENZ

En todos los casos de inducción electromagnética, el voltaje generado por inducción tenderá a hacer circular en un circuito cerrado una corriente en un sentido tal que su efecto magnético se oponga a la variación que lo ha generado.

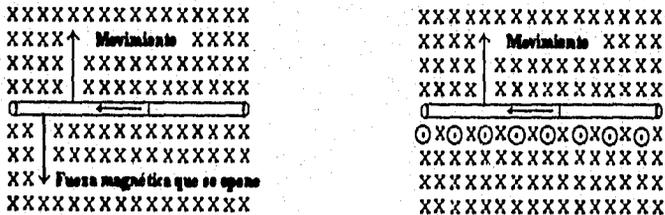
El principio de la " conservación de la energía " se cumple para todas las corrientes inducidas de la Ley de Lenz.

" Siempre que se induce un voltaje generado por inducción ($f_{e.m.}$), la corriente inducida debe tener un sentido tal que se opone al cambio por el cual se induce la corriente ".

Ley de Lenz. La corriente inducida debe tener una dirección tal que produzca una fuerza magnética que se oponga a la fuerza que causa el movimiento.

Fig 2.4

Ley de Lenz



X Campo magnético estacionario

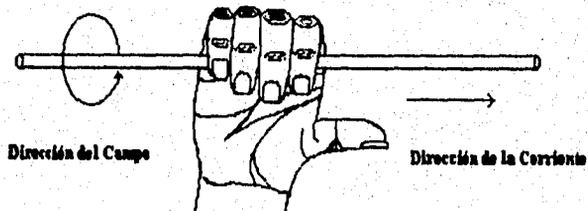
⊙ Campo magnético inducido

REGLA DEL PULGAR DE LA MANO DERECHA.

Si el alambre se toma con la mano derecha de tal modo que el pulgar apunte en la dirección de la corriente convencional, los demás dedos que sujetan al conductor indicarán la dirección del campo magnético.

Fig. 2.5

Regla del Pulgar de la Mano Derecha

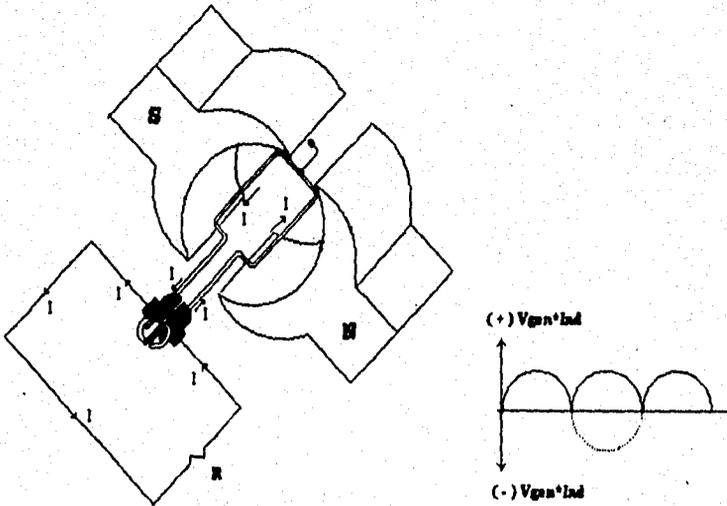


GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA

Un colector invierte las conexiones de las delgas dos veces por revolución y da como resultado que la corriente sea pulsante; " Pero en ningún momento invierte la dirección ". En la práctica se diseñan con muchas bobinas en diferentes planos de manera que $V_{gen^{ind}}$ sea mayor y aproximadamente constante.

Fig. 2.6

Rectificación Mediante un Colector de Anillos Rozantes Generador de C.C.



Capítulo 3

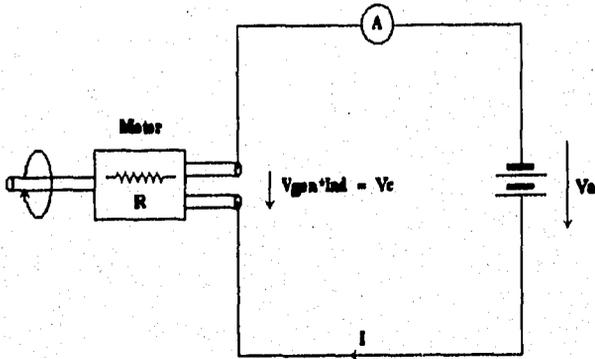
Analogías y Diferencias entre el Generador y el Motor de Corriente Continua

VOLTAJE CONTRAELECTROMOTRIZ

ANTECEDENTES

En un motor eléctrico un momento de torsión magnética hace que en una espira por la que circula corriente, gire en un campo magnético constante. Una bobina girando dentro de un campo magnético inducirá un voltaje generado por inducción ($f_{e.m.}$) que se opone a la causa que lo origina. Lo anterior es cierto aún en el caso de que ya exista una corriente en la espira. " Por consiguiente cualquier motor también es un generador ". Que conforme a la Ley de Lenz, el voltaje generado por inducción ($f_{e.m.}$) se debe oponer a la corriente que se suministra al motor; por esta razón, al voltaje generado por inducción ($f_{e.m.}$) en un motor se llama Voltaje Contraelectromotriz (V_c).

Fig. 3.1



El efecto del voltaje contraelectromotriz es reducir el voltaje neto que se suministra a las bobinas del rotor del motor.

$$V_n = V_a - V_c \quad (\text{volts}) \quad \text{Ec. 3.1}$$

De la Ley de Ohm, el voltaje neto a través de las bobinas del rotor es igual al producto de la resistencia R_r de las bobinas por la corriente I_r .

$$I_r R_r = V_n - V_c \quad (\text{volts}) \quad \text{Ec. 3.2}$$

- I_r Corriente del rotor (amperes).
- R_r Resistencia del rotor (ohms).
- V_a Voltaje aplicado (volts).
- V_c Voltaje contraelectromotriz (volts).
- V_n Voltaje neto (volts).

Esta ecuación expresa que la corriente que circula a través de un circuito que contiene un motor está determinada por la magnitud del voltaje contraelectromotriz (V_c). La magnitud de éste, depende de la velocidad de rotación del rotor.

Cuando el rotor gira libremente se registra una corriente baja. Si se frena el movimiento del motor, sosteniendo estacionario el rotor, el voltaje contraelectromotriz (V_c) decaerá a cero. Por lo que el incremento en el voltaje neto da como resultado una corriente mayor en el circuito y puede ocasionar que el motor se sobrecaliente e incluso se quemé. Como se puede observar en los amperímetros de la siguiente figura:

Fig. 3.2

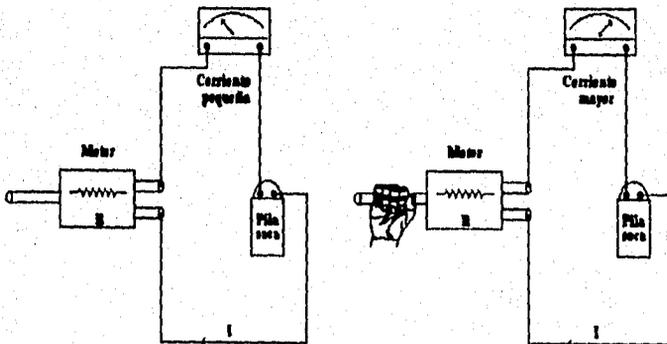
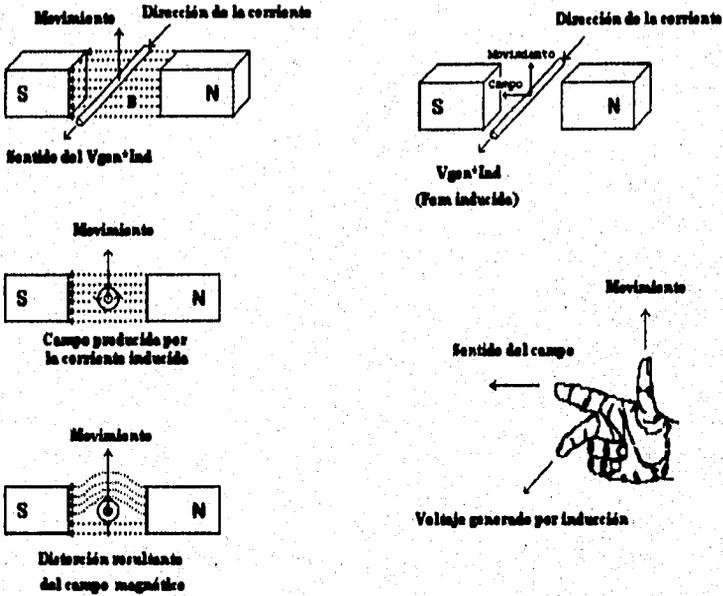


Fig. 3.3

Regla de la Mano Derecha para Generador



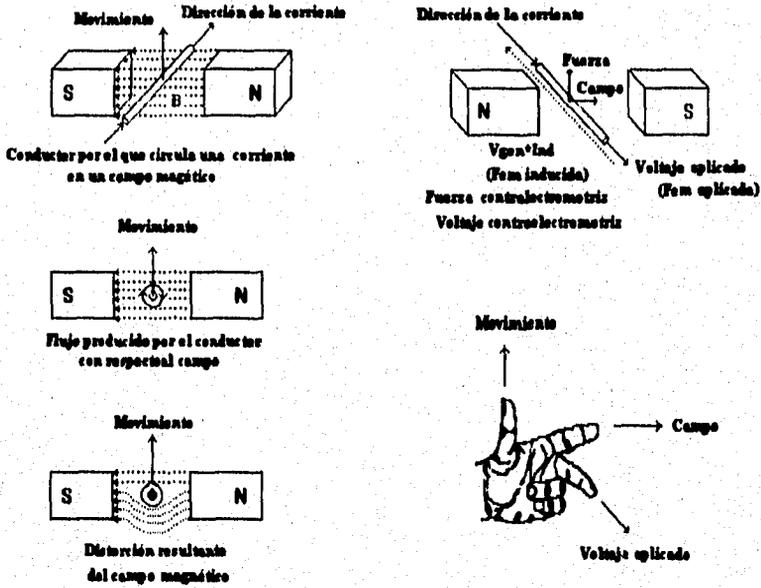
El dedo Índice indicará la dirección del campo.

El dedo Medio indicará la dirección de la corriente.

El dedo Pulgar apuntará en la dirección en la que el conductor tratará de moverse.

Fig. 3.4

Regla de la Mano Izquierda para Motor



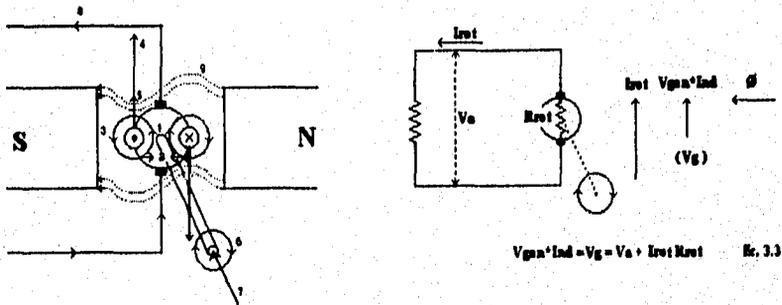
El dedo Índice indicará la dirección del campo.

El dedo Medio indicará la dirección de la corriente.

El dedo Pulgar apuntará en la dirección en la que el conductor tratará de moverse.

Fig. 3.5

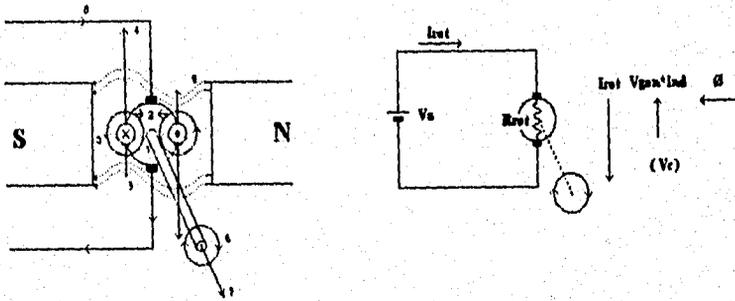
Circuito Generador



1. Se suman las direcciones de los campos magnéticos de la bobina.
2. Se restan las direcciones de los campos magnéticos de la bobina.
3. Dirección del flujo magnético generado por el conductor de la bobina.
4. Dirección del movimiento generado por la dirección del conductor de la bobina.
5. Dirección del movimiento del V_{gen}^{ind} de la espira.
6. Dirección del par inducido por la corriente generada.
7. Dirección de la corriente en el inducido.
8. Dirección de la corriente del circuito.
9. Dirección del flujo magnético o del campo.

Fig. 3.6

Circuito Motor



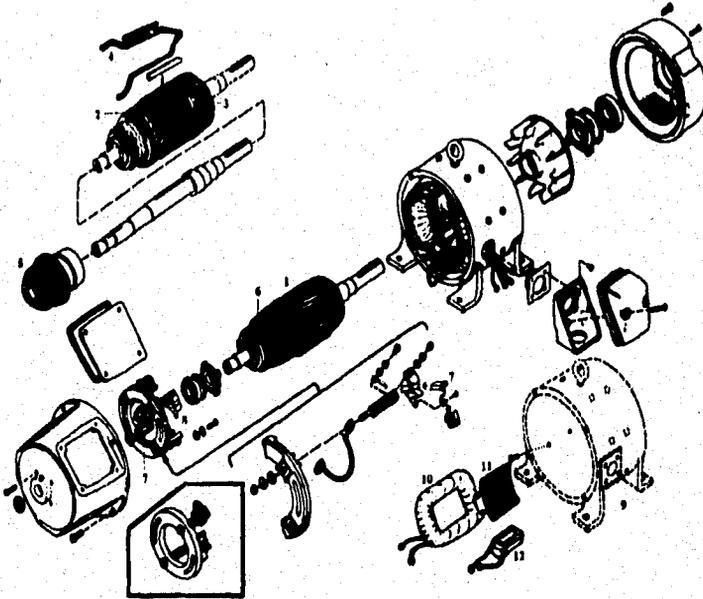
$$V_{g^{ind}} = V_c = V_a - (I_{rot} R_{rot}) \quad \text{Eq. 3.4}$$

1. Se suman las direcciones de los campos magnéticos de la bobina.
2. Se restan las direcciones de los campos magnéticos de la bobina.
3. Dirección del flujo magnético generado por el conductor de la bobina.
4. Dirección del movimiento generado por la dirección del conductor de la bobina.
5. Dirección del movimiento del $V_{gen^{ind}}$ de la espira.
6. Dirección del par inducido por la corriente generada.
7. Dirección de la corriente en el inducido.
8. Dirección de la corriente del circuito.
9. Dirección del flujo magnético o del campo.

Capítulo 4

Principales Partes de un Motor de Corriente Continua

Fig. 4.1



Vista por separado de las partes de un motor de corriente continua en tamaño hasta de 200 H.P.

Las principales partes electromecánicas son:

- 1.- Rotor;
- 2.- Araña;
- 3.- Núcleo del rotor;
- 4.- Devanado del rotor;
- 5.- Colector;
- 6.- Delgas;
- 7.- Escobillas;
- 8.- Portaescobillas;
- 9.- Carcaza;
- 10.- Devanado de excitación;
- 11.- Polos de excitación;
- 12.- Polos auxiliares.

ROTOR

El rotor, armadura o inducido está constituido por el núcleo, el colector y el devanado del rotor. Los cuales están unidos mecánicamente.

Proporciona rotación al eje del rotor al cortar las líneas de fuerza que se producen en el estator, por medio de una gran cantidad de conductores en el momento de energizarse.

ARAÑA

Para máquinas grandes puede estar fabricada de acero fundido o acero rolado.

Es la estructura sobre la cual se montan y arman las laminaciones del rotor. Para máquinas grandes se diseñan con ductos axilares, para lograr buena ventilación en el interior del rotor y conservar un menor peso.

NÚCLEO DEL ROTOR

Se hacen de laminaciones de acero con un espesor que varía de 0.36 a 0.65 mm. Las laminaciones son troqueladas al tamaño deseado y después, recocidas y aisladas.

La construcción laminar se emplea para impedir la circulación de corrientes inducidas (corrientes parásitas) en el interior del núcleo, proporciona un camino magnético de baja reluctancia entre los polos así como bajas pérdidas por histéresis. El núcleo del rotor es también parte del circuito magnético del motor y está ranurado longitudinalmente en toda su superficie. En las ranuras se aloja el devanado del rotor.

DEVANADO DEL ROTOR

Es una serie de bobinas formadas en las ranuras mencionadas, cuyos extremos se conectan a los segmentos del conmutador. El número de espiras y el diámetro del conductor se determinan por la velocidad y voltaje de trabajo del motor.

Su función es establecer polos magnéticos en la superficie del mismo que reaccionen con los del estator.

COLECTOR

El colector o conmutador se hace de cobre duro estirado mediante segmentos (delgas) que se aíslan unas de otras con micas. El espesor del aislamiento de mica varía de 0.5 a 1.5 mm. y depende del diámetro del conmutador y el voltaje.

Es el encargado de proporcionar el voltaje consumido por el rotor a través de las escobillas.

DELGAS

Están hechas de cobre duro estirado y son las partes a las cuales se soldan las puntas de las bobinas que se encuentran colocadas en el rotor.

Cierran el circuito de la bobina, permitiendo la conmutación entre una y otra bobina.

ESCOBILLAS

Se hacen de cobre, grafito, carbón o una mezcla de estos materiales.

Realizan la conexión entre el circuito de línea y el devanado rotatorio del rotor.

PORTAESCOBILLAS

Son barras salientes ó brazos de latón de 12 a 25 mm. de diámetro que se montan sobre la carcasa.

Soporta y mantiene las escobillas en posición adecuada sobre el colector.

CARCAZA

La carcasa o yugo es el armazón donde se remachan los polos del estator, está hecho de acero fundido o laminado.

Sirve de soporte de todas las piezas del motor, a la vez que proporciona un camino de retorno para el flujo magnético creado por el bobinado de excitación.

DEVANADO DE EXCITACIÓN

Son bobinas de alambre de cobre, que en el caso de una excitación serie, son de pocas espiras pero de calibre mayor, en el caso de excitación en paralelo, son de muchas espiras pero de calibre menor.

Sirven para crear electroimanes cuyos amper-vueltas proporcionan una fuerza magnetomotriz adecuada para producir en el entrehierro el flujo que se precisa para generar un voltaje generado por inducción ($f_{e.m}$) ó voltaje electromotriz.

POLOS DE EXCITACIÓN.

Son contruidos de chapa de acero y unidos mediante pernos o soldados a la carcasa.

Su función es distribuir el flujo más uniformemente por eso las zapatas de los polos son curvas y más anchas que el núcleo de los polos. En estos se introduce el devanado de excitación.

POLOS AUXILIARES

Los polos auxiliares o interpolos son bobinas de alambre de cobre de unas pocas espiras de hilo de gran sección, ya que están conectados en serie con el circuito del rotor. Estos devanados se montan sobre la carcasa entre los polos principales.

Evitan el chisporroteo entre el colector y las escobillas.

Capítulo 5

Deducción de la Ecuación de la Velocidad y del Par

DEDUCCIÓN DE LA FÓRMULA DE LA ECUACIÓN DE LA VELOCIDAD

De las ecuaciones de la Ley de Faraday se tienen las siguientes relaciones:

$$A = a * b \quad (\text{m}^2) \quad \text{Ec. 2.3}$$

$$\varnothing = \theta * A \quad (\text{lneas}) \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$V_{\text{gen}^{\text{ind-med}}} = \frac{\varnothing}{t} * 10^{-8} \quad (\text{volts}) \quad \text{Ec. 2.5}$$

- $V_{\text{gen}^{\text{ind-med}}}$ Voltaje medio generado en una sola espira (voltios / espira).
- \varnothing Número de líneas de fuerza magnética concatenadas con la espira.
- t Tiempo en segundos que concatena una espira dentro de un campo magnético.
- 10^{-8} Número de líneas que una sola espira debe concatenar cada segundo a fin de producir una tensión de un voltio.

La ecuación anterior es para un cuarto de revolución, por lo que para una revolución completa se tendría:

$$V_{\text{gen}^{\text{ind-med}}} = 4 * v_{\text{rot}} * \varnothing * 10^{-8} \text{ (volts)} \quad \text{Ec. 5.1}$$

La ecuación anterior es para una máquina bipolar por lo que para tener una ecuación general se modificaría de la siguiente manera:

$$v = \frac{v_{\text{rot}}}{60} \text{ (r.p.m.)} \quad \text{Ec. 5.2}$$

$$N = \frac{Z}{2a} \quad \text{Ec. 5.3}$$

$$p = \frac{P}{2} \quad \text{Ec. 5.4}$$

- P** Número de polos.
- N** Número de espiras por bobina.
- Z** Número de conductores del rotor.
- a** Número de ramas de bobina en paralelo.
- v** Velocidad relativa del rotor (m / s.).
- v_{rot}** Velocidad del rotor (r.p.m.).

$$V_{\text{gen}^{\text{ind-med}}} = 4 * \varnothing * \left(\frac{P}{2}\right) * \left(\frac{Z}{2a}\right) * \left(\frac{v_{\text{rot}}}{60}\right) * (10^{-8}) \text{ (volts)} \quad \text{Ec. 5.5}$$

Y agrupando las constantes de la máquina se tendrá:

$$V_{\text{gen}^{\text{ind-med}}} = K_{\text{máq}} * \varnothing * v_{\text{rot}} \text{ (volts)} \quad \text{Ec. 5.6}$$

La ecuación anterior es para un generador. En el caso del motor el voltaje generado por inducción media se opondrá al voltaje que lo produce; por consiguiente se tendría la siguiente ecuación en base al voltaje contraelectromotriz.

$$V_c = K_{m\omega} \cdot \phi \cdot \omega_{rot} \quad (\text{volts}) \quad \text{Ec. 5.7}$$

Utilizando la ecuación del circuito motor (Ec. 3.4) más la caída de tensión en las escobillas:

$$V_c = V_a - (I_{rot} R_{rot} + 2\Delta V) \quad (\text{volts}) \quad \text{Ec. 5.8}$$

Sustituyendo V_c y despejando la velocidad del rotor de la Ec. 5.5 se obtiene:

$$\omega_{rot} = \frac{V_a - (I_{rot} R_{rot} + 2\Delta V)}{K_{m\omega} \cdot \phi} \quad (\text{r.p.m.}) \quad \text{Ec. 5.9}$$

Que es la ecuación fundamental de la velocidad para un motor de corriente continua.

DEDUCCIÓN DE LA FÓRMULA DE LA ECUACIÓN DEL PAR

Despejando el Par de la fórmula de la Potencia se obtiene:

$$\tau = \frac{P_{ot}}{\omega_{ang}} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad \text{Ec. 5.10}$$

τ Par desarrollado por un motor (Newton * metro).

P_{ot} Potencia del motor (watts).

ω_{ang} Velocidad angular del rotor (radianes / segundo).

Por otra parte se conoce que :

$$P_{ot} = V * I \quad (\text{watts}) \quad \text{Ec. 5.11}$$

y que

$$V_{ang} = \frac{2 \pi v_{p'rot}}{60} \quad (\text{rad / scg}) \quad \text{Ec. 5.12}$$

Donde

$v_{p'rot}$ Velocidad periferica del rotor (r.p.m.)

y de la Ec. 5.5

$$V_{gen'ind-med} = 4 * \emptyset * \left(\frac{P}{2}\right) * \left(\frac{Z}{2a}\right) * \left(\frac{v_{rot}}{60}\right) * (10^{-8}) \quad (\text{volts}) \quad \text{Ec. 5.5}$$

Sustituyendo todo lo anterior en la Ec.5.10 se obtiene:

$$5.13 \quad \tau = \frac{P * Z * \emptyset * I_{rot}}{a} \quad (\text{N * m}) \quad \text{Ec.}$$

Que agrupando las constantes propias del motor se obtiene:

$$\tau = K'_{m\acute{a}g} * \emptyset * I_{rot} \quad (\text{N * m}) \quad \text{Ec. 5.14}$$

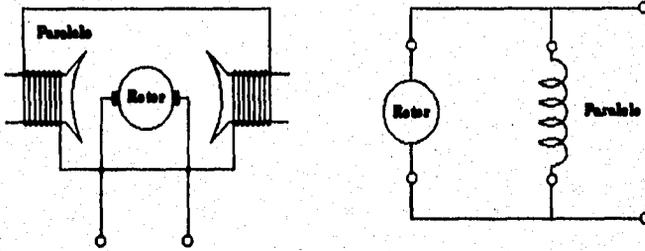
Que es la ecuación fundamental del Par para un motor de corriente continua; éste es proporcional a la intensidad del campo magnético y a la corriente del rotor.

Capítulo 6

Tipos de Motores de Corriente Continua

Fig. 6.1

Motor Tipo Paralelo (ó Shunt)



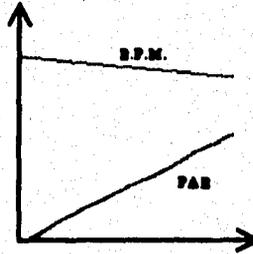
Gráf. 6.1

CURVAS CARACTERISTICAS

MOTOR TIPO DERIVADO

VELOCIDAD
R.P.M.

PAR MOTOR
(m²kg)



INT. DE CORRIENTE DE LINEA
(Amp.)

EL MOTOR TIPO PARALELO

DERIVACIÓN O SHUNT

Un motor de corriente continua de este tipo mantiene una velocidad aproximadamente constante desde carga cero hasta plena carga. Debe su nombre a que su devanado de estator está conectado en paralelo a su rotor. Tal devanado en paralelo se forma con muchas espiras de conductor delgado. En la figura anterior se indica la conexión apropiada de ambos devanados.

Las curvas características de la gráfica muestran que el par desarrollado por un motor en derivación varía con la intensidad de corriente de su rotor, ésto se debe a que es proporcional al flujo magnético del rotor y del estator. El rotor tiene un flujo de intensidad constante porque se conecta a la línea, mientras que el flujo de rotor varía con la intensidad de su corriente.

El par de un motor en paralelo se considera aceptable en relación con el de otros motores de corriente continua, arranca hasta con una sobrecarga del 50 % aproximadamente, sin que resulte dañado por corriente excesiva.

El motor tipo paralelo mantiene su velocidad aproximadamente constante, desde carga nula hasta plena carga, porque la intensidad magnética en su rotor es constante.

La curva característica indica que la velocidad varía aproximadamente 10 % desde el vacío hasta la carga total, lo que da a este motor una muy buena regulación de velocidad.

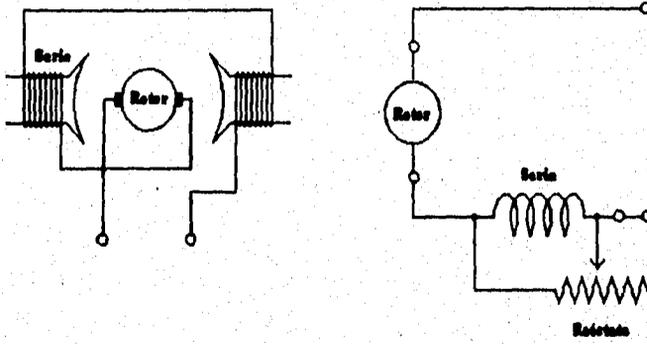
Tal máquina se emplea extensamente donde se desea controlar la velocidad arriba y abajo de su valor normal.

Un reóstato conectado en serie con el devanado en paralelo hará aumentar la velocidad. Un resistor en serie con el rotor la hará disminuir.

Para un funcionamiento más estable con carga fluctuante se emplea una combinación de devanados de estator, uno en paralelo y el otro en serie con el rotor. El último produce generalmente la misma polaridad que el estator y consta de pocas espiras de conductor grueso en cada polo. Este tipo de motor de corriente continua se denomina compuesto.

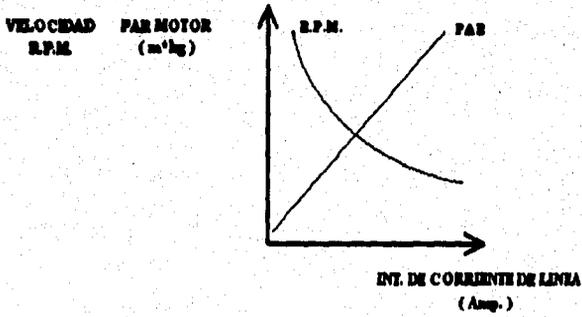
Fig. 6.2

Motor Tipo Serie



Gráf. 6.2

CURVAS CARACTERISTICAS MOTOR TIPO SERIE



EL MOTOR TIPO SERIE

En estos motores el estator y el rotor, son devanados con un hilo grueso y corto, debido a que por ambos circula la misma corriente.

En un motor de tipo serie su estator y su rotor están conectados en serie. El devanado de estator es de pocas espiras de conductor grueso (alambre o tira de cobre). La intensidad magnética variará con la de la corriente del rotor en condiciones normales.

Los pares de arranque y crítico o de agarrotamiento son muy convenientes. Puede arrancar y soportar sobrecargas muy fuertes. El par de un motor serie varía con el cuadrado de la intensidad en el rotor, puesto que la intensidad magnética es proporcional a esta última.

Por ejemplo: Si se duplica la intensidad de corriente en el rotor se duplicará también la intensidad magnética y se producirá también una reacción cuatro veces mayor entre los polos del rotor y del estator. Es decir, el par será cuatro veces mayor. Por otra parte la regulación de velocidad es muy pobre.

La velocidad varía inversamente con la carga, lo que significa que a mayor carga menor velocidad y que a menor carga mayor velocidad. Debe cuidarse de que el motor tenga siempre suficiente carga para que la velocidad no rebase los límites de seguridad. Si la carga se redujese a cero el motor probablemente se aceleraría hasta destruirse.

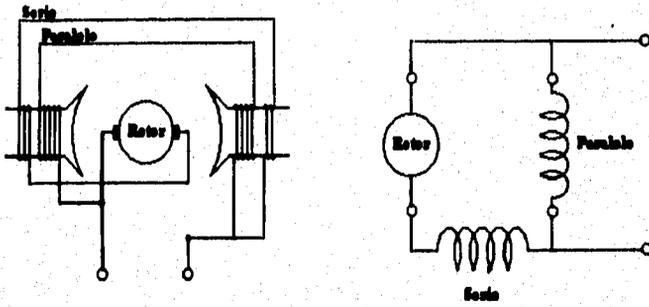
Un motor serie es de aplicación limitada debido a su pobre regulación de velocidad. Es especialmente adecuado para grúas, montacargas, maquinaria de minas y locomotoras eléctricas. Tales cargas pueden manejarse más eficientemente con motores serie, porque la

velocidad tiene que ser baja si la carga es pesada y una carga ligera será acelerada hasta una alta velocidad.

La velocidad de un motor serie puede controlarse por encima del valor normal conectando un resistor ajustable en paralelo con el devanado serie del estator. Tal resistor se llama " paralelo " del devanado serie. La velocidad variará inversamente con la intensidad magnética. Controlando la velocidad sobre el valor normal se reduce el par, pero no se altera la potencia de salida.

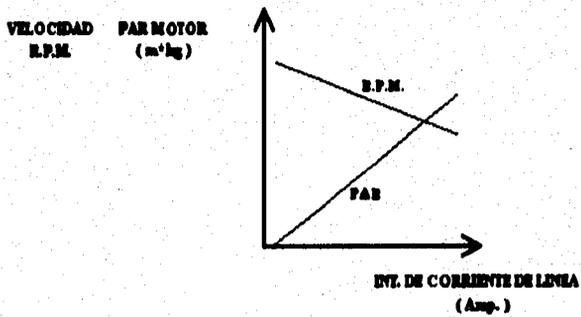
Fig. 6.3

Motor Tipo Compuesto (ó Compound)



Gráf. 6.3

CURVAS CARACTERISTICAS MOTOR TIPO COMPUESTO



EL MOTOR TIPO COMPUESTO

El devanado del estator de un motor de corriente continua tipo compuesto tiene conectadas bobinas en paralelo y serie en cada uno de los polos.

El devanado " paralelo " es el principal devanado del estator.

El serie es el adicional que junto con el otro constituyen el devanado combinado que da origen al nombre del motor; El flujo producido por el devanado serie es proporcional a la corriente en el rotor. Si ambos devanados producen la misma polaridad en cada polo, su combinación recibe el nombre de " compuesto " aditivo.

Motor " compuesto " aditivo. El par es bastante bueno. Arranca y soporta sobrecargas pesadas. Este motor produce mejor par que el " paralelo ", pero no tan bueno como el de serie.

La regulación de velocidad es aceptable. Su velocidad varía del 15 a 25 % desde el vacío hasta plena carga; La variación, en %, de la velocidad, desde carga cero hasta plena carga (o sea, la regulación), depende de la intensidad magnética comparativa de los devanados paralelo y serie.

Un motor " compuesto " aditivo es adecuado para cargas tales como compresores, trituradoras, laminadores de acero, etc.

La regulación de velocidad de un motor de este tipo es muy buena con cargas hasta del 75 % aproximadamente de lo normal. Se desacelera o se agarota si la carga sobrepasa tal punto.

El par es muy pobre. Puede arrancar e invertir su rotación luego de empezar a mover una carga.

En general hay muy pocos usos para un motor " compuesto " diferencial.

Capítulo 7

Control de la Velocidad en los Motores de Corriente Continua

Se tiene una gran cantidad de accionamientos en la industria que requieren máquinas con una excelente regulación y un sencillo control de la velocidad. Como ya se ha dicho los motores de corriente continua presentan estas características.

Anteriormente se ha establecido que el voltaje contraelectromotriz generado en el devanado del rotor se opone al voltaje de alimentación que es directamente proporcional al flujo que corta los conductores del rotor y a la velocidad, esto es:

$$v_{rot} = \frac{V_s - (I_{rot} R_{rot} + 2\Delta V)}{K_{m4} \cdot \Phi} \quad (\text{r.p.m.}) \quad \text{Ec. 5.9}$$

Puesto que $(I_{rot} R_{rot} + 2\Delta V)$ es muy pequeña (debido a R_{rot}), alrededor del 3 al 8 % del voltaje entre terminales, la ecuación anterior se puede escribir aproximadamente.

$$v_{rot} = K_{m4} \frac{V_s}{\Phi} \quad (\text{r.p.m.}) \quad \text{Ec. 7.1}$$

De la fórmula anterior se puede observar que la velocidad del motor de corriente continua es directamente proporcional al voltaje aplicado al rotor e inversamente proporcional al flujo magnético. De esta manera, la variación de una u otra de las magnitudes mencionadas permiten el control de la velocidad.

Control de la velocidad con par constante y potencia variable.

El par desarrollado por un motor de corriente continua, está dado por la siguiente expresión:

$$\tau = K'_{m\dot{a}q} * \phi * I_{rot} \quad (N * m) \quad \text{Ec. 5.14}$$

Por otro lado, la potencia mecánica proporcionada por el motor de la Ec. 5.11 puede expresarse como:

$$P = K'_{m\dot{a}q} * v_{rot} * \tau \quad (\text{watts}) \quad \text{Ec. 7.2}$$

P	Potencia de salida (watts).
K'_{m\dot{a}q}	Constante de la máquina.
v_{rot}	Velocidad del rotor (r.p.m.).
\tau	Par desarrollado

De esta manera, si se efectúa un ajuste en la velocidad combinando el voltaje en las terminales del rotor, el par permanece constante, mientras que la potencia P, varía directamente con la velocidad.

La velocidad en los motores serie, paralelo y compuesto puede variarse con este tipo de control, el cual se logra, introduciendo una resistencia en el circuito del rotor ó variando el voltaje de la fuente de alimentación.

En realidad introducir una resistencia en el rotor para controlar la velocidad, no es muy recomendable, porque se tienen muchas pérdidas, reduciéndose el rendimiento notablemente. Se prefiere entonces, variar el voltaje de la fuente.

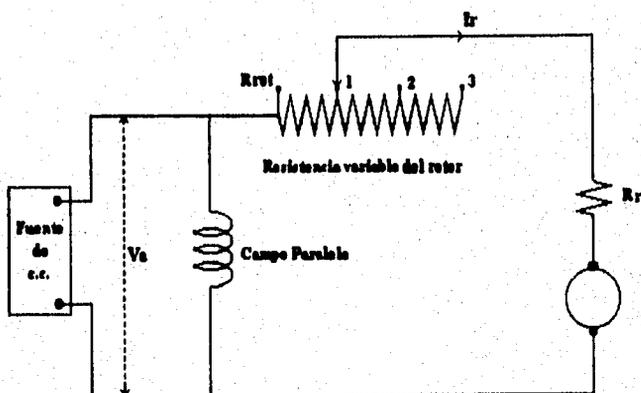
CONTROL DE LA VELOCIDAD EN MOTORES DE C.C. POR RESISTENCIA EN EL CIRCUITO DEL ROTOR

De acuerdo con la ecuación de la velocidad (Ec. 7.2), ésta se controla cambiando ($I_{rot} R_{rot}$) la resistencia del motor, pero como la resistencia de la máquina no puede cambiarse fácilmente. Sin embargo, la resistencia total del circuito del rotor, puede variarse colocando una resistencia en serie con el rotor del motor, haciendo que actúe sobre el estator el voltaje total de la línea. Al variar la resistencia se puede tener el control de la velocidad por debajo de la básica. Por esta razón, puede decirse que el control de la resistencia en el rotor sólo puede originar velocidades por debajo de la básica.

Fig. 7.1

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

Control de la velocidad en motores de c. c. por resistencia en el rotor

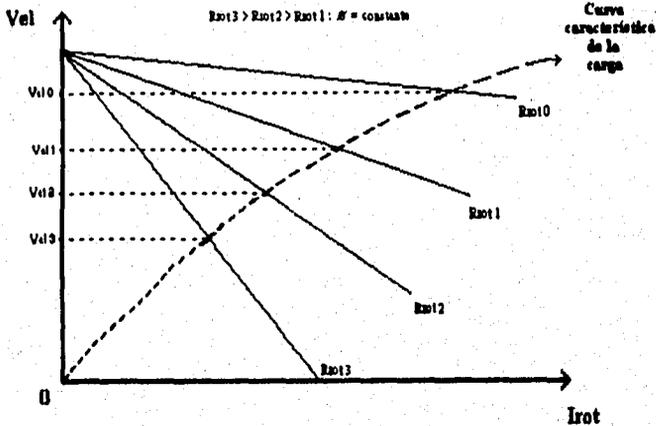


La corriente del rotor de acuerdo con la ecuación de la velocidad es función de la carga. Para un valor de ajuste determinado de la resistencia en el circuito del rotor a un aumento de la carga se provocará un aumento de corriente continua en los bornes de la resistencia conectada en serie con el rotor, que originará una disminución de la velocidad.

Para un valor de ajuste de la velocidad en vacío por debajo de la velocidad básica, el control de la resistencia del rotor provocará una caída de velocidad con la aplicación de la carga, resultando una regulación pobre de la velocidad. Cuanto más grande es el valor de la resistencia en serie del rotor, más pobre es la regulación de la velocidad del motor.

Gráf. 7.1

Curvas características del control de la velocidad en un motor de c. c. por resistencia en el rotor



Ventajas del control de la velocidad en motores de corriente continua por resistencia en el rotor:

- * Una parte del costo es compensada por que la resistencia del rotor sirve también como resistencia de arranque.
- * Las funciones de arranque y de control de velocidad pueden combinarse en una sola resistencia
- * El intervalo de variación de la velocidad empieza en cero hasta la velocidad básica.
- * El costo es mucho menor que el de otros sistemas que permiten el control de la velocidad desde cero hasta la velocidad básica.
- * Simplicidad y facilidad de conexión.

Objeciones:

- * Hay una excesiva pérdida de energía en la resistencia en serie con el rotor.
- * La regulación de la velocidad es muy pobre para un ajuste determinado de la velocidad.
- * El costo relativamente elevado en las resistencias para motores grandes.
- * Dificultad para obtener un control continuo de la velocidad para potencias grandes.
- * Otra objeción que implica, es que debe tomarse en cuenta que por la resistencia en el rotor tiene que pasar la intensidad de la corriente nominal y además la sobrecarga; por lo que deben de tomarse medidas para disipar la gran cantidad de calor que se produce en dicha resistencia.

En realidad introducir una resistencia en el rotor de un motor para controlar la velocidad, no es muy recomendable, por que se tienen muchas pérdidas, reduciéndose el rendimiento notablemente. Se prefiere entonces, variar el voltaje de la fuente.

La combinación del control de la resistencia en el circuito del rotor y del estator de un motor, proporciona un medio razonablemente eficaz y relativamente barato para obtener velocidades por encima y por debajo de la básica en el caso de motores pequeños de corriente continua. Para motores grandes se emplea el control de velocidad por control de la resistencia en el rotor en serie y paralelo.

Observación:

En los motores de corriente continua de gran tamaño, es necesario insertar resistencia en serie con el rotor, durante el periodo de arranque.

Dos factores que limitan la corriente que toma el rotor de un motor de una línea determinada son: el voltaje contraelectromotriz y la resistencia en el rotor. Como no hay voltaje contraelectromotriz en el reposo, la corriente que tome el rotor será anormalmente alta, a menos que esté limitada por una resistencia externa.

Un motor en derivación, conectado directamente a través de una línea de 250 volts con una resistencia en el rotor de 0.5 ohms. La corriente, a plena carga, que toma la máquina, es de 25 amperes, y la corriente del estator en derivación es de un ampere. Por tanto, la corriente del rotor, a plena carga, es de 24 amperes.

De acuerdo con la ecuación Ec. 5.7, se recordará que el voltaje contraelectromotriz desarrollado por un motor es proporcional a su velocidad, si el campo magnético es constante; también el voltaje contraelectromotriz es igual al voltaje aplicado menos la caída en el rotor ($I_{rot} R_{rot}$). La corriente que pasa por el rotor se determina mediante la ecuación:

$$I_{rot} = \frac{V_s - V_c}{R_{rot}} \quad (\text{amperes}) \quad \text{Ec. 7.3}$$

- I_{rot} Corriente del rotor (amperes).
- V_s Voltaje de la línea (volts).
- V_c Voltaje contraelectromotriz (volts).
- R_{rot} Resistencia del rotor (ohms).

La corriente que circula por el rotor en el instante del arranque, se obtiene como sigue:

$$I_{rot} = \frac{250 - 0}{0.5} = 500 \text{ amperes}$$

La corriente total de arranque es igual al valor anterior, más un ampere de la corriente del estator. La relación del arranque y la corriente a plena carga, en este caso, es:

$$I_{rot} = \frac{501}{25} = 20.04 \text{ amperes}$$

El torque y el calor excesivos que produce esta corriente, puede dañar al motor y a su carga acoplada, sobrecalentar el aislante durante el arranque y quemar el rotor.

Si se conecta una resistencia en serie con el rotor, para reducir la corriente de ésta durante el arranque a 1.5 veces aproximadamente del valor de la carga total, reduciendo gradualmente la resistencia, se eliminarán estos efectos dañinos.

El valor de esta resistencia en R se puede obtener resolviendo la ecuación para (R) , sin olvidar restar la resistencia del rotor (R_{rot})

$$R = \frac{V_s - V_c}{I_{rot}} - R_{rot} \quad (\text{ohms}) \quad \text{Ec. 7.4}$$

En el reposo, la resistencia en serie sería:

$$R = \frac{250 - 0}{36} - 0.5 = 6.44 \text{ ohms}$$

Para obtener la resistencia en serie, necesaria en cierto punto intermedio en el arranque del motor, es preciso encontrar el voltaje contraelectromotriz a esa velocidad y después, obtener la resistencia mediante la fórmula (Ec. 7.4). Como el voltaje

La corriente total de arranque es igual al valor anterior, más un ampere de la corriente del estator. La relación del arranque y la corriente a plena carga, en este caso, es:

$$I_{rot} = \frac{501}{25} = 20.04 \text{ amperes}$$

El torque y el calor excesivos que produce esta corriente, puede dañar al motor y a su carga acoplada, sobrecalentar el aislante durante el arranque y quemar el rotor.

Si se conecta una resistencia en serie con el rotor, para reducir la corriente de ésta durante el arranque a 1.5 veces aproximadamente del valor de la carga total, reduciendo gradualmente la resistencia, se eliminarán estos efectos dañinos.

El valor de esta resistencia en serie se puede obtener resolviendo la ecuación para (R), sin olvidar restar la resistencia del rotor (R_{rot})

$$R = \frac{V_s - V_c}{I_{rot}} - R_{rot} \quad (\text{ohms}) \quad \text{Ec. 7.4}$$

En el reposo, la resistencia en serie sería:

$$R = \frac{250 - 0}{36} - 0.5 = 6.44 \text{ ohms}$$

Para obtener la resistencia en serie, necesaria en cierto punto intermedio en el arranque del motor, es preciso encontrar el voltaje contraelectromotriz a esa velocidad y después, obtener la resistencia mediante la fórmula (Ec. 7.4). Como el voltaje

contraelectromotriz difiere en un voltaje aplicado solamente por la caída en el rotor ($I_{rot} R_{rot}$), se entiende que la velocidad es, prácticamente proporcional al voltaje aplicado.

A media velocidad; por ejemplo, el voltaje contraelectromotriz sería:

$$\frac{50\% \text{ de velocidad}}{100\% \text{ de velocidad}} = \frac{\text{Voltaje a media velocidad}}{250} \quad \text{Ec. 7.5}$$

$$\text{Voltaje a media velocidad} = 250 \times \frac{50\%}{100\%} = 250 \times \frac{1}{2} = 125 \text{ volts}$$

La resistencia necesaria a media velocidad es igual a:

$$R = \frac{250 - 125}{36} = 0.5, \text{ ó } 2.97 \text{ ohms}$$

El voltaje contraelectromotriz, a plena carga, se puede encontrar como sigue:

$$V_c = V_a - (I_r R_r) \quad (\text{volts}) \quad \text{Ec. 7.6}$$

$$V_c = 250 - (24 \times 0.5)$$

$$V_c = 250 - 12$$

$$V_c = 238 \text{ volts}$$

BIBLIOGRAFÍA:

Control de Máquinas Eléctricas

Irving L. Kosow P. H. D.

Ed. Reverté, S.A.

Manual de Máquinas Eléctricas

George J. Thaler.

Utediciones Ciencia y Técnica, S.A.

Manual de Máquinas Eléctricas y Transformadores

George McPherson.

Utediciones Ciencia y Técnica, S.A.

Manual de Equipo Eléctrico y Electrónico

Coyne Electrical School.

Ed. Hispano - Americana, S.A.

Operación Control y Protección de Motores Eléctricos

Horacio Buitrón S.

Ed. Soto.

Máquinas Eléctricas.

Stephen S. Chapman

Ed. Mc Graw-Hill.

Curso de Máquinas Eléctricas de Corriente Directa

Enriquez Harper Gilberto

Ed. Limusa.

Física Conceptos y Aplicaciones

Paul E. Tippens

De. McGraw-Hill