

Práctica 1

Campo magnético giratorio

Objetivos:

- a).- Demostración de la generación del campo magnético giratorio con velocidad síncrona variable.
- b).- Analizar la estructura de un drive variador de frecuencia como medio de control de velocidad de un motor de inducción trifásico jaula de ardilla.
- c).- Demostrar prácticamente el control de velocidad mediante el variador de la frecuencia en un sistema trifásico, arranque y paro, la inversión de giro mediante el cambio de secuencia de fases.

Introducción:

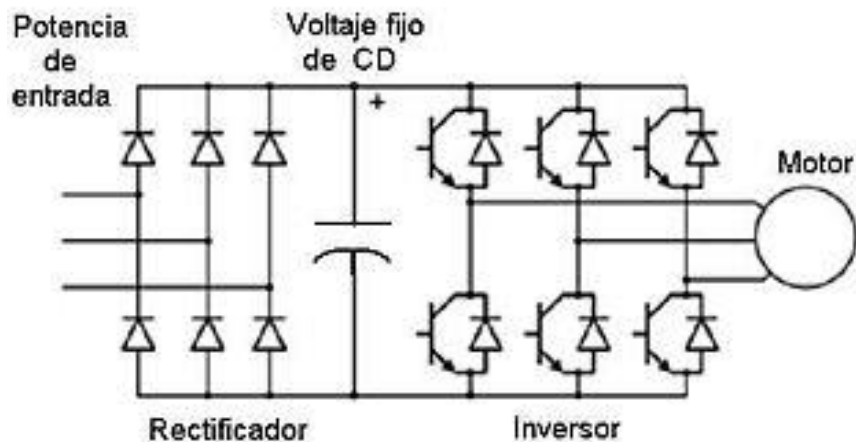
Los variadores de frecuencia pueden llevar a cabo el control de la velocidad del campo magnético giratorio generado mediante la aplicación de un sistema de voltaje trifásico balanceado, pudiendo a su vez bajo este mismo principio controlar la velocidad de un motor de inducción trifásico jaula de ardilla, ya que la velocidad síncrona del campo magnético giratorio depende de la frecuencia y del número de polos dada mediante la siguiente expresión:

$$n = 120f/p$$

Siendo n velocidad síncrona (rpm), f frecuencia (Hertz) y p número de polos en la máquina de inducción, observar como la velocidad síncrona depende directamente de la frecuencia de la corriente alterna.

Por lo anterior si se regula y controla la frecuencia, se regula y controla la velocidad síncrona, ya que el número de polos p es constante, por lo también de esta forma se puede controlar la velocidad en la máquina de inducción tomando en cuenta determinado deslizamiento.

El variador de frecuencia recibe la corriente alterna fija (voltaje y frecuencia fijas) a continuación la rectifica y mediante un enlace de cd, alimenta un inversor de cd a ca, el cual mediante el control del proceso de inversión, mediante por ejemplo una de las técnicas para controlar este proceso de inversión es la técnica PWM, puede entregar una corriente alterna con una frecuencia variable, la cual se puede utilizar para generar el campo magnético giratorio con velocidad variable y de esta forma finalmente controlar la velocidad de un motor de inducción trifásico jaula de ardilla, bajo un determinado deslizamiento.



Inicialmente se tiene corriente alterna ca fija, se rectifica a corriente directa cd y se aplica al enlace de cd, el cual alimenta el inversor de cd a ca controlado (PWM) entregado una ca con frecuencia variable aplicándose finalmente al motor.

En el caso de esta práctica se utiliza como variador de frecuencia al drive Micromaster 420 de Siemens.

Material y Equipo.

Motor de inducción jaula de ardilla.

Drive Variador de frecuencia micromaster 420 Siemens

Módulo de medición de ca amperímetro.

Brújula.

Reóstato de control.

1 Juego de cables de conexión 20+20.

Motor de inducción trifásico jaula de ardilla (Estator trifásico)

4 Multímetros.

Procedimiento.

1.- Conectar el siguiente circuito para controlar la velocidad del motor de inducción trifásico jaula de ardilla mediante el variador de frecuencia Micromaster 420:

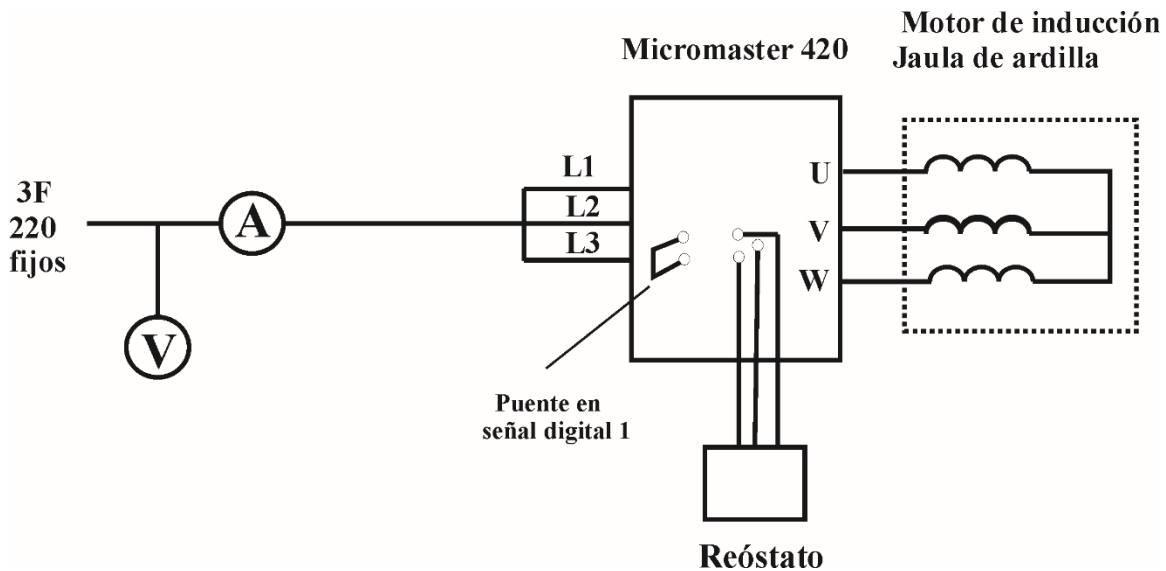


Figura 1 Motor de inducción 3F jaula de ardilla y Micromaster 420.

2.- Energizar el circuito y arrancar el motor mediante un pulso aplicado con el puente de la señal digital 1, a continuación ajustando el reóstato regular la velocidad en el motor de inducción trifásico jaula de ardilla entre los valores máximo y mínimo de ajuste.

3.- Medir la frecuencia de ca aplicada al motor conectando un multímetro como frecuencímetro conectado en paralelo con una fase y el neutro de la máquina, con otro multímetro medir el voltaje aplicado en el mismo circuito. Tomar tres lecturas máxima, intermedia y mínima en el ajuste del reóstato tanto de frecuencia como de voltaje, apagar la fuente.

4.- A continuación se analiza el campo magnético variable en un estator trifásico. Conectar ahora las fases U, V, W del Micromaster 420 a las fases del estator trifásico como fuente de alimentación en ca. Medir en este circuito el voltaje de fase a neutro y la frecuencia mediante los dos multímetros utilizados en el paso 3.

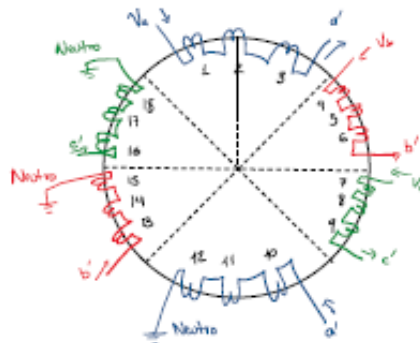


Figura 2 Conexiones en el estator trifásico en estrella con neutro flotante o a tierra.



Figura 3 Estator trifásico conectado en estrella con neutro flotante.

5.- Colocar la brújula sobre la periferia inferior dentro del estator.



6.- Energizar la fuente fija trifásica y dar un pulso en el puente en la señal digital 1 del Micromaster 420, observar el comportamiento de la brújula.

7.- Observar el arranque y paro de la brújula utilizar el pulso y el botón 0 en el panel mantener oprimido para apagar el drive, en el display del drive se muestra la frecuencia generada.

8.- Controlar la velocidad de la brújula mediante la frecuencia generada, ahora la velocidad de la brújula depende de la velocidad del campo magnético giratorio generado, variar la frecuencia mediante el reóstato, tomar lecturas máxima, intermedia y mínima de la frecuencia y voltaje en el circuito.

9.- Cambiar el sentido de giro de la brújula cambiando la secuencia de fases de la alimentación del Micromaster 420 al estator.

Reporte

- 1.- Reportar las mediciones de las variables en la práctica.
- 2.- ¿De qué variables depende la velocidad síncrona del campo magnético giratorio?
- 3.- ¿Cómo se puede cambiar el sentido de giro en el motor de inducción jaula de ardilla?
- 4.- ¿Cómo se controla la velocidad en el motor y en la brújula?
- 5.- Conclusiones.

Práctica 2

Generador de CD en derivación autoexcitado

Objetivos:

- a).- Analizar las características del generador de cd en derivación autoexcitado en vacío y plena carga.
- b).- Conexión de una máquina de cd como generador en derivación autoexcitado.
- c).- Obtener la curva de voltaje de armadura en función de la corriente del generador.

Introducción:

El generador de cd autoexcitado no requiere de una fuente adicional para excitar su devanado de campo en derivación como es el caso de un generador de cd con excitación independiente.

Las características del generador de cd depende de la forma de conexión de su campo de excitación, la cual puede ser en serie, derivación o compuesta.

La autoexcitación es posible debido al magnetismo remanente de los polos del estator. Cuando la armadura gira, se induce un pequeño voltaje en sus terminales, si el devanado en derivación se conecta a la armadura, se tiene el flujo de una corriente de campo pequeña debido al voltaje generado en las terminales de la armadura. Si esta corriente fluye en el sentido adecuado, el magnetismo remanente se refuerza, lo cuál aumenta el voltaje en la armadura y, por lo tanto, se genera un rápido aumento de voltaje.

Si la corriente no fluye en el sentido adecuado para reforzar el magnetismo remanente, este magnetismo se reduce y el voltaje en terminales se anula. Esta condición se corrige intercambiando las terminales del campo en derivación.

Material y Equipo.

Módulo de medición de cd.

Módulo de medición de ca amperímetro.

Máquina de cd.

Máquina síncrona.

Módulo de resistencias.

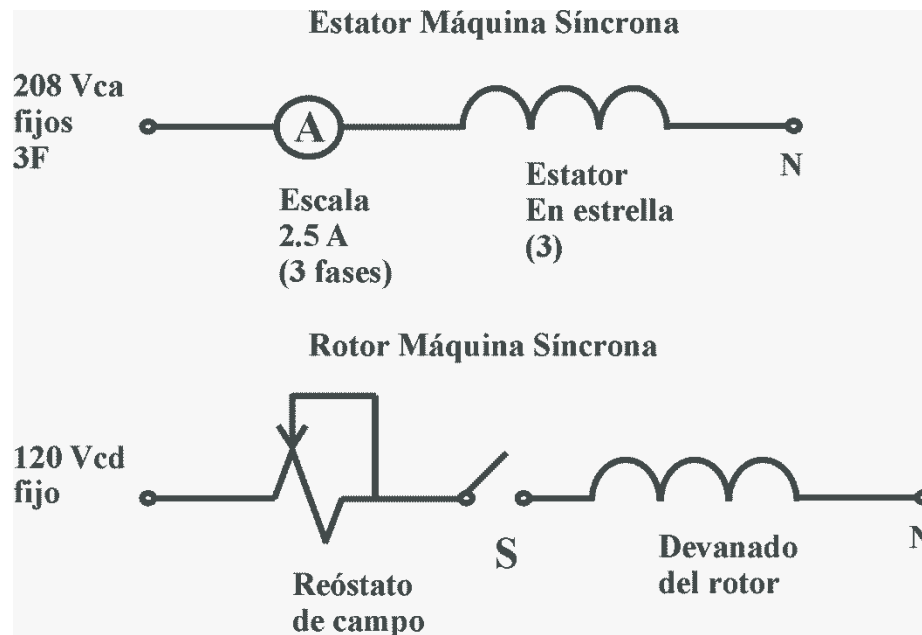
1 Juego de cables de conexión 15+15.

Banda.

Multímetro.

Procedimiento.

1.- Se utiliza una máquina síncrona como primo motor para el generador de cd, conectar el siguiente circuito:

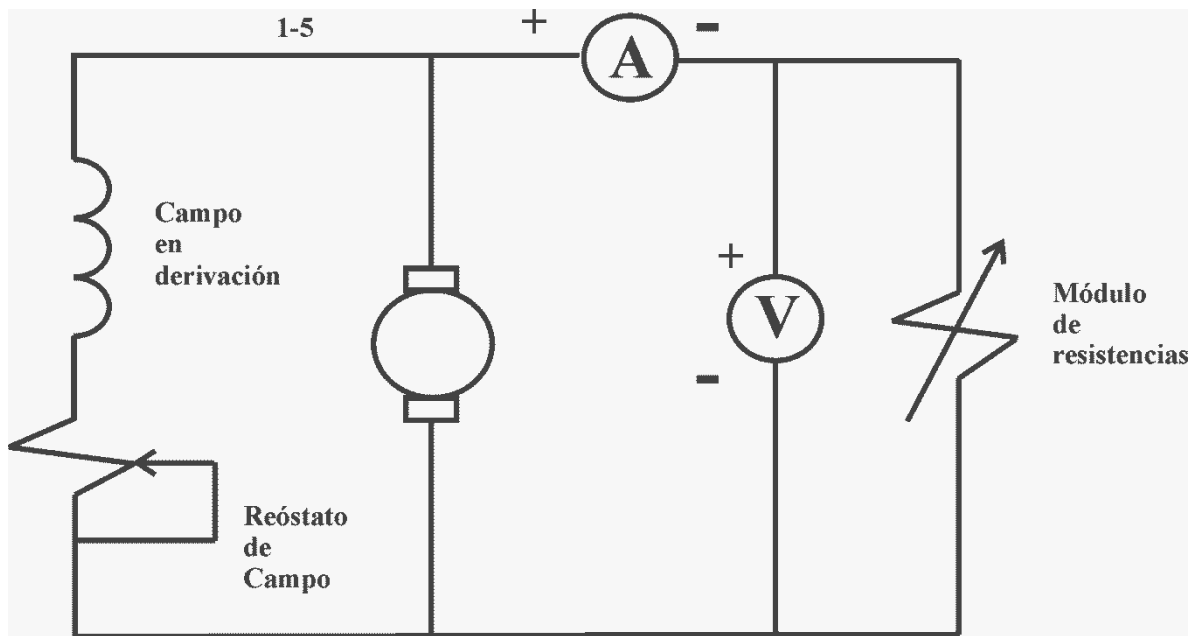


No arrancar el motor síncrono hasta que se indique.

Secuencia de arranque: Encender fuente, después del arranque del motor, cerrar el interruptor S del rotor de la máquina síncrona, no arrancar con el interruptor S cerrado.

Secuencia de apagado: Apagar fuente y abrir el interruptor S.

2.- Conectar el generador de cd en derivación autoexcitado, según la figura utilizando los módulos de medición de cd y el módulo de resistencias considerar la terminal 1 de la armadura y la terminal 5 del campo en derivación como positivas, ajustar a su posición abierta todos los interruptores del módulo de resistencias para una carga cero para la condición en vacío del generador.



- 3.- Acoplar el motor síncrono y la máquina de cd mediante la banda.
- 4.- Ajustar el reóstato de campo en el generador de cd en el sentido del reloj a su posición extrema para obtener una resistencia mínima.
- 5.- Con el interruptor S del rotor de la máquina síncrona en posición abierta, encender la fuente de alimentación, el motor síncrono arranca como motor de inducción cuando termine su periodo de aceleración, cerrar S para sincronizar el motor.
- 6.- Observar el voltaje de armadura, si se nulifica, intercambiar con cuidado las terminales de campo en derivación del generador de cd, si es necesario apagar la fuente e intercambiar las terminales, llevando a cabo la secuencia de apagado y arranque del motor síncrono.
- 7.- En el voltímetro de cd correspondiente, medir el voltaje en vacío _____
- 8.- Variar la resistencia en el circuito de campo y observar el comportamiento del voltaje en terminales de la armadura. Explicar las variaciones en el voltaje.
- 9.- Ajustar el reóstato a su posición nominal, conectar una resistencia de 120 ohms (300 ohms primera sección, 600 y 300 ohms segunda sección en paralelo del módulo de resistencias) como carga. Ajustar el reóstato de campo hasta que se tenga un voltaje de armadura de 120 Vcd y una corriente en la carga de 1 Acd, ajustar en esta posición por el resto del procedimiento el reóstato de campo en derivación del generador de cd.
- 10.- Ajustar la resistencia de carga y tomar lecturas de corriente y voltaje en terminales del generador de cd autoexcitado para completar la siguiente tabla.

Rl ohms	I Acd	Va Vcd	Potencia W	Sección 1	Sección 2	Sección 3
Infinito	0		0			
1200						
600						
400				1200-600		
300						
240				1200-300		
200				600-300		
171.4				1200-600-300		
150				1200	1200-600-300	
133.3				60	1200-600-300	
120				300	600-300	
109.1				300	1200-600-300	
100				1200-300	1200-600-300	
92.3				600-300	1200-600-300	
85.7				1200-600-300	1200-600-300	
80				1200	1200-600-300	1200-600-300
75				600	1200-600-300	1200-600-300

11.- Los valores menores a 120 ohms en la carga consumen una corriente por arriba de la corriente nominal, realizar estas mediciones rápidamente o por un instante ya que esta es una condición de sobrecarga de la máquina de cd.

Reporte

1.- ¿Por qué en el punto 4 el reóstato de campo se ajusta a su resistencia mínima?

2.- Sí una máquina de cd pierde su magnetismo remanente ¿Puede generar voltaje de salida? Explicar.

3.- Graficar V_a contra I , esta es la curva característica de carga del generador de cd autoexcitado en derivación.

4.- Calcular la regulación de voltaje del generador de cd autoexcitado en derivación:

$$\% \text{ reg} = (V_{\text{vacío}} - V_{\text{plena carga}}) / V_{\text{plena carga}} \times 100$$

5.- Conclusiones.

Práctica 3

Generador de CD compuesto conexión corta

Objetivos:

- a).- Analizar las características del generador de cd compuesto en condición de vacío y plena carga.
- b).- Conexión de una máquina de cd como generador compuesto y diferencial compuesto.
- c).- Obtener la curva de voltaje de armadura en función de la corriente de armadura en ambos generadores.

Introducción:

Los generadores en derivación autoexcitados tienen la desventaja de que variaciones en su corriente de carga al pasar de una condición de vacío a plena carga generan variaciones en el voltaje de salida. Su elevada regulación se debe a:

- 1.- La intensidad de campo magnético disminuye proporcionalmente al voltaje en la armadura.
- 2.- La caída de voltaje en la armadura al pasar de vacío a plena carga.
- 3.- La velocidad del primo motor puede disminuir con la carga.

Los devanados en derivación y en serie en un generador compuesto se conectan de tal forma que sus campos magnéticos se refuercen (conexión aditiva). Cuando aumenta la corriente de carga, disminuye la corriente que pasa por el devanado de campo en derivación reduciendo la intensidad de campo magnético. Si se hace pasar la corriente de carga por el devanado en serie entonces compensará y hasta podrá aumentar la intensidad de campo magnético.

Si el devanado serie tiene el número apropiado de vueltas, el aumento obtenido en la intensidad de campo magnético compensará la reducción debida al devanado de campo en derivación.

La intensidad de campo magnético resultante de la suma de los campos magnéticos de los devanados en derivación y serie permanecerá casi invariable y se tendrá un cambio pequeño en el voltaje de salida desde la condición de vacío a plena carga.

Si el campo en serie se conecta haciendo que la corriente de armadura fluya en un sentido tal que el campo magnético del devanado en serie se oponga al campo del devanado en derivación, entonces se tiene el generador compuesto diferencial (conexión subtractiva), el cuál tiene una regulación de voltaje elevada, siendo útil en aplicaciones, como la soldadura y el alumbrado de arco, cuando se requiere una corriente de salida constante aunque el voltaje de salida sea variable.

Material y Equipo.

Módulo de medición de cd.

Módulo de medición de ca amperímetro.

Máquina de cd.

Máquina síncrona.

Módulo de resistencias.

1 Juego de cables de conexión 15+15.

Banda.

2 Multímetros.

Procedimiento.

1.- Se utiliza una máquina síncrona como primo motor para el generador de cd, conectar el siguiente circuito:

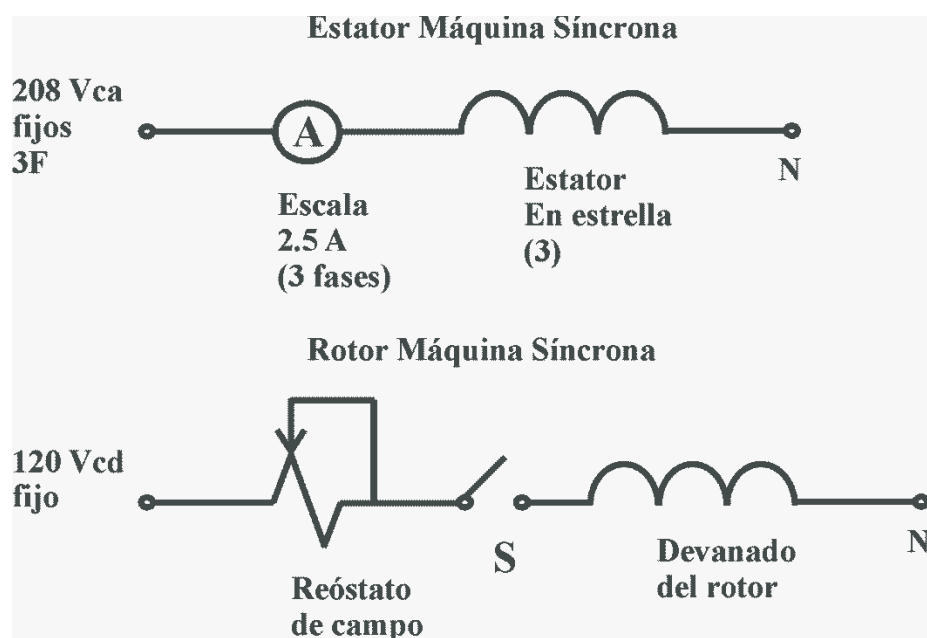


Figura 1 Motor síncrono como primo motor.

No arrancar el motor síncrono hasta que se indique.

Secuencia de arranque: Encender fuente, después del arranque del motor, cerrar el interruptor S del rotor de la máquina síncrona, no arrancar con el interruptor S cerrado.

Secuencia de apagado: Apagar fuente y abrir el interruptor S.

2.- Conectar el generador de cd compuesto autoexcitado conexión corta, según la figura utilizando los módulos de medición de cd y el módulo de resistencias considerar la terminal 3 del campo en serie y la terminal 5 del campo en derivación como positivas o como marcas de polaridad, para realizar la conexión aditiva de campos magnéticos, ajustar a su posición abierta todos los interruptores del módulo de resistencias para una carga cero para la condición en vacío del generador.

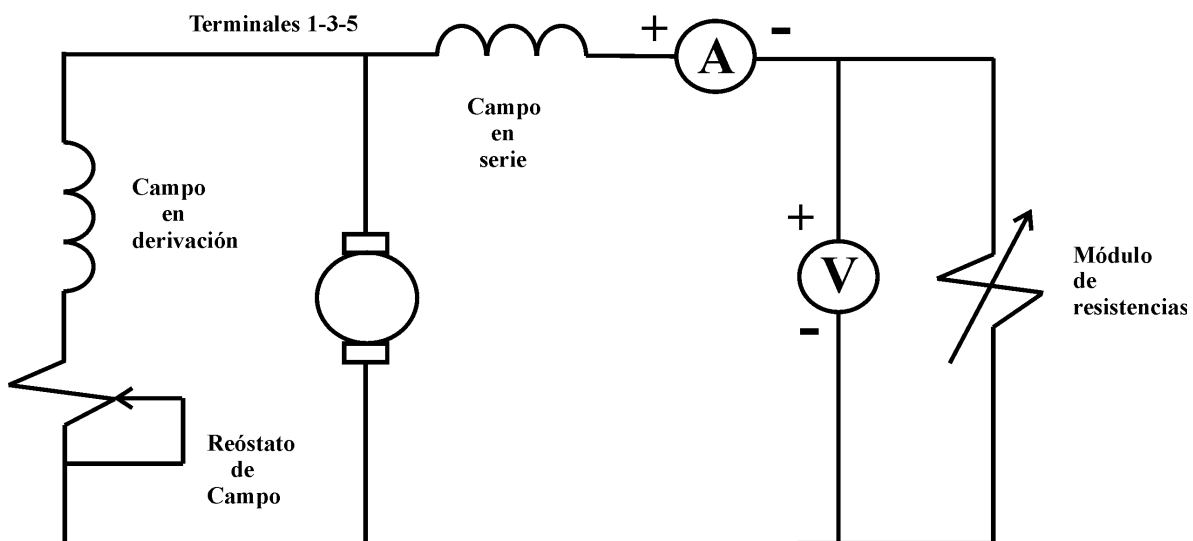


Figura 2 Generador de cd compuesto en conexión corta.

3.- Acoplar el motor síncrono y la máquina de cd mediante la banda.

4.- Ajustar el reóstato de campo en el generador de cd en el sentido del reloj a su posición extrema para obtener una resistencia mínima. Verificar que las escobillas de la máquina de cd se encuentran en su posición neutra.

5.- Con el interruptor S del rotor de la máquina síncrona, encender la fuente de alimentación, el motor síncrono arranca como motor de inducción cuando termine su periodo de aceleración, cerrar S para sincronizar el motor.

6.- Observar el voltaje de armadura, este debe de aumentar, si se nulifica, apagar la fuente de alimentación e intercambiar dos de las tres terminales del estator del motor síncrono para cambiar su sentido de giro, conectar la fuente de alimentación, llevando a cabo la secuencia de apagado y arranque del motor síncrono.

7.- En el voltímetro de cd correspondiente, medir el voltaje en vacío _____

8.- Variar la resistencia en el circuito de campo en derivación y observar el comportamiento del voltaje en terminales de la armadura. Explicar las variaciones en el voltaje.

9.- Ajustar el reóstato de campo en derivación a una posición intermedia, dejar por el resto del procedimiento el reóstato de campo en esta posición.

10.- Ajustar la resistencia de carga y tomar lecturas de corriente y voltaje en terminales del generador de cd compuesto con conexión aditiva para completar la siguiente tabla.

Rl ohms	I Acd	Va Vcd	Potencia W	Sección 1	Sección 2	Sección 3
Infinito	0		0			
1200						
600						
400				1200-600		
300						
240				1200-300		
200				600-300		
171.4				1200-600-300		
150				1200	1200-600-300	
133.3				60	1200-600-300	
120				300	600-300	
109.1				300	1200-600-300	
100				1200-300	1200-600-300	
92.3				600-300	1200-600-300	

85.7	1200-600-300	1200-600-300
80	1200	1200-600-300 1200-600-300
75	600	1200-600-300 1200-600-300

11.- Los valores menores a 120 ohms en la carga, consumen una corriente por arriba de la corriente nominal, realizar estas mediciones rápidamente o por un instante ya que esta es una condición de sobrecarga de la máquina de cd.

12.- Apagar la fuente y aplicar la secuencia de apagado al motor síncrono. Intercambiar las conexiones del devanado de campo en serie de tal forma que la corriente circule por este devanado en sentido opuesto (intercambiar terminales 3 y 4 del devanado de campo serie), para obtener una conexión del generador de cd compuesto en forma subtractiva, restando la intensidad de campo magnético del devanado en derivación con la correspondiente intensidad generada por el devanado de campo en serie.

13.- Encender la fuente y aplicar secuencia de arranque al motor síncrono (primo motor del generador compuesto de cd), ajustar la resistencia de carga y tomar lecturas de corriente y voltaje en terminales del generador de cd compuesto con conexión subtractiva para completar la siguiente tabla:

Rl ohms	I Acd	Va Vcd	Potencia W	Sección 1	Sección 2	Sección 3
Infinito	0		0			
1200						
600						
400				1200-600		
300						
240				1200-300		
200				600-300		
171.4				1200-600-300		
150				1200	1200-600-300	
133.3				60	1200-600-300	

120	300	600-300	
109.1	300	1200-600-300	
100	1200-300	1200-600-300	
92.3	600-300	1200-600-300	
85.7	1200-600-300	1200-600-300	
80	1200	1200-600-300	1200-600-300
75	600	1200-600-300	1200-600-300

14.- Apagar la fuente aplicando secuencia de apagado en el motor síncrono.

Reporte

1.- ¿Por qué en el punto 4 el reóstato de campo en derivación se ajusta a una resistencia mínima?

2.- ¿Por qué en el punto 9 el reóstato de campo en derivación se ajusta a una resistencia intermedia?

3.- Graficar V_a contra I , para las conexiones aditiva y substractiva esta es la curva característica de carga del generador de cd compuesto conexión corta.

4.- Calcular la regulación de voltaje del generador de cd compuesto para conexión corta aditiva y substractiva.

$$\% \text{ reg} = \left(\frac{V_{\text{vacío}} - V_{\text{plena carga}}}{V_{\text{plena carga}}} \right) \times 100$$

5.- Conclusiones.

Práctica 4

Máquina de Inducción

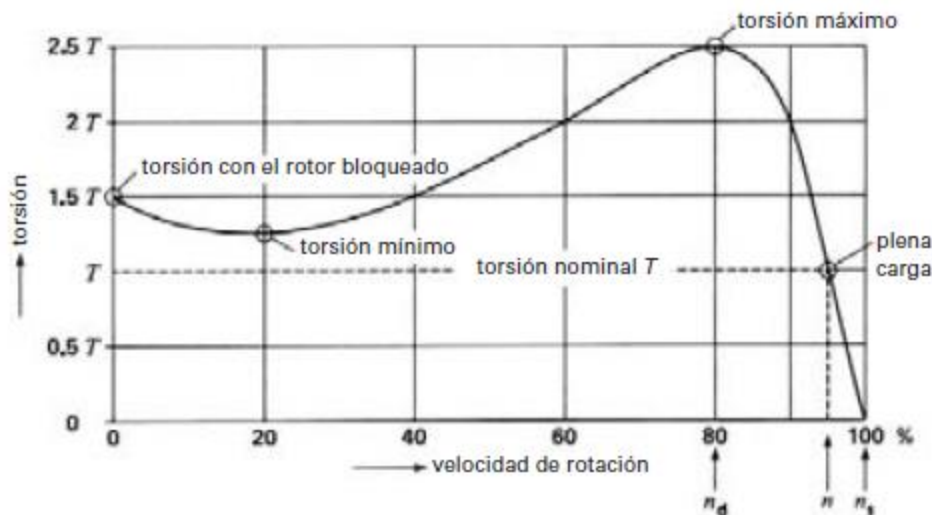
Control de par por resistencias

Objetivos:

- a).- Obtener las curvas características del motor de inducción de rotor devanado, en condiciones de operación en vacío y plena carga.
- b).- Observar el control de velocidad y par utilizando resistencias variables externas conectadas al devanado del rotor de la máquina de inducción.
- c).- Obtener la curva de par-velocidad de la máquina de inducción trifásica de rotor devanado.

Introducción:

El par o momento desarrollado por un motor depende de su velocidad, pero la relación entre los dos no se puede expresar por una ecuación, por lo cual se utiliza una curva que muestra la relación entre la velocidad y el par generado por un motor de inducción, denominada curva par-velocidad. En la curva par-velocidad que se muestra en la siguiente figura 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 generar la máquina y el par a plena carga o mejor conocido como par nominal.

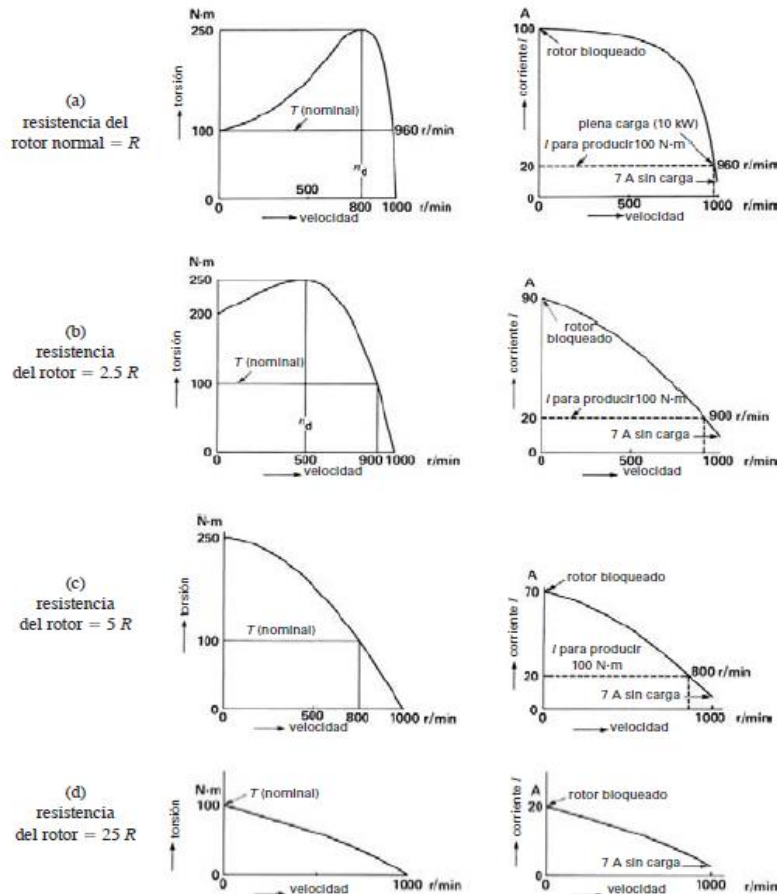


Curva par-velocidad típica de un motor de inducción trifásico jaula de ardilla.

Los motores pequeños menores a 15 HP desarrollan su par máximo a aproximadamente el 80% de la velocidad síncrona mientras en los motores grandes de 1500 HP y más alcanzan su momento de par máximo a 98% de su velocidad síncrona. En las máquinas con rotor jaula de ardilla, el grosor de las barras conductoras y la profundidad de las mismas en el rotor determinan la característica par-velocidad y esta no puede ser modificada, ya que esta característica depende del valor de la resistencia del rotor.

En las máquinas de inducción de rotor devanado sí es posible modificar el valor de la resistencia, agregando resistencias externas que permiten modificar algunos de los parámetros de la curva par-velocidad. Con esta modificación se pueden obtener valores de par de arranque mejores en bajas velocidades, por lo que resultar ser un excelente método para el control de la velocidad durante el arranque de una máquina de inducción en condiciones de plena carga y cercanas.

En la siguiente figura se observa la curva para el valor de la resistencia de diseño denominada como R ; los valores que se utilizan para modificar la característica par velocidad son en función a ese valor de diseño. En la figura se muestran la curva para valores de resistencia de $2.5R$, $5R$ y $25R$, donde se puede observar que el par nominal, la máquina genera su valor nominal a velocidades menores conforme se incrementa el valor de la resistencia y manteniendo el mismo consumo de corriente.



La curva par-velocidad se modifica según el valor de la resistencia del rotor en la máquina de inducción jaula de ardilla.

Para el caso de la máquina de inducción de rotor devanado, si las escobillas conectadas en los anillos del rotor se conectan a través de reóstatos, se puede desarrollar un par de arranque más elevado. Conforme el motor se acerca a la velocidad normal de operación, la resistencia del reóstato se reduce gradualmente y queda fuera del circuito del rotor cuando se llega a plena velocidad.

Una característica especial del motor de rotor devanado, es su capacidad para operar a velocidad variable. Si se hace variar la resistencia del reóstato, se puede variar el deslizamiento y, por lo tanto, la velocidad del motor. La operación del motor a una velocidad menor que la nominal significa que éste funciona a una eficiencia y potencia reducidas. Además, el motor se hace más susceptible a variaciones de velocidad cuando la carga varía, debido a la mayor resistencia del rotor.

Material y Equipo.

Máquina de inducción trifásica rotor devanado.

Electrodinamómetro.

Módulo de reóstato trifásico para el control de velocidad

Módulo de wattmetro trifásico.

Módulo de medición voltímetro de ca.

Módulo de medición amperímetro de ca.

Tacómetro.

Cables B-B 20+20.

Banda.

2 Multímetros.

Procedimiento.

1.- Analizar la estructura del reóstato de control de velocidad. Al girar el control en sentido antihorario al extremo la resistencia es 0 ohms, al girar en sentido horario al extremo la resistencia es aproximadamente de 16 ohms.

2.- Analizar la máquina de inducción trifásica rotor devanado, localizar devanado trifásico del estator, rotor, así como sus terminales de conexión, anillos rozantes y escobillas. El devanado trifásico del estator se compone de muchas vueltas de conductor con diámetro pequeño colocado alrededor del estator por cada fase, este devanado es idéntico en las máquinas de inducción jaula de ardilla, rotor devanado y máquina síncrona.

3.- ¿Cuáles son los valores nominales de la máquina? Corriente en el estator, voltaje en el estator, velocidad y potencia.

4.- Conectar el circuito de la figura 1 utilizando la máquina de inducción rotor devanado, el electrodinamómetro, wattmetro trifásico, voltímetros de ca, amperímetros de ca y reóstato trifásico de control de velocidad. Conectar el estator de la máquina de inducción en estrella y su neutro conectarlo al neutro de la fuente de alimentación, se utiliza la fuente trifásica variable, conectar el reóstato trifásico de control de velocidad al circuito del rotor de la máquina de inducción rotor devanado, todavía no acoplar el motor rotor devanado con el electrodinamómetro.

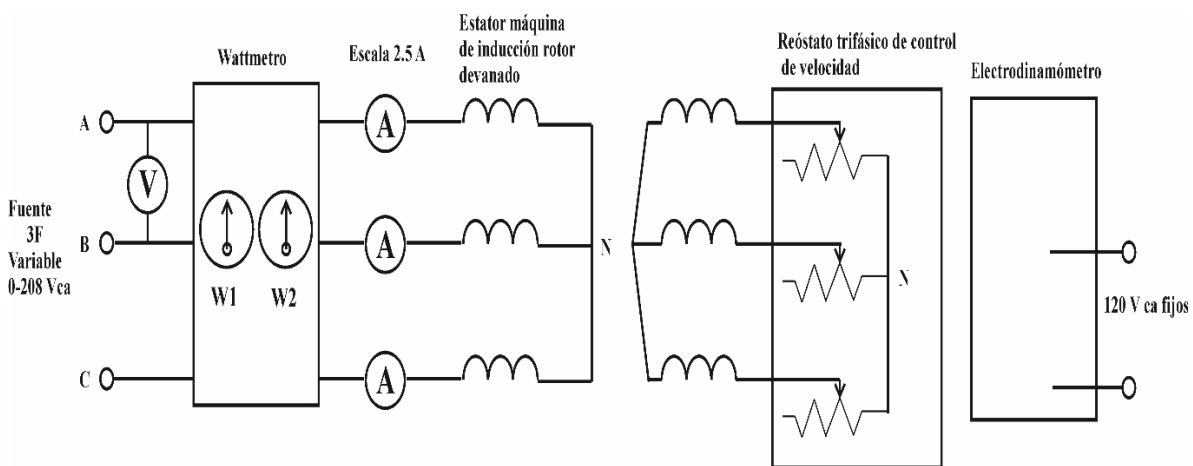


Figura 1 Motor de inducción 3f jaula de ardilla.

5.- Ajustar el reóstato al extremo antihorario para una resistencia cero.

6.- Conectar la fuente y ajustar el voltaje entre fases a 208 volts ca, tomar las lecturas de corriente, velocidad y wattmetros, desconectar la fuente de alimentación. Esta es la condición de vacío en la máquina de inducción rotor devanado. Anotar estos valores para par igual a cero en la tabla 1.

7.- A continuación acoplar la máquina de inducción rotor devanado con el electrodinamómetro mediante la banda. Ajustar el control del electrodinamómetro a carga mínima girando en el sentido contrario de las manecillas del reloj.

8.- Conectar la fuente de alimentación y ajustar el voltaje entre fases a 208 Volts ca, tomar las lecturas de corriente, velocidad y wattmetros, para cada valor de par indicado en la tabla 1, después de tomar las lecturas correspondientes a los pares indicados, desconectar la fuente de alimentación. Esta es la determinación de la gráfica de la curva par-velocidad de la máquina de inducción rotor devanado. w_t es igual a la suma algebraica de w_1 y w_2 tomando en cuenta sus signos, esta cantidad indica la potencia real absorbida por el motor. Para valores donde se exceda los valores nominales de la

máquina, ajustar el par requerido, tomar lecturas, bajar el par a un valor seguro por debajo de los valores nominales. El primer renglón correspondiente a un par cero, son los valores obtenidos en el paso seis.

Tabla 1

Par	I1	I2	I3	w1	w2	wt	velocidad	% s
Lbf-pg	amps	amps	amps	watts	watts	watts	rpm	deslizamiento
0								
1.5								
3								
4.5								
6								
7.5								
9								

9.- Con la fuente apagada, ajustar el reóstato al extremo horario para resistencia máxima, desacoplar el electrodinamómetro, encender la fuente y tomar las lecturas para un par cero, primer renglón de la tabla 2, apagar la fuente.

Tabla 2

Par	I1	I2	I3	w1	w2	wt	velocidad	% s
Lbf-pg	amps	amps	amps	watts	watts	watts	rpm	deslizamiento
0								
1.5								
3								
4.5								
6								
7.5								
9								

10.- Volver a acoplar la máquina de inducción rotor devanado con el electrodinamómetro mediante la banda.

11.- Repetir las lecturas para cada par indicado en la tabla 2 con voltaje de entrada igual a 208 Vca.

12.- Bajo un par de 6 lbf.plg, girar el reóstato desde un extremo al otro. Observar como mediante la variación de la resistencia en el rotor es posible regular la velocidad y el par de la máquina de inducción rotor devanado.

¿Cambia la velocidad del motor? _____

¿Varía el par desarrollado? _____

13.- Prueba de rotor bloqueado. Con la fuente de alimentación apagada, cambiar la fuente trifásica variable del motor rotor devanado a fija de 208 volts ca, ajustar el reóstato a resistencia cero (extremo antihorario) ajustar el electrodinamómetro a máxima carga girando el control a su extremo en el sentido de las manecillas del reloj. Conectar la fuente y medir rápidamente la corriente de fase, voltaje entre fases y el par de arranque, máximo conectar la fuente por 3 segundos y apagar la fuente de alimentación.

Reporte

1.- Calcular el deslizamiento en % para cada valor de par de la curva par-velocidad, la velocidad síncrona es de 1800 rpm. (deslizamiento= $((\text{vel. síncrona} - \text{vel. rotor})/\text{vel. síncrona}) \times 100 \%$)

2.- Calcular la potencia aparente necesaria para generar el par de arranque.

Voltaje entre fases (volts) x corriente de fase (amps)= _____

3.- Comparar este valor con la potencia nominal del motor ¿Cuántas veces es mayor la potencia del par de arranque que la potencia nominal del motor? _____

4.- Graficar las dos curvas par-velocidad, para el motor de inducción trifásico rotor devanado (tablas 1 y 2).

5.- Conclusiones.

Práctica 4

Máquina de Inducción

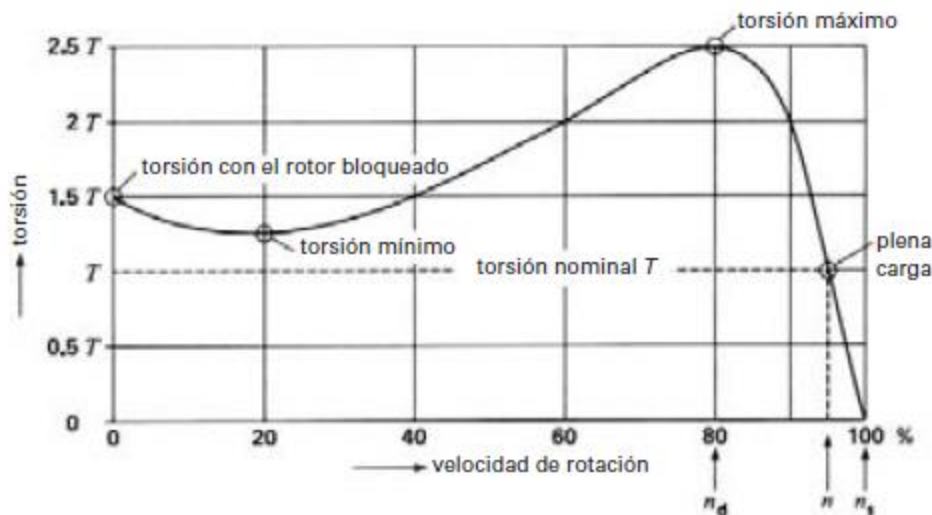
Control de par por resistencias

Objetivos:

- a).- Obtener las curvas características del motor de inducción de rotor devanado, en condiciones de operación en vacío y plena carga.
- b).- Observar el control de velocidad y par utilizando resistencias variables externas conectadas al devanado del rotor de la máquina de inducción.
- c).- Obtener la curva de par-velocidad de la máquina de inducción trifásica de rotor devanado.

Introducción:

El par o momento desarrollado por un motor depende de su velocidad, pero la relación entre los dos no se puede expresar por una ecuación, por lo cual se utiliza una curva que muestra la relación entre la velocidad y el par generado por un motor de inducción, denominada curva par-velocidad. En la curva par-velocidad que se muestra en la siguiente figura 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 generar la máquina y el par a plena carga o mejor conocido como par nominal.

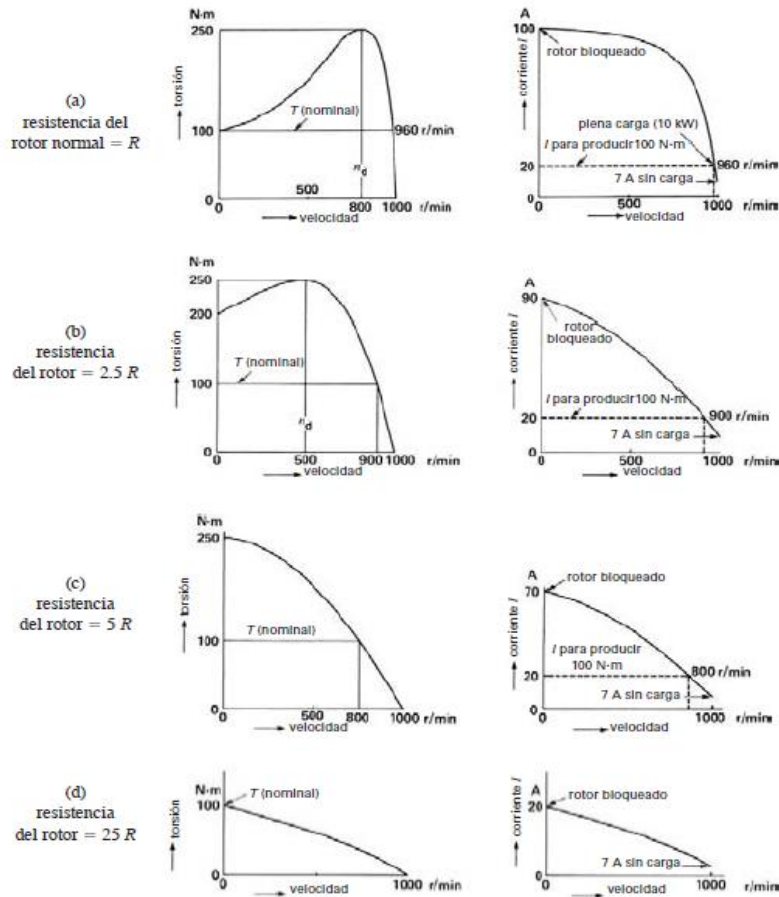


Curva par-velocidad típica de un motor de inducción trifásico jaula de ardilla.

Los motores pequeños menores a 15 HP desarrollan su par máximo a aproximadamente el 80% de la velocidad síncrona mientras en los motores grandes de 1500 HP y más alcanzan su momento de par máximo a 98% de su velocidad síncrona. En las máquinas con rotor jaula de ardilla, el grosor de las barras conductoras y la profundidad de las mismas en el rotor determinan la característica par-velocidad y esta no puede ser modificada, ya que esta característica depende del valor de la resistencia del rotor.

En las máquinas de inducción de rotor devanado sí es posible modificar el valor de la resistencia, agregando resistencias externas que permiten modificar algunos de los parámetros de la curva par-velocidad. Con esta modificación se pueden obtener valores de par de arranque mejores en bajas velocidades, por lo que resultar ser un excelente método para el control de la velocidad durante el arranque de una máquina de inducción en condiciones de plena carga y cercanas.

En la siguiente figura se observa la curva para el valor de la resistencia de diseño denominada como R ; los valores que se utilizan para modificar la característica par velocidad son en función a ese valor de diseño. En la figura se muestran la curva para valores de resistencia de $2.5R$, $5R$ y $25R$, donde se puede observar que el par nominal, la máquina genera su valor nominal a velocidades menores conforme se incrementa el valor de la resistencia y manteniendo el mismo consumo de corriente.



La curva par-velocidad se modifica según el valor de la resistencia del rotor en la máquina de inducción jaula de ardilla.

Para el caso de la máquina de inducción de rotor devanado, si las escobillas conectadas en los anillos del rotor se conectan a través de reóstatos, se puede desarrollar un par de arranque más elevado. Conforme el motor se acerca a la velocidad normal de operación, la resistencia del reóstato se reduce gradualmente y queda fuera del circuito del rotor cuando se llega a plena velocidad.

Una característica especial del motor de rotor devanado, es su capacidad para operar a velocidad variable. Si se hace variar la resistencia del reóstato, se puede variar el deslizamiento y, por lo tanto, la velocidad del motor. La operación del motor a una velocidad menor que la nominal significa que éste funciona a una eficiencia y potencia reducidas. Además, el motor se hace más susceptible a variaciones de velocidad cuando la carga varía, debido a la mayor resistencia del rotor.

Material y Equipo.

Máquina de inducción trifásica rotor devanado.

Electrodinamómetro.

Módulo de reóstato trifásico para el control de velocidad

Módulo de wattmetro trifásico.

Módulo de medición voltímetro de ca.

Módulo de medición amperímetro de ca.

Tacómetro.

Cables B-B 20+20.

Banda.

2 Multímetros.

Procedimiento.

1.- Analizar la estructura del reóstato de control de velocidad. Al girar el control en sentido antihorario al extremo la resistencia es 0 ohms, al girar en sentido horario al extremo la resistencia es aproximadamente de 16 ohms.

2.- Analizar la máquina de inducción trifásica rotor devanado, localizar devanado trifásico del estator, rotor, así como sus terminales de conexión, anillos rozantes y escobillas. El devanado trifásico del estator se compone de muchas vueltas de conductor con diámetro pequeño colocado alrededor del estator por cada fase, este devanado es idéntico en las máquinas de inducción jaula de ardilla, rotor devanado y máquina síncrona.

3.- ¿Cuáles son los valores nominales de la máquina? Corriente en el estator, voltaje en el estator, velocidad y potencia.

4.- Conectar el circuito de la figura 1 utilizando la máquina de inducción rotor devanado, el electrodinamómetro, wattmetro trifásico, voltímetros de ca, amperímetros de ca y reóstato trifásico de control de velocidad. Conectar el estator de la máquina de inducción en estrella y su neutro conectarlo al neutro de la fuente de alimentación, se utiliza la fuente trifásica variable, conectar el reóstato trifásico de control de velocidad al circuito del rotor de la máquina de inducción rotor devanado, todavía no acoplar el motor rotor devanado con el electrodinamómetro.

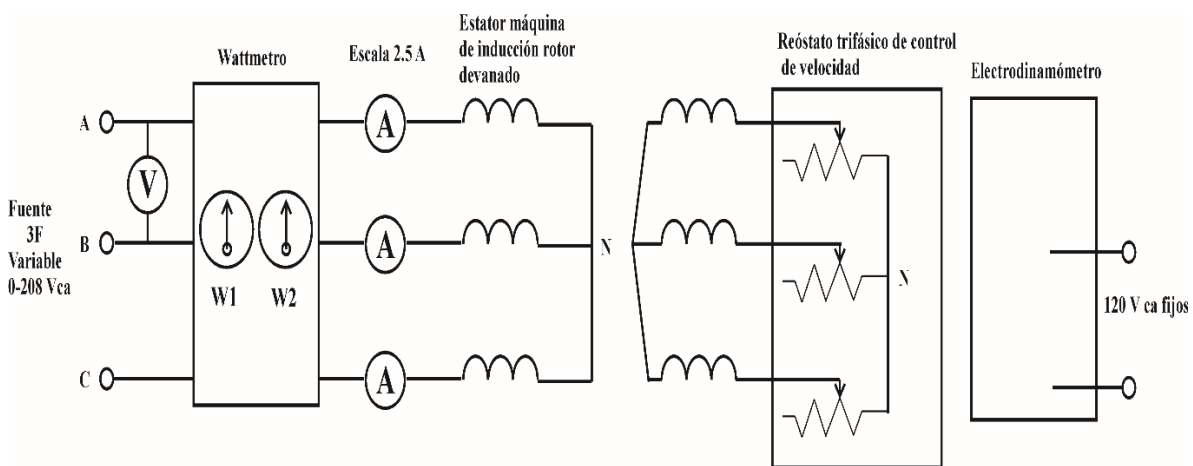


Figura 1 Motor de inducción 3f jaula de ardilla.

5.- Ajustar el reóstato al extremo antihorario para una resistencia cero.

6.- Conectar la fuente y ajustar el voltaje entre fases a 208 volts ca, tomar las lecturas de corriente, velocidad y wattmetros, desconectar la fuente de alimentación. Esta es la condición de vacío en la máquina de inducción rotor devanado. Anotar estos valores para par igual a cero en la tabla 1.

7.- A continuación acoplar la máquina de inducción rotor devanado con el electrodinamómetro mediante la banda. Ajustar el control del electrodinamómetro a carga mínima girando en el sentido contrario de las manecillas del reloj.

8.- Conectar la fuente de alimentación y ajustar el voltaje entre fases a 208 Volts ca, tomar las lecturas de corriente, velocidad y wattmetros, para cada valor de par indicado en la tabla 1, después de tomar las lecturas correspondientes a los pares indicados, desconectar la fuente de alimentación. Esta es la determinación de la gráfica de la curva par-velocidad de la máquina de inducción rotor devanado. w_t es igual a la suma algebraica de w_1 y w_2 tomando en cuenta sus signos, esta cantidad indica la potencia real absorbida por el motor. Para valores donde se exceda los valores nominales de la

máquina, ajustar el par requerido, tomar lecturas, bajar el par a un valor seguro por debajo de los valores nominales. El primer renglón correspondiente a un par cero, son los valores obtenidos en el paso seis.

Tabla 1

Par	I1	I2	I3	w1	w2	wt	velocidad	% s
Lbf-pg	amps	amps	amps	watts	watts	watts	rpm	deslizamiento
0								
1.5								
3								
4.5								
6								
7.5								
9								

9.- Con la fuente apagada, ajustar el reóstato al extremo horario para resistencia máxima, desacoplar el electrodinamómetro, encender la fuente y tomar las lecturas para un par cero, primer renglón de la tabla 2, apagar la fuente.

Tabla 2

Par	I1	I2	I3	w1	w2	wt	velocidad	% s
Lbf-pg	amps	amps	amps	watts	watts	watts	rpm	deslizamiento
0								
1.5								
3								
4.5								
6								
7.5								
9								

10.- Volver a acoplar la máquina de inducción rotor devanado con el electrodinamómetro mediante la banda.

11.- Repetir las lecturas para cada par indicado en la tabla 2 con voltaje de entrada igual a 208 Vca.

12.- Bajo un par de 6 lbf.plg, girar el reóstato desde un extremo al otro. Observar como mediante la variación de la resistencia en el rotor es posible regular la velocidad y el par de la máquina de inducción rotor devanado.

¿Cambia la velocidad del motor? _____

¿Varía el par desarrollado? _____

13.- Prueba de rotor bloqueado. Con la fuente de alimentación apagada, cambiar la fuente trifásica variable del motor rotor devanado a fija de 208 volts ca, ajustar el reóstato a resistencia cero (extremo antihorario) ajustar el electrodinamómetro a máxima carga girando el control a su extremo en el sentido de las manecillas del reloj. Conectar la fuente y medir rápidamente la corriente de fase, voltaje entre fases y el par de arranque, máximo conectar la fuente por 3 segundos y apagar la fuente de alimentación.

Reporte

1.- Calcular el deslizamiento en % para cada valor de par de la curva par-velocidad, la velocidad síncrona es de 1800 rpm. (deslizamiento= $((\text{vel. síncrona} - \text{vel. rotor})/\text{vel. síncrona}) \times 100 \%$)

2.- Calcular la potencia aparente necesaria para generar el par de arranque.

Voltaje entre fases (volts) x corriente de fase (amps)= _____

3.- Comparar este valor con la potencia nominal del motor ¿Cuántas veces es mayor la potencia del par de arranque que la potencia nominal del motor? _____

4.- Graficar las dos curvas par-velocidad, para el motor de inducción trifásico rotor devanado (tablas 1 y 2).

5.- Conclusiones.

Práctica 5

Máquina de Inducción

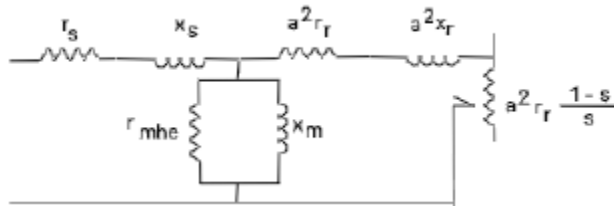
Obtención de parámetros

Objetivos:

- a).- Presentar el modelo de la máquina de inducción representado mediante su circuito equivalente.
- b).- Determinar los parámetros de la máquina de inducción para su inclusión en el circuito equivalente.
- c).- Obtener los parámetros de la máquina utilizando mediciones eléctricas, cálculos y las pruebas de vacío y rotor bloqueado.

Introducción:

El circuito equivalente es un modelo 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 siguiente figura.



Circuito equivalente de la máquina de inducción

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.
- $a^2 r_r((1-s)/s)$ 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 está moviendo el motor.

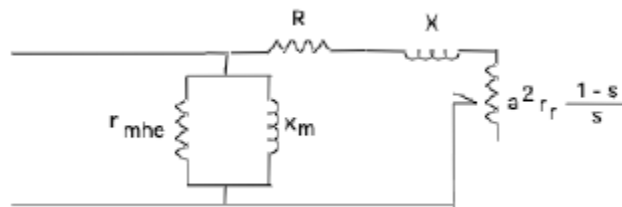
La obtención de los parámetros del circuito exacto es bastante complicada (en particular las reactancias de dispersión) por lo que se realizan algunas consideraciones que permiten una reducción del circuito, obteniéndose lo que se denomina circuito equivalente aproximado donde las resistencias de rotor 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 siguiente figura:



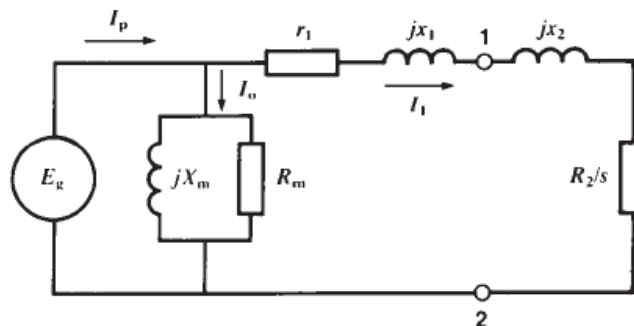
Circuito equivalente aproximado de una máquina de inducción.

La determinación de los parámetros para este circuito es susceptible de realizar y su análisis de operación resulta menos complejo que el del circuito exacto, sin que los cambios realizados generen un error apreciable en los resultados del análisis.

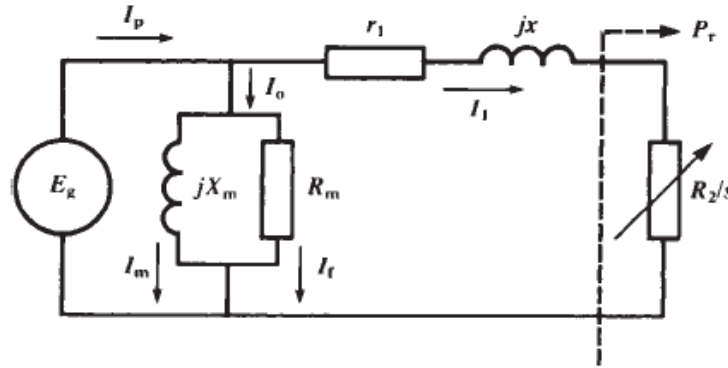
Los parámetros del circuito serán determinados mediante tres pruebas:

- Prueba de vacío.
- Prueba de rotor bloqueado
- Determinación de resistencias de estator.

En la siguiente figura se representa el circuito equivalente por fase de una máquina de inducción rotor devanado, las variables del rotor se refieren al estator.



Si las reactancias de dispersión del estator (x_1) y rotor (x_2) se combinan en el circuito equivalente para formar una reactancia de dispersión equivalente x , se tiene el siguiente circuito:



Los valores aproximados de r_1 , r_2 , X_m , R_m y x del circuito equivalente se pueden encontrar por medio de las pruebas en vacío o sin carga y de rotor bloqueado.

Prueba sin carga. Cuando un motor de inducción funciona sin carga, el deslizamiento es sumamente pequeño. De acuerdo con la figura anterior, esto significa que el valor de R_2/s es muy alto, por lo que la corriente I_1 es insignificante comparada con I_o . Por lo tanto, sin carga, el circuito se compone básicamente de la rama magnetizante X_m , R_m . Sus valores pueden determinarse midiendo el voltaje, la corriente y la potencia sin carga, como sigue:

a.- Medir la resistencia del estator R_{LL} entre dos terminales cualesquiera. Suponiendo una conexión en Y, el valor de r_1 es:

$$r_1 = R_{LL}/2$$

b.- Arrancar el motor sin carga utilizando el voltaje línea a línea nominal, E_{NL} . Medir la corriente sin carga I_{NL} y la potencia activa trifásica total P_{NL} .

Entonces se realizan los siguientes cálculos de la potencia aparente total S_{NL} y la potencia reactiva total Q_{NL} :

$$S_{NL} = \sqrt{3}E_{NL}I_{NL}$$

$$Q_{NL} = \sqrt{S_{NL}^2 - P_{NL}^2}$$

Las pérdidas por fricción del rodamiento en los baleros, por ventilación y del hierro o en el circuito magnético pueden ser evaluadas mediante:

$$P_f + P_v = P_{NL} - 3I_{NL}^2 r_1$$

La resistencia R_m que representa $P_f + P_v$ se puede calcular mediante:

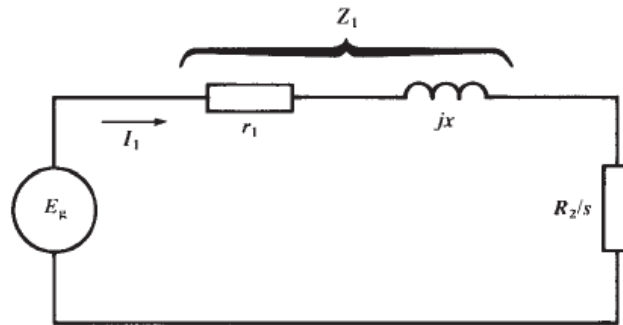
$$R_m = E_{NL}^2 / (P_f + P_v)$$

La reactancia magnetizante se evalúa mediante la siguiente expresión:

$$X_m = E_{NL}^2 / Q_{NL}$$

Prueba con el rotor bloqueado. Bajo un voltaje de línea nominal, cuando el rotor de un motor de inducción está bloqueado, la corriente I_p del estator es casi seis veces su valor nominal. Además, el deslizamiento s es igual a uno. Esto significa que r_2/s es igual a r_2 , donde r_2 es la resistencia del rotor reflejada o referida al estator. Como I_p es mucho más

grande que la corriente de excitación I_o , se puede omitir la rama magnetizante. Esto da como resultado el circuito de la figura siguiente:



El circuito está compuesto de la reactancia de dispersión x , la resistencia r_1 del estator y la resistencia $R_2/s = r_2/1 = r_2$ reflejada o referida al rotor. Estos valores se pueden determinar midiendo el voltaje, la corriente y la potencia en condiciones de rotor bloqueado, como se describe a continuación:

- Aplicar voltaje trifásico reducido al estator para que la corriente en el estator sea aproximadamente igual a su valor nominal.
- Tomar lecturas de E_{LR} (línea a línea), I_{LR} y de la potencia trifásica total P_{LR} con las que se realizan los cálculos siguientes:

$$S_{LR} = \sqrt{3}E_{LR}I_{LR}$$

$$Q_{LR} = \sqrt{S_{LR}^2 - P_{LR}^2}$$

$$x = Q_{LR}/3I_{LR}^2$$

Para obtener r_2 se tiene:

$$3I_{LR}^2(r_1 + r_2) = P_{LR}$$

Despejando a r_2 :

$$r_2 = P_{LR}/(3I_{LR}^2) - r_1$$

Los valores calculados de los parámetros en las pruebas en vacío y rotor bloqueado, se sustituyen en el circuito equivalente para de esta forma representar la máquina de inducción.

Material y Equipo.

Máquina de inducción trifásica rotor devanado.

Electrodinamómetro.

Módulo de wattmetro trifásico.

Módulo de medición voltímetro de ca.

Módulo de medición amperímetro de ca.

Cables B-B 20+20.

Banda.

2 Multímetros.

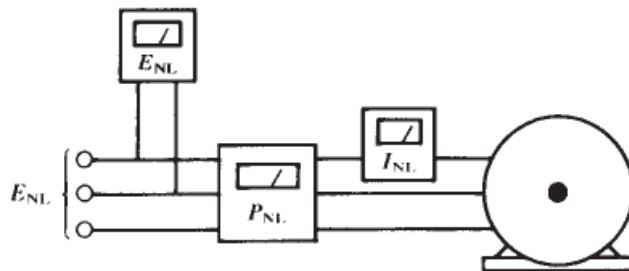
Procedimiento.

1.- En el estator de la máquina de rotor devanado, medir la resistencia del devanado por fase en el estator y rotor mediante el multímetro.

$$r_1 = r_{\text{estator}} = \text{_____} \text{ ohms}$$

$$r_{\text{rotor}} = \text{_____} \text{ ohms}$$

2.- Prueba en vacío. Conectar el siguiente circuito a la fuente trifásica variable de ca, utilizando el voltímetro de ca para medir el voltaje de línea a línea, el wattmetro trifásico para medir la potencia real trifásica, el amperímetro para medir la corriente de fase y la máquina de rotor devanado conectando en estrella el circuito tanto del estator como del rotor devanado. Como se lleva a cabo la prueba en vacío no acoplar ni conectar por ahora el electrodinamómetro.



3.- Ajustar el voltaje de línea a línea de la fuente al voltaje nominal de la máquina de 208 volts ca, la máquina debe comenzar a girar y tomar una velocidad en estado estable cercana a la velocidad síncrona, tomar las lecturas de voltaje, potencia y corriente y apagar la fuente.

$$E_{NL} = \underline{208 \text{ volts ca}}$$

$$P_{NL} = \text{_____} \text{ watts}$$

$$I_{NL} = \text{_____} \text{ amps.}$$

3.- Calcular los valores de los parámetros del circuito equivalente mediante las lecturas obtenidas en la prueba en vacío.

$$S_{NL} = \sqrt{3} E_{NL} I_{NL} = \text{_____} \text{ VAs}$$

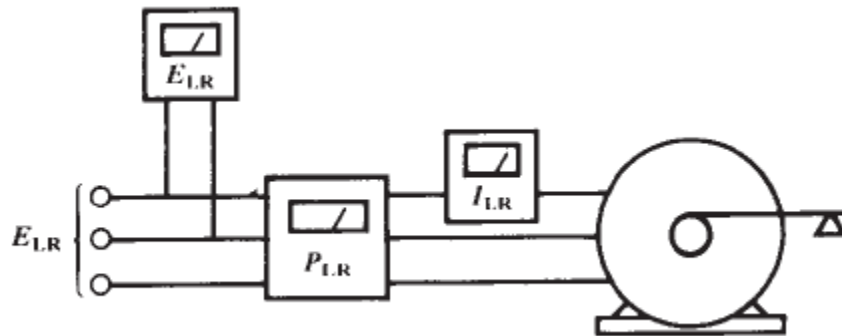
$$Q_{NL} = \sqrt{S_{NL}^2 - P_{NL}^2} = \text{_____} \text{ VARs}$$

$$P_f + P_v = P_{NL} - 3I_{NL}^2 r_1 = \text{_____} \text{ watts}$$

$$R_m = E_{NL}^2 / (P_f + P_v) = \text{_____} \text{ ohms}$$

$$X_m = E_{NL}^2 / Q_{NL} = \text{_____} \text{ ohms}$$

4.- Prueba de rotor bloqueado. Acoplar la máquina de inducción y el electrodinamómetro, ajustar el electrodinamómetro para suministrar la carga mecánica máxima girando la perilla al extremo horario, conectar la máquina de inducción a la fuente trifásica variable de ca, la siguiente figura muestra el circuito de la prueba de rotor bloqueado.



5.- Encender la fuente y ajustar el voltaje de tal forma que la máquina solo tome su corriente nominal, la máquina puede estar en reposo o girando lentamente tomar las siguientes lecturas de voltaje, corriente y potencia en la prueba de rotor bloqueado, ya que la máquina se encuentra en una condición de sobrecarga tomar rápidamente las lecturas y apagar la fuente.

E_{LR} =_____volts ca

P_{LR} =_____watts

I_{LR} =_____1.3_____amps ca.

6.- Calcular los valores de los parámetros del circuito equivalente mediante las lecturas obtenidas en la prueba de rotor bloqueado.

$$S_{LR} = \sqrt{3}E_{LR}I_{LR} = \text{_____} \text{ VAs}$$

$$Q_{LR} = \sqrt{S_{LR}^2 - P_{LR}^2} = \text{_____} \text{ VARs}$$

$$x = Q_{LR}/3I_{LR}^2 = \text{_____} \text{ ohms}$$

$$r_2 = P_{LR}/(3I_{LR}^2) - r_1 = \text{_____} \text{ ohms}$$

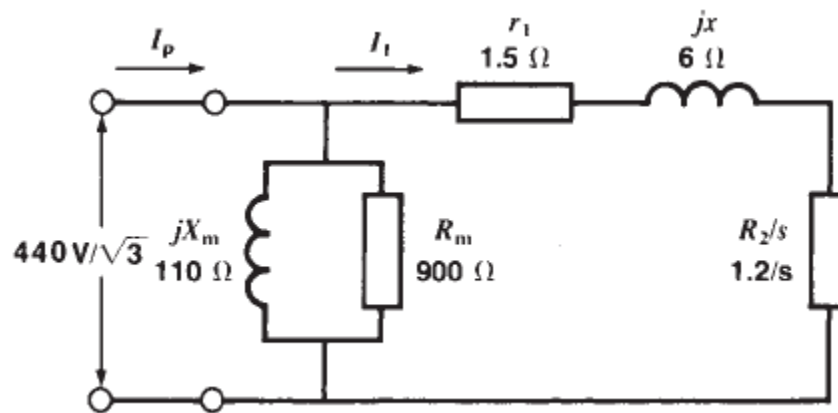
Alternativamente:

$$r_2 = R_{\text{rotor}} \cdot a^2 = \text{_____} \text{ ohms}$$

Con lo anterior quedan determinados los valores de los parámetros a utilizar dentro del circuito equivalente de la máquina de inducción rotor devanado. Para una máquina de inducción jaula de ardilla el procedimiento es similar solo que no es necesario la conexión eléctrica en el rotor.

Reporte

1.- Comparar los parámetros obtenidos del modelo del laboratorio contra los parámetros para un motor de 5 hp, 440 v trifásico, 60 Hz, 1800 rpm, corriente nominal de 7 amps, del siguiente circuito.



Parámetros del modelo del laboratorio.

$r_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ ohms}$

$x = \underline{\hspace{2cm}} \text{ ohms}$

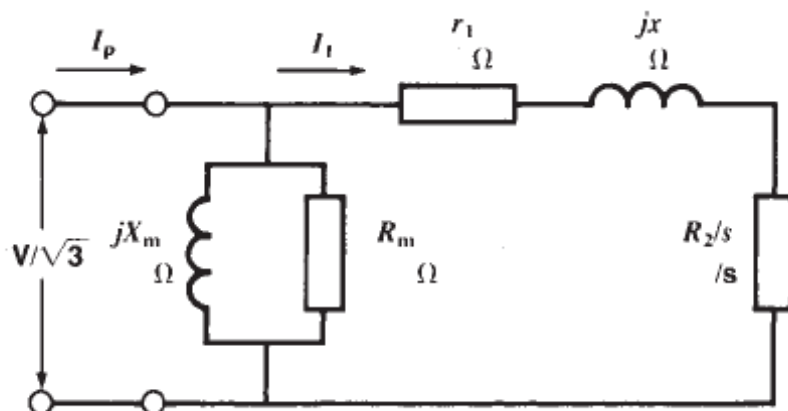
$X_m = \underline{\hspace{2cm}} \text{ ohms}$

$R_m = \underline{\hspace{2cm}} \text{ ohms}$

$r_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ ohms}$

Comentar acerca de esta comparación de cada uno de los parámetros.

2.- Sustituir en el siguiente circuito los parámetros obtenidos para el modelo del laboratorio.



Este circuito es el que representa a la máquina de inducción rotor devanado en cada una de sus fases.

3.- Conclusiones.

Práctica 6

Máquina de Inducción

Convertidor de frecuencia

Objetivos:

- a).- Presentar el funcionamiento de la máquina de inducción rotor devanado como convertidor de frecuencia.
- b).- Definir las ecuaciones de las cuales depende la máquina de inducción rotor devanado funcionando como convertidor de frecuencia.
- c).- Determinar el comportamiento de las variables en la máquina de inducción rotor devanado y su influencia en el proceso de conversión de la frecuencia entre el estator y el rotor de la máquina.

Introducción:

Un motor de inducción rotor devanado convencional se puede utilizar como convertidor de frecuencia para generar a una frecuencia distinta a la de la fuente de ca donde se encuentra conectado. El estator de la máquina de inducción rotor devanado está conectado a la alimentación normal de la compañía suministradora y el rotor puede ser impulsado mediante un motor de cd a una velocidad apropiada.

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 fuente eléctrica y cuyos valores dependerán del deslizamiento según se observa en las siguientes ecuaciones:

$$f_2 = sf_1$$

$$E_2 = sE_1$$

Donde:

f_1 – frecuencia de la fuente de ca.

E_1 – voltaje de la fuente de ca.

s – deslizamiento.

La frecuencia de generación puede llegar a ser mayor a la de la fuente de energía por lo que según la primera ecuación, 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. La potencia que en la operación de freno es disipada en forma de calor, en esta conexión puede ser utilizada para suministrar potencia a la carga eléctrica conectada al rotor devanado.

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 fuente eléctrica de ca. 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 segunda ecuación, 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.

La velocidad del campo magnético giratorio que se crea por el estator trifásico en una máquina de inducción es determinada por la frecuencia de la fuente de alimentación trifásica. Como la frecuencia en un sistema de potencia se trata de conservar constante o al menos dentro de ciertos límites, la velocidad síncrona del campo en el estator se puede considerar como constante.

El rotor devanado en una máquina de inducción trifásica se compone de un núcleo con tres fases o devanados que sustituyen las barras conductoras en corto circuito del rotor jaula de ardilla. Las corrientes inducidas en estos devanados se generan de la misma forma que se inducen en las barras en corto circuito de la jaula de ardilla. Si las terminales de los devanados del rotor se conectan a anillos colectores deslizantes se puede variar en su circuito la resistencia eléctrica y con ello regular o controlar las corrientes inducidas en el rotor devanado.

El campo magnético giratorio del estator induce un voltaje de corriente alterna en cada fase de los devanados en el rotor. Si el rotor se encuentra en reposo, la frecuencia del voltaje inducido en los devanados del rotor es igual a la frecuencia de la fuente de alimentación (acción transformador).

Si el rotor devanado gira en el mismo sentido que el campo magnético giratorio del estator, disminuye la velocidad a la que el flujo magnético corta los devanados en el rotor, por lo que el voltaje inducido en el rotor devanado y su frecuencia también disminuirán.

Cuando el rotor devanado gira a la misma velocidad y en el mismo sentido que el campo magnético giratorio del estator, el voltaje inducido y su frecuencia disminuyen a cero ya que no hay velocidad relativa entre el campo giratorio y el rotor devanado, en esta condición el rotor devanado gira a la velocidad síncrona.

Si el rotor devanado gira a la velocidad síncrona pero en sentido contrario al del campo magnético giratorio, el voltaje inducido y su frecuencia serán el doble de los valores correspondientes a cuando el rotor se encuentra en reposo.

Para comprobar el voltaje inducido y su frecuencia de acuerdo al sentido de giro, el rotor se puede girar mediante un motor, aunque para una velocidad de rotor dada los valores de voltaje inducido y su frecuencia son los mismos que sí el rotor gira por sí solo.

Material y Equipo.

Máquina de inducción trifásica rotor devanado.

Máquina de corriente directa.

Módulo de wattmetro trifásico.

Módulo de medición voltímetro de corriente alterna.

Módulo de medición amperímetro de corriente alterna.

Tacómetro.

20 cables de conexión cortos banana-banana.

20 cables de conexión largos banana-banana.

Banda.

Multímetro.

Medidor de Potencia.

Procedimiento.

1.- Analizar la máquina de inducción trifásica rotor devanado, localizar devanado trifásico del estator, los devanados en el rotor, su distribución en tres fases, así como sus terminales de conexión hacia los anillos, los anillos colectores deslizantes. El devanado trifásico del estator se compone de muchas vueltas de conductor con diámetro pequeño colocado alrededor del estator por cada fase, este devanado es idéntico en las máquinas de inducción jaula de ardilla, rotor devanado y máquina síncrona. Identificar los devanados del rotor compuestos por muchas vueltas de alambre magneto de calibre un poco mayor al calibre del devanado en el estator, estos devanados se distribuyen uniformemente en la periferia del rotor.

2.- ¿Cuáles son los valores nominales de la máquina? Corriente en el estator, voltaje en el estator, velocidad y potencia, así como, voltaje y corriente en el rotor devanado.

3.- Conectar el circuito de la Figura 1 utilizando la máquina de inducción rotor devanado, wattmetro trifásico, voltímetros de ca y amperímetros de ca. Conectar el estator de la máquina de inducción en estrella y su neutro conectarlo al neutro de la fuente de alimentación, se utiliza la fuente trifásica fija, todavía no acoplar mecánicamente mediante la banda el motor de rotor devanado con la máquina de cd en derivación.

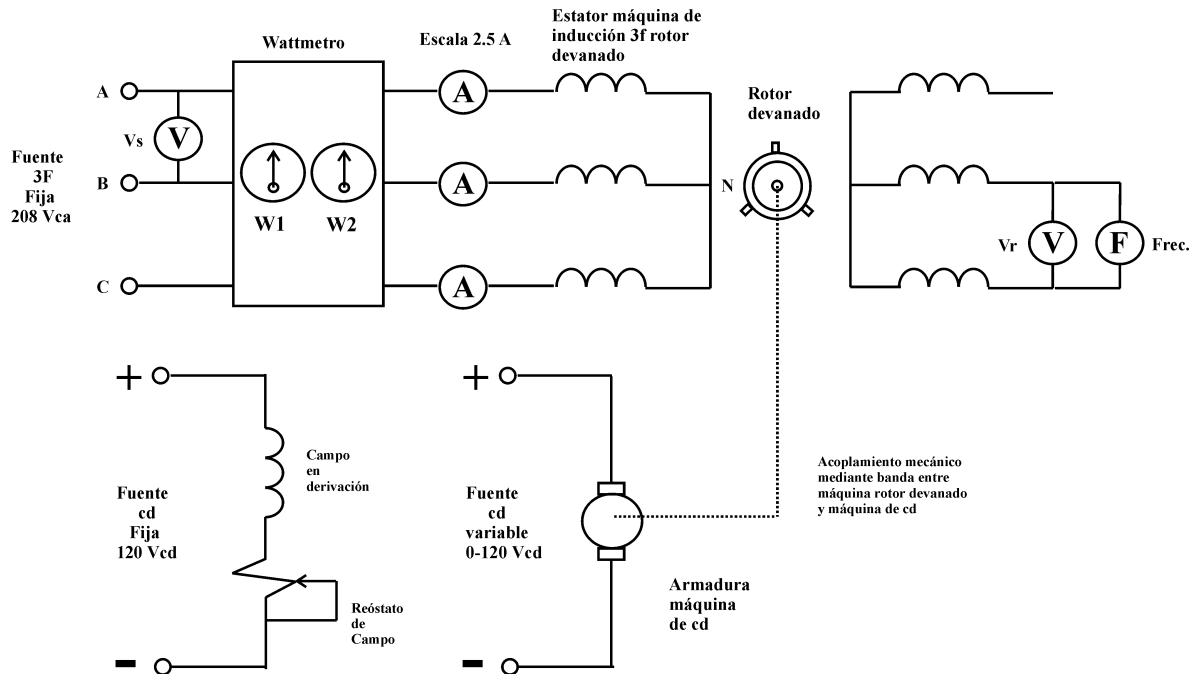


Figura 1 Máquina de inducción rotor devanado acoplada con la máquina de cd con campo en derivación excitado en forma independiente.

- 4.- El campo en derivación y su reóstato se conectan en serie a la fuente de cd fija de 120 volts de corriente directa, ajustar el reóstato de campo a una resistencia mínima, esto es su posición extrema en el sentido de las manecillas del reloj, esto es con el fin de mantener constante la excitación en el campo en derivación de la máquina de cd. Verificar que no se exceda la corriente nominal del devanado de campo, si es necesario ajustar el reóstato de campo para disminuir a la corriente de campo por debajo de su valor nominal.
- 5.- La armadura se conecta a la fuente variable de corriente directa, esto es con el fin de regular el voltaje de armadura y controlar la velocidad de la máquina de cd.
- 6.- Las mediciones de voltaje en la máquina de rotor devanado corresponden al voltaje en la fuente de alimentación y al voltaje inducido en el rotor. El medidor de frecuencia del voltaje inducido se conecta en paralelo con los devanados del rotor.
- 7.- Acoplar las máquinas de inducción de rotor devanado y la máquina de corriente directa mediante la banda.
- 8.- Conectar la fuente y ajustar el voltaje de armadura a cero, la máquina de corriente directa debe estar en reposo. Medir y anotar los valores del primer renglón en la siguiente tabla (V_s voltaje estator, $w_t = w_1 + w_2$ suma algebraica, V_r voltaje rotor, frecuencia en el rotor devanado).

9.- Mediante la fuente de corriente directa variable ajustar la velocidad de la máquina de corriente directa a cada valor de velocidad en la tabla y anotar las correspondientes mediciones.

[illegible]

10.- Desconectar la fuente de alimentación.

11.- Utilizando los valores de la tabla anterior ¿En qué sentido gira el motor de rotor devanado? ¿En el mismo sentido del campo magnético giratorio del estator o en sentido contrario?

12.- Con la fuente desconectada intercambiar las conexiones de la armadura para cambiar su sentido de giro, conservar el reóstato de campo en su posición extrema en el sentido de las manecillas del reloj.

13.- Conectar la fuente de alimentación y ajustar la velocidad de la máquina de corriente directa mediante la fuente variable de corriente directa. Medir y anotar los valores correspondientes en la siguiente tabla.

[illegible]

800
1000
1200
1400
1600
1800

14.- Desconectar la fuente de alimentación.

15.- Utilizando los valores de la tabla anterior ¿En qué sentido gira el motor de rotor devanado? ¿En el mismo sentido del campo magnético giratorio del estator o en sentido contrario?

Reporte

1.- ¿Cómo están conectados los devanados en el rotor devanado en delta o en estrella?

2.- ¿Cómo se podrían conectar en la otra conexión trifásica?

3.- ¿Por qué $w_t = w_1 + w_2$ debe ser la suma algebraica?

4.- Calcular la potencia aparente para cada renglón de las tablas

$$S = \sqrt{3} \cdot \text{Voltaje entre fases (volts)} \times \text{corriente de fase (amps)}$$

Para la corriente de fase utilizar el promedio de las tres lecturas disponibles.

5.- Calcular el factor de potencia mediante w_t y el valor obtenido en el punto 4 de este cuestionario según el triángulo de las potencias para cada renglón en las tablas.

6.- Calcular la potencia reactiva según el triángulo de las potencias para cada renglón en las tablas.

7.- Conclusiones.

Práctica 7

Máquina Síncrona

Obtención de Parámetros

Objetivos:

- a).- Obtener los parámetros eléctricos de la máquina síncrona para definir su circuito equivalente.
- b).- Mediante la medición directa determinar el valor de resistencia del estator y rotor.
- c).- Determinar mediante las pruebas en vacío y corto-circuito, el valor correspondiente a la reactancia síncrona del estator de la máquina síncrona.

Introducción:

Considerando la máquina síncrona, cada fase del devanado del estator tiene una resistencia eléctrica R y además cierta inductancia L . Como ésta es una máquina de corriente alterna, la inductancia se manifiesta y representa como una reactancia síncrona X_s , dada por la siguiente expresión:

$$X_s = 2\pi fL$$

Donde:

X_s es la reactancia síncrona por fase [ohms].

f es la frecuencia del generador [Hertz].

L es la inductancia del devanado del estator por fase [Henrys].

La reactancia síncrona de un generador es una reactancia interna, justo como su resistencia interna R . La impedancia está formada por la resistencia y la reactancia síncrona. Por lo general, el valor de X_s es 10 a 100 veces mayor que R ; por consiguiente, se puede omitir la resistencia eléctrica, a menos que nos interese la eficiencia o los efectos de calentamiento.

Se puede simplificar el circuito equivalente de la máquina síncrona mostrando sólo una fase del estator. De hecho, las otras dos fases son idénticas, excepto que sus voltajes (y corrientes) respectivos están desfasados 120° . Además, se omite la resistencia de los devanados, se obtiene obtendremos el circuito de la figura 1. Por lo tanto, un generador síncrono se puede representar mediante un circuito equivalente compuesto de un voltaje inducido E_o conectado en serie con una reactancia síncrona X_s .

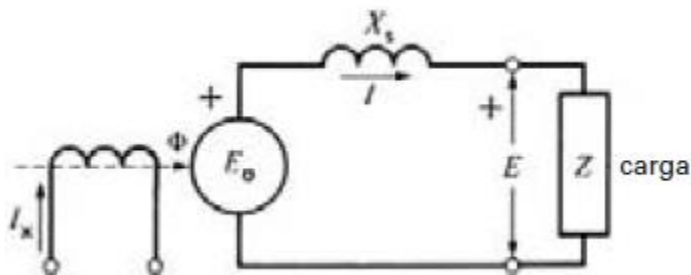


Fig. 1 Circuito equivalente de una máquina síncrona trifásica mostrando sólo una fase del estator.

En este circuito equivalente la corriente directa de excitación I_x en el rotor genera el flujo magnético Φ que induce a su vez el voltaje E_o interno en los devanados del estator. Para una reactancia síncrona dada, el voltaje E en las terminales de la máquina síncrona funcionando como generador depende de E_o y de la carga Z . Observar que E_o y E son los voltajes de línea a neutro e I es la corriente de línea o de fase en el circuito.

Material y Equipo.

Máquina síncrona.

Máquina de corriente directa.

Módulo de medición voltímetro de corriente alterna.

Módulo de medición amperímetro de corriente alterna.

Tacómetro.

20 cables de conexión cortos banana-banana.

20 cables de conexión largos banana-banana.

Banda.

3 Multímetros.

Procedimiento.

1.- Medición de las resistencias de estator y de campo utilizando el multímetro. En la máquina síncrona medir directamente la resistencia del estator por fase mediante el multímetro, puede medirse la resistencia para cada una de las fases comparando sus valores y obteniendo su promedio. También por medición directa obtener la resistencia del circuito de corriente directa en el rotor y anotar los valores correspondientes.

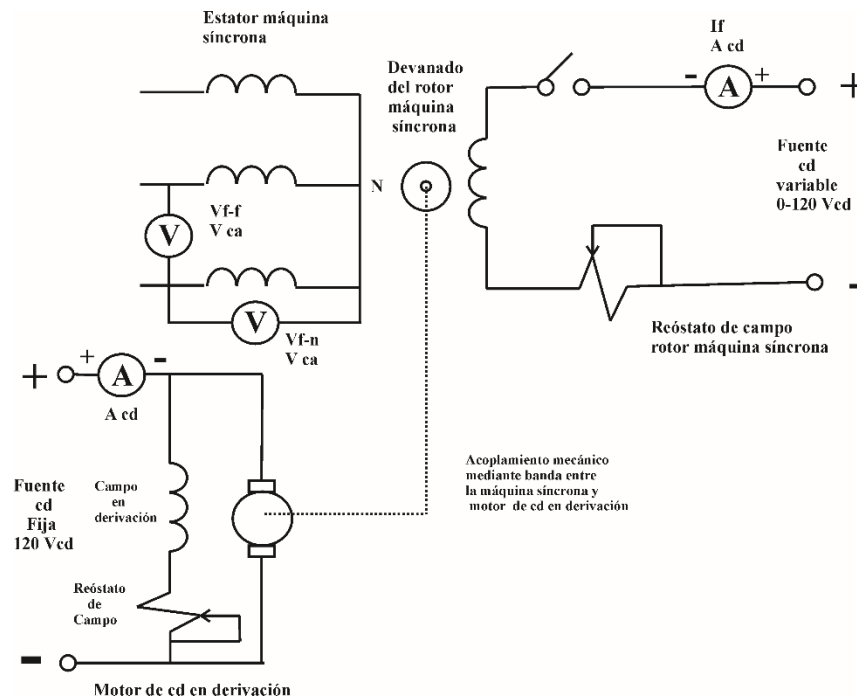
Resistencia estator por fase= _____ ohms.

Resistencia en corriente directa del rotor = _____ ohms.

Para determinar el valor de la reactancia síncrona se utilizan a continuación las pruebas de circuito abierto y corto-circuito.

Prueba de circuito abierto. Durante esta prueba, la máquina síncrona funcionando como generador, se impulsa a la velocidad nominal y la corriente de excitación de corriente directa en el rotor se aumenta hasta que se alcanza el voltaje nominal de fase a fase en las terminales del estator, bajo esta condición se realiza la medición de la corriente de excitación correspondiente y el voltaje de fase o línea a neutro en los devanados del estator.

1.- Conectar el siguiente circuito utilizando la máquina de cd, la máquina síncrona, medición de voltaje y corriente en ca y cd, así como las fuentes de cd fija y variable.



2.- Observar como en esta prueba se utiliza como primo motor de la máquina síncrona al motor de cd en derivación y la excitación en corriente directa del rotor de la máquina síncrona se conecta a la fuente variable de 0-120 volts cd.

3.- Acoplar mediante la banda el motor de cd y la máquina síncrona.

4.- Ajustar el reóstato del motor de cd a una resistencia mínima en sentido horario.

5.- Ajustar el reóstato del rotor de la máquina síncrona a una resistencia mínima en sentido antihorario y abrir el interruptor de este circuito.

6.- Encender la fuente y llevar al motor de cd a una velocidad de 1800 rpm tomando la lectura utilizando el tacómetro y ajustando el reóstato de campo si es necesario cuidando no rebasar la corriente nominal del motor de cd.

7.- Cerrar el interruptor en el circuito del rotor de la máquina síncrona y aumentar la corriente de excitación en este circuito hasta que el voltaje generado de fase a fase en el estator de la máquina síncrona sea de 208 volts ca, bajo esta condición tomar las lecturas de voltaje entre fase y neutro y la corriente de excitación.

Voltaje de fase a neutro en vacío _____volts ca (V_{fn})

Corriente de excitación en el rotor _____amps cd ($I_{exc\ cd}$)

8.- Apagar la fuente, ajustar a cero y abrir el interruptor en el rotor de la máquina síncrona.

Prueba de corto circuito. La corriente de excitación se reduce a cero, las tres terminales del estator se conectan en cortocircuito a través de amperímetros para medir la corriente de corto-circuito, con la máquina síncrona girando a la velocidad nominal se aumenta la corriente de excitación hasta que se tiene la corriente nominal en los devanados del estator (0.33 A).

9.- Con la fuente apagada, conectar en corto-circuito las terminales del estator en la máquina síncrona a través de amperímetros en cada una de las fases, con el control de la fuente en cero, encender la fuente cuidando que el interruptor en el rotor de la máquina síncrona se encuentre abierto.

10.- Ajustar la velocidad del motor a 1800 rpm y cerrar el interruptor del rotor de la máquina síncrona.

11.- Aumentar la corriente de excitación en el rotor de la máquina síncrona y observar la corriente de corto-circuito en el estator de la misma máquina no rebasar el valor de corriente nominal de los devanados de la máquina síncrona (1.0 A) ajustando el voltaje en el circuito de excitación para obtener el valor de corriente de excitación medido en el paso 7 y tomar la lectura de la corriente de corto-circuito en el estator, apagar la fuente y abrir el interruptor en el rotor de la máquina síncrona.

Voltaje de excitación de cd en el rotor de la máquina síncrona _____volts cd (V_{cd})

Corriente de excitación de cd en el rotor de la máquina síncrona _____amps cd

Lectura de la corriente de corto circuito a voltaje de excitación nominal.

I_{sc} =_____amps en corto-circuito.

La reactancia síncrona se calcula utilizando Vfn obtenido en el paso 7 e Isc obtenido en el último paso, mediante la siguiente expresión:

$$X_s = V_{fn} / I_{sc} = \text{_____} / \text{_____} \text{ ohms}$$

En el modelo de la figura 1, según las pruebas realizadas, Eo es igual al voltaje de fase a neutro obtenido en el paso 7, y la reactancia síncrona es igual al valor obtenido en el último paso por calculo, es decir, en el paso 11 anterior.

Evaluar la impedancia del estator con la resistencia obtenida en el paso 1 y la reactancia síncrona del paso anterior:

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \text{_____} \text{ ohms}$$

¿Se puede despreciar el efecto de Rs sobre Zs en la expresión anterior?

Conclusiones

Práctica 8

Máquina Síncrona

Curvas V

Objetivos:

- a).- Examinar la máquina síncrona como motor en las condiciones sub-excitada y sobre-excitada.
- b).- Observar la variación de la potencia reactiva en el motor síncrono desde una condición sub-excitada a sobre-excitada.
- c).- Obtener las curvas V de la máquina síncrona graficando la potencia aparente contra la corriente de excitación de i_d en el rotor.

Introducción:

Considerar a un motor síncrono operando bajo su carga mecánica nominal, se analiza su funcionamiento cuando se varía la corriente de excitación en el rotor; la carga mecánica permanece fija, a continuación se ajusta la corriente de excitación para que el factor de potencia sea unitario.

Bajo la condición anterior de factor de potencia unitario, se reduce la corriente de excitación para definir una condición sub-excitada, el motor absorberá potencia reactiva de la línea además de la potencia activa, esto origina un aumento en la corriente de línea, esta corriente se atrasa con respecto al voltaje por lo que el factor de potencia se atrasa (carga inductiva). La corriente de excitación en el rotor es menor, pero la potencia aparente absorbida por el estator es mayor.

Si por el contrario se aumenta la corriente de excitación respecto de la condición de factor de potencia unitario, se define una condición sobre-excitada, el motor suministra potencia reactiva a la línea. La potencia aparente es nuevamente mayor en comparación a la potencia aparente cuando se tiene factor de potencia unitario; la corriente de estator se adelanta respecto al voltaje de línea del estator, con lo que se tiene un factor de potencia en adelanto (carga capacitiva).

Si se varía la corriente de excitación en el rotor, se puede graficar la potencia aparente del motor síncrono como una función de la corriente directa de excitación en el rotor, con ello se origina una curva en forma de V, esta curva se despliega para una carga mecánica fija. Se puede graficar las curvas V para las condiciones en vacío y plena carga, esto con la finalidad de ilustrar la potencia reactiva que puede ser absorbida o suministrada por el motor síncrono solamente cambiando la corriente de excitación de i_d en el rotor.

Como ejemplo en la figura 1 se presenta las curvas V en vacío y a carga nominal de un motor síncrono de 1000 hp, graficando la potencia aparente vs corriente de excitación.

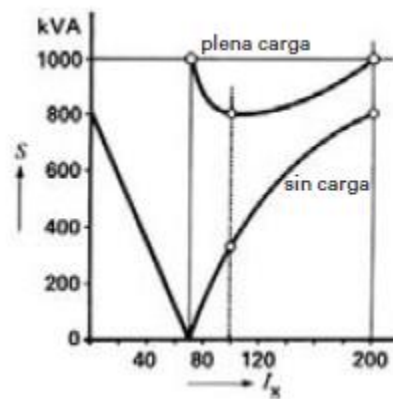


Figura 1

También es posible graficar la corriente de estator vs corriente de excitación para obtener las curvas V tal como se ilustra en la figura 2, donde se presentan tres condiciones de carga, en vacío, media carga y carga nominal.

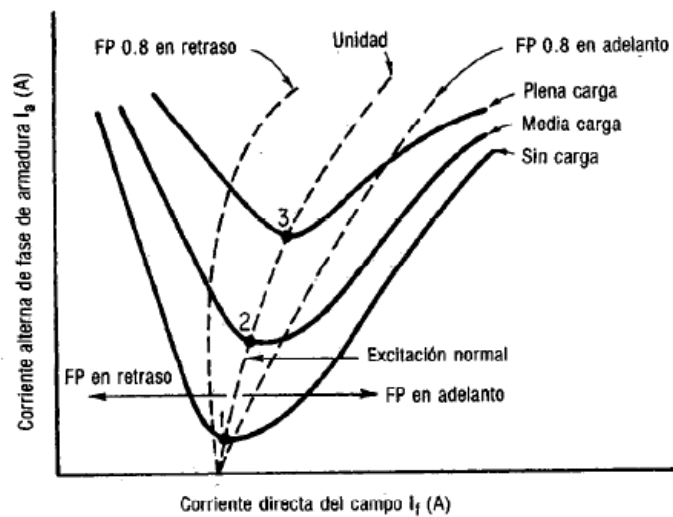


Figura 2

Material y Equipo.

Máquina síncrona.

Electrodinamómetro.

Módulo de medición voltímetro de corriente alterna.

Módulo de medición amperímetro de corriente alterna.

Tacómetro.

20 cables de conexión cortos banana-banana.

20 cables de conexión largos banana-banana.

Banda.

3 Multímetros.

Medidor de potencia.

Procedimiento.

1.- Conectar el siguiente circuito de la figura 3 utilizando el electrodinamómetro, la máquina síncrona, medición de voltaje y corriente en ca y cd, así como las fuentes de ca fija y de cd variable, conectar el medidor de potencia para una medición de potencia trifásica entre la fuente de ca trifásica fija y el estator del motor síncrono.

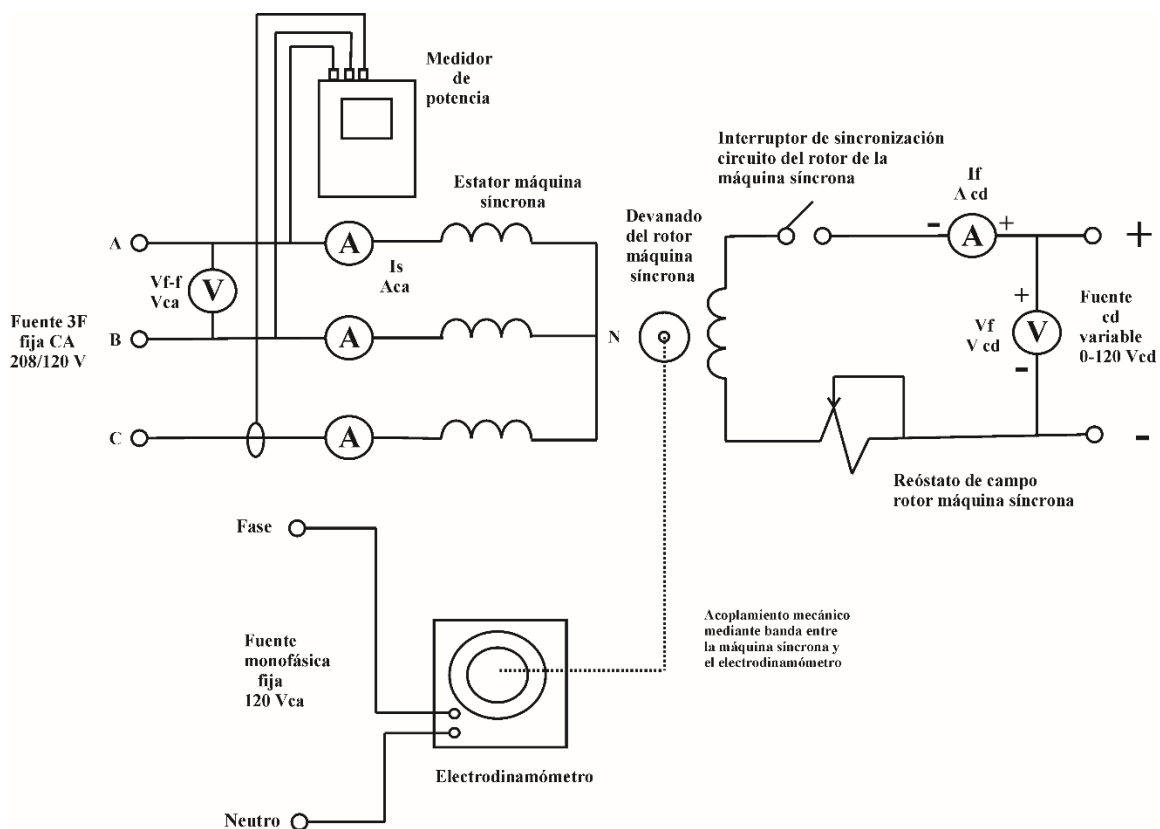


Figura 3

2.- Bajo una condición de vacío sin carga mecánica no acoplar mecánicamente el motor con el electrodinamómetro, arrancar el motor síncrono para que alcance una velocidad de estado estable cercana a la velocidad síncrona, ajustar la fuente de cd en el rotor a 120 volts cd y sincronizar cerrando el interruptor en el circuito del rotor, observar como el motor adquiere la velocidad síncrona constante.

3.- Ajustar la fuente de cd en el circuito del rotor y el reóstato para obtener un factor de potencia unitario en el medidor de potencia, ahora el motor solo consume potencia real, tomar las lecturas de potencia aparente que en esta condición es igual a la potencia real en el medidor de potencia y la corriente de excitación de cd en el rotor, para localizar el punto inferior de la curva V en vacío. Si no es posible ajustar el factor de potencia unitario, tomar la lectura lo más cerca posible a este valor.

4.- Disminuir la corriente de excitación de cd en el rotor, tomar las lecturas anteriores de potencia aparente y corriente de excitación con un factor de potencia atrasado para obtener un punto a la izquierda del anterior donde se tuvo factor de potencia unitario o cerca de él.

5.- Aumentar la corriente de excitación de cd en el rotor, tomar las lecturas anteriores de potencia aparente y corriente de excitación con un factor de potencia adelantado para obtener un punto a la derecha del punto anterior con factor de potencia unitario.

6.- En los pasos anteriores 2-5 se obtiene la curva V en vacío, la cual se puede obtener graficando los valores de potencia aparente vs corriente de excitación en cd.

7.- Apagar la fuente, abrir el interruptor de sincronización en el rotor del motor síncrono y acoplar mecánicamente mediante la banda el electrodinamómetro con el motor síncrono.

8.- Repetir los pasos 2-5, ajustando la carga mecánica a 2 y 4 lbf-plg en el electrodinamómetro, para obtener la curva V bajo estas condiciones de carga mecánica.

9.- Graficar los valores obtenidos de potencia aparente vs corriente de excitación de cd en el rotor para obtener las curvas V en vacío y a una carga de 2 y 4 lbf-plg.

Conclusiones

Práctica 9

Máquina Síncrona, Eficiencia y Regulación

Objetivos:

- a).- Analizar las características de regulación de voltaje de la máquina síncrona con cargas resistiva, inductiva y capacitiva.
- b).- Mediante la máquina síncrona trabajando como generador síncrono o alternador, alimentar cargas trifásicas balanceadas y desbalanceadas para observar el efecto sobre el voltaje en terminales de la máquina síncrona.

Introducción:

El voltaje en terminales de un generador síncrono depende principalmente del flujo magnético total en el entrehierro, el cuál, depende de flujo en el estator y el rotor. Cuando se tiene la condición de vacío en el generador síncrono, el flujo en el entrehierro queda determinado únicamente por la excitación de campo de corriente directa en el rotor de la máquina síncrona.

Cuando se tiene carga eléctrica conectada al generador síncrono, el flujo magnético queda determinado por los amper-vuelta tanto del rotor como del estator. Estos flujos magnéticos pueden reforzarse u oponerse entre sí, dependiendo del factor de potencia en la carga eléctrica. Cuando la carga es capacitiva se tiene un factor de potencia en adelanto, este tipo de carga magnetizan el entrehierro, mientras que la carga inductiva tiene un factor de potencia en atraso, esta carga desmagnetiza el entrehierro.

Como la fuerza magneto-motriz del estator tiene un efecto importante sobre el flujo magnético, la regulación de voltaje de los generadores síncronos o alternadores es mala, es decir, el voltaje a plena carga cambia con respecto del voltaje en vacío, en consecuencia la corriente de campo en el rotor se debe controlar o ajustar continuamente para mantener un voltaje constante bajo condiciones de carga variable.

Cuando un generador síncrono trifásico alimenta una carga desbalanceada, una fase tiene una carga mayor comparada con la carga conectada en las fases restantes. La fase con mayor carga tiende a reducir su voltaje en terminales debido a la caída de voltaje en la resistencia y en la reactancia inductiva de la propia fase, pero esta reducción en el voltaje no se puede compensar ajustando la corriente de campo de corriente directa, debido a que los voltajes en las otras dos fases tenderían a cambiar desajustando su voltaje en terminales. Por lo anterior, es importante que el generador síncrono alimente cargas trifásicas lo más balanceadas posible.

Material y Equipo.

Máquina síncrona

Máquina de corriente directa

Módulo de resistencia

Módulo de inductancia

Módulo de capacitancia

Módulo de medición de ca amperímetro

Módulo de medición de ca voltímetro

Módulo de medición de corriente directa

Tacómetro.

15 cables de conexión cortos banana-banana.

15 cables de conexión largos banana-banana.

Banda.

Dos multímetros.

Procedimiento.

1.- Conectar el circuito de la Figura 1 utilizando la máquina síncrona (generador síncrono), la máquina de corriente directa (primo motor), voltímetros y amperímetros de ca, voltímetros y amperímetros de cd y el módulo de resistencias. Una carga resistiva balanceada se conecta en estrella a las terminales del generador síncrono y el campo del rotor se conecta a la fuente variable de cd. La máquina de corriente directa se conecta como motor de cd en derivación a la fuente de cd fija de 120 volts.

2.- Acoplar mecánicamente la máquina síncrona y la máquina de corriente directa por medio de la banda.

3.- Ajustar el reóstato de campo en derivación del motor de cd girando a su límite en el sentido de las manecillas del reloj para obtener resistencia mínima.

4.- Ajustar el reóstato de campo del generador síncrono girando a su límite en el sentido contrario de las manecillas del reloj para obtener resistencia máxima.

5.- Ajustar la carga eléctrica a 300 ohms en cada fase.

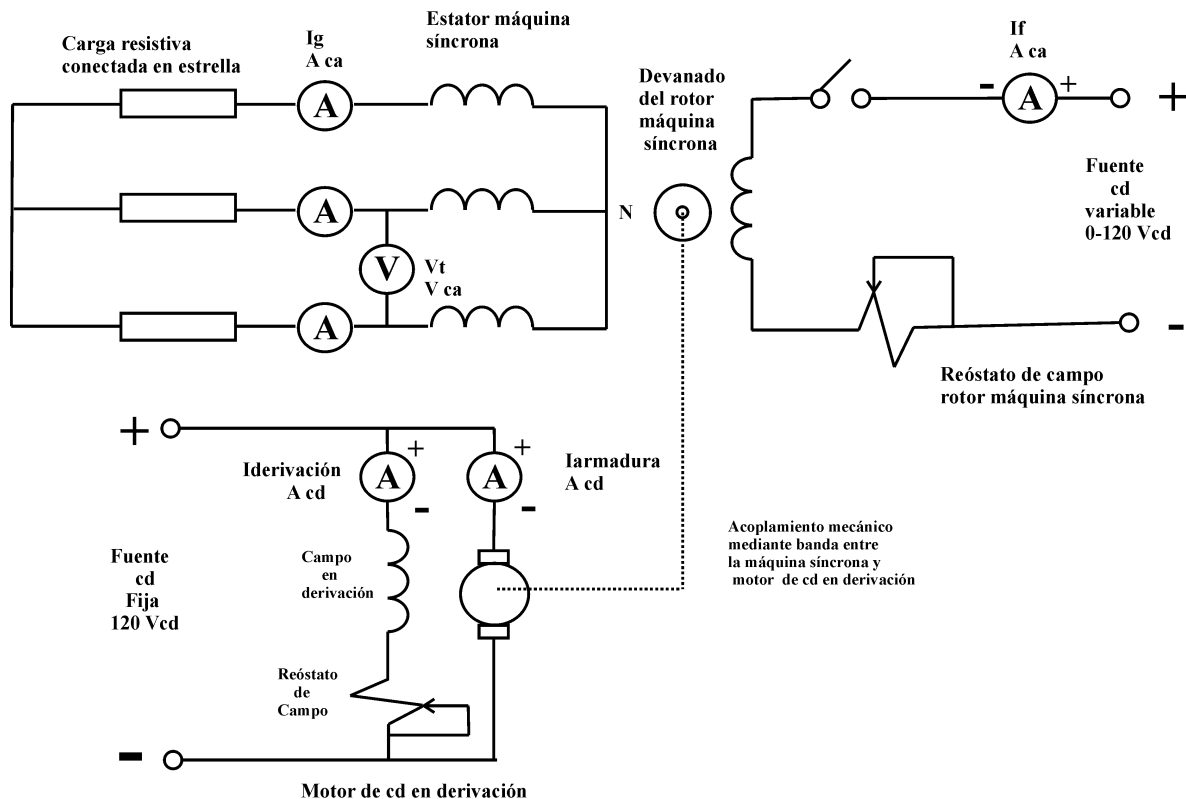


Figura 1 Máquina síncrona acoplada con la máquina de corriente directa con campo en derivación.

6.- Conectar la fuente de alimentación, verificar que las corrientes en los devanados de las dos máquinas no rebasen sus valores nominales, utilizando el tacómetro, ajustar el reóstato de campo del motor de cd para obtener una velocidad de 1800 rpm. Durante la práctica mantener en forma constante esta velocidad.

7.- Cerrar el interruptor de campo en el rotor de la máquina síncrona para excitar el rotor con corriente directa. Ajustar la excitación de cd del generador síncrono hasta obtener un voltaje en terminales V_t de 208 volts ca. Medir y anotar las corrientes I_g (corriente generada) y I_f (corriente de campo) de carga nominal.

I_g (corriente generada)= _____ A ca, I_f (corriente de campo)= _____ A cd

8.- Abrir los interruptores de las resistencias en cada fase para llevar al generador síncrono a una condición en vacío. Medir y anotar el voltaje en terminales V_t y la corriente de campo I_f , ajustando la velocidad a 1800 rpm si es necesario mediante el reóstato de campo en derivación en el motor de cd.

V_t voltaje en terminales en vacío= _____ V ca, I_f (corriente de campo)= _____ A cd

9.- Disminuir el voltaje a cero, abrir el interruptor en el rotor del generador síncrono y desconectar la fuente.

10.- Calcular la regulación de voltaje del generador síncrono alimentando carga resistiva.

$$\% \text{ reg. res.} = [(V_t \text{ en vacío} - V_t \text{ carga nominal}) / V_t \text{ carga nominal}] \times 100 = _____\%$$

11.- Cambiar la carga resistiva a carga inductiva, ajustar cada fase a una reactancia inductiva de 300 ohms, repetir los pasos 6 a 10 para carga inductiva anotando los valores del paso 7 en el punto 12, los valores del paso 8 en el punto 13 y la regulación en el paso 14.

12.- Medir y anotar las corrientes I_g (corriente generada) y I_f (corriente de campo) de carga nominal inductiva (repetición de paso 7).

$$I_g \text{ (corriente generada)} = _____\text{A ca, } I_f \text{ (corriente de campo)} = _____\text{A cd}$$

13.- Medir y anotar el voltaje en terminales V_t e I_f (corriente de campo) de carga en vacío (repetición de paso 8).

$$V_t \text{ voltaje en terminales en vacío} = _____\text{V ca, } I_f \text{ (corriente de campo)} = _____\text{A cd}$$

14.- Calcular la regulación de voltaje del generador síncrono alimentando carga inductiva.

$$\% \text{ reg. ind.} = [(V_t \text{ en vacío} - V_t \text{ carga nominal}) / V_t \text{ carga nominal}] \times 100 = _____\%$$

15.- Cambiar la carga inductiva a carga capacitiva, ajustar cada fase a una reactancia capacitiva de 300 ohms, repetir los pasos 6 a 10 para carga capacitiva anotando los valores del paso 7 en el punto 16, los valores del paso 8 en el punto 17 y la regulación en el paso 18.

16.- Medir y anotar las corrientes I_g (corriente generada) y I_f (corriente de campo) de carga nominal capacitiva (repetición de paso 7).

$$I_g \text{ (corriente generada)} = _____\text{A ca, } I_f \text{ (corriente de campo)} = _____\text{A cd}$$

17.- Medir y anotar el voltaje en terminales V_t e I_f (corriente de campo) de carga en vacío (repetición de paso 8).

$$V_t \text{ voltaje en terminales en vacío} = _____\text{V ca, } I_f \text{ (corriente de campo)} = _____\text{A cd}$$

18.- Calcular la regulación de voltaje del generador síncrono alimentando carga capacitiva.

$\% \text{ reg. cap.} = [(V_t \text{ en vacío} - V_t \text{ carga nominal}) / V_t \text{ carga nominal}] \times 100 = \underline{\hspace{2cm}} \%$

19.- Modificar la carga eléctrica en el generador síncrono según se presenta en la figura 2, sólo se tiene una carga resistiva de 600 ohms entre dos fases del generador síncrono como condición desbalanceada de carga. Solo se modifica la carga eléctrica en el generador síncrono, en el resto del experimento no hay cambio.

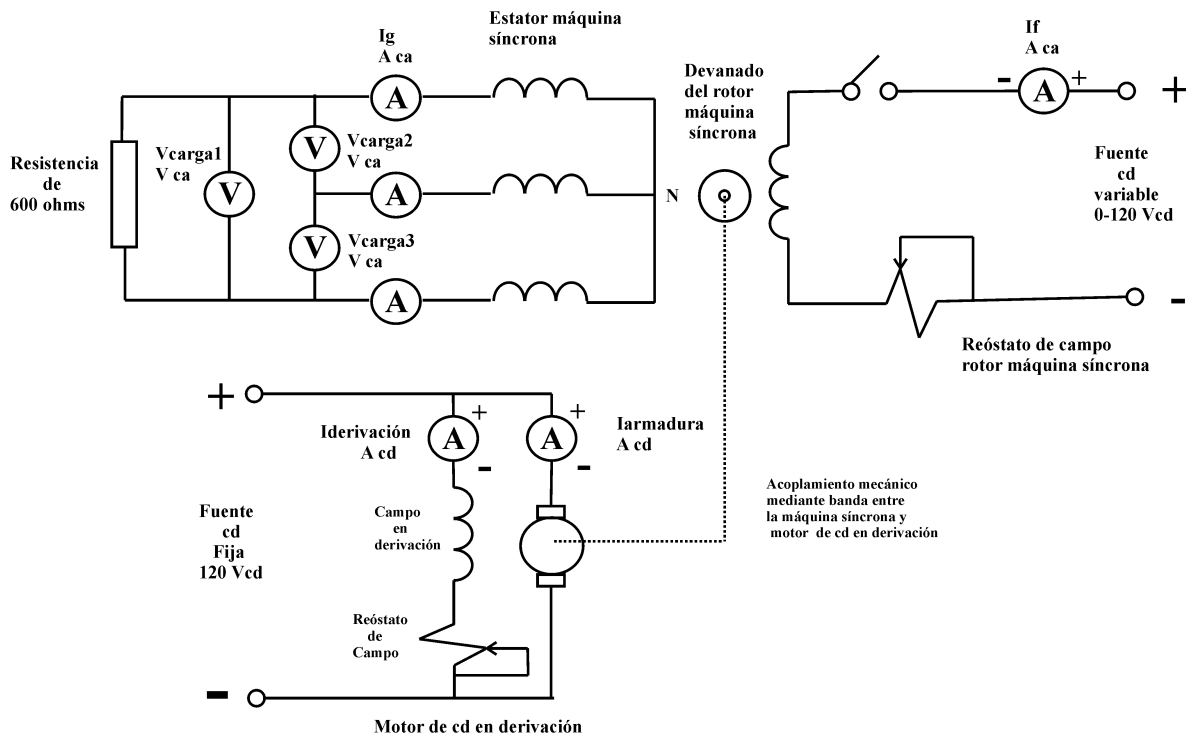


Figura 2 Generador síncrono con carga eléctrica desbalanceada.

20.- Conectar la fuente y ajustar el reóstato del motor de cd para obtener una velocidad de 1800 rpm.

21.- Ajustar la excitación de corriente directa para obtener un voltaje de 208 volts ca en la carga de 600 ohms (V_{carga1}), medir y anotar los voltajes:

$V_{\text{carga2}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V ca}$ y $V_{\text{carga3}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V ca}$

22.- Desconectar la fuente de alimentación.

Conclusiones

Práctica 10

Sincronización del generador síncrono

Objetivos:

- a).- Analizar los requisitos para la sincronización de un generador síncrono con un sistema de potencia para su conexión al mismo.
- b).- Analizar la implicación de cambios en la magnitud del voltaje generado, su secuencia de fases sobre el proceso de sincronización y comprender su efecto sobre este mismo proceso.

Introducción:

La frecuencia de un sistema eléctrico de potencia depende principalmente de la velocidad de rotación de los generadores síncronos interconectados al sistema eléctrico mediante líneas de transmisión, las cuales también conectan a la carga eléctrica con la generación.

La inercia del sistema de potencia en conjunto con los generadores, líneas y cargas es muy grande, ya que difícilmente una falla o perturbación puede cambiar la velocidad de rotación de los generadores, por lo anterior, la frecuencia de un sistema eléctrico de potencia se puede considerar como constante.

Si un generador síncrono genera potencia para un sistema eléctrico, debe generar la potencia o energía con la misma frecuencia que la del sistema; un sistema no puede recibir energía con una frecuencia diferente que la propia, tanto el sistema como el generador síncrono deben operar a la misma frecuencia. Cuando un generador síncrono se sincroniza y se conecta a un sistema de potencia, automáticamente se mantiene constante su frecuencia.

Para efectuar la sincronización de un generador síncrono se requiere en principio que su frecuencia sea igual a la del sistema de potencia, esta frecuencia se controla mediante el regulador de velocidad. Además, la secuencia de fases o rotación debe ser la misma tanto en el generador como en el sistema de potencia.

Otro requisito para la sincronización es que la magnitud del voltaje en terminales del generador síncrono debe ser igual al voltaje en terminales del sistema donde se realiza la conexión del generador, esto se controla mediante el circuito de excitación utilizando corriente directa en el devanado del rotor del generador síncrono regulando con ello el voltaje en terminales. El voltaje del generador síncrono debe estar en fase con el voltaje del sistema de potencia.

Por lo anterior, las condiciones de sincronismo son:

1. misma frecuencia,
2. misma secuencia de fases,
3. misma magnitud de voltaje,
4. misma fase de voltaje.

Cuando estas condiciones se cumplen, el generador síncrono está sincronizado con el sistema de potencia, las cuales se pueden verificar mediante un módulo de sincronización de tres lámparas conectadas entre el generador y el sistema cuando al tratar de sincronizar las lámparas se apaguen simultáneamente tanto el generador como el sistema están sincronizados y el interruptor eléctrico que se encuentra entre ambos se puede cerrar realizándose la conexión del generador con el sistema de potencia.

Material y Equipo.

Máquina síncrona

Máquina de corriente directa

Módulo de sincronización

Módulo de medición de corriente alterna amperímetro

Módulo de medición de corriente alterna voltímetro

Módulo de medición de corriente directa

Tacómetro

20 cables de conexión cortos banana-banana

20 cables de conexión largos banana-banana

Banda

3 Multímetros

Procedimiento.

1.- Conectar el circuito de la Figura 1 utilizando la máquina síncrona (generador síncrono), la máquina de corriente directa, voltímetros y amperímetros de ca, voltímetros y amperímetros de cd y el módulo de sincronización, el cual se conecta entre el generador síncrono y la fuente trifásica fija de corriente alterna, cuidar que inicialmente el interruptor de sincronización esté abierto. El campo del rotor se conecta a la fuente variable de cd. La máquina de corriente directa se conecta como motor de cd en derivación a la fuente de cd fija de 120 volts para accionar como primo motor a la máquina síncrona.

2.- Acoplar mecánicamente la máquina síncrona y la máquina de corriente directa por medio de la banda.

3.- Ajustar el reóstato de campo en derivación del motor de cd girando a su límite en el sentido de las manecillas del reloj para obtener resistencia mínima.

4.- Ajustar el reóstato de campo del generador síncrono girando a su límite en el sentido contrario de las manecillas del reloj para obtener resistencia máxima.

5.- Verificar que el interruptor del módulo de sincronización se encuentre abierto, así como el interruptor en el campo de excitación en el rotor de la máquina síncrona también debe estar abierto.

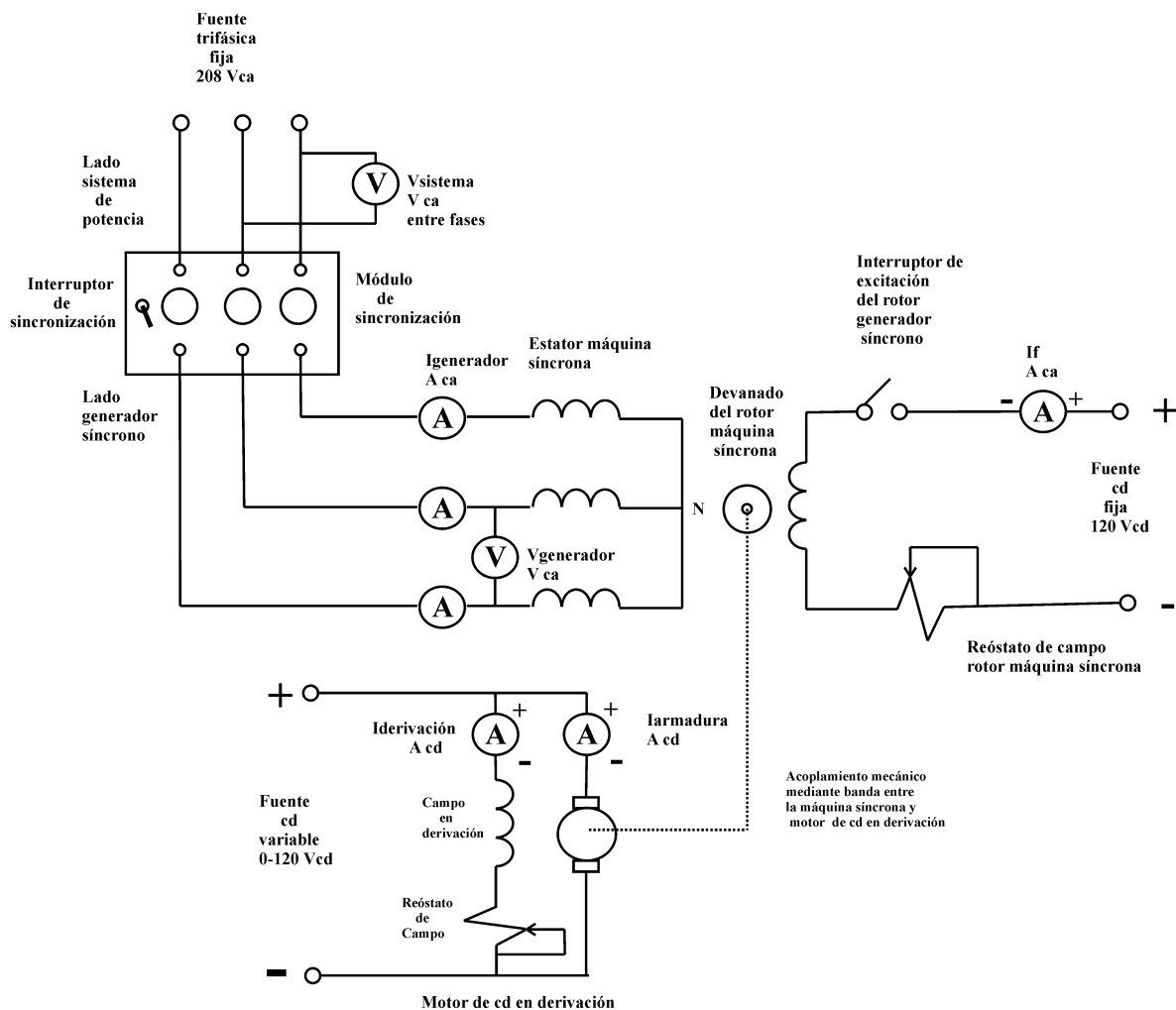


Figura 1 Máquina síncrona utilizada como generador acoplada con la máquina de corriente directa (primo motor) con campo en derivación para realizar su sincronización al sistema de potencia.

6.- Conectar la fuente de alimentación, verificar que las corrientes en los devanados de las dos máquinas no rebasen sus valores nominales, utilizando el tacómetro, ajustar el reóstato de campo del motor de cd para obtener una velocidad de 1800 rpm. Durante la práctica mantener en forma constante esta velocidad.

7.- Medir el voltaje en el sistema de potencia.

Voltaje en el sistema $V_{\text{sistema}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Volts corriente alterna

8.- Cerrar el interruptor de campo en el rotor de la máquina síncrona para excitar el rotor con corriente directa. Ajustar la excitación de cd del generador síncrono hasta obtener un voltaje en terminales $V_{\text{generador}}$ en el generador síncrono igual al voltaje en el sistema medido en el paso anterior (paso 7). En los pasos siguientes del experimento estos dos valores de voltaje en el sistema y el voltaje generado en terminales de la máquina síncrona deben mantenerse iguales y constantes llevando a cabo los ajustes necesarios en los reóstatos de campo de derivación (máquina de cd, ajuste de velocidad) y de campo de excitación en el rotor de la máquina síncrona (ajuste del voltaje generado en terminales $V_{\text{generador}}$).

9.- Las tres lámparas en el módulo de sincronización deben de parpadear, encendiéndose y apagándose en forma intermitente.

10.- Ajustar cuidadosamente la velocidad de la máquina de cd (motor de cd en derivación) mediante el reóstato de campo en derivación hasta que la frecuencia de encendido de las lámparas sea lo más baja posible.

11.- Si las lámparas se encienden y se apagan al mismo tiempo se tiene la misma secuencia de fases en el sistema y en el generador síncrono. Si las lámparas no se encienden y se apagan simultáneamente la secuencia de fases es incorrecta entre el sistema de potencia y el generador, para corregirla, abra cuidadosamente el interruptor de campo en el rotor de la máquina síncrona, al momento de abrir el interruptor la máquina síncrona deja de generar (el voltaje en terminales $V_{\text{generador}}$ es cero), con cuidado intercambie dos fases en el estator de la máquina síncrona, volver a cerrar con cuidado el interruptor de excitación, observar como ahora sea corregido la secuencia de fases en el generador síncrono, las lámparas deben de encenderse y apagarse al mismo tiempo.

12.- Ajustar cuidadosamente la velocidad del motor en derivación hasta que la iluminación de las tres lámparas aumente y disminuya lentamente, bajo este ajuste la frecuencia del generador síncrono es muy cercana a la frecuencia en el sistema de potencia. Al apagarse las tres lámparas, los voltajes del generador síncrono y del sistema de potencia son iguales y están en fase. Si las tres lámparas se iluminan al mismo tiempo los voltajes están defasados en 180 grados, el interruptor de sincronización no debe cerrarse bajo esta condición.

13.- Verificar que los voltajes V_{sistema} y $V_{\text{generador}}$ sean iguales; si es necesario ajustar la excitación del rotor en el generador síncrono. Cuando las tres lámparas se hayan apagado y permanezcan apagadas por cierto tiempo, se puede cerrar el interruptor de sincronización, con lo que el generador síncrono queda sincronizado y conectado al sistema de potencia, en este momento medir la corriente en el generador $I_{\text{generador}}$ después de haber cerrado el interruptor.

Al momento de sincronizar: $I_{\text{generador}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Amps corriente alterna

14.- Abrir el interruptor de sincronización. El generador síncrono deja de estar sincronizado y se desconecta del sistema de potencia.

15.- Abrir el interruptor de excitación en el rotor del generador síncrono, con lo que se deja de generar el voltaje en el estator, bajo esta condición $V_{\text{generador}} = 0$ Vca, a continuación cuidadosamente intercambiar dos fases en el estator del generador síncrono (esto con el fin de cambiar su secuencia de fases). Cerrar el interruptor de excitación en el rotor del generador síncrono para volver a generar voltaje en terminales del generador, verificar que el interruptor de sincronización este abierto.

16.- Observar el efecto de cambio en la secuencia de fases sobre el encendido y apagado de las lámparas en el módulo de sincronización.

¿Por qué no se encienden y se apagan las lámparas al mismo tiempo?

17.- ¿Cómo se puede sincronizar nuevamente el generador síncrono?

18.- Abrir el interruptor de sincronización, abrir el interruptor de excitación en el generador síncrono. Reducir el voltaje a cero y desconectar la fuente de alimentación.

Conclusiones

Práctica 11

Conexión de generadores síncronos al sistema de potencia.

Objetivos:

- a).- Conectar mediante el proceso de sincronización generadores síncronos a un sistema de potencia para aumentar la capacidad de generación.
- b).- Conectar una carga eléctrica al sistema de potencia y observar la distribución de carga en los generadores síncronos conectados al sistema.

Introducción:

En esta práctica se toma a la máquina de corriente directa como primo motor de la máquina síncrona para que esta actúe como generador, se debe conocer el estado de carga de la máquina de corriente directa para tener en cuenta durante la práctica el grado de carga de esta máquina para que cuando se sobrecargue corregir los parámetros en el experimento para no sobrecargar la máquina de corriente directa durante el experimento, esto se logra verificando las corrientes de armadura y campo en la máquina de corriente directa para no sobrepasar sus valores nominales.

Inicialmente se sincroniza un primer generador con la fuente trifásica fija, se puede conectar una carga eléctrica a este conjunto sistema-generador midiendo sus corrientes para conocer la distribución de carga entre el sistema y el generador.

A continuación se puede conectar y sincronizar con el conjunto anterior un segundo generador y tratar de distribuir la carga eléctrica entre los dos generadores síncronos conectados y el sistema.

La sincronización de los generadores síncronos se debe verificar mediante el módulo de sincronización, el cual, verifica las cuatro condiciones de sincronismo: frecuencia, voltaje, ángulo de voltaje y secuencia de fases.

Posteriormente se puede conectar un tercer generador síncrono al sistema de potencia, verificando las condiciones de sincronismo mediante el módulo de sincronización.

Cuando se tiene la conexión de los tres generadores síncronos se trata de distribuir la carga eléctrica entre los tres generadores.

Material y Equipo.

Máquina síncrona

Máquina de corriente directa

Módulo de sincronización

Módulo de medición de corriente alterna amperímetro

Módulo de medición de corriente alterna voltímetro

Módulo de medición de corriente directa

Módulo de resistencias

Tacómetro

15 cables de conexión cortos banana-banana

15 cables de conexión largos banana-banana

Banda

2 multímetros

Procedimiento.

1.- Conectar el circuito de la Figura 1 utilizando la máquina síncrona (generador síncrono), la máquina de corriente directa, voltímetros y amperímetros de ca, voltímetros y amperímetros de cd y el módulo de sincronización, el cuál se conecta entre el generador síncrono y la fuente trifásica fija de corriente alterna, cuidar que inicialmente el interruptor de sincronización este abierto. El campo del rotor se conecta a la fuente variable de cd. La máquina de corriente directa se conecta como motor de cd en derivación a la fuente de cd fija de 120 volts para accionar como primo motor a la máquina síncrona.

2.- Acoplar mecánicamente la máquina síncrona y la máquina de corriente directa por medio de la banda.

3.- Ajustar el reóstato de campo en derivación del motor de cd girando a su límite en el sentido de las manecillas del reloj para obtener resistencia mínima.

4.- Ajustar el reóstato de campo del generador síncrono girando a su límite en el sentido contrario de las manecillas del reloj para obtener resistencia máxima.

5.- Verificar que el interruptor del módulo de sincronización se encuentre abierto, así como el interruptor en el campo de excitación en el rotor de la máquina síncrona también debe estar abierto.

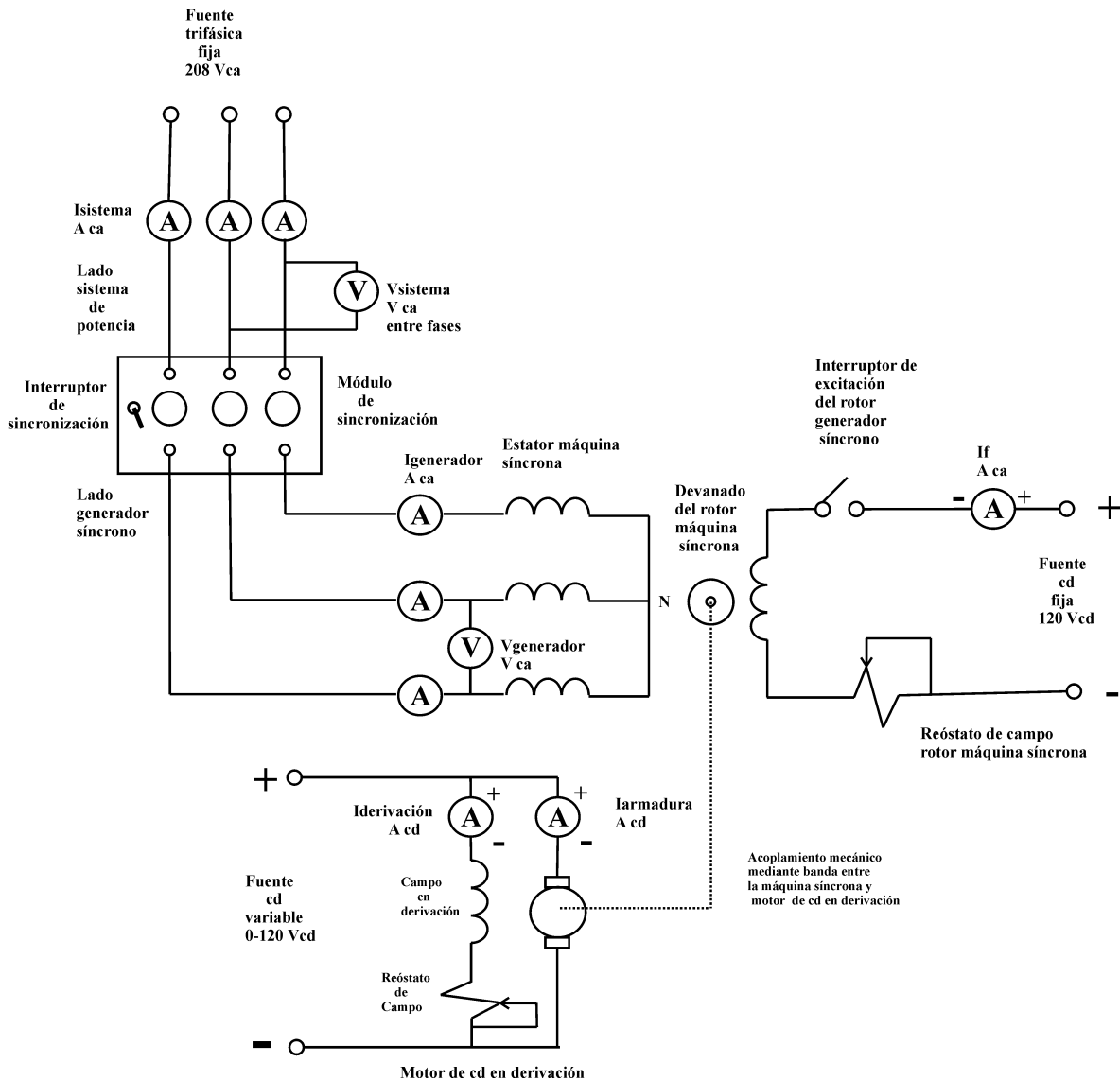


Figura 1 Máquina síncrona utilizada como generador acoplada con la máquina de corriente directa (primo motor) con campo en derivación para realizar su sincronización al sistema de potencia.

6.- Conectar la fuente de alimentación, verificar que las corrientes en los devanados de las dos máquinas no rebasen sus valores nominales, utilizando el tacómetro, ajustar el reóstato de campo del motor de cd para obtener una velocidad de 1800 rpm. Durante la práctica mantener en forma constante esta velocidad.

7.- Medir el voltaje en el sistema de potencia.

Voltaje en el sistema $V_{\text{sistema}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Volts corriente alterna

8.- Cerrar el interruptor de campo en el rotor de la máquina síncrona para excitar el rotor con corriente directa. Ajustar la excitación de cd del generador síncrono hasta obtener un voltaje en terminales $V_{\text{generador}}$ en el generador síncrono igual al voltaje en el sistema medido en el paso anterior (paso 7). En los pasos siguientes del experimento estos dos valores de voltaje en el sistema y el voltaje generado en terminales de la máquina síncrona deben mantenerse iguales y constantes llevando a cabo los ajustes necesarios en los reóstatos de campo de derivación (máquina de cd, ajuste de velocidad) y de campo de excitación en el rotor de la máquina síncrona (ajuste del voltaje generado en terminales $V_{\text{generador}}$).

9.- Las tres lámparas en el módulo de sincronización deben de parpadear, encendiéndose y apagándose en forma intermitente.

10.- Ajustar cuidadosamente la velocidad de la máquina de cd (motor de cd en derivación) mediante el reóstato de campo en derivación hasta que la frecuencia de encendido de las lámparas sea lo más baja posible.

11.- Si las lámparas se encienden y se apagan al mismo tiempo se tiene la misma secuencia de fases en el sistema y en el generador síncrono. Si las lámparas no se encienden y se apagan simultáneamente la secuencia de fases es incorrecta entre el sistema de potencia y el generador, para corregirla, abra cuidadosamente el interruptor de campo en el rotor de la máquina síncrona, al momento de abrir el interruptor la máquina síncrona deja de generar (el voltaje en terminales $V_{\text{generador}}$ es cero), con cuidado intercambie dos fases en el estator de la máquina síncrona, volver a cerrar con cuidado el interruptor de excitación, observar como ahora sea corregido la secuencia de fases en el generador síncrono, las lámparas deben de encenderse y apagarse al mismo tiempo.

12.- Ajustar cuidadosamente la velocidad del motor en derivación hasta que la iluminación de las tres lámparas aumente y disminuya lentamente, bajo este ajuste la frecuencia del generador síncrono es muy cercana a la frecuencia en el sistema de potencia. Al apagarse las tres lámparas, los voltajes del generador síncrono y del sistema de potencia son iguales y están en fase. Si las tres lámparas se iluminan al mismo tiempo los voltajes están defasados en 180 grados, el interruptor de sincronización no debe cerrarse bajo esta condición.

13.- Verificar que los voltajes V_{sistema} y $V_{\text{generador}}$ sean iguales; si es necesario ajustar la excitación del rotor en el generador síncrono. Cuando las tres lámparas se hayan apagado y permanezcan apagadas por cierto tiempo, se puede cerrar el interruptor de sincronización, con lo que el generador síncrono queda sincronizado y conectado al sistema de potencia, en este momento medir la corriente en el generador $I_{\text{generador}}$ después de haber cerrado el interruptor.

Al momento de sincronizar: $I_{\text{generador}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Amps corriente alterna

14.- Repetir los pasos 1-13 en una consola diferente pero la fuente trifásica fija es la fuente de la consola donde se sincronizo el primer generador, es decir, se va a sincronizar el nuevo generador de la siguiente consola a la primer fuente y al primer generador. Verificar las condiciones de sincronismo mediante el módulo de sincronización.

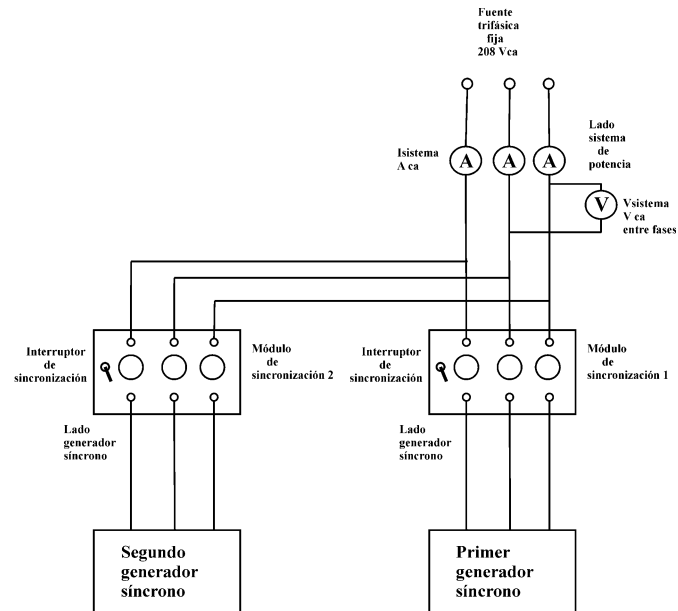


Figura 2 Dos generadores sincronizados con el sistema de potencia.

15.- A continuación al sincronizar los dos generadores y el sistema conectar una carga eléctrica resistiva a las terminales del sistema o de cualquiera de los generadores, conectar una carga de 1200 ohms por fase y observar la distribución de carga mediante la variación de las corrientes en los generadores, anotar sus conclusiones.

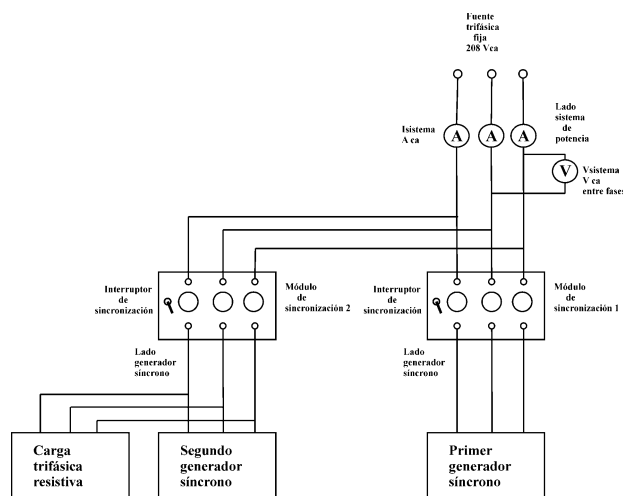


Figura 3 Dos generadores sincronizados con el sistema de potencia con carga resistiva conectada en las terminales del generador 2.

16.- Desconectar la carga eléctrica abriendo los interruptores correspondientes en el módulo de carga resistiva para mantener el sistema de potencia en condición de vacío.

17.- Repetir los pasos 1-13 pero ahora en otra consola diferente, la fuente trifásica fija es la fuente de la consola donde se sincronizo el primer generador. Ahora se sincroniza un tercer generador con el sistema de potencia y los dos generadores sincronizados en los puntos anteriores.

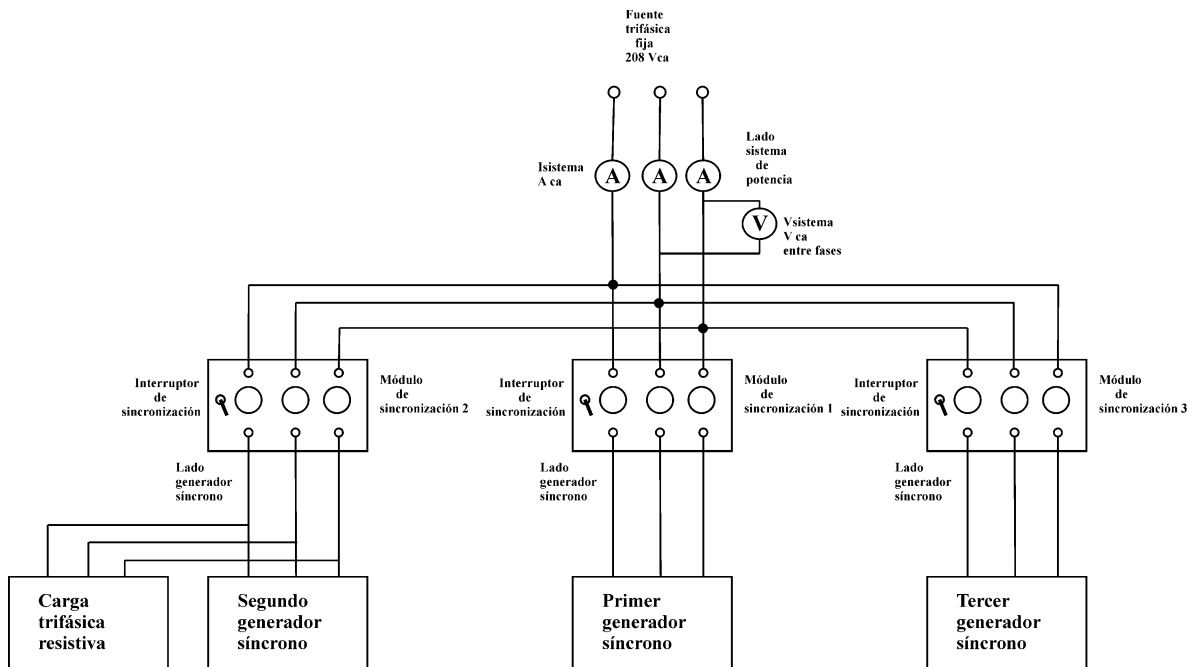


Figura 4 Tres generadores sincronizados con el sistema de potencia con carga resistiva conectada en las terminales del generador 2.

18.- Al sincronizar y conectar los tres generadores con la fuente fija de ca de la primer consola, conectar en el módulo de carga resistiva que se conecto en el punto 15, una carga de 1200 ohms por fase y observar nuevamente la distribución de carga mediante la variación de las corrientes en los generadores, anotando sus conclusiones.

19.- Abrir los interruptores de sincronización, abrir los interruptores de excitación en los generadores síncronos. Reducir el voltaje a cero y desconectar las fuentes de alimentación.

Conclusiones