

Indice

1. – Máquinas asíncronas.

1.1 – Generación del campo giratorio.

1.1.1 – El estator

1.2 – Funcionamiento del rotor.

1.3 – Características de funcionamiento de los motores de inducción.

- Velocidad de sincronismo.
- Par motor.
- Par de giro.
- Deslizamiento.

1.4 – Ecuaciones del par motor e intensidad del rotor en función del deslizamiento.

1.4.1. – Motor de inducción con rotor de alta resistencia.

1.4.2. – Motor de inducción con rotor devanado.

1.4.3. – Motor con doble jaula de ardilla.

1.5 – Balance energético, rendimiento, deslizamiento y factor de potencia de un motor de inducción.

- Balance energético.
- Rendimiento.
- Deslizamiento.
- Factor de potencia.

1.6 – Arranque del motor trifásico. Corriente y par de arranque. Conexión estrella – triángulo.

1.6.1 – Arranque de los motores de jaula de ardilla trifásicos.

- Arranque directo.
- Arranque de motores con arrollamiento partidos.
- Arranque del motor asíncrono trifásico en estrella – triángulo.
- Arranque estatístico por resistencias.

1.7 – Rotor con anillos rozantes, rotor de jaula y rotor de efecto skin. Características del par.

1.8 – Arranque rotórico por resistencias de motores de anillo.

1.9 – Inversión del sentido de giro.

1. – Máquinas asíncronas.

Contrariamente a las máquinas síncronas empleadas normalmente como generadores, las máquinas asíncronas han encontrado su principal aplicación como motores, debido a la sencillez de su construcción. El motor asíncrono trifásico es hoy el motor usual de accionamiento en todas las redes de distribución.

1.1. – Generación del campo giratorio.

El campo magnético del motor asíncrono es también un campo giratorio. En el caso de un motor trifásico está generado por las tres corrientes desfasadas que circulan por el arrollamiento estatórico. Para que se genere el campo giratorio es preciso que los arrollamientos estén uniformemente repartidos en la periferia del estator, como lo están en el tiempo (es decir, en el orden de sucesión) las 3 corrientes de fase. En máquinas bipolares el ángulo entre bobinas correspondientes de cada fase deberá ser, por consiguiente, de 120° . Las 3 corrientes estatóricas del lugar entonces a 3 campos alternos, también desfasados 120° entre sí, cuya resultante es un campo magnético giratorio. La dirección que posee este campo en un momento dado puede representarse por medio de una flecha.

El sentido de las corrientes y la dirección del campo giratorio en una máquina bipolar, que por razones de sencillez se ha supuesto provista únicamente de 6 ranuras. El tiempo correspondiente a cada posición puede deducirse a partir del ángulo girado por el campo (de 0 a 360°). Permutando dos bornes de la red se invierte el sentido de giro del campo. El rotor se movería entonces en sentido contrario al de las agujas de un reloj.

1.1.1 – El estator

Es la parte fija del motor. Está constituido por una carcasa en la que está fijada una corona de chapas de acero de calidad especial provistas de ranuras. Los bobinados están distribuidos en estas ranuras y forman un conjunto de devanados que contienen tantos circuitos como fases de la red de alimentación.

1.2. – Funcionamiento del rotor.

Él es la parte móvil del motor. Está situado en el interior del estator y consiste en un acoplamiento de chapas de acero que forman un cilindro solidario con el árbol del motor.

El rotor del motor trifásico es atravesado por el campo giratorio engendrado en el estator. El arrollamiento rotórico puede ejecutarse como el estatórico en forma repartida, con las bobinas unidas en serie (rotor bobinado o con anillos rozantes); o también a base de barras (rotor de jaula o en cortocircuito). Estas barras, de aluminio inyectado a presión (las aletas de refrigeración hechas en la misma operación hacen masa con el rotor) están conectadas en paralelo y al mismo tiempo puestas en cortocircuito por medio de dos aros extremos. Dichos aros suelen fundirse conjuntamente con la aleación de aluminio que rellena las ranuras del rotor.

En uno y otro caso queda el arrollamiento rotórico en cortocircuito una vez el motor está en servicio. Igual que en el secundario de un transformador, en el arrollamiento rotórico se induce también una f.e.m., la cual, por estar éste cerrado sobre sí mismo, da lugar a la circulación de una corriente rotórica. La acción conjunta del campo giratorio y del campo debido a la corriente rotórica determina, como en todos los motores, un par de giro. Éste par arrastra al rotor en el sentido de rotación del campo giratorio y le comunica una velocidad muy próxima a la de sincronismo. Tanto en reposo como en el instante inicial del arranque, el motor trifásico funciona igual que un transformador normal y genera en el rotor la tensión rotórica de reposo, cuya magnitud depende asimismo de la relación entre los números de espiras. En motores con rotor bobinado puede medirse esta tensión en los anillos rozantes (con el arrollamiento abierto). El valor de misma suele estar indicado en la placa de características.

Una vez el motor puesto en marcha se induce en el rotor, además de la tensión de reposo, una contratensión producida por el movimiento de los conductores rotoricos en el campo giratorio. Con el motor en servicio, la tensión rotorica efectiva equivale pues solamente a la diferencia entre las dos anteriores.

Si el rotor llegase a girar a la velocidad de sincronismo es evidente que ambas tensiones serían iguales (en magnitud), con lo cual la tensión rotórica efectiva resultaría nula. En tal caso no circularía tampoco corriente alguna por el rotor y desaparecería el par de giro. El motor trifásico funciona, pues, siempre algo rezagado con respecto a la velocidad de sincronismo: se dice que desliza. La diferencia entre esta última y la velocidad real del motor constituye la velocidad relativa de éste con respecto al campo. Recibe el nombre de deslizamiento el cociente de dividir la velocidad relativa por la de sincronismo; suele venir expresado en tanto por ciento. El motor trifásico es, por consiguiente, esencialmente asíncrono. A medida que la carga aumenta y con ella la corriente rotórica, va disminuyendo el numero de revoluciones. El deslizamiento a plena carga de los motores trifásicos normales es del orden de 5 % para potencias pequeñas y de 2-3 % para las mayores. La característica de servicio del motor trifásico es parecida a la del motor derivación de corriente continua. Intercalando resistencias en el circuito rotórico es posible conseguir una característica de más pronunciado descenso a efectos de regulación de la velocidad, pero entonces se originan pérdidas más elevadas y el rendimiento del motor baja.

1.3 – Características de funcionamiento de los motores de inducción.

• Velocidad de sincronismo.

A la velocidad del campo magnético giratorio se le denomina **velocidad de sincronismo** (n_s) y es igual a:

$$n_s = (120 / 2p) \cdot f \text{ (rpm)}$$

Siendo:

f = Frecuencia.

$2p$ = Numero de polos.

n_s representa la velocidad a la que tiene que girar un alternador del mismo numero de polos para proporcionar la misma frecuencia

• Par motor.

Cuando las líneas del campo magnético cortan las barras del rotor, se produce en ellas una fuerza electromotriz que da lugar a corrientes que circulan en los sentidos opuestos (en los hilos más próximos a los polos) es decir, que se producen esas corrientes en hilos separados 180°. Estos hilos se ven sometidos a unas fuerzas que tienden a moverlos en dirección perpendicular al campo magnético y produciendo con ello el llamado **par motor**.

En un motor eléctrico, el par M y la velocidad de giro n están relacionadas de tal forma que cuando la velocidad decrece el par aumenta.

• Par de giro.

El valor del par de giro del motor viene dado por:

$$M = K \cdot \Phi \cdot I_r$$

Siendo:

M = Constante.

δ = Flujo magnético del campo giratorio.

I_r = Intensidad de corriente del rotor.

• Deslizamiento.

La velocidad de giro del rotor debe ser menor que la velocidad del flujo magnético, puesto que si tuvieran la misma velocidad, las barras del rotor no cortarían las líneas de flujo y, por tanto, no se engendraría en ellas la f.e.m., resultando que la corriente en el rotor sería nula.

Debido a la resistencia con el aire y al rozamiento, el rotor no llega a alcanzar la misma velocidad que el flujo. Y a esa diferencia se le denomina deslizamiento.

1.4 – Ecuaciones del par motor e intensidad del rotor en función del deslizamiento.

Considerando:

δ Flujo giratorio del polo; E_r = Tensión del rotor; X_r = Reactancia de dispersión del rotor. ; R_r = Resistencia del rotor; f = Frecuencia de red; s = Deslizamiento. I_r = Intensidad del rotor; θ Angulo de desfase entre I_r y sE_r ; M = Par motor; sE_r = Tensión engendrada en el rotor para cualquier deslizamiento con $\delta = \text{cte}$; sf = Frecuencia en el rotor para cualquier deslizamiento; sX_r = Reactancia de dispersión para cualquier deslizamiento,

tenemos que la intensidad en el rotor vendrá dada por la expresión siguiente:

y el factor de potencia $\cos\theta_r$ será:

Hay que hacer notar que I_r tiene dos componentes, que son:

- $I_r \cdot \cos\theta_r$, en fase con sE_r .
- $I_r \cdot \sin\theta_r$, retrasada 90° respecto a sE_r .

La única componente que produce el par es $I_r \cdot \cos\theta_r$, por lo que el par resultante total se expresará como:

Si se sustituyen las ecuaciones 1 y 1.1 en la ecuación 1.2 se obtiene el par motor en función del deslizamiento.

Como el deslizamiento es muy pequeño, tanto funcione el motor en vacío como a plena carga, el producto sX_r es despreciable frente a R_r , de este modo las ecuaciones 1 y 1.2 se convierten en:

La intensidad y el par motor son directamente proporcionales al deslizamiento tanto en vacío como a plena carga.

1.4.1– Motor de inducción con rotor de alta resistencia.

En la Figura 15.13 se representa la relación entre la variación del par y la corriente del rotor con la velocidad de un motor de inducción de jaula de ardilla y baja impedancia. Podemos observar que en reposo el motor absorbe aproximadamente seis veces y media la corriente a plena carga, a la vez que desarrolla un par motor de arranque de una vez y media el par a plena carga.

Si se aumenta hasta tres veces la resistencia del rotor, se puede duplicar el par de arranque, reduciendo práctica-mente la corriente en un 25 %. En este caso se dice que el rotor es de alta resistencia.

Con esto se consigue que las características de arranque del motor sean buenas, por lo que su utilización principal se da en aquellas aplicaciones que conlleven arranques y para-das sucesivas.

1.4.2 – Motor de inducción con rotor devanado.

Si se precisa combinar el buen par de arranque del motor con rotor de alta resistencia con las elevadas caracterís-ticas de funcionamiento del motor con rotor de baja impedancia, es preciso variar la resistencia del rotor.

Esto se consigue utilizando un arrollamiento trifásico **en** el rotor, en vez de la jaula de ardilla.

Durante el proceso de arranque, toda la resistencia está en el circuito, suprimiéndose gradualmente hasta cero cuan-do el motor adquiere velocidad.

Dado que el motor de jaula de ardilla posee velocidad constante, si se precisa variar la velocidad hay que utilizar este tipo de motor, el cual permite obtener un margen de velocidades amplio, que va desde cero hasta un 95 % apro-ximadamente.

1.4.3 – Motor con doble jaula de ardilla.

Otro procedimiento que permite disponer de un rotor de alta resistencia en el arranque y baja durante el funciona-miento es el motor de rotor devanado con doble jaula de ardilla.

Las barras gruesas se sitúan en el interior del rotor, siendo su reactancia muy elevada a la frecuencia de la red y circulando muy poca comente a rotor parado.

Por el contrario, las barras delgadas de la superficie **del** rotor poseen pequeña reactancia pero una resistencia ele-vada. **De** este modo, en el momento del arranque solamen-te transportan corriente las barras de alta resistencia **del rotor**, comportándose como un rotor de alta resistencia.

Por el contrario, cuando el motor alcanza velocidad, la reactancia en las barras gruesas disminuye a la vez que la corriente total del rotor aumenta hasta que la velocidad hace que la corriente prácticamente se iguale con la corrien-te que circula por las barras delgadas, siendo la resistencia pequeña en el momento de funcionamiento.

1.5 – Balance energético, rendimiento, deslizamiento y factor de potencia de un motor de inducción.

- **Balance energético.**

- **Rendimiento.**

Considerando que la potencia de salida del estator (P_{se}) es igual a la potencia de entrada en el rotor (P_{er}) tenemos **que:**

$$P_{se} = P_{er} = 3 \cdot E_r \cdot I_r \cdot \cos \theta_r$$

Si I_e , es la intensidad del estator de una fase y $\cos \theta_e$ el factor de potencia, la potencia absorbida será igual a:

$$P_a = 3 E_e \cdot I_e \cdot \cos \theta_e$$

En la que E_e es la tensión del estator.

Por lo que:

Potencia suministrada = Potencia absorbida – Pérdidas

y el rendimiento será:

• Potencia suministrada/Potencia absorbida

• P_s/P_a

• **Deslizamiento.**

Si en la ecuación

se multiplican ambos miembros por R se obtiene:

por lo que:

siendo:

$R_r =$ Pérdidas en el cobre del rotor por fase.

$E_r I_r \cos \phi_r =$ Potencia por fase transmitida.

Si se multiplica el numerador y denominador de la ecuación anterior por el número de fases se obtiene:

$s =$

• **Factor de potencia.**

La figura adjunta representa las características de funcionamiento de un motor trifásico de inducción, en ella se observa como el factor de potencia aumenta con la carga del motor.

1.6. – Arranque del motor trifásico. Corriente y par de arranque. Conexión Estrella – Triángulo

Si el motor trifásico se conecta directamente a la red, sin intercalar resistencia alguna en el circuito rotórico, circula por éste una *corriente de arranque* que es prácticamente de cortocircuito.

En motores normales con rotor de jaula es del orden de 5 a 8 veces la intensidad de corriente nominal. Intercalando resistencias en el arrollamiento rotórico puede reducirse la corriente de arranque al valor que se desee. Esto se logra, en motores con rotor bobinado, poniendo los anillos rozantes en contacto con el arrancador. A pesar de la elevada corriente de arranque absorbida por el rotor normal de jaula (que puede provocar grandes caídas de tensión en las redes de distribución), el *par de arranque* desarrollado por el mismo resulta muy bajo, ya que en dicho instante el factor de potencia rotórico es también muy pequeño. En rotores bobinados puede mejorarse notablemente el factor de potencia inicial gracias al arrancador, con lo cual se consigue un par de arranque más elevado. Cuando la corriente de arranque no debe exceder de un valor moderado (como se exige en las redes públicas), los motores con rotor de jaula se arrancan mediante la *conexión estrella – triángulo*. Para ello es preciso que el arrollamiento estatórico esté dimensionado de forma que la conexión normal de servicio sea la conexión en triángulo. Alimentando el motor con una red trifásica a 220/380 V, en cada fase estatórica queda entonces aplicada una tensión de 380 V. En cambio, si mediante el

arrancador se conectan primero las tres fases del estator en estrella, es evidente que el motor queda capacitado para trabajar en una red cuya tensión compuesta fuera de 660 V. Como de hecho sólo se le aplican 380 V, la corriente de arranque absorbida viene a ser (en virtud de la reacción rotórica) solamente 1/3 de la que tomaría conectado directamente a la red y con sus fases en triángulo.

Si suponemos, por ejemplo, que en este último caso la corriente de arranque es 6 veces superior a la nominal, con la conexión en estrella se logra reducir este factor a 2. Hay que tener presente, sin embargo, que el par de arranque también disminuye en la misma proporción. Por consiguiente, sólo es posible efectuar el arranque en vacío o a media carga, condición suficiente en la mayoría de casos. Como el arrancador estrella – triángulo, a causa de sus numerosos contactos, exige un entretenimiento periódico, se procurará prescindir del mismo en aquellas instalaciones donde no existan tales cuidados. Para subsanar este inconveniente se han ideado rotores de jaula provistos de ranuras especiales, con los cuales se consigue un par de arranque elevado

y una corriente de arranque relativamente pequeña aun en el caso de conectar el motor directamente a la red.

1.6.1- – Arranque de los motores de jaula de ardilla trifásicos.

En la puesta en tensión de un motor, éste absorbe una gran intensidad de la red y puede, sobre todo si la sección de la línea de alimentación es insuficiente, provocar una caída de tensión susceptible de afectar el funcionamiento de los receptores. A veces esta caída de tensión es tal que es perceptible sobre los aparatos de alumbrado.

Para remediar estos inconvenientes, algunos sectores prohíben, por encima de una cierta potencia la utilización de motetes de inducción con arranque directo; otros imponen en función de la potencia de los motores la relación entre la intensidad de arranque y la intensidad nominal.

El motor de jaula es el único que puede ser acoplado directamente a la red.

Sólo los extremos de los devanados del estator tienen salida sobre la placa de bornas, por lo que los diversos procedimientos de arranque permiten hacer variar únicamente la tensión en las bornas del estator. En este tipo de motor la reducción de la punta de intensidad está acompañada de una fuerte reducción del par.

• Arranque directo

Es un sistema obtenido en un solo tiempo; el estator del motor se acopla directamente a la red. El motor arranca con sus características naturales con una fuerte punta de intensidad. Este procedimiento es ideal si es tolerable la punta de intensidad y si el par inicial de arranque del motor (fijado por el tipo de construcción de su rotor y cerca de 1,5 Cn) es el conveniente para la puesta en marcha de la máquina.

La punta de intensidad, en la puesta en tensión, es muy elevada, del orden de cuatro a ocho veces la intensidad nominal. El par durante el arranque es siempre superior al par nominal, sobre todo para los motores modernos de jaulas complejas.

El par es máximo cuando el motor alcanza el 80 % de su velocidad; en este momento, la punta de intensidad está considerablemente amortiguada.

Este dispositivo permite arrancar las máquinas incluso en plena carga, si la red admite la punta de corriente en el momento del arranque. Es pues indicado para las máquinas de pequeña y mediana potencia.

Sin embargo, el par en el momento de la puesta en tensión es cerca de 1,5 Cn, este procedimiento no está recomendado si el arranque debe hacerse lenta y progresivamente (determinados montacargas, cintas transportadoras, etcétera).

Arranque de motores con arrollamientos partidos

Este tipo de motor lleva un arrollamiento estatístico desdoblado en dos arrollamientos paralelos con seis o doce bornas de salida (Fig. 15.21). Es equivalente a dos *semimotores* de igual potencia.

Al acoplar el primer arrollamiento a la red de alimentación, el *semimotor* arranca en directo con toda la tensión de la red, esto hace que la corriente de arranque y el par sea la mitad.

Al finalizar el arranque, se conecta el segundo arrollamiento a la red. En este momento, la punta de intensidad es débil y de corta duración, puesto que el motor no ha sido separado de la red de alimentación y hay un débil deslizamiento.

ig. 1.6.2 Curva de la intensidad absorbida en función de la velocidad.

Arranque del motor asíncrono trifásico en estrella-triángulo.

Este arranque sólo puede ser aplicado a los motores donde los dos extremos de los tres devanados del estator tengan salida sobre la placa de bornas y donde el acoplamiento en triángulo corresponda a la tensión de la red (ejemplo: para red 380 V es preciso un motor 380 V /660 V) (Fig. 15.24).

Este procedimiento consiste en arrancar el motor conectando sus devanados en estrella. Éstos se encuentran entonces alimentados con una tensión igual a la tensión de la red dividida por 3, o sea, a un 58 % de la tensión nominal.

El par se reduce en relación al cuadrado de la tensión de alimentación y es igual al tercio del par proporcionado por **un** motor en arranque directo.

La corriente en la línea de alimentación se reduce en la misma proporción.

La intensidad en cada devanado decrece únicamente en relación a 0,58. Los típicos valores iniciales son para la corriente $2 I_n$ y para el par $0,5 C_n$.

Fig1.6. 3. Esquema estrella – triángulo.

El arranque estrella-triángulo es el indicado para aquellas máquinas *que* arranquen en vacío o *tengan un par resistente pequeño*. En el segundo tiempo se suprime el acoplamiento en estrella y se acoplan los devanados en triángulo.

Cada devanado entonces está alimentado con la tensión de la red y el motor recupera sus características naturales.

El par motor es pequeño durante todo el *acoplamiento* estrella y la velocidad estabilizada al final de este tiempo puede ser muy baja si el par resistente es elevado.

1 velocidad

Fig. 1.6.4. Variación del par con la velocidad para el acoplamiento de triángulo y en estrella.

Arranque estatístico por resistencias

La alimentación a tensión reducida del motor, durante el primer tiempo se obtiene poniendo en serie con cada fase del estator una resistencia que es cortocircuitada luego en un solo tiempo. Los acoplamientos eléctricos

de los devanados respecto a la red no se modifican durante el arranque, la intensidad de arranque que recorre la línea de alimentación se reduce proporcionalmente a la tensión aplicada al motor, mientras que el par se reduce como el cuadrado de la tensión.

El par inicial de arranque es relativamente pequeño (valor típico: 0,75 Cn) para una punta de corriente todavía importante (valor típico: 4,5 In).

La tensión aplicada en las bornas del motor no es constante durante el período de aceleración. La intensidad, máxima cuando se pone el motor en tensión, disminuye a medida que el motor acelera; la caída de tensión en las bornas de la resistencia disminuye y la tensión en las bornas del motor aumenta progresivamente.

Como el par es proporcional al cuadrado de la tensión, los valores obtenidos del par son más elevados, para un par inicial dado, que con un sistema que suministra una tensión reducida de valor fijo.

La velocidad va aumentando progresivamente y sin cambios bruscos. Por otra parte, es posible modificar los valores de la intensidad y del par de arranque adaptando la resistencia.

El arranque estático por resistencia es conveniente para realizar el arranque de las máquinas con par resistente creciente o cerca de la mitad del par nominal e incluso en las máquinas potentes y de gran inercia.

1.7. – Rotor con anillos rozantes, rotor de jaula y rotor de efecto skin.

Características del par

Las características de arranque del motor con rotor bobinado o con rotor de jaula sencilla se deducen de las curvas que dan la variación del par en función de la velocidad. Cada una de estas curvas corresponde a una determinada resistencia del circuito rotórico. Si no hay ninguna resistencia adicional (curva R_2), el par, relativamente pequeño en el instante del arranque, crece hasta alcanzar un valor máximo (par crítico) y desciende luego casi en línea recta hasta anularse. El par crítico, que se produce cuando el rotor gira aproximadamente al 90 % de la velocidad síncrona, suele ser en motores normales de 2 a 3 veces superior al par nominal. Intercalando resistencias adicionales en el circuito rotórico por medio del arrancador, se obtienen las curvas características designadas por $2 R_2$ – $5 R_2$. Con ello se consigue desplazar progresivamente el valor crítico del par en el sentido de las velocidades decrecientes, hasta alcanzar el eje de ordenadas (instante del arranque). El motor puede entonces arrancar con un par elevado. La resistencia adicional intercalada se va desconectando luego escalonadamente por medio del arrancador. Estas resistencias escalonadas se dimensionan de manera que el motor, conservando su elevado par inicial, se vaya acelerando gradualmente. En motores con rotor de jaula sencilla no es posible obtener un par de arranque elevado. El elevado precio de los motores con rotor bobinado y el mantenimiento que exigen los contactos de los anillos rozantes limitan el empleo de aquéllos a casos especiales (por ejemplo, en dispositivos de elevación, que requieren un arranque bajo carga).

Ningún motor trifásico puede sobrepasar el par crítico de su característica de servicio. Si se obliga al motor a suministrar un par superior al crítico, el rotor se para; como se dice vulgarmente, el motor se cala. Por este motivo las prescripciones VDE fijan para motores normales los valores mínimos del par crítico: 1,6 veces el par nominal si el servicio es permanente, y 2 veces dicho par si el servicio es intermitente. El par normal de servicio de un motor trifásico oscila por tanto entre el 35 y el 50% de su par crítico.

Como ya se ha indicado al final del apartado anterior, han sido ideados rotores en cortocircuito con una ejecución especial de las ranuras que permite alcanzar elevados pares de arranque. En todos ellos se hace aplicación del efecto pelicular (skin), y por tal motivo se designan con el nombre rotores de efecto *skin*. Éstos pueden ser de varios tipos. El llamado de doble *jaula* se compone de dos jaulas independientes cuyas barras respectivas, unidas en paralelo, van alojadas en dos ranuras especiales superpuestas y separadas por una

angosta rendija. La forma de estas ranuras es muy diversa

El objeto perseguido en todas es que la corriente se distribuya desigualmente entre las barras de la superior y las de la jaula inferior. Las barras superiores o inferiores pueden unirse eléctricamente una vez montadas, pero generalmente se funde la doble jaula entera de aluminio, con los aros de cortocircuito, en moldes especiales. A causa de su exigua tensión no es necesario aislar las del rotor. El rotor de *corrientes parásitas* lleva las barras alojadas en ranuras relativamente estrechas y profundas.

El funcionamiento del rotor de doble jaula radica en la diferente reactancia de la jaula superior y de la inferior. En el momento del arranque las frecuencias del rotor y del estator son iguales, exactamente como en el primario y el secundario de un transformador. Debido al tipo y configuración de las ranuras, las barras rotóricas pueden considerarse representada por una conexión en serie de resistencias óhmicas y reactancias. La reactancia de las barras inferiores es relativamente mayor que la de las barras superiores, ya que el número de líneas de fuerza abrazado por las primeras es también más grande. Durante el arranque, por consiguiente, la mayor parte de la corriente rotórica circula por la jaula superior, como si fuera empujada hacia arriba. Por ser las barras superiores de sección muy reducida, el efecto es el mismo que si se hubiera intercalado una resistencia de arranque.

A medida que el motor se acelera va disminuyendo el deslizamiento, que una vez alcanzado el régimen de servicio es del orden del 5 %. Con ello disminuye también la frecuencia rotórica hasta valores de sólo 1–2 Hz. La reactancia de las barras inferiores desciende entonces a un valor muy bajo (ya que, como sabemos, es proporcional a la frecuencia) y la corriente puede circular también por ellas, que son de gran sección. La resistencia del circuito rotórico, casi puramente óhmica, es ahora muy pequeña.

Ejecutando las ranuras del rotor de distintas formas se obtienen también diferentes pares de arranque.

1.8 – Arranque rotórico por resistencias de motores de anillo.

Un motor de anillos no puede arrancar en un tiempo, devanados rotóricos cortocircuitados, sin provocar puntas de par y de comente inadmisibles. Es necesario que al mismo tiempo que se alimenta el estator a plena tensión de la red se introduzcan resistencias rotóricas que serán progresivamente cortocircuitadas.

El cálculo de la resistencia insertada en cada fase permite determinar de forma rigurosa la curva par-velocidad obtenida: para un par dado la velocidad es tanto más baja cuanto más alta sea la resistencia. Ésta debe ser insertada totalmente en el momento del arranque y alcanzará la velocidad nominal cuando esté totalmente cortocircuitada.

La comente absorbida es sensiblemente proporcional al par suministrado o por lo menos sensiblemente superior al valor teórico.

El motor de anillos, con un arranque rotórico, se utiliza en todos los casos donde las puntas de comente deben ser mínimas y en todas las máquinas que arranquen a plena carga.

Por otra parte, este tipo de arranque es extremadamente flexible, porque es fácil de ajustar el número y el aspecto de las curvas que representan los tiempos sucesivos a los imperativos mecánicos o eléctricos (par resistente, valor de la aceleración, punta máxima de comente, etc.).

1.9 – Inversión del sentido de giro.

En los motores de corriente continua, para cambiar el sentido de giro del motor, hay que invertir el sentido del campo de excitación por medio de la inversión de la comente de excitación. De forma general, se consigue la inversión del sentido de giro si se invierte la comente del inducido, lo que provoca una inversión del campo

del inducido.

En los motores trifásicos de rotor en cortocircuito el sentido de giro del motor se invierte si se permutan dos fases cualesquiera de las tres que lo alimentan.

Generalmente, esta inversión se realiza por medio de contactores, lo que provoca un esquema complejo, por lo que se requiere un conocimiento y estudio más profundo de los motores eléctricos, que no es objeto de este nivel.

17

9