

Resumen

Máquinas eléctricas de corriente alterna: constitución, funcionamiento y aplicaciones características.

José Ángel Laredo García
jgarcia2@platea.pntic.mec.es

© Laredo

CONVERTIDORES ELECTROMECÁNICOS DE ENERGÍA

Por máquina eléctrica, en general, entendemos toda máquina o aparato capaz de transformar en energía eléctrica otra forma cualquiera de energía o viceversa.

Podemos clasificar las máquinas eléctricas en tres categorías:

1º Generadores. 2º Receptores. 3º Transformadores y Convertidores.

El generador de energía eléctrica a partir de la energía mecánica es todavía la máquina más importante de los aparatos eléctricos.

Dado que el proceso de la conversión de energía mecánica en eléctrica es siempre reversible, más que de generadores y motores se habla de convertidores electromecánicos de energía.

Todo convertidor electromecánico consta de tres partes:

✦ Sistema eléctrico. ✦ Medio de acoplamiento. ✦ Sistema mecánico.

El acoplamiento entre uno y otro sistema tiene lugar por medio de campos eléctricos y magnéticos.

De entre los principales fenómenos que pueden servir para este acoplamiento destacamos:

1º Inducción electromagnética.

2º Ferromagnetismo.

La conversión electromecánica de la energía depende de la existencia en la naturaleza de fenómenos de interacción entre campos eléctricos y magnéticos, por una parte y de la manifestación de fuerza y movimiento, por otra. De los convertidores electromecánicos, los más importantes son las máquinas eléctricas rotativas que utilizan los dos fenómenos anteriores.

Tanto los generadores como los motores eléctricos se basan en la ley de inducción electromagnética de Faraday y en la de la fuerza magnética de Laplace

Las máquinas que producen corriente alterna se llaman generadores de inducción o alternadores. Son reversibles como motores síncronos, aunque se utiliza poco esta propiedad.

Los motores de corriente alterna más utilizados son los asíncronos o de inducción y los de colector.

Las máquinas que producen corriente continua se llaman dinamos. Debido a su reversibilidad pueden funcionar como motores de corriente continua.

PRINCIPIOS GENERALES DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Para que se produzcan f.e.m.s inducidas (caso de los generadores) y fuerzas o par de giro sobre las bobinas o inducidos (caso de los motores), se necesitan dos circuitos eléctricos (uno fijo en el estator y otro móvil en el rotor) que estén en el seno de un campo magnético. Es lo que llamamos acoplador electromagnético.

El acoplador electromagnético transforma la energía eléctrica en magnética, para que ésta se transforme en mecánica, y viceversa.

Las máquinas eléctricas rotativas constan de una parte fija, denominada estator, y de otra móvil respecto a la anterior, denominada rotor. Ambas son de forma cilíndrica y tienen un eje común.

En el estator y en el rotor de polos lisos se alojan, en ranuras longitudinales, los hilos de cobre que forman los devanados eléctricos, inductor e inducido, respectivamente.

Ambos devanados se acoplan a través del circuito magnético formado por el material ferromagnético del estator y del rotor y por el entrehierro.

CONSTITUCIÓN GENERAL DE UNA MÁQ. ELÉCTRICA DE C.A.

Todos los elementos constructivos (sin diferenciar las de ca y las de cc) pueden dividirse en dos clases: Elementos electromagnéticos y elementos mecánicos. Como *resumen* se presenta el siguiente cuadro:

Elementos Electromagnéticos	Magnéticos	Polos inductores, polos de conmutación, núcleos de hierro de los inducidos, etc ...
	Eléctricos	Arrollamientos inductores, arrollamientos de los polos de conmutación, arrollamientos de los inducidos, colectores, escobillas, etc ...
	Aislantes	Aislamientos entre bobinas, aislamiento entre arrollamientos, aislamientos entre arrollamientos y partes magnéticas y mecánicas.
Elementos Mecánicos	De trabajo	Ejes, cojinetes, poleas, engranajes, ventiladores, etc...
	De sustentación	Carcasa, tapas, soportes de cojinetes, bandejas de sujeción de los devanados etc.

Por ejemplo, el rotor de una máquina eléctrica de ca (motor trifásico de inducción), está constituido a su vez por los siguientes elementos:

- a) Núcleo magnético de hierro.
- b) Cuerpo sustentador y elementos de fijación al núcleo magnético.
- c) Arrollamiento, incluido su aislamiento.
- d) Soportes de arrollamiento, bandejas de sujeción al núcleo magnético.
- e) Anillos rozantes o colector. f) Ventiladores, canales de ventilación.

El estator de la misma máquina consta de las siguientes partes:

- a) Núcleo magnético de hierro - polos inductores, polos de conmutación -
- b) Carcasa y elementos de fijación al núcleo magnético.
- c) Arrollamiento, incluido su aislamiento
- d) Soportes de arrollamiento. e) Caja de bornes. f) Canales de ventilación.

Mas los componentes del lado de transmisión y del lado de escobillas.

Tipos estructurales de máquinas eléctricas.

En la constitución interna de una máquina eléctrica lo que la caracteriza es la forma que se da a los núcleos magnéticos del estator y del rotor.

Resumen de la *constitución interna* de seis máquinas características:

	CLASE DE MÁQUINA	NÚCLEO MAGNÉTICO DEL ESTATOR	NÚCLEO MAGNÉTICO DEL ROTOR	DISPOSITIVO DE TOMA DE CORRIENTE EN EL ROTOR
1	Máquina de corriente continua. (generador o motor)	Polos salientes	Chapa ranurada	Colector
2	Máquina de corriente alterna asincrónica con rotor de anillos rozantes. (motor de inducción)	Chapa ranurada	Chapa ranurada	Anillos rozantes
3	Máquina de corriente alterna asincrónica con rotor en jaula de ardilla. (Motor de inducción).	Chapa ranurada	Chapa ranurada	No tiene
4	Máquina de corriente alterna asincrónica. (Alternador o m. síncrono).	Chapa ranurada	Polos salientes	Anillos rozantes (solo para I de excitación)
5	Máquina de corriente alterna con rotor de colector. (Motor de colector).	Chapa ranurada	Chapa ranurada	Colector
6	Máquina convertidora de corriente. (Conmutatriz).	Polos salientes	Chapa ranurada	Anillos rozantes. Colector.

Las máquinas 1 y 6 se denominan de polos exteriores.
 La máquina 4 se denomina de polos interiores
 En resumen:

<i>punto de vista mecánico</i>	Estator → parte fija de la máquina.	Rotor → parte giratoria de la máquina.
<i>punto de vista eléctrico:</i>	Inductor → producción del campo magnético inductor.	Inducido → producción de corriente eléctrica inducida.

Elementos constructivos del rotor.

En todos los motores de inducción, el núcleo magnético del rotor tiene que estar laminado para limitar las pérdidas por corrientes de Foucault.

En los motores de jaula de ardilla, el arrollamiento rotórico está constituido por la propia jaula de ardilla.

En los motores de doble jaula y en los de ranuras profundas se siguen idénticos procedimientos para la preparación de la jaula de ardilla. Únicamente cambia la forma de las ranuras.

Estator.

El estator de los motores de inducción con rotor bobinado es idéntico al de los motores con rotor de jaula de ardilla. La disposición constructiva es la misma y consta de los elementos estudiados anteriormente.

Caja de bornes

Los motores asíncronos, como cualquier máquina, ha de ir provista de bornes de conexión que generalmente, están agrupados en una caja de bornes situada en un costado de la carcasa.

Dispositivos de toma de corriente para el rotor.

Estos dispositivos solamente son aplicables a los motores con rotor bobinado ya que, los motores con rotor en jaula de ardilla, no necesitan ningún elemento de conducción de corriente para el rotor, porque los conductores que constituyen el arrollamiento rotórico van cerrados en cortocircuitos.

Como órgano de conducción para el rotor, las máquinas asíncronas de rotor bobinado llevan tres anillos rozantes, conectados cada uno de ellos a uno de los tres finales del arrollamiento rotórico; sobre estos anillos frotan tres escobillas, mediante las cuales, la corriente rotórica es conducida al exterior de la máquina.

Los anillos rozantes se construyen de cobre o de bronce fundidos.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS ASÍNCRONOS, CON ROTOR EN CORTOCIRCUITO.

Estos motores denominados también motores de jaula de ardilla, gracias a su construcción robusta y sencilla y su baratura, son, con mucho, el tipo más frecuentemente utilizado en las aplicaciones industriales.

Una de las principales ventajas de los motores con rotor en cortocircuito consiste en la facilidad para invertir el sentido de giro.

Entre sus desventajas se pueden citar:

- Elevada intensidad de corriente durante el periodo de arranque.
- Bajo factor de potencia durante el periodo de arranque.
- Rigidez en lo que concierne a la regulación de velocidad.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS ASÍNCRONOS, CON ROTOR BOBINADO.

Entre el estator de un motor de rotor bobinado, y un motor con rotor en cortocircuito, no existe básicamente ninguna diferencia.

En el rotor, el motor recibe un devanado bifásico o trifásico, según el tamaño del motor. Cuando el devanado es trifásico, los terminales interiores del mismo se conectan en estrella en el rotor, mientras que los terminales exteriores, se conducen a tres anillos colectores de bronce, situados sobre el eje del motor.

En lo que respecta a las características técnicas, el motor con rotor bobinado tiene las siguientes **ventajas** respecto al motor con rotor en cortocircuito.

1. La corriente de arranque es, solamente, de 1,5 a 2.5 veces la corriente nominal, debido precisamente al empleo de las resistencias de arranque.
2. El par de arranque Carr de un motor con rotor bobinado es siempre mayor que el de un motor con rotor en cortocircuito de las mismas características.
3. Durante el periodo de arranque también es mayor el factor de potencia debido a la presencia de las resistencias rotóricas.
4. En los motores de rotor bobinado es posible una regulación continua de la velocidad, sin saltos, y en un margen mucho más amplio que en los motores de rotor en cortocircuito.

Los principales **inconvenientes** son los siguientes:

1. El devanado del rotor encarece el precio del motor y lo hace más voluminoso.
2. Los equipos para el arranque, frenado, regulación de la velocidad, etc... son más complejos. Esto significa más caros, más voluminosos y personal más entrenado para su manejo.

Los motores con rotor bobinado se emplean preferentemente sobre los de rotor en cortocircuito, en los siguientes casos:

1. Cuando solamente se permiten bajas corrientes de arranque.
2. Cuando los arranques deben efectuarse a plena carga, lo que significa la necesidad de elevados pares de arranque.
3. En el caso de máquinas accionadas de arranque difícil.
4. Cuando se precisa una regulación de velocidad entre límites muy amplios.

Para la inversión del sentido de giro es necesario hacer que el campo magnético giratorio gire en sentido contrario. La forma más sencilla de conseguirlo es permutar dos cualesquiera de las tres conexiones con la línea.

Respecto a los dispositivos utilizados para la inversión del sentido de giro es válido todo lo dicho en el caso de los motores de rotor en cortocircuito.

EL MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO EN SERVICIO

La mayoría de los motores que se encuentran en el mercado se dan para una frecuencia de 50 Hz y se fabrican para una sola velocidad de 3000, 1500, 1000 y 750 r.p.m., que corresponde a 2, 4, 6 y 8 polos respectivamente.

Para una red trifásica de 380 V (3 ~ 380 V - 50 Hz), existen los motores bitensión de 220 / 380 V y ofrecen dos posibilidades de conexión directa a la red: conexión en estrella y conexión en triángulo.

PUESTA EN MARCHA DE LOS MOTORES ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS.

El proceso de arranque de estos motores es distinto según se trate del motor en jaula de ardilla o de rotor bobinado. En ambos aparece una considerable corriente de arranque al encontrarse el motor en cortocircuito en el primer momento. A medida que aumenta la velocidad disminuye la intensidad hasta descender al valor correspondiente a la carga aplicada. El

deslizamiento disminuye desde 1 hasta el valor que corresponda al de funcionamiento normal.

El arranque directo o a plena carga consiste en someter a cada arrollamiento de fase a su tensión nominal y acelerarlo sin interrupción hasta que alcanza su velocidad nominal. Esto es posible cuando la corriente de arranque este entre las 5 y las 7 veces la nominal.

Los motores industriales superan en la mayoría de las ocasiones estos bajos valores apareciendo corrientes de arranque que no son admisibles.

INVERSIÓN DEL SENTIDO DE GIRO.

Una de las ventajas principales de los motores asíncronos trifásicos es su rápida adaptación para cambiar el sentido de giro. Para ello es suficiente intercambiar dos fases cualesquiera de la línea de alimentación.

REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LAS MÁQUINAS ASÍNCRONAS.

Los motores de inducción se utilizan principalmente a velocidad constante, conectados directamente a la red, de acuerdo con su propias características par - velocidad, número de polos y carga de la máquina operadora.

De esta forma se construyen motores de una sola velocidad de acuerdo la expresión ya conocida de la velocidad del rotor de un motor de inducción.
$$N_s = \frac{60 \cdot f}{P}$$

Modernamente se utilizan en el campo de la regulación y control componentes electrónicos como son los diodos, transistores y tiristores.

También existe un control discreto de la velocidad si los devanados del estator se disponen de tal forma que pueda exteriormente, mediante las conexiones accesibles, modificar el número de polos.

Con este principio se obtienen motores de dos velocidades mediante arrollamientos separados y hasta tres velocidades si los arrollamientos anteriores se combinan en conexión Dahlander.

EL MOTOR MONOFÁSICO DE INDUCCIÓN.

Estos motores presentan cierta analogía con los trifásicos pero su rendimiento y factor de potencia son inferiores, por lo que solo deben ser usados en los casos de que no se disponga red trifásica.

Para un motor monofásico, desde el punto de vista del dimensionado de la instalación eléctrica y del equipo de protección, nos interesa conocer:

- a) Intensidad, tiempo de arranque y velocidad.
- b) Potencia activa, rendimiento, tensión y frecuencia.
- c) La capacidad C para mejorar el factor de potencia a $\cos \phi'$.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR MONOFÁSICO

El motor monofásico dispone de una sola fase en el bobinado del estator. Esta al ser recorrida por una corriente alterna, crea un flujo también alterno pero de dirección constante y que por lo tanto no impulsa al rotor a girar.

La corriente alterna monofásica que atraviesa el arrollamiento del estator produce un flujo magnético que está en fase con la misma corriente.

El motor monofásico de inducción no puede ponerse en marcha por sí solo.

PUESTA EN MARCHA Y FUNC. DEL MOTOR MONOFÁSICO.

Motores de fase partida.

Es posible producir un campo giratorio agregándole al principal (de trabajo o de régimen) UV un segundo devanado denominado auxiliar o de arranque, WZ formando un ángulo de 90°

Ambos arrollamientos desfasados en el espacio, se encuentran recorridos por corrientes desfasadas también en el tiempo.

La composición de ambos flujos dará lugar a un campo magnético giratorio que permitirá el arranque.

CONEXIÓN DE UN MOTOR TRIFÁSICO COMO MONOFÁSICO.

Un motor trifásico puede conectarse a una línea monofásica haciendo uso del sistema de fase auxiliar con condensador o con bobina de reactancia.

Para ello se conectan dos fases, por ejemplo U y V en serie y directamente a la línea monofásica, y la tercera fase, W a la línea a través de un condensador o de la bobina de reactancia.

MOTORES TRIFÁSICOS DE COLECTOR.

Estos se construyen para potencias entre 2 y 500 CV.

La desventaja de estos frente a los de inducción es su elevado precio. A igualdad de potencias resultan aproximadamente tres veces más caros.

La característica constructiva común a todos ellos es la presencia de un colector muy semejante al de las máquinas de cc. Este colector va provisto de escobillas en número de 3 a 6 según el tipo de motores. Constan de un devanado rotórico que unas veces es semejante a un devanado de inducido de cc, y otras veces está dispuesto como un devanado trifásico. También constan de un devanado estatórico muy semejante al de las máquinas trifásicas síncronas y asíncronas.

El principal inconveniente de estos motores radica precisamente en el colector al originar defectuosas características de conmutación, cuyas condiciones varían con la velocidad, y en general, se realiza con más chispas en el colector que en los motores de cc.

Clasificación por la forma de funcionamiento.

- a) Motor serie de colector.
- b) Motor shunt de colector o motor derivación de colector.

Motor serie de colector.

Son motores en los que la velocidad disminuye al aumentar la carga conectada. Tienen características de funcionamiento muy parecidas a las de un motor serie de cc. La velocidad correspondiente a cualquier carga puede conseguirse en unos tipos constructivos por variación de la U aplicada y en otros tipos constructivos por desplazamiento de las escobillas sobre el colector.

Motor shunt de colector o motor derivación de colector.

La velocidad es aproximadamente constante con la carga. Sus características de funcionamiento son semejantes a las del motor shunt de cc. Puede aumentarse o disminuirse la velocidad independientemente de la carga, bien variando la tensión aplicada o bien, lo que es más general, por desplazamiento de las escobillas por el colector.

Clasificación por su disposición constructiva.

- a) Motores con alimentación por el estator.
- b) Motores con alimentación por el rotor.

Motores con alimentación por el estator.

En estos motores el estator está conectado a la línea y el rotor lleva un arrollamiento parecido al de las máquinas de cc pero en conexión trifásica y cerrado sobre un reostato de arranque. Por medio de las escobillas del colector se aplica al rotor una tensión procedente del estator y por el desfase producido en las corrientes del estator y del rotor, se produce un par de giro que produce la puesta en marcha del motor.

Motores con alimentación por el rotor.

El rotor lleva un arrollamiento trifásico ordinario conectado a la red a través de tres anillos rozantes de toma de corriente. El arrollamiento del estator también es trifásico y se alimenta del arrollamiento rotórico a través de las escobillas del colector. El desfase entre ambas corrientes produce un par de giro suficiente para iniciar la marcha de motor. Se puede suprimir el reostato de arranque.

Teniendo en cuenta estas cuatro características relativas al funcionamiento y la disposición constructiva disponemos de:

1. Motor serie con alimentación por el estator.
2. Motor shunt con alimentación por el estator.
3. Motor shunt con alimentación por el rotor.

Motor serie trifásico de colector.

Su característica de vel. es semejante a la del motor serie de cc, es decir, que la vel. aumenta por sí sola cuando disminuye la carga y viceversa.

Su campo de aplicación es el mismo (por analogía) que el de los motores de cc con excitación serie. Tiene las ventajas añadidas que no se precisa una conversión previa de ca en cc y la posibilidad de arrancar suavemente desplazando las escobillas desde la posición cero y aumentando así lentamente el par motor. No necesita reostato de arranque.

Inconvenientes: Su elevado precio y la necesidad del transformador.

Motores shunt trifásicos de colector alimentados por el estator.

En este tipo de motores encontramos el devanado del estator unido a la línea trifásica de alimentación. A las escobillas podemos aplicarles la tensión de línea o si es elevada una f.e.m. proporcional E^2

En el motor derivación la velocidad permanece casi constante con la carga, es decir, lo mismo que ocurre con el motor derivación de cc.

Motores shunt trifásicos de colector alimentados por el rotor.

Se conoce con el nombre de **motor Schrage**. Un servomotor de mando de las escobillas permitirá una amplia regulación de la velocidad conservando buen rendimiento.

El rotor está provisto de un colector y de un juego de 3 anillos rozantes. Además, consta de dos arrollamientos rotóricos: arrollamiento de anillos o arrollamiento rotórico propiamente dicho, arrollamiento de colector o arrollamiento rotórico de regulación y un arrollamiento estatórico.

En este tipo de motor, la velocidad es casi constante con la carga.

A pesar de su elevado precio, este motor ha sustituido, en casi todos los casos, a los restantes motores trifásicos de colector.

MOTORES MONOFÁSICOS DE COLECTOR.

Los motores monofásicos de colector constan de un estator de chapa magnética laminada (ranurada) y que para potencias superiores a 1 CV es análogo al de los motores de inducción y al de las máquinas síncronas. Para potencias inferiores (motores fraccionales) el estator es de polos salientes como el de las máquinas de cc, pero de chapas aisladas para evitar las pérdidas por corrientes de Foucault.

El rotor está constituido de forma parecida al de una máquina de cc, con un arrollamiento ondulado o imbricado.

El elemento característico es el colector de delgas, de constitución al de las de cc., y montado, como en dichas máquinas, en el rotor.

En su funcionamiento difiere de los motores de inducción en que su par es máximo durante el período de arranque, en que su velocidad es regulable y en que su rendimiento resulta menor que en los motores de inducción de análogas características.

Los que más importancia tienen en la práctica son:

1. Motor serie monofásico simple.
2. Motor serie monofásico compensado.
3. Motor de repulsión.

MOTOR SERIE MONOFÁSICO SIMPLE DE COLECTOR.

Un motor de cc, construido con su circuito magnético laminado, puede funcionar, (no satisfactoriamente), si se conecta a una red alterna monofásica.

Alimentado por la ca arranca por sí solo. La corriente que recorre el bobinado inducido presenta 100 alternancias por segundo pero, simultáneamente, le ocurre lo mismo a la corriente de excitación de las bobinas polares y, en consecuencia, al flujo inductor, por lo que, el momento de rotación y el giro del rotor resulta siempre de sentido constante.

1. Mayor calentamiento y chispas en el colector.
2. El estator y el rotor son construidos de chapa magnética para reducir las corrientes de Foucault y la Histéresis.
3. La vida de escobillas y colector es más corta. (conmutación).
4. Bajo factor de potencia.

Por otra parte, alimentado con ca, arranca por si solo (par de giro) debido al campo resultante producido por la interacción del flujo inductor y el flujo pulsatorio transversal del inducido.

MOTOR SERIE MONOFÁSICO COMPENSADO DE COLECTOR

Para limitar los inconvenientes apuntados anteriormente los motores monofásicos de colector, excepto los de pequeña potencia, están provistos de un **arrollamiento compensador**.

El arrollamiento compensador crea una ff.mm.mm que neutraliza la reacción del inducido.

Su conexión se puede realizar de dos formas:

- a) Espiras en cortocircuito coaxiales con el eje de la línea de escobillas.
- b) En serie con el inducido.

Para mejorar el factor de potencia, se emplea un entrehierro menor, con la correspondiente disminución del flujo inductor, reduciéndose de esta forma la tensión reactiva en el inducido.

Aplicaciones del motor monofásico de colector.

Son las siguientes:

1. Como **motor universal** de pequeña potencia.
2. Como motor para tracción eléctrica. (Locomotora).

