

Laboratorio de Máquinas Eléctricas III

Programa de la materia:

Máquinas de CD

- Sesión 1: Generador de CD.

Máquinas de Inducción.

- Sesión 2: Campo Magnético Giratorio.
- Sesión 3: Máquina de Inducción, Control de Par por Resistencias.
- Sesión 4: Máquina de Inducción, Obtención de Parámetros.
- Sesión 5: Máquina de Inducción, Convertidor de Frecuencia.
- Sesión 6: Máquina de Inducción, Diagrama de Carga.

Máquinas Síncronas.

- Sesión 7: Máquina Síncrona Obtención de Parámetros.
- Sesión 8: Máquina Síncrona, Curvas V y Curvas de Capacidad.
- Sesión 9: Máquina Síncrona, Potencia, Eficiencia y Regulación.
- Sesión 10: Sincronización al Sistema Eléctrico Mediante Osciloscopio.
- Sesión 11: Dinámica del Ángulo de Potencia de la Máquina Síncrona ante Variaciones de Carga.

Marco Teórico Sesión 1, Generador de CD.

La saturación juega un papel muy importante en el control del comportamiento de las máquinas de CD. Es muy complicado tomar en cuenta los efectos de la saturación en las ecuaciones dinámicas del movimiento, por lo cual este efecto será tomado solo de forma cualitativa. Las ecuaciones que determinan la operación como generador de la máquina de CD son:

$$V_t = R_f I_f$$

y

$$E = V_t + I_a R_a = I_f R_f + I_a R_a$$

donde V_t es el voltaje de campo, R_f y I_f son la resistencia y corriente de campo respectivamente, E es el voltaje inducido (voltaje generado) y R_a y I_a son la resistencia y corriente de armadura respectivamente.

Sin los efectos de saturación estas ecuaciones determinan que E se seguirá incrementando sin llegar a un punto de equilibrio, sin embargo una vez que el sistema llega al punto de saturación, por mas corriente de campo que se inyecte a la máquina la magnitud del voltaje generado E ya no aumentara.

Usualmente las características (curvas de operación) en vacío y con carga de los generadores de CD son de interés para determinar sus aplicaciones potenciales. De estas dos, la que proporciona mayor información es la característica con carga. Como el nombre lo sugiere las características de vacío y bajo carga corresponden, respectivamente al comportamiento de la

máquina cuando no suministra potencia (circuito abierto o sin carga) y cuando está suministrando potencia a un circuito externo.

El único caso en que tiene sentido la curva de vacío de un generador de CD es cuando está operando como generador shunt (paralelo) auto-excitado o con excitación independiente. A esta última también se le denomina curva de imanación o curva de saturación de la máquina de CD.

En una característica bajo carga, la variación del voltaje en terminales estará en función de la corriente de carga suministrada. Se llega a esta característica directamente si se pueden identificar las causas de las caídas de voltaje en los generadores de CD:

1. Caída en la resistencia de armadura. Está es la caída $I_a R_a$ debida a la resistencia de armadura.
2. Caída en las escobillas. El contacto mecánico entre las escobillas y el colector ofrece una resistencia eléctrica. En consecuencia, cuando una corriente fluye por la escobilla ocurre una caída de tensión (usualmente de 2v).
3. Caída de voltaje por reacción de armadura. La reacción de armadura tiene una componente desmagnetizante que se opone a la fmm del campo principal dando como resultado una reducción del flujo y por lo tanto una reducción de la fem inducida en la armadura con el resultado de una reducción en el voltaje en terminales (voltaje generado).
4. Si se está utilizando mas de un devanado (conexión compuesta), los efectos (1) y (3) son acumulativos.

Estas pérdidas ocasionan que las características del generador de CD con carga presenten una caída conforme se incrementa la magnitud de la corriente suministrada a la carga.

Marco Teórico Sesión 2, Campo Magnético Giratorio.

El principio de funcionamiento de las máquinas trifásicas se basa en un fenómeno ocasionado por la alternancia de amplitud y magnitud de la C.A. de una fuente trifásica balanceada. Este principio es el que se puede observar en el estator de cualquier máquina trifásica, ya sean máquinas de inducción o máquinas síncronas.

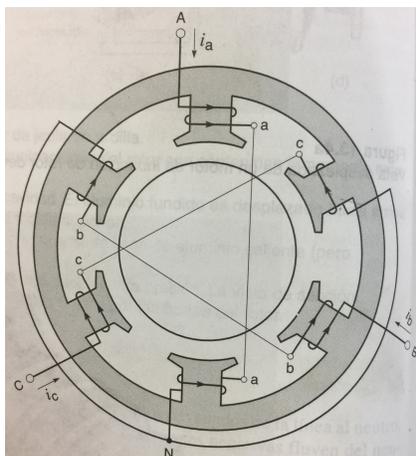


Figura 2.1

Para realizar el análisis del campo magnético giratorio, se toma 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 de C.A. trifásica balanceada con los sentidos de circulación de corriente que se ilustran en la Figura 2.1.

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 corriente que lo está generando. Sin embargo la característica de los 120° grados de desfase entre las 3 formas de onda de la fuente trifásica ocasionara una alternancia entre los campos, lo cual, generará un campo magnético que varía en el tiempo, denominado como campo magnético giratorio.

La Figura 2.2 muestra las líneas de campo magnético que produce la corriente en el instante de tiempo (1), el cual es ilustrado en la Figura 2.3. Si se analizan el sentido de la corriente de cada una de las bobinas, para determinar el sentido y dirección del campo magnético que están produciendo, haciéndolo de la manera correcta se debe llegar la conclusión de que las seis caras polares del estator están produciendo en conjunto dos polos dominantes, cuyas líneas de campo atraviesan el rotor e inducen los respectivos polos en el como se puede apreciar en la Figura 2.2.

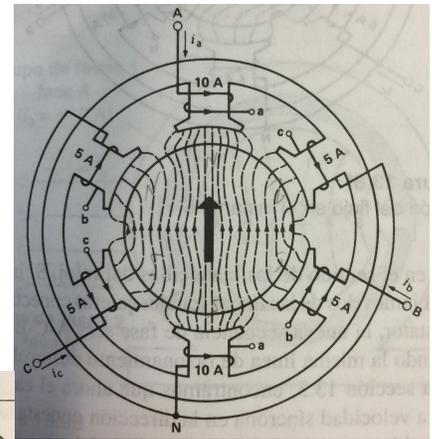


Figura 2.2

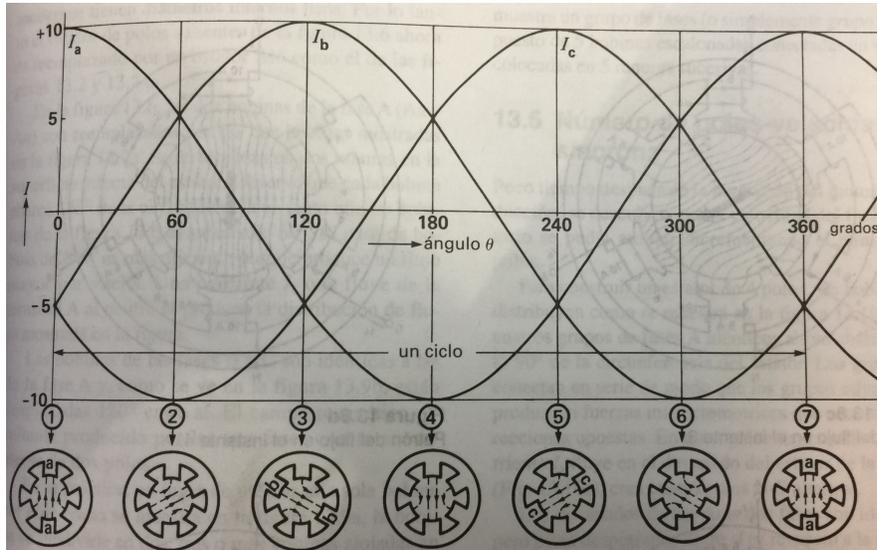


Figura 2.3

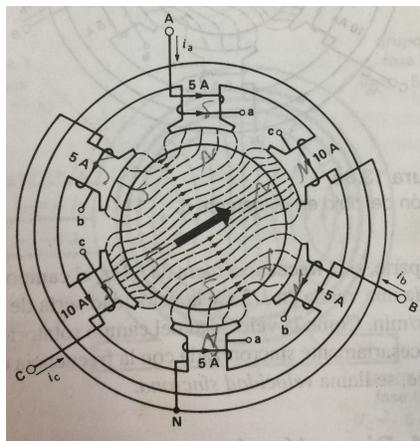


Figura 2.4

Si se continúa con el análisis del instante de tiempo marcado como (2) en la Figura 2.3, que corresponde a los 60° grados del ciclo, se observa que el campo magnético dominante se ha desplazado 60° en sentido horario. Esto es debido a que las intensidades de las corrientes involucradas han cambiado de intensidad, manteniendo su polaridad; si se observa i_a disminuye a la mitad de la intensidad manteniendo su polaridad; i_b se ha incrementado hasta cambiar de polaridad, lo que modifica el sentido y dirección de los campos que estaba generando en el instante anterior; la i_c se alcanza su máximo valor negativo manteniendo la misma polaridad lo que solo incrementa la intensidad del campo que genera. Estos cambios de intensidad y polaridad de las corrientes ocasionan que el campo magnético dominante parezca haberse desplazado los 60° que se ilustran en la Figura 2.4. Si se continúa con el análisis de manera subsecuente para los instantes de tiempo denotados como (3), (4), etc (Figura 2.3), se podrá observar que el campo magnético continúa girando 60° por cada uno de los instantes de tiempo.

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

Marco Teórico Sesión 3, Obtención de los Parámetros de la Máquina de Inducción.

El circuito equivalente es un artificio de modelado que consiste en un circuito eléctrico pasivo, sin acoplamientos magnéticos. La carga mecánica del motor se transforma en un elemento resistivo del circuito, de modo que todos los elementos son exclusivamente términos eléctricos. El circuito equivalente es una representación monofásica por lo que puede ser representado de manera exacta como se muestra en la Fig. 3.1

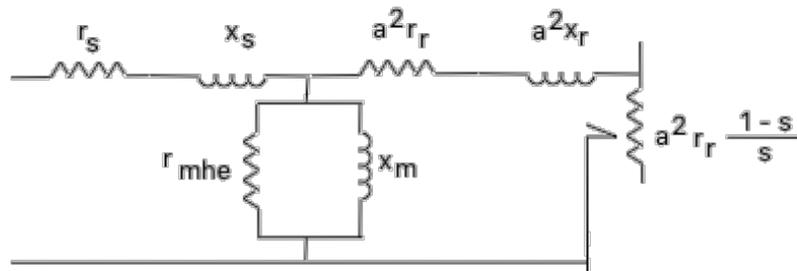


Figura 3.1 Circuito equivalente exacto del motor.

donde:

- r_{mhe} Resistencia de las pérdidas mecánicas, histéresis y corrientes de Eddy.
- x_m Reactancia de magnetización.
- r_r Resistencia de la bobina del rotor.
- x_r Reactancia originada por el flujo disperso en el rotor.
- $a^2 r_r$ Valor de la Resistencia del rotor referida al voltaje del estator.
- $a^2 x_r$ Valor de la Reactancia del rotor referida al voltaje del estator.
- $a^2 r_r \frac{1-s}{s}$ Resistencia equivalente de la carga mecánica.
- s Deslizamiento.

El circuito equivalente modela el comportamiento de una fase, por lo tanto el voltaje aplicado y la corriente que circula por él será de fase también. En el centro del circuito equivalente la corriente que circula se divide en dos, una pequeña parte que se deriva hacia el circuito de magnetización y la más importante que se dirige hacia la carga mecánica que esta moviendo el motor.

La obtención de los parámetros del circuito exacto es bastante complicada (en particular las reactancias de dispersión) por lo que se realizan algunas consideraciones que permiten una reducción del circuito, obteniéndose lo que se denomina Circuito equivalente aproximado donde las resistencias de rotor y estator quedan en la parte derecha del circuito equivalente y se representan por un mismo elemento:

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

Y lo mismo sucede con las reactancias de dispersión de rotor y estator:

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

Resultando en el circuito que se ilustra en la Figura 3.2

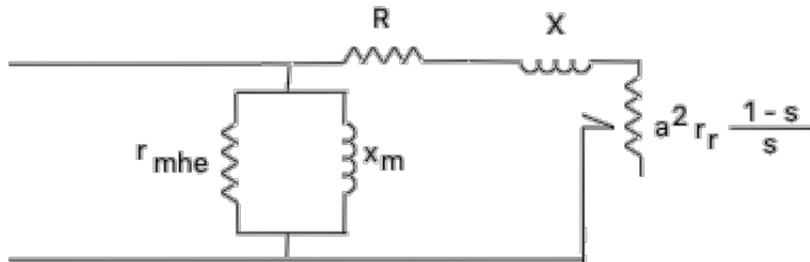


Figura 3.2 Circuito equivalente aproximado.

La determinación de los parámetros para este circuito es bastante sencilla y su análisis de operación resulta menos compleja que el del circuito exacto, sin que los cambios realizados produzcan un error apreciable en los resultados de los análisis.

Los parámetros del circuito serán determinados mediante tres sencillas pruebas.

Prueba de vacío.

Prueba de rotor bloqueado

Determinación de resistencias de estator.

Marco Teórico Sesión 4, Control de Par por Resistencias.

El par o momento desarrollado por un motor depende de su velocidad, pero la relación entre los dos no puede ser expresada por una ecuación, por lo cual se utiliza una curva que muestra la relación entre la velocidad y el par producido por un motor de inducción, denominada "Curva Par Velocidad". En la curva *Par-Velocidad* que se muestra en la figura 4.1 se pueden apreciar puntos de interés en el análisis de del comportamiento de una máquina de inducción cuando está cambia de velocidad; el par con rotor bloqueado o par de arranque, el par máximo que es capaz de producir la máquina y el par a plena carga o mejor conocido como par nominal.

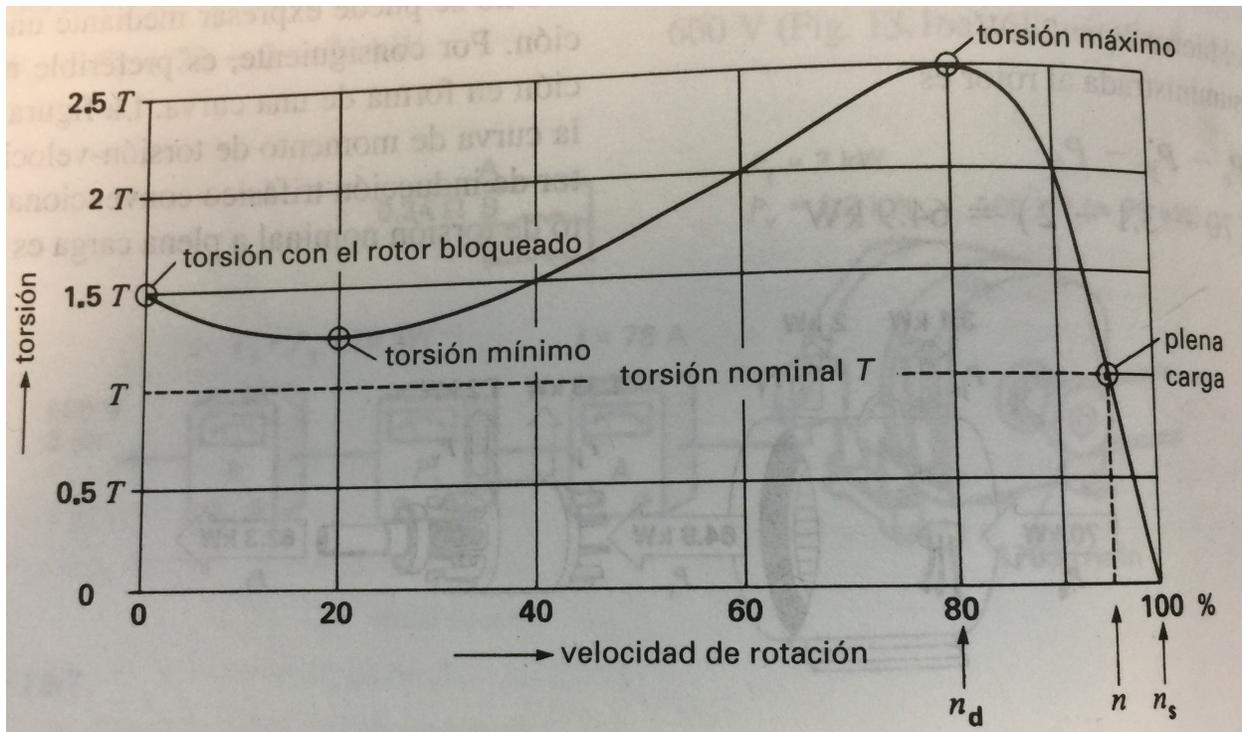


Figura 4.1 Característica Par-Velocidad de un motor de inducci3n.

Los motores "pequeños" (menores a 15 HP) desarrollan su par m3ximo a aproximadamente el 80% de la velocidad s3ncrona mientras en los motores grandes (1500 HP y mas) alcanzan su momento de par m3ximo a 98% de su velocidad s3ncrona.

En las m3quinas con rotor jaula de ardilla, el grosor de las barras conductoras y la profundidad de las mismas en el rotor determinan la caracter3stica par-velocidad y esta no puede ser modificada, ya que esta caracter3stica depende del valor de la Resistencia del rotor.

En las m3quinas de inducci3n de rotor devanado s3 es posible modificar el valor de la resistencia, agregando resistencias externas que permiten modificar algunos de los par3metros de la curva par-velocidad. Con esta modificaci3n se pueden obtener valores de par de arranque mejores en bajas velocidades, por lo que resultar ser un excelente m3todo para el control de la velocidad durante el arranque de una m3quina de inducci3n en condiciones de plena carga y cercanas. En la Figura 4.2 se observa la curva para el valor de la resistencia de diseo denominada como R ; los valores que se utilizan para modificar la caracter3stica par velocidad son en funci3n a ese valor de diseo. En la Figura 4.2 se muestran

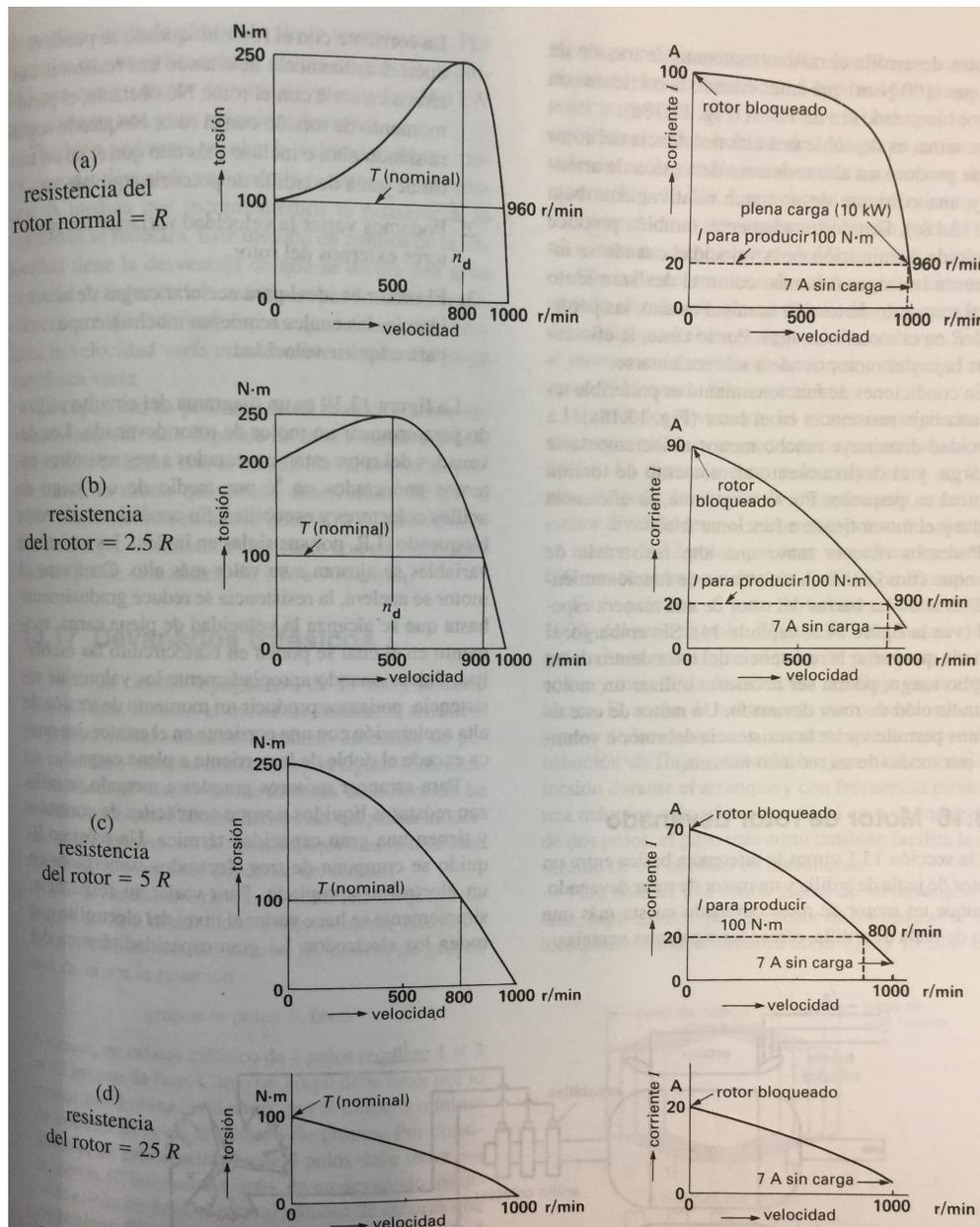
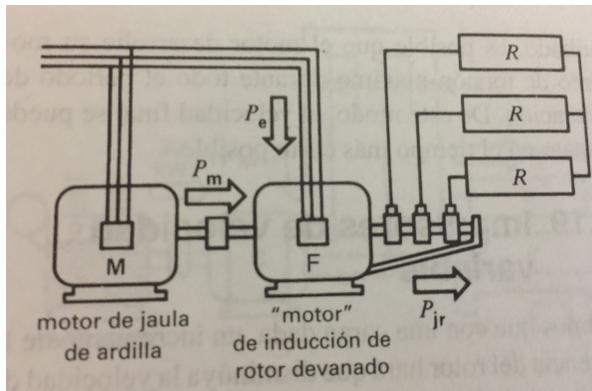


Figura 4.2 Modificación de la curva Par-Velocidad utilizando resistencias externas.

la curva de para valores de resistencia de $2.5R$, $5R$ y $25R$, donde se puede observa que el par nominal, la máquina produce su valor nominal a velocidades menores conforme se incrementa el valor de la resistencia y manteniendo el mismo consumo de corriente.

Marco Teórico Sesión 5, Máquina de Inducción, Convertidor de Frecuencia.

Un motor de rotor devanado convencional se puede utilizar como convertidor de frecuencia para generar a una frecuencia distinta a la de la compañía eléctrica. El estator de la máquina de rotor devanado esta conectado a la línea de servicio de electricidad y el rotor es impulsado por un motor a una velocidad apropiada (ver Figura 5.1). En esas condiciones el rotor proporciona una potencia trifásica a un voltaje E_2 y a una frecuencia f_2 distintas a la de la compañía eléctrica y cuyos valores dependerán del deslizamiento según se observa en las ecuaciones 5.1 y 5.2.



$$f_2 = S f_1 \tag{Ec. 5.1}$$

$$E_2 = S E_1 \tag{Ec. 5.2}$$

donde:

f_1 Frecuencia de la compañía.

E_1 Voltaje de la compañía.

S Deslizamiento.

Figura 5.1 Motor de Rotor devanado como convertidor de frecuencia

La frecuencia de Generación puede llegar a ser dos o tres veces la de la compañía de energía por lo que según la ecuación 5.1, para alcanzar esos valores de frecuencia, el deslizamiento tendrá que ser mayor a 1, lo cual se logrará haciendo girar el rotor en sentido contrario al del campo magnético giratorio.

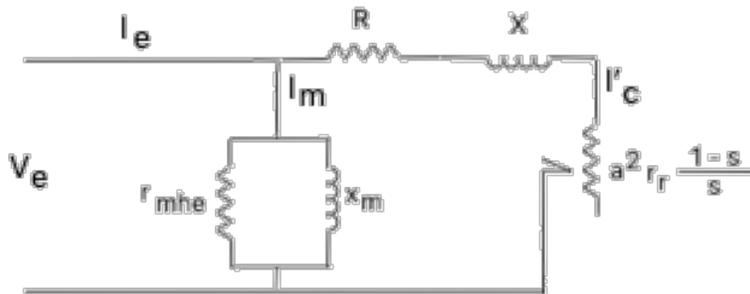
La operación del convertidor de frecuencia es entonces idéntica a la de un motor de inducción que opera como freno. Sin embargo la potencia que en la operación de freno es disipada en forma de calor, en esta conexión es ahora utilizada para suministrar potencia a una carga.

Sin embargo, sí se hace girar el rotor de máquina de inducción en el mismo sentido que el campo magnético giratorio, la frecuencia de salida de convertidor será menor a la frecuencia de la compañía eléctrica. Dando un rango de operación de frecuencia variable desde cerca de 3-5 Hz hasta 120-180Hz; sin embargo se tiene que tomar en cuenta la ecuación 5.2, donde se aprecia que el valor del voltaje de salida también tendría valores muy pequeños al depender E_2 del deslizamiento. Siendo la potencia en algunos casos tan pequeña que no convendría la utilización de este convertidor.

Marco Teórico Sesión 6, Máquina de Inducción, Diagrama de Carga.

El diagrama de carga de la máquina de inducción es mencionado por algunos autores como diagrama de círculo de o diagrama circular de Heyland y es una construcción geométrica que permite analizar el comportamiento de una máquina de inducción. Un diagrama de este tipo, permite realizar los cálculos de sus características y magnitudes de manera gráfica.

El diagrama de carga de la máquina de inducción se basa en el circuito equivalente aproximado que se obtuvo en las Sesión 3; cuando los voltajes de estator y frecuencia de alimentación permanecen constantes.



De este circuito equivalente se obtienen los valores que permitirán realizar la construcción del diagrama de carga aplicando las siguientes ecuaciones:

Figura 6.1 Circuito equivalente de la máquina de inducción.

El Diagrama circular se puede construir a partir de las pruebas de vacío y de rotor bloqueado. Agregando algunos trazos, se podrá obtener el comportamiento total del motor.

Es conveniente comenzar por dibujar el fero de mayor magnitud, procurando que ocupe todo el espacio disponible en el papel de dibujo, y de acuerdo con la escala que resulte de este primer trazo, se continua con el resto.

Pasos:

a) Trazar los ejes de referencia, y sobre el eje vertical dibujar el faser que representa el voltaje de fase V_f .

- b) Trazo de la corriente de arranque; de la prueba de rotor bloqueado se puede obtener
- 1 Magnitud de la corriente de fase en el arranque, que es la extrapolación de la corriente de fase de la prueba al valor correspondiente al voltaje nominal.
 - 2 Ángulo de fase. se deduce del factor de potencia de la prueba a partir de la potencia real y la potencia aparente de la prueba.

$$\theta_a = \cos^{-1} \frac{P_{rb}}{S_{rb}}$$

La magnitud del faser de corriente de arranque debe tener la longitud total del área destinada para el diagrama circular.

c) Calcular la escala de las corrientes ρ_A :

$$\rho_A = \frac{i_{rb}}{\text{longitud del segmento } OA}$$

d) Trazo de la corriente de vacío

- 1 Magnitud de la corriente de vacío, el segmento es igual a: $OB = \frac{i_0}{\rho}$
- 2 Ángulo de la corriente de vacío $\theta_0 = \cos^{-1} \frac{P_0}{Q_0}$

e) Trazo del arco de la circunferencia.

- 1 Del extremo del segmento OB se traza una línea horizontal paralela al eje imaginario.
- 2 Se traza una línea auxiliar (no es parte del análisis entre A y B).
- 3 Se obtiene la mediatriz hasta que está cruce con la línea horizontal del segmento del paso e1.
- 4 El punto de cruce será el centro del círculo que tendrá de radio la mitad del segmento auxiliar A-B del punto e2.

f) Característica de arranque del motor. Por el punto A se traza un vertical que define los puntos D y E que son los que se dan al cruzar La horizontal del e1 y el eje imaginario.

AD es la componente real de la corriente de arranque $AD\rho_A = i_a \cos \theta_a$
 Para facilitar la interpretación de resultados se puede definir una escala de potencias: $\rho_P = \rho_A V_f$

De manera que podemos identificar los siguientes parámetros.

Perdidas totales en el arranque: $= AD\rho_P$

Perdidas magnéticas en el arranque $= DE\rho_P$

Perdidas eléctricas en el estator y rotor al arranque $= EA\rho_P$

g) Para obtener las características nominales se dibuja el fasor OG que representa el valor de la corriente nominal

$$OG = \frac{i_{nom}}{\rho_A}$$

Al trazar una vertical del punto G se obtienen los puntos H, J, K, L Para completar el diagrama.

Para realizar el análisis de las condiciones de la máquina se pueden leer los siguientes datos:

$GL\rho_P$ = Potencia real de entrada por fase.

$LK\rho_P$ = Perdidas mecánicas y magnéticas por fase.

$KJ\rho_P$ = Perdidas eléctricas en el estator por fase.

$JH\rho_P$ = Perdidas eléctricas en el rotor por fase.

$HG\rho_P$ = Potencia mecánica de salida por fase.

$\frac{JH}{HG}$ = Deslizamiento.

$\frac{HG}{JG}\omega_s$ = Velocidad del motor.

$OG\rho_A$ = Corriente de fase.

$\frac{LG}{OG}$ = Factor de potencia.

$\frac{3HG\rho_P}{746}$ = Potencia total en la flecha (HP).

$\frac{HG}{LG} \times 100$ = Porcentaje de eficiencia.

$\frac{2.92 JG \rho_P}{\omega_s}$ = Par mecánico en kg-m.

Máquina de Síncrona

Marco Teórico: Curvas V y Curva de Capabilidad

Cuando se modifican las condiciones de operación de una máquina síncrona, las relaciones que existen entre los voltajes, corrientes, y potencias pueden ser fácilmente expresadas por medio de vectores, cuya magnitud y ángulo indican el punto de operación de la máquina.

Sin embargo estas mismas relaciones vectoriales pueden resumirse gráficamente y determinarse experimentalmente en el Laboratorio usando una disposición llamada "Familia de Curvas V".

Cuando la corriente de excitación de un motor síncrono se reduce, absorbe una corriente de inducido inductiva que es superior a la corriente mínima (necesaria) para el factor de potencia unitario. De manera parecida, cuando el motor está sobre excitado, la corriente del inducido también aumenta y supera la corriente necesaria a excitación normal para desarrollar el par necesario para mover la carga. Aplicando una cierta carga constante al eje del motor síncrono y variando la corriente de excitación desde la sub-excitación hasta la sobre-excitación y registrando el valor de la corriente del inducido en cada momento se obtiene una curva V para ese valor de carga dado.

Cada una de las curvas de la familia, tendrán un desplazamiento hacia la derecha al ir aumentado la carga porque el valor de corriente mínima se incrementa con el incremento del par necesario. Así, las curvas V representan los diagramas vectoriales y viceversa, para las distintas condiciones de carga y factor de potencia.