
2. MÁQUINAS ASÍNCRONAS O DE INDUCCIÓN

2.1. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica hoy en día representa más de la tercera parte de toda la energía utilizada, una parte de la cual se utiliza para producir calor o luz. No obstante, la mayor parte de la energía eléctrica es convertida en mecánica mediante motores eléctricos, de los cuales la proporción más alta la representan los llamados motores asíncronos o de inducción.

En lo que se refiere a la generación de energía eléctrica, casi la totalidad es generada mediante máquinas síncronas, aunque con la creciente evolución de las energías renovables empieza a resultar significativa la generación mediante máquinas asíncronas.

Dentro de la categoría de los motores, aunque la mayoría de los motores de inducción son alimentados directamente de la red eléctrica, hay una cantidad de ellos significativa que es alimentada mediante variadores de frecuencia con el objetivo de variar la velocidad de funcionamiento. Esta combinación es ampliamente utilizada en transportes, bombas, compresores, ventiladores, máquinas-herramientas, robótica vehículos híbridos o eléctricos, lavadoras y un amplio etcétera.

La predicción es que en la próxima década hasta el 50% de los motores eléctricos sean alimentados mediante variadores de frecuencia, y que el 70% de estos motores sean motores de inducción.

El rango de potencias de los motores de inducción varía desde la fracción de vatio hasta los 33 MW

El uso inteligente de la energía deriva en una mayor productividad con menor energía y menores pérdidas con costes moderados. La reducción de las pérdidas conduce a un menor impacto medioambiental en la zona de funcionamiento del motor y un menor impacto térmico y químico en la planta de energía eléctrica que genera la energía necesaria.

La velocidad variable por medio de variadores de frecuencia es de vital importancia en el logro de estos objetivos. Como efecto secundario, el uso de variadores de velocidad da lugar a la aparición de armónicos en la red eléctrica y a interferencias electromagnéticas (IEM) con el medio ambiente. Por tanto, la calidad de la energía y las IEM se han convertido en nuevos requisitos para los accionamientos eléctricos del motor de inducción.

El control digital es ahora un estándar en máquinas de velocidad variable, mientras que las unidades autónomas inteligentes para ser controlados y reparados a través de Internet son un objetivo de futuro, siendo las nuevas aplicaciones abundantes. Se aprecia la importancia pues de la máquina de inducción en nuestros días y de cara al futuro.

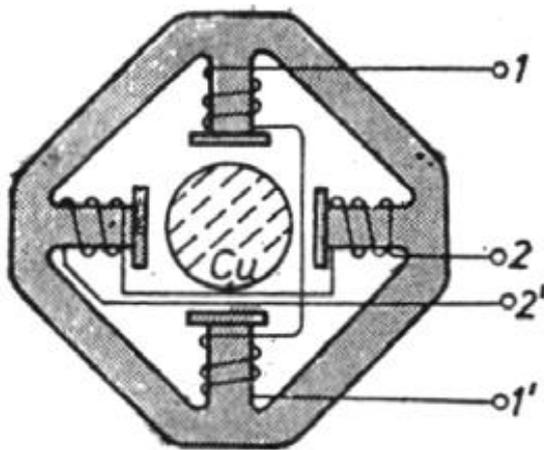
2.2. BREVE HISTORIA DE LAS MÁQUINAS DE INDUCCIÓN

A comienzos del siglo XIX se empiezan a desarrollar los principios básicos del electromagnetismo gracias a los experimentos de Oersted, Faraday, Henry, Lenz, Barlow y Maxwell. Pero son Faraday, al descubrir la ley de inducción electromagnética alrededor de 1831, y Maxwell, formulando sus ecuaciones alrededor de 1860, los que aportan las claves para la inminente invención de la máquina de inducción.

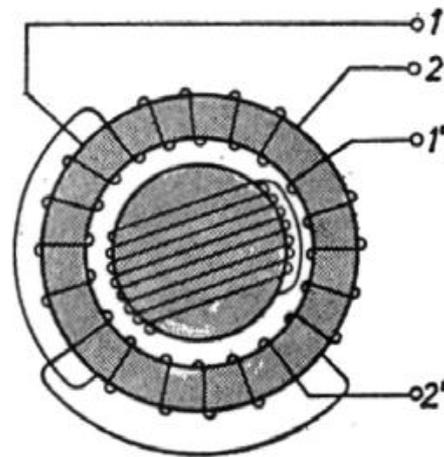
La ley de inducción de Faraday fue el detonante para que muchos científicos e ingenieros intentaran idear una máquina que generase electricidad de un modo diferente al que se conocía en aquellos tiempos, como era la pila de Volta.

En 1879 Walter Baily demostró ante la Physical Society de Londres, la posibilidad de producir una rotación de un disco de cobre mediante corrientes inducidas. Ferraris en 1885 descubrió el campo magnético giratorio casi a la vez, y sin tener conocimiento uno de los avances del otro, que Nikola Tesla, que fue el primero que construyó y patentó este tipo de motores en 1887 y por lo que se considera el inventor de los mismos.

Galileo Ferraris (1885), creó un dispositivo generador de un campo giratorio a partir de un bobinado bifásico de cuatro polos que hacía girar un disco de cobre sujeto a su influencia. Nicola Tesla (1886), creó un dispositivo con cuatro arrollamientos alrededor de una corona magnética generando dos campos diametrales normales entre sí que hacían girar un rotor constituido por un tambor magnético en el que se habían arrollado según un plano axial varias espiras de cobre en cortocircuito. Sus máquinas de inducción se muestran en las figuras 2-1 y 2-2, tomadas de [2].



2-1 Máquina de inducción de Ferraris



2-2 Máquina de inducción de Tesla

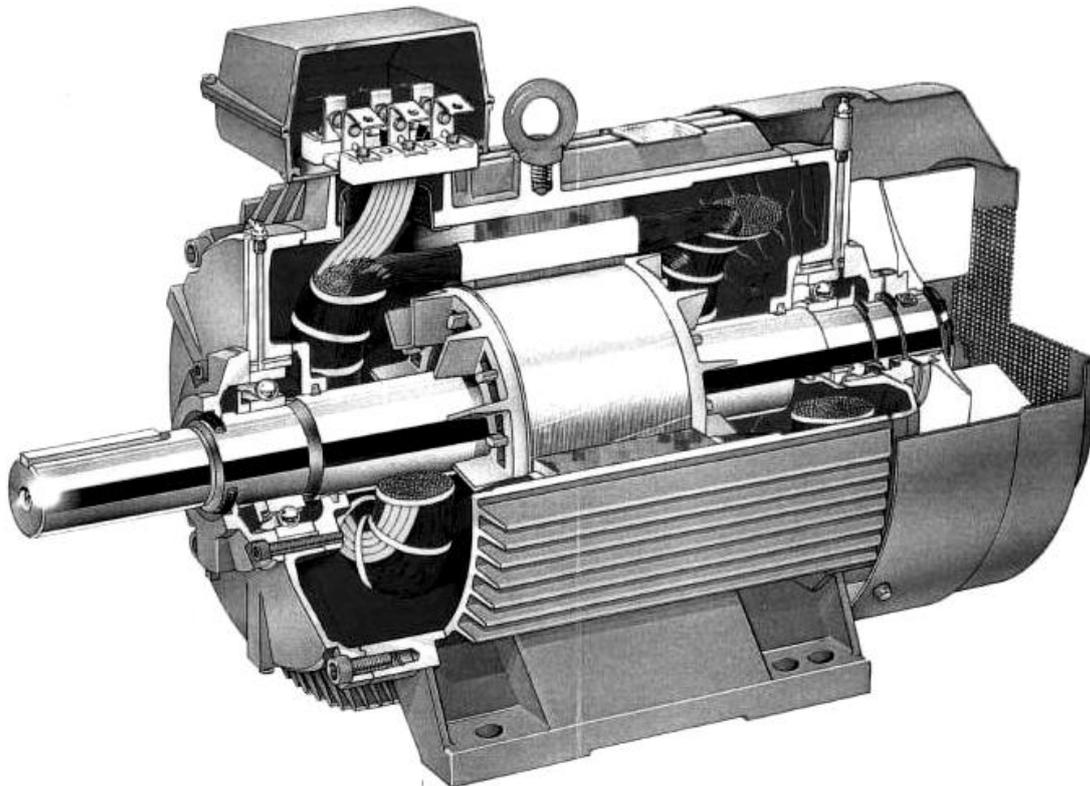
En 1889 Mikhail Dolivo-Dobrowolsky, ingeniero de la empresa alemana AEG, inventó el motor de inducción trifásico de rotor bobinado a la par que un generador trifásico y en 1991 el motor de inducción de rotor de jaula de ardilla con una topología muy similar a la utilizada hoy en día.

George Westinghouse compró las patentes de Tesla y utilizó a este ingeniero como consultor de su empresa. En la feria mundial de Chicago de 1893, la fábrica de Westinghouse presentó un motor bifásico de 300 HP, 12 polos a 220 V, lo que era una hazaña para esa época.

En 1893 AEG había construido motores asíncronos trifásicos de doble jaula de ardilla. Las empresas americanas Westinghouse y Thomson-Houston se unieron para fabricar motores asíncronos trifásicos y pasar del sistema bifásico al trifásico y poder alimentar estas máquinas.

Alrededor de 1900 el motor de inducción ya estaba preparado para el uso industrial a gran escala y durante el primer decenio del siglo XX algunas locomotoras europeas impulsadas por motores de inducción fueron capaces de alcanzar los 200 km/h. En cualquier caso, y para el transporte, el motor de corriente continua se impuso durante casi todo el siglo XX, hasta alrededor de 1985, cuando la tecnología PWM/IGBT dio la posibilidad de realizar conversiones de frecuencia de manera eficiente, lo que ha provocado un fuerte retorno al uso de motores de inducción combinados con variadores de frecuencia en tracción y otras aplicaciones industriales.

A pesar de que los motores de inducción contemporáneos tienen tipologías más elaboradas y su eficiencia y comportamiento son muchos mejores en la actualidad, el principio de funcionamiento se mantiene básicamente igual. Esto es, un arrollamiento polifásico en el estátor produce un campo magnético giratorio, dicho campo induce unas tensiones que a su vez generan unas intensidades en los arrollamientos cortocircuitados del rotor. La interacción entre el campo producido por el estátor y las corrientes inducidas en el rotor produce un par que hace que el motor gire. Dado que el par electromagnético no es nulo cuando la velocidad es nula, el motor de inducción tiene auto-arranque. La figura 2-3 muestra una sección de un motor de inducción trifásico actual [2]



2-3 Motor de inducción trifásico actual

El motor de inducción es el motor que se utiliza con más frecuencia en el accionamiento industrial. La evolución ha sido enorme desde los primeros pasos hasta nuestro días, de modo que un motor actual de 100 CV ocupa el mismo espacio que el que ocupaba uno de 7.5 CV construido en 1897

2.3. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

La máquina asíncrona o de inducción consta de una parte fija llamada estátor y una parte móvil llamada rotor, separadas ambas por un pequeño espacio de aire denominado entrehierro.

La máquina de inducción es básicamente una máquina polifásica de corriente alterna conectada a una red eléctrica bien por el estator, bien por el rotor o bien por ambos. En el caso que atañe al presente proyecto, la alimentación es trifásica y a través de los arrollamientos inductores (generalmente el estátor), produciendo un campo giratorio en el entrehierro de la máquina. Este campo inducirá tensiones en los arrollamientos del inducido (rotor generalmente), que está galvánicamente aislado de la red de alimentación. Si los arrollamientos del rotor o inducido están cortocircuitados se generarán corrientes alternas en su seno.

La interacción entre el campo del inductor y las corrientes del inducido produce un par desde velocidad nula del rotor hacia adelante. La velocidad del rotor en la que las intensidades de los devanados del secundario son nulas es conocida como velocidad síncrona. Los arrollamientos del rotor pueden ser polifásicos (rotor bobinado) o estar contruidos mediante barras cortocircuitadas por anillos (rotor de jaula de ardilla).

Todos los arrollamientos tanto estatóricos como rotóricos están ubicados en ranuras uniformes practicadas en chapas delgadas de acero al silicio. La máquina de inducción tiene un entrehierro bastante uniforme de 0,2 a 3 mm, correspondiendo los valores más altos a potencias mayores, del orden de MW.

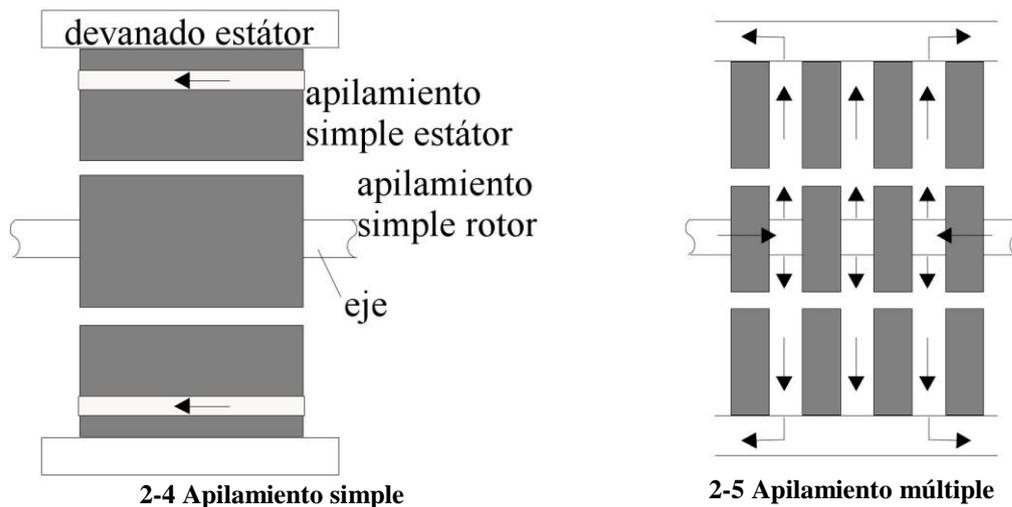
Los devanados del rotor pueden estar cortocircuitados, conectados a una impedancia externa o conectados a una fuente de potencia con frecuencia y tensión variables. En el último caso la máquina funciona casi como una máquina síncrona ya que está doblemente alimentada y ambas frecuencias, estatórica y deslizamiento-rotórica vienen impuestas, la última dependiente de la velocidad.

Las partes principales de las máquinas de inducción son:

- La corona magnética ranurada estatórica
- Los devanados eléctricos estatóricos
- La corona magnética ranurada rotórica
- Los devanados eléctricos rotóricos
- El eje del rotor
- La carcasa del estátor más los cojinetes.
- El sistema de refrigeración
- La caja de bornas

2.3.1. LAS CORONAS MAGNÉTICAS

Las coronas magnéticas del rotor y el estátor están compuestas de finas chapas de acero al silicio con grano no orientado, aisladas entre sí mediante barnices, con el objeto de reducir las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault. Las chapas pueden ser empaquetadas en un único apilamiento, apropiado para refrigeración axial o en múltiples apilamientos formando canalizaciones radiales para una refrigeración radial.



Los apilamientos simples se han utilizado tradicionalmente para potencias inferiores a los 100 kW, pero gracias a la significativa mejora en la ventilación axial se llega a utilizar en máquinas de hasta 2 MW. El concepto de apilamiento múltiple es necesario aún para máquinas de elevada potencia con grandes coronas.

Las coronas de apilamiento múltiple, si bien favorecen la refrigeración, tienen algunas desventajas, como la de incrementar las pérdidas en los devanados hasta en un 10% debido a que zonas que atraviesan los conductos de refrigeración no producen par a pesar de tener corriente eléctrica en dichos devanados. Igualmente, el campo electromagnético creado por las bobinas en las zonas de los canales de refrigeración se traduce en inductancias de dispersión que tienden a reducir el par y el factor de potencia, reduciendo asimismo el par de arranque.

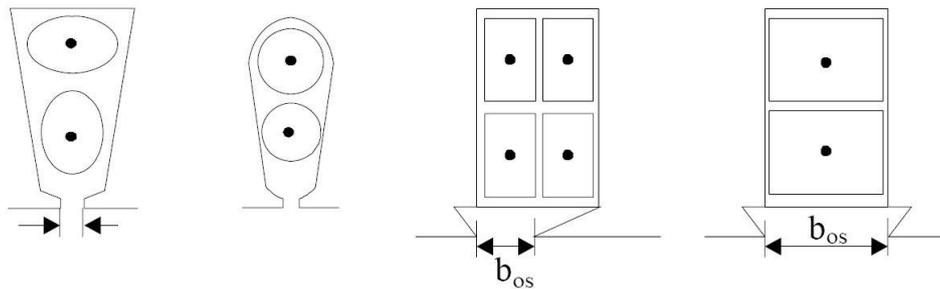
Para máquinas de inducción con frecuencia principal de hasta 300 Hz, se suelen utilizar chapas de acero al silicio de grano no-orientado de 0,5 mm de espesor, que conducen a unas pérdidas en las coronas razonables de entre 2 y 4 W/kg con campo de 1 T a 50 Hz.

Para frecuencias mayores se requieren laminaciones más finas. Como alternativa se pueden utilizar materiales anisótropos, basados en polvo magnético que pueden ser utilizados para reducir las pérdidas en el núcleo para frecuencias altas, por encima de los 500 Hz, con un factor de potencia inferior.

2.3.2. GEOMETRÍA DE RANURA

El entrehierro tiene que ser atravesado por el campo magnético producido en el primario. Esto a su vez induce tensiones y genera intensidades en los arrollamientos del secundario. Para magnetizar el aire se requieren grandes fuerzas magnetomotrices y como parece lógico, cuanto menor espesor tenga el entrehierro menos fuerza magnetomotriz será necesaria para la magnetización. El límite inferior del espesor del entrehierro viene determinado por restricciones mecánicas y por el cociente entre las aberturas del estátor y del rotor b_{0s} , b_{0r} y el entrehierro g , de modo que se limiten las pérdidas originadas por la superficie de la corona y por las pulsaciones del flujo producidas por los dientes formados entre ranura y ranura (figura 2-6).

El poner los arrollamientos en ranuras produce una disminución de la corriente de magnetización, a la vez que facilita la fabricación de los devanados. Además el bobinado en ranuras es mejor en términos de rigidez mecánica y transmisión de calor (a las coronas). Por último la fuerza magnetomotriz por unidad de longitud periférica (altura de bobina) puede ser aumentada, permitiendo la construcción eficiente de máquinas con una mayor potencia. Como contrapartida se pierde la posibilidad de distribuir los arrollamientos de forma que se cree una distribución puramente senoidal de las fuerzas magnetomotrices a lo largo de la periferia del entrehierro, lo cual es un precio pequeño frente a los beneficios antes mencionados.



2-6 Distintos tipos de ranuras: semicerradas, semiabierta y abierta

La geometría de la ranura depende principalmente del nivel de potencia de la máquina y, por tanto, del tipo de espira magnética (con sección rectangular o circular) con la que están hechos los devanados.

Con una sección de cable circular en motores de baja potencia, las bobinas pueden ser introducidas hilo a hilo y por tanto la apertura de la ranura puede ser pequeña. En bobinas preformadas, para máquinas grandes, hechas mediante sección rectangular se utilizan ranuras abiertas o semiabiertas. Esto se aprecia en la figura 2-1.

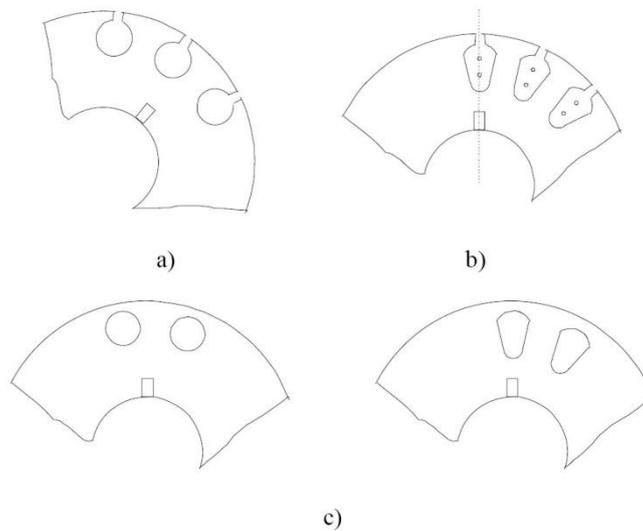
En general las ranuras pueden ser rectangulares, ligeramente trapezoidales o trapezoidales con bordes redondeados. Las abiertas o semiabiertas tienden a ser rectangulares, mientras que las semicerradas suelen ser trapezoidales.

En la máquina de inducción solo las ranuras de un lado son abiertas, mientras que en el otro son semicerradas o semiabiertas. El motivo es que un ratio grande de apertura de ranura frente al espesor del entrehierro ($b_{0s}/g > 6$) conlleva una menor densidad de flujo media para una fuerza magnetomotriz estática determinada, y también a una pulsación en el flujo originada por los dientes del rotor que producirá

armónicos en el mismo y por tanto mayores pérdidas en el núcleo, pares parásitos, ruido y vibración. Cerrar demasiado la abertura del cuello de las ranuras conduce, por otro lado, a una inductancia de dispersión mayor, ya que crea un camino con una menor reluctancia a través de dicho cuello, provocando una disminución del par.

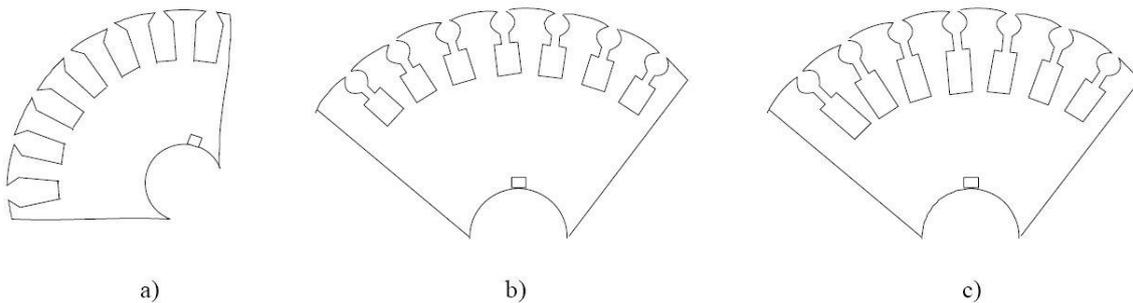
La geometría de las ranuras de los rotores de jaula es mucho más diversa, dependiendo de las especificaciones de carga y arranque, del tipo de alimentación (tensión/frecuencia constante o variable) y del rango de par deseado.

Los motores de alta eficiencia con un par de arranque inferior al nominal suelen tener ranuras circulares semicerradas y los motores con un par de arranque del orden del nominal, ranuras trapezoidales redondeadas. Las ranuras cerradas suelen utilizarse para reducir el ruido y las fluctuaciones del par en bombas domesticas, a costa de una mayor inductancia de dispersión (figura 2-7).



2-7 Ranuras del rotor

a) Semicerrada circular b) Semicerrada trapezoidal redondeada c) Cerradas



2-8 Ranuras del rotor para máquinas de inducción de baja intensidad de arranque

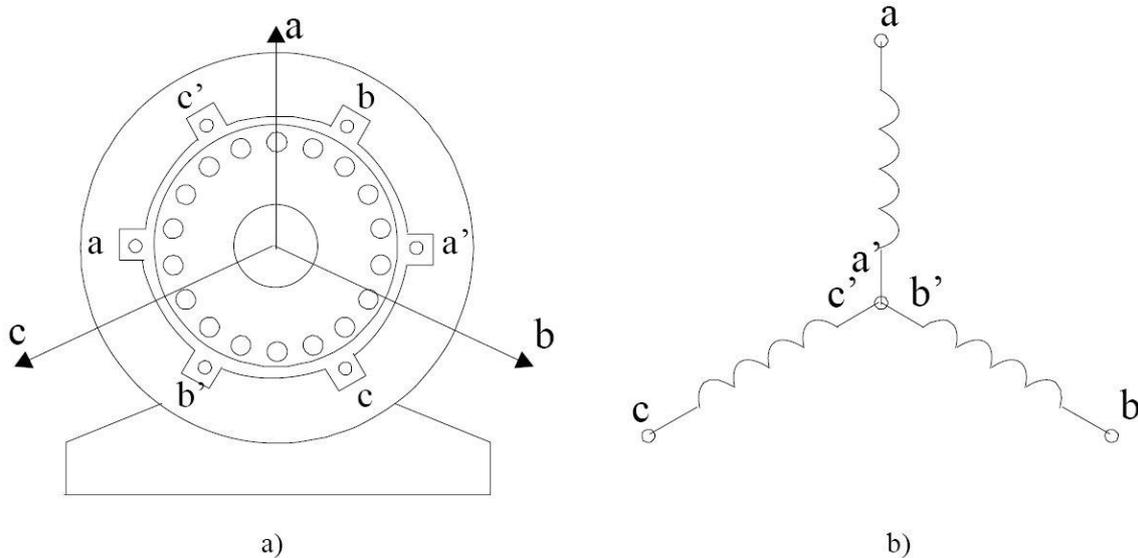
a) Gran deslizamiento, alto par de arranque b) Par de arranque moderado c) Par de arranque muy elevado

Los rotores de ranura profunda se utilizan para obtener un gran par de arranque y un deslizamiento elevado. Las ranuras trapezoidales inversas o las ranuras para doble jaula son utilizadas para obtener bajas intensidades de arranque a la vez que un par de arranque elevado. En todos estos casos la inductancia de dispersión del motor es más

elevada, y por tanto el par máximo disminuye mucho, en algunos casos llega a ser el 150% del par nominal.

2.3.3. DEVANADOS DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

La máquina de inducción tiene devanados tanto en el estator como en el rotor, alojados en las ranuras previamente descritas. Para el caso de un motor trifásico sencillo en el que cada fase esté realizada con una sencilla bobina girada 120° con respecto a cada una de las otras dos, como se muestra en la figura 2-9.



2-9 Motor de inducción con 6 ranuras en el estator y rotor de jaula

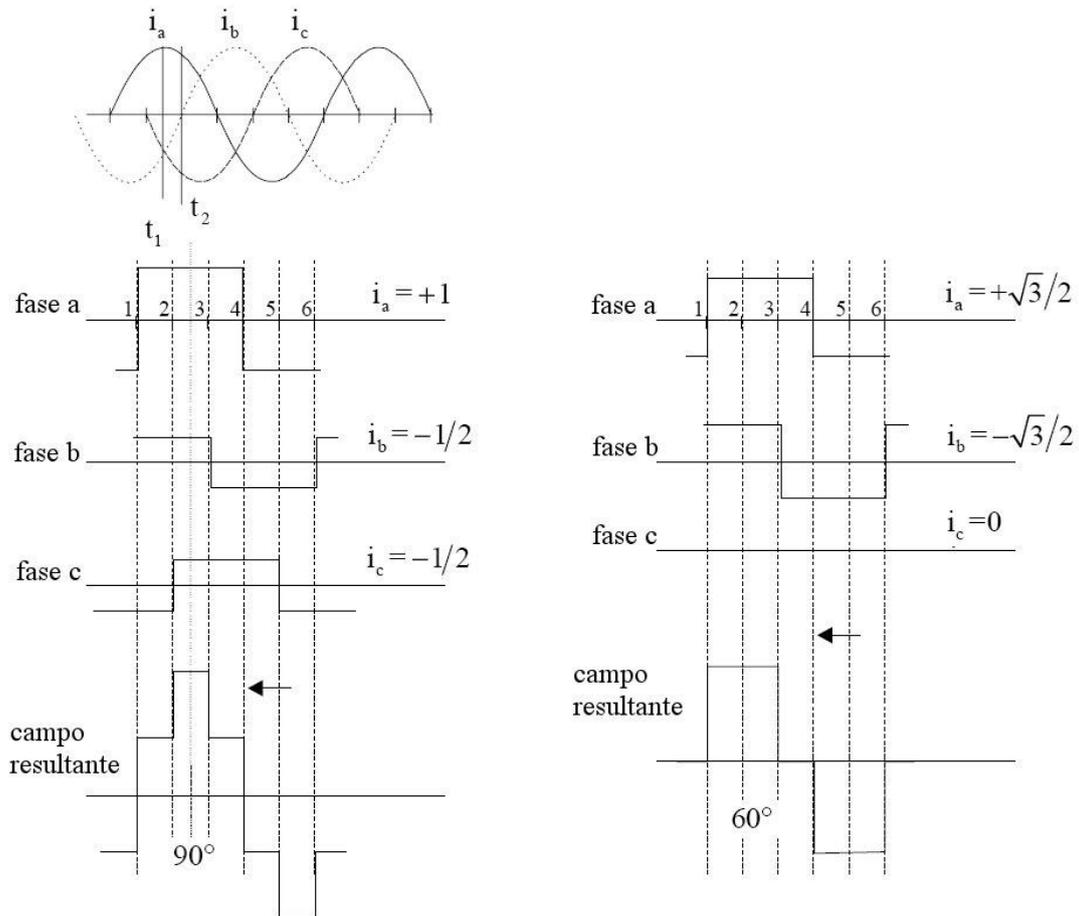
a) Sección del motor

b) Esquema de conexión en estrella

Este caso es el caso concreto de un par de polos, pero si lo que se tuviera fueran p pares de polos, habría $3p$ bobinas desplazadas $120/p$ grados y siguiendo con el caso sencillo, tantas ranuras como el doble del número de bobinas.

El campo magnético producido por cada fase tiene su máximo en la mitad de la bobina de fase y, obviando el efecto de la apertura de las ranuras, dicho campo tendrá una distribución espacial rectangular uniforme que variará en amplitud senoidalmente en el tiempo con una frecuencia igual a la de la tensión aplicada en la bobina.

Es evidente en la figura 2-10 que cuando el ángulo eléctrico varía en $\pi/6$ rad también lo hace la máxima fundamental de la densidad de inducción del entrehierro, y se produce una onda giratoria de campo. Su sentido de marcha es del eje de la fase a al de la fase b . Si la intensidad en la fase a está adelantada en el tiempo a la fase b , e igualmente la intensidad de la fase b esta adelantada en el tiempo a la intensidad de la fase c , la velocidad angular de este campo será simplemente ω en términos eléctricos, o sea la velocidad angular de variación de las ondas fundamentales de intensidad, o en términos mecánicos ω/p .

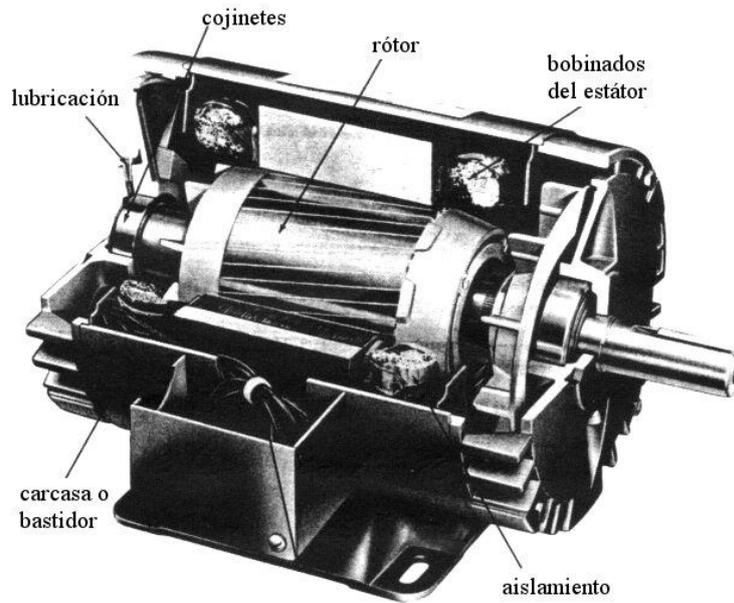


2-10 Corrientes del estátor y campo magnético del entrehierro para dos instantes

Dado que el deslizamiento nominal s_n es bastante pequeño, la velocidad nominal será solo ligeramente inferior a un submúltiplo de la frecuencia de alimentación. La tosca configuración de bobinados utilizada en la figura 2-9 puede ser mejorada incrementando el número de ranuras y utilizando dos capas de bobinas en cada ranura, de forma que el contenido de armónicos en la densidad de flujo del entrehierro se ve reducido, aproximándose mejor campo giratorio senoidal puro, a pesar de la intrínseca discontinuidad que produce el alojamiento de los conductores en ranuras.

En la figura 2-11 se muestra una máquina de inducción con el estátor bobinado. Las tres fases pueden estar conectadas en estrella o en triángulo, de hecho hay un tipo de arranque en el que se cambian las conexiones de estrella a triángulo con el objetivo de reducir las corrientes en el estátor.

Los rotores bobinados se construyen de forma similar, con unos anillos rozantes mediante escobillas de forma que se pueda alimentar y excitar el rotor y hacer funcionar a la máquina como generador o insertar resistencias en el circuito rotórico para así reducir las intensidades en el arranque.



2-11 Máquina de inducción de estator bobinado trifásico y rotor de jaula

2.3.4. DEVANADOS ROTÓRICOS EN JAULA

Como se ha mencionado anteriormente, el rotor de la máquina de inducción puede ser suministrado con un devanado en forma de jaula simple o doble, a parte del típico y ya comentado rotor con devanado trifásico. Las barras de la jaula y los anillos de conexión son fabricados en fundición de aluminio para pequeñas y medianas potencias y de latón o cobre para potencias elevadas (figura 2-12).



2-12 Jaula de ardilla típica

Para los motores de alta eficiencia el material preferido para la construcción de la jaula es el cobre, debido principalmente a la mayor conductividad, mayor densidad de corriente conducida y por sus temperaturas de trabajo.

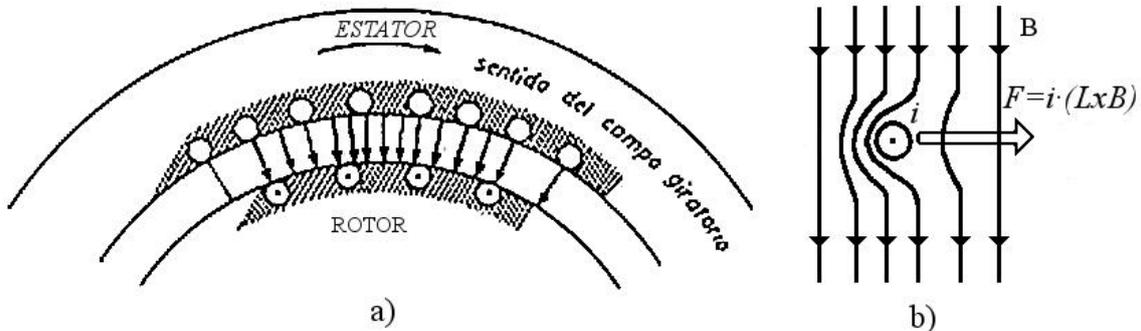
A medida que la fabricación mediante fundición por inyección a presión de jaulas de cobre va evolucionando la jaula de cobre se va imponiendo cada vez más, incluso para pequeños motores. Por otro lado, la fundición por inyección a presión del aluminio a temperaturas relativamente bajas hacen que los costes de producción en masa de las jaulas en este material sean bastante bajos para máquinas de pequeña potencia.

2.4. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Como ya se ha visto, el devanado del estator está constituido por tres arrollamientos desfasados $2\pi/3$ rad en el espacio y de $2p$ polos. Al introducir por ellos corrientes de una red trifásica de frecuencia f_1 , se produce una onda rotativa de fuerza magnetomotriz distribuida de forma senoidal por la periferia del entrehierro, ésta a su vez produce un flujo giratorio cuya velocidad viene expresada por:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \text{ r.p.m.} \quad (2-1)$$

n_1 recibe el nombre de velocidad de sincronismo. Este campo giratorio inducirá una fuerza electromotriz en los conductores del rotor, y si su circuito eléctrico está cerrado, aparecerán intensidades que intentarán oponerse a la variación de flujo del estator. En la figura 2-13 se muestra las líneas de inducción en el entrehierro producida por el devanado del estator y cómo atraviesan el entrehierro.



2-13 Recorrido del flujo electromagnético

De acuerdo con la ley de Faraday, la fuerza electromotriz inducida en un conductor de longitud L que se mueve a la velocidad v dentro de un campo en una región donde existe inducción B , tiene un valor:

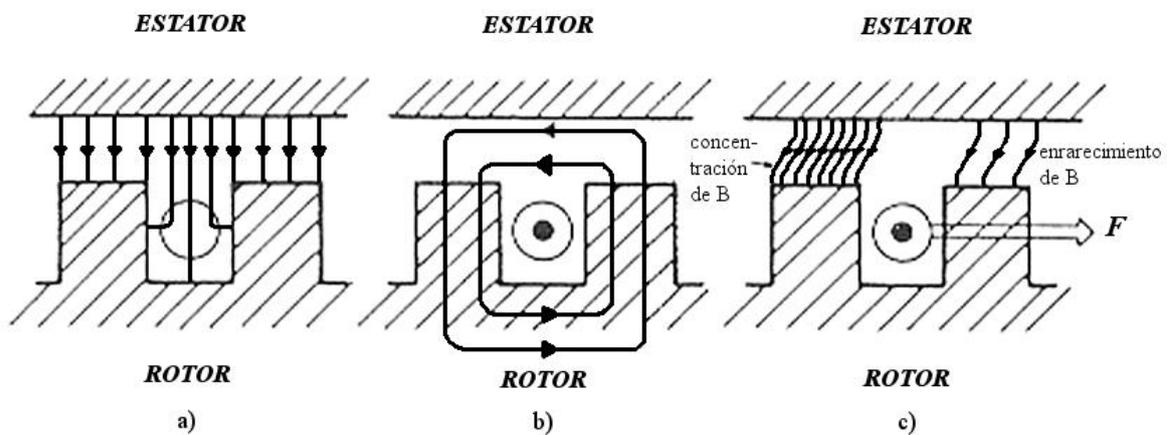
$$e = \int (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot L \quad (2-2)$$

El sentido de la fuerza que aparecerá en los conductores del rotor se obtiene aplicando la conocida ley vectorial (ley de Laplace):

$$F = i \cdot (L \times B) \quad (2-3)$$

Multiplicando la fuerza por el radio del rotor y el número de conductores existentes en el mismo, se obtendrá el par total de la máquina que tenderá a mover el rotor siguiendo al campo giratorio del estator.

Este razonamiento tan simple, aunque da los resultados correctos no es del todo cierto, debido a que en la realidad y como muestra la siguiente figura, los conductores del rotor están situados dentro de unas ranuras, de tal forma que el campo B no atraviesa al conductor y en consecuencia la fuerza resultante es nula. La explicación de esta paradoja debe buscarse en la deformación de las líneas de campo B al circular corriente por los conductores



2-14 Deformación de las líneas de campo en el entrehierro

En la figura 2-14a) se muestra el reparto de la inducción en la ranura y el diente cuando la intensidad en el conductor es cero y se observa que debido a la menor reluctancia de los dientes las líneas de B tienden a concentrarse en ellos sin atravesar apenas al conductor. En la figura 2-14b) se muestran la forma de las líneas de inducción producidas únicamente por el conductor llevando corriente.

En la figura 2-14c), en la que se representa la resultante de ambos campos, se observa que la deformación de las líneas de inducción es similar a la que se obtenía para el caso de un conductor "aislado", apareciendo una fuerza resultante en el sentido indicado, pero con la diferencia fundamental de que esta fuerza actúa realmente en los dientes y no en los conductores (lo que constituye además una ventaja, ya que si la fuerza actuara sobre los conductores comprimiría los aislamientos de éstos sobre los dientes, lo que sería perjudicial para la vida de los aislantes).

El momento total de estas fuerzas origina el par de rotación de la máquina que obliga a girar al rotor siguiendo el movimiento del campo giratorio, de tal forma que cuanto más se aproxima a la velocidad n_1 del campo, tanto menor resulta la fuerza electromotriz inducida en los conductores del rotor y en consecuencia, resultan también reducidas las corrientes en el mismo. Esto provoca una disminución del par interno o par electromagnético del motor.

Si, como caso límite, el rotor girase a la velocidad de sincronismo n_1 , no habría entonces movimiento del campo giratorio respecto del rotor, desapareciendo con ello la fuerza electromotriz inducida y, como consecuencia de esto, se anularían la corriente y el par.

De este modo, la velocidad de sincronismo n_1 constituye el límite teórico al que puede girar el rotor. El motor debe girar a una velocidad inferior a la de sincronismo ($n < n_1$), es decir, su velocidad de régimen es asíncrona.

Se conoce con el nombre de deslizamiento al cociente:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (2-4)$$

cuyo valor está comprendido en los motores industriales entre el 3% y el 8% a plena carga. Al aumentar la carga mecánica del motor, el par resistente se hace mayor que el par interno y el deslizamiento aumenta, esto provoca un aumento en las corrientes del rotor, gracias a lo cual aumenta el par motor y se establece el equilibrio dinámico de los momentos resistente y motor.

Las frecuencias de las corrientes del rotor, están relacionadas con la frecuencia del estator por medio de la expresión:

$$f_2 = s f_1 \quad (2-5)$$

2.4.1. FUNCIONAMIENTO COMO TRANSFORMADOR

En el caso de que el rotor esté parado, se cumple $n = 0$, es decir $s = 1$, lo que indica que en estas circunstancias, las frecuencias del estator y del rotor coinciden, es decir $f_2 = f_1$.

Si se denomina E_2 el valor eficaz de la fuerza electromotriz por fase del rotor, N_2 al nº de espiras por fase, Φ_m al flujo máximo que lo atraviesa y al coeficiente del devanado, se cumplirá:

$$E_2 = 4,44 \xi_{b2} f_1 N_2 \Phi_m \quad (2-6)$$

De una forma similar, si se denomina E_1 al valor eficaz de la fuerza electromotriz inducida por fase en el estator, se tendrá:

$$E_1 = 4,44 \xi_{b1} f_1 N_1 \Phi_m \quad (2-7)$$

La diferencia con el transformador estriba en que en los motores aparecen unos coeficientes de devanado ξ_{b1} y ξ_{b2} que representan factores reductores (cuyos valores son menores, pero muy cercanos a la unidad) para tener en cuenta que las fuerzas electromotrices de las diversas espiras del devanado, al estar distribuido en ranuras por

las periferias del estator y del rotor, llevan un desfase entre sí. Este hecho obliga a realizar una suma geométrica (fasorial) de las fuerzas electromotrices inducidas en las diferentes bobinas, cosa que no ocurre en el caso de los transformadores, donde las fuerzas electromotrices de todas las espiras van en fase por tratarse de un devanado concentrado y la fuerza electromotriz total se obtiene como suma aritmética de las fuerzas electromotrices individuales.

2.4.2. FUNCIONAMIENTO COMO MOTOR

Cuando el rotor gira a la velocidad n , en el sentido del campo giratorio, el deslizamiento ya no es la unidad y las frecuencias de las corrientes del rotor son iguales a f .

Ahora la nueva fuerza electromotriz inducida en este devanado es

$$E_{2s} = 4,44 \xi_{b2} f_2 N_2 \Phi_m = s E_2 \quad (2-8)$$

La fuerza electromotriz anterior E_{2s} producirá unas corrientes en el rotor de frecuencia f_2 , de tal forma que éstas a su vez crearán un campo giratorio, cuya velocidad respecto a su propio movimiento será

$$n_2 = \frac{60 f_2}{p} \quad (2-9)$$

considerando que el rotor está devanado con el mismo número de polos que el estator. Como la máquina gira a n r.p.m., la velocidad del campo giratorio del rotor respecto al reposo será $n_2 + n$. En consecuencia la velocidad absoluta del campo del rotor será:

$$f_2 = s f_1 = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot \frac{p n_1}{60} = \frac{p(n_1 - n)}{60} \quad (2-10)$$

$$n_2 = n_1 - n \quad (2-11)$$

lo que indica que el campo del rotor gira en sincronismo con el campo del estator. Realmente, son las fuerzas magnetomotrices de ambos devanados, las que interaccionan para producir el flujo resultante en el entrehierro.

Debe hacerse notar que esta interacción sólo es posible si las fuerzas magnetomotrices están enclavadas sincrónicamente, es decir, si las ondas de fuerza magnetomotriz de estator y rotor giran a la misma velocidad n_1 , lo que requiere que el número de polos con el que se confeccionan ambos arrollamientos sean iguales, aspecto que representa una exigencia constructiva de estas máquinas.

No es necesario sin embargo, que el número de fases del estator y del rotor deban ser iguales, ya que el campo giratorio dentro del cual se mueve el rotor es independiente del número de fases del estator.

Los motores con rotor devanado o con anillos se construyen normalmente para tres fases, es decir, igual que las del estator. En cambio el motor en jaula de ardilla está

formado por un gran número de barras puestas en cortocircuito, dando lugar a un devanado polifásico, en general de m_2 fases.

Lo anterior es fácil de comprender: si se considera, por ejemplo, un rotor trifásico de dos polos y 6 barras o conductores en total, se habrá formado un devanado trifásico en el que cada fase consiste en una sola espira (dos barras opuestas formarían la espira).

Si, considerando una máquina bipolar, el rotor tienen 10 barras, se podrá decir que se ha logrado un devanado pentafásico con 1 espira por fase. En general se podrá decir que si el rotor tiene NB barras y $2p$ polos se tendrán m_2 fases:

$$m_2 = \frac{NB}{2p} \quad (2-12)$$

donde cada fase está formada por una única espira.

Debe destacarse que cuando el rotor es de jaula de ardilla, las leyes del bobinado del estator son las que determinan el número de polos del motor.

En el rotor se obtienen corrientes por inducción, por lo que las diferencias de fase que aparecen entre las corrientes de las diversas barras del rotor coinciden con el ángulo eléctrico que forman las mismas. Así, si el rotor tiene 36 barras y el estator tiene 2 polos, se habrán formado 18 fases, pero la misma jaula de ardilla en el interior de un estator de 4 polos daría lugar a 9 fases, etcétera.

En resumen, una jaula de ardilla es equivalente a un devanado rotórico de m_2 fases de una espira por fase, donde m_2 viene expresado por la relación anterior. Cuando el rotor está bobinado (o con anillos) se disponen entonces de m_2 fases (normalmente $m_2 = 3$) con N_2 espiras por fase. En ambas situaciones, el estator siempre está formado por m_1 fases (generalmente $m_1 = 3$) con N_1 espiras por fase.

Como quiera que el sentido de transferencia de la energía en un motor asíncrono se produce de estator a rotor por inducción electromagnética de un modo similar al que se obtenía entre el primario y el secundario de un transformador, esto hace que la analogía se traslade no solamente a la simbología de las magnitudes implicadas sino incluso también, en algunos autores, a las propias denominaciones.

2.4.3. FUNCIONAMIENTO COMO GENERADOR

Si mediante una máquina motriz cualquiera se acelera el rotor de la máquina de inducción, cuyo estator esté conectado a una red trifásica, hasta una velocidad superior a la de sincronismo, se tendrá de nuevo una velocidad relativa entre el campo magnético en el entrehierro y los conductores rotóricos. Esto motivará la inducción en el mismo de fuerzas electromotrices y corrientes de frecuencia correspondiente a la diferencia de velocidades, si bien ahora, al cambiar el signo de la velocidad relativa, los sentidos de las fuerzas electromotrices y de las corrientes rotóricas serán opuestos a los que existían en el funcionamiento como motor.

Tal inversión de sentido implicará, también, un cambio de signo en el par determinado por la acción del campo del estator sobre las corrientes inducidas en el rotor. Esto significa que en lugar de un par motor tendremos ahora un par resistente, opuesto al par de la máquina motriz, que mantiene la velocidad del rotor por encima de la de sincronismo. En estas condiciones, la máquina de inducción en vez de tomar energía eléctrica de la red primaria, lo que hace es ceder a esta red la energía correspondiente al par resistente, es decir, pasa a funcionar como generador.

El funcionamiento como generador de la máquina asíncrona exige que la red primaria, a la que se halla conectado el estator, esté alimentada por otras fuentes de energía eléctrica que, a la vez que fijan la pulsación de la corriente y la velocidad de sincronismo del campo giratorio, suministren a la máquina de inducción la energía reactiva precisa para la excitación. Puesto que la máquina por sí misma es incapaz de generar corriente magnetizante, esta debe ser suministrada por la red a la que está conectada, tanto en el funcionamiento como motor como cuando lo hace como generador.

2.4.4. FUNCIONAMIENTO COMO FRENO ELECTROMAGNÉTICO

En los dos modos de funcionamiento últimos considerados, el rotor gira en el mismo sentido que el campo giratorio. Veamos ahora que sucede si conectado el estator a la red, el rotor es obligado, por medio de un medio motriz externo, a girar en sentido contrario al del campo magnético. Evidentemente, para que esto sea posible, el elemento motor tendrá que desarrollar un par superior al que da la máquina de inducción y en cuantía que depende de la velocidad impuesta al rotor.

La máquina de inducción en estas condiciones actúa pues como un freno electromagnético, sacándose partida de ello en determinadas aplicaciones, como por ejemplo en el descenso de cargas en las grúas, cuyo mecanismo de elevación es accionado por motores de inducción, y particularmente en casos de emergencia, cuando se desea frenar bruscamente una máquina, lo que se logra invirtiendo el sentido del campo magnético del motor por el simple cambio de orden de la sucesión de las fases. Esta maniobra, que prácticamente se reduce a cruzar la conexión de dos fases a la red, se traduce en una brusca inversión del sentido del par, que de motor pasa a resistente, o sea a actuar como freno. Una vez la máquina parada, de mantenerse la conexión del estator a la red se pondría a girar como motor en sentido opuesto, por lo cual es obligado, de no convenir este movimiento, desconectarla de la red tan pronto se alcance el reposo o tienda a iniciar el giro en el sentido contrario.