



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**MODOS DE OPERACIÓN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA,
OBTENIDOS DE FORMA EXPERIMENTAL**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTA
HUMBERTO GUTIÉRREZ HERNÁNDEZ**

**ASESOR
ING. GUSTAVO SAUCEDO ZAVALA**

**MORELIA, MICHOACÁN,
JUNIO 2009**



Agradecimientos

Con un cariño inmenso, deseo manifestar mi agradecimiento a mis padres que con gran sacrificio me apoyaron para realizar mis estudios, ellos son el pilar de mis logros.

A mi familia en general, que me han apoyado incondicionalmente para mis estudios en todos los niveles, para todos ellos muchas gracias.

Al Ing. Gustavo Saucedo Zavala, por regalarme su tiempo con las asesorías para llevar a cabo este proyecto.

A la Facultad de ingeniería Eléctrica, por haberme formado como un profesionalista mas para el país; al cuerpo académico de esta facultad, por transmitirme los conocimientos teóricos y prácticos de la Ingeniería Eléctrica y ciencias relacionadas.

Para todos, ¡ Muchas Gracias...!

Dedicatoria

Esta tesis se la dedico a alguien muy especial, a la memoria de mi madre que en paz descanse; yo quería terminar la carrera a su lado, el destino me la quitó unos años antes. Aquél día se me vino encima el mundo pero yo tenía que seguir adelante. Le debo la vida y el amor de madre, por ello escribo lo siguiente:

Madre, te recuerdo a cada instante desde tu partida, aunque en vida no lo hacía ya que sabía que existías.

Al saber que pronto te irías, jugué con el destino y pensé que nunca lo harías, por tu fuerza de no querer separarte de nosotros, lo que más querías...

Al llegar la noche de tu despedida ¡no lo creía!, ¡te fuiste madre mía!, sin poder estar a tu lado, aunque siempre lo quería.

Ahora que estás en el paraíso junto a Dios, se que me cuidarás como lo hacías cuando era pequeño y me divertía.

Siempre en mis caídas fuiste la mujer que nunca me abandonaría, a tu lado llegaba y como madre bella me levantabas y protegías.

Y aunque nunca te demostré cuanto te amaba, se que desde el cielo ves lo que tengo en mi corazón y siempre guardaba.

La tristeza fue mucha en tu vida y te sacrificaste para que la felicidad nos arropara cada día.

Hoy le pido a Dios que te tiene cada nuevo día, que te haga feliz por siempre ¡Madre mía!

Adiós madre mía y aunque no es fácil el decirlo, se que tu partida era lo que Dios decidió para salvarte de esa agonía.

Mamá, te doy gracias por todo lo que me enseñaste, lo conservo en mi pequeño corazón que tú creaste desde que estuve dentro de ese hermoso cuerpo, tu cuerpo.

Por todo lo que me diste, con todo amor y cariño te dedico este trabajo...

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
1.0 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Objetivos particulares	2
1.4 Justificación	3
1.5 Metodología	3
1.6 Organización de la tesis	4
CAPÍTULO 2. Generador Síncrono	5
2.0 Introducción	5
2.1 Generadores síncronos comerciales	5
2.2 Número de polos	6
2.3 Características principales del estator	6
2.4 Características principales del rotor	7
2.5 Excitación de campo y excitadores	8
2.6 Excitación sin escobillas	9
2.7 Factores que afectan el tamaño de los generadores síncronos	10
2.8 Circuito equivalente de un generador síncrono	11
2.9 Diagrama fasorial de un generador síncrono	17
2.10 Generadores síncronos, desde la perspectiva del campo magnético	18
2.11 Potencia y par en los generadores síncronos	19
2.12 Obtención de los parámetros del circuito equivalente de la Máquina Síncrona	22
2.12.1 Resistencia del rotor (R_r); (Valores experimentales)	22
2.12.2 Resistencia de armadura (R_a); (valores experimentales)	23
2.12.3 Reactancia síncrona (X_s); (valores experimentales)	6

2.12.4	Curva de Magnetización; (Valores experimentales)	29
2.13	Modos de operación del generador en un sistema aislado (generador-carga)	31
2.13.1	Generador subexcitado (carga capacitiva)	31
2.13.2	Generador subexcitado; (valores experimentales)	31
2.13.3	Generador a factor de potencia unitario (carga resistiva)	34
2.13.4	Generador a factor de potencia unitario; (valores experimentales)	34
2.13.5	Generador sobreexcitado (cargas inductivas)	36
2.13.6	Generador sobreexcitado; (valores experimentales)	36
2.14	Modos de operación del generador síncrono interconectado a un sistema de potencia	39
2.14.0	Introducción	39
2.14.1	Condiciones requeridas para operar en paralelo	39
2.14.2	Procedimiento general para conectar generadores en paralelo	41
2.15	Generador síncrono al bus infinito	42
2.15.1	Bus infinito, efecto de la variación de la corriente de excitación	43
2.15.2	Bus infinito, efecto de la variación del par o momento de torsión mecánico	45
2.15.3	Generador síncrono en paralelo con el bus infinito, en sus diferentes modos de operación	46
2.15.4	Generador Subexcitado; (valores experimentales)	49
2.15.5	Factor de potencia unitario; (valores experimentales)	50
2.15.6	Generador sobreexcitado; (valores experimentales)	50
2.15.7	Generador síncrono como reactor	51
	a) Reactor capacitivo; (valores experimentales)	51
	b) Reactor inductivo; (valores experimentales)	51
2.16	Generador síncrono en paralelo con otro generador	52
2.16.1	Generador subexcitado (carga RC); (valores experimentales)	57
2.16.2	Generador a factor de potencia unitario (carga R); (valores experimentales)	58

2.16.3	Generador subexcitado (Carga RL); (valores experimentales)	59
2.17	Obtención de las curvas de capacidad del motor síncrono	61
2.17.1	Obtención de la curva de capacidad para una máquina síncrona real; (valores experimentales)	64
CAPÍTULO 3. Motor Síncrono		67
3.0	Introducción	67
3.1	Principios básicos de la operación de los motores síncronos	67
3.2	Circuito equivalente de un motor síncrono	68
3.3	Motores síncronos desde la perspectiva del campo magnético	70
3.4	Operación del motor síncrono en estado estacionario	71
3.5	Curva característica par-velocidad de los motores síncronos	71
3.6	Características nominales de equipos eléctricos	73
3.7	Efecto de los cambios de carga en los motores síncronos	74
3.8	Efecto de los cambios de carga; (valores experimentales)	75
3.9	Efecto de los cambios de corriente de campo en los motores síncronos	77
3.10	Efecto de los cambios de corriente de campo; (valores experimentales)	79
3.11	Curvas en V de la máquina síncrona	80
CAPÍTULO 4. Conclusiones, Observaciones y Trabajos Futuros		82
4.0	Conclusiones	82
4.0.1	Conclusiones Generales	82
4.0.2	Conclusiones Particulares	83
4.1	Observaciones de la sección (3.9 y 3.10)	83
4.2	Trabajos Futuros	84

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2-1. Diagrama esquemático y vista de corte transversal de un generador síncrono.	8
2-2. Sistema excitador sin escobillas típico.	9
2-3. Circuito simple de un generador síncrono.	11
2-4. Desarrollo de un modelo de la reacción del inducido.	12
2-5. El circuito equivalente completo de un generador síncrono trifásico.	15
2-6. El circuito equivalente de un generador conectado en a) Y y b) Δ .	16
2-7. Diagrama fasorial de un generador síncrono con un factor de potencia unitario.	17
2-8. Diagrama fasorial de un generador sincrónico con un factor de potencia a). En retraso y b) En adelanto.	18
2-9. a) Diagrama fasorial de un generador síncrono que opera con un factor de potencia en retraso. b) Diagrama de campo magnético correspondiente.	19
2-10. Diagrama fasorial simplificado, donde se ha despreciado la resistencia del inducido.	21
2-11. Obtención de la resistencia del rotor (R_r).	23
2-12. Obtención de la resistencia de armadura del generador síncrono.	24
2-13. Generador conectado a una carga.	27
2-14. Circuito eléctrico que representa la instalación de la figura 2-11.	27
2-15. Voltajes e impedancias de un generador trifásico y su carga conectada.	27
2-16. Circuito equivalente de un generador trifásico que muestra sólo una fase.	28
2-17. Curva de magnetización de un generador síncrono.	30
2-18. Efecto del incremento de carga capacitiva sobre un generador a factor de potencia constante en el voltaje en sus terminales.	31
2-19. Comportamiento del V_ϕ , para un incremento de carga.	33
2-20. Aumento de potencias para un incremento de carga.	33
2-21. Efecto del incremento de carga sobre un generador a factor de potencia unitario constante en el voltaje en sus terminales.	34

2-22.	Disminución del voltaje de fase, para un incremento en la carga resistiva.	35
2-23.	Incremento de potencias a un incremento de carga.	35
2-24.	Efecto del incremento de carga sobre un generador a factor de potencia atrasado constante en el voltaje en sus terminales.	36
2-25.	Caída de voltaje por fase de un generador síncrono, para un incremento de carga inductiva.	37
2-26.	Incremento de potencia real, reactiva y aparente; para un incremento de carga inductiva.	38
2-27.	Generador que se conecta en paralelo con un sistema de potencia en operación.	39
2-28.	a) Las dos secuencias de fase posibles en un sistema trifásico. b) Método de las tres lámparas para encontrar la secuencia de fase.	41
2-29.	a) Generador que flota en un bus infinito. b) Generador sobreexcitado en un bus infinito. c) Generador subexcitado en un bus infinito.	44
2-30.	a) Turbina que impulsa el generador. b) Diagrama fasorial que muestra el ángulo δ del par o momento de torsión.	45
2-31.	Diagrama fasorial, efecto del incremento en los puntos de ajuste del mecanismo regulador.	47
2-32.	Efecto del incremento en la corriente de campo del mecanismo regulador en el diagrama fasorial de la máquina.	48
2-33.	Flujo de potencia entre dos fuentes de voltaje.	52
2-34.	Generador síncrono conectado en paralelo con otra máquina del mismo tamaño.	53
2-35.	Generadores en paralelo alimentando una carga conexión estrella.	55
2-36.	Determinación de la curva de capacidad de un generador síncrono a) Diagrama fasorial del generador; b) sus unidades de potencia correspondiente.	61
2-37.	Curva de capacidad resultante de un generador síncrono	63
2-38.	Curva de capacidad de un generador síncrono real.	66
3-1.	Diagrama esquemático de un motor síncrono de dos polos	68

3-2.	a) Circuito equivalente trifásico de un motor síncrono, b) Circuito equivalente por fase.	69
3-3.	a) Diagrama fasorial de un motor síncrono, b) Diagrama de campo magnético correspondiente.	70
3-4.	Características par-velocidad de un motor síncrono.	72
3-5.	Conexión física de la máquina síncrona, con una carga en el eje (electrodinómetro)	73
3-6.	a) Diagrama fasorial de un motor que opera con un factor de potencia en adelanto; b) Efecto de incrementar la carga en la operación de un motor síncrono	74
3-7.	Diagrama fasorial del motor síncrono, efecto del incremento de la carga en su operación.	76
3-8.	a) Motor síncrono que opera en un factor de potencia en retraso, b) Efecto del incremento en la corriente de campo en la operación del motor.	78
3-9.	Efecto del incremento de carga, en la operación del motor.	80
3-10.	Curva en V del motor síncrono, operando con carga.	81
3-11.	Curva en V del motor síncrono, operando en vacío.	81

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
2-1. Resistencia del rotor para niveles de tensión diferentes.	23
2-2. Resistencia de armadura para diferentes niveles de tensión.	25
2-3. Comportamiento del voltaje inducido respecto a la corriente de campo.	30
2-4. Comportamiento de los parámetros del generador síncrono a un incremento en la carga capacitiva.	32
2-5. Comportamiento de los parámetros del generador síncrono para un incremento en la carga.	34
2-6. Comportamiento de los parámetros del generador síncrono, cuando se incrementa la carga.	37
2-7. Comportamiento de los parámetros del generador síncrono subexcitado.	49
2-8. Comportamiento de las variables del generador, para f.p.u.	50
2-9. Comportamiento de los parámetros del generador síncrono, para factor de potencia 0.8 adelantado.	50
2-10. Comportamiento de las variables del generador cuando se comporta como reactor capacitivo.	51
2-11. Reactor inductivo para niveles de potencia variables.	52
2-12. Comportamiento de los parámetros de G_1 y G_2 para carga RC; G_2 aumenta la potencia que suministra a la carga mientras que G_1 disminuye la potencia que entrega a la carga.	57
2-13. Comportamiento de los parámetros de G_1 y G_2 para carga puramente resistiva (R); G_2 aumenta la potencia que suministra a la carga mientras que G_1 disminuye la potencia que entrega a la carga.	59
2-14. Comportamiento de los parámetros de G_1 y G_2 para carga RL; G_2 aumenta la potencia que suministra a la carga mientras que G_1 disminuye la potencia que entrega a la carga.	60
3-1. Efecto de incremento de carga de un motor síncrono.	76
3-2. Efecto del incremento de la corriente de campo en la operación del motor con carga.	79
3-3. Efecto del incremento de la corriente de campo del motor cuando este opera en vacío.	79

SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

fem = fuerza electromotriz

cd = corriente directa

cc = corriente continua

P = potencia real

Q = potencia reactiva

S = potencia aparente

P_{ϕ} = potencia real por fase

Q_{ϕ} = potencia reactiva por fase

S_{ϕ} = potencia aparente por fase

S = potencia aparente

$P_{3\phi}$ = potencia real trifásica

$Q_{3\phi}$ = potencia reactiva trifásica

$S_{3\phi}$ = potencia aparente trifásica

kVA = kilo voltamperes

Polos N y S = polos norte y sur

f = frecuencia

Hz = hertz

W = watts

VA = voltamperes

VAR = voltamperes reactivos

A = amperes

p = número de polos en el rotor

n = velocidad del rotor (r/min)

Y = conexión estrella

Δ = conexión delta

I = corriente en amperes (A)

V = voltaje en volts

R = resistencia en ohms (Ω)

kV = kilovoltios

MVA = mega voltamperes = 1×10^6 voltamperes

m = metros

ca = corriente alterna

I_c = corriente directa de control

kg = kilogramo

m^2 = metro cuadrado

E_o = voltaje inducido

V_ϕ = voltaje de fase

R_a = resistencia de armadura

X_s = reactancia síncrona

I_a = corriente de armadura

L_f = autoinductancia del rotor

E_{estat} = voltaje producido por el campo magnético del estator.

$E_{o,máx}$ = voltaje inducido máximo

B_{net} = campo magnético neto

L_a = autoinductancia del estator

X_a = reactancia de armadura

R_{ajus} = resistor ajustable

R_f = resistencia de campo = R_r

V_T = voltaje en terminales

ω = velocidad (r/min)

ϕ = flujo

τ_{ap} = par aplicado

τ_{ind} = par inducido

P_{entr} = potencia mecánica de entrada

ω_{sinc} = velocidad síncrona

γ = ángulo entre E_o e I_a

P_{sal} = potencia eléctrica de salida

I_L = corriente de línea.

Q_{sal} = potencia reactiva de salida

δ = ángulo de par de la máquina

$P_{máx}$ = potencia máxima

kW = kilowatts

MW = Megawatts

r/min = revoluciones por minuto.

hp = horse power (caballos de fuerza)

I_f = corriente de campo

B_r = campo magnético del rotor

B_s = campo magnético del estator

V_{cd} = voltaje de cd

ρ = resistividad

l = longitud

A = área de la sección transversal

L = inductancia

C = capacitancia

Z = impedancia

I_{sc} = corriente de cortocircuito

Ω = ohm

fp = factor de potencia

G_1 = generador 1

G_2 = generador 2

E = voltaje de fase

cons = consume

entr = entrega

atras = atrasado

adel = adelantado

f.p.u = factor de potencia unitario

f_{sis} = frecuencia del sistema

R_{ajus} = resistencia ajustable = resistencia variable

CAPÍTULO 1

1.0 Introducción

Las Máquinas Síncronas son máquinas de corriente alterna y están entre los tres tipos más comunes de máquinas eléctricas; se llaman así porque trabajan a velocidad constante y frecuencia constante en condiciones de operación estacionarias; pueden ser monofásicas o trifásicas, especialmente en aplicaciones de potencia; como la mayoría de las máquinas giratorias, una máquina síncrona es capaz de trabajar como motor o generador e incluso como reactor o como condensador.

La operación de un generador síncrono o alternador se basa en la ley de Faraday de inducción electromagnética y un generador síncrono trabaja de manera muy semejante a un generador de corriente continua, en el que la generación de fuerza electromotriz (fem) se logra por medio del movimiento relativo de entre conductores y un flujo magnético. Al colocar una espira dentro de un campo magnético y hacerlo girar, sus lados cortarían las líneas de fuerzas de campo, induciéndose entonces una fem que se puede verificar entre los extremos del conductor de forma de espira. Se comprueba que la fem es alterna. Las dos partes básicas de una máquina síncrona son la estructura del campo magnético, que lleva un devanado excitado por corriente continua y la armadura. La armadura tiene con frecuencia un devanado trifásico en el que se genera la fem de corriente alterna. Casi todas las máquinas síncronas modernas tienen armaduras estacionarias y estructuras de campo giratorias. El devanado de corriente continua sobre la estructura giratoria del campo se conecta a una fuente externa por medio de anillos deslizantes y escobillas. Algunas estructuras de campo no tienen escobillas, sino que tienen excitación sin escobillas por medio de diodos giratorios. En algunos aspectos, el estator que lleva los devanados de armadura es semejante al estator de un motor de inducción polifásico.

Los modos de operación, son situaciones en las que la máquina síncrona opera ante condiciones de carga diferentes (factores de potencia: atrasado, adelantado y unitario).

1.1 Antecedentes

Actualmente en algunas escuelas y universidades del país y del mundo, a los estudiantes de nivel licenciatura se les imparte solamente la teoría del estudio y análisis de las máquinas eléctricas lo que su preparación profesional es incompleta y deficiente.

El laboratorio de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), cuenta con las máquinas y los instrumentos para realizar las mediciones y observar el comportamiento real de la máquina en cuestión. Aún

cuando se cuenta con el equipo para realizar la parte práctica, no se tiene un registro de las pruebas físicas aplicables a la máquina síncrona. Aunado a esto, se ve la necesidad de hacer un documental de los valores reales obtenidos en el laboratorio que ayude a los estudiantes a relacionar la teoría con la práctica; no obstante, predecir y analizar los comportamientos reales de la máquina antes de llevarla a práctica, le servirá de gran ayuda al interesado a lograr la experiencia educativa de forma satisfactoria.

1.2 Objetivos

- Con este material, los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, conocerán los principios básicos de las máquinas en estudio; analizarán cualitativa y cuantitativamente su funcionamiento apoyándose en los fenómenos físicos que lo justifiquen. Lo anterior deberá permitirle hacer su selección y aplicación adecuada, ponerlas en marcha y predecir su comportamiento ante diferentes circunstancias.
- Que los alumnos y a los lectores en general conozcan la estructura de la máquina síncrona con sus variantes y auxiliares, interpretar las fórmulas y diagramas de operación así como también el significado de los parámetros que se obtendrán de forma experimental.
- Los estudiantes tendrán la oportunidad de analizar las características reales del comportamiento y condiciones de estabilidad de la máquina síncrona bajo condiciones diferentes de carga y excitación.
- Los amantes de Ingeniería Eléctrica analizarán y evaluarán el comportamiento de la máquina síncrona bajo diferentes condiciones de carga y excitación, así como el uso de reactores síncronos para la corrección del factor de potencia. Parámetros como estos son los de interés análisis en plantas de generación de energía eléctrica.

1.3 Objetivos particulares

- Todos los experimentos se presentan con el propósito de estimular el interés y la autodirección, la solución de problemas y la asociación de ideas. El sincero deseo del autor es que el lector tenga éxito inmediato y logre la experiencia educativa de forma satisfactoria. Los estudios que aquí se inician pueden ser el principio de una investigación provechosa en la ciencia.
- De los mayores méritos de este trabajo, estriba en la importancia dada a la demostración práctica de las teorías analizadas en los cursos de máquinas. El método a seguir es puramente experimental y directo.

1.4 Justificación

En la ciencia y en la vida misma, la práctica es de suma importancia para desenvolverse en la sociedad; el caso de las máquinas eléctricas es de vital importancia conocerlas ya que del conocimiento y la experiencia puede ser la diferencia entre hacer o no hacer competencia en el mercado laboral. Por ello se requiere fortalecer a las instituciones educativas a través de herramientas estratégicas como la demostración práctica de las teorías vistas en clase, para que con responsabilidad, se realice una mejor preparación de los estudiantes.

Es de mucha importancia considerar que el estudiante de la facultad de Ingeniería eléctrica debe adquirir una combinación adecuada de conocimientos teóricos con la práctica, para lograr de forma efectiva el propósito de su preparación. Deben reconocerse los alcances y limitaciones de la educación en las diferentes corrientes o escuelas del conocimiento, para lograr que los profesionistas de Ingeniería, apliquen sus actividades analíticas y así poder ofrecer un servicio adecuado en el ámbito empresarial.

El problema del desempleo en México y el Tratado de Libre Comercio en América del Norte (TLCAN), exige cada vez más profesionistas mejor preparados para ser más competentes ante profesionistas extranjeros y una incorporación rápida en el mercado laboral nacional e internacional.

1.5 Metodología

La metodología a seguir en este trabajo es la de investigar y documentar la información que se tiene sobre las máquinas síncronas, esta información en su mayoría se obtuvieron en libros de máquinas eléctricas. Después de comprender estos conceptos se procede a realizar las pruebas físicas a la máquina y hacer las mediciones necesarias para el análisis del comportamiento de los parámetros de la misma. Los parámetros deben de comportarse como en la teoría se establece, al menos se espera algo idéntico debido a que en la práctica es inevitable descartar los errores de cualquier naturaleza.

Cuando no se comporta exactamente como se espera, la explicación de su causa y motivo se dará en el momento; Otra de las razones por las cuales se presentan los cambios pequeños no esperados, se debe a que en los libros de texto descartan ciertos efectos presentes en el sistema y estos se manifiestan cuando se le hacen las pruebas físicas pertinentes a la máquina.

1.6 Organización de la tesis

Esta tesis está integrada por 4 capítulos, desarrollados de la forma siguiente:

CAPÍTULO 1. En este capítulo se pretende dar una introducción, explicar la importancia y el objetivo del trabajo.

CAPÍTULO 2. Aquí se desarrollará los modos de operación de la máquina síncrona como generador, así como también la obtención de los parámetros tales como: R_r , R_a , X_s , etc.

CAPÍTULO 3. Se presenta algo similar al capítulo 2, la diferencia es que en el capítulo 3, se desarrolla los modos de operación de la máquina pero como motor.

CAPÍTULO 4. Este es el último capítulo de la tesis, de modo que el autor presenta aquí las conclusiones y el trabajo futuro a realizarse.

CAPITULO 2

Generador Síncrono

2.0 Introducción

Los generadores síncronos trifásicos son la fuente principal de toda la energía eléctrica que se consume. Estas máquinas son los convertidores de energía más grandes del mundo. Convierten energía mecánica en energía eléctrica, en potencias de hasta 1500 MW [1]. En este capítulo se estudiarán: la construcción, las características y el comportamiento de estos modernos generadores ante diferentes circunstancias. Se obtendrán de forma experimental, basándose en los principios elementales de los generadores trifásicos.

2.1 Generadores síncronos comerciales

Los generadores síncronos comerciales se construyen con un campo magnético de cd estacionario o con uno rotatorio.

Un generador síncrono de *campo estacionario* tiene la misma apariencia externa que un generador de cd. Los polos salientes crean el campo de cd, el cual es cortado por una armadura rotatoria. La armadura posee un devanado trifásico cuyas terminales están conectadas a tres anillos colectores montados en el eje. Un juego de escobillas que se deslizan sobre los anillos colectores permite conectar la armadura a una carga trifásica externa. La armadura es impulsada por un motor de gasolina o alguna otra fuente de potencia motriz. Conforme gira, se induce un voltaje trifásico, cuyo valor depende de la velocidad de rotación y de la corriente directa de excitación en los polos estacionarios. La frecuencia del voltaje depende de la velocidad y del número de polos en el campo. Se utilizan generadores de campo estacionario cuando la salida de potencia es menos de 5 kVA [1]. Sin embargo, para una salida más grande, es más barato, más seguro y más práctico emplear un campo rotatorio de cd.

Un generador síncrono de *campo rotatorio* tiene una armadura estacionaria llamada estator. El devanado trifásico del estator está conectado directamente a la carga, sin pasar por grandes y poco confiables anillos colectores y escobillas. Un estator estacionario también facilita el aislamiento de los devanados porque no están sujetos a fuerzas centrífugas. El campo es excitado por un generador de cd, casi siempre montado en el mismo eje. Las escobillas que están en el conmutador se tienen que conectar a otro juego de escobillas montado sobre anillos colectores para alimentar la corriente directa I_f al campo rotatorio.

2.2 Número de polos

El número de polos en un generador síncrono depende de la velocidad de rotación y de la frecuencia que deseamos producir. Considere, por ejemplo, el conductor de un estator que es barrido sucesivamente por los polos N y S del rotor. Si se induce un voltaje positivo cuando un polo N pasa frente al conductor, se induce un voltaje negativo similar cuando el polo S hace lo mismo. Por lo tanto, cada vez que un par completo de polos cruza el conductor, el voltaje inducido realiza un ciclo completo. Esto es cierto para cada dos conductores del estator; por consiguiente, podemos deducir que la frecuencia del alternador es

$$f = \frac{pn}{120} \quad (2.1)$$

Donde

f = frecuencia del voltaje inducido (Hz)

p = número de polos en el rotor

n = velocidad del rotor (r/min)

2.3 Características principales del estator

Desde un punto de vista eléctrico, el estator de un generador síncrono es idéntico al de un motor de inducción trifásico. Se compone de un núcleo cilíndrico laminado que contiene un conjunto de ranuras que portan un devanado trifásico imbricado. El devanado siempre está conectado en estrella (Y) y el neutro está conectado a tierra. Se prefiere una conexión en (Y) a una delta (Δ) porque:

1. El voltaje por fase es de sólo $1/\sqrt{3}$ o 58% del voltaje entre líneas. Esto significa que el voltaje más alto entre un conductor del estator y el núcleo de éste conectado a tierra es de sólo el 58% del voltaje de línea. Por consiguiente, podemos reducir la cantidad de aislante en las ranuras, lo que, a su vez, permite incrementar el diámetro de los conductores. Un conductor más grande permite incrementar la corriente y, por ende, la salida de potencia de la máquina.
2. Cuando un generador síncrono está sometido a carga, el voltaje inducido en cada fase se distorsiona y la forma de onda deja de ser sinusoidal. La distorsión se debe principalmente a un indeseado voltaje de tercer armónico cuya frecuencia es tres veces la frecuencia fundamental. Con una conexión en (Y), los armónicos de línea a neutro distorsionantes no aparecen entre las líneas porque se cancelan entre sí. Por consiguiente, los voltajes de línea permanecen sinusoidales en todas las condiciones de carga. Desafortunadamente, cuando se utiliza una conexión delta, los voltajes armónicos no se cancelan, sino que se acumulan.

Como la conexión Δ es cerrada, producen una corriente circulante de tercer armónico, la cual incrementa las pérdidas eléctricas I^2R .

El voltaje de línea nominal de un generador síncrono depende de su capacidad de kVA. En general, mientras más grande es la capacidad de potencia, más alto es el voltaje. Sin embargo, el voltaje nominal entre líneas rara vez excede los 25 kV [1] porque el aislamiento incrementado en las ranuras ocupa un valioso espacio a expensas de los conductores de cobre.

2.4 Características principales del rotor

Los generadores síncronos se construyen con dos tipos de rotores: rotores de polos salientes y rotores cilíndricos lisos. Por lo general, los de polos salientes son impulsados por turbinas hidráulicas de baja velocidad, y los cilíndricos, por turbinas de vapor de alta velocidad.

1. **Rotores de polos salientes.** La mayoría de las turbinas hidráulicas tienen que girar a bajas velocidades (entre 50 y 300 r/min) para extraer la máxima potencia de una cascada. Como el rotor está directamente acoplado a la rueda hidráulica, y como se requiere una frecuencia de 50 a 60 Hz, se necesita un gran número de polos en el rotor. Los rotores de baja velocidad siempre tienen un gran diámetro, a fin de proporcionar el espacio necesario para los polos. Los polos salientes están montados en un gran armazón circular de acero, el cual está fijo en un eje vertical rotatorio. Para garantizar un buen enfriamiento, las bobinas de campo están hechas de barras de cobre desnudo, con las vueltas aisladas entre sí por tiras de mica. Las bobinas están conectadas en serie, con polos adyacentes de polaridades opuestas.

Además del devanado de campo de cd, con frecuencia se agrega un devanado de jaula de ardilla, insertado en las caras polares. En condiciones normales, este devanado no transporta corriente porque el rotor gira a velocidad síncrona. Sin embargo, cuando la carga en el generador cambia de repente, la velocidad del rotor comienza a fluctuar y se producen variaciones de velocidad momentáneas por encima y por debajo de la velocidad síncrona. Esto induce un voltaje en el devanado de jaula de ardilla que hace que fluya una gran corriente adentro de él. La corriente reacciona con el campo magnético del estator y produce fuerzas que amortigua las oscilaciones del rotor. Por esta razón, el devanado de jaula de ardilla también se conoce como *devanado amortiguador*.

El devanado amortiguador también tiende a mantener equilibrados los voltajes trifásicos entre las líneas, aún cuando las corrientes sean desiguales debido a las condiciones de carga desequilibrada.

2. **Rotores cilíndricos.** Es bien sabido que las turbinas de vapor de alta velocidad son más pequeñas y más eficientes que las de baja velocidad. Lo mismo sucede con los generadores síncronos de alta velocidad. Sin embargo, para generar la frecuencia requerida no podemos utilizar menos de dos polos y esto fija la velocidad más alta

posible. En un sistema de 60 Hz es de 3600 r/min. La siguiente velocidad más baja es de 1800 r/min, que corresponde a una máquina de 4 polos. Por consiguiente, estos generadores de turbina de vapor poseen ya sea 2 o 4 polos [1].

El rotor de un generador de turbina es un cilindro largo y sólido de acero que contiene una serie de ranuras longitudinales fresadas en la masa cilíndrica. Se utilizan bobinas de campo concéntricas, firmemente insertadas en las ranuras y retenidas por anillos extremos de alta resistencia, para crear los polos N y S.

La alta velocidad de rotación produce grandes fuerzas centrífugas, las cuales imponen un límite máximo en el diámetro del rotor. En el caso de un rotor que gira a 3600 r/min, el límite elástico del acero requiere que el fabricante limite el diámetro a un máximo de 1.2 m. Por otra parte, para construir los poderosos generadores de 1000 MVA a 1500 MVA, el volumen de los rotores tiene que ser grande. En consecuencia, los rotores de alta potencia y alta velocidad tienen que ser muy largos.

2.5 Excitación de campo y excitadores

La excitación de campo de cd de un gran generador síncrono es una parte importante de su diseño global. La razón es que el campo debe garantizar no sólo un voltaje terminal de ca estable, sino que también debe responder a cambios repentinos de carga para mantener la estabilidad del sistema. La prontitud de respuesta es una de las características de la excitación de campo. Para lograrla, se utilizan dos generadores de cd: *un excitador principal* y *un excitador piloto*. También se emplean excitadores estáticos sin partes rotatorias.

El excitador principal alimenta la corriente de excitación al campo del generador síncrono por medio de escobillas y anillos colectores. En condiciones normales, el voltaje del excitador queda entre 125 y 600 V. Es regulado manual o automáticamente por señales de control que varían la corriente I_c , producida por el excitador piloto (Figura 2.1).

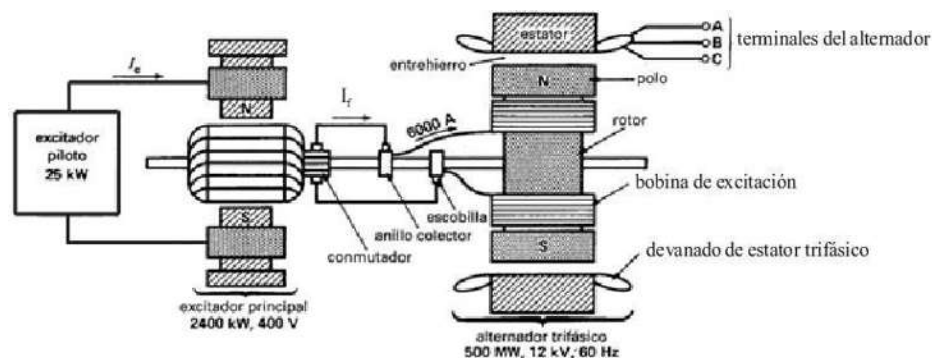


FIGURA 2-1. Diagrama esquemático y vista de corte transversal de un generador síncrono de 500 MW típico y su excitación de cd de 2400 kW. La corriente directa de excitación I_f (600 A) fluye por el conmutador y por dos anillos colectores. La corriente directa de control I_c del excitador piloto permite controlar el campo variable del excitador principal el que, a su vez, controla a I_f .

La capacidad de potencia del excitador principal depende de la capacidad del generador síncrono. Por lo general, se requiere un excitador de 25 kW para excitar un alternador de 1000 kVA (2.5 % de su capacidad), mientras que un excitador de 2500 kW es suficiente para un alternador de 500 MW (sólo 0.5% de su capacidad) [1].

En condiciones normales, la excitación varía automáticamente. Responde los cambios de carga con el objeto de mantener un voltaje de línea de ca constante o para controlar la potencia reactiva suministrada al sistema de servicio eléctrico. Una perturbación seria en el sistema puede producir una caída de voltaje repentina a través de las terminales del alternador. Entonces el excitador debe reaccionar con rapidez para evitar que el voltaje de ca disminuya. Por ejemplo, el voltaje excitador tiene que elevarse al doble de su valor normal en sólo 300 o 400 milisegundos [1]. Ésta es una respuesta muy rápida, considerando que la potencia del excitador puede ser de varios miles de kilowatts.

2.6 Excitación sin escobillas

Debido al desgaste de las escobillas y al polvo de carbón, constantemente se tienen que limpiar, reparar y reemplazar las escobillas, los anillos colectores y los conmutadores en sistemas de excitación de cd convencionales. Para eliminar el problema, se han desarrollado *sistemas de excitación sin escobillas*. Estos sistemas se componen de un generador de campo estacionario trifásico cuya salida de ca es rectificada por un grupo de rectificadores. La salida de cd de los rectificadores es alimentada directamente al campo del generador síncrono (Figura 2.2).

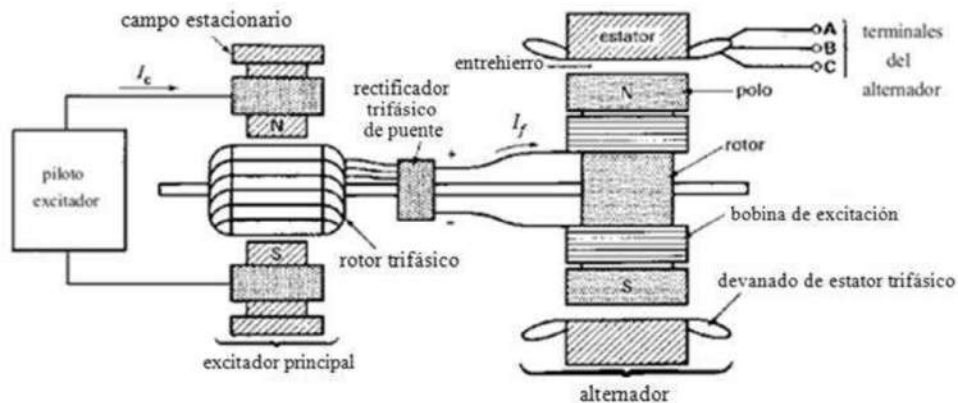


FIGURA 2-2. Sistema excitador sin escobillas típico.

La armadura de un excitador de ca y los rectificadores están montados en el eje principal y giran junto con el generador síncrono. Al comparar el sistema de excitación de la figura 2-2 con el de la figura 2-1, se puede ver que son idénticos, excepto que el rectificador trifásico reemplaza el conmutador, los anillos colectores y las escobillas. En otras palabras,

el conmutador (que en realidad es un rectificador mecánico) es reemplazado por un rectificador electrónico. El resultado es que las escobillas y los anillos colectores ya no son necesarios.

La corriente directa de control I_c del piloto excitador regula la salida del excitador principal I_f , como en el caso de un excitador de cd convencional. Por lo general, la frecuencia del excitador principal es de dos a tres veces la frecuencia del generador síncrono (60 Hz). El incremento de la frecuencia se obtiene utilizando más polos en el excitador que en el generador síncrono.

2.7 Factores que afectan el tamaño de los generadores síncronos

La prodigiosa cantidad de energía generada por las compañías eléctricas ha hecho de que éstas estén muy conscientes de la eficiencia de sus generadores. Por ejemplo, si la eficiencia de estación generadora de 1000 MW mejora en solo 1 %, representa ingresos extra de varios miles de dólares al día. A este respecto, el tamaño del generador es particularmente importante porque su eficiencia mejora automáticamente conforme se incrementa la potencia. Por ejemplo, si un pequeño generador síncrono de 1 kilowatt tiene una eficiencia de 50%, un modelo más grande pero similar de 10 MW de capacidad inevitablemente tiene una capacidad de casi 90%. Esta mejora de la eficiencia con el tamaño es la razón por la cual los generadores síncronos de 1000 MW y más poseen eficiencias del orden de 99% [1].

Otra ventaja de las máquinas grandes es que la salida de potencia por kilogramo se incrementa a medida que se incrementa la potencia. Por ejemplo, si un generador de 1 kW pesa 20 kg (y produce 1000 W/20 kg = 50 W/kg), uno de 10 MW de construcción similar pesará solo 20 000 kg y producirá 500 W/kg. Desde el punto de vista de potencia, las grandes máquinas pesan relativamente menos que las pequeñas, así que son más baratas [1].

Por ende, todo favorece a las grandes máquinas. No obstante, conforme se incrementa su tamaño, se presentan serios problemas de enfriamiento. De hecho, las máquinas grandes producen inherentemente pérdidas de potencia por unidad de área (W/m^2). En consecuencia, tienden a sobrecalentarse. Para evitar una elevación de temperatura inaceptable, debemos diseñar sistemas de enfriamiento eficientes cada vez más elaborados conforme se incrementa la potencia. Por ejemplo, un sistema de circulación de aire frío es adecuado para enfriar generadores síncronos de menos de 50 MW, pero entre 50 W y 300 MW tenemos que recurrir a enfriamiento por medio de hidrógeno. Los generadores muy grandes, en el rango de 1000 MW, tienen que estar equipados con conductores huecos enfriados por agua. Por último, se llega en un punto donde el costo incrementado del enfriamiento excede los ahorros obtenidos en otros rubros, lo cual fija el límite máximo del tamaño [1].

Para resumir, la evolución de los alternadores grandes ha sido determinada principalmente por la evolución de sofisticadas técnicas de enfriamiento. Otros avances tecnológicos, como mejores materiales y devanados novedosos, también han desempeñado un papel importante en la modificación del diseño de las primeras máquinas.

Por lo que se refiere a la velocidad, los generadores de baja velocidad siempre son más grandes que las máquinas de alta velocidad de igual potencia. La magnitud de la baja velocidad simplifica el problema de enfriamiento; un buen sistema de enfriamiento, completado con un intercambiador de calor, suele ser suficiente. Por ejemplo, los grandes generadores síncronos de 500 MVA y 200 r/min de baja velocidad instalados en una planta hidroeléctrica típica son enfriados por aire mientras que las unidades de 500 MVA y 1800 r/min mucho más pequeñas de alta velocidad instaladas en una planta de vapor tienen que ser enfriada por hidrógeno [1].

2.8 Circuito equivalente de un generador síncrono

El voltaje E_o es el voltaje interno producido en una fase de un generador síncrono como se muestra en la figura 2-3. Sin embargo, este voltaje E_o no es normalmente el voltaje que se presenta en los terminales del generador. De hecho, el único momento en que el voltaje interno E_o es igual al voltaje de salida V_ϕ de una fase es cuando no fluye corriente de armadura en la máquina.

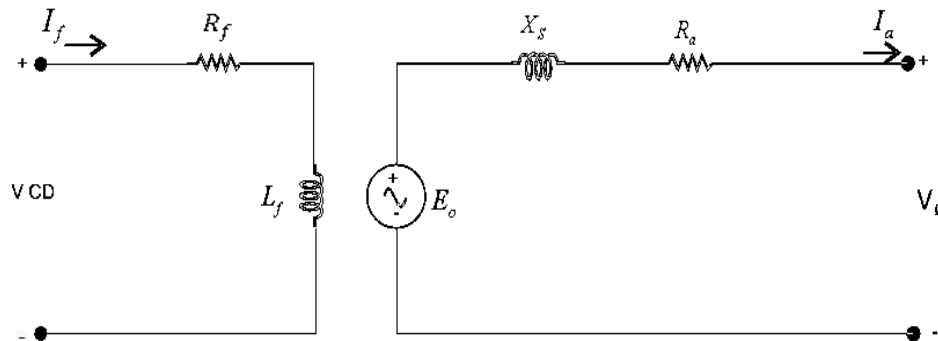


FIGURA 2-3. Circuito simple de un generador síncrono.

¿Porqué el voltaje de salida V_ϕ de una fase no es igual a E_o y cuál es la relación entre estos dos voltajes? La respuesta a esta pregunta lleva al modelo de un generador síncrono.

Hay varios factores que ocasionan la diferencia que hay entre E_o y V_ϕ :

1. La distorsión del campo magnético del entrehierro debida a la corriente que fluye en el estator, llamada *reacción de inducido*.
2. La autoinductancia de las bobinas del inducido (o armadura).
3. La resistencia de las bobinas del inducido.

4. El efecto de la forma del rotor de polos salientes.

Se estudiarán los efectos de los primeros tres factores y se desarrollará un modelo de la máquina a partir de ellos. En este capítulo se despreciarán los efectos de la forma de los polos salientes en la operación de una máquina síncrona; en otras palabras, se supone que todas las máquinas que se analizan en este capítulo, tienen rotores de polos no salientes o cilíndricos. Partiendo de este supuesto, las respuestas que se obtengan serán un poco inexactas si la máquina tiene rotores de polos salientes, pero los errores son relativamente pequeños.

El primer efecto mencionado, y normalmente el más grande, es la reacción del inducido. Cuando gira el rotor de un generador síncrono, se induce un voltaje E_o en los devanados del estator del generador. Si se añade una carga a los terminales del generador, la corriente fluye. Pero el flujo de corriente de un estator trifásico produce su propio campo magnético en la máquina. Este campo magnético del estator distorsiona el campo magnético original del rotor y altera el voltaje de fase resultante. A este efecto se le llama *reacción del inducido* porque la corriente del inducido (estator) afecta el campo magnético que lo produjo en primera instancia.

Para entender la reacción del inducido, remítase a la figura 2-4. La figura 2-4a muestra un rotor bipolar girando dentro de un estator trifásico. No hay ninguna carga conectada al estator. El campo magnético del rotor B_r produce un voltaje interno generado E_o cuyo valor pico coincide con la dirección de B_r . Si el generador no tiene carga, no hay flujo de corriente en el inducido y, por lo tanto, E_o será igual al voltaje de fase V_ϕ .

Ahora supóngase que el generador se conecta a una carga con un factor de potencia en retraso. Debido a que la carga está en retraso, la corriente pico se presentará en un ángulo detrás del voltaje pico. En la figura 2-4b se presenta este efecto.

La corriente que fluye en los devanados del estator produce su propio campo magnético. A este campo magnético del estator se llama B_s y su dirección se obtiene por medio de la regla de la mano derecha como se observa en la figura 2-4c. El campo magnético del estator B_s produce su propio voltaje en el estator y a este voltaje se le llama E_{estat} en la figura.

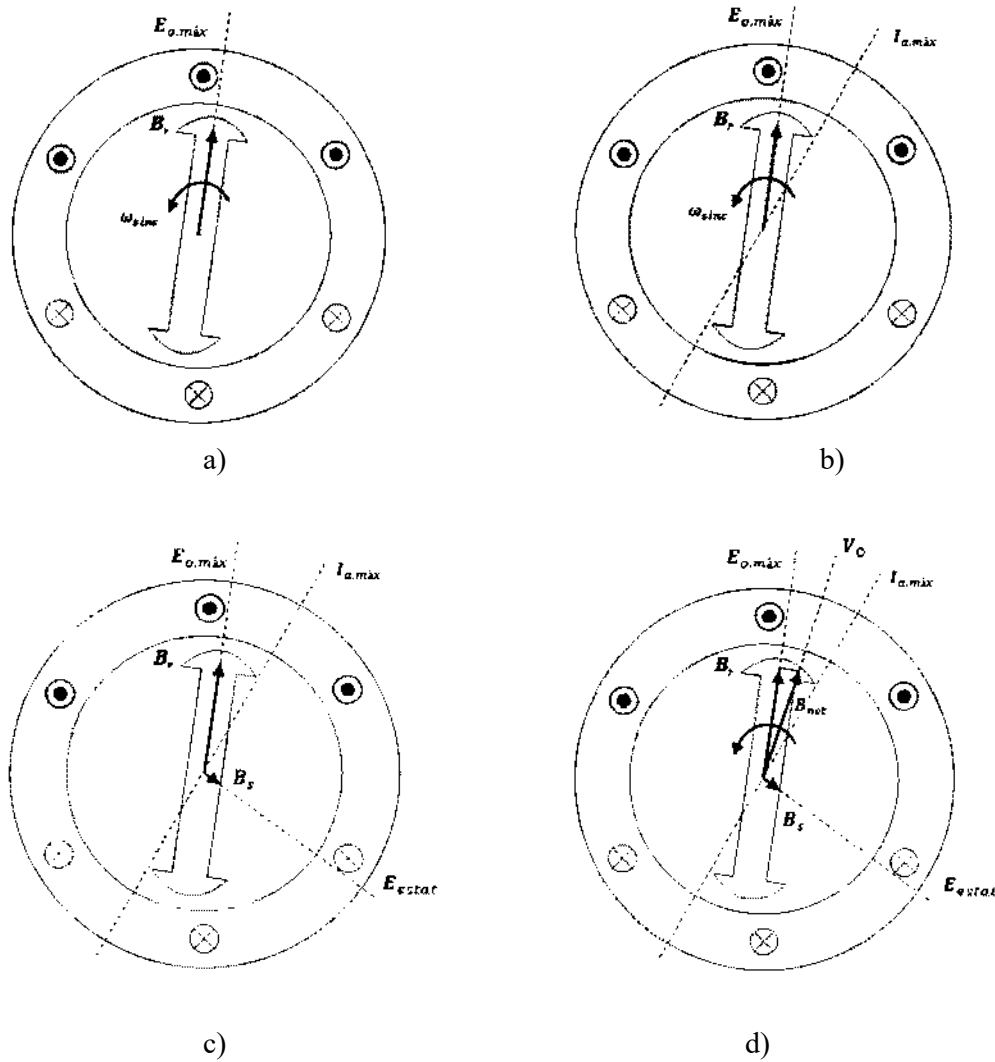


FIGURA 2-4. Desarrollo de un modelo de la reacción del inducido: a) Un campo magnético giratorio produce el voltaje interno generado E_o . b) El voltaje resultante produce un *flujo de corriente* en retraso cuando se conecta a una carga en retraso. c) La corriente en el estator produce su propio campo magnético B_s , que produce su propio voltaje E_{estat} en los devanados del estator de la máquina. d) El campo magnético B_s se suma a B_r y se transforma en B_{net} . El voltaje E_{estat} se suma a E_o y produce V_ϕ en la salida de la fase.

Con dos voltajes presentes en los devanados del estator, el voltaje total en una fase es simplemente la *suma* del voltaje interno generado E_o más el voltaje de reacción del inducido E_{estat} .

$$V_\phi = E_o + E_{estat} \quad (2-2)$$

El campo magnético neto B_{net} es simplemente la suma de los campos magnéticos del rotor y del estator:

$$B_{net} = B_r + B_s \quad (2-3)$$

Debido a que los ángulos de E_o y B_r son iguales y los ángulos de E_{estat} y B_s también son iguales, el campo magnético resultante B_{net} coincidirá con el voltaje neto V_ϕ . Los voltajes y corrientes resultantes como se muestra en la figura 2-4d.

¿Cómo se pueden modelar los efectos de la reacción del inducido en el voltaje de fase? Primero, nótese que el voltaje E_{estat} tiene un ángulo de 90° atrás del plano de corriente máxima I_a . Segundo, el voltaje E_{estat} es directamente proporcional a la corriente I_a . Si X es una constante de proporcionalidad, entonces *el voltaje de reacción del inducido se puede expresar como*

$$E_{estat} = -jXI_a \quad (2-4)$$

Por lo tanto, el voltaje en una fase es

$$V_\phi = E_o - jX_s I_a \quad (2-5)$$

Obsérvese el circuito que se muestra en la figura 2-3. La ecuación de la ley de voltaje de Kirchhoff para este circuito es

$$V_\phi = E_o - jXI_a \quad (2-6)$$

Ésta es exactamente la misma ecuación que la que describe el voltaje de reacción del inducido. Por lo tanto, se puede modelar el voltaje de reacción del inducido como un inductor en serie con un voltaje interno generado.

Además de los efectos de la reacción del inducido, las bobinas del estator tienen una autoinductancia y una resistencia. Si se llama L_a a la autoinductancia del estator (y se llama X_a a su reactancia correspondiente), mientras que a la resistencia del estator se le llama R_a , entonces la diferencia total entre E_o y V_ϕ está dada por

$$V_\phi = E_o - jXI_a - jX_a I_a - R_a I_a \quad (2-7)$$

Tanto los efectos de la reacción del inducido como la autoinductancia en la máquina se representan por medio de reactancias y se acostumbra combinarlas en una sola llamada *reactancia síncrona* de la máquina:

$$X_s = X + X_a \quad (2-8)$$

Por lo tanto, la ecuación final que describe V_ϕ es

$$\boxed{V_\phi = E_o - jX_s I_a - R_a I_a} \quad (2-9)$$

Ahora es posible dibujar el circuito equivalente de un generador síncrono trifásico. En la figura 2-5 se puede apreciar el circuito equivalente completo de un generador de este tipo.

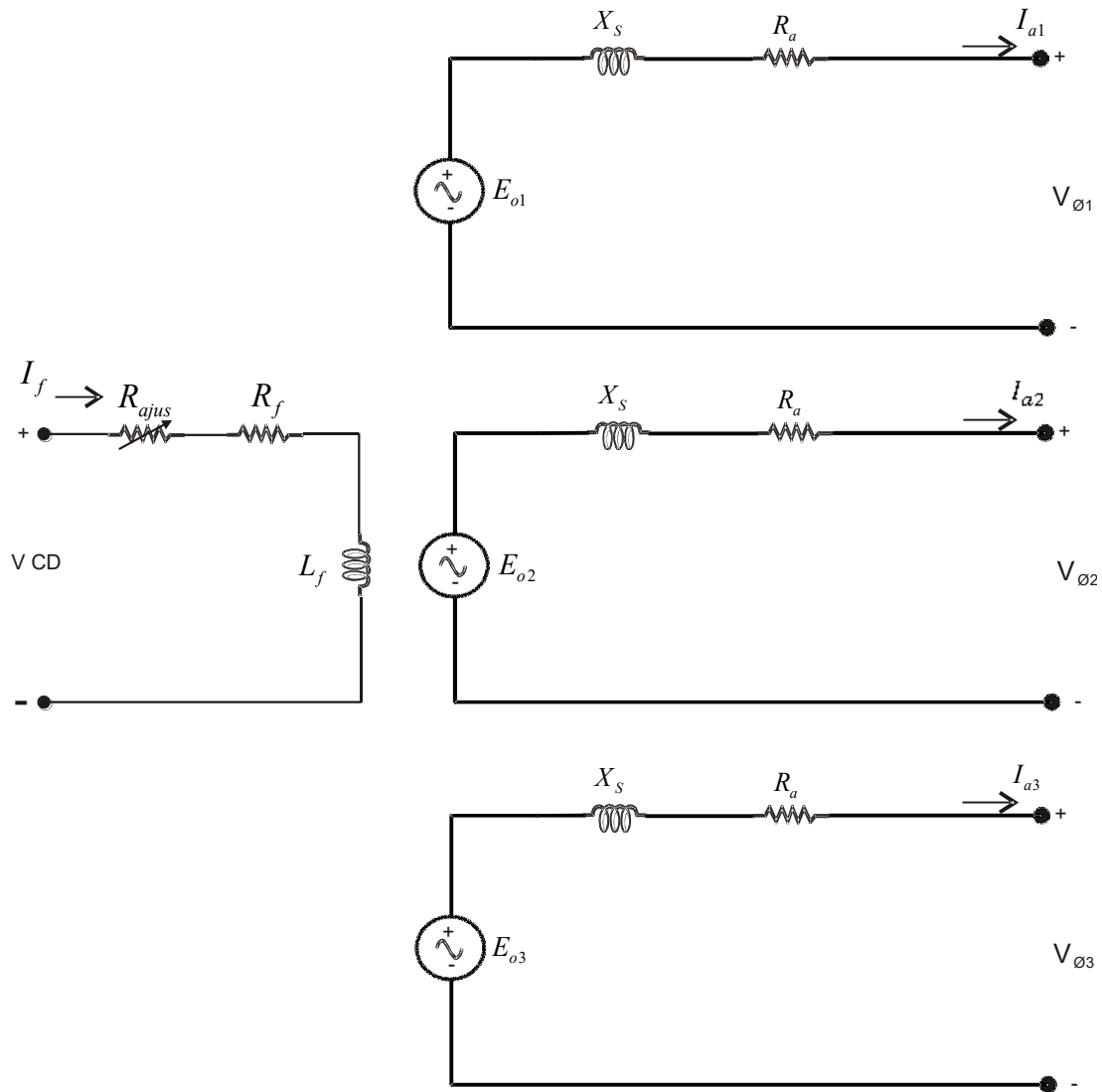


FIGURA 2-5. El circuito equivalente completo de un generador síncrono trifásico.

Esta figura muestra una fuente de potencia de cd que suministra potencia al circuito de campo del rotor, que se modela por medio de la inductancia y resistencia en serie de la bobina. Un resistor ajustable R_{ajus} está conectado en serie con R_f y este resistor controla el flujo de corriente de campo. El resto del circuito equivalente se muestra en la figura 2-6 que consta de los modelos de cada fase. Cada fase tiene un voltaje interno generado con una inductancia en serie X_s (que consta de la suma de la reactancia del inducido y la autoinductancia de la bobina) y una resistencia en serie R_a . Los voltajes y corrientes de las tres fases están separados por 120° , pero en todo lo demás son idénticos.

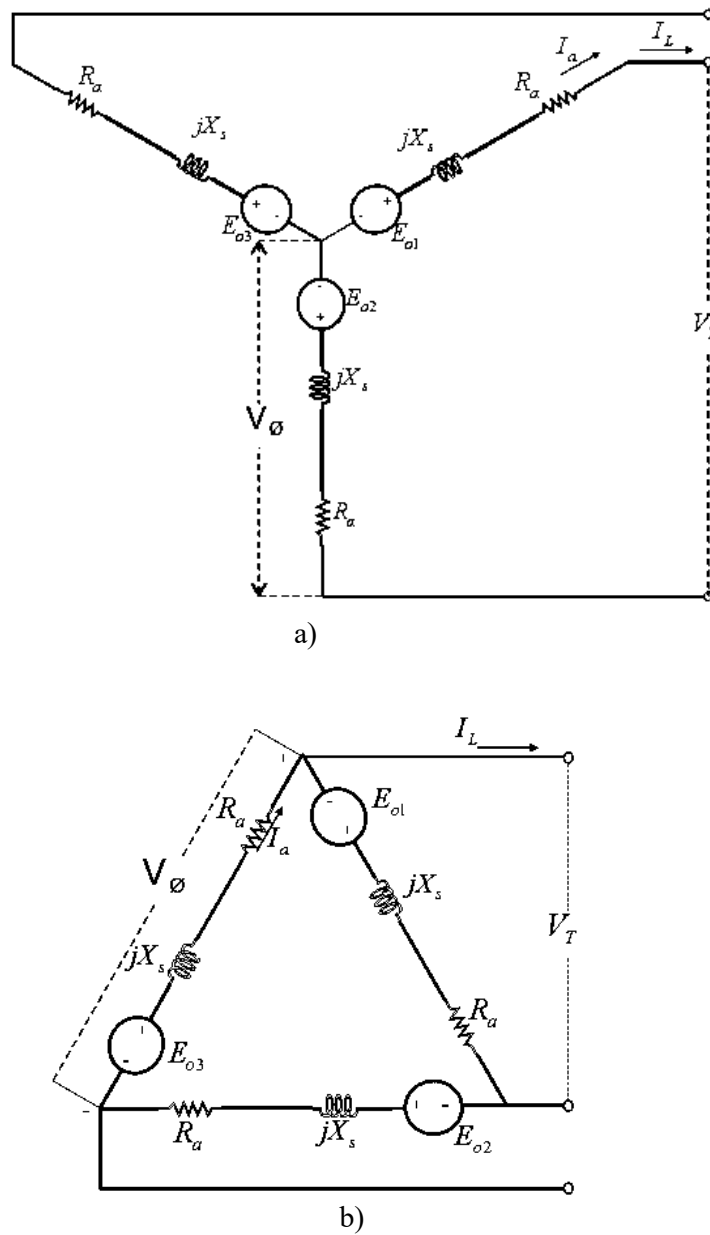


FIGURA 2-6. El circuito equivalente de un generador conectado en a) Y y b) Δ .

Como se muestra en la figura 2-6, estas tres fases se pueden conectar en **Y** o en Δ . Si se conectan en **Y**, entonces el voltaje del terminal V_T está relacionado con el voltaje de fase por

$$V_T = \sqrt{3} V_\phi \quad (2-10)$$

Si se conectan en Δ , entonces

$$V_T = V_\phi \quad (2-11)$$

Normalmente, el hecho de que las tres fases de un generador síncrono sean idénticas en todos aspectos menos en el ángulo de fase lleva a la utilización de un *circuito equivalente por fase*. El circuito equivalente por fase de esta máquina se puede apreciar en la figura 2-3. Se debe tener presente un factor importante cuando se utiliza circuito equivalente por fase: las tres fases tienen los mismos voltajes y corrientes sólo cuando las cargas conectadas a ellas están balanceadas [2]. Si las cargas del generador no están balanceadas, se requieren técnicas de análisis más complicadas, las cuales están fuera del alcance de este trabajo.

2.9 Diagrama fasorial de un generador síncrono

Debido a que los voltajes de un generador síncrono son voltajes de ca, normalmente se expresan como fasores. Y puesto que los fasores tienen tanto como magnitud como ángulo, la relación entre ellos se debe expresar en una gráfica bidimensional. Cuando se hace una gráfica de los voltajes dentro de una fase (E_o , V_ϕ , $jX_s I_a$ y $R_a I_a$) y la corriente I_a en la fase de tal forma que se muestran las relaciones entre ellos, la gráfica resultante se llama *diagrama fasorial*.

Por ejemplo, la figura 2-7 muestra estas relaciones cuando el generador alimenta una carga con un factor de potencia unitario (una carga puramente resistiva). De la ecuación (2-9) se obtiene que el voltaje total E_o difiere del voltaje en los terminales de la fase V_ϕ por las caídas de voltaje resistivo e inductivo. Todas las corrientes y voltajes están referenciados a V_ϕ y se asume arbitrariamente que tiene un ángulo de 0° .

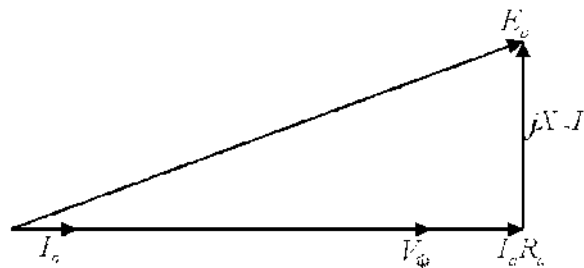


FIGURA 2-7. Diagrama fasorial de un generador síncrono con un factor de potencia unitario.

Este diagrama fasorial se puede comparar con los diagramas fasoriales de los generadores que operan con factores de potencia en retraso o en adelanto. En la figura 2-8 se pueden observar estos diagramas fasoriales. Nótese que *para cierto voltaje de fase y cierta corriente* del inducido se necesita un voltaje interno generado E_o más grande para las cargas en atraso que para las cargas en adelanto. Por lo tanto, se requiere una corriente de campo más grande para obtener el mismo voltaje en los *terminales en las cargas en retraso debido a que*

$$E_o = K\phi\omega \quad (2-12)$$

Y ω debe ser constante para mantener una frecuencia constante.

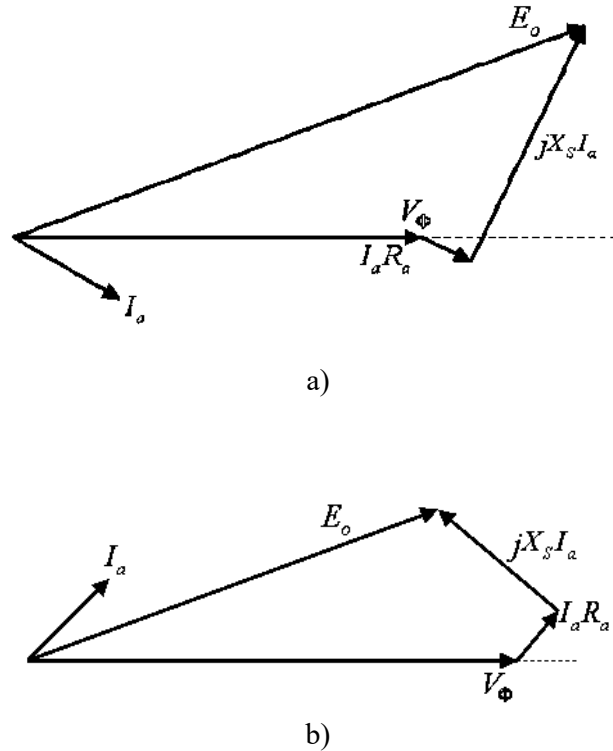


FIGURA 2-8. Diagrama fasorial de un generador síncrono con un factor de potencia: a) En retraso y b) En adelanto.

Alternativamente, *para cierta corriente de campo y cierta magnitud de corriente de carga, el voltaje en los terminales es menor para cargas en retraso y mayor para cargas en adelanto.*

En las máquinas síncronas reales, por lo regular la reactancia síncrona es mucho más grande que la resistencia del devanado R_a , por lo que a menudo se desprecia R_a en el estudio cualitativo de las variaciones de voltaje. Obviamente, para obtener resultados numéricos exactos se debe considerar R_a .

2.10 Generadores síncronos, desde la perspectiva del campo magnético

Para comenzar a entender la operación de un generador síncrono, es preciso dar una mirada al comportamiento de un generador síncrono conectado a un bus infinito. El generador tiene un motor primario que gira el eje y causa que éste rote. La dirección del par aplicado τ_{ap} del motor primario sigue la dirección del movimiento porque el motor primario hace que el generador gire.

En la figura 2-9a se muestra el diagrama fasorial de un generador que opera con una corriente de campo grande y en la figura 2-9b se puede ver el diagrama del campo

magnético correspondiente. Cómo se describió anteriormente, B_r corresponde a (produce) E_o , B_{net} corresponde a (produce) V_ϕ y B_s corresponde a (produce) $E_{estat} (= -jX_s I_a)$. La rotación tanto del diagrama de campo magnético como del diagrama fasorial es en sentido contrario al de las manecillas del reloj en la figura, de acuerdo con la convención matemática estándar de incremento de ángulo.

El par inducido en el generador se puede calcular a partir del diagrama de campo magnético.

De las ecuaciones siguientes el par inducido está dado por

$$\tau_{ind} = k B_r \times B_{net} \quad (2-13)$$

o

$$\tau_{ind} = k B_r B_{net} \sin \delta \quad (2-14)$$

Nótese que a partir de ese campo magnético *el par inducido en esta máquina es en el sentido de las manecillas del reloj*, en sentido opuesto a la rotación. En otras palabras, el par inducido en el generador es un par contrario, en sentido contrario a la rotación provocada por el par externo aplicado τ_{ap} .

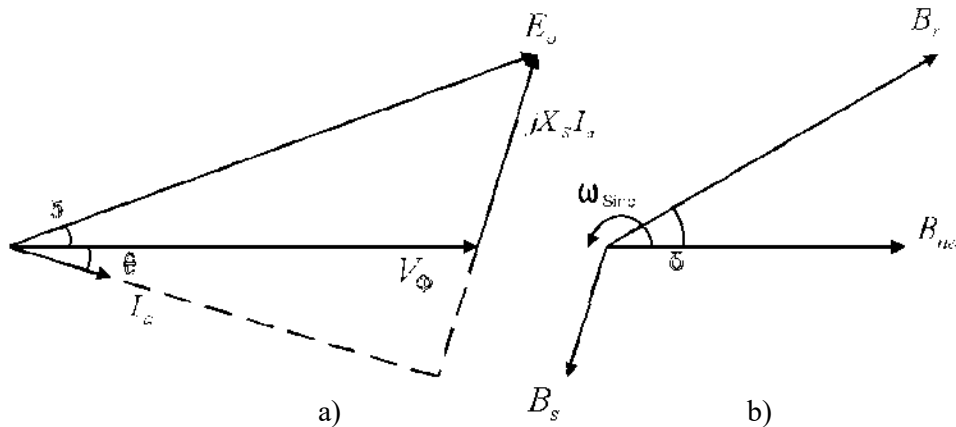


FIGURA 2-9. a) Diagrama fasorial de un generador síncrono que opera con un factor de potencia en retraso. b) Diagrama de campo magnético correspondiente.

2.11 Potencia y par en los generadores síncronos

Un generador síncrono es una máquina síncrona que se utiliza como generador. Convierte potencia mecánica en potencia eléctrica trifásica. La fuente de la potencia mecánica, el motor primario, puede ser un motor diesel, una turbina de vapor, una turbina hidráulica u otro equipo similar. Cualquiera que sea la fuente, debe tener la propiedad básica de mantener su velocidad constante sin importar la demanda de potencia. Si esto no se cumple, entonces la frecuencia resultante del sistema de potencia podría presentar fallas.

No toda la potencia mecánica que entra en un generador síncrono se convierte en potencia eléctrica que sale de la máquina. La diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida representa las pérdidas de la máquina.

La potencia mecánica de entrada es la potencia eje en el generador $P_{entr} = \tau_{ap} \omega_{sinc}$, mientras que la potencia mecánica convertida a potencia eléctrica internamente está dada por

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_{sinc} \quad (2-15)$$

$$= 3E_o I_a \cos \gamma \quad (2-16)$$

Donde γ es el ángulo entre E_o e I_a . La diferencia entre la potencia que entra en el generador y la potencia convertida en el generador representa las pérdidas mecánicas, del núcleo y misceláneas de la máquina.

La potencia eléctrica de salida real de un generador síncrono se puede expresar en cantidades de línea a línea como

$$P_{sal} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta \quad (2-17)$$

Y en cantidades fasoriales como

$$P_{sal} = 3 V_\phi I_a \cos \theta \quad (2-18)$$

La potencia reactiva de salida se puede expresar en cantidades de línea a línea como

$$Q_{sal} = \sqrt{3} V_T I_L \sin \theta \quad (2-19)$$

o en cantidades fasoriales como

$$Q_{sal} = 3 V_\phi I_a \sin \theta \quad (2-20)$$

Si se desprecia la resistencia del inducido R_a (debido a que $X_s \gg R_a$), entonces se puede deducir en una ecuación muy útil para obtener una aproximación de la potencia de salida del generador. Para deducir esta ecuación se debe examinar el diagrama fasorial de la figura 2-10, que muestra el diagrama fasorial simplificado de un generador en el que se desprecia la resistencia del estator. Nótese que se puede expresar el segmento vertical bc como $E_o \sin \delta$ o $X_s I_a \cos \theta$. Por lo que,

$$I_a \cos \theta = \frac{E_o \sin \delta}{X_s} \quad (2-21)$$

Y sustituyendo esta expresión en la ecuación (2-18) se tiene

$$P = \frac{3V_\phi E_o \sin \delta}{X_s} \quad (2-22)$$

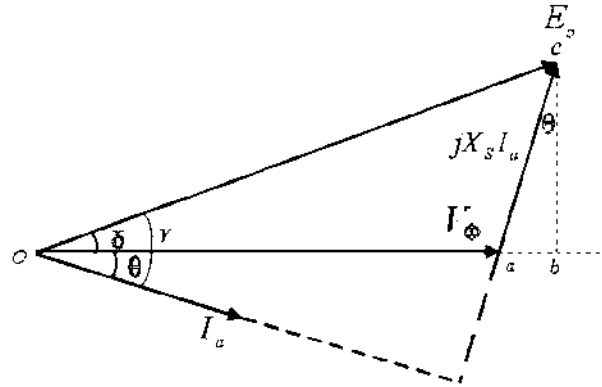


FIGURA 2-10. Diagrama fasorial simplificado, donde se ha despreciado la resistencia del inducido.

Debido a que se supone que las resistencias son cero en la ecuación (2-22), no hay pérdidas eléctricas en el generador y la ecuación es igual para $\mathbf{P}_{conv}$ y $\mathbf{P}_{sal}$.

La ecuación (2-22) muestra que la potencia producida por un generador síncrono depende del ángulo δ entre $\mathbf{V}_\phi$ y $\mathbf{E}_o$. El ángulo δ se conoce como el ángulo de par de la máquina. Nótese también que la potencia máxima que puede suministrar un generador se presenta cuando $\delta = 90^\circ$. A un ángulo de $\delta = 90^\circ$, $\text{sen } \delta = 1$ y

$$P_{max} = \frac{3V_{\phi}E_o}{X_s} \quad (2-23)$$

La potencia máxima que indica esta ecuación se llama límite de estabilidad estática del generador. Normalmente los generadores nunca llegan a estar demasiado cerca de este límite. En las máquinas reales los ángulos más comunes del par a plena carga son de 15 a 20° [2].

Ahora analícese de nuevo las ecuaciones (2-18), (2-20) y (2-22). Si se supone que V_ϕ es constante, entonces la potencia real de salida es directamente proporcional a las cantidades $I_a \cos \theta$ y $I_a \sin \theta$ y la potencia reactiva de salida es directamente proporcional a la cantidad $I_a \sin \theta$. Estos datos son útiles para dibujar el diagrama fasorial de un generador síncrono cuando las cargas varían.

También se sabe que el par inducido en este generador se puede expresar como

$$\boldsymbol{\tau}_{ind} = k \mathbf{B}_r \times \mathbf{B}_s \quad (2-24)$$

o como

$$\tau_{ind} = k \mathbf{B}_r \times \mathbf{B}_{net} \quad (2-25)$$

La magnitud de la ecuación (2-25) se puede expresar como

$$\tau_{ind} = k B_r \times B_{net} \sin \delta \quad (2-26)$$

Donde δ es el ángulo entre el rotor y los campos magnéticos netos (también llamado *ángulo de par*). Debido a que B_r produce el voltaje E_o y B_{net} produce el voltaje de V_ϕ , el ángulo δ entre E_o y V_ϕ es el mismo que el ángulo δ entre B_r y B_{net} .

De la ecuación (2-22) se puede derivar una expresión alternativa para el par inducido en un generador síncrono. Debido a que $P_{conv} = \tau_{ind} \omega_{sinc}$ el par inducido se puede expresar como

$$\tau_{ind} = \frac{3V_\phi E_o \sin \delta}{\omega_{sinc} X_s} \quad (2-27)$$

Esta expresión describe el par inducido en términos de cantidades eléctricas, mientras que la ecuación (2-25) proporciona la misma información en términos de cantidades magnéticas.

2.12 Obtención de los parámetros del circuito equivalente de la Máquina Síncrona

El circuito equivalente obtenido de un generador síncrono consta de tres cantidades:

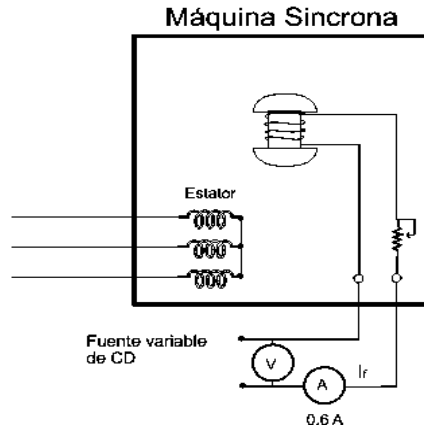
1. La resistencia del inducido o de armadura (R_a)
2. La reactancia síncrona
3. La relación entre la corriente de campo (I_f) y el flujo (ϕ), por lo tanto, entre la corriente de campo y el voltaje inducido (E_o)

Estas son las que se deben de determinar para describir completamente el comportamiento de una máquina real, sin embargo, para un análisis más riguroso es necesario determinar otros parámetros como la resistencia del rotor (R_r).

2.12.1 Resistencia del rotor (R_r); (valores experimentales)

Se obtuvo aplicando la ley ohm en las terminales de la excitación de campo de CD, aplicando diferentes niveles de tensión; en este caso se obtuvo del promedio de 4 muestras.

La conexión física para la obtención de R_r de la maquina se muestra en la figura 2-11. Como se observa en esta figura R_r está en serie con una resistencia variable que es la encargada de variar la corriente de campo de la máquina. Se recomienda hacer la medición de la resistencia del rotor cuando la resistencia variable permite pasar la corriente máxima de excitación que es cuando su impedancia es mínima o nula.

FIGURA 2-11. Esquema de conexión para la obtención de la resistencia del rotor (R_r).

Las mediciones realizadas, como se ilustra en la figura 2-11, se muestra en la tabla 2-1.

Tabla 2-1. Resistencia del rotor para niveles de tensión diferentes.

N	V_{cd}	I_f	$R_r = \frac{V_{cd}}{I_f}$
1	10.23	0.09	113.667
2	30.7	0.25	122.8
3	50.2	0.40	125.5
4	70.1	0.55	127.455

Donde

N = número de muestras

V_{cd} = voltaje de cd aplicado en terminales del rotor

I_f = corriente de campo medido en amperes (A)

R_r = resistencia del rotor en ohms (Ω).

Si se promedia los valores obtenidos de las N muestras (tabla 2-1), se tiene

$$R_r = \frac{(113.667 + 122.8 + 125.5 + 127.455)}{4} = \frac{489.421245}{4} = 122.36 \Omega$$

$$R_r = 122.36 \Omega$$

2.12.2 Resistencia de armadura (R_a); (valores experimentales)

Este parámetro normalmente se desprecia, sobre todo en máquinas de gran tamaño donde los valores de éstas son insignificantes; la razón de su estudio se justifica cuando se desea conocer los efectos de calentamiento de la máquina.

La resistencia de armadura se puede obtener aplicando diferentes formas y métodos, aquí se presenta dos formas de obtención:

1. Aplicando CD en las terminales de las bobinas del estator de la máquina, como se muestra en la figura 2-12, posteriormente aplicar la ley de ohm para la obtención de la resistencia, el resultado se multiplica por 1.25.
2. Se puede medir directamente con un óhmetro en las terminales de la bobina y posteriormente multiplicar por el factor de 1.25.

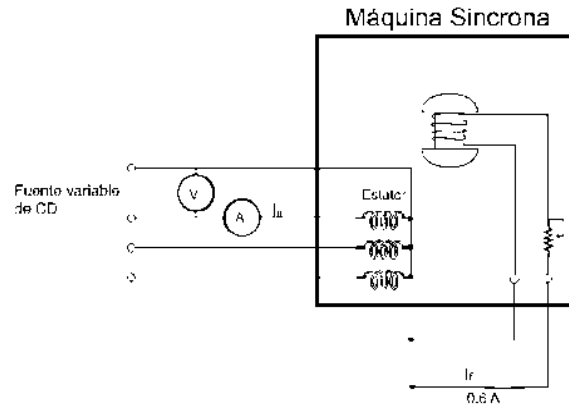


FIGURA 2-12. Obtención de la resistencia de armadura del generador síncrono.

¿Por qué hay que multiplicar por 1.25 la resistencia obtenida en las mediciones?

La razón es la siguiente:

La resistencia de los conductores de las bobinas de los motores es la causa más importante de pérdida de potencia en ellas. El término “resistencia”, a menos que sea calificado específicamente, se refiere a la *resistencia efectiva*. La resistencia efectiva de un conductor es

$$R = \frac{\text{pérdida de potencia en el conductor}}{|I|^2} \Omega \quad (2-28)$$

Donde la potencia está en watts e I es la corriente rms en el conductor en amperes. La resistencia efectiva es igual a la resistencia de CD del conductor sólo si la distribución de corriente a través del conductor es uniforme.

La ecuación que determina la resistencia de cd es:

$$R = \frac{\rho l}{A} \Omega \quad (2-29)$$

Donde

ρ = resistividad del conductor

l = longitud

A = área de la sección transversal

La distribución uniforme de la corriente en la sección transversal de un conductor solamente se presenta para la corriente directa. Conforme se aumenta la frecuencia de la corriente alterna, la no uniformidad de la distribución se hace más pronunciada. Un incremento en la frecuencia da origen a una densidad de corriente no uniforme. A este fenómeno se le conoce como *efecto piel*. Generalmente, la densidad de corriente en un conductor circular se incrementa desde el interior hacia la superficie. Sin embargo, para conductores de radios suficientemente grandes, se puede obtener una densidad de corriente oscilatoria con respecto a la distancia radial desde el centro [5].

El incremento en la resistencia causado por el efecto piel, se determinan a partir de las tablas de características eléctricas de los conductores proporcionados por sus fabricantes, de aquí la justificación del 25% que se le agrega a la resistencia de los conductores cuando se les hace circular por ellos cc ya que las bobinas se energizarán con ca cuando las máquinas se encuentran en operación.

1. Aplicando CD

Los resultados obtenidos en las mediciones al aplicar voltaje de cd variable en las terminales (figura 2-12), se presenta en la tabla 2-2.

Tabla 2-2. Resistencia de armadura para diferentes niveles de tensión.

N	V_{cd}	I_a	$R_a = \frac{V_{cd}}{I_a}$
1	3.15	0.25	12.6
2	6.03	0.48	12.563
3	9	0.71	12.676
4	12	0.95	12.632

Donde

N = número de muestras

V_{cd} = voltaje de cd aplicado

I_a = corriente de armadura en amperes (A)

R_a = resistencia de armadura en ohms (Ω).

Para obtener la resistencia de forma adecuada, se promedia los valores obtenidos en la tabla 2-2 mediante la ecuación 2-30.

$$R_a = \frac{\sum_{N=1}^4 R_a}{N} \quad (2-30)$$

$$R_a = \frac{12.6 + 12.563 + 12.676 + 12.632}{4} = 12.618 \, \Omega$$

$$R_a = 12.618 \, \Omega$$

Si se multiplica por el factor de corrección de 1.25, se tiene:

$$R_a = (12.618 \, \Omega)(1.25)$$

$$R_a = 15.773 \, \Omega$$

2. Por medición directa

Al conectar un óhmetro en las terminales de una sola bobina, se obtuvo la siguiente medición

$$R_a = 12.4 \, \Omega$$

Multiplicando por 1.25 se tiene

$$R_a = 15.5 \, \Omega$$

En ambos métodos se obtienen casi el mismo resultado, por lo que se puede optar cualquiera de estos para obtener la resistencia de armadura.

2.12.3 Reactancia síncrona (X_s); (valores experimentales)

Considere un generador trifásico con terminales A, B, C que alimentan una carga trifásica equilibrada como se muestra en la figura 2-13. El generador es impulsado por una turbina (que no se muestra) y excitado por una corriente directa I_f . La máquina y su carga están conectados en Y y forman el circuito de la figura 2-14. Aunque los neutros N_1 y N_2 no están conectados, se encuentran al mismo potencial porque la carga está equilibrada. Por consiguiente, podríamos conectarlos entre sí, (como lo muestra la línea punteada) sin afectar el comportamiento de los voltajes o de las corrientes en el circuito.

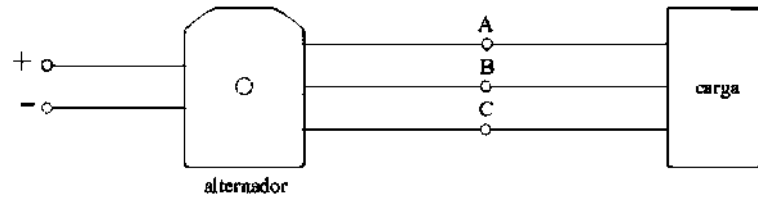


FIGURA 2-13. Generador conectado a una carga.

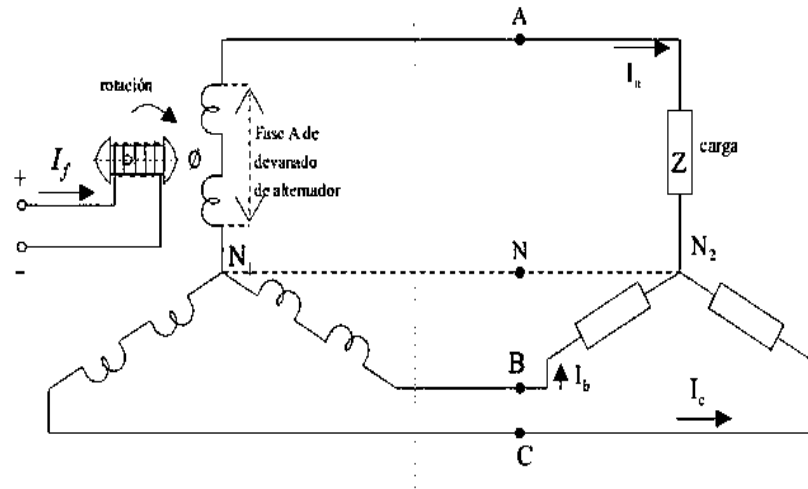


FIGURA 2-14. Circuito eléctrico que representa la instalación de la figura 2-11.

El campo conduce una corriente de excitación que produce un flujo Φ . Conforme el campo gira, el flujo induce en el estator tres voltajes E_o que están desfasados 120° (figura 2-15).

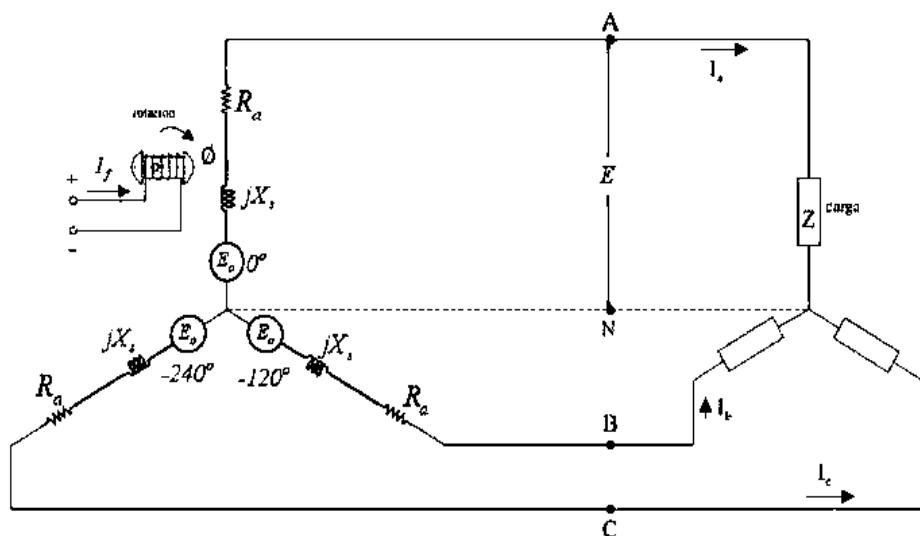


FIGURA 2-15. Voltajes e impedancias de un generador trifásico y su carga conectada.

Cada fase del devanado del estator posee una resistencia R_a y cierta inductancia L . Como ésta es una máquina de corriente alterna, la inductancia se manifiesta como una reactancia X_s , dada por

$$X_s = 2\pi fL \quad (2-31)$$

Donde

X_s = reactancia síncrona, por fase (Ω)

f = frecuencia del generador (Hz)

L = inductancia aparente del devanado del estator, por fase (H)

La *reactancia síncrona* de un generador es una impedancia interna, justo con su resistencia interna R_a . La impedancia está ahí, pero no se puede ver ni tocar. Por lo general, el valor de X_s es 10 a 100 veces mayor que R_a [1]; por consiguiente, siempre se puede omitir la resistencia, a menos que se interesa la eficiencia o los efectos de calentamiento.

Se puede simplificar el diagrama esquemático de la figura 2-15 mostrando una sola fase del estator. De hecho, las otras dos fases son idénticas, excepto que sus voltajes (y corrientes), respectivos están desfasados 120° . Además, si se omite la resistencia de los devanados, se obtiene el circuito realmente simple de la figura 2-16. Por lo tanto, un generador síncrono se puede representar mediante un circuito equivalente compuesto de un voltaje inducido E_o en serie con una reactancia X_s . En este circuito la corriente de excitación I_f , produce el flujo Φ que induce el voltaje E_o interno. Para una reactancia síncrona dada, el voltaje E en las terminales del generador depende de E_o y de la carga Z .

Observe que E_o y E son los voltajes de línea a neutro e I es la corriente de línea.

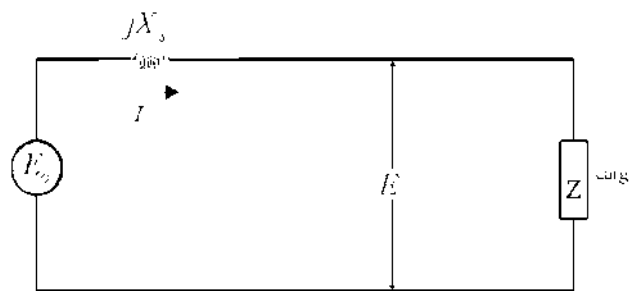


FIGURA 2-16. Circuito equivalente de un generador trifásico que muestra sólo una fase.

Se puede *determinar el valor no saturado de X_s* mediante la siguiente prueba de **circuito abierto y cortocircuito**.

Durante la prueba de circuito abierto el generador es impulsado a velocidad nominal y la corriente de excitación se eleva hasta que se alcanza el voltaje nominal de línea a línea. Se registran la corriente de excitación I_f correspondiente y el voltaje de línea a neutro E_n que es igual al voltaje inducido en la armadura E_o .

Luego se reduce la excitación a cero y las tres terminales del estator se ponen en cortocircuito. Con el generador funcionando de nuevo a velocidad nominal, se eleva gradualmente la corriente de excitación hasta su valor original I_f .

Se mide la corriente de cortocircuito resultante I_{sc} en los devanados del estator y se calcula X_s por medio de la expresión

$$X_s = \sqrt{\left(\frac{E_o}{I_a}\right)^2 - R_a^2} \quad (2-32)$$

Una vez realizadas las pruebas de circuito abierto y de cortocircuito, los valores determinados en las mediciones son los siguientes:

$$E_o = 122 \text{ V}$$

$$I_{sc} = 1.24 \text{ A.}$$

$$I_{sc} = I_a$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 2-32, se tiene;

$$X_s = \sqrt{\left(\frac{122}{1.24}\right)^2 - (15.772)^2}$$

$$X_s = 97.115 \Omega$$

2.12.4 Curva de magnetización (X_s); (valores experimentales)

El voltaje interno generado E_o es directamente proporcional al flujo y a la velocidad, pero el flujo en si depende de la corriente que fluye por el circuito de campo del rotor; la situación es que para cierta cantidad de flujo el material ferromagnético se satura y no permite pasar más flujo y por consecuente no se induce más voltaje en el estator por más incremento de la corriente de excitación que se aplique.

Los valores reales obtenidos de I_f y E_o , manteniendo a la máquina síncrona a velocidad constante (1800 rpm), se muestra en la tabla 2-3.

TABLA 2-3. Comportamiento del voltaje inducido respecto a la corriente de campo.

N	I_f	E_o	N	I_f	E_o
1	0	2.9333	11	0.50	115
2	0.05	20.44	12	0.55	120.4
3	0.10	32.9	13	0.58	124.8
4	0.15	47.7	14	0.65	131.1
5	0.20	59.3	15	0.70	133.4
6	0.25	73.1	16	0.75	136.7
7	0.30	83.5	17	0.80	139.6
8	0.35	93.3	18	0.84	141.2
9	0.40	102	19	0.89	143.6
10	0.45	109.6			

Donde

N = número de mediciones.

I_f = corriente de campo en amperes (A)

E_o = voltaje inducido en el estator.

De tal manera que graficando los valores obtenidos de I_f y E_o se tiene la figura 2-17 que muestra el comportamiento de I_f contra E_o del generador síncrono; llamado también, curva de magnetización.

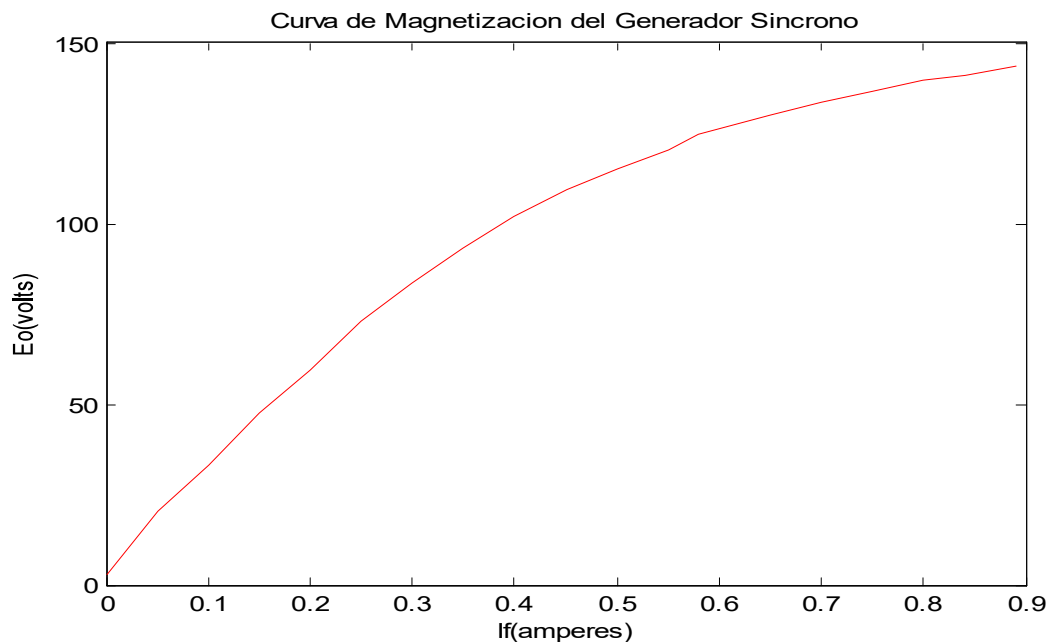


FIGURA 2-17. Curva de magnetización de un generador síncrono.

2.13 Modos de operación del generador en un sistema aislado (generador-carga)

Para entender las características de funcionamiento de un generador síncrono que opera solo, considérese un generador que alimenta una carga. *¿Qué pasa cuando se incrementa la carga de este generador?*

Un incremento en la carga es un incremento en la potencia real, reactiva, o ambas, que se obtiene del generador. Un incremento en la carga aumenta la corriente de la carga que se obtiene del generador. Debido a que no se ha cambiado el resistor de campo, la corriente de campo es constante y, por lo tanto, el flujo Φ es constante. Debido a que el motor principal también tiene una velocidad constante ω , la magnitud del voltaje interno generado $E_o = K\Phi\omega = \text{constante}$.

Si E_o es constante, *¿Qué cambia con una variación en la carga?* La manera de encontrar una respuesta a esta pregunta es dibujar diagramas fasoriales que muestren el incremento en la carga manteniendo en mente las restricciones sobre el generador.

2.13.1 Generador subexcitado (carga capacitiva)

Primero supóngase que el generador se carga con cargas con factores de potencia en adelanto (cargas capacitivas). Si ahora se añaden nuevas cargas con el mismo factor de potencia, el voltaje de reacción del inducido es mayor a su valor previo y V_o aumenta tal y como se muestra en la figura 2-18. En este último caso, un incremento en la carga en el generador produjo un incremento en el voltaje en los terminales. Este resultado no es el que se esperaría si nos basáramos únicamente en la intuición.

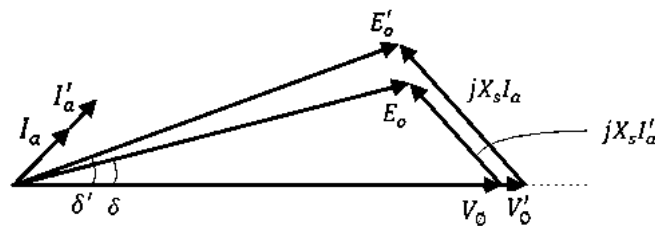


FIGURA 2-18. Efecto del incremento de carga capacitiva sobre un generador a factor de potencia constante en el voltaje en sus terminales.

2.13.2 Generador subexcitado; (valores experimentales)

Para corroborar lo que se ha dicho en la sección 2.13.1 se presenta una serie de valores reales obtenidos de forma experimental como se muestra en la tabla 2-4. En esta tabla, se observa numéricamente el incremento del voltaje de fase (V_o) cuando existe un incremento en la carga, la figura 2-19 ilustra mejor este efecto.

Tabla 2-4. Comportamiento de los parámetros del generador síncrono, a un incremento en la carga capacitiva.

N	Z	I_a	I_f	V_Φ	f	P	Q	fp	S
1	∞	0	0.54	120	60	0	0	0	0
2	3600	0.0515	0.54	122	60	0	4.5	-0.04	6.5
3	3000	0.054	0.54	122	60	0.5	5.5	-0.04	6.5
4	2700	0.05	0.54	122	60	0.5	6	-0.04	7
5	2400	0.063	0.54	122	60	0.5	6.5	-0.04	7.5
6	1800	0.083	0.54	123	60	0.5	9	-0.03	10
7	1500	0.0965	0.54	124	60	0.5	11	-0.03	12
8	1200	0.1195	0.54	125	60	0.5	14	-0.03	15
8	900	0.158	0.54	128	60	0.5	19	-0.03	20
9	600	0.237	0.54	132	60	1	30.5	-0.03	31

Donde

N = número de muestras

Z = carga por fase del sistema (Ω)

I_a = corriente de armadura (A)

I_f = corriente de campo (A)

V_Φ = voltaje de fase (V)

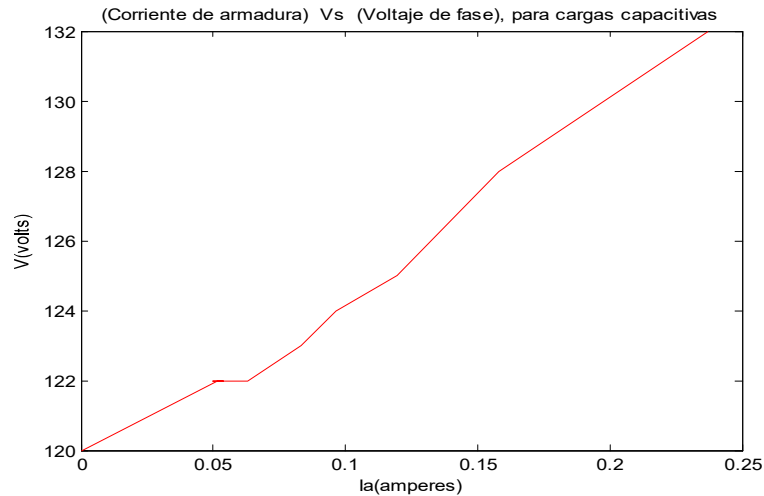
f = frecuencia (Hz)

P = potencia real (W)

Q = potencia reactiva (VAR)

fp = factor de potencia

S = potencia aparente (VA)

FIGURA 2-19. Comportamiento del V_ϕ , para un incremento de carga.

La conclusión del comportamiento del generador síncrono con carga puramente capacitiva es:

1. Si se añaden cargas en adelanto ($-Q$ o cargas de potencia reactiva capacitivas) a un generador, V_ϕ y el voltaje en terminales aumentan.
2. Un incremento en la carga provoca un aumento en la potencia real demandada por ésta, a la vez que la carga suministra reactivos al generador en vez de consumirla como la naturaleza de una carga lo haría, la figura 2-20 muestra estos incrementos.

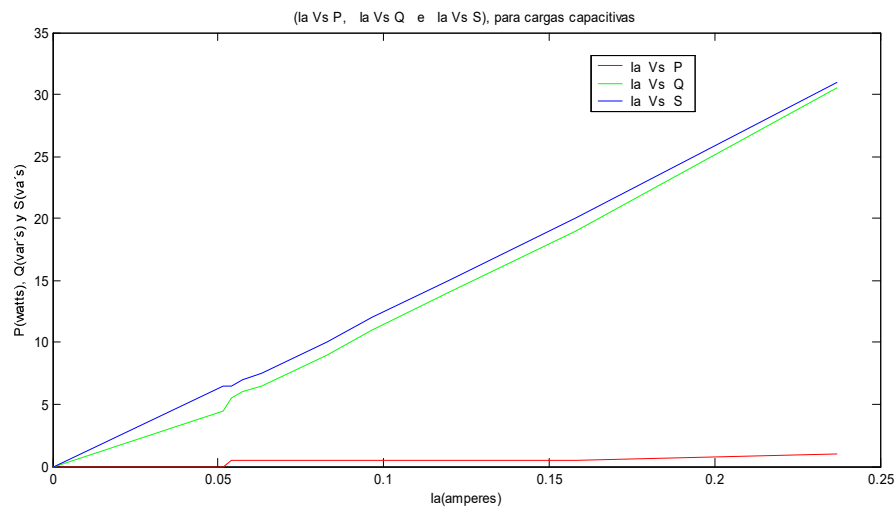


FIGURA 2-20. Aumento de potencias para un incremento de carga.

2.13.3 Generador a factor de potencia unitario (carga resistiva)

Supóngase ahora que se carga el generador con cargas con factores de potencia unitarios (cargas resistivas). ¿Qué pasa si se añaden más cargas con el mismo factor de potencia? Con las mismas restricciones que antes, ahora se puede observar que V_ϕ decrece tan sólo ligeramente como lo muestra la figura 2-21 y la tabla 2-5.

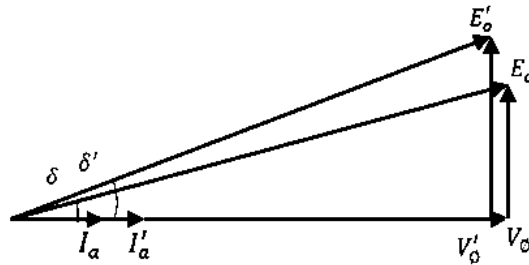


FIGURA 2-21. Efecto del incremento de carga sobre un generador a factor de potencia unitario constante en el voltaje en sus terminales.

2.13.4 Generador a factor de potencia unitario (valores experimentales)

Los valores reales que se presentan en esta sección, puede ayudar al lector a comprender más el comportamiento del generador síncrono con carga resistiva; no obstante, hacer una comparación del valor real con la parte teórica, es un privilegio del lector para tener un mejor desenvolvimiento en el ramo; los valores obtenidos de forma experimental se observa en la tabla 2-5, mismo que se grafican los valores de *carga contra voltaje de fase* (V_ϕ) como se observa en la figura 2-22.

TABLA 2-5. Comportamiento de los parámetros del generador síncrono para un incremento en la carga.

N	Carga(Ω)	I_a (A)	I_f (A)	V_ϕ (V)	f (Hz)	P (W)	Q (VAR)	fp	S (VA)
1	∞	0	0.55	120	60	0	0	0	0
2	3600	0.0310	0.52	118.3	60	3.6	0.3	0.99	3.6
3	3000	0.0365	0.52	117.5	60	4.25	0.3	1	4.25
4	2700	0.0410	0.52	117.7	60	4.75	0.35	1	4.8
5	2400	0.0455	0.52	117.2	60	5.3	0.35	1	5.3
6	1800	0.0610	0.52	116.8	60	7.15	0.5	1	7.15
7	1500	0.0740	0.52	116.6	60	8.55	0.6	1	8.5
8	1200	0.0925	0.52	116.1	60	10.75	0.75	1	10.75
9	900	0.1260	0.52	114.8	60	14.5	0.5	1	14.5
10	600	0.1835	0.52	114.5	60	21	0.5	1	21

La conclusión del comportamiento de este tipo de carga es que:

1. Si se añaden cargas con factores de potencia unitarios (no potencia reactiva) a un generador, hay una pequeña disminución en V_ϕ y en el voltaje en los terminales.
2. Un incremento en la carga es un incremento en la potencia real, reactiva, o ambas como se muestran en la tabla 2-5 o en la figura 2-23.

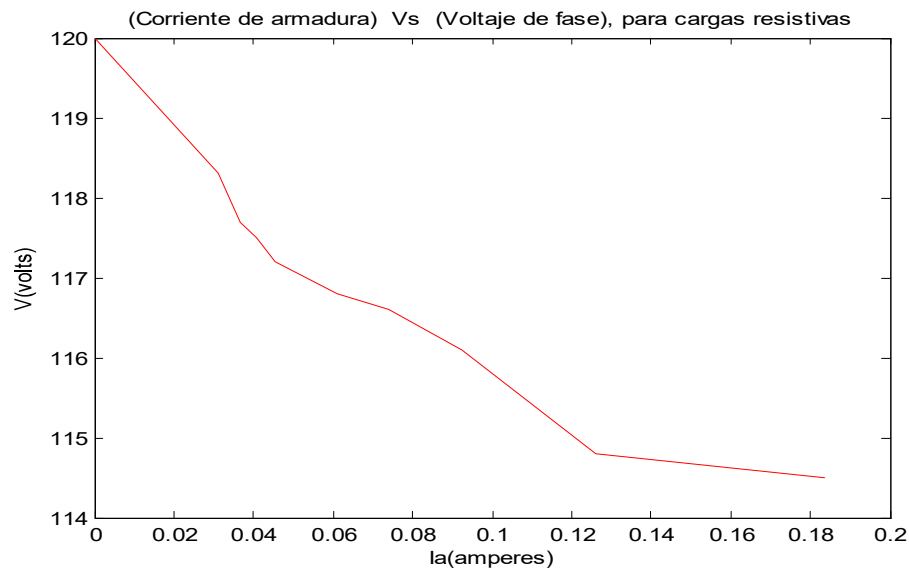


FIGURA 2-22. Disminución del voltaje de fase, para un incremento de la carga resistiva.

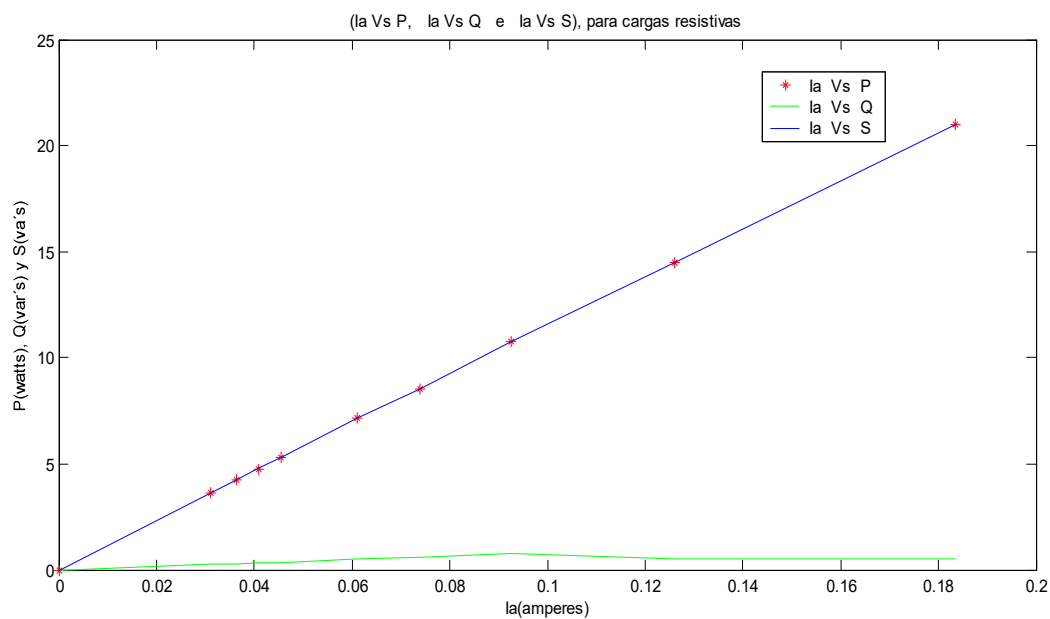


FIGURA 2-23. Incremento de potencias a un incremento de carga.

2.13.5 Generador sobreexcitado (cargas inductivas)

Examínese un generador que opera con un factor de potencia en retraso (cargas inductivas). Si se añade más carga con el mismo factor de potencia, entonces $|I_a|$ se incrementa pero mantiene el mismo ángulo θ con respecto a V_ϕ . Por lo tanto, el voltaje de reacción en el inducido $jX_s I_a$ es mayor que antes, pero tiene el mismo ángulo. Ahora, puesto que

$$E_o = V_\phi + jX_s I_a \quad (2-33)$$

$jX_s I_a$, debe extenderse entre V_ϕ a un ángulo de 0° y E_o que tiene la restricción de mantener la misma magnitud que antes del incremento en la carga. Si se dibujan estas restricciones en el diagrama fasorial, hay un solo punto en el que el voltaje de reacción del inducido es paralelo a su posición original mientras se incrementa su tamaño. En la figura 2-24 se muestra la gráfica resultante.

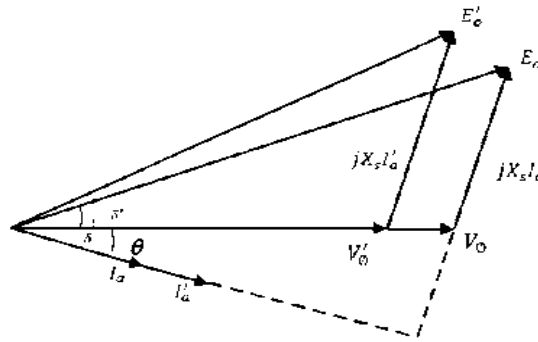


FIGURA 2-24. Efecto del incremento de carga sobre un generador a factor de potencia atrasado constante en el voltaje en sus terminales.

2.13.6 Generador sobreexcitado; (valores experimentales)

Lo que se ha mencionado en la sección 2.13.5, en comparación con los valores obtenidos de forma experimental, si se cumplen las restricciones, se observa que conforme se incrementa la carga, el voltaje V_ϕ decrece abruptamente como se muestra en la tabla 2-6 y la gráfica de $(Z \text{ Vs } V_\phi)$ en la figura 2-25.

TABLA 2-6. Comportamiento de los parámetros del generador síncrono, cuando se incrementa la carga.

N	Carga (Ω)	I_a (A)	I_f (A)	V_ϕ (V)	f (Hz)	P (W)	Q (VAR)	fp	S (VA)
1	0	0	0.55	120	60	0	0	0	0
2	3600	0.035	0.520	115.6	60	0.8	3.9	0.20	4
3	3000	0.0405	0.520	114.9	60	0.9	4.5	0.20	4.6
4	2700	0.0445	0.520	114.3	60	0.95	4.9	0.19	5.05
5	2400	0.0495	0.520	113.8	60	1.1	5.5	0.20	5.6
6	1800	0.0655	0.520	112.6	60	1.45	5.7	0.20	7.35
7	1500	0.078	0.520	111.9	60	1.65	8.5	0.20	8.65
8	1200	0.0925	0.520	110.2	60	1.7	10	0.17	10.15
9	900	0.1245	0.520	108.3	60	2.35	13.25	0.18	13.45
10	600	0.177	0.520	103.3	60	3	17.69	0.17	18.2
11	300	0.321	0.520	93.1	60	4.5	29.5	0.15	30

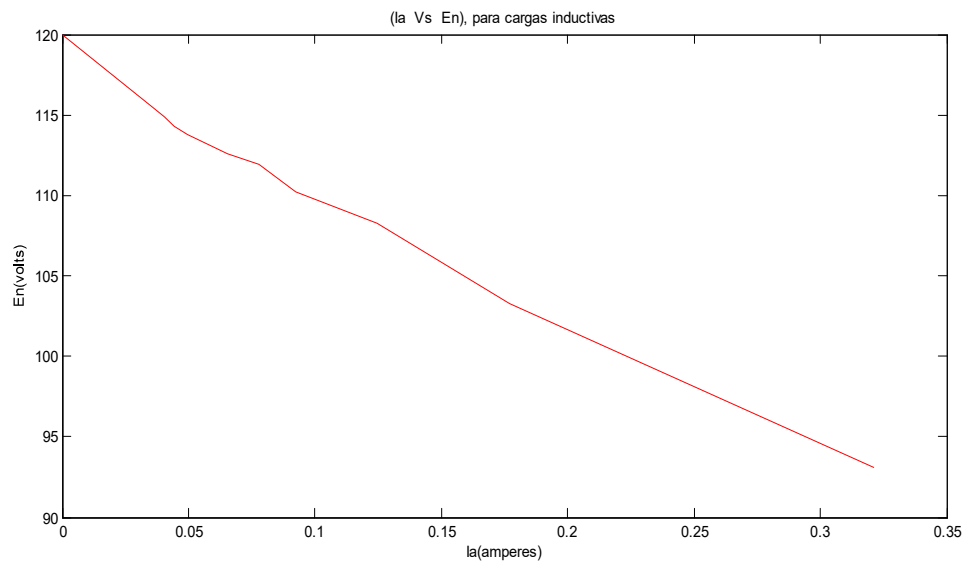


FIGURA 2-25. Caída de voltaje por fase de un generador síncrono, para un incremento de carga inductiva.

Las conclusiones generales de las mediciones son las siguientes:

1. Si se añaden cargas en retraso ($+Q$ o cargas de potencia reactiva inductivas) a un generador, V_ϕ y el voltaje en las terminales decrecen significativamente.
2. Un incremento en la carga es un incremento en la potencia real, reactiva, o ambas como se muestra en la figura 2-26.

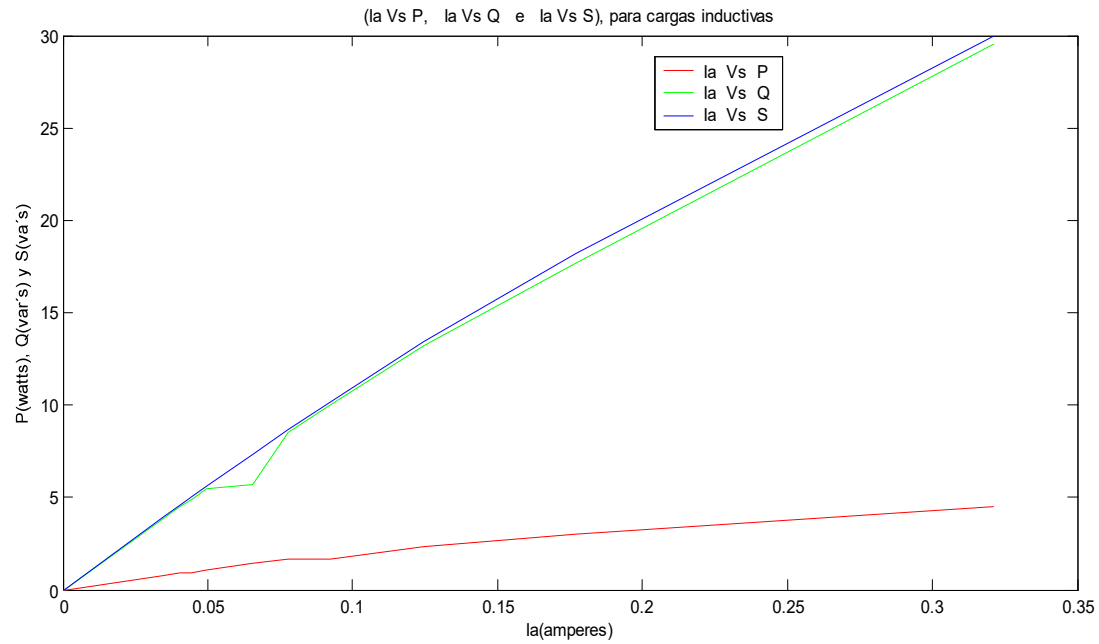


FIGURA 2-26. Incremento de potencia real, reactiva y aparente; para un incremento de carga inductiva.

2.14 Modos de operación del generador síncrono interconectado a un sistema de potencia

2.14.0 Introducción

En las centrales eléctricas modernas es muy raro encontrar que un generador síncrono suministre independientemente su propia carga. Esta situación se encuentra en algunas aplicaciones que se salen de lo normal, tales como los generadores de emergencia. En todas las demás aplicaciones de generadores hay más de un generador que opera en paralelo para suministrar las potencias que requieren las cargas. La situación en la red de potencia de México es un ejemplo extremo de esta situación, en la que literalmente cientos de generadores comparten la carga en el sistema.

¿Por qué se utilizan los generadores síncronos en paralelo?

Las ventajas que se tienen al conectar varios generadores en paralelo son:

1. Varios generadores pueden alimentar una carga más grande que una sola máquina.
2. Tener varios generadores incrementa la confiabilidad del sistema de potencia, debido a que la falla de cualquiera de ellos no causa la pérdida total de potencia en la carga.
3. Tener varios generadores que operan en paralelo permiten la remoción de uno o más de ellos para cortes de potencia y mantenimientos preventivos.
4. Si se utiliza un solo generador y éste no opera cerca de plena carga, entonces está relativamente ineficiente. Con varias máquinas más pequeñas trabajando en paralelo, es posible operar sólo una fracción de ellas. Las que están operando lo hacen casi a plena carga y por lo tanto de manera más eficiente.

2.14.1 Condiciones requeridas para operar en paralelo

La figura 2-27 muestra un generador síncrono G_1 que suministra potencia a una carga con otro generador G_2 a punto de conectarse en paralelo con G_1 por medio del cierre del interruptor S_1 . *¿Qué condiciones se deben cumplir antes de poder cerrar el interruptor y de conectar los dos generadores?*

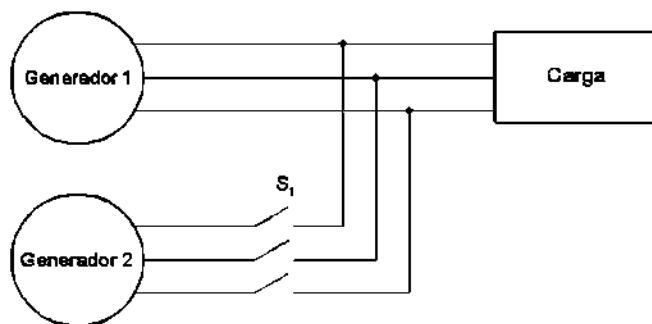


FIGURA 2-27. Generador que se conecta en paralelo con un sistema de potencia en operación.

Si el interruptor se cierra de manera arbitraria en cualquier momento, es posible que los generadores se dañen severamente y que la carga pierda potencia. Si los voltajes no son exactamente iguales en cada uno de los generadores que se conectarán juntos, habrá un flujo de corriente muy grande cuando se cierre el interruptor. Para evitar este problema, cada una de las tres fases debe tener *exactamente la misma magnitud de voltaje y ángulo de fase* que el conductor al que se conectará. En otras palabras, el voltaje en la fase a debe ser exactamente igual al voltaje en la fase a' y así en forma sucesiva para las fases b , b' y c , c' . Para lograr lo anterior, se deben cumplir las siguientes condiciones de puesta en paralelo.

1. Deben ser iguales los voltajes de línea rms de los dos generadores.
2. Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fase.
3. Los ángulos de fase de las dos fases a deben ser iguales.
4. La frecuencia del generador nuevo, llamado generador en aproximación, debe ser un poco mayor que la frecuencia del sistema en operación.

Estas condiciones de puesta en paralelo requieren ciertas explicaciones. La condición 1 es obvia: para que dos grupos de voltajes sean idénticos, deben tener la misma magnitud de voltaje rms.

Los voltajes en las fases a y a' serán completamente idénticos en todo momento si ambas magnitudes y sus ángulos son iguales, lo que explica la condición 3.

La condición asegura que la secuencia en la que el voltaje de fase llegue a su pico en los dos generadores sea la misma. Si la secuencia de fase es diferente (como se observa en la figura 2-28a), entonces aun cuando un par de voltajes (los de fase a) estén en fase, los otros dos pares de voltajes estarán desfasados por 120° . Si se conecta los generadores de esta manera, no habrá problema con la fase a , pero fluirán enormes corrientes en las fases b y c , lo que dañará ambas máquinas. Para corregir el problema de secuencia de fase, simplemente se intercambian las conexiones en dos de las tres fases en una de las máquinas.

Si las frecuencias de los generadores no son muy parecidas cuando se conectan juntos, se presentarán grandes potencias transitorias hasta que se estabilicen los generadores en una frecuencia común. Las frecuencias de las dos máquinas deben ser casi iguales, pero no pueden ser exactamente iguales. Deben diferir por una pequeña cantidad para que los ángulos de fase de la máquina en aproximación cambien en forma lenta con respecto a los ángulos de fase del sistema en operación. De esta manera se pueden observar los ángulos entre los voltajes y se puede cerrar el interruptor S_1 cuando los sistemas estén exactamente en fase.

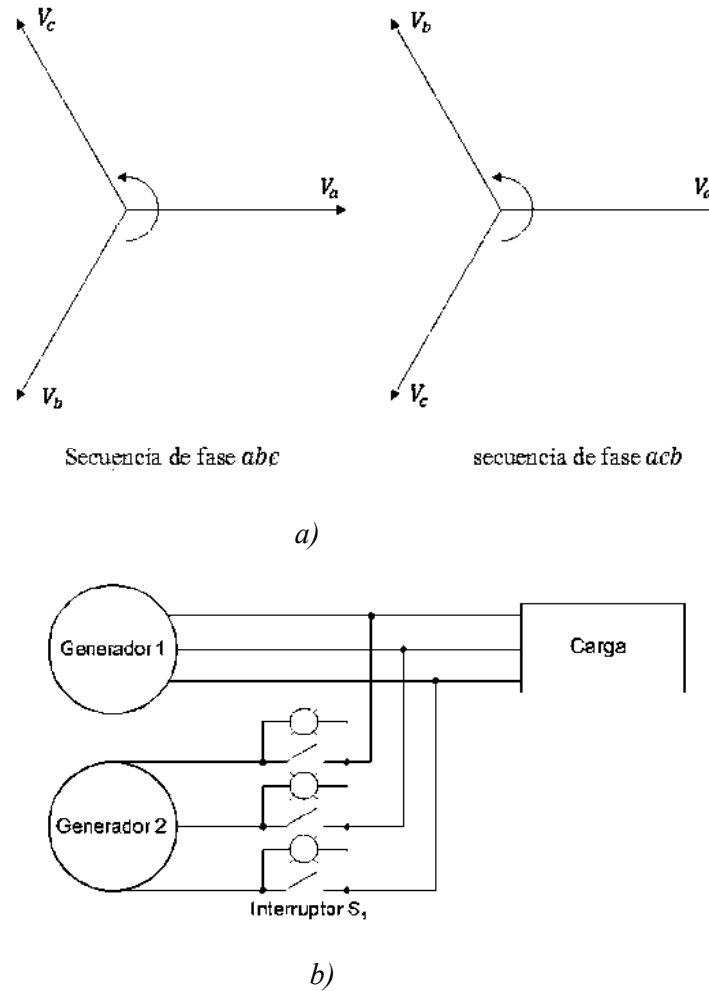


FIGURA 2-28. a) Las dos secuencias de fase posibles en un sistema trifásico. b) Método de las tres lámparas para encontrar la secuencia de fase.

2.14.2 Procedimiento general para conectar generadores en paralelo

Supóngase que se va a conectar el generador G2 al sistema en operación que se muestra en la figura 2-28. Se deben seguir los siguientes pasos para conectarlos en paralelo.

1. Utilizando voltímetros se debe ajustar la corriente de campo del generador en aproximación hasta que su voltaje en los terminales sea igual al voltaje en línea del sistema en operación.
2. La secuencia de fase del generador en aproximación se debe comparar con la secuencia de fase del sistema en operación. La secuencia de fase se puede revisar de muchas maneras diferentes. Una de ellas es conectar alternativamente un pequeño motor de inducción a los terminales de cada uno de los generadores. Si el motor gira en la misma dirección en ambas ocasiones, entonces la secuencia de fase es la misma en ambos generadores. Si el motor gira en direcciones opuestas,

entonces las secuencias de fase son diferentes y se deben invertir dos de los conductores del generador en aproximación.

Otra manera de revisar la secuencia de fase es el método de las tres lámparas. En este método, se conectan tres lámparas a través de los terminales abiertos del interruptor que conecta el generador al sistema, como se muestra en la figura 2-28b. Conforme la fase cambia entre los dos sistemas, las lámparas lucirán primero brillantes (una gran diferencia de fase) y luego tendrán una luz tenue (una diferencia de fase pequeña). Si las tres lámparas lucen brillantes y se apagan al mismo tiempo, entonces los sistemas tienen la misma secuencia de fase. Si las lámparas lucen brillantes sucesivamente, entonces los sistemas tienen secuencias de fase opuestas y se debe invertir una de las secuencias.

A continuación, la frecuencia del generador en aproximación se ajusta para que sea un poco más alta que la frecuencia del sistema en operación. Esto se lleva a cabo primero observando un medidor de frecuencia hasta que las frecuencias sean similares y entonces se observan los cambios de fase entre los sistemas. Se ajusta el generador en aproximación a una frecuencia un poco más alta para que cuando se conecte se incorpore a la línea suministrando potencia como generador, en lugar de consumirla como lo hace un motor [2].

Una vez que las frecuencias son casi iguales, los voltejes en los dos sistemas cambian de fase muy lentamente con respecto al otro. Se observan los cambios de fase y cuando los ángulos de fase son iguales, se cierra el interruptor que conecta a los dos sistemas.

¿Cómo se puede saber cuando los dos sistemas están por fin en fase? Una manera sencilla es observar las tres lámparas que se describieron anteriormente en relación con la discusión de la secuencia de fase. Cuando se apagan las tres lámparas, la diferencia de voltajes a través de ellas es cero y los sistemas están en fase.

En los generadores más grandes que pertenecen a sistemas de potencia, todo el proceso de conectar un generador nuevo en paralelo está automatizado y la computadora lleva a cabo esta tarea. Sin embargo, en generadores más pequeños el operador ejecuta manualmente los pasos antes descritos de conexión en paralelo [2].

2.15 Generador síncrono al bus infinito

Un bus infinito es un sistema tan poderoso que impone su propio voltaje y frecuencia en cualquier aparato conectado a sus terminales. Una vez conectado a un gran sistema (bus infinito), un generador síncrono se vuelve parte de una red que comprende cientos de generadores más que suministran potencia a miles de cargas. Por lo tanto, es imposible especificar la naturaleza de la carga (grande o pequeña, resistiva o capacitiva) conectada a las terminales de este generador particular. *¿Qué determina, entonces, la potencia que suministra la máquina?* Para responder esta pregunta, se debe recordar que tanto el valor

como la frecuencia del voltaje terminal a través del generador son fijos. Por consiguiente, se puede variar sólo dos parámetros de la máquina:

1. La corriente de excitación I_f .
2. El par o momento de torsión mecánico ejercido por la turbina.

Véase cómo un cambio en estos parámetros afecta el desempeño de la máquina.

2.15.1 Bus infinito, efecto de la variación de la corriente de excitación

Inmediatamente después de que se sincroniza un generador y se conecta a un bus infinito, el voltaje inducido E_o es igual a, y está en fase con, el voltaje V_ϕ del sistema como se observa en la figura 2-29a. No existe diferencia de potencial a través de la reactancia síncrona y, por consiguiente, la corriente de carga I es cero. Aunque el generador está conectado al sistema, no suministra potencia; se dice que flota en la línea.

Si ahora se incrementa la corriente de excitación, el voltaje E_o se incrementará y la reactancia síncrona X_s experimentará una diferencia de potencial E_x dada por

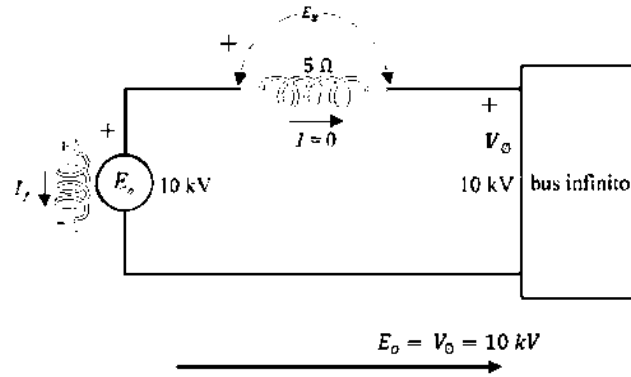
$$E_x = E_o - V_\phi \quad (2-34)$$

Por lo tanto, una corriente I circulará en el circuito dado por

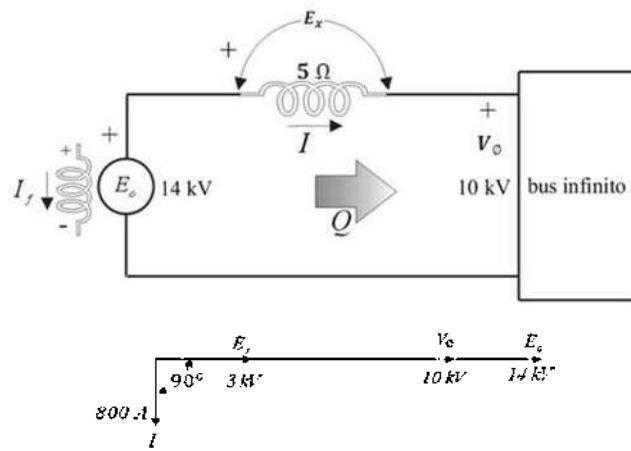
$$I = (E_o - V_\phi)/X_s \quad (2-35)$$

Cómo la reactancia síncrona es inductiva, la corriente está retrasada 90° respecto a E_x . Por lo tanto, la corriente está retrasada 90° respecto a V_ϕ , lo que significa que el generador ve el sistema como si fuera una reactancia inductiva. Por consiguiente cuando sobreexcitamos un generador síncrono, éste suministra potencia reactiva al bus infinito como se muestra en la figura 2-29b. La potencia reactiva se incrementa conforme aumentamos la corriente directa de excitación. Contrario a lo que pudiéramos esperar, es imposible hacer que un generador suministre potencia activa elevando su excitación.

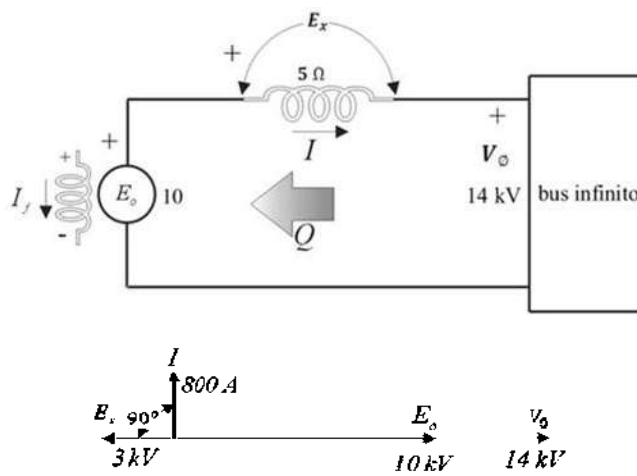
Si se disminuye la corriente de excitación para que E_o sea menor que V_ϕ . Como resultado, el fasor $E_x = E_o - V_\phi$ se vuelve negativo, por lo que apunta hacia la izquierda como se muestra en la figura 2-29c. Como siempre, la corriente $I = E_x/X_s$ está retrasada 90° respecto a E_x . Sin embargo, esto adelanta 90° a I respecto a V_ϕ , lo que significa que el alternador ve el sistema como si fuera un capacitor. Por consiguiente, cuando se subexcita un alternador, éste absorbe potencia reactiva del sistema. Esta potencia reactiva produce una parte del campo magnético requerido por la máquina; el resto es suministrado por la corriente de excitación I_f .



a)



b)

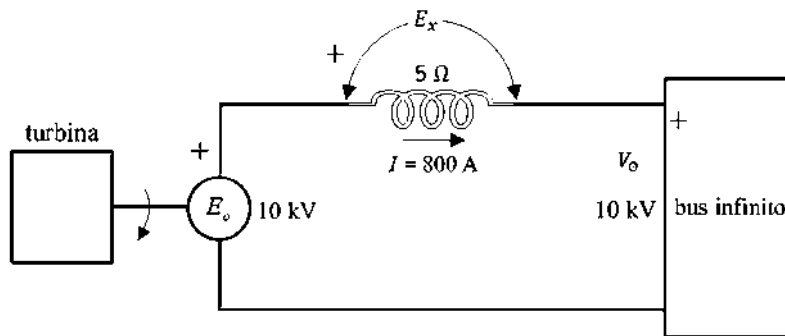


c)

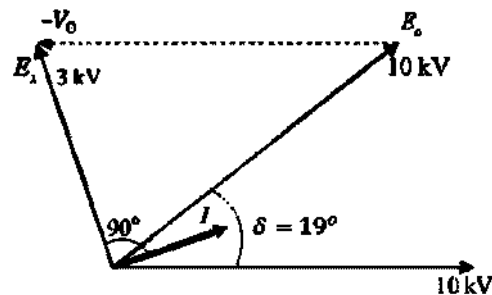
FIGURA 2-29. a) Generador que flota en un bus infinito. b) Generador sobreexcitado en un bus infinito. c) Generador subexcitado en un bus infinito.

2.15.2 Bus infinito, efecto de la variación del par o momento de torsión mecánico.

Volviendo a la situación con el generador síncrono flotando en la línea, donde E_o y V_ϕ son iguales y están en fase. Si abrimos la válvula del vapor de la turbina que impulsa el generador, el resultado inmediato es un incremento del par o momento de torsión mecánico como se muestra en la figura 2-30. El rotor se acelerará y, por consiguiente, E_o alcanzará su valor máximo un poco más pronto que antes. El fasor E_o se adelantará al fasor V_ϕ un ángulo de fase δ . Aunque ambos voltajes tienen el mismo valor, el ángulo de fase produce una diferencia de potencial $E_x = E_o - V_\phi$ a través de la reactancia síncrona.



a)



b)

FIGURA 2-30. a) Turbina que impulsa el generador. b) Diagrama fasorial que muestra el ángulo δ del par o momento de torsión.

Fluirá una corriente I (de nuevo con un retraso de 90° con respecto a E_x). Pero esta vez casi estará en fase con V_ϕ . Por lo tanto, alimenta potencia activa al sistema. Bajo la fuerza propulsora de la turbina, el rotor continuará acelerándose, el ángulo δ continuará divergiendo y la potencia eléctrica suministrada al sistema aumentará gradualmente. Sin embargo, en cuanto la potencia eléctrica suministrada al sistema sea igual a la potencia mecánica suministrada por la turbina, el rotor dejará de acelerarse. El generador funcionará nuevamente a velocidad síncrona y el ángulo δ del par o momento de torsión entre E_o y V_ϕ permanecerá constante.

Es importante entender que se crea una diferencia de potencial cuando dos voltajes iguales están desfasados. Por lo tanto, en la figura 2-30, existe una diferencia de potencial entre E_o y V_ϕ , aunque ambos voltajes tienen un valor de 10 kV.

2.15.3 Generador síncrono en paralelo con el bus infinito, en sus diferentes modos de operación.

Para entender el comportamiento de un generador que está conectado al bus infinito, se examina un sistema que conste de un generador y un sistema de potencia muy grande, ambos conectados en paralelo que están suministrando potencia a una carga. El motor primario del generador tiene un mecanismo regulador (reóstato), pero el campo se controla manualmente por medio de un resistor (llamado también reóstato).

Cuando se conecta un generador en paralelo con otro generador o con un sistema grande, *la frecuencia y voltaje en los terminales de todas las máquinas deben ser iguales*, debido a que sus conductores de salida están unidos.

Supóngase que el generador acaba de ser conectado en paralelo con el bus infinito de acuerdo con el procedimiento descrito en la sección 2.14.2. Entonces el generador estará “flotando” en la línea, suministrando una pequeña cantidad de la potencia real y muy poca o nada de la potencia reactiva.

Para asegurar que un generador se conecta en línea, el cual debe estar suministrando potencia en lugar de consumir potencia, se ajusta la frecuencia de la máquina en aproximación a un valor un poco mayor que la frecuencia del sistema en operación. Muchos generadores reales tienen disparadores de potencia inversa conectados a ellos, por lo que es imperativo que se conecten en paralelo con una frecuencia mayor que la del sistema en operación. Si un generador así comienza a consumir potencia, se desconectará de forma automática de la línea [2].

Después de conectarse el generador, *¿qué pasará si se incrementan los puntos de ajuste del mecanismo regulador?*, El efecto de este incremento es un desplazamiento hacia arriba en la frecuencia en vacío del generador. Debido a que la frecuencia del sistema no cambia (la frecuencia de un bus infinito no puede cambiar), se incrementa la potencia suministrada por el generador. Esto se muestra en el diagrama fasorial de la figura 2-31. Nótese en el diagrama fasorial que $E_o \sin \delta$ (que es proporcional a la potencia suministrada siempre y cuando V_ϕ permanezca constante) se incrementa, mientras que la magnitud de $E_o (= K\phi\omega)$ permanece constante debido a que tanto la corriente de campo I_f como la velocidad de rotación ω no cambian. Conforme los puntos de ajuste del mecanismo regulador se incrementan aún más, la frecuencia en vacío se incrementa y también la potencia suministrada por el generador. Conforme la potencia de salida se incrementa, E_o mantiene una magnitud constante mientras que $E_o \sin \delta$ sigue incrementándose.

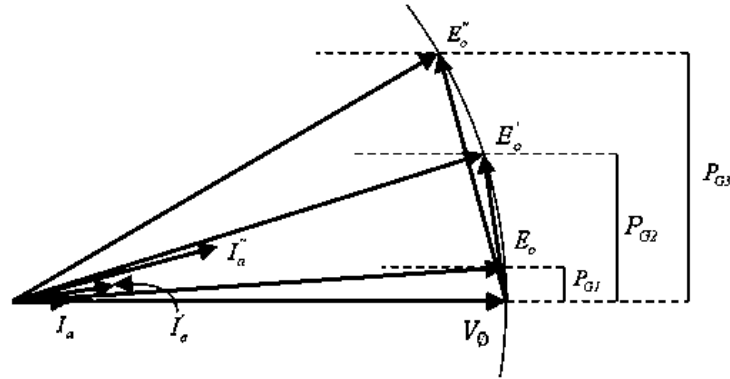


FIGURA 2-31. Diagrama fasorial, efecto del incremento en los puntos de ajuste del mecanismo regulador.

¿Qué sucede en el sistema si la potencia de salida del generador se incrementa hasta que excede la potencia que consume la carga, suponiendo que ambos están alimentando a una carga? Si esto sucede, la potencia extra generada fluye de regreso al bus infinito. Un bus infinito, por definición, puede consumir o suministrar cualquier cantidad de potencia sin cambiar la frecuencia, por lo que consume la potencia extra [2].

Después de ajustar la potencia real del generador en el nivel deseado, el diagrama es como el que se muestra en la figura 2-31. Nótese que en este momento el generador en realidad opera con un factor de potencia levemente en adelanto y suministra potencia reactiva negativa. Alternativamente, se puede decir que el generador consume potencia reactiva. ¿Cómo se puede ajustar el generador para que suministre cierta potencia reactiva Q al sistema? Esto se puede lograr por medio del ajuste de la corriente de campo de la máquina. Para entender por qué esta declaración es cierta, es necesario considerar las restricciones en la operación del generador en estas circunstancias.

La primera restricción en el generador es que la potencia debe permanecer constante cuando cambia I_f . La potencia que entra en un generador está dada por la ecuación $P_{entr} = \tau_{ind} \omega_m$. Ahora, el motor primario de un generador síncrono tiene una característica de par-velocidad para cualquier punto de ajuste del mecanismo regulador. Esta curva cambia sólo cuando varían los puntos de ajuste del mecanismo regulador. Debido a que el generador está unido a un bus infinito, su velocidad no puede cambiar. Si la velocidad del generador no cambia y los puntos de ajuste del mecanismo regulador no se cambian, la potencia suministrada por el generador debe permanecer constante.

Si la potencia suministrada se mantiene constante conforme cambia la corriente de campo, entonces las distancias proporcionales a la potencia en el diagrama fasorial ($I_a \cos \theta$ y $E_o \sin \delta$) no pueden cambiar. Cuando se incrementa la corriente de campo, se incrementa el flujo Φ y, por lo tanto, se incrementa $E_o = (K\Phi \uparrow \omega)$. Si se incrementa E_o , pero $E_o \sin \delta$ debe permanecer constante, entonces el fasor E_o debe “deslizarse” sobre la línea de potencia constante, como se observa en la figura 2-32. Debido a que V_θ es

constante, el ángulo $jX_s I_a$ cambia como se muestra en la figura, y, por lo tanto, cambian el ángulo y la magnitud de I_a . Nótese que como resultado se incrementa la distancia proporcional a $Q(I_a \sin \theta)$. En otras palabras, *el incremento en la corriente de campo en un generador síncrono que opera en paralelo con un bus infinito causa el incremento de la potencia reactiva de salida del generador.*

Para resumir, cuando un generador opera en paralelo con un bus infinito:

1. El sistema al que se conecta el generador controla la frecuencia y voltaje en los terminales del generador.
2. Los puntos de ajuste del mecanismo regulador del generador controlan la potencia real suministrada al sistema por el generador.
3. La corriente de campo en el generador controla la potencia reactiva suministrada al sistema por el generador.

Esta situación es muy parecida a la manera en que operan los generadores reales cuando se conectan a un sistema de potencia muy grande.

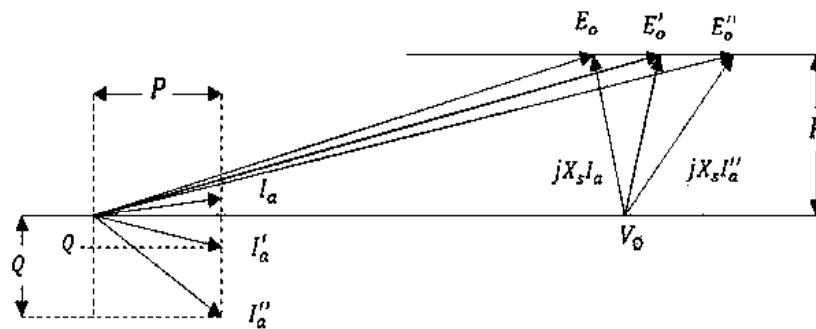


FIGURA 2-32. Efecto del incremento en la corriente de campo del mecanismo regulador en el diagrama fasorial de la máquina.

Supóngase también que el generador está en paralelo con la línea, pero en lugar de tener frecuencia un poco más elevada que el sistema en operación, tiene una frecuencia un poco más baja. Nótese que aquí la frecuencia en vacío del generador es menor que la frecuencia de operación del sistema. A esta frecuencia, la potencia suministrada por el generador es en realidad negativa. En otras palabras, cuando la frecuencia en vacío del generador es menor que la frecuencia de operación del sistema, el generador en realidad consume potencia eléctrica y funciona como un motor [2].

Ya conociendo las restricciones del generador síncrono, se analizarán todos los modos posibles de operación en las secciones 2.15.4, 2.15.5 y 2.15.6; con valores reales obtenidos físicamente en el laboratorio.

2.15.4 Generador Subexcitado; (valores experimentales)

Se dice que un generador opera en modo subexcitado cuando entrega potencia real (P) y consume potencia reactiva (Q) del bus infinito.

En la tabla 2.7 se muestra el comportamiento del generador síncrono operando a un factor de potencia 0.8 atrasado, variando la potencia aparente (S) hasta plena carga o nominal.

$$S_{nom} \text{ (potencia nominal de la máquina)} = 120 \text{ VA}$$

Tabla 2.7. Comportamiento de los parámetros del generador síncrono, (modo subexcitado).

$\%S_{nom}$	P	Q	S	I_a	V_ϕ	I_f	fp	δ
$\frac{1}{4}S$	24	-18	30	0.195	119.9	0.51	0.80	2.5
$\frac{1}{2}S$	48	-36	60	0.217	120.2	0.49	0.80	5
$\frac{3}{4}S$	72	-54	90	0.268	119.9	0.47	0.80	6.5
S	96	-72	120	0.332	120.2	0.46	0.80	10

Donde

$\%S_{nom}$ = por ciento de la potencia nominal de la máquina en (VA)

P = potencia real (W)

Q = potencia reactiva (VAR)

S = potencia aparente (VA)

I_a = corriente de armadura (A)

V_ϕ = voltaje de fase (V)

I_f = corriente de campo (A)

fp = factor de potencia

δ = separación entre V_ϕ y E_o (grados eléctricos)

2.15.5 Factor de potencia unitario; (valores experimentales)

La operación del generador síncrono a factor de potencia unitario se presenta cuando el generador entrega potencia real pura al bus infinito, es decir, no consume ni entrega potencia reactiva. Dicho de otra forma, el voltaje de fase generado por la máquina está en fase con la corriente de armadura de esa fase.

El comportamiento de los parámetros del generador cuando se varía la potencia aparente desde $\left(\frac{1}{4}S_{nom}\right)$ hasta la potencia aparente nominal (S_{nom}), se muestra en la tabla 2-8.

Tabla 2-8. Comportamiento de las variables del generador, para factor de potencia unitario.

$\%S_{nom}$	$P(W)$	$Q(VAR)$	$S(VAR)$	$I_a(A)$	$V_\phi(V)$	$I_f(A)$	fp	δ
$\frac{1}{4}S$	30	0	30	0.198	119.9	0.53	1	2.5
$\frac{1}{2}S$	60	0	60	0.224	119.7	0.55	1	3.5
$\frac{3}{4}S$	90	0	90	0.278	120	0.57	1	5
S	120	0	120	0.346	120	0.60	1	8.5

2.15.6 Generador sobreexcitado; (valores experimentales)

Cuando un *generador entrega potencia real (P) y reactiva (Q) al bus infinito* se dice que el generador está operando en modo sobreexcitado, los parámetros medidos se muestra en la tabla 2-9.

Para entender de forma más precisa lo que está sucediendo internamente con la máquina en los tres modos de operación, se recomienda hacer una comparación del comportamiento de los parámetros del generador síncrono en las tablas 2-7, 2-8 y 2.9. Las mediciones se han realizado para potencias aparentes iguales en los tres casos.

Tabla 2-9. Comportamiento de los parámetros del generador síncrono, para factor de potencia 0.8 adelantado.

$\%S_{nom}$	P	Q	S	I_a	V_ϕ	I_f	fp	δ
$\frac{1}{4}S$	24	18	30	0.208	120.3	0.57	0.80	1.5
$\frac{1}{2}S$	48	36	60	0.244	120.5	0.64	0.80	2
$\frac{3}{4}S$	72	54	90	0.301	120.2	0.67	0.80	2.5
S	96	72	120	0.372	120.2	0.71	0.8	5

2.15.7 Generador síncrono como reactor

El principal inconveniente que presentan las máquinas síncronas, es que necesitan una corriente continua (cc) para la excitación de las bobinas del rotor, pero en grandes instalaciones (Siderúrgicas), el avance de corriente que produce la máquina síncrona compensa parcialmente el retraso que determinan los motores asíncronos, mejorando con ello el factor de potencia general de la instalación, es decir, el motor produce sobre la red el mismo efecto que un banco de condensadores, el mismo aprovechamiento de esta propiedad, es la mayor ventaja de la máquina síncrona [1]. Otra utilidad donde estas máquinas se puede aplicar, es en los sistemas donde se encuentran presentes cargas de efecto capacitivo indeseables; Aunque en la práctica no es muy común encontrar sistemas de este tipo, puede darse el caso donde se tenga que usar estas máquinas para compensar el factor de potencia adelantado que generan las cargas capacitivas, ya que las máquinas síncronas puede también comportarse como un banco de inductores que compensan el adelanto de la corriente con respecto al voltaje del sistema en cuestión.

a) Reactor capacitivo; (valores experimentales)

La tabla 2-10 muestra el comportamiento de las variables cuando la máquina entrega al bus infinito potencia reactiva capacitiva (no potencia real), para diferentes niveles de potencia aparente nominal de la máquina.

Tabla 2-10. Comportamiento de las variables del generador (reactor capacitivo).

$\%S_{nom}$	$P(W)$	$Q(VAR)$	$S(VA)$	$I_a(A)$	$V_\phi(V)$	$I_f(A)$	fp	δ
$\frac{1}{4}S$	0	30	30	0.224	121.5	0.60	0.07	0.5
$\frac{1}{2}S$	0	60	60	0.274	121.48	0.65	0.05	1
$\frac{3}{4}S$	0	90	90	0.336	121.5	0.71	0.07	2
S	0	120	120	0.407	121.5	0.75	-0.01	3.5

b) Reactor inductivo; (valores experimentales)

En la tabla 2-11 se observa el comportamiento del reactor inductivo para diferentes niveles de potencia aparente. En esta condición el reactor se comporta como un inductor, dicho de otra forma, consume potencia reactiva capacitiva de la red.

Tabla 2-11. Reactor inductivo para niveles de potencia variables.

$\%S_{nom}$	$P(W)$	$Q(VAR)$	$S(VA)$	$I_a(A)$	$V_\phi(V)$	$I_f(A)$	fp	δ
$\frac{1}{4}S$	0	30	30	0.21	121.1	0.47	0.2	0.5
$\frac{1}{2}S$	0	60	60	0.252	121.2	0.41	0.01	1.5
$\frac{3}{4}S$	0	90	90	0.293	121.2	0.36	0.01	2.5
S	0	120	120	0.36	121.1	0.31	0.01	5

2.16 Generador síncrono en paralelo con otro generador

El circuito de la figura 2-33 es particularmente importante porque se encuentra en el estudio de generadores, motores síncronos y líneas de transmisión. En tales circuitos se interesa la potencia activa transmitida de una fuente A a una fuente B o viceversa.

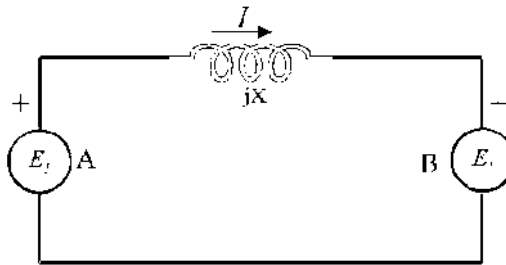


FIGURA 2-33. Flujo de potencia entre dos fuentes de voltaje.

Cuando un generador opera solo, las potencias real y reactiva (P y Q) suministradas por el generador son fijas, están restringidas a ser iguales a la potencia demandada por el sistema y los puntos de ajuste del mecanismo regulador y la corriente de campo varían la frecuencia y el voltaje en los terminales [2]. Cuando un generador opera en paralelo con un bus infinito, el bus infinito restringe a la frecuencia y al voltaje en los terminales a ser constantes y los puntos de ajuste del mecanismo regulador y la corriente de campo varían las potencias real y reactiva [2]. *¿Qué sucede cuando un generador síncrono se conecta en paralelo no con bus infinito, si no con otro generador del mismo tamaño? ¿Cuál será el efecto de cambiar los puntos de ajuste del mecanismo regulador y las corrientes de campo?*

En la figura 2-34, se puede ver el sistema resultante si se conecta un generador en paralelo con otro del mismo tamaño. En este sistema la restricción básica es que la suma de las potencias real y reactiva suministradas por los dos generadores deben ser iguales a la P y Q que demanda el sistema. La frecuencia del sistema no está restringida a ser constante ni

tampoco la potencia de un generador lo está. En este caso, la potencia total P_{tot} (que es igual a P_{carga}) está dada por

$$P_{tot} = P_{carga} = P_{G1} + P_{G2} \quad (2-36)$$

y la potencia reactiva total está dada por

$$Q_{tot} = Q_{carga} = Q_{G1} + Q_{G2} \quad (2-37)$$

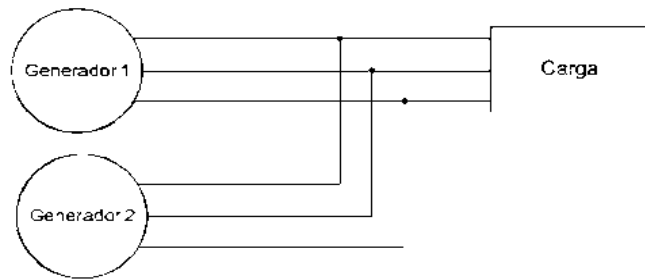


FIGURA 2-34. Generador síncrono conectado en paralelo con otra máquina del mismo tamaño.

¿Qué sucede si se incrementan los puntos de ajuste del gobernador de G_2 ? Recuerdese que la potencia total suministrada a la carga no debe cambiar. A la frecuencia original f_1 , la potencia suministrada G_1 y G_2 será mayor que la demanda de la carga, por lo que el sistema no puede continuar operando a la misma frecuencia que antes. De hecho, sólo hay una frecuencia a la que la suma de la potencia de salida de los dos generadores es igual a P_{carga} . Esa frecuencia f_2 es mayor que la frecuencia original de operación del sistema. A esa frecuencia, G_2 suministra más potencia que antes y G_1 suministra menos potencia que antes.

Por lo tanto, cuando los generadores operan juntos, un incremento en los puntos de ajuste del mecanismo regulador de uno de ellos

1. *Incrementa la frecuencia del sistema.*
2. *Incrementa la potencia suministrada por ese generador, a la vez que reduce la potencia suministrada por el otro.*

¿Qué sucede si se incrementa la corriente de campo de G_2 ? Cuando dos generadores operan juntos y se incrementa la corriente de campo de G_2 , sucede lo siguiente:

1. *Se incrementa el voltaje en los terminales del sistema.*
2. *Se incrementa la potencia reactiva Q suministrada por ese generador, a la vez que disminuye la potencia reactiva suministrada por el otro generador.*

Cuando dos generadores de tamaño similar operan en paralelo, el cambio en los puntos de ajuste del mecanismo regulador de uno de ellos cambia tanto la frecuencia del sistema

como la repartición de potencia entre ellos. Sería deseable ajustar sólo una de estas cantidades a la vez. *¿Cómo se puede ajustar la repartición de potencia independientemente de la frecuencia del sistema y viceversa?*

La respuesta es muy simple. El incremento en los puntos de ajuste del mecanismo regulador de un generador incrementa la potencia de la máquina y aumenta la frecuencia del sistema. La disminución en los puntos de ajuste del mecanismo regulador en el otro generador disminuye la potencia de la máquina y la frecuencia del sistema. Por lo tanto, para ajustar la repartición de potencia sin cambiar la frecuencia del sistema se deben *incrementar los puntos de ajuste del mecanismo regulador de un generador y simultáneamente disminuir los puntos de ajuste del mecanismo regulador del otro generador*. De manera similar, para ajustar la frecuencia del sistema sin cambiar la repartición de potencia, se deben *incrementar o disminuir simultáneamente ambos puntos de ajuste del mecanismo regulador*.

Los ajustes a la potencia y voltaje en los terminales funcionan de manera análoga. Para desplazar la repartición de la potencia reactiva sin cambiar V_T , se debe *incrementar simultáneamente la corriente de campo de un generador y disminuir la corriente de campo en el otro*. Para cambiar el voltaje en los terminales sin afectar la repartición de potencia reactiva se deben *incrementar o disminuir simultáneamente ambas corrientes de campo*.

En resumen, en el caso de dos generadores que operan juntos:

1. El sistema está restringido a que la potencia total suministrada por los dos generadores juntos sea igual a la cantidad consumida por la carga. Ni f_{sis} ni V_T están restringidos a ser constantes.
2. Para ajustar la repartición de potencia real entre los generadores sin cambiar f_{sis} , se deben incrementar los puntos de ajuste del mecanismo regulador en un generador al mismo tiempo que se disminuyen los puntos de ajuste en el mecanismo regulador del otro generador. La máquina cuyos puntos de ajuste del mecanismo regulador se incrementan alimentará mas carga.
3. Para ajustar f_{sis} sin cambiar la repartición de potencia real, se deben incrementar o disminuir simultáneamente los puntos de ajuste del mecanismo regulador de los generadores.
4. Para ajustar la repartición de potencia reactiva entre generadores sin cambiar V_T , se debe incrementar de manera simultánea la corriente de campo de un generador a la vez que se disminuye la corriente de campo en el otro. La máquina cuya corriente de campo se incrementa alimentará mas carga.
5. Para ajustar V_T sin cambiar la repartición de potencia reactiva, deben incrementar o disminuir de manera simultánea las corrientes de campo de ambos generadores.

Para comprobar de forma práctica lo dicho, se determinarán las cargas resistivas (R), resistivas inductivas (RL) y resistivas capacitivas (RC); para alimentarlas con los generadores en paralelo tal y como se muestra en la figura 2-35.

En esta figura se desea alimentar a diferentes tipos de carga con los generadores en paralelo; con ello se pretende mostrar el comportamiento de ambos generadores conforme el generador G_2 empieza a suministrar potencia a la carga partiendo de que G_1 en principio suministra la potencia total demandada por la carga y luego G_2 entra en operación suministrando potencia como se muestra en las tablas presentadas por las secciones 2.16.1, 2.16.2 y 2.16.3.

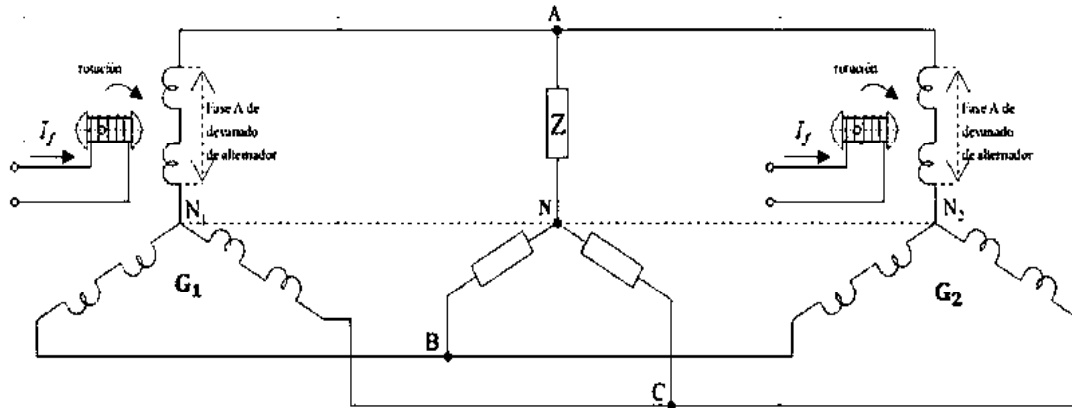


FIGURA 2-35. Generadores en paralelo alimentando una carga conexión estrella.

Los generadores en paralelo, por la naturaleza de su estudio y análisis, es necesario fijar una potencia en específico como referencia en donde se toma como punto de partida en el que G_1 alimenta a la carga, mientras G_2 flota en la línea. Se disminuye manualmente la potencia que suministra G_1 a la carga, mientras que en G_2 se incrementa para seguir manteniendo la potencia demandada.

Dada las circunstancias, que para determinadas potencias generadas es muy difícil encontrar una combinación de cargas que consuma esa cantidad de energía, se opta por elegir primero las cargas que consuman ciertas cantidades de energía y luego generar la cantidad demandada con G_1 y G_2 . La restricción única de las cargas es que la cantidad de energía demandada por estas se encuentren dentro de los límites de capacidad de los generadores, para una operación segura de las máquinas. Se procederá entonces a determinar estas cargas.

2.16.1 Generador subexcitado (carga RC); (valores experimentales)

La conexión (Y) de las cargas (figura 2-35) y la combinación de las cargas RC en paralelo, con valores: $R = 600 \, \Omega$ y $X_L = 1200 \, \Omega$ con corrientes iguales a 0.2 y 0.1 A, respectivamente; el equivalente de estas cargas consumen una potencia de 24 W y 12 VAR por fase, estas cantidades de potencia son fundamentadas por las expresiones y cálculos matemáticos siguientes.

$$P_{\phi} = \frac{V^2}{R} = \frac{(120 \text{ V})^2}{600 \Omega} = 24 \text{ W}$$

$$Q_{\phi} = \frac{V^2}{X_c} = \frac{(120 \text{ V})^2}{1200 \, \Omega} = 12 \text{ VAR}$$

La potencia aparente por fase, se obtiene con la ecuación:

$$S_{\phi} = \sqrt{(P_{\phi})^2 + (Q_{\phi})^2}$$

Sustituyendo valores, se tiene

$$S_{\phi} = \sqrt{(24)^2 + (12)^2}$$

$$S_{\phi} = \mathbf{26.833 \text{ VA}}$$

Para obtener la potencia trifásica solo se multiplica por 3 la potencia aparente por fase y esta será la cantidad de potencia a generar para la carga trifásica equilibrada, el producto se obtiene en la expresión siguiente.

$$S_{3\phi} = 3(26.833) \text{ VA}$$

$$S_{3\phi} = \mathbf{80.45 \text{ VA}}$$

Teóricamente se necesitará 80.45 VA para abastecer a la carga, esta cantidad es la potencia trifásica a generar entre las máquinas.

Del triángulo de potencias se puede conocer el factor de potencia ya que se conoce la potencia real y reactiva que demanda la carga.

$$P = S \cos(\theta) \quad \text{pero} \quad fp = \cos(\theta)$$

$$fp = \frac{P_{\phi}}{S_{\phi}} = \frac{24}{26.833} = 0.894$$

$$fp = \mathbf{0.894 \text{ (adelantado)}}$$

Los cálculos aquí realizados es sólo para darse una idea donde pueden estar los valores de los parámetros a medir físicamente en el sistema ya que la realidad difiere un poco a la teoría, la razón es muy simple; La impedancia de las cargas que se tienen en el laboratorio no son exactamente las especificadas en las placas y si a estos se le suman los errores de medición, la diferencia es aún más notorio.

La tabla 2-12 muestra el comportamiento real de G_1 y G_2 cuando ambos se manipulan para la repartición en el suministro de potencia, donde; G_2 aumenta la potencia que suministra a la carga, mientras que G_1 lo hace de forma descendente.

Las potencias presentadas en esta tabla son trifásicas, por la razón de que la generación es trifásica y la carga también es una carga trifásica equilibrada en estrella.

TABLA 2-12. Comportamiento de los parámetros de G_1 y G_2 para carga RC; G_2 aumenta la potencia que suministra a la carga, mientras que en G_1 disminuye.

$\%S_{nom(G1)}$	$\%S_{nom(G2)}$	P_1	P_2	Q_1	Q_2	S_1	S_2	I_{a1}	I_{a2}	$V_{\phi 1}$	$V_{\phi 2}$	I_{f1}	I_{f2}	fp_1	fp_2
71.63	0	75	0	42	0	85.96	0	0.257	0	123.5	123.5	0.54	0.60	0.88	0.49
48.1	23.58	51	24	27	15	57.71	28.30	0.185	0.12	126.4	126.4	0.58	0.62	0.88	0.86
36.91	36.91	39	39	21	21	44.29	44.29	0.15	0.14	125.9	125.9	0.58	0.62	0.86	0.88
17.91	54.1	3	54	9	36	9.49	64.9	0.112	0.178	132	132	0.66	0.69	0.9	0.84

Donde

$\%S_{nom(G1)}$ = por ciento de la capacidad nominal del generador 1

$\%S_{nom(G2)}$ = por ciento de la capacidad nominal del generador 2

P_1 = potencia real generada por G_1 (W)

P_2 = potencia real generada por G_2 (W)

Q_1 = potencia reactiva suministrada por G_1 (VAR)

Q_2 = potencia reactiva suministrada por G_2 (VAR)

S_1 = potencia aparente generada por G_1 (VA)

S_2 = potencia aparente generada por G_2 (VA)

I_{a1} = corriente de armadura de G_1 (A)

I_{a2} = corriente de armadura de G_2 (A)

$V_{\phi 1}$ = voltaje de fase de G_1 (V)

$V_{\phi 2}$ = voltaje de fase de G_2 (V)

I_{f1} = corriente de campo de G_1 (A)

I_{f2} = corriente de campo de G_2 (A)

fp_1 = factor de potencia de G_1

fp_2 = factor de potencia de G_2 .

Observaciones

I_{f1} : aumenta porque al disminuir la potencia reactiva que consume de la carga capacitiva, ahora tiene que aumentar I_{f1} para mantener la reactancia magnética.

I_{f2} : aumenta porque al aumentar la potencia del generador que entrega a la carga este provoca una disminución de la potencia reactiva, por lo tanto: para mantener Q se tiene que aumentar I_{f2} .

En consecuencia, las afirmaciones anteriores se concluye que:

Debido a que I_{f1} , I_{f2} **aumentan; por lo tanto, $V_{\phi 1}$ y $V_{\phi 2}$ aumentan.**

En la tabla se observa que la potencia real demandada por la carga se incrementa respecto al valor inicial, la justificación a este fenómeno es que la impedancia (carga) con el paso del tiempo consume mayor cantidad de energía ya que parte de ésta se convierte en calor.

2.16.2 Generador a factor de potencia unitario (carga R); (valores experimentales)

Se cuenta con una resistencia de 600Ω , 0.2 A y 1200Ω , 0.1 A ; el paralelo de estas dos resistencias hacen un equivalente de 400Ω , que en el circula 0.3 A .

Para una carga conectada en estrella se requiere de una resistencia de 400Ω por fase que consume una potencia de

$$P_{\phi} = \frac{V^2}{R} = \frac{(120)^2}{400} = 36 \text{ W}$$

$\therefore$

La potencia trifásica que demanda la carga es de:

$$P_{3\phi} = 3(36 \text{ W})$$

$$P_{3\phi} = 108 \text{ W}$$

El comportamiento de los generadores se muestra en la tabla 2-13

TABLA 2-13. Comportamiento de los parámetros de G_1 y G_2 para carga puramente resistiva (R); G_2 aumenta la potencia que suministra a la carga mientras que G_1 disminuye la potencia que entrega a la carga.

$\%S_{nom(G1)}$	$\%S_{nom(G2)}$	P_1	P_2	Q_1	Q_2	S_1	S_2	I_{a1}	I_{a2}	$V_{\phi 1}$	$V_{\phi 2}$	I_{f1}	I_{f2}	fp_1	fp_2
87.5	0	105	0	0	0	105	0	0.287	0	120	0	0.61	0	1	0
67.5	21.5	81	25.8	0	0	81	25.8	0.243	0.126	120	120	0.60	0.59	1	1
44	45	52.8	54	0	0	52.8	54	0.171	0.17	120	120	0.60	0.59	1	1
21.5	67.5	25.8	81	0	0	25.8	81	0.104	0.23	120	120	0.60	0.89	1	1

2.16.3 Generador sobreexcitado (Carga RL); (valores experimentales)

Se cuenta con una carga resistiva de 600Ω en la cual circula 0.2 A y una inductiva de 1200Ω que en ella circula 0.1 Amperes ; el paralelo de estas cargas consumen en total 24 W y 12 VAR , resultados que se obtienen con los cálculos que a continuación se muestran:

$$P_{\phi} = \frac{V^2}{R} = \frac{(120 \text{ V})^2}{600 \Omega} = 24 \text{ W}$$

$$Q_{\phi} = \frac{V^2}{X_L} = \frac{(120 \text{ V})^2}{1200 \Omega} = 12 \text{ VAR}$$

$$S_{\phi} = \sqrt{(24)^2 + (12)^2}$$

$$S_{\phi} = 26.833 \text{ VA}$$

La potencia trifásica a generar es:

$$S_{3\phi} = 3(26.8328)$$

$$S_{3\phi} = 80.5 \text{ VA}$$

$$P = S \cos(\theta) \quad \text{pero} \quad fp = \cos(\theta)$$

El factor de potencia de la carga es:

$$fp = \frac{P_{\phi}}{S_{\phi}} = \frac{24}{26.833} = 0.8944$$

$$fp = 0.894 \text{ (atrasado)}$$

El comportamiento de G_1 con G_2 con estas cargas se muestra en la tabla 2-14.

TABLA 2-14. Comportamiento de los parámetros de G_1 y G_2 para carga RL; G_2 aumenta la potencia que suministra a la carga mientras que G_1 disminuye la potencia que entrega a la carga.

$\%S_{nom(G1)}$	$\%S_{nom(G2)}$	P_1	P_2	Q_1	Q_2	S_1	S_2	I_{a1}	I_{a2}	$V_{\phi 1}$	$V_{\phi 2}$	I_{f1}	I_{f2}	fp_1	fp_2
69.325	0	75	0	36	0	83.19	0	0.226	0	121.2	121.2	0.62	0	0.9	0
50.31	21.36	54	24	27	9	60.37	25.63	0.19	0.118	121.5	121.5	0.62	0.60	0.9	0.95
35.79	33.54	39	36	18	18	42.95	40.25	0.15	0.134	121.2	121.2	0.57	0.61	0.9	0.9
16.76	50.31	18	54	9	27	20.13	60.374	0.092	0.18	121.7	121.7	0.53	0.62	0.89	0.92

2.17 Obtención de las curvas de capacidad del motor síncrono

Los límites de calentamiento del estator y rotor, junto con cualquier otro límite de un generador síncrono, se pueden expresar en forma gráfica por medio del diagrama de capacidad también conocido como curva de capacidad del generador. Un diagrama de capacidad es una gráfica de la potencia compleja $S = P + jQ$. Esta fórmula se obtiene del diagrama fasorial del generador, asumiendo que V_ϕ es constante en el voltaje nominal de la máquina [2].

La figura 2-36a muestra el diagrama fasorial de un generador síncrono que opera con un factor de potencia en retraso y a voltaje nominal. Se dibuja un grupo ortogonal de ejes en el diagrama con origen en la punta de V_ϕ y en volts. En este diagrama, el segmento vertical AB tiene una longitud de $X_S I_a \cos \theta$ y el segmento horizontal OA tiene una longitud de $X_S I_a \sin \theta$.

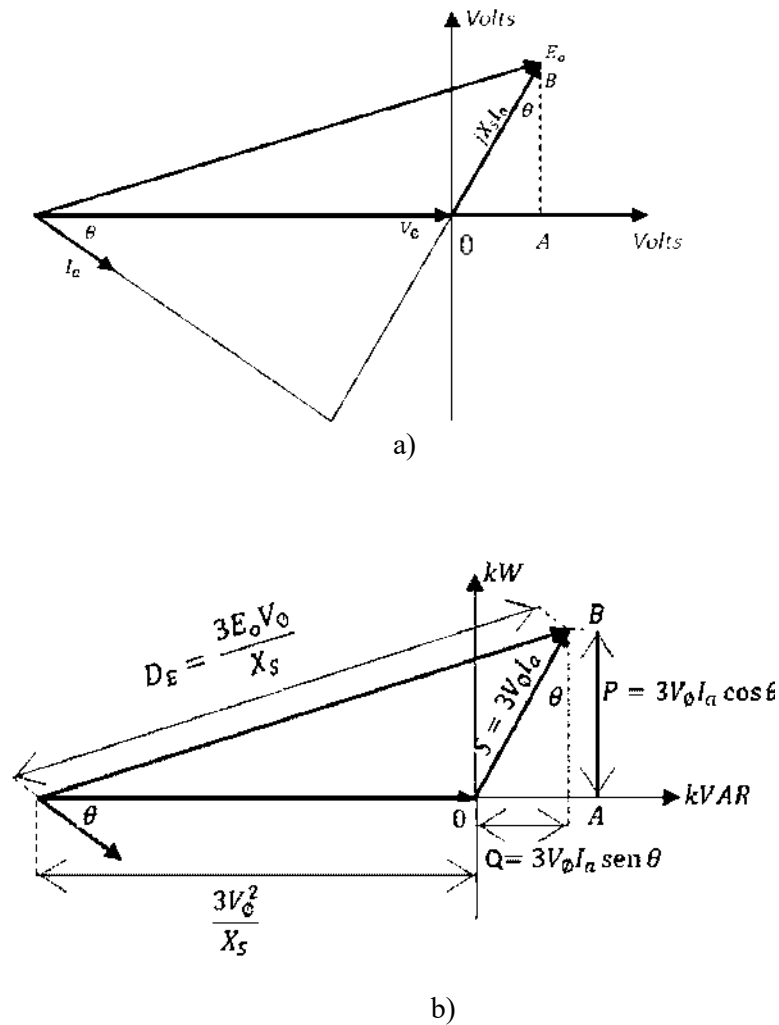


FIGURA 2-36. Determinación de la curva de capacidad de un generador síncrono. a) Diagrama fasorial del generador; b) Sus unidades de potencia correspondiente.

La potencia real de salida del generador está dada por

$$P = 3V_{\phi}I_a \cos \theta \quad (2-38)$$

La potencia reactiva de salida está dada por

$$Q = 3V_{\phi}I_a \sin \theta \quad (2-39)$$

Y la potencia aparente de salida está dada por

$$S = 3V_{\phi}I_a \quad (2-40)$$

Por lo que los ejes horizontal y vertical de esta figura se pueden volver a calibrar en términos de las potencias real y reactiva como se muestra en la figura 2-36b. El factor de conversión requerido para cambiar la escala de volts a voltamperes (unidades de potencia) es $3V_{\phi}/X_s$:

$$P = 3V_{\phi}I_a \cos \theta = \frac{3V_{\phi}}{X_s}(X_s I_a \cos \theta) \quad (2-41)$$

Y

$$Q = 3V_{\phi}I_a \sin \theta = \frac{3V_{\phi}}{X_s}(X_s I_a \sin \theta) \quad (2-42)$$

En los ejes del voltaje, el origen del diagrama fasorial se encuentra en $-V_{\phi}$ en el eje horizontal, por lo que el origen en el diagrama de potencia está en

$$Q = \frac{3V_{\phi}}{X_s}(-V_{\phi}) \quad (2-43)$$

$$Q = -\frac{3V_{\phi}^2}{X_s} \quad (2-44)$$

La corriente de campo es proporcional al flujo de la máquina y el flujo es proporcional a $E_o = K\phi\omega$. La longitud correspondiente a E_o en el diagrama de potencia es

$$D_E = -\frac{3E_o V_{\phi}}{X_s} \quad (2-45)$$

La corriente en el inducido I_a es proporcional a $X_s I_a$ y la longitud correspondiente a $X_s I_a$ en el diagrama de potencia es $3V_{\phi}I_a$.

La curva de capacidad final de un generador síncrono se muestra en la figura 2-37. Es una gráfica de P y Q , con la potencia real P en el eje horizontal y la potencia reactiva Q en

el eje vertical. Las líneas de corriente constante en el inducido I_a aparecen como líneas de $S = 3V_\phi I_a$ constante, que son círculos concéntricos alrededor del origen. Las líneas de corriente de campo constante corresponden a las líneas de E_o constante, que se muestran como círculos de magnitud $3E_o V_\phi / X_S$ con su centro en el punto

$$Q = - \frac{3V_\phi^2}{X_S} \quad (2-46)$$

El límite de corriente del inducido aparece como el círculo correspondiente a I_a nominal o kilovoltamperes nominal y el límite de la corriente de campo aparece como un círculo que corresponde a I_f nominal o E_o nominal. **Cualquier punto que se encuentre dentro de ambos círculos es un punto de operación seguro para el generador [2].**

También se pueden mostrar otras restricciones en el diagrama, como la potencia máxima del motor primario. En la curva de capacidad figura 2-37 se observa que también refleja la potencia máxima del motor primario o el elemento que realiza el trabajo mecánico.

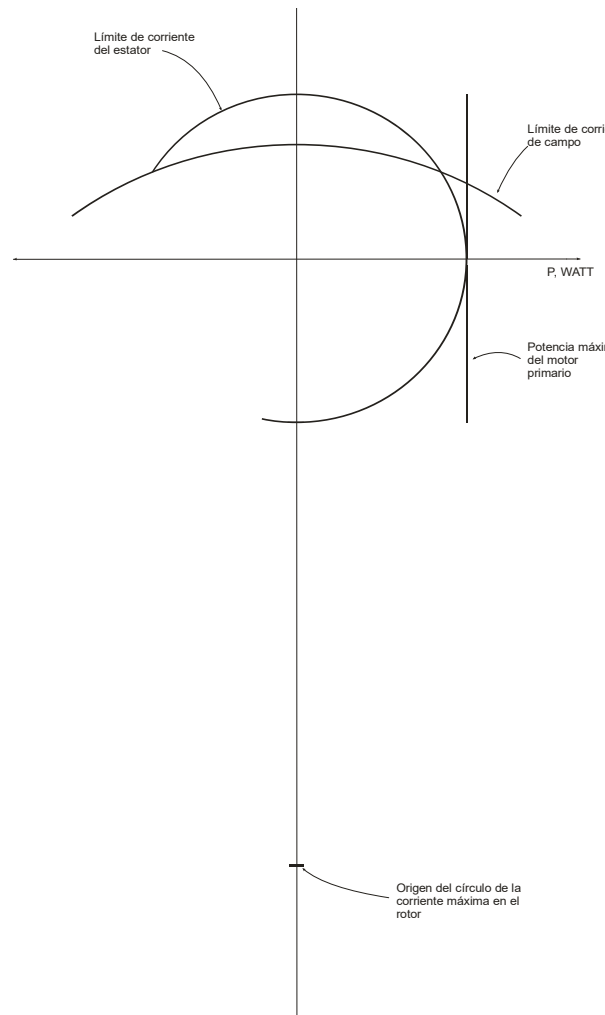


FIGURA 2-37. Curva de capacidad resultante de un generador síncrono.

En resumen, se pueden establecer los siguientes límites de funcionamiento:

1. Límite dado por la máxima intensidad del inducido I_a . Como X_s es constante, este límite se puede representar por una circunferencia de radio igual a $X_s I_a$.
2. El segundo límite, es también de origen térmico, dado por la máxima intensidad de excitación en el devanado inductor. A dicho valor le corresponde igualmente un valor máximo de la fem en vacío E_f , que se puede representar por una circunferencia de radio $E_{f\text{máx}}$ y con centro en 0.
3. Un tercer límite impuesto por la máxima potencia de la turbina. Si despreciamos los efectos de la resistencia de armadura(inducido), esta potencia máxima se representa con una línea recta paralela al eje Q. Éste se trata de un límite mecánico, que depende de variables no eléctricas y que tampoco es estrictamente constante. Por ejemplo, si la turbina es hidráulica, la potencia máxima depende de la altura hidráulica disponible en el salto, que a su vez influye en el rendimiento de la turbina. Si se trata de una central de vapor, dicha potencia máxima es función del máximo salto entálpico disponible en el ciclo Rankine, que a su vez depende de la temperatura en el condensador. Por tanto, puede variar en unos pocos puntos porcentuales entre verano e invierno [4].
4. Es un límite impuesto por el criterio de estabilidad estática.

2.17.1 Obtención de la curva de capacidad para una máquina síncrona real; (valores experimentales)

Obtención de la curva de capacidad de una máquina síncrona con las características que se enuncia a continuación.

Un generador síncrono de 4 polos, 208 volts, 60 Hz conectado en estrella, tiene el valor nominal de 120 VA con un factor de potencia de 0.8 en retraso. Su reactancia síncrona es de 97.115Ω por fase. Este generador está conectado a una máquina de CD capaz de suministrar hasta $\frac{1}{4}$ HP (186.5 watts). El primotor es capaz de suministrar el trabajo mecánico tal que el generador opera a su capacidad nominal.

⇒ Dibuje la curva de capacidad de este generador incluyendo el límite de potencia del motor primario.

Solución

Se puede calcular la corriente máxima en el generador con la ecuación

$$S_{nom} = 3V_{\phi, nom} I_{a, máx} \quad (2-47)$$

El voltaje de fase de esta máquina es

$$V_{\phi} = \frac{V_T}{\sqrt{3}} = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120 \text{ V}$$

Por lo que la corriente máxima en el inducido es

$$I_{a,m\acute{a}x} = \frac{S_{nom}}{3V_{\phi}} = \frac{120 \text{ VA}}{3(120)} = 0.333 \text{ A}$$

Con ésta información se puede obtener la curva de capacidad de la máquina

La potencia máxima permitida es 120 VA, que especifica la corriente máxima segura en el inducido. El centro de los círculos E_o está en

$$Q = -\frac{3V_{\phi}^2}{X_s}$$

$$Q = -\frac{3(120 \text{ V})^2}{97.115 \Omega} = -444.833 \text{ VAR}$$

El tamaño máximo de E_o está dado por

$$\begin{aligned} E_o &= V_{\phi} + jX_s I_a \\ &= 120\angle 0^\circ \text{ V} + (j97.115 \Omega)(0.333\angle -36.87^\circ \text{ A}) \\ &= 120\angle 0^\circ \text{ V} + (97.115\angle 90^\circ)(0.333\angle -36.87^\circ) \\ &= 120\angle 0^\circ \text{ V} + 32.34\angle 53.13^\circ \text{ V} \\ &= 120 \text{ V} + (19.4 + j25.872) \text{ V} \\ &= (139.4 + j25.872) \text{ V} = \mathbf{141.78\angle 10.51^\circ \text{ V}} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la magnitud de la distancia proporcional a E_o es

$$\begin{aligned} D_E &= \frac{3E_o V_{\phi}}{X_s}, \text{ de la ecuación (2-45)} \\ &= \frac{3(141.78 \text{ V})(120 \text{ V})}{97.115 \Omega} = 525.571 \text{ VAR} \\ &= \mathbf{525.571 \text{ VAR}} \end{aligned}$$

Estos valores están representados en la figura 2-38.

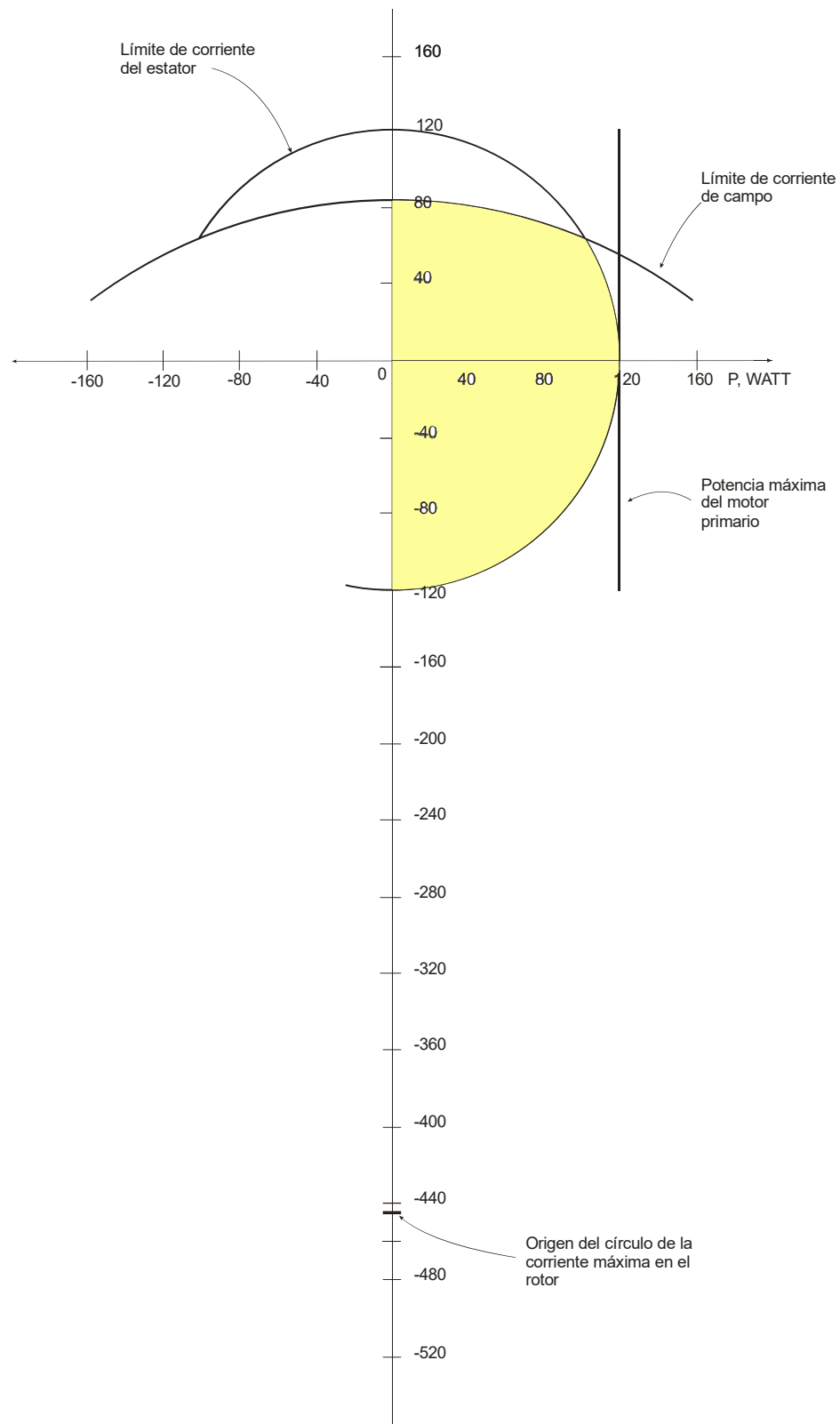


FIGURA 2-38. Curva de capacidad de un generador síncrono real.

CAPITULO 3

Motor Síncrono

3.0 Introducción

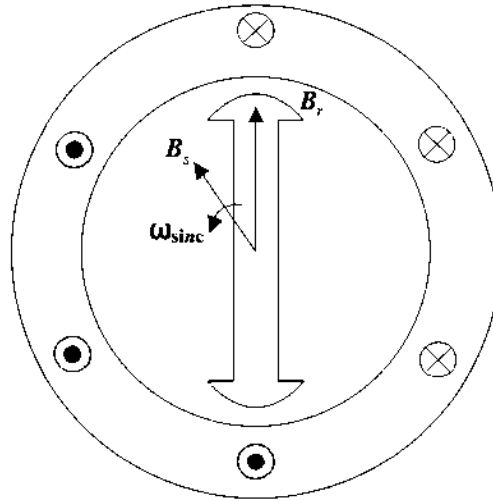
Los generadores síncronos descritos en el capítulo anterior pueden operar también como motores. Cuando operan como motores (conectándolos a una fuente trifásica), reciben el nombre de *motores síncronos*. Como el nombre lo dice, los motores síncronos funcionan en sincronismo con el campo rotatorio. Por consiguiente, la velocidad de rotación está asociada con la velocidad de la fuente. Como la frecuencia es fija, la velocidad del motor permanece constante, independientemente de la carga o voltaje de la línea trifásica. Sin embargo, los motores síncronos se utilizan mucho no sólo porque funcionan a velocidad constante si no porque poseen otras características de operación únicas. En este capítulo se estudiarán estas características.

La capacidad de la mayoría de los motores síncronos oscila entre 150 kW (200 hp) y 15 MW (20 000 hp) y giran a velocidades que van de 150 a 1800 r/min [1]. Por lo tanto, estas máquinas se utilizan principalmente en la industria pesada. En el otro extremo del espectro de potencia se encuentran los motores síncronos utilizados en dispositivos de control y relojes eléctricos.

3.1 Principios básicos de la operación de los motores síncronos

Para entender el concepto básico de un motor síncrono véase la figura 3-1, que muestra un motor síncrono de dos polos. La corriente de campo I_f del devanado del rotor produce un campo magnético en estado estacionario B_r . Se aplica un conjunto de voltajes trifásicos al estator de la máquina, lo que produce un flujo de corriente trifásica en los devanados; el conjunto de corrientes trifásicas en el inducido de un devanado produce un campo magnético giratorio uniforme B_s . Por lo tanto hay dos campos magnéticos presentes en la máquina y *el campo del rotor B_r tenderá a alinearse con el campo del estator B_s* , igual que dos imanes tenderán a alinearse si se colocan uno cerca del otro. Debido a que el campo magnético del estator gira, el campo magnético del rotor (y el rotor mismo) tratará constantemente de alcanzarlo. Mientras más grande sea el ángulo entre los dos campos magnéticos (hasta un ángulo máximo), mayor será el par en el rotor de la máquina. El principio básico de la operación de los motores síncronos es que el rotor “persigue” el campo magnético giratorio del estator alrededor de un círculo y nunca lo alcanza [2].

Debido a que un motor síncrono es igual físicamente a un generador síncrono, todas las ecuaciones básicas de velocidad, potencia y par se utilizan también para los motores síncronos [2].



$$\tau_{ind} = k B_r \times B_s = \text{sentido contrario al de las manecillas del reloj}$$

FIGURA 3-1. Diagrama esquemático de un motor síncrono de dos polos.

3.2 Circuito equivalente de un motor síncrono

Un motor síncrono es igual en todos los aspectos a un generador síncrono, excepto en que la dirección del flujo de potencia es la opuesta. Ya que se invierte la dirección del flujo de potencia en la máquina, se puede esperar que la dirección del flujo de corriente en el estator del motor también se invierta. Por lo tanto, el circuito equivalente de un motor síncrono es igual al circuito equivalente de un generador síncrono, *excepto* en que la dirección de referencia de la corriente de armadura I_a está *invertida* [2]. En la figura 3-2a se muestra el circuito equivalente completo resultante y en la figura 3-2b se puede observar el circuito equivalente por fase. Igual que como se especificó antes, las tres fases del circuito equivalente pueden estar conectadas tanto en estrella (Y) como en delta (Δ).

Debido al cambio en la dirección de I_a , cambia también la ecuación de la ley de voltaje de Kirchhoff para el circuito equivalente. La nueva ecuación de la ley de voltaje de Kirchhoff es

$$V_\phi = E_o + jX_S I_a + R_a I_a \quad (3-1)$$

ó

$$E_o = V_\phi - jX_S I_a - R_a I_a \quad (3-2)$$

Donde

V_ϕ = voltaje de fase

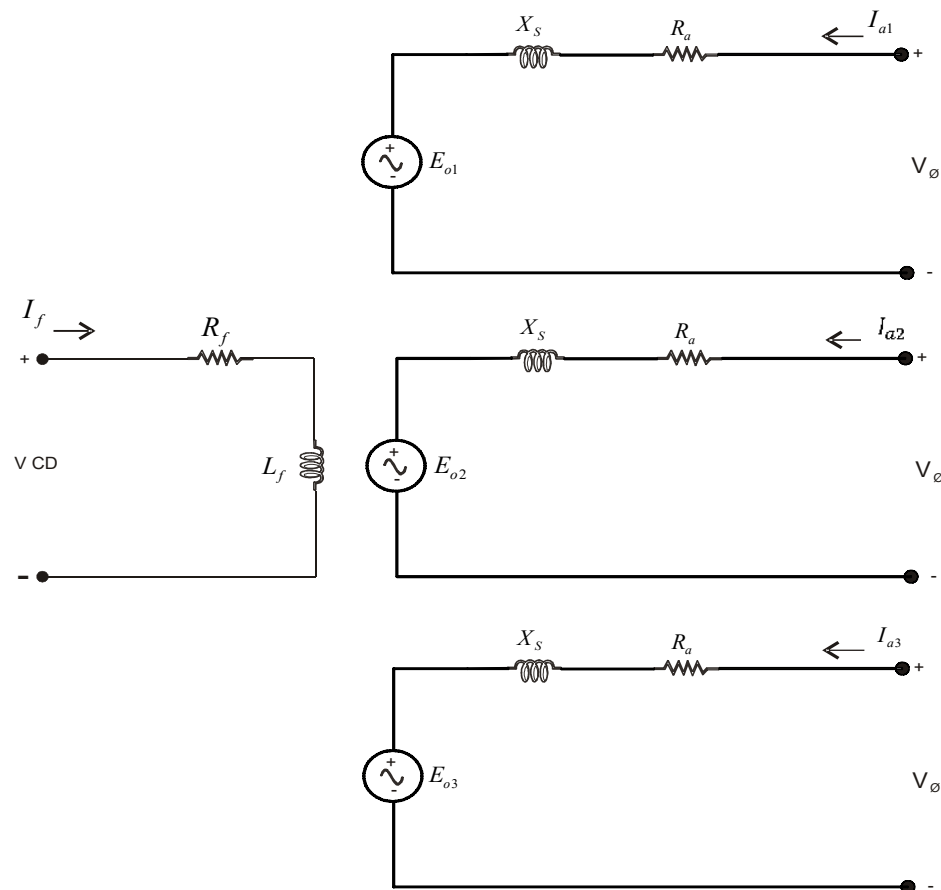
E_o = voltaje inducido

jX_S = reactancia síncrona

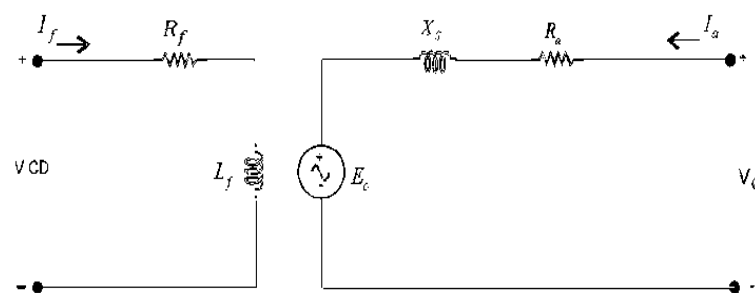
I_a = corriente de armadura

R_a = resistencia de armadura

Ésta es exactamente la misma ecuación que para el generador, excepto que se invierte el signo en el término de la corriente.



a)



b)

FIGURA 3-2. a) Circuito equivalente trifásico de un motor síncrono, b) Circuitos equivalentes por fase.

3.3 Motores síncronos desde la perspectiva del campo magnético

Para comenzar a entender la operación de un motor síncrono, es preciso dar otra mirada a un generador síncrono conectado a un bus infinito; sírvase leer la sección 2-15, para comprender la operación como generador la máquina aquí citada.

Después de comprenderse la sección 2-15, ahora, supóngase en lugar de que el eje gire en el sentido del movimiento, el motor principal súbitamente perdiera potencia y comenzara a frenar el eje de la máquina. ¿Qué pasaría con la máquina? El rotor pierde velocidad debido al obstáculo en su eje y se retrasa con respecto al campo magnético de la máquina (véase la figura 3-3a). Conforme el rotor, y por lo tanto $\mathbf{B}_r$, pierde velocidad y queda detrás de $\mathbf{B}_{net}$ la operación de la máquina cambia súbitamente. Por la ecuación (2-13), cuando $\mathbf{B}_r$ está detrás de $\mathbf{B}_{net}$, se invierte la dirección del par inducido y va en sentido contrario al de las manecillas del reloj. En otras palabras, el par de la máquina tiene la dirección del movimiento y la máquina funciona como un motor. El ángulo del par δ en incremento tiene como resultado un par cada vez más grande en dirección de la rotación, hasta que a la larga el par inducido del motor es igual al par de la carga en su eje. En ese momento, la máquina opera en estado estacionario y a velocidad síncrona una vez más, pero ahora como motor.

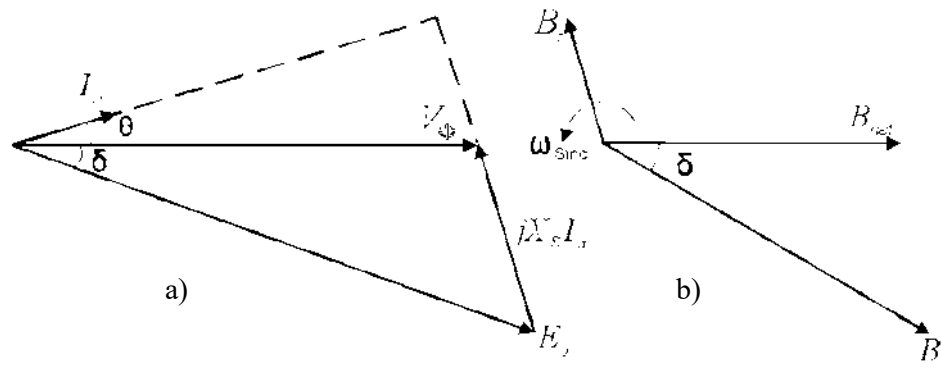


FIGURA 3-3. a) Diagrama fasorial de un motor síncrono, b) Diagrama de campo magnético correspondiente.

El diagrama fasorial correspondiente a la operación como generador se muestra en la figura 2-9 y el diagrama fasorial correspondiente a la operación como motor se puede ver en la figura 3-3a. La razón de que la cantidad $jX_s I_a$ apunte de V_ϕ a E_o en el generador y de E_o a V_ϕ en el motor, es que se invirtió la dirección de referencia de I_a en la definición del circuito equivalente del motor. La diferencia básica entre la operación como motor y como generador de las máquinas síncronas se puede observar tanto en el diagrama de campo magnético como en el diagrama fasorial. En un generador, E_o está delante de V_ϕ y B_r está delante de B_{net} . En un motor, E_o está detrás de V_ϕ y B_r está detrás de B_{net} . En un motor el par inducido tiene la dirección del movimiento y en un generador el par inducido es un par contrario, en sentido contrario a la dirección del movimiento.

3.4 Operación del motor síncrono en estado estacionario

Esta sección se estudia la operación de los motores síncronos en diferentes condiciones de carga y corriente de campo, así como también la forma de corregir el factor de potencia en estos motores. Por simplicidad, generalmente se desprecia en esta discusión la resistencia de armadura de los motores [2]. Sin embargo, se tomará en cuenta en algunos de los cálculos numéricos.

3.5 Curva característica par-velocidad de los motores síncronos

Los motores síncronos suministran cargas que son básicamente dispositivos de velocidad constante. Es normal que estén conectados a sistemas de potencia mucho más grandes que los motores individuales, por lo que los sistemas de potencia parecen buses infinitos para los motores. Esto quiere decir que el voltaje en los terminales y la frecuencia del sistema serán constantes sin importar la cantidad de potencia que consuma el motor. La velocidad de rotación del motor está asociada a la frecuencia eléctrica aplicada, por lo que la velocidad del motor será constante sin importar la carga como se expresa en la ecuación 3-3. En la figura 3-4 se muestra la curva característica par-velocidad. La velocidad en estado estacionario del motor es constante desde vacío hasta el par máximo que el motor puede suministrar (*llamado par máximo*), por lo que la regulación de velocidad del motor es de 0%. El par inducido se muestra en la ecuación 3-4 y 3-5.

$$n_{sc} = \frac{120f}{p} \quad (3-3)$$

$$\tau_{ind} = k \mathbf{B}_r \mathbf{B}_{net} \sin \delta \quad (3-4)$$

$$\tau_{ind} = \frac{3V_\phi E_o \sin \delta}{\omega_m X_s} \quad (3-5)$$

Siendo

$$\delta = \sin^{-1} \frac{X_s P_{3\phi}}{3V_\phi E_o} \quad (3-6)$$

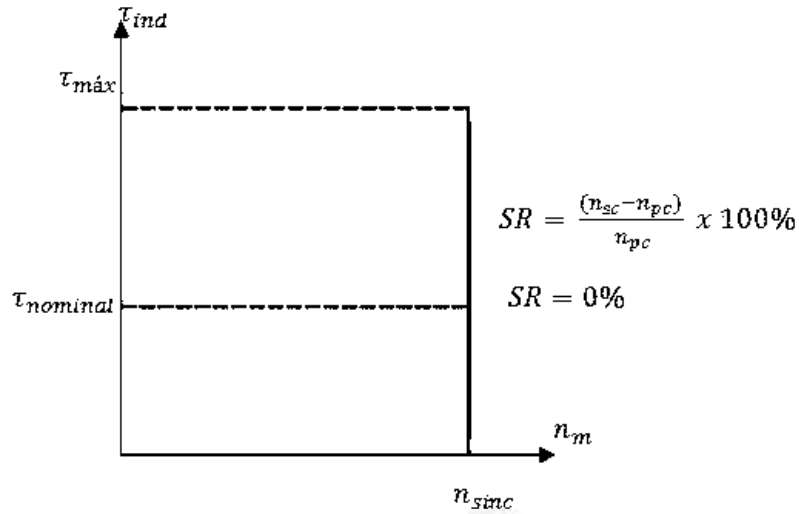


FIGURA 3-4. Características par-velocidad de un motor síncrono. Puesto que la velocidad del motor es constante, su regulación de velocidad es cero.

El par máximo se presenta cuando $\delta = 90^\circ$. Sin embargo, los pares normales a plena carga son mucho menores que éste. De hecho, el par máximo es por lo regular tres veces el par de la máquina a plena carga.

Cuando el par en el eje de un motor síncrono excede el par máximo, el rotor no puede seguir unido al campo magnético del estator y el campo magnético neto. En cambio, el rotor se comienza a retrasar con relación a ellos. Conforme el rotor pierde velocidad, el campo magnético del estator “lo rebasa” varias veces y la dirección del par inducido en el rotor se invierte con cada rebase. El enorme par resultante oscila primero hacia un lado y luego hacia el otro y provoca que todo el motor vibre con fuerza. La pérdida de sincronización una vez que excede el par máximo se conoce como *deslizamiento de polos*, cuando la máquina encuentra en estas condiciones se requiere la acción inmediata del operador o de un sistema automático para sacarlo en operación para evitar que éstas sufran daños físicos.

El par máximo del motor está dado por

$$\tau_{max} = k B_r B_{net} \quad (3-7)$$

ó

$$\tau_{ind} = \frac{3V_\phi E_o}{\omega_m X_s} \quad (3-8)$$

Estas ecuaciones indican que mientras más grande sea la corriente de campo (y por lo tanto E_o) más grande será el par máximo del motor. Por lo tanto, hay una ventaja en la estabilidad cuando se opera el motor con una gran corriente de campo o un gran E_o .

3.6 Efecto de los cambios de carga en los motores síncronos

Si se fija una carga al eje de un motor síncrono, el motor desarrollará suficiente par como para mantener el motor y su carga a velocidad síncrona. *¿Qué pasa si la carga en un motor síncrono cambia?*

Para encontrar la respuesta a esta pregunta, examínese un motor síncrono que opera inicialmente con un factor de potencia en adelanto, tal como se muestra en la figura 3-5, si se incrementa la carga en el eje del motor, el rotor comenzará a perder velocidad. Conforme pierde velocidad, el ángulo del par δ se hace más grande y se incrementa el par inducido. Este incremento en el par inducido a la carga acelera de nuevo el motor y éste vuelve a girar a velocidad síncrona, pero con un ángulo de par δ más grande.

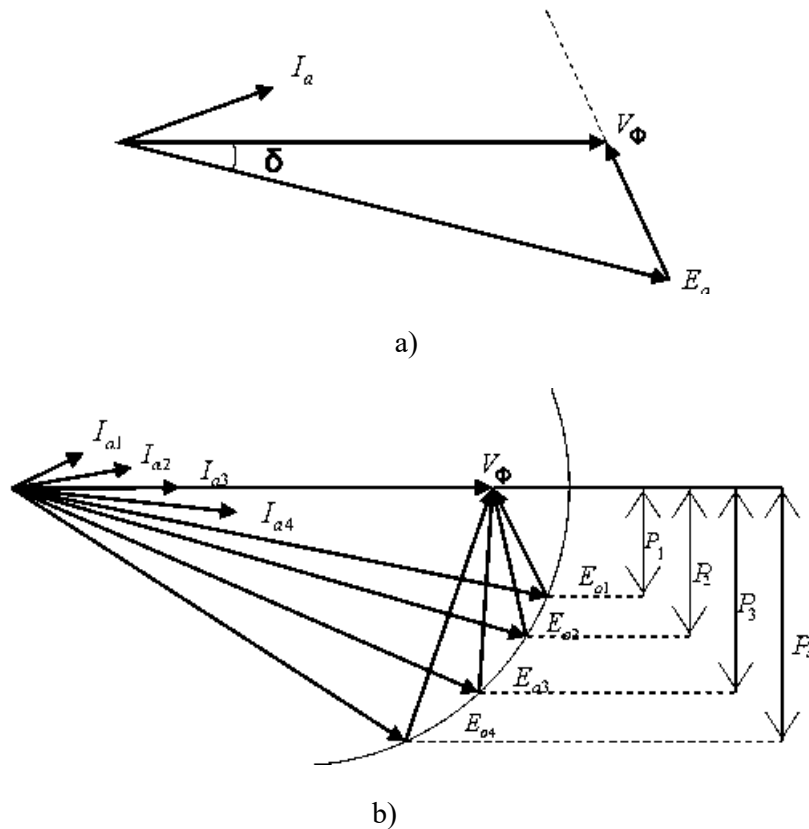


FIGURA 3-5 a) Diagrama fasorial de un motor que opera con un factor de potencia en adelanto;

b) Efecto de incrementar la carga en la operación del motor síncrono.

¿Cuál es la forma del diagrama fasorial durante este proceso? Para encontrar las restricciones sobre ésta máquina, examínese las restricciones sobre la máquina durante un cambio en la carga. La figura 3-5a muestra el diagrama fasorial del motor antes de que se incrementen las cargas. El voltaje interno generado E_o es igual a $K\phi\omega$ y, por lo tanto, *sólo*

depende de la corriente de campo en la máquina y de la velocidad de ésta. La velocidad está restringida a ser constante en función de la fuente de potencia de entrada y, debido a que no se ha tocado el circuito de campo, también es constante la corriente de campo. Por lo tanto $|E_o|$ debe ser constante cuando la curva varía. Se incrementarán las distancias proporcionales a la potencia ($E_o \sin \delta$ e $I_a \cos \theta$), pero la magnitud de E_o debe ser constante. Se mueve hacia abajo cada vez más, se debe incrementar la cantidad $jX_s I_a$ para llegar de la punta de E_o hasta V_ϕ y, por lo tanto, también se incrementa la corriente en el inducido I_a . Nótese que el ángulo θ del factor de potencia también cambia, cada vez está menos en adelanto y más en retraso.

3.7 Valores experimentales obtenidos para un motor síncrono

En esta sección se obtendrán valores experimentales utilizando equipo eléctrico como la máquina síncrona y un electrodinamómetro, así como, equipos de medición utilizados en las prácticas de laboratorio de máquinas eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana.

Las características del equipo eléctrico utilizados son:

a) Máquina síncrona:

- Potencia nominal = 175 W = 0.235 hp
- Corriente de armadura = 0.8 A
- Voltaje de línea = 208 V
- Corriente de campo = 0.6 A

b) Electrodinamómetro:

- Fuente: 120 V, 2 A, 60 Hz
- Par: 0-27 lbf-in
- Velocidad: 0-500 rpm

La conexión de las máquinas se muestra en la figura 3-6

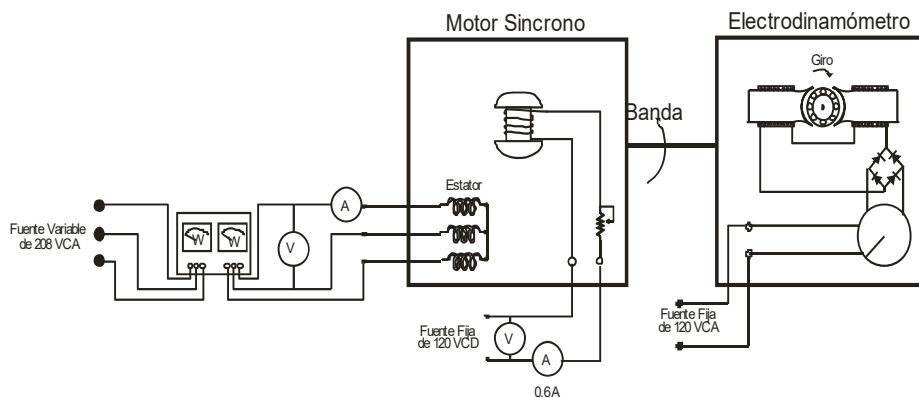


FIGURA 3-6. Conexión física de la máquina síncrona, con una carga en el eje (electrodinamómetro).

3.8 Efecto de los cambios de carga; (valores experimentales)

Los valores que se muestran a continuación es el efecto de los cambios de carga obtenidos de la máquina síncrona como motor.

Partiendo de que el motor síncrono opera a la mitad de su potencia nominal, se puede empezar determinando el par que tendrá el motor en la flecha para ese por ciento de su capacidad nominal. Mediante la ecuación 3-9, que define la potencia de salida en caballos de fuerza (hp) en función del par aplicado al motor a velocidad constante

$$P_{sal} = \frac{\tau \omega (1.59)}{100,000} \quad (3-9)$$

Donde

τ = par mecánico en lbf_in

P_{sal} = potencia de salida en el eje del motor en hp

ω = velocidad de la máquina en rpm

Despejando τ en la ecuación 3-9 se tiene

$$\tau = \frac{(P_{sal})(100,000)}{\omega(1.59)} \quad (3-10)$$

Sustituyendo valores en la siguiente expresión

$$P_{sal} = \frac{1}{2} P_{nom} \text{ de la máquina}$$

$$\tau = \frac{\left(\frac{1}{2} * 0.235 \text{ hp}\right) (100,000)}{1800(1.59)}$$

$$\tau = 4.106 \text{ lbf_in}$$

Este es el par que se aplicará en el eje del motor síncrono para analizar el efecto de los cambios de carga.

Observe el comportamiento de los parámetros, como: par(τ), corriente de armadura(I_a), corriente de campo(I_f) del motor síncrono en la tabla 3-1.

Tabla 3-1. Efecto de incremento de carga

$Par(\tau)$	I_a	I_f	V_ϕ	$P_{3\phi,entr}$	$Q_{3\phi}$	$S_{3\phi}$	fp	ω	E_o	δ
0	0.363	0.66	120	24	15(entr)	28.30	0.8(ad)	1800	102.56	3.59°
1.03	0.377	0.66	120	54	6(entr)	39.46	0.98(ad)	1800	101.2	5.58°
2.05	0.428	0.66	120	87	0	72	1	1800	96.65	10.82°
3.08	0.47	0.66	120	108	6(cons)	93.19	0.98(atras)	1800	92.77	14.61°
4.11	0.504	0.66	120	126	9(cons)	111.36	0.8	1800	89.37	18.22°

Para una mejor apreciación del comportamiento observe y analice el diagrama fasorial mostrado en la figura 3-7.

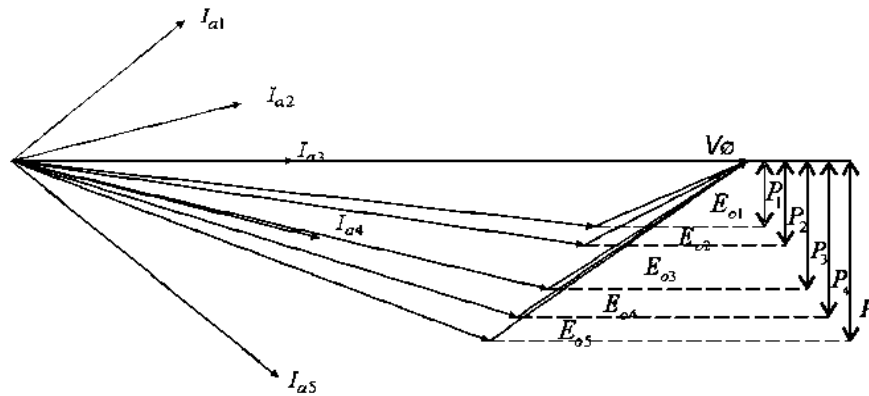


FIGURA 3-7. Diagrama fasorial del motor síncrono, efecto del incremento de la carga en su operación.

E_o y δ se obtuvieron de las ecuaciones (3-2) y (3-6) respectivamente

En estas ecuaciones se ha despreciado la resistencia de armadura para simplificar los cálculos, esta resistencia es muy pequeña en relación a la reactancia síncrona de la máquina; otra razón de su omisión es para generalizar los cálculos matemáticos ya que en máquinas de gran tamaño y capacidad, la resistencia del inducido es muy pequeña.

Observaciones

1. Para un incremento de carga existe un incremento en la corriente de armadura (I_a) de la máquina.
2. La corriente de campo se mantiene constante.
3. Aumenta la potencia real consumida por la máquina.
4. En principio el motor entrega potencia reactiva a la red, conforme aumenta la carga se revierte la situación, ahora consume de ella.
5. Empieza operando con un factor de potencia adelantado, se aproxima a 1 para cierta cantidad de carga a la vez que se atrasa al seguir incrementándose ésta en el eje de la máquina.
6. Al aumentar la carga en el eje decrece el voltaje inducido (E_o).
7. Se acrecenta el ángulo de potencia (δ) cuando la carga lo hace de la misma forma.

Conclusiones

En teoría, como lo describen varios libros de texto de máquinas eléctricas, para corriente de campo constante (I_f) el voltaje inducido (E_o) debe mantenerse constante cuando existe un aumento o disminución de la carga en el eje del motor.

Compárese la figura 3-5b con la figura 3-7 ó los valores de E_o en la tabla 3-1. La diferencia es que los valores de E_o en la figura 3-7 obtenidos de forma experimental de la máquina no es constante, **¿porqué?, ¿hay un error en la medición?**, La respuesta a estas preguntas se da a continuación.

En los libros de texto idealizan algunos valores para lograr una mejor representación gráfica como el caso de los diagramas fasoriales o simplemente para simplificar la explicación de los cambios en estos parámetros. La razón del decrecimiento del voltaje inducido es que al aumentar la carga se incrementa el ángulo eléctrico δ y por consiguiente aumenta el par ejercido por la máquina para seguir manteniendo la velocidad síncrona, para lograr estos cambios y sobre todo el aumento de potencia del motor se requiere de una mayor cantidad de reactivos para la magnetización. Este último está fundamentado por el triángulo de potencias, donde $P = 3V_\phi I_a \cos \theta$ y $\cos \theta = fp$ que a su vez este depende de la potencia reactiva.

Otra razón por la cual varía la corriente de campo I_f es por la distorsión del campo magnético del entrehierro debida a la corriente que fluye en el estator, llamada *reacción de inducido*. Este efecto, normalmente el más grande; ocurre cuando gira el rotor de un generador síncrono, se induce un voltaje E_o en los devanados del estator del generador. Si se añade una carga a los terminales del generador, la corriente fluye. Pero el flujo de corriente de un estator trifásico produce su propio campo magnético en la máquina. Este campo magnético del estator distorsiona el campo magnético original del rotor y altera el voltaje de fase resultante. A este efecto se le llama *reacción del inducido* porque la corriente del inducido (estator) afecta el campo magnético que lo produjo en primera instancia.

3.9 Efecto de los cambios de corriente de campo en los motores síncronos

Se ha estudiado cómo un cambio en la carga en el eje de un motor síncrono afecta al motor. Hay otra cantidad de un motor síncrono que se puede ajustar: *su corriente de campo*. *¿Qué efecto tiene un cambio en la corriente de campo en los motores síncronos?*

Para encontrar la respuesta a esta pregunta, examínese la figura 3-8. La figura 3-8a muestra un motor síncrono que opera inicialmente con un factor de potencia en retraso. Ahora, increméntese su corriente de campo y obsérvese el resultado en el motor. Nótese que *un incremento en la corriente de campo incrementa la magnitud de E_o* , pero no afecta

la potencia real suministrada al motor. La potencia mecánica suministrada por el motor sólo cambia cuando cambia el par en la carga del eje. Puesto que un cambio en I_f no afecta la velocidad del eje n_m y debido a que la carga en el eje no cambia, la potencia real suministrada no cambia. Por supuesto, V_ϕ también es constante debido a que la fuente de potencia que alimenta el motor lo mantiene constante. Las distancias proporcionales a la potencia en el diagrama fasorial ($E_o \sin \theta$ e $I_a \cos \theta$) deben permanecer constantes. Cuando se incrementa la corriente de campo, E_o debe incrementarse, pero sólo lo puede lograr por medio de un deslizamiento sobre la línea de la potencia constante. Este efecto se muestra en la figura 3-8b.

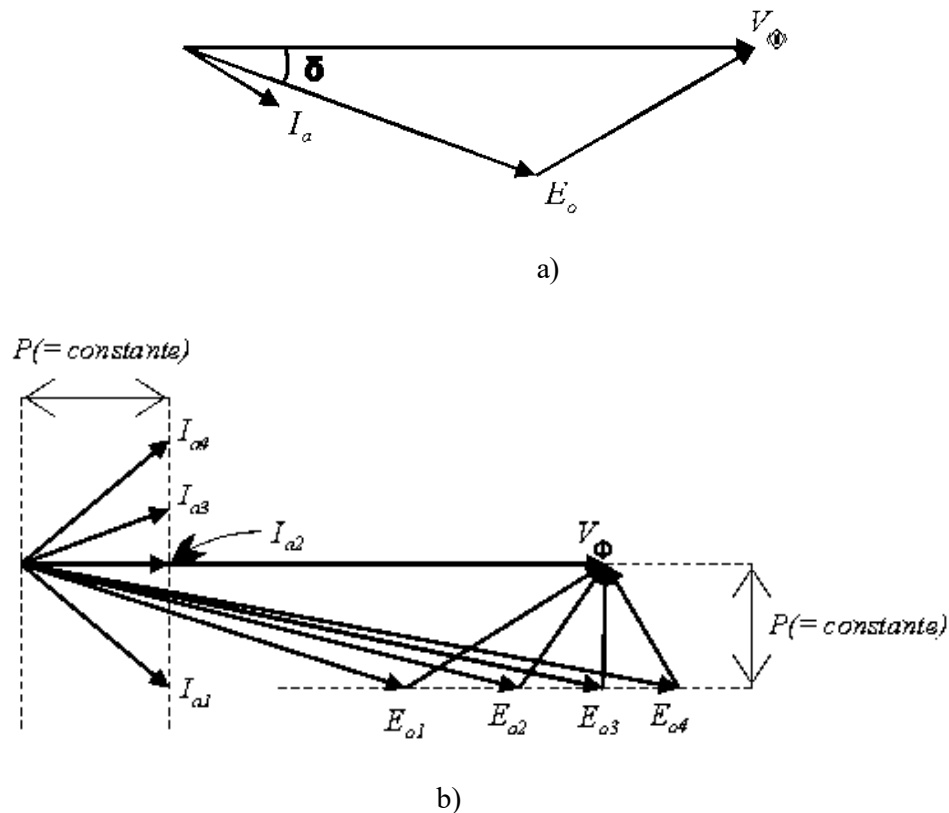


FIGURA 3-8. a) Motor síncrono que opera en un factor de potencia en retraso, b) Efecto del incremento en la corriente de campo en la operación del motor.

Nótese que conforme se incrementa el valor de E_o , la magnitud de la corriente en el inducido I_a primero disminuye y luego se incrementa de nuevo. Con un E_o bajo, la corriente en el inducido está en retraso y el motor es una carga inductiva. Actúa como una combinación de inductor y resistor y consume potencia reactiva Q . Conforme se incrementa la corriente de campo, la corriente en el inducido a la larga se alinea con V_ϕ y el motor parece puramente resistivo. Si se incrementa la corriente de campo aún más, la corriente en el inducido está en adelante y el motor se vuelve una carga capacitiva. Ahora actúa como una combinación de capacitor y resistor, consume potencia reactiva negativa $-Q$ o, alternativamente, suministra potencia reactiva Q al sistema.

3.10 Efecto de los cambios de corriente de campo; (valores experimentales)

Operando el motor síncrono en las mismas condiciones que en el caso anterior se observa el comportamiento de los parámetros en la tabla 3-2.

Tabla 3-2. Efecto del incremento de la corriente de campo en la operación del motor con carga.

$Par(\tau)$	I_f	I_a	V_ϕ	$P_{3\phi}$	$Q_{3\phi}$	$S_{3\phi}$	fp	ω	E_o	δ
4.11	0.38	0.499	120	138	78(cons)	158.518	0.86(atras)	1800	71.54	31.36
4.11	0.41	0.48	120	135	54	145.4	0.93(atras)	1800	73.385	29.75
4.11	0.44	0.472	120	135	36	139.718	0.97	1800	74.162	29.41
4.11	0.47	0.471	120	135	18	136.195	0.99	1800	74.259	29.37
4.11	0.50	0.465	120	132	9	132.31	1	1800	74.842	28.41
4.11	0.51	0.465	120	132	3	132.034	1	1800	74.842	28.41
4.11	0.53	0.464	120	129	6(entr)	129.139	1	1800	74.939	27.67
4.11	0.56	0.482	120	129	30	132.442	0.98(adel)	1800	73.191	28.39
4.11	0.59	0.49	120	129	42	135.665	0.95	1800	72.414	28.72
4.11	0.62	0.504	120	129	60	142.271	0.90	1800	71.054	29.32
4.11	0.65	0.523	120	129	72	147.733	0.86	1800	69.209	30.19

El comportamiento de los parámetros del motor en vacío se presenta en la tabla 3-3

Tabla 3-3. Efecto del incremento de la corriente de campo del motor cuando este opera en vacío.

$Par(\tau)$	I_f	I_a	V_ϕ	$P_{3\phi}$	$Q_{3\phi}$	$S_{3\phi}$	fp	ω	E_o	δ
0	0.38	0.353	120	51	84(cons)	98.27	0.47(atras)	1800	85.72	9.24
0	0.41	0.341	120	51	75	90.7	0.54(atras)	1800	86.884	9.11
0	0.44	0.314	120	51	51	72.125	0.70	1800	89.506	8.84
0	0.47	0.304	120	48	42	63.78	0.73	1800	90.48	8.23
0	0.50	0.294	120	45	24	51	0.88	1800	91.45	7.63
0	0.53	0.294	120	42	6	42.426	0.99	1800	91.45	7.12
0	0.545	0.292	120	42	0	42	1	1800	91.642	7.1
0	0.56	0.299	120	42	9 (entr)	42.953	0.99	1800	90.963	7.16
0	0.59	0.312	120	42	27	49.93	0.80	1800	89.70	7.26
0	0.62	0.334	120	42	42	59.397	0.67	1800	87.564	7.43
0	0.65	0.349	120	42	51	66.068	0.61	1800	86.107	7.56

Para una mejor comprensión de los valores reales de la tabla 3-2, observe y analice el diagrama fasorial en la figura 3-9 así como también el comportamiento de la corriente de campo (I_f) contra la corriente de armadura (I_a), llamado también **curva V** del motor síncrono de la figura 3-10.

Nota: en la figura 3-9 sólo se están representando los puntos, considerados como necesarios e importantes en la tabla 3-2.

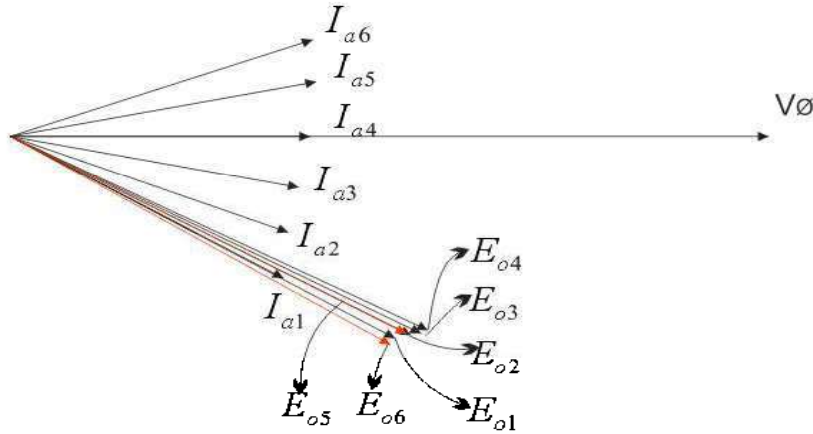


FIGURA 3-9. Efecto del incremento de carga, en la operación del motor.

3.11 Curvas en V de la máquina síncrona

Esta gráfica se llama *curva en V del motor síncrono*, por la obvia razón de que tiene forma de V. Hay muchas curvas en V que corresponden a diferentes niveles de potencia real. Para cada curva, la corriente mínima del inducido se presenta con un factor de potencia unitario cuando sólo se suministra al motor potencia real. En cualquier otro punto de la curva se suministra alguna cantidad de potencia reactiva, ya sea al motor o desde el motor. Para corrientes de campo *menores* que el valor que resulta en la mínima I_a , la corriente del inducido está en retraso y consume Q . Para corrientes de campo *mayores* que el valor que resulta en la mínima I_a , la corriente del inducido está en adelanto y suministra Q al sistema de potencia como lo haría un capacitor. Por lo tanto, si se controla la corriente de campo de un motor síncrono, se puede controlar *la potencia reactiva* suministrada o consumida por el sistema de potencia.

Cuando la proyección del fasor E_o sobre V_ϕ ($E_a \cos \delta$) es *más corta* que V_ϕ , el motor síncrono tiene una corriente en retraso y consume Q . Debido a que la corriente de campo es pequeña en esta situación, se dice que el motor está *subexcitado*. Por otro lado, cuando la proyección de E_o sobre V_ϕ ($E_a \cos \delta$) es *más larga* que V_ϕ , el motor síncrono tiene una corriente en adelanto y suministra Q al sistema de potencia. Debido a que la corriente de campo es grande en esta situación, se dice que el motor está *sobreexcitado*. En la figura 3-8 se muestran los diagramas fasoriales que ilustran estos conceptos. La figura 3-10 y 3-11 se muestra una gráfica de I_a e I_f del motor síncrono en condiciones de carga y en vacío; los datos que aquí se grafican se tomaron de las tablas 3-2 y 3-3 respectivamente.

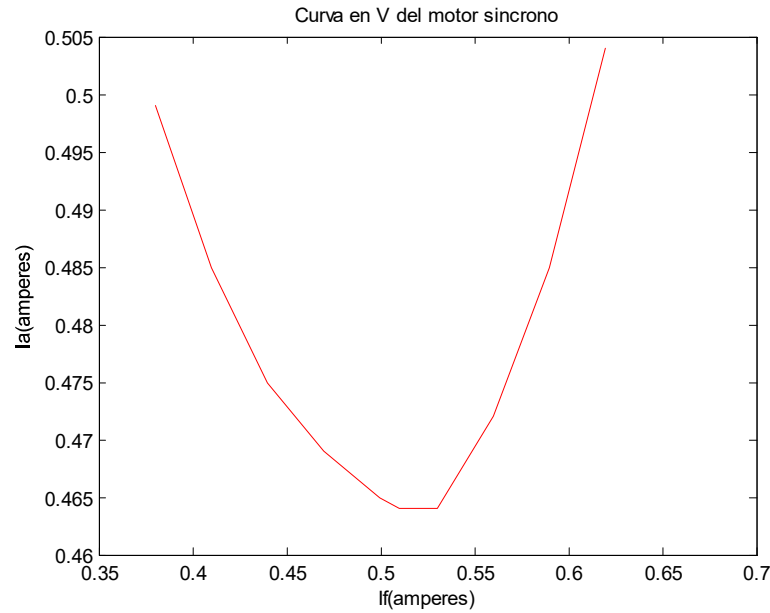


FIGURA 3-10. Curva en V del motor síncrono, operando con carga.

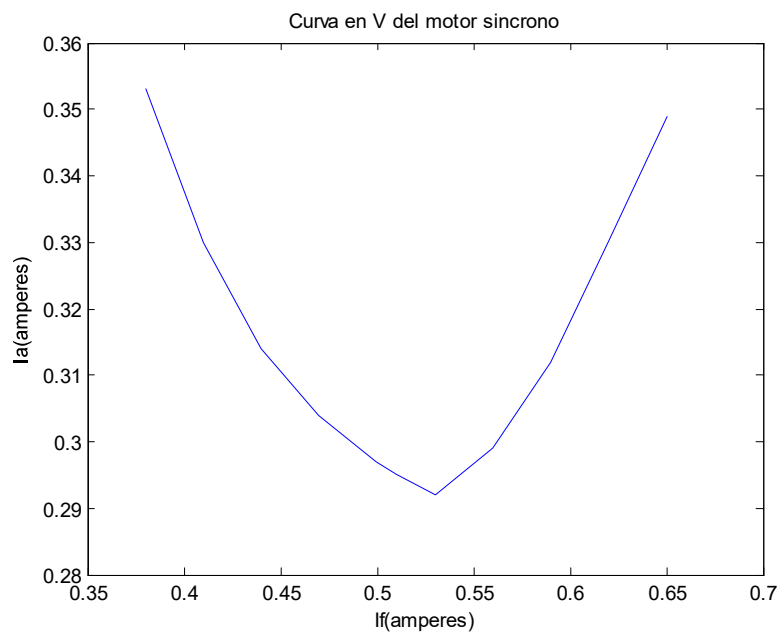


FIGURA 3-11. Curva en V del motor síncrono, operando en vacío.

Una observación a este apartado se presenta en la tabla 3-2. Se muestran los valores de E_o , en donde se aprecia que el voltaje inducido es mínimo cuando el factor de potencia es unitario. Recuerde que; cuando el factor de potencia es igual a 1 ó aproximado a 1 como en la tabla 3-2, la potencia reactiva presente en el sistema es mínima.

CAPÍTULO 4

Conclusiones, Observaciones y Trabajos Futuros

4.0 Conclusiones

El desarrollo de los capítulos de este trabajo se ha realizado de forma cuidadosa tanto en la redacción de los párrafos como en las mediciones realizadas durante la adquisición de los valores experimentales, tales que estos contienen el error mínimo para obtener el resultado esperado.

Se considera que el objetivo del proyecto se ha cubierto satisfactoriamente, tal que los estudiantes y lectores tienen la capacidad de: describir la estructura, interpretar formulas y diagramas de operación en condiciones estables, analizar el comportamiento de las máquinas síncronas bajo condiciones de operación diferentes. Además, son consientes de las restricciones y limitaciones del análisis cuantitativo respecto al cualitativo.

4.0.1 Conclusiones Generales

Una de las estrategias fundamentales que está implementando el gobierno mexicano para enfrentar la crisis económica mundial; es la creación de nuevas empresas para la generación de empleos y hacer una competencia en el comercio internacional. Estas medidas tomadas para combatir la crisis económica, puede ser una buena razón para que los futuros profesionistas dominen la parte práctica de sus estudios para una incorporación rápida en el mercado laboral y así reactivar la economía de México en un plazo más corto que la competencia.

Las medidas tomadas por el gobierno mexicano implican un reto, que en la historia de los mexicanos no se había enfrentado, al menos se debería de empezar a preparar a los estudiantes de forma adecuada para enfrentar estos retos de forma más rápida y eficaz. “los profesionistas mexicanos deben de ser competentes en el mercado laboral internacional”. Esto significa que si México exporta mano de obra en el extranjero, se debe de ofrecer calidad en el ámbito laboral y empresarial.

Dado que México no cuenta con la tecnología necesaria por los recursos insuficientes destinados a esta área; la única forma de sobresalir es explotar al máximo lo poco que se tiene en los diferentes laboratorios de las facultades. Aunado a esto, las universidades deberían de buscar formas estratégicas para actualizar a los profesionistas y evitar el rezago tecnológico promovido por los países de potencia tecnológica y económica en el mundo.

4.0.2 Conclusiones Particulares

Se espera que este trabajo obtenga el éxito esperado en la preparación profesional de los estudiantes; El deseo del autor es que el material se aplique de forma adecuada en el laboratorio de ingeniería eléctrica.

Es de mucho mérito llevar a la práctica lo que se estudia y analiza de forma teórica en el salón de clases. El caso de los ingenieros de cualquier rama, es de vital importancia esta parte de preparación.

Una vez concluido los trabajos experimentales aquí presentados se establecen las conclusiones siguientes.

- Al realizarse las prácticas en equipo, como suele hacerse en los laboratorios; con la ayuda de este material, todos los elementos del equipo tienen los conocimientos básicos del trabajo y el resultado a obtener en las pruebas físicas.
- Cuando el trabajo se vuelve múltiple, también se vuelve más sustantivo. Con este manual, no solo se elimina el desperdicio de tiempo si no también el trabajo que no agrega valor alguno.
- El papel del estudiante, cambia de dirigido por el profesor a una autodirección. Cuando los estudiantes tienen la oportunidad de analizar el comportamiento de los sistemas antes de llevarla a práctica, se genera un ambiente de confianza y seguridad ante los equipos, que a su vez, los motiva a realizar las pruebas por cuenta propia.
- La actitud cambia de proteccionista a productiva; Este material conlleva al interesado a un importante cambio de cultura, es una gran ayuda para asumir el compromiso de realizar bien las prácticas del laboratorio y así fortalecer los conocimientos.
- Hay un cambio en la relación del alumno al profesor; el alumno se vuelve más independiente como lo es en el ámbito laboral. Con este documental el lector es capaz de tomar sus propias decisiones sin la relación maestro-alumno, ya que estas pueden ser resueltas por los mismos en el transcurso de las prácticas.

4.1 Observaciones de la sección (3.9 y 3.10)

1. Conforme la corriente de campo aumenta la corriente de armadura (I_a) disminuye, a la vez que el factor de potencia se aproxima a 1; partiendo de que al principio el motor está trabajando con un f.p. en retraso.
2. Al seguir incrementando I_f (después del punto 1), (I_a) lo hace de la misma forma pero ahora con un factor de potencia adelantado por la razón de que la corriente de armadura se adelanta con respecto al voltaje de fase.
3. La corriente de armadura es mínima para factor de potencia unitario.

4. El voltaje inducido es menor para factores de potencia atrasado y adelantado; en otras palabras el voltaje inducido (E_o) es mayor cuando el factor de potencia se aproxima a la unidad.
5. El desfaseamiento de (E_o) respecto al voltaje de fase (V_ϕ) (llamado “grados eléctricos”) es mayor para factores de potencia atrasado y adelantado, es decir, la mínima separación entre E_o y V_ϕ ocurre cuando el factor de potencia es unitario.
6. El voltaje de fase aumenta con un incremento de la corriente de campo, dicho de otra forma, el voltaje de fase es mayor para un factor de potencia en adelanto que en retraso.

4.2 Trabajos Futuros

Después de realizarse las pruebas de la máquina síncrona en estado estable, el cual se enfoca este trabajo de tesis, será de mucha utilidad para el estudiante presentarle lo que ocurre con la máquina antes de estabilizarse (estado transitorio), que sin duda, es uno de los análisis de mayor interés en máquinas eléctricas; para ello se requiere de equipos más sofisticados para la adquisición de los datos de interés para su posterior análisis.

Por la razón de que este material se apega más a la cuestión educativa, sería muy interesante que se hiciera un documental para cada una de las máquinas rotatorias consideradas como las más importantes en el mercado, ya que todas ellas tienen aplicaciones especiales aprovechadas por las características únicas de cada una de ellas. A continuación, se mencionan algunas de las aplicaciones importantes de estas máquinas por las cuales su estudio se considera importante.

1. Máquina de CD:

- **Como Generador:** es muy cierto que los generadores de cd ya no son tan comunes como lo eran antes, porque la corriente directa cuando se requiere, es producida principalmente por rectificadores electrónicos. Estos rectificadores pueden convertir la corriente de un sistema de corriente alterna en corriente directa sin utilizar ninguna parte móvil. No obstante, el conocimiento de los generadores de cd es importante porque representa una introducción lógica al comportamiento de los motores de cd. De hecho, muchos motores cd en la industria operan como generadores durante periodos breves; esta situación se presenta cuando se sacan de operación las máquinas, la justificación a esto es que al cortarle la energía de alimentación a la máquina, el rotor no se detiene al instante, el movimiento del rotor provocado por la inercia produce una fem en los devanados del estator y en ese instante de tiempo, la máquina se comporta como generador suministrando energía hacia la red. Su estudio toma mayor interés cuando se analizan los problemas de cortocircuito, ya que parte de la gran cantidad de energía que se colapsan, son producidos por la inercia de las máquinas.

- **Como Motor:** los motores de corriente de directa transforman la energía eléctrica en energía mecánica. Impulsan dispositivos tales como malacates, ventiladores, bombas, calandrias, prensas punzonadoras y carros. Estos dispositivos pueden tener una característica de par o momento de torsión-velocidad muy definida (como una bomba o un ventilador) o una extremadamente variable (como un malacate o un automóvil). La característica de par o momento de torsión-velocidad del motor debe ser adaptada al tipo de carga que debe impulsar.

Los motores de corriente directa rara vez se utilizan en aplicaciones industriales ordinarias ya que todos los sistemas eléctricos suministran corriente alterna. Sin embargo, en aplicaciones, como fábricas de acero, minas y trenes eléctricos, en ocasiones es conveniente transformar la corriente alterna en corriente directa para utilizar motores de cd. La razón es que las características de par o momento de torsión-velocidad de los motores de cd pueden ser variadas dentro de un amplio intervalo sin perder su alta eficiencia. Hoy en día, este planteamiento general puede ser cuestionado porque la disponibilidad de manejadores eléctricos complejos ha hecho posible utilizar motores de corriente alterna en aplicaciones de velocidad variable. No obstante, aún existen millones de motores de cd en servicio y se están produciendo algunos miles más cada año.

2. **Máquinas de Inducción:** Las máquinas de inducción trifásicas comprenden tanto motores como generadores.

Los motores de inducción (o motores asíncronos) trifásicos son los motores mas utilizados en la industria. Son simples, resistentes, baratos y fáciles de mantener. Funcionan a velocidad esencialmente constante desde cero hasta plena carga. La velocidad depende de la frecuencia, por lo que estos motores no se adaptan con facilidad al control de velocidad. Sin embargo, cada vez se utilizan más los controladores electrónicos de frecuencia variable para controlar la velocidad de motores de inducción comerciales.

La documentación de los comportamientos de estas máquinas obtenidos desde el laboratorio, será de mucha utilidad para los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; no obstante, al adquirir ciertos conocimientos prácticos sobre las máquinas giratorias, puede facilitarle al estudiante de darle una aplicación adecuada a cada tipo de máquina. Este hecho se justifica que con frecuencia se descubre que varios tipos de máquinas pueden satisfacer a plenitud las mismas necesidades. Ahora, *¿Si todas satisfacen la necesidad, porqué o para qué se necesita conocer la construcción y las características básicas de las máquinas, si lo único que nos interesa es realizar el trabajo?* Normalmente se resume en costo beneficio de los equipos, aunque hay otros factores a considerar como es el caso de la aplicación de estos en fuentes alternativas de energía. La elección de los equipos se adapta a las condiciones donde se tiene la necesidad de utilizarse.

Bibliografía

1. Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia

Autor; Theodore Wildi

Editorial; Pearson, Prentice Hall

Edición; 6.

2. Máquinas Eléctricas

Autor; Stephen J. Chapman

Editorial; Mc Graw Hill

Edición; 4.

3. Máquinas Eléctricas

Autor; A. E. Fitzgerald

Charles Kingsley, Jr.

Stephen D. Umans

Editorial; Mc Graw Hill

Edición; 5.

4. Máquinas Eléctricas

Autor; Javier Sanz Feito

Editorial; Prentice Hall

5. Análisis de Sistemas de potencia

Autor; Grainger/Stevenson Jr.

Editorial; Mc Graw Hill

Edición; 2.