

## 6.1 Introducción

Como su nombre lo indica son máquinas capaces de operar sólo a la velocidad sincrónica, esto es, a la velocidad mecánica equivalente a la velocidad de rotación de CMR producido por las corrientes del estator. Estas máquinas operando como generador son usadas en las centrales para la generación de energía eléctrica (hidráulicas, térmicas o nucleares) en sistemas interconectados, figura 1. En tales aplicaciones se les denominan *generadores sincrónicos* o *alternadores* y normalmente se operan con otras unidades en las distintas centrales, interconectarlas entre sí.

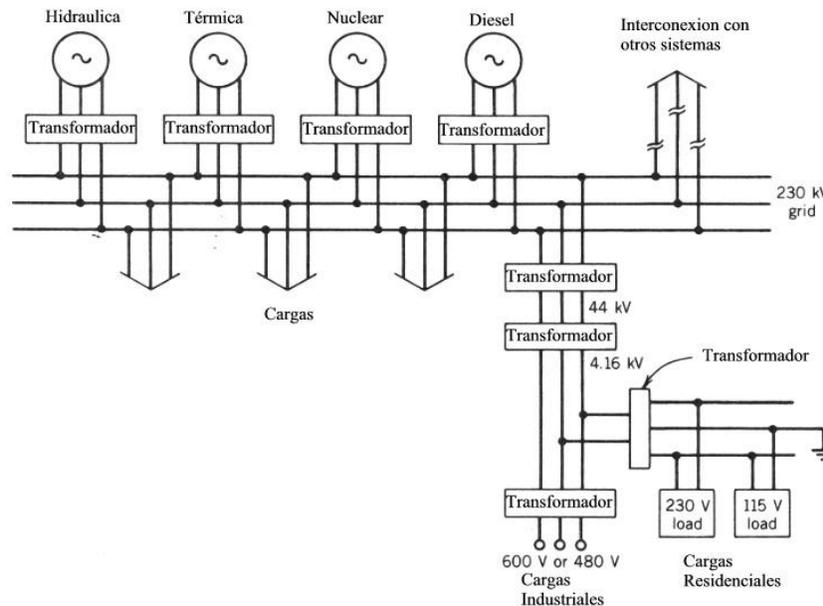


Figura 1. Sistema interconectado de energía eléctrica

Al igual que muchas máquinas eléctricas, las máquinas sincrónicas pueden operar como generador o motor. En aplicaciones industriales los motores sincrónicos son usados donde es deseada velocidad constante. Una característica importante de estos motores que pueden operar ya sea tomando o entregando potencia reactiva a la red dependiendo el nivel de excitación. Este tipo de máquinas es de doble excitación esto es: los polos del rotor son alimentados con corriente continua mientras que los bobinados del estator están conectados a la red eléctrica. Por lo tanto, el flujo en el entrehierro es la resultante de ambas excitaciones. El motor de inducción solo es excitado por las corrientes del estator, ya que las corrientes de rotor son producto de un efecto inductivo, siempre operará con factor de potencia en atraso. Es decir, que con una apropiada excitación, el motor sincrónico puede no requerir potencia reactiva de la red para su operación y trabajar con factor de potencia unitario. Aumento o disminución de la corriente de campo involucrará en un aporte o consumo de potencia reactiva a la red eléctrica con lo que se puede regular la tensión en

sistemas con factor de potencia bajo.

En general la maquina sincrónica tiene en el estator el bobinado de armadura del tipo trifásico y en el rotor el enrollado de excitación alimentado con corriente continua, figura 2. Al aplicar un juego de corrientes trifásicas simétricas y equilibradas en el bobinado de estator, se genera, un CMR que gira a la frecuencia sincrónica ( $\omega_s$ ). Si por otro lado se tiene al rotor girando a  $\omega_m = \omega_s$  y se inyecta una corriente continua,  $I_f$ , al campo, se producirá un CMR producido por el giro mecánico también a la velocidad  $\omega_s$ .

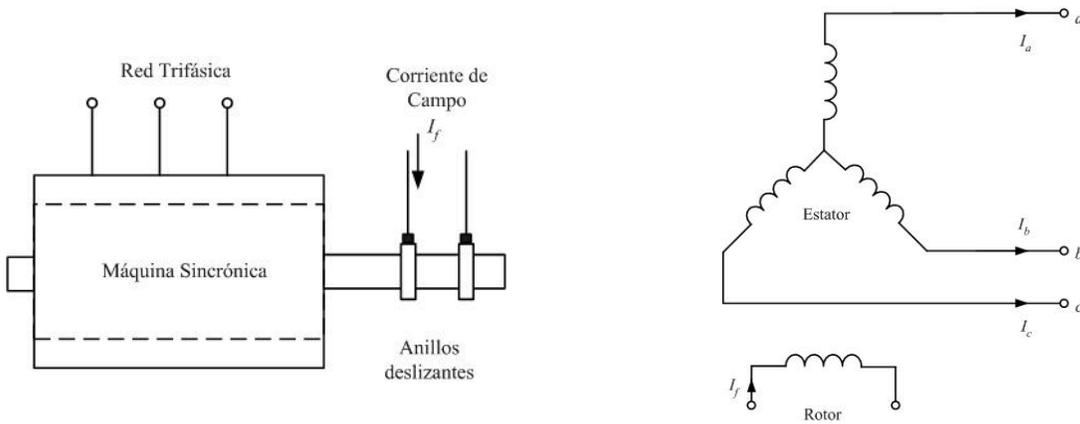


Figura 2. Representación esquemática de la máquina sincrónica

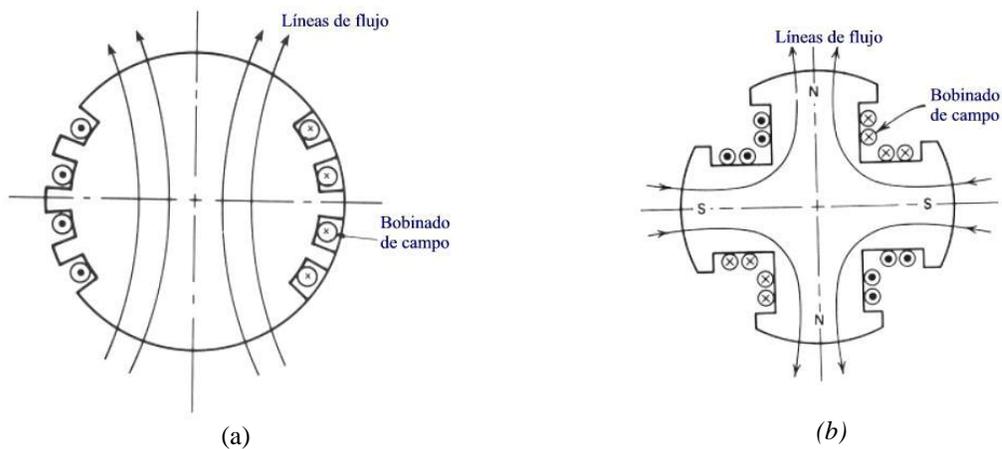


Figura 3. Máquina sincrónica. a) Rotor cilíndrico, b) Polos salientes

Desde el punto de vista constructivo se distinguen dos formas: de rotor cilíndrico y de rotor de polos salientes, como se muestra en la figura 3a y b. Las MS de rotor cilíndrico se utilizan en aplicaciones de alta velocidad (2 y 4 polos), turbo alteradores. Las MS de polos salientes es mas apropiada para bajas velocidades (alto numero de polos) se aplica en hidrogeneradores.

### 6.2 Operación de la MS de Rotor cilíndrico.

La corriente de campo  $I_f$  establece en el entrehierro una distribución senoidal de flujo en el entrehierro  $\lambda_f$  (mediante una geometría especial del polo magnético o la distribución del bobinado de campo en el caso rotor cilíndrico). Asimismo la corriente de los bobinados trifásicos del estator produce un flujo  $\lambda_a$ . Parte de este flujo enlaza sólo los bobinados de estator y no enlaza el bobinado de campo, a este flujo de le denomina flujo de fuga o dispersión. La mayor parte de  $\lambda_a$ , denominada flujo de reacción de armadura  $\lambda_{ar}$ , se establece en el entrehierro y enlaza el bobinado de campo. El flujo resultante  $\lambda_r$  es por lo tanto debido a la interacción entre flujos  $\lambda_f$  y  $\lambda_{ar}$ . Cada una de estas componentes induce tensiones en los bobinados del estator  $E_f$  debida a  $\lambda_f$  y  $E_a$  debida a  $\lambda_{ar}$  y la tensión  $E_r$  debida al flujo resultante  $\lambda_r$ . La tensión  $E_f$  se determina para la condición de circuito abierto, similar al caso de la MCC, esto es, para una velocidad de operación se obtiene la relación entre la corriente de campo y la tensión inducida. La tensión  $E_{ar}$ , conocida como 'voltaje de reacción de armadura' depende de  $\lambda_{ar}$  y de aquí de la magnitud y posición de la corriente de armadura  $I_a$ . La relación fasorial se muestra en la figura 4

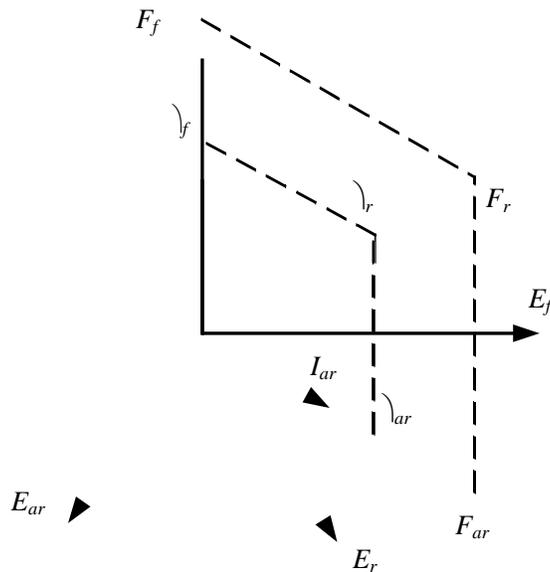


Figura 4. Flujos y tensiones inducidas en la MS

De acuerdo a la ley de voltajes, se tiene

$$E_r = E_{ar} + E_f \tag{1}$$

o

$$E_f = -jX_{ar}I_a + E_r \tag{2}$$

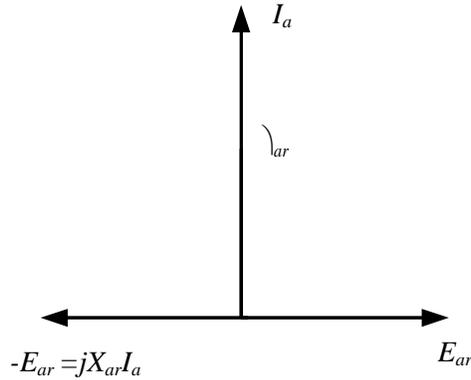


Figura 5. Definición de la reactancia de reacción de armadura

Del diagrama fasorial de la figura 5, el voltaje  $E_{ar}$  atrasa al flujo  $\lambda_{ar}$  (o  $I_a$ ) en  $90^\circ$ . Por lo tanto,  $I_a$  atrasa al fador  $-E_{ar}$  en  $90^\circ$ . En la ecuación (2), el voltaje  $-E_{ar}$  puede ser representado como una caída de voltaje a través de una reactancia  $X_{ar}$  debida a la corriente  $I_a$ . Luego, la ecuación (2) puede ser escrita como

$$E_f = jX_{ar}I_a + E_r \tag{3}$$

Esta reactancia  $X_{ar}$  es conocida como *reactancia de reacción de armadura* o reactancia de magnetización y se muestra en la figura 6a

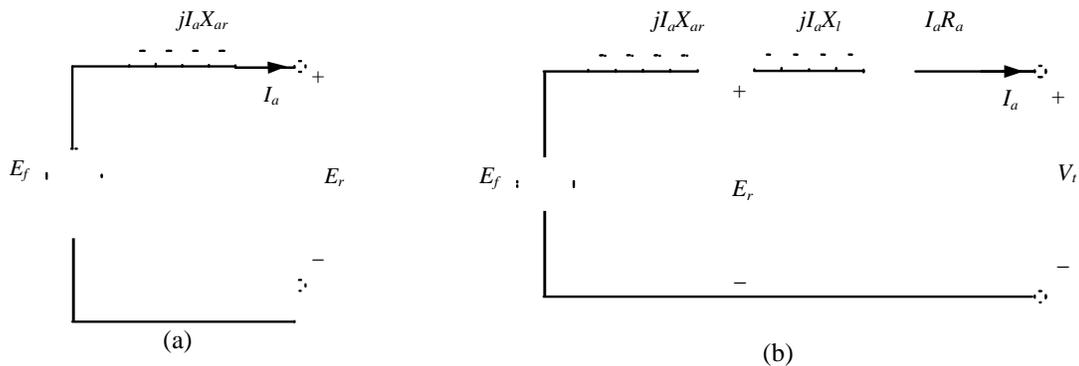


Figura 6. Circuito equivalente. a Voltaje de excitación b. Voltaje en terminales

Si la resistencia del bobinado de estator y el flujo de fuga se incluyen en el circuito equivalente el resultado se expresa en la figura 6b.

Si las dos reactancias son combinadas en una el circuito equivalente se reduce al mostrado en la figura 5, donde

$$X_s = X_{ar} + X_l \tag{4}$$

Esta reactancia se denomina *reactancia sincrónica* y toma en cuenta el efecto del flujo de fuga y de magnetización producida por la corriente del estator. El diagrama fasorial mostrando la relación entre los voltajes y corrientes para ambas condiciones: generador y motor se muestra en la figura 7.

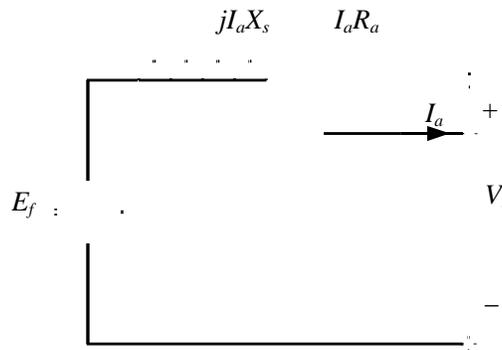


Figura 7. Circuito Equivalente de la Máquina Sincrónica de rotor cilíndrico

El diagrama fasorial representa la relación la relación de cantidades por fase considerando el voltaje terminal  $V_t$  como referencia. Para el modo de operación generador de la máquina sincrónica la figura 7 muestra la corriente fluyendo hacia la carga. Dos condiciones de operación, sobreexcitado ( $E_f > V$ ) y subexcitado son mostrados en los diagramas fasoriales. En el primer caso la corriente de campo se controla de manera que el voltaje  $E_f$  en módulo sea mayor que la tensión en bornes de la máquina  $V_t$ , de esta manera la corriente de armadura resulta en retraso, figura 8a. Esta condición de operación corresponde al de un generador sobreexcitado. Si por el contrario la corriente de campo se reduce de manera que  $|E_f|$  es menor que  $|V_t|$ , la corriente de armadura adelanta al voltaje terminal, figura 8b.

En el caso que la máquina opere como motor, la corriente de armadura fluye hacia la máquina (en dirección opuesta al caso generador). Considerando esto, se representa en el diagrama fasorial como  $-I_a$  y se construye de acuerdo a esta convención. A esta forma de representar las cantidades se denomina ‘Convención generador’. En el caso subexcitado  $|E_f|$  es menor que  $|V_t|$  y por lo tanto la corriente ( $-I_a$ ) atrasa al voltaje terminal operando con factor potencia en atraso, figura 9a. En el caso sobreexcitado la corriente de armadura adelanta a  $V_t$  y la tensión  $E_f$  es mayor que la tensión en bornes ( $V_t$ ), figura 9b.

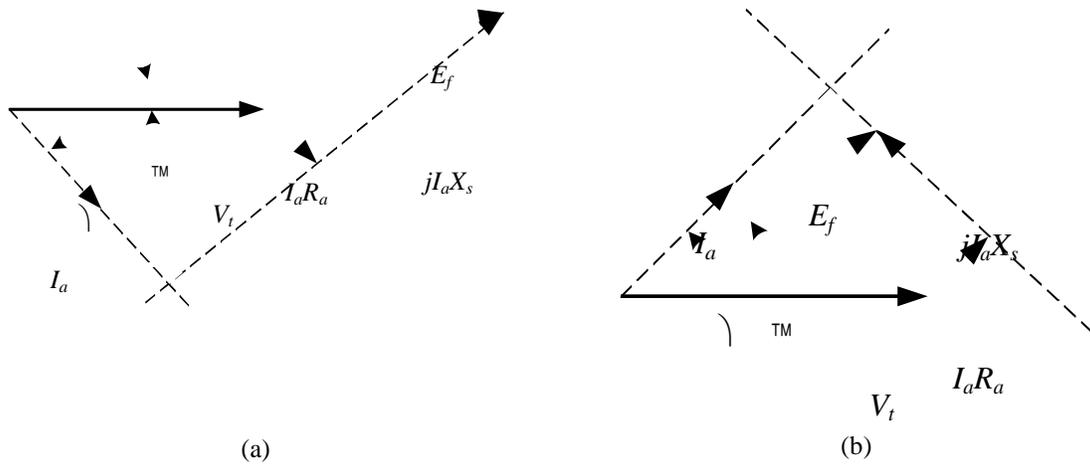


Figura 8. Diagrama fasorial a. Generador sobreexcitado, b. Generador Subexcitado

Es importante notar que el ángulo  $\delta$  (ángulo de potencia) entre  $V_t$  y  $E_f$  es positivo para modo generador y negativo para modo motor, y juega un rol importante en la transferencia de potencia y estabilidad de la maquinaria.

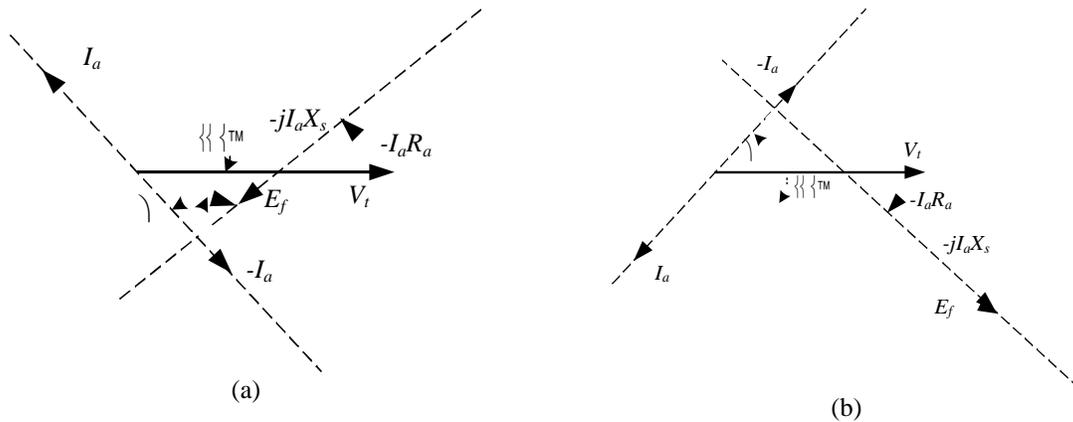


Figura 9. Diagrama fasorial a. Motor sobreexcitado, b. Motor Subexcitado

### 6.2.1 Potencia y Torque

Una máquina síncrona normalmente se encuentra conectada a una red cuyo voltaje y frecuencia son constantes. Existe un límite de la potencia que el generador puede entregar a la barra infinita y un torque máximo que puede ser aplicado al motor sin perder sincronismo.

Del diagrama fasorial se tiene que

$$X_s I_a \cos \delta = E_f \sin \delta \quad (5)$$

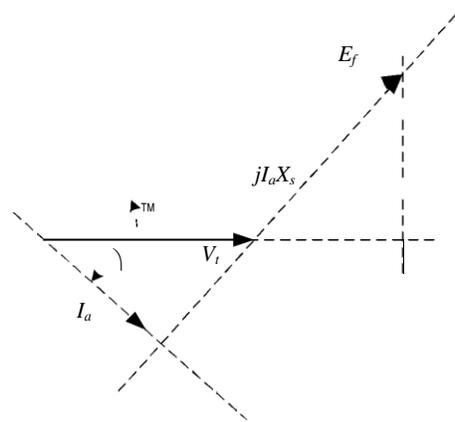


Figura 10. Diagrama fasorial motor sincrónico con  $R_a=0$

despejando la componente activa de la corriente de armadura

$$I_a \cos \delta = \frac{E_f}{X_s} \sin \delta \quad (6)$$

por lo que la potencia activa  $P_3$  se calcula como

$$P = 3V_t I_a \cos \delta \quad (7)$$

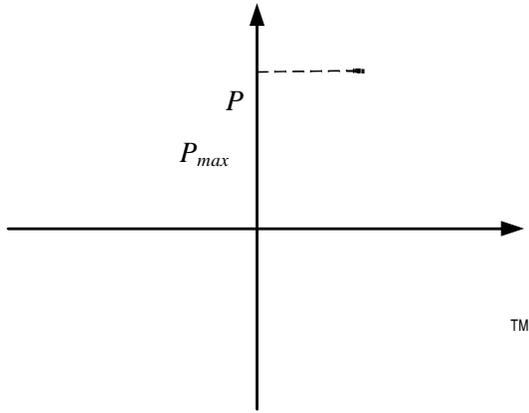
$$= 3 \frac{V_t E_f}{X_s} \sin \delta \quad (8)$$

y el torque

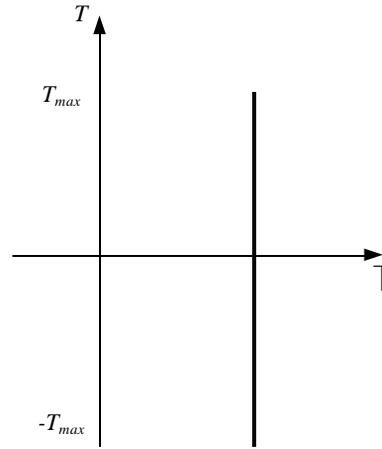
$$T = \frac{P_3}{\omega_s} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_t E_f}{X_s} \sin \delta \quad (9)$$

Se observa que ambos,  $P_3$  y  $T_g$ , varían senoidalmente con el ángulo  $\delta$ , figura 11a. La carga de la máquina puede ser gradualmente incrementada hasta los valores máximos  $P_{max}$  y  $T_{max}$  conocido como ‘límite de estabilidad estática’. La máquina perderá sincronismo si el ángulo de torque es mayor de  $90^\circ$ . Notar que dado que  $V_t$  es constante, el torque máximo puede incrementarse aumentando la excitación  $E_f$  (aumentando la corriente de campo  $I_f$ ).

Como la velocidad de la máquina sincrónica es constante ( $\omega_s$ ), la característica torque velocidad resulta ser una línea recta como se indica en la figura 11b



(a)



(b)

Figura 11 Característica a) potencia-ángulo y b) Torque velocidad

### 6.2.2 Determinación de la Reactancia Sincrónica $X_s$

La reactancia sincrónica es un parámetro determinante en la operación de la MS. Esta se puede determinar realizando dos pruebas: circuito abierto y corto circuito.

#### i) Prueba de circuito abierto.

Para esta prueba la máquina sincrónica es llevada a la velocidad sincrónica. Con el circuito de armadura (bobinado de estator) en circuito abierto, figura 13a se mide la variación de la tensión en terminales  $V_t$  (que resulta igual a  $E_f$ ) respecto de la corriente de campo. La curva resultante, figura 12b. se conoce como ‘*característica de circuito abierto*’ (OCC). Debido a que los terminales están abiertos, ésta curva muestra la variación del voltaje de excitación  $E_f$  con la corriente de campo  $I_f$ . Notar que a medida que la corriente de campo aumenta el circuito magnético muestra los efectos de la saturación. La línea que pasa a través de la sección lineal de la OCC se denomina ‘*línea de entrehierro*’.

#### ii) Prueba de corto circuito.

Para esta prueba se realiza el arreglo de la figura 14, se conectan amperímetros en cada fase y se cortocircuitan los terminales del bobinado de estator. La máquina se lleva a la velocidad sincrónica, se varía la corriente de campo y se registra su valor, el promedio de las corrientes de armadura se mide en este proceso. La variación de esta corriente respecto de la corriente de campo se muestra en la figura 13b, y representa la ‘*característica de cortocircuito*’ (SCC) de la máquina sincrónica. Notar que esta característica es una línea recta. Esto se debe al hecho que debido a la condición de cortocircuito el flujo presente en la máquina es bajo, por lo que no entra en saturación. Para entender este hecho hay que referirse al circuito equivalente de la figura \_\_. Debido a que  $R_a \ll X_s$ , la corriente de armadura atrasa al voltaje  $E_f$  en casi  $90^\circ$ . Por lo tanto la FMM de reacción de armadura,  $F_a$ , se opone a la FMM de campo  $F_f$ , por lo que la FMM resultante es muy pequeña, como lo muestra el diagrama fasorial de la figura \_\_. Por lo tanto, el circuito magnético permanece con bajo nivel de flujo y no saturado aún cuando  $I_a$  e  $I_f$  sean altos. Por lo mismo la variación de  $E_f$  respecto a  $I_f$  será lineal resultando en una variación lineal de  $I_a$  con  $E_f$ .



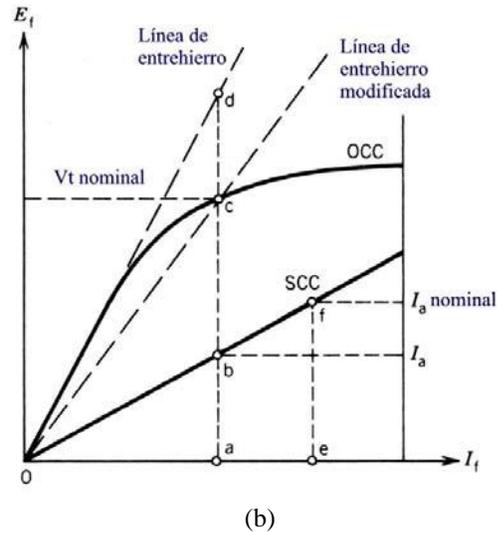
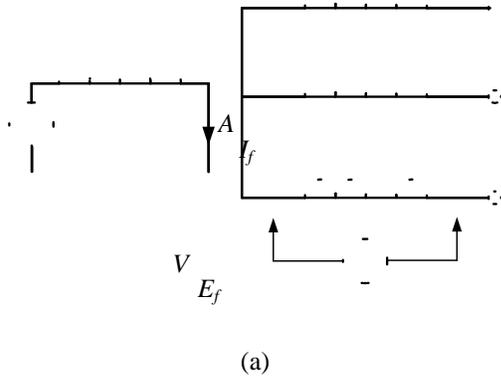


Figura 13. Prueba de Circuito abierto. A) diagrama circuital, b) Línea de entrehierro

### iii) Prueba de corto circuito.

Para esta prueba se realiza el arreglo de la figura 14, se conectan amperímetros en cada fase y se cortocircuitan los terminales del bobinado de estator. La máquina se lleva a la velocidad sincrónica, se varía la corriente de campo y se registra su valor, el promedio de las corrientes de armadura se mide en este proceso. La variación de esta corriente respecto de la corriente de campo se muestra en la figura 13b, y representa la ‘*característica de cortocircuito*’ (SCC) de la máquina síncrona. Notar que esta característica es una línea recta. Esto se debe al hecho que debido a la condición de cortocircuito el flujo presente en la máquina es bajo, por lo que no entra en saturación. Para entender este hecho hay que referirse al circuito equivalente de la figura -. Debido a que  $R_a \ll X_s$ , la corriente de armadura atrasa al voltaje  $E_f$  en casi  $90^\circ$ . Por lo tanto la FMM de reacción de armadura,  $F_a$ , se opone a la FMM de campo  $F_f$ , por lo que la FMM resultante es muy pequeña, como lo muestra el diagrama fasorial de la figura -. Por lo tanto, el circuito magnético permanece con bajo nivel de flujo y no saturado aún cuando  $I_a$  e  $I_f$  sean altos. Por lo mismo la variación de  $E_f$  respecto a  $I_f$  será lineal resultando en una variación lineal de  $I_a$  con  $E_f$ .

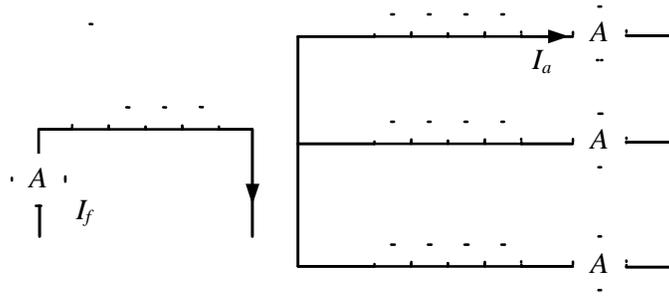


Figura 14. Prueba de cortocircuito. Diagrama circuital

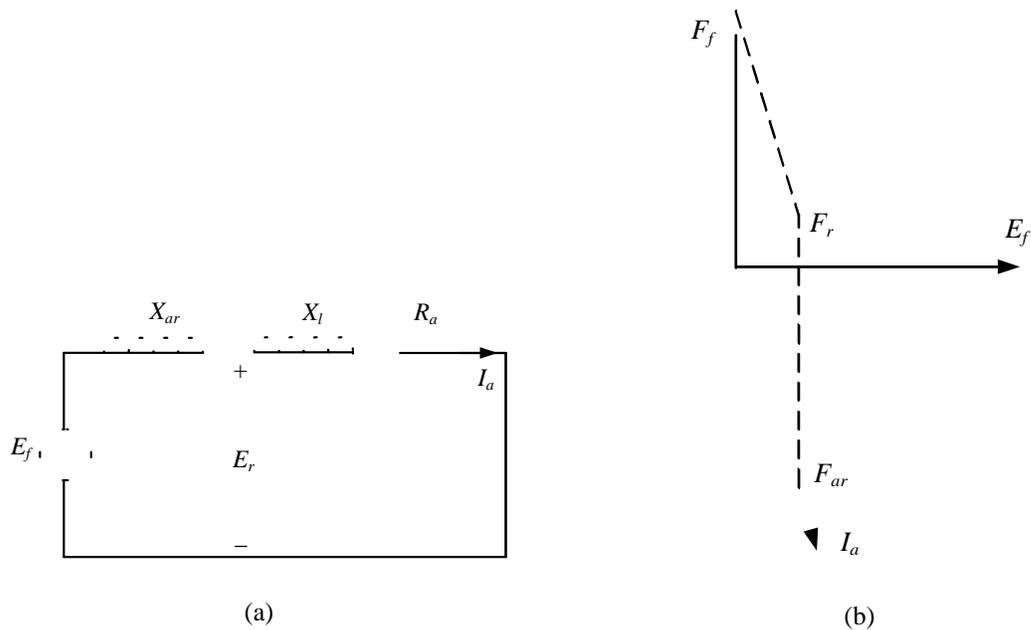


Figura 15. Condición de Corto Circuito, a. Circuito equivalente, b. Diagrama fasorial

#### iv) Reactancia Sincrónica no saturada.

El valor de la reactancia sincrónica,  $X_s$  para la condición no saturada se calcula a partir de la línea de entrehierro y de la característica de corto circuito de la máquina para un valor particular de  $I_f$ , esto es (si  $R_a \approx 0$ )

$$X_{s(nosat)} \approx \frac{E_{da}}{I_{ba}} \quad (10)$$

Donde  $I_{ba}$  se obtiene de la figura 13b

### v) Reactancia Sincrónica saturada

Para operación cercana al voltaje nominal ( $V_t$  nominal) se asume que la máquina sincrónica opera en un nivel no saturado de acuerdo a una 'línea de entrehierro modificada' definida como una línea recta que pasa por el origen y el valor nominal de voltaje de la característica de circuito abierto como se muestra en la figura 13b. De acuerdo a esta aproximación el valor de la reactancia sincrónica a voltaje nominal se calcula como

$$X_{s(sat)} = \frac{E_{ca}}{I_{ba}} \quad (11)$$

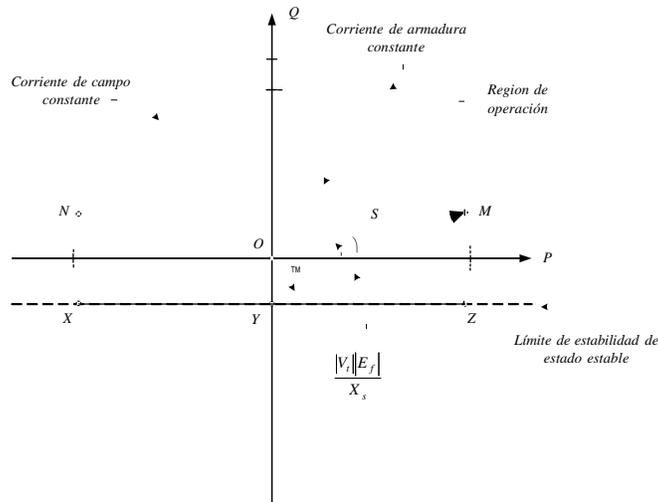
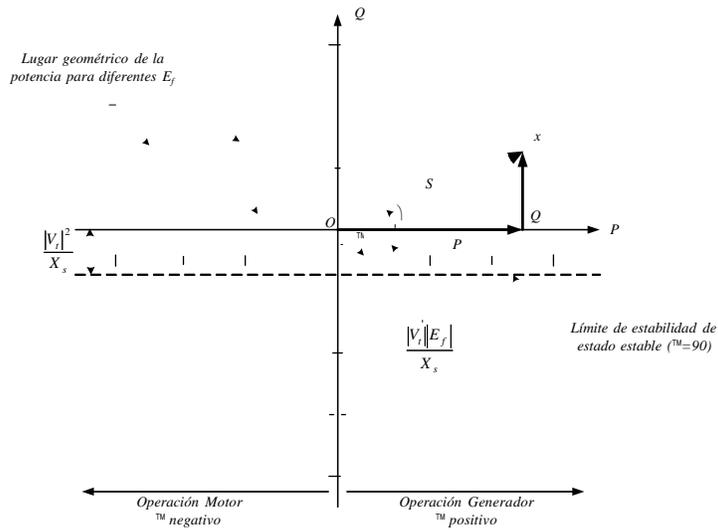
## 6.3 Región de Operación de la MS rotor cilíndrico

Las potencias activas y reactivas dadas por las ecuaciones \_ son graficadas en el plano complejo P-Q. Este describe un círculo de radio  $\frac{V_t E_f}{X_s}$  con centro en el punto  $\left\{0, \frac{|V_t|^2}{X_s}\right\}$

como muestra la figura \_. Para un punto de operación  $x$ , el ángulo de potencia  $\delta$  y el ángulo de factor de potencia  $\phi$  son los indicados. Los diferentes círculos trazados corresponden a diferentes valores de la tensión de excitación. El punto de máxima potencia representando el límite de estabilidad de estado estable es la línea horizontal (pasando a través del centro) para  $\phi = 90^\circ$ .

Aún cuando la región definida por los círculos concéntricos de la figura \_ representa los valores de P y Q que la máquina puede alcanzar, ella no puede operar en todos los puntos dentro de dichos círculos sin exceder los valores nominales. La región de operación está restringida por las siguientes consideraciones

1. Calentamiento de la armadura (determinado por  $I_a$ ).
2. Calentamiento del campo (determinado por  $I_f$ ).
3. Límite de estabilidad estático.



La región definida por las restricciones enumeradas define la zona de operación en la cual ninguna de ellas es excedida.

En la figura \_ se observa el plano complejo para una operación de la MS a voltaje terminal  $V_t$ . El círculo con centro en el origen  $O$  y radio  $S = V_t I_a$  define la región de operación para la cual el calentamiento de la armadura no excede el límite especificado ( $I_a$  máxima). El círculo con centro en  $\left\{0, \frac{|V_t|^2}{X_s}\right\}$  y radio  $\frac{V E_f}{X_s}$  define la región para la cual el

calentamiento del bobinado de campo alcanza el máximo tolerable. La línea horizontal XYZ especifica el límite de estabilidad de estado estable  $\theta = 90^\circ$ . Con estas indicaciones el área sombreada de la figura \_ muestra la zona de operación de la MS. Los puntos M (para operación generador) y N (para operación motor) representan la intersección del límite de calentamiento de armadura y campo, y determinan los puntos de operación óptima debido a que en estos puntos se hace máxima utilización de los circuitos de armadura y campo.

### 6.3.1 Control del factor de potencia.

Una característica sobresaliente de la máquina síncrona conectada a un sistema eléctrico es que el factor de operación puede ser controlado por la corriente de campo. Esto es, la corriente de campo puede ser ajustada para que la corriente de armadura esté en adelanto o atraso respecto del voltaje terminal. En la figura 16 se muestra el circuito equivalente y el diagrama fasorial de la MS para operación motor. Asumiendo operación a potencia constante conectado a una red infinita con voltaje terminal  $V_t$ . Despreciando la resistencia la potencia activa trifásica transferida es

$$P = 3V_t I_a \cos \theta \quad (12)$$

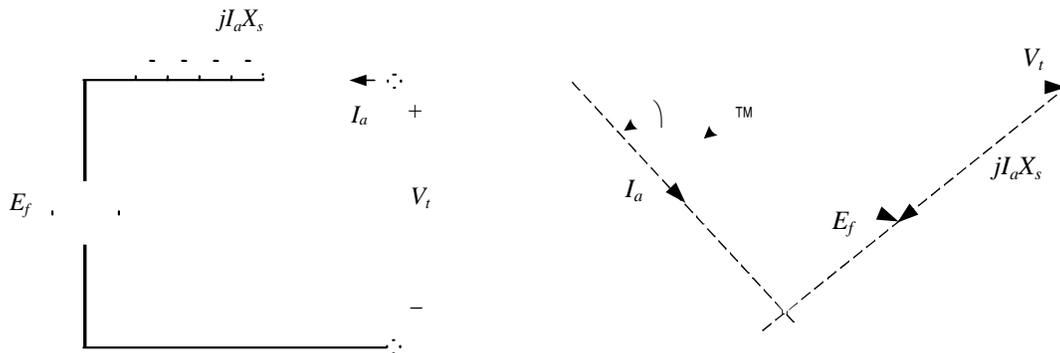


Figura 16. Circuito equivalente y diagrama fasorial motor síncrono

Debido a que  $V_t$  es constante (red infinita) el producto  $|I_a \cos \theta|$  es constante, esto es, la componente de la corriente de armadura en fase con el voltaje es constante. Por lo tanto el lugar geométrico de la corriente de armadura es una línea vertical que pasa a través del valor de la corriente de armadura para factor de potencia unitario. En la figura 17 se muestra la operación de la MS para tres corrientes de armadura

- $I_a = I_{a1}$  en atraso respecto a  $V_t$ .
- $I_a = I_{a2}$  en fase con  $V_t$ .
- $I_a = I_{a3}$  en adelanto respecto a  $V_t$ .

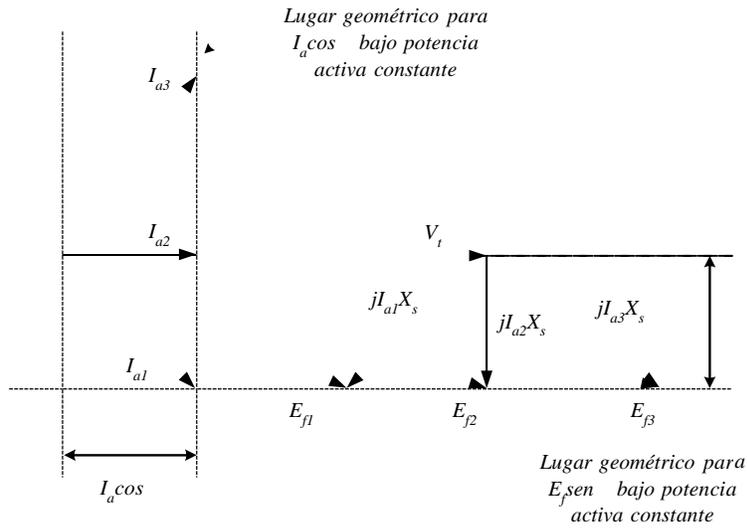


Figura 17. Característica de factor de potencia para potencia activa constante

Para cada una de esas corrientes de estator se trazan los respectivos voltajes de excitación  $E_{f1}$ ,  $E_{f2}$  y  $E_{f3}$ , asociados a las corrientes de campo  $I_{f1}$ ,  $I_{f2}$  y  $I_{f3}$ , que satisfacen la ecuación fasorial

$$E_f = V_t \square jX_s I_a \tag{13}$$

La potencia puede ser expresada también como

$$P = 3 \frac{V_t E_f}{X_s} \sin \phi \tag{14}$$

Nuevamente, para operación a potencia constante el valor  $|E_f \text{ sen} \delta|$  es constante. Entonces el lugar geométrico de  $E_f$  (y con ello de  $I_f$ ) es una línea paralela al fasor  $V_t$ , como se muestra en la figura 17. La diferencia vertical entre el lugar geométrico de  $E_f$  y el fasor  $V_t$  es constante e igual a  $|E_f \text{ sen} \delta|$

La tensión de excitación  $E_f$  cambia linealmente con la corriente de campo  $I_f$ , por lo tanto, una variación en esta corriente producirá un cambio en  $E_f$  y con ello la  $I_a$  de acuerdo al lugar geométrico de cada uno. Para un nivel de corriente de campo, subexcitación, la corriente de estator es elevada y en atraso. La corriente de estator es mínima para factor de potencia unitario y una excitación normal. Para un valor mayor de corriente de campo la corriente de armadura es mayor nuevamente, pero en adelanto. La variación de la corriente de estator con la corriente de campo para un nivel de potencia activa constante se muestra en la figura 18. Esta relación se denomina 'curvas en V' de la MS. La variación del factor de potencia es la variación V inversa.

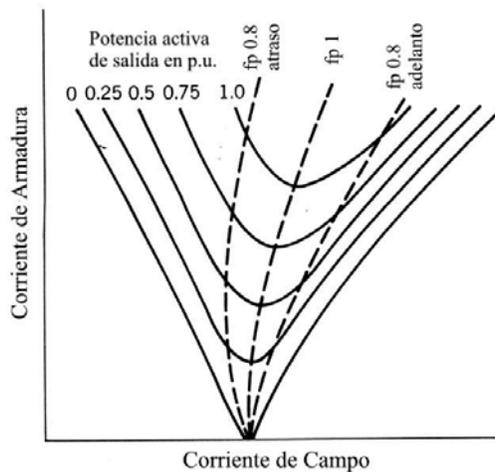


Figura 18. Variación de la corriente de armadura respecto de la corriente de campo. Curvas en V

### 6.3.2 Operación aislada de la MS

En general las MS's operan conectadas a un sistema eléctrico infinito, sin embargo pequeños generadores son utilizados para proveer energía a cargas eléctricas aisladas o como sistemas de respaldo o emergencia basados en motores a gasolina o diesel. En estos sistemas el voltaje terminal tiende a variar de acuerdo a la variación de la carga conectada por lo que se debe utilizar un sistema regulador de voltaje que ajuste la corriente de campo de manera de mantener el voltaje de salida constante.

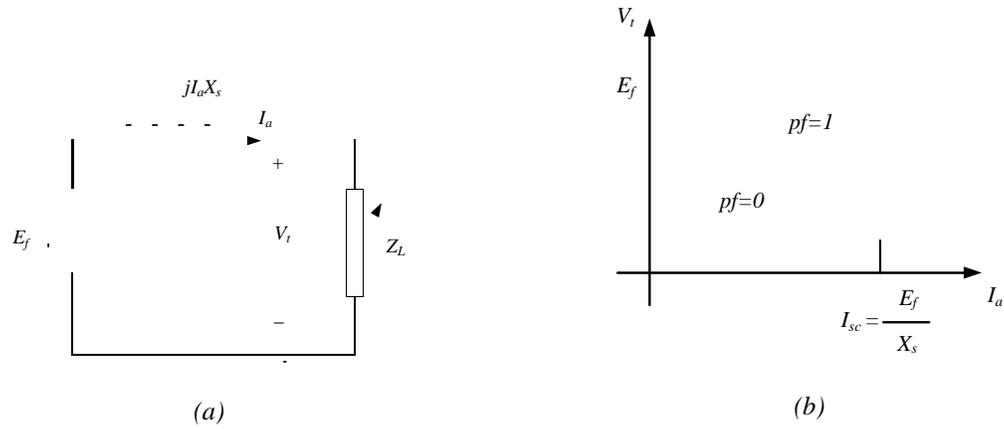


Figura 19. Operación aislada del generador sincrónico

Para determinar la característica del voltaje en terminales de un generador aislado hay que considerar el circuito equivalente de la figura 19a. Para la condición de circuito abierto

$$I_a = 0$$

por lo tanto  $V_t$

=  $E_f$ . Para la condición de cortocircuito  $V_t$

= 0, luego la corriente

$I_a = I_{cc} = \frac{E_f}{X_s}$ . Por lo tanto, si la corriente varía desde  $I_a = 0$  hasta  $I_a = \frac{E_f}{X_s}$ , el voltaje en terminales va desde  $V_t = E_f$  a  $V_t = 0$ , es decir, si la corriente de campo se mantiene invariante la regulación de voltaje resulta pobre cuando la corriente de carga cambia.

Para una carga inductiva pura  $Z_L = X_L$ , se tiene

$$V_t = E_f - I_a X_s \quad (15)$$

pero  $E_f = I_{cc} X_s$

$$V_t = I_{cc} X_s - I_a X_s \quad (16)$$

$$= X_s (I_{cc} - I_a) \quad (17)$$

Para una carga resistiva pura  $Z_L = R_L$

$$I_a = \frac{E_f}{R_L^2 + X_s^2} \quad (18)$$

$$= \frac{I_{cc} X_s}{R_L^2 + X_s^2} \quad (19)$$

pero  $V_t = R_L I_a$

De las ecuaciones \_ se tiene

$$\frac{V_t^2}{(X_s I_{cc})^2} + \frac{I_a^2}{I_{cc}^2} = 1 \quad (20)$$

La ecuación (17) representa una variación (disminución) lineal del voltaje terminal con la corriente de estator, mientras que la ecuación (20) representa una elipse con coordenadas rectangulares  $V_t$  e  $I_a$ . Estas ecuaciones son mostradas en la figura 19b. Las curvas demuestran que al aumentar la corriente de armadura el voltaje terminal caerá rápidamente, resultando en una regulación pobre. Para mantener el voltaje terminal constante con

corriente de carga variable la corriente de campo se ajusta variando la tensión de excitación  $E_f$  . La figura 20 muestra los requerimientos de corriente  $I_f$  para mantener el voltaje de carga constante.

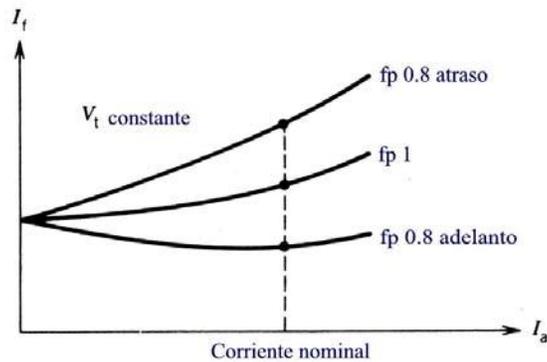


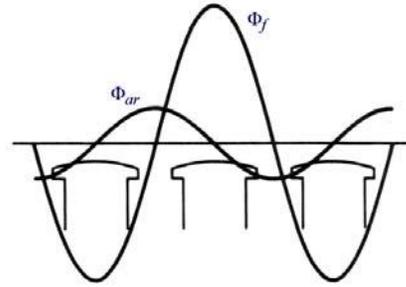
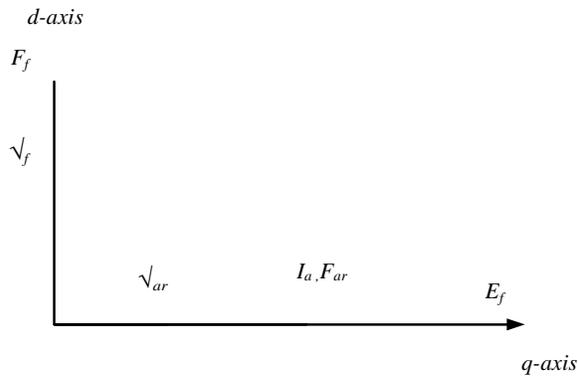
Figura 20. Requerimientos de corriente de campo en función de la corriente de carga

#### 6.4 Máquina Síncrona de Polos Salientes

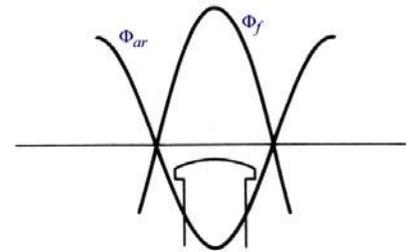
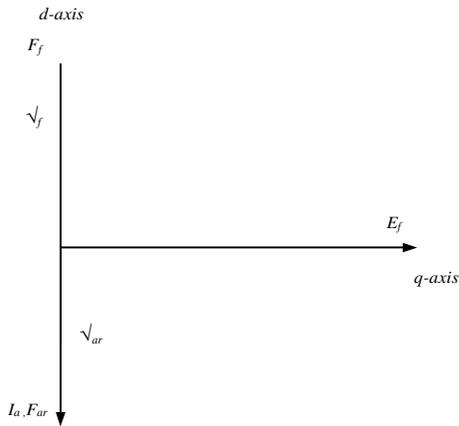
Las máquinas de baja velocidad y gran número de polos poseen geometría de polos salientes y un largo de entrehierro no uniforme. La reluctancia magnética es baja a lo largo del polo y alta en la zona interpolar. Por lo tanto una distribución particular de corrientes de armadura ( $I_{ar}$ ) producirá más flujo si actúa en la zona polar (baja reluctancia) denominada “eje directo” o “eje-d” que en la región interpolar denominada “eje cuadratura” o “eje-q”. En el caso de máquinas con rotor cilíndrico la reacción de armadura produce esencialmente el mismo flujo independiente de la posición del rotor, por lo que el efecto de la reacción de armadura puede ser representado por un solo parámetro  $X_{ar}$ , no así en el caso de la configuración de polos salientes.

Considerando la figura 21a, donde la corriente de armadura  $I_a$  está en fase con el voltaje de excitación  $E_f$ , la  $FMM$  de campo,  $F_f$ , y el flujo  $\lambda_{ar}$  a lo largo del eje-q. En la figura 21b la corriente de estator  $I_a$  se considera que atrasa al voltaje de excitación  $E_f$  en  $90^\circ$ , la  $FMM$  de reacción de armadura y el  $\lambda_{ar}$  actúan a lo largo del eje-d en directa oposición al flujo y  $FMM$  de campo. Notar que la misma  $FMM$  de armadura ahora actuando sobre el eje-d produce más flujo de reacción de armadura que en el caso cuando  $I_a$  estaba en fase con  $E_f$  y su  $FMM$  actuaba en el eje-q.

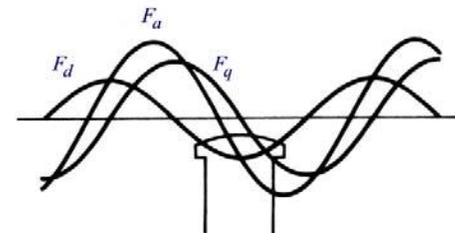
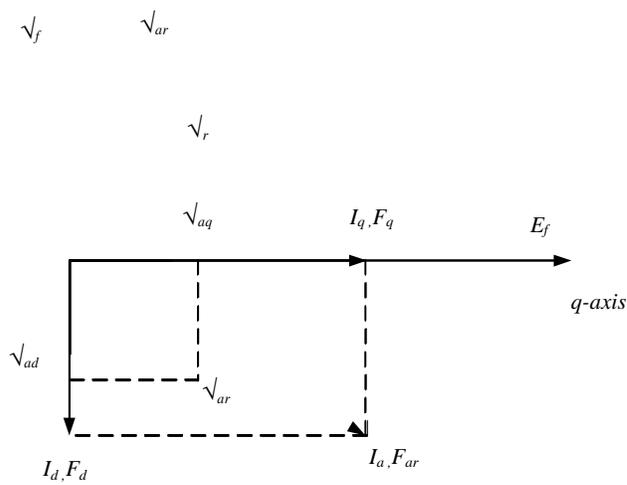
Por lo tanto la reactancia de reacción de armadura no es única en una máquina de polos salientes y depende de la posición relativa en la cual actúa la  $FMM$  de reacción de armadura.



(a)



(b)



(c)

Figura 21. Reacción de armadura de la MS de polos salientes

### 6.4.1 Reactancia de eje Directo y Cuadratura

Si a la  $FMM$  de armadura se divide en dos componentes: una actuando a lo largo del eje directo  $F_d$  y otra sobre el eje de cuadratura  $F_q$ . Cada una de estos componentes ( $F_d, F_q$ ) o corrientes ( $I_d, I_q$ ) producen flujos ( $\lambda_{ad}, \lambda_{aq}$ ) que actúan en los respectivos ejes. Este concepto se ilustra en la figura 21c, donde la corriente  $I_a$ , es considerada atrasada al voltaje de excitación  $E_f$ .

El flujo de eje directo,  $\lambda_{ad}$ , y el de eje cuadratura,  $\lambda_{aq}$ , actúan sobre ejes de permeancia constante, por lo que se pueden representar a través de reactancias:

- $X_{ad}$  : Reactancia de eje directo que toma en cuenta el flujo  $\lambda_{ad}$  producido por la corriente de eje directo  $I_d$ .
- $X_{aq}$  : reactancia de eje cuadratura que toma en cuenta el flujo  $\lambda_{aq}$  producido pro la corriente de cuadratura  $I_q$ .

Si la inductancia de fuga  $X_{al}$  se incluye para tomar en cuenta el flujo de fuga producido por la corriente de armadura se tiene:

$$X_d = X_{ad} + X_l \quad (21)$$

$$X_q = X_{aq} + X_l \quad (22)$$

La reactancia de fuga  $X_l$  se asume igual para ambas corrientes debido a que los flujos están fundamentalmente confinados al estator. De la configuración de polos salientes, se observa que  $X_d$  mayor que  $X_q$  debido a que la reluctancia a lo largo del eje cuadratura es mayor que la reluctancia del eje directo (menor entrehierro). En general  $X_q$  esta entre 0.5 y 0.8 de  $X_d$ .

### 6.4.2 Diagrama fasorial MS Polo Saliente

El circuito equivalente para una MS de polos salientes considerando las relaciones previas puede ser construido según muestra la figura 22

Si se define el ángulo  $\phi$  entre  $E_f$  e  $I_a$ , (ángulo de factor de potencia interno) es posible calcular las corrientes  $I_d$  e  $I_q$ , respectivamente son:

$$I_d = I_a \sin \theta \quad (23)$$

$$I_q = I_a \cos \theta \quad (24)$$

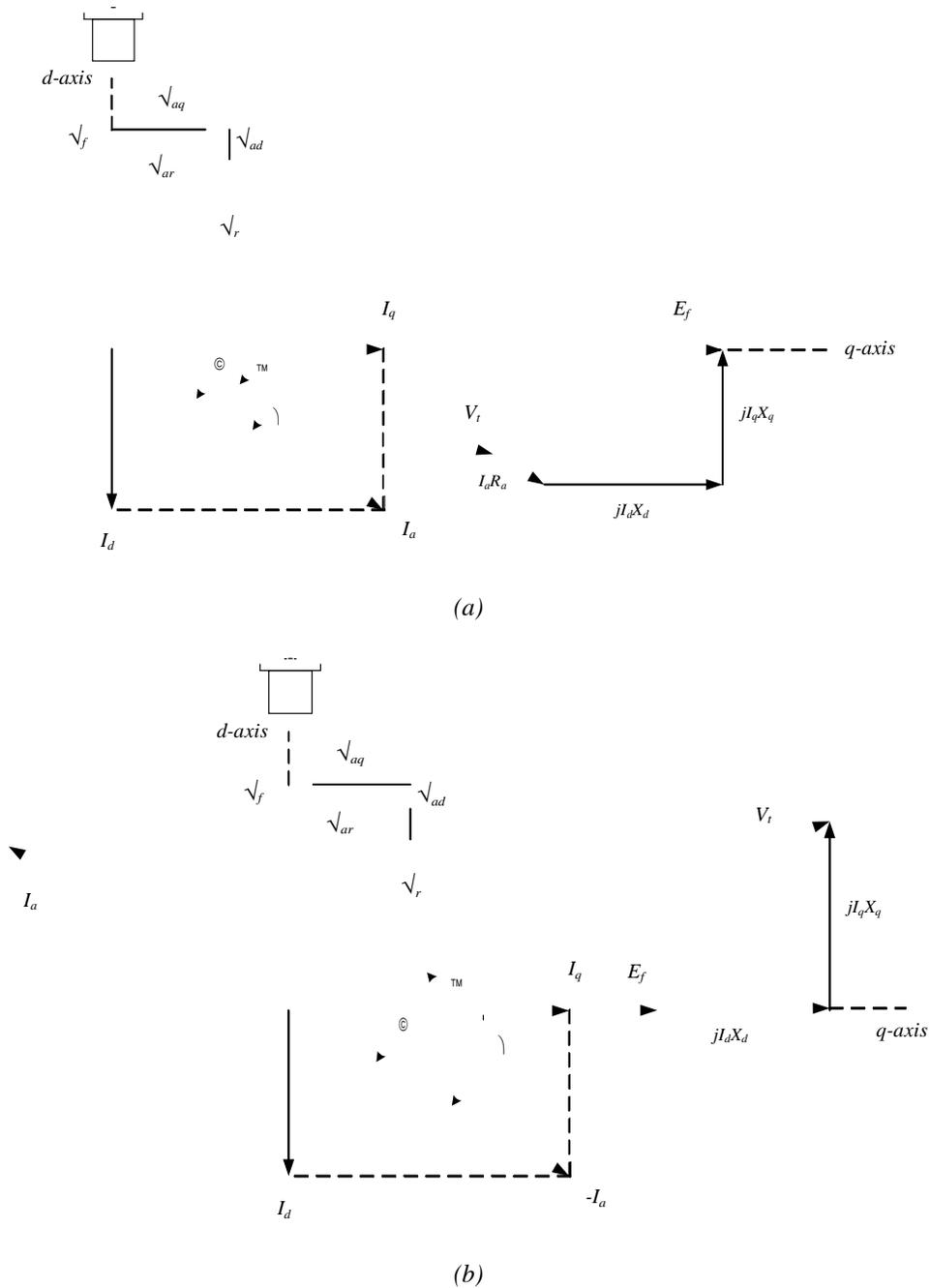


Figura 22 Diagrama fasorial maquina de polos salientes. a) Generados b) Motor con ( $R_a=0$ )(convención generador)

Sin embargo, en muchos casos el ángulo entre  $V_t$  e  $I_a$  es conocido (ángulo del

factor de potencia en terminales) por lo que se hace necesario conocer el ángulo  $\delta$  entre  $E_f$  y  $V_t$  para poder realizar la descomposición de  $I_a$ .

De los diagramas fasoriales se tiene:

$$\theta = \lambda \pm \theta^{TM} \quad (25)$$

Luego, para la corriente de eje directo

$$I_d = I_a \sin \theta = I_a \sin (\lambda \pm \theta^{TM}) \quad (26)$$

de igual forma para la corriente de eje cuadratura

$$I_q = I_a \cos (\lambda \pm \theta^{TM}) \quad (27)$$

Además

$$V_t \sin \theta^{TM} = I_q X_q = I_a X_q \cos (\lambda \pm \theta^{TM}) \quad (28)$$

Luego

$$\operatorname{tg}(\theta^{TM}) = \frac{I_a X_q \cos(\lambda)}{V_t \pm I_a X_q \operatorname{sen}(\lambda)} \quad (29)$$

y

$$E_f = V_t \cos(\theta^{TM}) \pm I_d X_d \quad (30)$$

De acuerdo al modo de operación de la MS (motor o generador) y del factor de potencia a la que opera el ángulo  $\theta$  será igual a  $\lambda + \theta^{TM}$  o bien a  $\lambda - \theta^{TM}$ .

### 6.4.3 Potencia en la MSPS

Si se desprecia la resistencia de armadura,  $R_a$ , y las pérdidas en el fierro, la potencia aparente desarrollada por la MS se calcula como:

$$S = V_t I_a^* \quad (31)$$

$$S = V_t \cos \theta^{TM} (I_q - j I_d)^* \quad (32)$$

$$S = V_t \cos \theta^{TM} (I_q + j I_d) \quad (33)$$

Del diagrama fasorial se tiene que :

$$I_d = \frac{E_f \sin \delta - V_t \cos(\delta - \theta)}{X_d} \quad (34)$$

$$I_q = \frac{V_t \sin(\delta - \theta)}{X_q} \quad (35)$$

Substituyendo estas expresiones de  $I_d$  e  $I_q$  en la ecuación (33):

$$S = \frac{(V_t)^2}{X_q} \sin^2(\delta - \theta) + \frac{V_t E_f}{X_d} \cos(\delta - \theta) \sin(\delta - \theta) \quad (36)$$

$$S = P + Q \quad (37)$$

Tomando la parte real y compleja de la potencia aparente, se tiene que la potencia activa es:

$$P = \frac{V_t E_f}{X_d} \sin \delta + \frac{(V_t)^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin(2\delta) \quad (38)$$

$$P = P_e + P_r \quad (39)$$

Y la potencia reactiva:

$$Q = \frac{V_t E_f}{X_d} \cos \delta - V_t^2 \left( \frac{\sin^2 \delta}{X_q} + \frac{\cos^2 \delta}{X_d} \right) \quad (40)$$

Notar que la ecuación (38) para la potencia activa en la MSPS posee dos términos: uno representa la potencia debida a la tensión de excitación,  $P_e$ , (que corresponde a la potencia en el caso de MS rotor cilíndrico). El segundo término,  $P_r$ , representa el efecto de la saliencia, proporcional a la diferencia de reluctancia de eje directo y cuadratura. Notar que esta componente es independiente de la excitación y desaparece si  $X_d = X_q$  (caso rotor cilíndrico), esto es

$$P = \frac{V_t E_f}{X_d} \sin \delta \quad (41)$$

$$Q = \frac{V_t E_f}{X_d} \cos \delta - \frac{V_t^2}{X_d} \quad (42)$$

La característica potencia-ángulo se observa en la figura 23, en ella se muestran las

componentes de las potencias debidas a la excitación y a la variación de reluctancia. La potencia máxima resultante es mayor que en caso de rotor cilíndrico para la misma excitación y ocurre a un ángulo  $\delta$  menor que  $90^\circ$ , haciendo que la curva sea más

pronunciada en la zona de pendiente positiva. Esto hace que la maquina responda de manera más rápida a los cambios de torque en el eje.

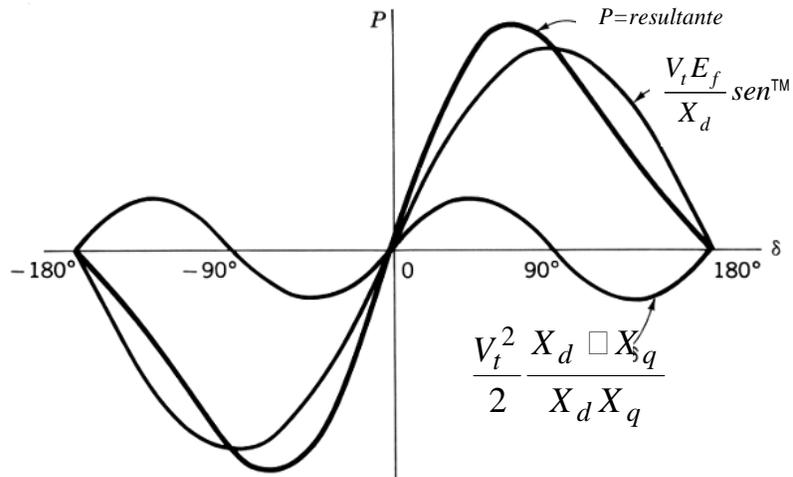


Figura 23 .Característica potencia-ángulo MS de polos salientes

### 6.5 Motor de Reluctancia

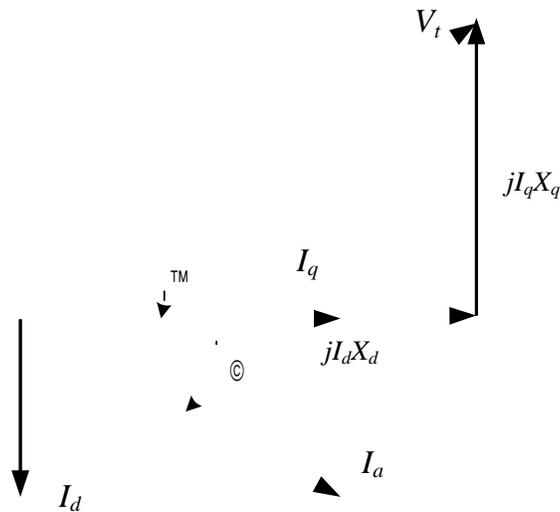


Figura 24

$$P = 3 \frac{V_t^2}{2} \left\{ \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right\} \text{sen} 2\theta$$

### 6.5.1 Determinación de las Reactancias $X_d$ y $X_q$

Para la determinación de las reactancias de eje directo y de cuadratura de una MSPS se acostumbra a realizar la prueba de bajo deslizamiento. La figura 25 muestra la disposición de la instrumentación y la conexión de la MS.

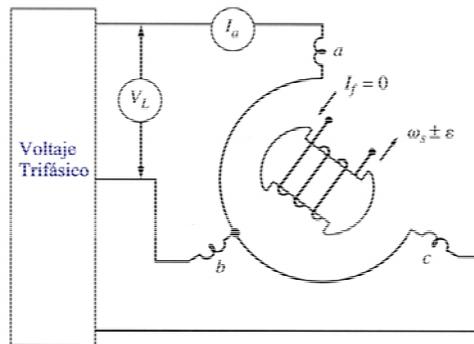


Figura 25. Prueba de bajo deslizamiento para la determinación de  $X_d$  y  $X_q$

Con el circuito de campo desenergizado ( $I_f = 0$ ) y en circuito abierto, el rotor se lleva a una velocidad cercana a la velocidad sincrónica a través de un mecanismo mecánico externo. El bobinado de armadura se excita a voltaje reducido para evitar saturación y obtener valores no saturados de las reactancias. Así como el eje directo del rotor se desliza respecto del *CMR* de armadura, la corriente  $I_a$  varía de acuerdo a la alineación y desalineación de la *FMM* con el eje directo del rotor. En estas condiciones se toma un oscilograma de la corriente de armadura como lo muestra la figura 26. A partir de esta información se calculan las reactancias como:

$$X_d = E \frac{V_L}{I_{\min}} \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (43)$$

$$X_q = E \frac{V_L}{I_{\max}} \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (44)$$

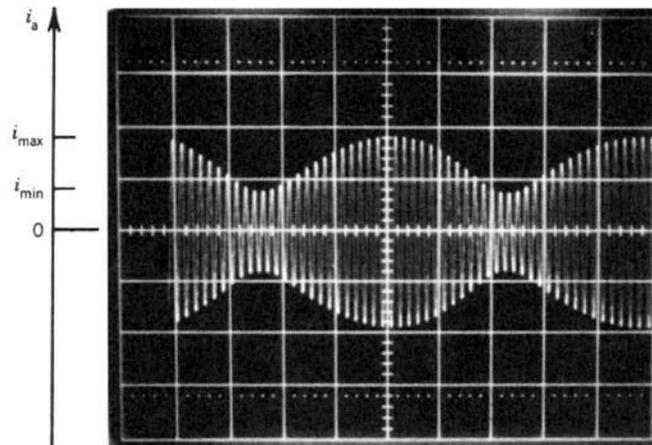


Figura 26. Variación e la corriente re armadura para la prueba de bajo deslizamiento de la MSPS

Para maquinas típicas la razón  $X_d / X_q$  esta en el rango 0.6 a 0.8. Dado que  $X_q$  esta determinado por la reluctancia interpolar (alta), la saturación es despreciable, asimismo,  $X_d$  esta asociada con la reluctancia de la línea del polo (fierro), es decir, entrehierro pequeño, por lo que el efecto de la saturación puede llegar es apreciable.

## 6.6 Sincronización de la MS a una red infinita

En un sistema eléctrico los generadores son conectados o desconectados de la red infinita dependiendo de la demanda.

Antes de que el alternador sea conectado a la barra infinita se deben cumplir un conjunto de condiciones para un mínimo efecto en la máquina como en el sistema de potencia, esto es:

- igualdad de voltajes
- igual frecuencia
- igual fase
- igual secuencia de fases

El *sincronoscopio* (figura 27) es un instrumento que permite verificar la secuencia y la fase entre el sistema de voltajes de la máquina entrante y el sistema de. La posición de la aguja indica la diferencia de fase entre el voltaje de la maquina entrante y la red. La dirección de giro del indicador muestra si el alternador gira mas rápido o mas lento respecto del sistema, esto es si la frecuencia de la maquina es mayor o menor que la frecuencia de la red. Cuando el indicador se mueve lentamente (es decir las frecuencias son casi iguales) y

pasa por el punto de cero fase (posición vertical) el conector se cierra, quedando el generador en paralelo con la red.



Figura 27. Sincronoscopio

Un segundo mecanismo para sincronizar el generador al sistema eléctrico es a través de las “Lámparas de Sincronización”, en la figura 28 se muestra en forma esquemática el *setup* para realizar la corrección con las lámparas.

Con la fuente motriz se ajusta la velocidad tal que la frecuencia del alternador sea lo mas cercano a la frecuencia de la red. La corriente de campo  $I_f$  se ajusta de manera que los voltajes  $V_{AB}$  y  $V_{ab}$  sean similares. Si la secuencia de fase es correcta, figura 29, las lámparas tendrán el mismo brillo y oscilaran, de acuerdo a la diferencia de frecuencias, todas a la vez. Si la secuencia de fases es incorrecta, figura 30, las lámparas brillaran alternadamente (una después de la otra), por lo que se debe intercambiar dos terminales del generador.

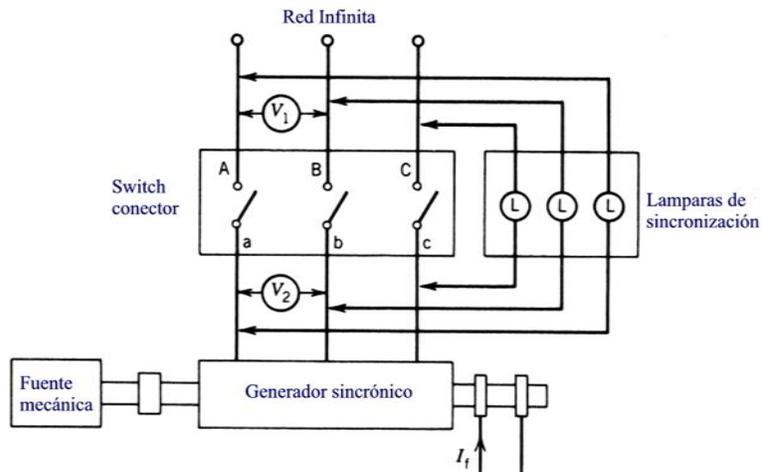


Figura 28. Lámparas de sincronización

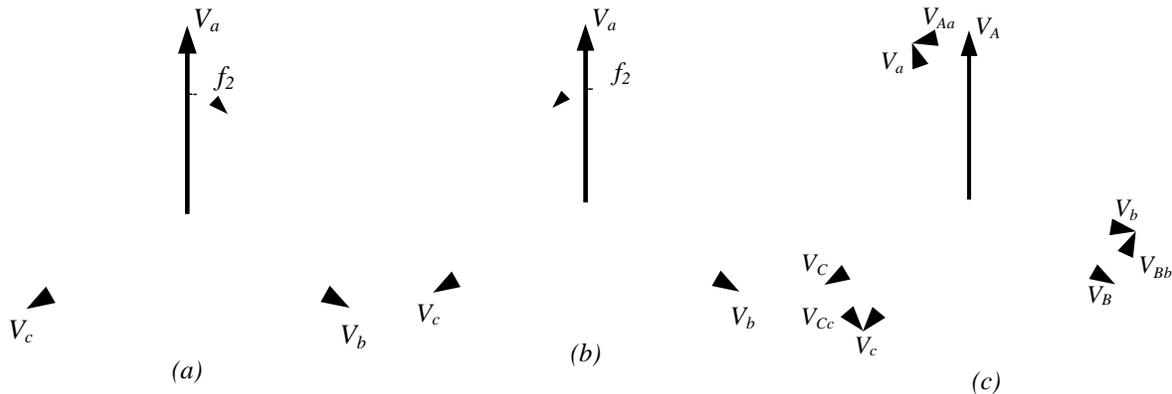


Figura 29. Secuencia de sincronización en fase, mínimo brillo de las lámparas. a) Sistema de Potencia, b) MS. c) Diferencia de voltajes

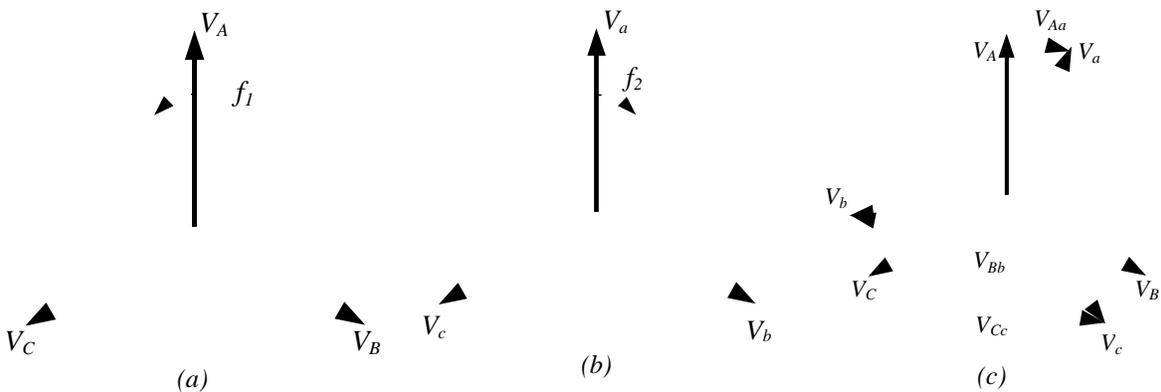


Figura 30. Secuencia de sincronización en contrafase, brillo alternado de las lámparas. a) Sistema de Potencia, b) MS. c) Diferencia de voltajes

## 6.7 Partida de motores sincrónicos

Si la MS es utilizada como motor, este debe ser capaz de conectarse a la red igual que otros motores de inducción o corriente continua. Sin embargo, un motor sincrónico no tiene torque de partida. Si el bobinado del campo se excita con corriente continua y la armadura se conecta a un sistema trifásico, el motor no parte, solo vibra, sin un torque medio acelerante. Esto se puede explicar como sigue:

Considerar una MS de dos polos. Si se conecta a una red trifásica de frecuencia,  $f_s$ , la corriente producirá un CMR que gira a la velocidad sincrónica,  $\omega_s$ . Si se representa los dos polos del CMR de armadura como muestra la figura 31, en el instante inicial ( $t=0$ ) la posición de los polos se muestra en la figura. En esta condición los polos del rotor tenderán

a alinearse con los polos del CMR de estator, por lo que aparece un torque motor en la dirección indicada. Sin embargo, en el instante  $t=t_1$ , los polos del estator se han movido media revolución, por lo que la posición es la presentada por la figura. Por otro lado, el

rotor se ha movido solo una porción de revolución a su alta inercia. Por lo tanto, en el instante indicado el rotor tendera a alinearse con los polos del estator, generando un torque en sentido contrario respecto del instante ( $t=0$ ).

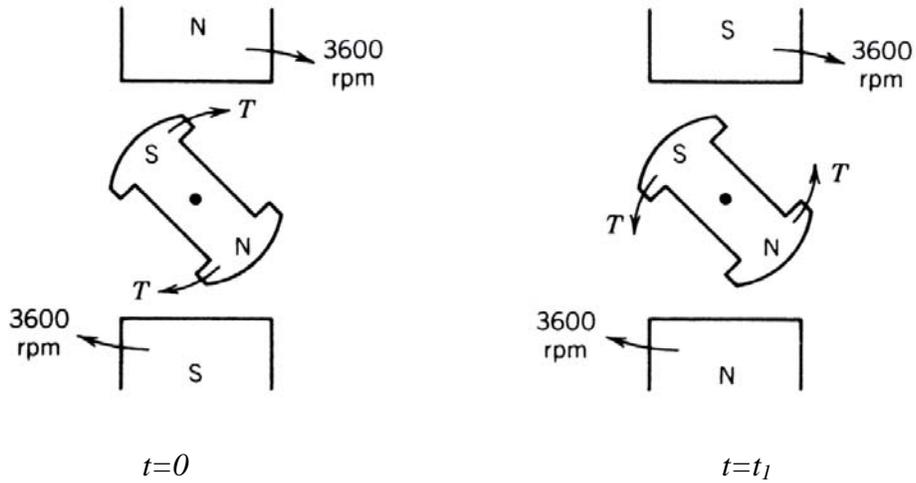


Figura 31. Torque sobre el rotor a la partida