

## Campo Magnético Giratorio.

### Introducción.

### Campo magnético giratorio

Para realizar el análisis del campo magnético giratorio, tomaremos en consideración un estator de 6 caras polares, donde en cada una de ellas se montara una bobina con el mismo número de vueltas, las cuales serán alimentadas mediante una fuente trifásica balanceada como se muestra en la *Figura 1*.

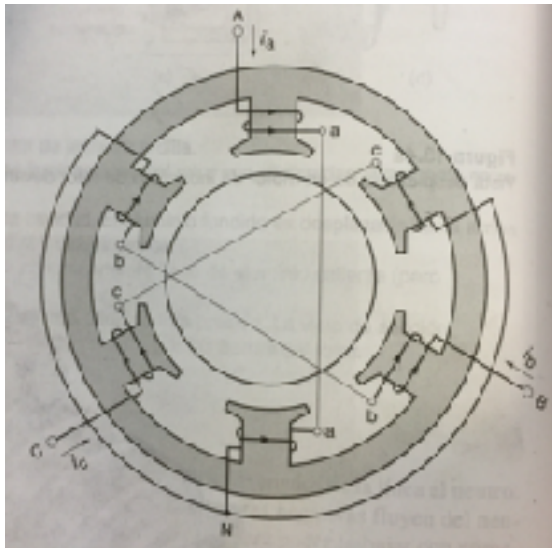


Figura 1. Conexión del estator de 6 polos.

Cada una de las bobinas producirá un campo magnético que estará cambiando de intensidad y de polaridad en concordancia con la forma de onda de la corriente que lo está generando. Sin embargo, la característica de  $120^\circ$  grados de desfase entre las 3 formas de onda de la fuente trifásica ocasionara una alternancia entre los campos, lo cual generara un campo magnético giratorio.

Analicemos la *Figura 2*. Donde se presentan las líneas de campo magnético que generan las corrientes instantáneas en el tiempo (1) mostrado en la *Figura 3*.

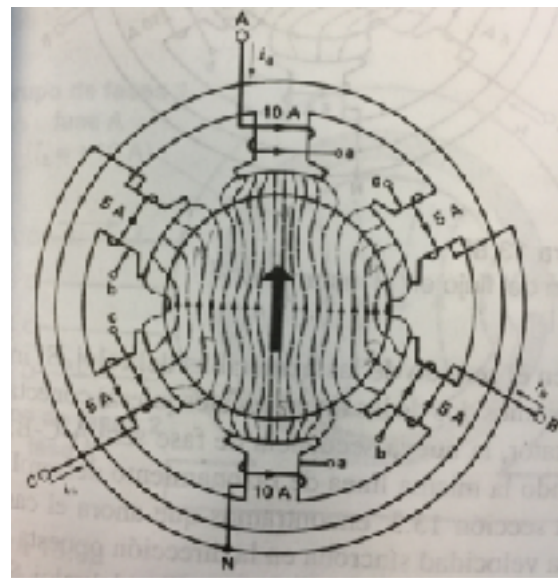


Figura 2. Campo magnético instantáneo.

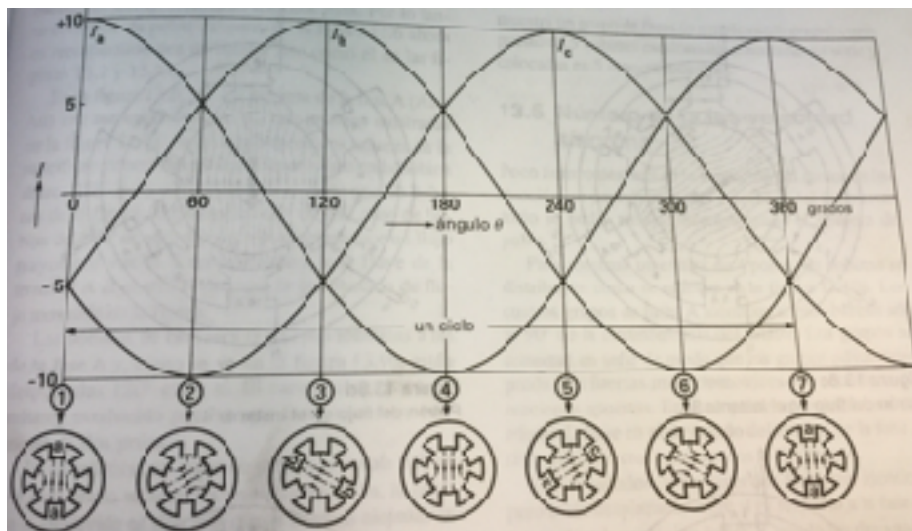


Figura 3. Ciclo

Para ello se tiene que observar el sentido de la corriente en cada una de las bobinas, para determinar el sentido y dirección del campo magnético que están produciendo. Si se hace de manera correcta, se debe llegar a la conclusión de que las seis caras polares del estator, están generando en conjunto dos polos dominantes, cuyas líneas de campo atraviesan el rotor e inducen los respectivos polos en el, como se aprecia en la Figura 2.

Si se analiza el instante de tiempo marcado en la Figura 3, como tiempo (2) que corresponde a  $60^\circ$  del ciclo, observamos que el campo magnético dominante se ha desplazado  $60^\circ$  a la derecha, esto debido a que las intensidades de las corrientes involucradas han cambiado;  $I_a$  disminuye a la mitad de la intensidad, manteniendo su polaridad;  $I_b$  se ha incrementado hasta cambiar de polaridad, lo que cambia el sentido y dirección de los campos que generaba anteriormente (ver Figura 1) y la  $I_c$  llega a su máximo valor negativo, pero manteniendo la misma polaridad. Estos cambios de intensidad y polaridad ocasionan que el campo magnético dominante parezca haberse desplazado los  $60^\circ$  para esta máquina de dos polos. Si continuamos el análisis de manera subsecuente para los instantes denotados como tiempo (3), tiempo (4), etc. observaremos que el campo magnético dominante continua girando,  $60^\circ$  por cada tiempo marcado en la Figura 3.

Con lo cual podemos establecer la manera en la cual se produce el magnético giratorio en el rotor de una máquina trifásica.

## Máquina de Inducción, Control de Par por Resistencias

### Introducción.

El par o momento de torsión desarrollado por un motor depende de su velocidad, pero la relación entre los dos no se puede expresar mediante una ecuación, por lo cual es preferible mostrarlo como una curva, denominada curva Par-Velocidad. Dicha curva puede ser obtenida mediante el estudio del Par eléctrico ( $T_e$ ) o el Par Mecánico ( $T_m$ ), dado que ambos están relacionados mediante la ecuación de oscilación:

$$\omega_r = \frac{(T_e - T_m)\omega_b}{JP} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

$\omega_r$	= Velocidad del rotor.
$\omega_b$	= Velocidad del campo.
$T_e$	= Par eléctrico.
$T_m$	= Par mecánico.
J	= Inercia.
P	= Polos.

El par eléctrico se puede obtener para cada instante de tiempo mediante la solución del sistema de ecuaciones diferencial-algebraico (DAE) utilizando la fórmula:

$$T_e = \frac{3\left(\frac{P}{4}\right)\left(\frac{\omega_r}{\omega_b}\right)\left(\frac{X_M^2}{\omega_b}\right)\left(\frac{r_r}{S}\right)I_{ae}}{\left(\frac{r_r}{S}\right)^2 + \left(\frac{\omega_r}{\omega_b}\right)^2 X_{rr}^2} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Sin embargo, como sabemos que en condiciones de estado estacionario el  $T_e$  es igual al  $T_m$ , se puede obtener la curva par velocidad para una máquina de inducción de manera experimental, tomando mediciones continuas de  $T_m$  y de la velocidad que desarrolla la máquina.

Al observar la (Ec. 2.2) se aprecia que el valor del par eléctrico está relacionado con el valor de la resistencia en el rotor  $r_r$ . Por lo cual, si se realiza un cambio en el valor de esta resistencia, se modifica el valor de  $T_e$ . Esto es posible llevarlo a cabo en una máquina de inducción de rotor devanado (MIRD), conectando en las terminales del rotor un reostato trifásico, modificando la resistencia total del circuito de la máquina y cambiando la característica par-velocidad.

Los incrementos de la  $r_r$  van a producir variaciones en las condiciones de arranque, lo que se puede utilizar para mejorar el  $T_m$  durante este periodo de operación. Aunque se mejore el par de arranque añadiendo resistencias externas, se debe tener cuidado, ya que esto, modifica el valor de deslizamiento<sup>(1)</sup> y ocasiona que la máquina trabaje con un factor de potencia menor al normal, por lo que las resistencias externas solo son recomendadas durante un breve tiempo en el arranque de la máquina.

(1) Entiéndase el deslizamiento S como la relación entre las velocidades del rotor ( $\omega_r$ ) y la del campo magnético giratorio ( $\omega_b$ ).  $S = \frac{\omega_b - \omega_r}{\omega_b}$

## Máquina de Inducción, Obtención de Parámetros

### Introducción.

El circuito equivalente de una máquina de inducción, modela o representa el comportamiento de una sola fase, por lo tanto los valores que a los que se hace referencia en la Fig. 3.1 son voltajes y corrientes de fase. Por lo cual esta manera de representar la máquina de inducción es valida si consideramos que las 3 fases de la máquina se encuentran equilibradas.

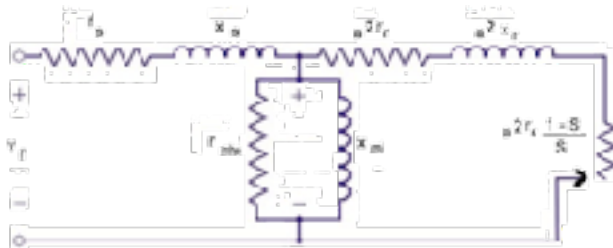


Fig. 3.1. Circuito equivalente del motor de inducción

donde:

$r_{mhe}$  = Resistencia de pérdidas (mecánicas, hysteresis y Eddy).

$x_m$  = Reactancia de magnetización.

$x_s$  = Reactancia (dispersión) de estator.

$a^2 x_r$  = Reactancia (dispersión) de rotor.

$r_s$  = Resistencias de estator.

$a^2 r_r$  = Resistencias de rotor.

$a^2 r_r \frac{1-s}{s}$  = Resistencia equivalente de la carga mecánica.

S. = Deslizamiento.

Como se puede apreciar este circuito tiene gran parecido con el circuito equivalente del transformador, con la ventaja de que en este caso la carga siempre será resistiva.

El circuito de la Fig. 3.1 se conoce como circuito exacto del motor, sin embargo, se presentan dificultades para obtener los valores de las reactancias de dispersión, por lo que se utilizara

el circuito equivalente aproximado, que se observa en la Fig. 3.2

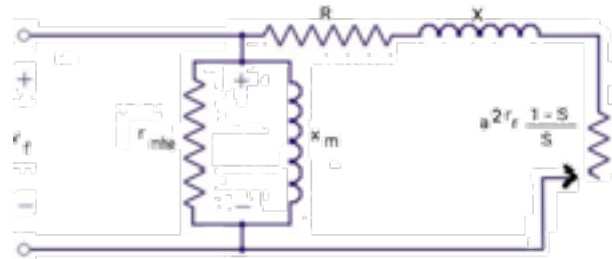


Fig. 3.2 Circuito equivalente Aproximado.

Donde:

$$R = r_s + a^2 r_r$$

$$X = x_s + a^2 x_r$$

La determinación de los parámetros para este circuito es bastante sencilla y su análisis de operación resulta menos complejo que el del circuito exacto, sin que influya apreciablemente en el error motivado por cambiar a la izquierda la rama de magnetización.

Máquina de Inducción, Convertidor de frecuencia.

Para estudiar la máquina de inducción como convertidor de frecuencia, se tiene que hablar un poco de la máquina de inducción doblemente alimentada. Este tipo de máquina tiene un rotor con un devanado trifásico similar al del estator. El devanado está distribuido de manera uniforme en las ranuras y casi siempre está conectado en estrella, cuyas terminales son conectadas a tres anillos colectores, los cuales giran junto con el rotor, estos anillos permiten la conexión de resistencias externas para modificar las características del par de arranque o en este caso, permiten la utilización de una fuente trifásica balanceada, que tiene como característica principal el control de la frecuencia. Esto da la posibilidad de que en el rotor se produzca un campo magnético giratorio a distinta velocidad que el CMG del estator. Hasta este punto dejaremos el funcionamiento de la máquina de inducción doblemente alimentada.

Sin embargo esa posibilidad de tener dos campos giratorios que interactúan entre ellos permite que la MIRD pueda funcionar como un convertidor de frecuencia o un ciclo convertidor con un rango de operación que va desde casi cero Hertz hasta 120 Hertz. Esto es posible si de manera análoga pensamos en los ejemplos de velocidad relativa en dos dimensiones que fueron estudiados en la física clásica. Donde dos objetos viajan a distintas velocidades, el primero de ellos a velocidad fija (60 hertz) y el otro a velocidad variable. Si el segundo objeto viaja en el mismo sentido que el de referencia, la velocidad relativa entre los dos será la diferencia de las velocidades de cada uno, lo que para nuestro caso nos dará el rango de salida de cero a 60 hertz aproximadamente. Pero si el segundo objeto viaja en sentido contrario al de referencia, la velocidad relativa entre ellas será la suma, lo que para nuestro caso, no dará las frecuencias de salida de 60 a 120 Hertz. Lo cual no es exactamente así pero nos permitirá utilizar la MIRD como un convertidor de frecuencia eléctrico.

De manera práctica, para hacer funcionar a la MIRD como ciclo convertidor se utilizará una máquina externa que funcione como primotor, para hacer girar el rotor a distintas velocidades y controlar la velocidad de inducción en los devanados del mismo rotor y con ello la frecuencia de generación.

Máquina de Inducción, Diagrama de Circulo.

El diagrama circular o diagrama de circulo, también conocido como diagrama de Heyland, se traza a partir de los datos de prueba obtenidos en los experimentos de motor en vacío y motor a rotor bloqueado, representado así sus características.

Una vez que se tiene el diagrama circular, se pueden obtener de el las características de funcionamiento de esa máquina en particular. en el diagrama de la Fig. 5.1, se muestran algunos de los parámetros que se pueden ubicar:

- O-A Corriente del estator.
- O (S=0) Corriente de vacío.
- A (S=0) Corriente del rotor (ref al estator)
- O (S=1) Corriente de arranque.
- A-B Potencia electromecánica.
- B-C Perd. en el cobre del estator ( $r_s$ ).
- D-E Perdidas en el nucleo ( $r_m$ ).
- O-E Potencia Reactiva total.
- O-A Potencia activa total.
- A-C Par eléctrico.
- C (S=1) Par mecánico.

En este tipo de diagrama se encuentran las mismas regiones de operación que fueron vistas en la curva  $T_e$  vs  $\omega_r$ , es decir, la región como motor, generador y freno a contra corriente. Aunque realmente este diagrama es de corrientes, al ser multiplicadas por el voltaje de fase se convierte en un diagrama de potencias, teniendo a la mano la mayoría de las magnitudes relevantes en la operación de la máquina. Por lo cual es de gran utilidad en el estudio de las máquinas eléctricas de inducción.

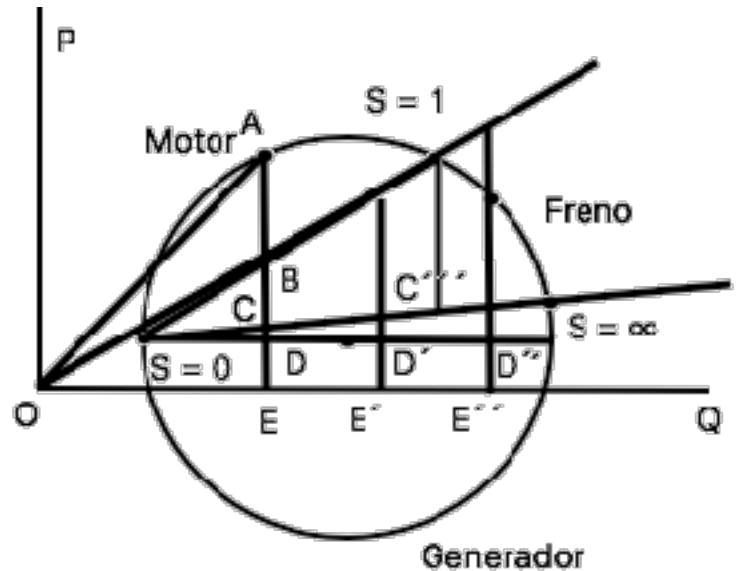


Fig. 5.1 Diagrama de Circulo de la MI.