



T
621.313
P438



BIBLIOTECA

**ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA**

**“REQUERIMIENTOS DE POTENCIA REACTIVA PARA LA AUTO-
EXCITACION DE UN GENERADOR DE INDUCCION”**

TESIS DE GRADO

**Previa a la Obtención del Título de:
INGENIERO EN ELECTRICIDAD
Especialización POTENCIA**

Presentada por:

ARTURO DAVID PEREZ ROLANDO

Guayaquil - Ecuador



D-13142

1992

A G R A D E C I M I E N T O

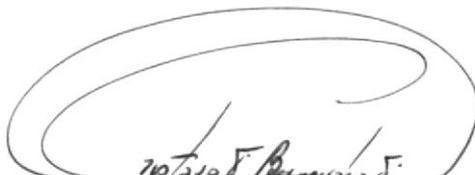
Al Ing. GUSTAVO BERMUDEZ F.
Director de Tesis.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

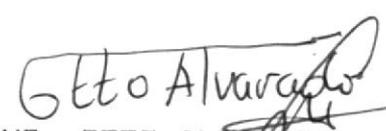
A MIS HERMANAS


ING. JORGE FLORES M.
SUB - DECANO
FACULTAD DE INGENIERIA
EN ELECTRICIDAD



ING. GUSTAVO BERMUDEZ F.
DIRECTOR DE TESIS


ING. ARMANDO ALTAMIRANO CH.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL


ING. OTTO ALVARADO
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamentos de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).



.....
ARTURO DAVID PEREZ ROLANDO

R E S U M E N

Conscientes del gran desarrollo que está dándose en la utilización de otras fuentes de energía, a parte de las tradicionales, hemos creído conveniente presentar con este trabajo una aportación al empleo del generador de inducción. El cual se presenta como una de las mejores alternativas para la utilización de fuentes de energía renovables.

En el primer capítulo se contemplan los conceptos básicos de una máquina de inducción, introduciendo la definición del generador de inducción al final del capítulo.

En el segundo capítulo se explica detalladamente el proceso de auto-excitación en generadores de inducción, presentándose una técnica analítica para estudiar el comportamiento del generador de inducción en estado estable, desarrollándose también un sistema computacional para facilitar el estudio del generador de inducción. Se explica además la técnica desarrollada para encontrar el valor de la reactancia capacitiva correspondiente al valor de capacitancia mínimo requerido para provocar y mantener la auto-excitación. Al finalizar este capítulo se estudia una aplicación muy particular de los generadores de inducción.

En el tercer y último capítulo se muestran los datos de las pruebas realizadas en el laboratorio de maquinaria de la ESPOL para una máquina de inducción (Kato), realizándose además una comparación entre los datos obtenidos experimentalmente y los obtenidos teóricamente. Por último se muestra un sistema computacional que aplica la técnica propuesta en el capítulo dos, para determinar los requerimientos mínimos de capacitancia.

Con este trabajo se ha pretendido abarcar, si bien es cierto no todo, pero si una gran parte del estudio del comportamiento del generador de inducción con miras a establecer los requerimientos de potencia reactiva mínimos para la auto-excitación del generador de inducción, cuando opera como un sistema aislado.

I N D I C E G E N E R A L

	Pág.
RESUMEN.....	VI
INDICE GENERAL.....	VIII
INDICE DE FIGURAS.....	XII
INDICE DE TABLAS.....	XVII
SIMBOLOGIA.....	XVIII
INTRODUCCION.....	XXII
I. CAPITULO	26
LA MAQUINA DE INDUCCION POLIFASICA.....	26
1.1 Generalidades y conceptos elementales..	26
1.1.1 Introducción a la máquina polifá- sica de inducción.....	26
1.1.2 Torque en una máquina de in- ducción.....	29
1.2 Circuito equivalente de la máquina de inducción.....	39
1.2.1 Pruebas para obtener los paráme- tros de la máquina de in- ducción.....	50
1.2.1.1 Prueba para la determina- ción de la resistencia del estator.....	50
1.2.1.2 Prueba de vacío.....	52
1.2.1.3 Prueba de vacío ideal.....	55

	Pág.
1.2.1.4 Prueba de cortocircuito...	57
1.2.1.5 Prueba de velocidad sín- crons.....	62
1.2.2 Potencia desarrollada y eficiencia de una máquina de inducción.....	64
1.2.3 Característica Torque-Velocidad de la máquina de inducción.....	68
1.3 La máquina de inducción como genera- dor.....	73
1.3.1 Diagrama vectorial de un generador de inducción.....	75
1.3.2 Operación del generador de inducción.....	78
 II. CAPITULO	 85
 ANALISIS DEL GENERADOR DE INDUCCION COMO UN SISTEMA AISLADO.....	 85
 2.1 El proceso de auto-excitación en generadores de inducción.....	 85
2.1.1 Introducción.....	85
2.1.2 Consideraciones teóricas.....	88
2.1.2.1 Modelo síncrono.....	88
2.1.2.2 Modelo asíncrono.....	92
2.1.2.3 Interacción entre modelos.	98



	Pág.
2.1.3 Consideraciones prácticas.....	100
2.2 Técnica analítica para estudiar el comportamiento en estado estable del generador de inducción.....	105
2.2.1 Introducción.....	105
2.2.2 Bases teóricas.....	107
2.3 Requerimiento mínimo de potencia reactiva.....	116
2.3.1 Requerimientos de capacitancia en vacío.....	117
2.3.2 Requerimientos de capacitancia bajo carga.....	120
2.4 Aplicación de capacitores estáticos a generadores de inducción que alimentan líneas monofásicas.....	127
2.4.1 Introducción.....	127
2.4.2 Excitación con dos capacitores....	128
2.4.3 Excitación con transformador y dos capacitores.....	133
 III. CAPITULO	 144
 PRUEBAS EXPERIMENTALES	 144
3.1 Obtención de parámetros y curvas características.....	144

	Pág.
3.2 Comportamiento del generador de inducción.....	150
3.2.1 Relación entre capacitancia y voltaje en vacío.....	150
3.2.2 Relación entre potencia máxima y capacitancia.....	155
3.2.3 Característica de carga del generador de inducción.....	157
3.2.4 Relación entre factor de potencia de la carga y capacitancia.....	164
3.3 Programa de computación para obtener los diferentes requerimientos de capacitancia mínima.....	166
3.3.1 Descripción general del sistema...	166
3.3.2 Diagrama de flujo y listado del programa.....	166
3.3.3 Manual de usuario.....	170
3.3.4 Listado del programa.....	171
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	179
APENDICE A.....	182
APENDICE B.....	199
BIBLIOGRAFIA.....	201



INDICE DE FIGURAS

No.		Pág.
1.1	Modelo elemental de una máquina simplificada de dos polos.....	29
1.2	Diagrama vectorial de las ondas de fuerza magnetomotiva.....	33
1.3	Circuito equivalente del estator para un motor de inducción polifásico.....	40
1.4	Circuito equivalente del rotor para un motor de inducción polifásico a frecuencia de deslizamiento.....	45
1.5	Circuito equivalente para un motor de inducción polifásico.....	48
1.6	Devanados conectados en Y.....	51
1.7	Devanados conectados en Delta.....	51
1.8	Esquema para prueba en vacío.....	52
1.9	Circuitos equivalentes en vacío.....	55
1.10	Esquema para la prueba de vacío ideal.....	56
1.11	Esquema para la prueba de cortocircuito.....	59
1.12	Circuito equivalente para la condición de cortocircuito.....	60
1.13	Variación típica de V_g/F con respecto a X_m a partir de la prueba de velocidad síncrona	64
1.14	Circuito equivalente aproximado de un motor de inducción.....	69
1.15	Aplicación del teorema de Thévenin al	

No.		Pág.
	circuito equivalente del motor de inducción.....	69
1.16	Torque desarrollado por una máquina de inducción como una función del deslizamiento..	71
1.17	Torque desarrollado por una máquina de inducción como una función de la velocidad....	72
1.18	Diagrama vectorial de un generador de inducción.....	77
1.19	Circuito equivalente aproximado para un generador de inducción.....	79
1.20	Diagrama fasorial del circuito equivalente aproximado del generador de inducción.....	79
1.21	Curvas P vs. Q para un generador de inducción a un voltaje del 100, 120 y 140 por ciento, y a una frecuencia del 100 %....	82
1.22	Curvas características de un generador de inducción.....	84
2.1	Modelo síncrono del generador de inducción auto-excitado.....	86
2.2	Modelo asíncrono del generador de inducción auto-excitado.....	87
2.3	Variación de la inductancia magnetizante con la corriente magnetizante.....	87
2.4	Circuito equivalente del modelo síncrono, incorporando el magnetismo remanente como	

No.		Pág.
	una fuente de voltaje dependiente de la frecuencia.....	89
2.5	Puntos de posible operación de un generador de inducción en modo síncrono para tres niveles de magnetismo remanente.....	91
2.6	Gráfico de α vs. velocidad de la máquina para dos valores de inductancia magnetizante. $L_m = 0.4 \text{ H}$ y 0.24 H	95
2.7	Curvas de α presentando un crecimiento y decrecimiento exponencial de corrientes asíncronas. (máquina de inducción con parámetros dados anteriormente).....	96
2.8	Curvas de α para el área de operación crítica de la máquina con iniciación de auto-excitación. α positivo correspondiente al crecimiento de corrientes asíncronas con excitación dominante.....	97
2.9	Diagrama vectorial correspondiente al punto x (en la figura 2.5 para el circuito mostrado en la figura 2.4).....	99
2.10	Diagrama vectorial correspondiente al punto Y.....	99
2.11	Gráfico de la inductancia magnetizante	

No.		Pág.
	mostrando barras de error.....	104
2.12	Circuito equivalente del generador de inducción con carga.....	108
2.13	Circuito equivalente en vacío.....	119
2.14	Variación de K con respecto a R y v	123
2.15	Variación de K con respecto a Z y al factor de potencia de la carga.....	124
2.16	Variación de K con respecto a v y al factor de potencia de la carga.....	126
2.17	Circuito modelo A para un generador de inducción trifásico, usando una línea monofásica 3 hilos, 120/240 voltios.....	129
2.18	Diagrama fasorial del circuito modelo A.....	129
2.19	Circuito modelo A'.....	132
2.20	Diagrama fasorial para el circuito A'.....	133
2.21	Circuito modelo B.....	134
2.22	Diagrama fasorial del circuito modelo B.....	134
2.23	Circuito modelo C.....	137
2.24	Diagrama fasorial del circuito modelo C.....	137
2.25	Requerimientos de Voltio-amperios de capacitores V_{cap} vs. Angulo del factor de potencia de la máquina.....	140
2.26	Requerimientos de Voltio-amperios vs. Angulo del factor de potencia de la máquina.....	142
3.1	Variación de V_g/F con respecto a X_m , a	



No.		Pág.
	partir de la prueba de velocidad síncrona...	149
3.2	Esquema de conexión para determinar el voltaje terminal en vacío V_t , con respecto a la variación de C	153
3.3	Variación del voltaje terminal V_t , con respecto a la capacitancia C (en vacío).....	154
3.4	Variación de $P_{m\acute{a}x}$ con respecto a K	156
3.5	Variación de $P_{m\acute{a}x}$ con respecto a v y X_c	156
3.6	Característica de carga del generador de inducción para $70 \mu f$ (Máquina Kato).....	161
3.7	Característica de carga del generador de inducción para $80 \mu f$ (Máquina Kato).....	162
3.8	Característica de carga del generador de inducción para $90 \mu f$ (Máquina Kato).....	163
3.9	Característica de carga del generador de inducción para diferentes factores de potencia.....	165
3.10	Diagrama de flujo del sistema que determina los requerimientos de capacitancia mínima, para la auto-excitación del generador de inducción.	170

INDICE DE TABLAS

No.		Pág.
I.	Variación de F/v con la velocidad.....	118
II.	Datos de la prueba voltímetro-amperímetro	146
III.	Datos de la prueba en vacío.....	146
IV.	Datos de la prueba de vacío ideal.....	147
V.	Datos de la prueba de cortocircuito.....	147
VI.	Datos de la prueba de velocidad síncrona.	148
VII.	Valores del voltaje terminal V_t para una variación de la capacitancia C en vacío..	153
VIII.	Característica de carga de la máquina Kato.....	159

S I M B O L O G I A

n_1, n	=	Velocidad del campo giratorio y del rotor respectivamente.
F	=	Frecuencia.
p	=	Número de polos al que se encuentra devanado un estator.
s	=	Diferencia de velocidades entre el campo giratorio y el rotor.
δ_{er}	=	Angulo entre el eje del campo del estator y el eje del campo del rotor.
f_{mm}	=	Fuerza magnetomotiva.
H	=	Intensidad de campo magnético.
F_e, F_r	=	Fuerza magnetomotiva del estator y del rotor respectivamente.
D	=	Diámetro promedio del entrehierro.
l	=	Longitud axial del entrehierro.
g	=	Espacio libre del entrehierro.



μ_0	=	Permeabilidad del espacio libre.
T	=	Torque electromagnético.
ϕ_{er}	=	Flujo resultante del efecto entre las fuerzas magnetomotivas del estator y rotor.
V ₁	=	Voltaje terminal en el estator.
V _g	=	Fuerza contraelectromotriz generada por el flujo resultante en el entrehierro.
I _e	=	Corriente del estator.
R _e	=	Resistencia efectiva del estator.
X _{le}	=	Reactancia de dispersión del estator.
G _c	=	Conductancia magnética.
B _m	=	Susceptancia magnética.
E	=	Voltaje inducido.
Z _r	=	Impedancia de dispersión del rotor a frecuencia deslizamiento, por fase, referida al estator.
R _r	=	Resistencia efectiva del rotor, referida al estator.
sX _{lr}	=	Reactancia de dispersión del rotor a



frecuencia deslizamiento, referida al estator.

- I_r = Corriente del rotor referida al estator.
- V_n, V_{l-1} = Voltaje nominal por fase y de fase a fase respectivamente.
- I_o = Corriente en vacío.
- P_o = Potencia total en vacío.
- R_m = Resistencia magnetizante.
- X_m = Reactancia magnetizante.
- V_{cc} = Voltaje de cortocircuito por fase.
- I_n = Corriente nominal por fase.
- P_{cc} = Potencia total de entrada en cortocircuito.
- P_{f+v} = Pérdidas por fricción más ventilación.
- P_{h-rot} = Pérdidas por hierro rotacional.
- m_1 = Número de fases de la máquina de inducción.
- Z_{cc} = Impedancia total en cortocircuito.
- Z_{th}, V_{th} = Impedancia y voltaje Thévenin.
- T_d = Torque desarrollado

P, Q	=	Potencia activa y reactiva que entrega un generador.
$P_{\text{lím}}$	=	Potencia límite del generador.
C	=	Capacitancia.
L_e	=	Inductancia del estator.
L_m	=	Inductancia magnetizante.
I_m	=	Corriente magnetizante.
X_c	=	Reactancia capacitiva por fase del capacitor terminal c .
$P_{\text{ent.}}$	=	Potencia de entrada.
P_s	=	Potencia de salida.
$C_{\text{mín}}$	=	Capacitancia mínima.
$X_{\text{smáx}}$	=	Reactancia magnetizante no-saturada.
$P_{\text{máx}}$	=	Potencia máxima.



I N T R O D U C C I O N

Del exagerado incremento en la explotación de los recursos de energía convencionales no renovables, nace un gran interés en desplazar dichos recursos por otros renovables como la energía eólica, la energía mareomotriz, etc..

Se ha calculado que la energía total en la atmósfera de la tierra es aproximadamente 10^{14} MW y se ha estimado que por lo menos 10^6 MW corresponde a energía recuperable del viento (10). Este valor es por lo menos diez veces mayor que toda la potencia hidroeléctrica disponible en el mundo.

Del avance tecnológico alcanzado dentro del campo de conversión de energía, los sistemas electromecánicos son los que han permitido alcanzar un gran desarrollo en la conversión de energía de fuentes no-renovables a energía mecánica y luego a energía eléctrica, pero a partir de fuentes no pulsantes, debido a que para esta última etapa se han utilizado básicamente alternadores síncronos, cuya estructura básica permanece igual desde el siglo pasado donde fueron introducidos.

Tanto la energía eólica, como la energía mareomotriz son fuentes pulsantes de energía, donde la utilización de



alternadores síncronos sería impropia.

Es entonces, cuando el generador de inducción despierta un gran interés debido a su habilidad de convertir potencia mecánica (producto de una fuente de energía pulsante) a potencia eléctrica sobre un amplio rango de velocidad para el rotor.

Además, debido al reciente desarrollo de fuentes estáticas de potencia reactiva, con controladores de potencia de estado sólido, permite que grandes oportunidades se abran para el uso de generadores de inducción a gran escala.

Se han desarrollado tres opciones de diseño de control:

1. Sistemas de velocidad variable y frecuencia constante (VSCF);
2. Sistemas de velocidad constante y frecuencia constante (CSCF); y,
3. Sistemas de velocidad variable y frecuencia variable (VSVF).

El presente trabajo se puede ubicar en la tercera categoría. Donde un arreglo capacitor, generador de inducción y primo-motor de velocidad variable, servirán para aplicaciones autónomas con cargas insensibles a la frecuencia, donde la potencia alterna generada puede utilizarse con una frecuencia variable que corresponda al



cambio de velocidad del primo-motor.

En el desarrollo de este trabajo se justificará claramente el proceso de auto-excitación en los generadores de inducción, y se estudiará una técnica analítica que permita establecer las condiciones del generador en estado estable, actuando como una unidad autónoma.

Pero el objetivo principal de este trabajo está centrado en la obtención de la reactancia capacitiva correspondiente al valor de capacitancia mínimo requerido para provocar y mantener la auto-excitación del generador de inducción.

Cabe señalar que se ha incluido en este trabajo el desarrollo de dos programas de computación; el primero para realizar todos los cálculos pertinentes a la obtención del valor de reactancia capacitiva máxima y el segundo para determinar el comportamiento en estado estable del generador de inducción.

Finalmente se realizarán pruebas con una máquina experimental para observar la validez del análisis teórico explicado en este trabajo.

Quede constancia que este trabajo no pretende ser exhaustivo en el estudio del generador de inducción, sino

que de acuerdo al propósito y nombre de la tesis, la de determinar las necesidades mínimas de potencia reactiva del generador de inducción cuando opera como una unidad aislada.

C A P I T U L O I

LA MAQUINA DE INDUCCION POLIFASICA

1.1 GENERALIDADES Y CONCEPTOS ELEMENTALES

1.1.1 INTRODUCCION A LA MAQUINA POLIFASICA DE INDUCCION

Cuando el devanado del estator de una máquina de inducción es alimentado por una fuente polifásica balanceada, se produce en el entrehierro un campo magnético giratorio que viaja a la velocidad sincrónica determinada por la frecuencia de alimentación y el número de polos de la máquina.

Se asume que el rotor está girando a una velocidad estable de n rev/min en la misma dirección del campo giratorio del estator, el cual gira a una velocidad n_1 rev/min dada por la ecuación (1.1).

$$n_1 = 120(f)/p \quad \text{rev/min} \quad (1.1)$$

Por lo tanto, el rotor está girando a una velocidad de $(n_1 - n)$ hacia atrás con respecto al

campo giratorio, o también, el deslizamiento del rotor es (n_1-n) rev/min.

Generalmente el deslizamiento es expresado como una fracción de la velocidad sincrónica; por lo tanto el deslizamiento en por unidad es:

$$s = (n_1-n)/n_1 \quad (1.2)$$

Debido al movimiento relativo entre el flujo giratorio y los conductores del rotor, se induce voltaje en estos de frecuencia sf , llamada frecuencia de deslizamiento.

En el arranque, la velocidad del rotor es cero ($n=0$), por lo tanto el deslizamiento es $s=1$ y las frecuencias del rotor y estator son iguales. El campo producido por las corrientes del rotor gira a la misma velocidad que el campo del estator, y resulta un torque de arranque que tiende a girar el rotor en dirección del campo que induce el estator. Si este torque es suficiente para vencer la oposición a la rotación, creada por la carga del eje, entonces el motor llegará a su velocidad de operación.



La velocidad de operación nunca puede ser igual a la velocidad sincrónica, ya que para ello, los conductores del rotor deberían estar estacionarios con respecto al campo del estator, luego la velocidad relativa entre el campo giratorio y el rotor sería cero ($n_1 - n = 0$) y no se inducirían voltajes en los conductores del rotor.

Con el rotor girando en la misma dirección de rotación del campo del estator, la frecuencia de las corrientes del rotor es sf , y la componente del campo del rotor provocada por ellas girará a sn_1 rev/min con respecto al rotor y hacia adelante. Pero superpuesta a esta rotación está la rotación mecánica del rotor n rev/min.

La velocidad del campo del rotor en el espacio es la suma de estas dos velocidades e igual a:

$$sn_1 + n = sn_1 + n_1(1-s) = n_1 \quad (1.3)$$

Los campos del estator y rotor están por lo tanto estacionarios entre sí, en consecuencia se produce un torque estable y se mantiene la rotación.



1.1.2 TORQUE EN UNA MAQUINA DE INDUCCION

El flujo magnético en el entrehierro del estator y rotor es una condición que corresponde a la aparición de polos magnéticos tanto en el estator como en el rotor, centrado en sus respectivos ejes magnéticos como se muestra en la figura (1.1) para una máquina de 2 polos con un entrehierro uniforme.

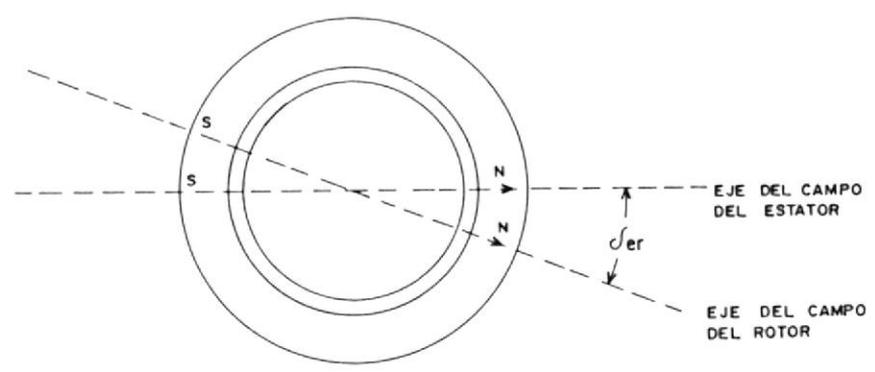


Fig. 1.1 Modelo elemental de una máquina simplificada de 2 polos.

El torque es producido por la tendencia, de las dos componentes de campo magnético, a alinear sus ejes magnéticos. El torque es proporcional al producto de las amplitudes de las ondas de fuerza magnetomotivas (fmm) del estator y rotor. Para una máquina con entrehierro

uniforme el torque es proporcional al $\sin \delta$.

La mayor parte del flujo producido por los devanados del estator y rotor (alrededor del 90% en máquinas típicas) cruza el entrehierro y enlaza ambos devanados; este flujo es llamado flujo mutuo.

Sin embargo un pequeño porcentaje del flujo no cruza el entrehierro y enlaza sólo el devanado del estator o del rotor; estos son respectivamente, el flujo de dispersión del estator y el flujo de dispersión del rotor. Ellos comprenden también, el flujo de dispersión de las ranuras, en la parte superior del diente, en los cabezales y el flujo de dispersión diferencial (armónico). Y es sólo el flujo mutuo el que concierne directamente en la producción del torque.

Los flujos de dispersión afectan el funcionamiento de la máquina, debido al voltaje que ellos inducen en sus propios devanados. Sus efectos sobre las características eléctricas explican las inductancias de dispersión (como un transformador). Sin embargo este efecto es auxiliar y no forma parte en la producción del

torque.

El análisis por lo tanto será en términos del flujo mutuo resultante. Se derivará una expresión para la coenergía magnética almacenada en el entrehierro en términos de las fuerzas magnética del estator y rotor y el ángulo δ entre sus ejes magnéticos.

El torque puede ser encontrado de la derivada parcial de la coenergía con respecto al ángulo δ .

Ahora se asumirá que la componente tangencial del campo magnético en el entrehierro es despreciable comparada con la componente radial. También se asumirá que la longitud radial del entrehierro es pequeño comparado con el radio del rotor o estator. Con estas asunciones existe una diferencia despreciable entre la densidad del flujo en la superficie del rotor, en la superficie del estator, o en cualquier otra distancia radial del entrehierro. El campo en el entrehierro se reduce entonces a un campo radial H o B cuya intensidad varía con el ángulo alrededor de la periferia.

El integral de línea de H a lo largo del

entrehierro es simplemente H_g e igual a la fuerza magnetomotiva F_{er} de los devanados del estator y rotor, esto es:

$$H_g = F_{er} \quad (1.4)$$

Donde F_{er} denota la onda de fuerza magnetomotiva como una función del ángulo alrededor de la periferia.

Las ondas de fuerza magnetomotiva del estator y rotor son ondas espaciales sinusoidales con un ángulo de fase \mathcal{F}_{er} entre sus ejes magnéticos en grados eléctricos. Ellos pueden ser representados por los vectores de espacio F_e y F_r dibujando a lo largo de sus ejes magnéticos de las ondas de f.m.m. del estator y rotor, como se muestra en la figura (1.2).

El torque es producido por la tendencia a alinearse de los campos magnéticos del estator y rotor.

La f.m.m. resultante F_{er} actuando a lo largo del entrehierro, también es una onda sinusoidal es el vector suma. Y su valor pico es encontrado a partir de la ley del coseno.

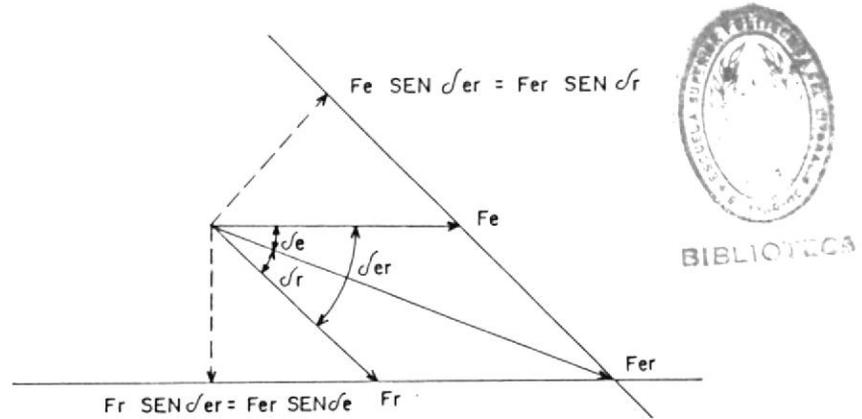


Fig. 1.2 Diagrama vectorial de las ondas de f.m.m.

$$F_{er}^2 = F_e^2 + F_r^2 + 2 F_e F_r \cos \delta_{er} \quad (1.5)$$

Donde las magnitudes F son los valores pico de las ondas f.m.m.. La resultante radial del campo H es una onda de espacio sinusoidal cuyo valor pico (H_{pico}) se lo obtiene a partir de la ecuación (1.4).

$$H_{pico} = F_{er}/g \quad (1.6)$$

Ahora consideremos la coenergía del campo magnético almacenada en el entrehierro.

La densidad de la coenergía en un punto donde la intensidad del campo magnético es H es $(\mu_0/2)H^2$ en unidades SI. La densidad de coenergía promedio sobre el volumen del entrehierro es $\mu_0/2$ veces el valor promedio de H^2 . El valor promedio del cuadrado de una onda sinusoidal es la mitad de su valor pico. Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \text{Densidad de coenergía promedio} &= (\mu_0/2) \\ & \frac{H \text{ pico}}{2} = \mu_0/4 \quad (\text{Fer/g}) \end{aligned} \quad (1.7)$$

La coenergía total es :

$$\begin{aligned} W'_{fld} &= (\text{densidad de coenergía promedio}) \\ & \quad * (\text{volumen del entrehierro}) \end{aligned}$$

$$W'_{fld} = \mu_0 \pi D l / 4 g (\text{Fer})^2 \quad (1.8)$$

donde:

D = diámetro promedio del entrehierro (m)

l = longitud axial del entrehierro (m)

g = espacio libre del entrehierro (m)

μ_0 = permeabilidad del espacio libre = $4 * 10^{-7}$
(H/m)

De la ecuación 1.6 la coenergía almacenada en el entrehierro puede ahora ser expresada en términos de las amplitudes pico de las ondas f.m.m. del estator y rotor y el ángulo de espacio-fase entre ellas; esto es:

$$W'_{fld} = \mu_0 \pi D l / 4 g (F_e^2 + F_r^2 + 2 F_e F_r \cos \epsilon_r) \quad (1.9)$$

Una expresión para el torque electromagnético se puede obtener ahora en términos de la interacción de los campos magnéticos tomando la derivada parcial de la coenergía del campo con



respecto al ángulo. Para una máquina de 2 polos:

$$T = \frac{\partial W'_{fld}}{\partial \epsilon_r} = - \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_e F_r \text{SEN} \epsilon_r \quad (1.10)$$

Para una máquina de p polos la ecuación 1.11 da el torque por par de polos.

El torque para una máquina de p polos es entonces:

$$T = -(F/2) (\mu_0/2) (\pi D l/g) F_e F_r \text{sen} \epsilon_r \quad (1.11)$$

Esta ecuación nos indica que el torque es proporcional a los valores pico de ondas de f.m.m. del estator y rotor. Torques iguales y opuestos hacen esfuerzo sobre el rotor y estator. El torque sobre el estator es simplemente transmitido a través de la estructura de la máquina a su base.

De la figura 1.2 se puede observar que $F_r \text{sen} \epsilon_r$ es la componente de la onda F_r en cuadratura de espacio eléctrico con la onda F_e . Similarmente $F_e \text{sen} \epsilon_r$ es la componente de la onda F_e en cuadratura con la onda F_r .

Por lo tanto, el torque es proporcional al



DIRECCIÓN

producto de un campo magnético con la componente del otro en cuadratura con el primero, como el producto cruz del análisis vectorial. También se puede notar en la figura (1.2):

$$F_e \text{ sen } \delta_e = F_e r \text{ sen } \delta_r \quad (1.12)$$

$$F_r \text{ sen } \delta_r = F_e r \text{ sen } \delta_e \quad (1.13)$$

El torque puede entonces ser expresado en términos de la onda de f.m.m. resultante $F_e r$ mediante la sustitución de cualquiera de las ecuaciones 1.12 ó 1.13 en la ecuación 1.11, así tenemos:

$$T = - (P \mu_0 D l / 4g) F_e F_e r \text{ Sen } \delta_e \quad (1.14)$$

$$T = - (P \mu_0 D l / 4g) F_r F_e r \text{ Sen } \delta_r \quad (1.15)$$

Comparando las ecuaciones 1.11, 1.14, y 1.15 se observa que el torque puede ser expresado en términos de la componente de campos magnéticos debidos a cada corriente actuando sola, como en la ecuación 1.11, o en términos del campo resultante y también de las componentes, como en las ecuaciones 1.14 y 1.15, con tal que se

use el ángulo correspondiente entre los ejes de los campos.

En las ecuaciones 1.11, 1.14 y 1.15 los campos han sido expresados en términos de los valores pico de sus ondas de f.m.m. Cuando la saturación magnética es despreciada, los campos pueden ser expresados en términos de sus ondas densidad de flujo o en términos del flujo total por polo. Esto es el valor pico B del campo debido a la onda de f.m.m. distribuida sinusoidalmente en una máquina con un entrehierro uniforme es $\mu_0 F/g$, donde F es el valor pico de la onda de f.m.m. Por ejemplo, la f.m.m. resultante F_{er} produce una onda de densidad de flujo resultante cuyo valor pico es $\mu_0 F_{er}/g$. Esto es :

$$T = -P/2 (\pi D/2) B_{er} F_r \sin \delta r \quad (1.16)$$

Una de las limitaciones inherente en el diseño de aparatos electromagnéticos es la densidad de flujo de saturación de los materiales magnéticos.

Debido a la saturación en los dientes de la armadura el valor pico B_{er} de la onda densidad de flujo resultante en el entrehierro está



limitada en 1 l (64.5 kilolíneas/pulg²). El valor permisible máximo de la onda de f.m.m. está limitado por el aumento de temperatura del devanado y otros requerimientos del diseño.

Formas alternativas surgen cuando es reconocido que el flujo resultante por polo es:

$$\bar{\Phi} = \frac{\text{(valor promedio de B sobre un polo)}}{\text{* (area del polo)}} \quad (1.17)$$

y que el valor promedio de una senoide sobre 1/2 longitud de onda es $2/\pi$ veces su valor pico. Esto es:

$$\bar{\Phi} = 2DIB/P \quad (1.18)$$

donde B es valor pico de la correspondiente onda densidad de flujo. Por ejemplo, sustituyendo la ecuación 1.18 en la ecuación 1.16 tenemos :

$$T = -\pi/2 (P/2)^2 \bar{\Phi}_{er} Fr \text{ sen } \mathcal{L}r \quad (1.19)$$

donde $\bar{\Phi}_{er}$ es el flujo resultante producido por el efecto combinado de las f.m.ms. del estator y rotor.

Como se puede observar, el torque de una máquina con entrehierro uniforme puede ser expresado de algunas formas en términos de sus campos magnéticos. Todos ellos expresan el hecho de que el torque es proporcional a la interacción de los campos y al seno del ángulo espacial eléctrico entre sus ejes magnéticos.

El signo negativo indica que el torque electromagnético actúa en una dirección que tiende a disminuir el ángulo de desplazamiento entre sus campos.



1.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA MAQUINA DE INDUCCION

Para este análisis sólo serán consideradas máquinas con devanados polifásicos simétricos alimentados por voltajes polifásicos balanceados. Como en muchas otras discusiones de dispositivos polifásicos, es de mucha ayuda pensar en máquinas trifásicas conectadas en Y, para de esta manera, las corrientes sean siempre los valores de línea y los voltajes valores de línea a neutro.

Primero considerar las condiciones en el estator. La rotación sincrónica de la onda de flujo en el entrehierro genera fuerza contra-electromotriz (f.c.e.m.) polifásica balanceada en las fases del estator. El voltaje terminal en el estator difiere de la f.c.e.m. por la caída de voltaje en la impedancia de dispersión del estator, la relación fasorial para la fase bajo esta consideración es:

$$V_1 = V_g + I_e (R_e + jX_{le}) \quad (1.20)$$

donde:

V_1 = voltaje terminal en el estator.

V_g = f.c.e.m. generada por el flujo resultante en el entrehierro.

I_e = corriente del estator.

R_e = resistencia efectiva del estator.

X_{le} = reactancia de dispersión del estator.

Las direcciones positivas se muestran en el circuito equivalente de la figura 1.3.

El flujo resultante en el entrehierro es creado por las corrientes de las f.m.m. combinadas del estator y rotor. La corriente en el estator puede ser descompuesta en dos componentes, una componente de carga y una componente de excitación.

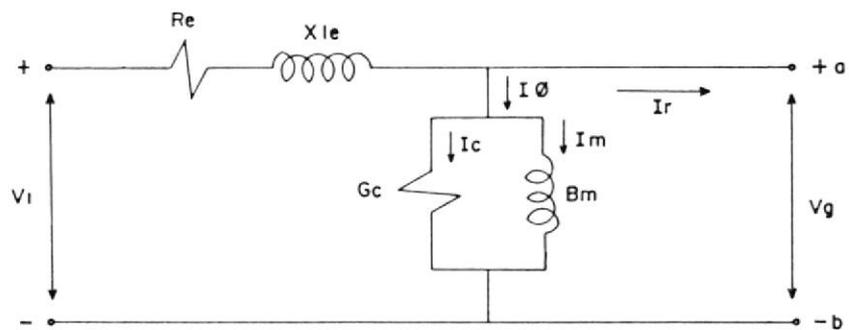


Fig. 1.3 Circuito equivalente del estator para un motor de inducción polifásico.

La componente de carga I_r produce una f.m.m. la cual contrarresta la f.m.m. de la corriente del rotor.

La componente de excitación I_ϕ es la corriente adicional del estator requerida para crear el flujo

resultante en el entrehierro y es una función de la f.c.e.m. V_g .

La corriente de excitación puede ser descompuesta a su vez en una componente pérdidas en el núcleo I_c en fase con V_g y una componente de magnetización I_m atrasada a V_g en 90 grados. En el circuito equivalente la corriente de excitación puede ser distribuida en un ramal en paralelo formada por la conductancia G_c , que representa las pérdidas en el núcleo y la susceptancia magnetizante B_m en paralelo, conectadas entre V_g , tal como lo muestra la figura 1.3.

Los valores de G_c y B_m son usualmente determinados a valores de frecuencia y voltaje de operación normal de la máquina.

Para completar el circuito, los efectos del rotor deben ser incorporados. Esto será realizado considerando corrientes y voltajes del estator y rotor en términos de cantidades referidas al estator.

En cuanto a lo que concierne a las componentes fundamentales, ambos, el rotor devanado y el rotor jaula de ardilla reaccionan produciendo una onda de f.m.m. que tiene el mismo número de polos que la onda de flujo inducida, viajando a la misma velocidad que

la onda de flujo, y con un ángulo de torque igual a 90 grados mayor que el ángulo de factor de potencia del rotor. La reacción de la onda de f.m.m. del rotor sobre el estator requiere una componente de carga compensada de la corriente del estator y con lo cual permite al estator absorber de la línea la potencia necesaria para sostener el torque creado por la interacción de las ondas de flujo y f.m.m. El único medio por el cual el estator sabe lo que está pasando es a través del flujo del entrehierro y las ondas de f.m.m. del rotor. Consecuentemente, si el rotor fuera reemplazado por uno que tenga la misma f.m.m. y factor de potencia a la misma velocidad, el estator debería ser incapaz de detectar el cambio. Dicho reemplazo permite la idea de referir cantidades del rotor al estator, una idea que es de gran valor en la traducción de las consideraciones de f.m.m. a flujo en el circuito equivalente de la máquina.

Consideremos por ejemplo, un rotor devanado para el mismo número de polos y fases que el estator.

El número de vueltas efectivas por fase en el devanado del estator es a veces el número en el devanado del rotor.

Comparando el efecto magnético de este rotor con el

de un rotor equivalente magnéticamente teniendo el mismo número de vueltas que el estator. Para el mismo flujo y velocidad la relación entre el voltaje E_{rotor} inducido en el rotor real y el voltaje E_{2e} inducido en el rotor equivalente es:

$$\frac{E_{2e}}{E_{rotor}} = a \quad (1.21)$$

Si los rotores son equivalentes magnéticamente, sus amperio-vueltas deben ser iguales, y la relación entre la corriente del rotor real I_{rotor} y la corriente I_{2e} en el rotor equivalente debe ser:

$$\frac{I_{2e}}{I_{rotor}} = a \quad (1.22)$$

Consecuentemente la relación entre la impedancia de dispersión a frecuencia-deslizamiento Z_{2e} del rotor equivalente y la impedancia de dispersión a frecuencia-deslizamiento Z_{rotor} del rotor real debe ser:

$$\frac{Z_{2e}}{Z_{rotor}} = \frac{E_{2e}^2 / I_{2e}^2}{E_{rotor}^2 / I_{rotor}^2} = a^2 \quad (1.23)$$

Los voltajes, corrientes e impedancias en el rotor equivalente son definidos como sus valores referidos al estator.



Desde el punto de vista del estator, los efectos reflejados del rotor aparecen en términos de cantidades referidas, y la teoría de ambos rotores jaula de ardilla y devanado pueden ser formulados en términos del rotor referido. Se debe asumir, por lo tanto, que las constantes del rotor referidas son conocidas.

Cuando el rotor es corto-circuitado, la relación fasorial entre la f.c.e.m. a frecuencia de deslizamiento generada en la fase de referencia del rotor referido y la corriente I_{2e} en esta fase es:

$$\frac{E_{2e}}{I_{2e}} = Z_{2e} = R_r + jsX_{lr} \quad (1.24)$$

donde:

Z_r = impedancia de dispersión del rotor a frecuencia de deslizamiento, por fase, referida al estator.

R_r = resistencia efectiva referida.

sX_{lr} = reactancia de dispersión referida a frecuencia de deslizamiento.

La reactancia es expresada en esta forma porque es proporcional a la frecuencia del rotor y por lo tanto al deslizamiento. Esto es, X_{lr} es definido como el valor referido de la reactancia de dispersión del

rotor a frecuencia del estator. El circuito equivalente a frecuencia de deslizamiento de una fase del rotor referido es mostrado en la figura 1.4

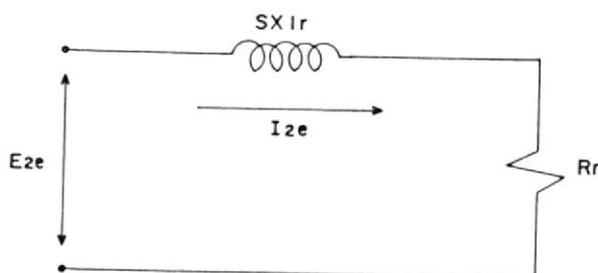


Fig. 1.4 Circuito equivalente del rotor para un motor de inducción a frecuencia de deslizamiento.

El estator ve una onda de flujo y una onda de f.m.m. girando a velocidad sincrónica. La onda de flujo induce el voltaje E_{2e} en el rotor a frecuencia de deslizamiento y la f.c.e.m. del estator V_g . Si no fuera por el efecto de la velocidad, el voltaje del rotor referido debería ser igual al voltaje del estator, ya que el devanado del rotor referido es idéntico que el devanado del estator. Debido a que la velocidad relativa de la onda de flujo con respecto al rotor es s veces su velocidad con respecto al estator, la relación entre los valores efectivos de las f.e.m. del estator y rotor es:



$$\frac{E}{2e} = s Vg \quad (1.25)$$

La onda de f.m.m. del rotor es opuesta a la f.m.m. de la componente de carga I_r de la corriente del estator, y por lo tanto, para valores efectivos:

$$\frac{I}{2e} = I_r \quad (1.26)$$

Dividiendo la ecuación 1.25 para la ecuación 1.26, se tiene:

$$\frac{E}{2e} / \frac{I}{2e} = s Vg / I_r \quad (1.27)$$

Cuando se reconoce que el torque puede ser calculado en términos de f.m.m. y del flujo resultante en el entrehierro, como en la ecuación 1.19, y que torques iguales y opuestos actúan sobre el rotor y estator, se ve que la onda de f.m.m. creada por la corriente de carga del estator I_r debe estar desplazada en el espacio de la onda de flujo resultante por el mismo ángulo que entre la onda de f.m.m. del rotor y el flujo resultante del entrehierro, llamado ángulo de torque $\mathcal{I}er$.

El ángulo tiempo-fase entre el voltaje del estator Vg y la corriente de carga del estator I_r deberá por lo tanto, ser igual al ángulo de tiempo correspondiente para el rotor, llamado, ángulo de factor de potencia del rotor $\mathcal{I}2$. El hecho de que los torques del

rotor y estator están en oposición es considerado, desde que la corriente del rotor I_{2e} es creada por la f.e.m. del rotor E_{2e} por cuanto la corriente del estator I_2 está fluyendo contra la f.c.e.m. del estator. Por lo tanto, la ecuación 1.27 es verdadera, no sólo para valores efectivos, sino también en un sentido fasorial. Realizando la sustitución de la ecuación 1.24 en el equivalente fasorial de la ecuación 1.27, se tiene:

$$s V_g / I_r = E_{2e} / I_{2e} = R_r + j s X_{lr} \quad (1.28)$$

Dividiendo para s se tiene:

$$V_g / I_r = R_r/s + j X_{lr} \quad (1.29)$$

Esto es, el estator ve las condiciones magnéticas en el entrehierro las cuales resultan en un voltaje inducido en el estator V_g y una corriente de carga en el estator I_r y, debido a la ecuación 1.29 estas condiciones son idénticas con el resultado de conectar una impedancia $R_r/s + j X_{lr}$ en paralelo a E' .

Consecuentemente, el efecto del rotor puede ser incorporado en el circuito equivalente de la figura 1.3 conectando esta impedancia entre los terminales ab. El resultado final es mostrado en la figura 1.5.

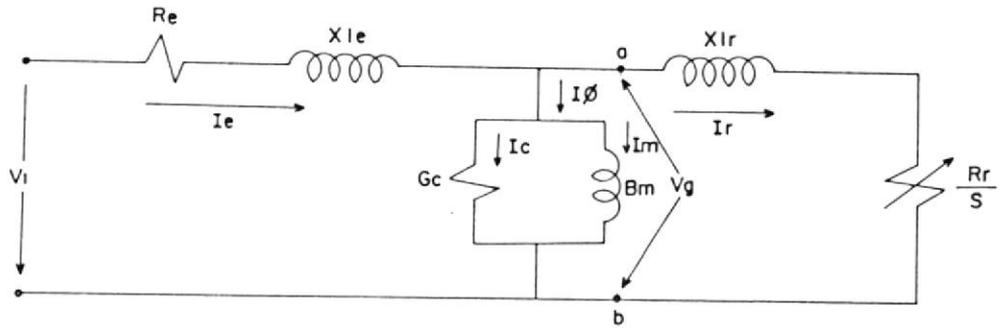


Fig. 1.5 Circuito equivalente para un motor de inducción polifásico.

El efecto combinado de la carga del eje y la resistencia del rotor aparece como una resistencia variable R_r/s , en función del deslizamiento y por lo tanto de la carga mecánica.

La corriente en la impedancia del rotor reflejada es igual a la componente de carga de la corriente del estator; el voltaje entre esta impedancia es igual al voltaje del estator V_g . Debería notarse que cuando los voltajes y las corrientes del rotor son reflejadas al estator, sus frecuencias también cambian a la frecuencia del estator.

Todo fenómeno eléctrico del rotor, cuando es visto desde el estator, cambia a un fenómeno con frecuencia del estator, debido a que el devanado del estator simplemente ve ondas de flujo y f.m.m. viajando a velocidad sincrónica.

1.2.1 PRUEBAS PARA OBTENER LOS PARAMETROS DE LA MAQUINA DE INDUCCION

Para determinar los parámetros de la máquina de inducción, es necesario realizar cuatro pruebas experimentales, en las cuales se considerará lo siguiente:

El valor de la tensión es por fase.

El valor de la corriente por fase.

La potencia de entrada es total.

Dichas pruebas son detalladas a continuación:

1.2.1.1 Prueba para la determinación de la resistencia del estator.-

Con esta prueba se determina el valor de la resistencia del devanado del estator, por fase.

Esta prueba deberá realizársela luego de que la máquina haya operado por algún tiempo, es decir, caliente.

Deberá considerarse el tipo de conexión de los devanados del estator, tal como se muestra en las figuras 1.6 y 1.7 y en las ecuaciones 1.30 y 1.31, para

devanados conectados en " Y " y en "delta" respectivamente.

Se toman lecturas de voltaje y corriente.

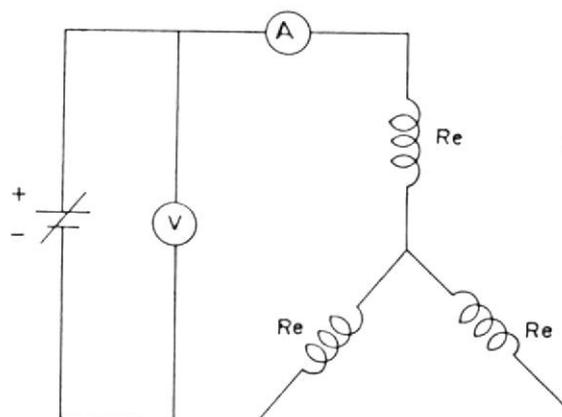


Fig. 1.6 Devanados conectados en Y.

$$R_e = \frac{V}{2 A} \quad (1.30)$$

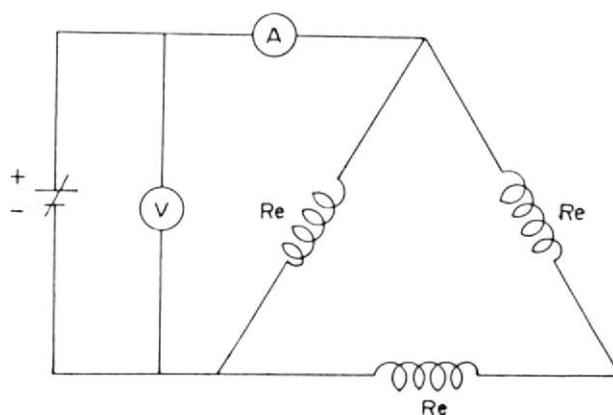


Fig. 1.7 Devanados conectados en Delta.

$$R_e = \frac{3 V}{2 A} \quad (1.31)$$

1.2.1.2 Prueba de vacío

Esta prueba corresponde a la prueba de circuito abierto en un transformador.

Se aplica tensión y frecuencia nominal al estator de la máquina, sin carga mecánica en su eje, teniéndose sólo carga por fricción y ventilación de la máquina.

Consideremos el siguiente esquema:

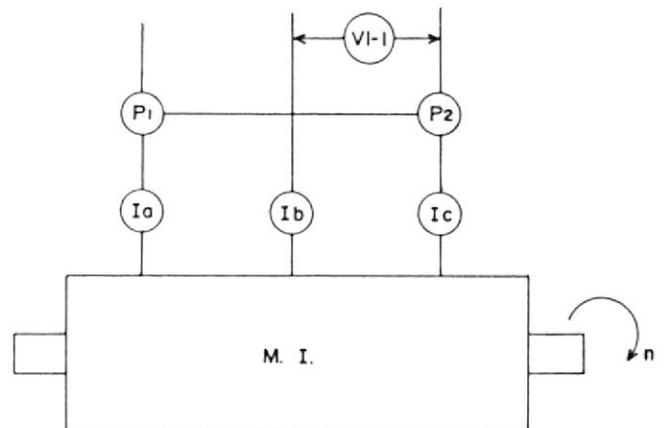


Fig. 1.8 Esquema para prueba en vacío

Sea: $V_n = V_{1-1} / \sqrt{3}$ = voltaje nominal por fase.

$I_o = (I_a + I_b + I_c) / 3$ = corriente en vacío por fase.

$P_o = P_1 + P_2 =$ potencia total
de entrada.

La potencia P_o se consume en:

- Pérdidas en el cobre del devanado del estator.

$$P_{Cu} ==> m I_o^2 R_e$$

- Pérdidas por histéresis y corrientes de Faulcolt debidas al flujo principal.

$$P_{h+f}$$

- Pérdidas de fricción y ventilación del rotor.

$$P_{f+v}$$

- Pérdidas en el hierro debido a la rotación y a las aberturas de las ranuras.

$$P_{h-rot}$$

O sea que son las pérdidas por altas frecuencias en los dientes del estator y del rotor debido principalmente a las corrientes parásitas producidas por las rápidas pulsaciones del flujo cuando los dientes y las ranuras cambian sus posiciones relativas.

- Teóricamente existen unas pérdidas

adicionales en el cobre del rotor, pero la corriente del rotor en vacío es tan pequeña que estas pueden despreciarse.

$R_r/s \implies$ valor bastante alto.

I_r pequeña.

Aún cuando $s = 0$ (en realidad $s = 0.001$) existe un pequeño valor de corriente debido a las armónicas en la densidad del flujo, a la no uniformidad del entrehierro y al pequeño deslizamiento producido por las cargas de fricción y ventilación.

El factor de potencia en vacío es:

$$\cos \phi_0 = P_0 / (m I_n V_n I_0) \quad (1.32)$$

Valor que oscila entre 0,05 (87,13 grados) y 0,15 (81,37 grados).

Como I_r es muy pequeña se puede considerar el circuito del rotor abierto, figura 1.9 (a) ó (b).

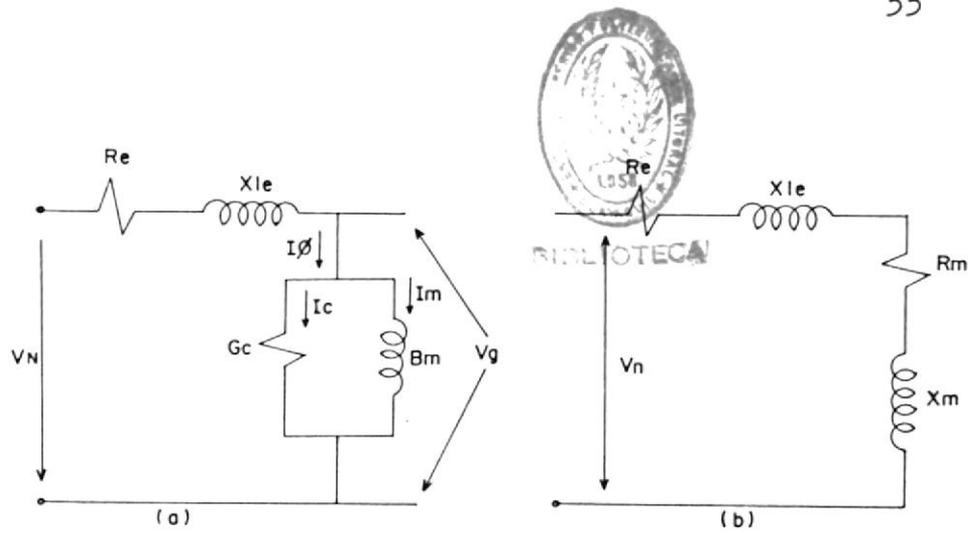


Fig. 1.9 (a) y (b) circuitos equivalentes en vacío.

Es necesario el conocimiento de P_{h+f} para la determinación de R_m , para que de este modo se puedan representar las pérdidas P_{h+f} .

Para obtener esto se requiere también de la siguiente prueba:

1.2.1.3 Prueba de vacío ideal

Se requiere que la máquina sea llevada a la velocidad sincrónica por medio de otra máquina auxiliar, en este caso $I_r = 0$ P_{f+v} y P_{fe-rot} son proporcionadas por la máquina auxiliar.

Se considera el siguiente esquema:

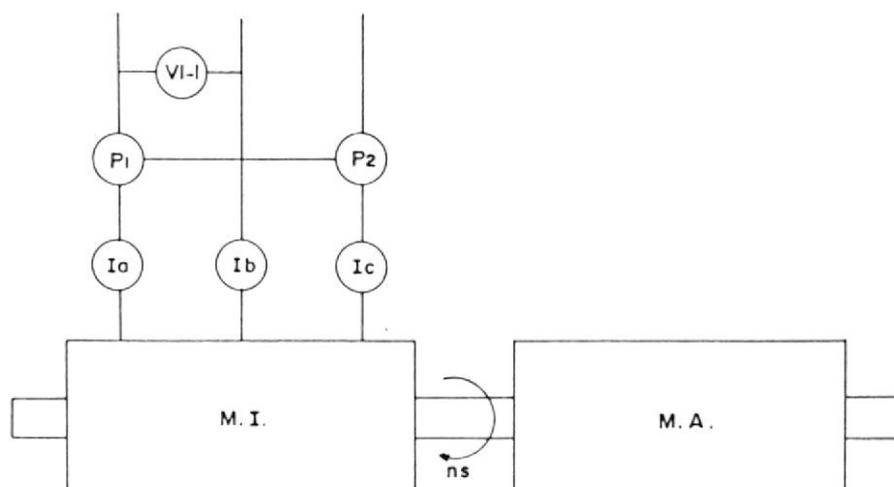


Fig. 1.10 Esquema para la prueba de vacío ideal.

Sea: $V_n' = V_{1-1} / \sqrt{3} =$ voltaje nominal por fase.

$I_o' = (I_a + I_b + I_c) / 3 =$ corriente en vacío por fase.

$P_o' = P_1 + P_2 =$ potencia total.

Luego, la potencia P_o se consumirá en:

$$P_o' = m_1 I_o'^2 R_e + P_{h+f}$$

donde:

$$P_{h+f} = P_o' - m_1 I_o'^2 R_e \quad (1.33)$$

Si se procede a calcular considerando los circuitos de la figura 1.9 :

$$P_{h+f} = m_1 V_g^2 G_c$$

$$G_c = P_{h+f} / (m_1 V_g^2) \quad (1.34)$$

$$V_g = V_n - I_o (R_e + jX_{le}) \quad (1.35)$$

I_o es la de vacío, ya que en

condiciones de funcionamiento siempre se consideran con $f+v$ y $f_e\text{-rot}$.

X_{le} se calcula a partir de la prueba de rotor bloqueado.

$$I_o = I_e + I_m \quad (1.36)$$

Conocido I_o y I_m procedemos a calcular I_e

$$I_e = V_g G_c \quad (1.37)$$

$$|I_m| = \sqrt{I_o^2 - I_e^2} \quad (1.38)$$

$$\text{Luego, } V_g = I_o / b_m$$

$$B_m = I_m / V_g \quad (1.39)$$

Conociendo G_c y B_m , se procede a calcular:

$$R_m = G_c / (G_c^2 + B_m^2) \quad (1.40)$$

$$X_m = B_m / (G_c^2 + B_m^2) \quad (1.41)$$

1.2.1.4 Prueba de cortocircuito

Las condiciones de reposo $s=1$ en un motor de inducción son iguales a las de un transformador en cortocircuito.

La prueba se la realiza de la siguiente manera:



BIBLIOTECA

Manteniéndose bloqueado el rotor mecánicamente, de tal manera que no gire, se alimenta el motor de inducción con voltaje reducido, el cual es el necesario para hacer circular corriente nominal en el estator; la frecuencia también debe ser reducida ya que los valores de resistencia efectiva e inductancia de dispersión del rotor, que corresponden a frecuencias del rotor debido a pequeños deslizamientos, pueden diferir considerablemente de sus valores a frecuencia nominal, particularmente con rotores de doble jaula.

Los procedimientos para estas pruebas de los estándares de la IEEE, sugieren utilizar un valor correspondiente al 25% del valor de la frecuencia nominal. Luego la reactancia de dispersión total a frecuencia nominal se obtiene considerando la reactancia proporcional a la frecuencia. Sin embargo, estos efectos de la



frecuencia son despreciables, en máquinas normales menores a 25 HP, por lo que la impedancia de rotor bloqueado, puede medirse directamente a frecuencia nominal para estos casos.

Se considera el siguiente esquema:

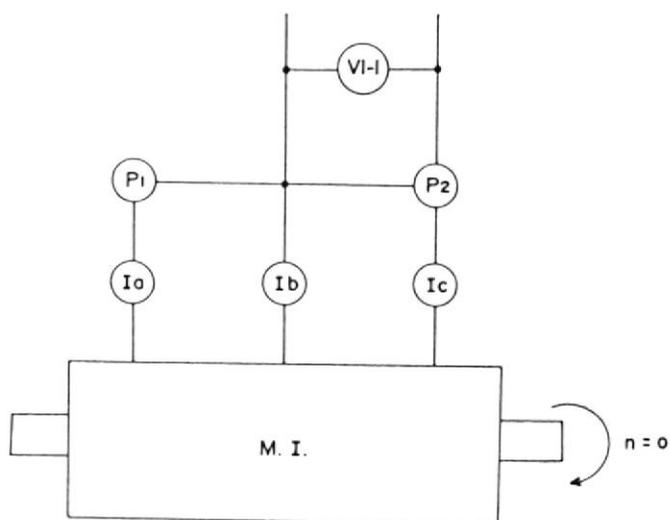


Fig. 1.11 Esquema para la prueba de cortocircuito.

Sea: $V_{cc} = V_{1-1}/\sqrt{3}$ = el voltaje de cortocircuito por fase.

$I_n = (I_a + I_b + I_c)/3$ = la corriente nominal por fase.

$P_{cc} = P_1 + P_2$ = la potencia

total de entrada.

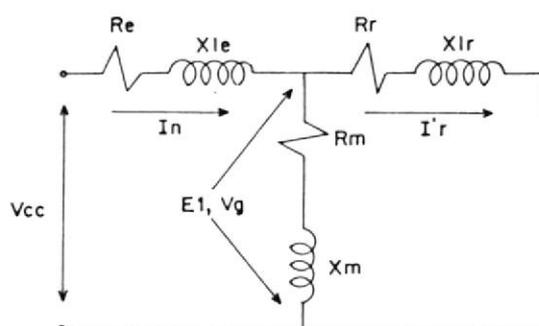


Fig. 1.12 Circuito equivalente para la condición de cortocircuito.

Ya que $(R_r + jX_{lr}) \ll X_m$

$I_n (R_e + jX_{le})$ es grande

Sólo fluye una pequeña corriente en el circuito magnético y las pérdidas del hierro debido a dicho flujo magnético son pequeñas.

En estas condiciones se tiene:

$$P_{f+v} = 0$$

$$P_{h-rot} = 0$$

y no existe potencia mecánica en el eje, toda la potencia se consume en las resistencias del cobre del estator y rotor.

$$P_{cc} = m_1 I_n^2 R_e + m_1 I_r^2 R_r \quad (1.42)$$

La corriente primaria está determinada principalmente por la suma de la impedancia primaria y secundaria. La f.c.e.m. V_g es la que reduce la corriente del primario cuando el motor gira. Cuando el motor se encuentra en reposo sólo existe una pequeña f.c.e.m., luego la corriente primaria viene a ser alta de 4 a 8 veces la corriente nominal, cuando se aplica tensión nominal durante la prueba de cortocircuito.

Para evitar el sobrecalentamiento de los arrollamientos se hace la prueba de cortocircuito a una tensión V_{cc} que es alrededor del 30% al 50% de la tensión nominal.

El factor de potencia en reposo es:

$$\cos \phi_{cc} = P_{cc} / (m_1 V_{cc} I_n) \quad (1.43)$$

que es mayor que en vacío, pero que permanece pequeño debido a la alta componente reactiva de la corriente necesaria para producir los flujos de dispersión del estator y rotor.

De los datos medidos, se tiene que:

$$Z_{cc} = V_{cc}/I_n \quad (1.44)$$

$$R_{cc} = P_{cc} / m_1 I_n^2 \quad (1.45)$$

Si se desprecia la rama de excitación, se tiene:

$$R_{cc} = R_e + R_r \quad (1.46)$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \quad (1.47)$$

$$X_{cc} = X_{le} + X_{lr} \quad (1.48)$$

Para los fines de cálculo se tiene que:

$$R_r = R_{cc} - R_e \quad (1.49)$$

$$X_{cc}/2 = X_{le} = X_{lr} \quad (1.50)$$

En el capítulo II se verá la necesidad de una prueba más, esta es: La prueba de velocidad síncrona, la cual permite desarrollar una relación entre el voltaje del entre-hierro y la reactancia magnetizante.

1.2.1.5 Prueba de velocidad síncrona

La máquina es llevada a su velocidad



síncrona mediante por un ~~primo motor,~~
se procede a medir la impedancia por fase para diferentes valores de voltaje de entrada V_{ent} . Como lo que se necesita es la variación de X_m con respecto al flujo del entre-hierro, que es proporcional a V_g/F , es necesario calcular el voltaje en el entre-hierro, para lo cual se resta la caída de voltaje debido a la impedancia de dispersión del estator, del voltaje de entrada. Se obtiene X_m para cada voltaje, restando la impedancia de dispersión del estator de la impedancia de entrada medida. La figura 1.13 muestra la curva típica de esta relación.

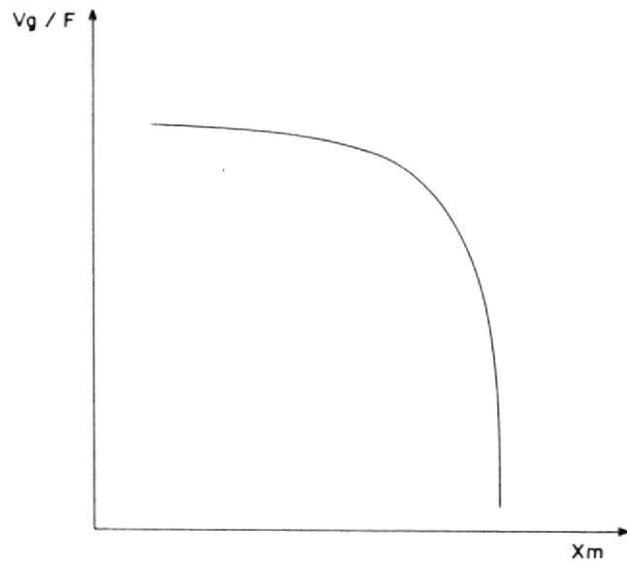


Fig. 1.13 Variación típica de V_g/F con respecto a X_m a partir de la prueba de velocidad síncrona.

1.2.2 POTENCIA DESARROLLADA Y EFICIENCIA DE UNA MAQUINA DE INDUCCION

A partir del circuito equivalente es posible determinar aspectos del funcionamiento en estado estable como: variación de corriente, velocidad, torque, pérdidas, así como también requerimientos de potencia.

Como en toda máquina, por la ley de la conservación de la energía se sabe que, la potencia de salida de una máquina de inducción está dada por la diferencia entre la potencia

de entrada y las pérdidas. Así para un motor de inducción, la potencia de entrada está dada por:

$$P_m = m_1 V_{1-n} I_1 \cos \phi \quad (1.51)$$

donde m_1 es el número de fases del estator.

Las pérdidas son:

1. Pérdidas en el cobre del estator:

$$P_{Cu-est} = m_1 I_e^2 R_e \quad (1.52)$$

2. Pérdidas en el hierro:

$$P_{h+f}$$

3. Pérdidas en el cobre del rotor:

$$P_{Cu-rot} = m_1 I_r^2 R_r \quad (1.53)$$

4. Pérdidas por fricción y ventilación:

$$P_{f+v}$$

5. Pérdidas por hierro rotacional:

$$P_{h-rot}$$

No existe una forma general de cómo tratar las pérdidas en el hierro en el modelo.

Las pérdidas en el hierro que resultan del flujo de dispersión en el estator no son despreciables como lo sería en un transformador. Las pérdidas en el hierro del rotor varían con la frecuencia del rotor, y por lo tanto con el deslizamiento. Bajo condiciones de operación normal, el

deslizamiento es aproximadamente 0,03 por lo que la frecuencia será de sólo 2 Hz (para $F = 60$ Hz), y la pérdida en el hierro del rotor es despreciable. Pero en el arranque y durante la aceleración la pérdida en el hierro del rotor es un valor alto que decrece, mientras la fricción y ventilación empiezan en cero y se incrementan conforme se acelera la máquina. Como resultado, la suma de las pérdidas por fricción, ventilación y hierro rotacional se la puede considerar constante.

Permitiendo llamar a estas pérdidas como "Pérdidas Rotacionales".

$$P_{rot} = P_{f+v} + P_{h+f} + P_{h-rot} \quad (1.54)$$

Aunque esta definición no es muy exacta, tiene la virtud de ser conveniente.

La cantidad más importante en el análisis de máquinas de inducción es la potencia transferida por el campo magnético del entrehierro desde los devanados del estator al rotor.

Esta cantidad estará representada por el símbolo P_g .



P_g = potencia del entre-hierro

Si se desprecian, en este punto, las pérdidas en el hierro del estator, la potencia en el entre-hierro estaría dada por la diferencia entre la potencia de entrada y las pérdidas en cobre del estator.

$$P_g = P_{ent} - P_{Cu-est}$$

$$P_g = m_1 V_1 - n I_1 \cos \phi - m_1 I_e^2 R_e \quad (1.55)$$

o también, del circuito equivalente:

$$P_g = m_1 I_r^2 R_r / s \quad (1.56)$$

P_g es la potencia de entrada al rotor, la cual es parcialmente consumida como pérdidas en el cobre del rotor y la diferencia está disponible para desarrollar potencia mecánica.

$P_{mec-des}$ = potencia mecánica desarrollada.

Entonces:

$$P_{mec-des} = P_g - P_{Cu-rot} =$$

$$P_{mec-des} = m_1 I_r^2 R_r / s - m_1 I_r^2 R_r =$$

$$P_{mec-des} = m_1 I_r^2 R_r (1-s) / s =$$

$$P_{mec-des} = (1-s) P_g \quad (1.57)$$

De donde se puede concluir que del total de la potencia entregada al rotor, la fracción

correspondiente a $(1-s)$ es convertida en potencia mecánica, mientras que la fracción s es disipada por el rotor en forma de calor. Lo cual hace evidente que las máquinas con deslizamientos grandes son máquinas de baja eficiencia. Habiendo determinado la potencia mecánica desarrollada, sustrayendo de la potencia de entrada solamente las pérdidas en el cobre, la potencia mecánica de salida neta será encontrada restando las pérdidas rotacionales de la potencia mecánica desarrollada.

$P_o =$ potencia mecánica de salida

$P_o = P_{mec-des} - P_{rot}$

$P_o = P_{mec-des} - P_{f+v} - P_{h+f} - P_{h-rot} \quad (1.58)$

1.2.3 CARACTERISTICA TORQUE-VELOCIDAD DE MAQUINAS DE INDUCCION

Si se aplica el teorema de Thévenin al circuito equivalente, se puede obtener una expresión para el torque de una máquina de inducción como una función de su deslizamiento.

Aplicando Thévenin en los puntos a y b de la figura 1.14, se obtiene la figura 1.15.

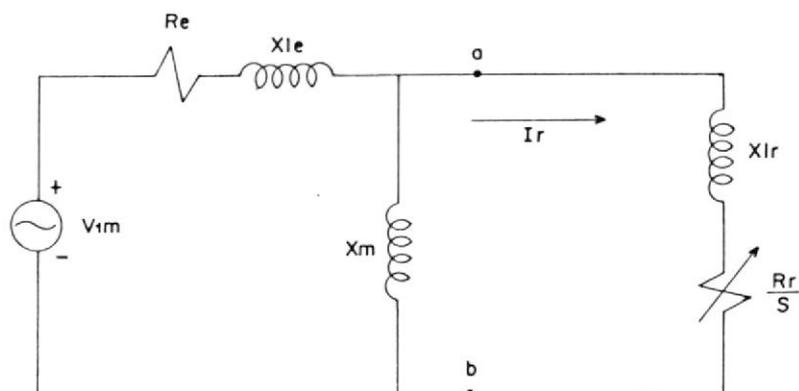


Fig. 1.14 Circuito equivalente aproximado de un motor de inducción.

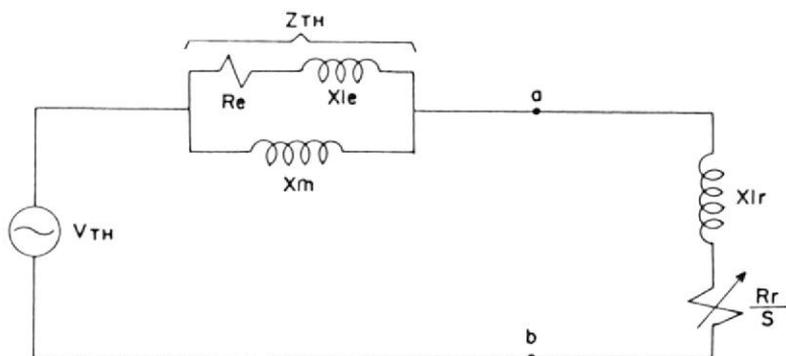


Fig. 1.15 Aplicación del teorema de Thévenin al circuito equivalente del motor de inducción.

donde:

$$V_{th} = V_{1m} \left(\frac{jX_m}{R_e + j(X_{le} + X_m)} \right) \quad (1.59)$$

$$Z_{th} = R_1 + jX_1 = \frac{jX_m (R_e + jX_{le})}{R_e + j(X_{le} + X_m)} \quad (1.60)$$

Si se considera que:

$$R_e \ll (X_{le} + X_m)$$

$$\text{También } X_1 = X_{le} \quad (1.61)$$

entonces la siguiente expresión involucra un



error mínimo.

$$V_{th} = V_{1m} \left(\frac{X_m}{X_{le} + X_m} \right) \quad (1.62)$$

Ahora, la parte real de Z_{th} (ec. 1.60) es $\text{Re} \left(\frac{X_m}{\sqrt{R_e^2 + (X_{le} + X_m)^2}} \right)$, lo cual es muy aproximado a $\frac{\text{Re} X_m}{X_{le} + X_m}$, ya que $R_e \ll (X_{le} + X_m)$.

Por lo tanto

$$R_1 \cong \text{Re} \left(\frac{X_m}{X_{le} + X_m} \right)^2 \quad (1.63)$$

($R_1 = \text{Re}$ involucra un error de sólo alrededor del 5 %).

Una expresión para I_r se puede desarrollar ahora, en función del voltaje Thévenin V_{th}

$$I_r = V_{th} / (R_1 + R_r/s + j(X_l + X_{lr})) \quad (1.64)$$

El torque desarrollado está dado por:

$$T_d = P_g / \omega_s = (1/\omega_s) (m_1) (I_r)^2 (R_r/s)$$

Si en esta última ecuación se sustituye I_r por la ecuación (1.64) se tendría:

$$T_d = (m_1/\omega_s) V_{th}^2 (R_r/s) / ((R_1 + (R_r/s)) + (X_l + X_{lr}))^2 \quad (1.65)$$

En la ecuación (1.59) se observa que V_{th} es

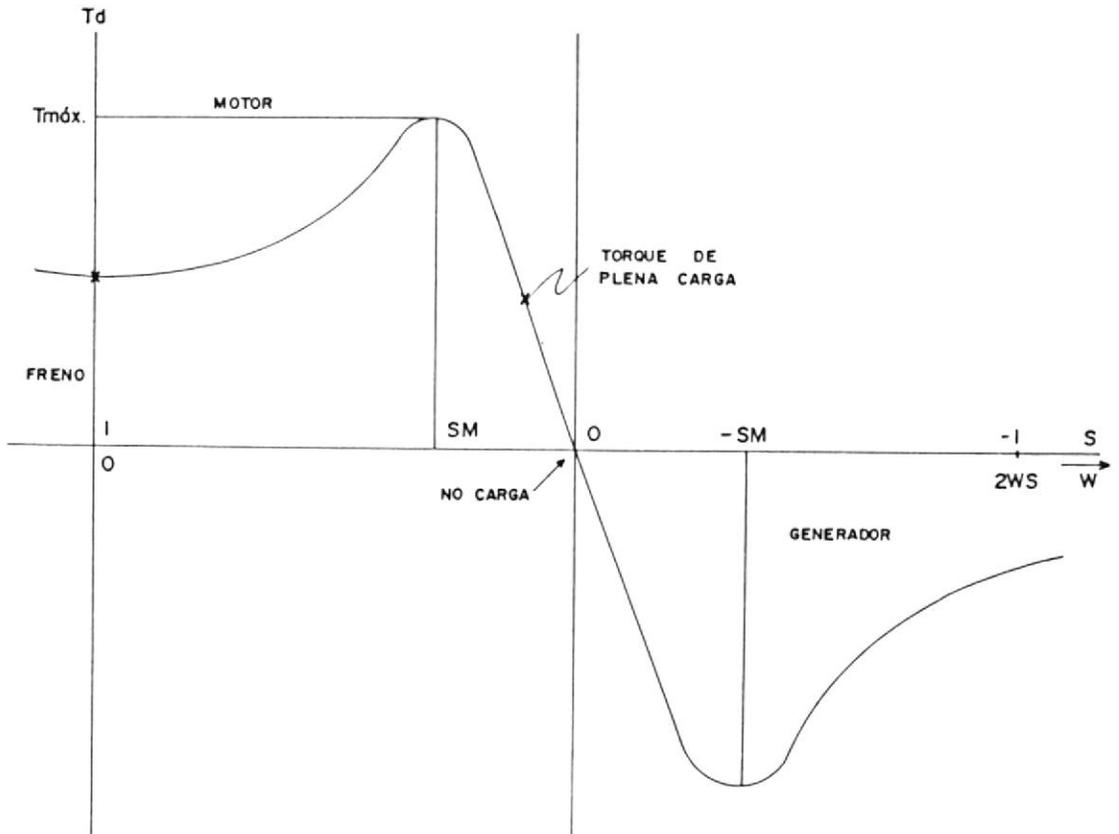


Fig. 1.17 Torque desarrollado por una máquina de inducción como una función de la velocidad.

A partir de la figura 1.17 se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Existe un torque máximo definido, $T_{máx}$, en el rango de operación del motor.
- El torque de plena carga está aproximadamente entre 0.4 y 0.5 del $T_{máx}$.
- Una vez que la máquina está en operación, sólo una pequeña parte de la curva está involucrada, la parte que va desde vacío hasta plena carga. Existe una variación

proporcional al voltaje en los terminales del motor, a cualquier velocidad el torque es proporcional al cuadrado del voltaje suministrado. Cuando esta expresión, para el torque desarrollado, es dibujado como una función del deslizamiento (s) y como una función de la velocidad (w), aparecen las curvas de las figuras (1.16) y (1.17) respectivamente.

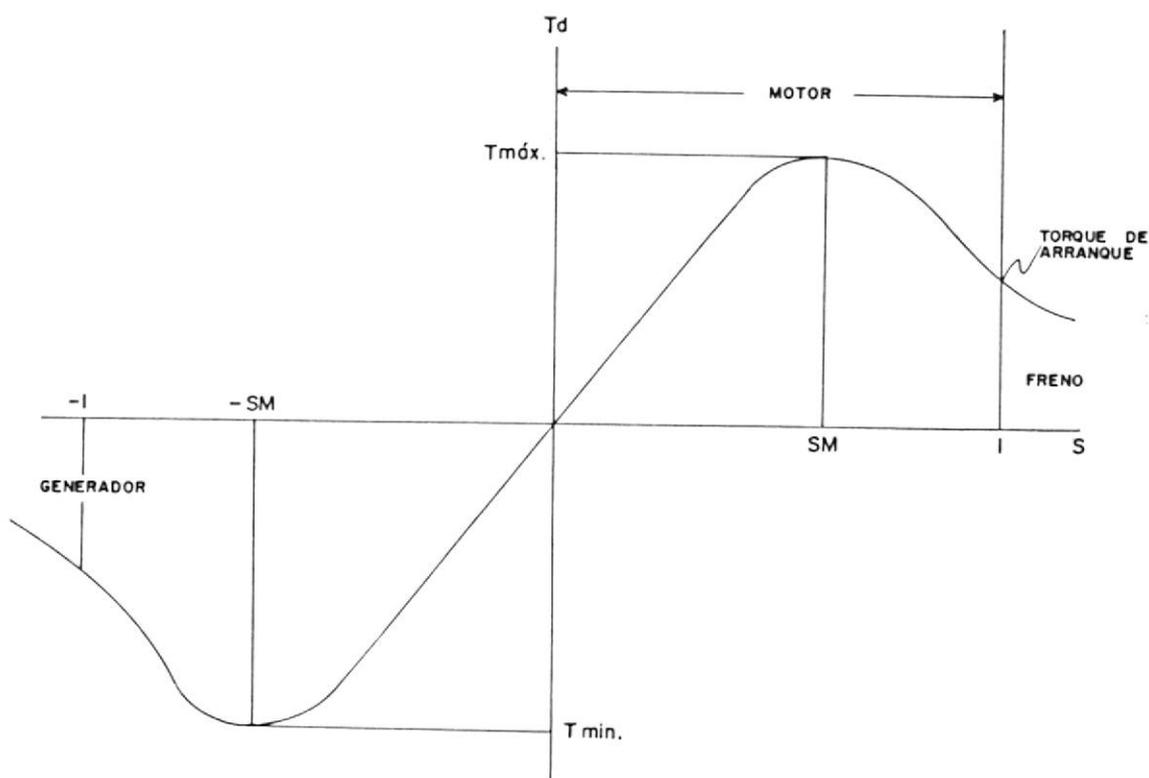


Fig. 1.16 Torque desarrollado por una máquina de inducción como una función del deslizamiento.

y el voltaje en el entre-hierro es:

$$V_g = V_t + I_e (R_e + jX_{le}) \quad (1.71)$$

La corriente en el ramal magnetizante es:

$$I_m = - V_g / jX_m \quad (1.72)$$

El diagrama fasorial de voltajes y corrientes calculados por este procedimiento se muestra en la fig. 1.20. Es significativo resaltar el hecho de que la corriente en el estator, la cual representa la corriente de salida del generador, adelanta al voltaje terminal en el ángulo del factor de potencia θ . La componente reactiva de esta corriente $I_e (\sin\theta)$ determina la potencia reactiva que debe ser suministrada por los capacitores en paralelo.

La ecuación 1.69 muestra que un valor de deslizamiento dado determina el valor de Z . Esto a su vez determina el valor de I_e y consecuentemente la potencia y los VARS de salida del generador $V_t I_e^*$ (donde I_e^* es el conjugado del fasor I_e). Para un voltaje terminal dado, existe una relación fija entre la potencia real y reactiva.

Las curvas características I , que ilustran esta

lineal en este rango. En vacío, la velocidad está muy cerca a la velocidad síncrona, ($s = 0$) y a plena carga, el deslizamiento es un tanto menor a dicha velocidad.

d) El torque de arranque ($s=1$) es ligeramente mayor que el torque a plena carga. Pero puede ser mayor mediante un diseño especial o usando cierto método de arranque.

e) La máquina opera como un generador ($T_d < 0$, $w > 0$, potencia negativa) cuando la máquina es llevada a velocidades mayores que la de sincronismo.

f) La máquina actúa como un freno cuando es girada en sentido contrario con respecto al campo giratorio ($T_d > 0$, $w < 0$, potencia mecánica negativa).

1.3 LA MAQUINA DE INDUCCION COMO GENERADOR

De acuerdo con la ecuación del deslizamiento $s = (n_s - n)/n_s$, es posible un deslizamiento negativo ($s < 0$) cuando la velocidad del rotor sea mayor que la velocidad síncrona ($n > n_s$).

Debido a que la máquina al girar como motor no puede alcanzar la velocidad uniforme $n = n_s$, debe ser otra



máquina (un primo-motor) la que lleve al rotor a una velocidad superior a n_s .

De la ecuación (1.57) se puede determinar que para $s < 0$ la $P_{mec.des.}$ viene a ser negativa.

Esto significa que a velocidades por encima de la sincrónica el rotor no proporciona potencia mecánica sino que consume potencia mecánica, esto es, la máquina funciona como generador. De este modo el motor de inducción, manejado por un primomotor arriba de su velocidad sincrónica funciona como generador de inducción.

De la ecuación (1.65) se deduce que para $s < 0$ el par motor (T_d) cambia de signo, lo cual se muestra también por la consideración siguiente:

A la velocidad por debajo de la sincrónica se induce una fem en el arrollamiento del rotor que corresponde a la velocidad relativa entre el flujo giratorio y el rotor, ($n_s - n$).

A la velocidad sincrónica ($n = n_s$) esta fem viene a ser cero debido a que la velocidad relativa entre el flujo giratorio y el rotor es cero. A velocidades por encima de la sincrónica ($n > n_s$) la velocidad relativa entre el flujo giratorio y el rotor cambia

su signo comparada con las velocidades por debajo de la sincrónica, y por lo tanto $E2'$ e $I2'$ cambian sus signos. Ya que el par motor está determinado por el producto del flujo y la corriente de armadura, el par motor cambia de signo a velocidad por encima de la sincrónica.

1.3.1 DIAGRAMA VECTORIAL DE UN GENERADOR DE INDUCCION

Del circuito equivalente de la máquina de inducción, se obtienen las ecuaciones de Kirchhoff para el funcionamiento como generador.

$$E1 - jIeXle = Ie Re + V1 \quad (1.66)$$

$$sE2 - jIr s Xlr = Ir Rr ; s < 0 \quad (1.67)$$

$$E1 = E2 = - Im Zm = - (Ie + Ir) Zm \quad (1.68)$$

A partir de estas ecuaciones se obtiene el diagrama vectorial correspondiente (Fig. 1.18).

La fem secundaria $E2'$ se adelanta del flujo ϕ en 90 grados y es opuesta a la dirección de $E2'$ para el motor. Ya que s es negativo, $+jIr sXlr$ se atrasa a la corriente Ir en 90 grados e Ir se adelanta de $E2$.

$E1$ está adelante de $V1$ como lo sería para un generador.

La corriente primaria I_e se adelanta a la tensión primaria, V_1 , esto es, cuando el generador de inducción funciona como un sistema aislado puede únicamente alimentar a una carga capacitiva. Lo cual se explica de la siguiente manera:

El primo-motor puede influir únicamente en la componente activa de la corriente y no en la componente reactiva; por lo tanto, el rotor no puede proporcionar corriente reactiva. Ya que la corriente reactiva (I_ϕ) en fase con el flujo principal (ϕ) es necesaria para mantener este flujo y se necesita otra corriente reactiva para mantener los flujos de dispersión, estas corrientes deben ser proporcionadas por el estator, por una corriente adelantada del estator (Fig. 1.18).

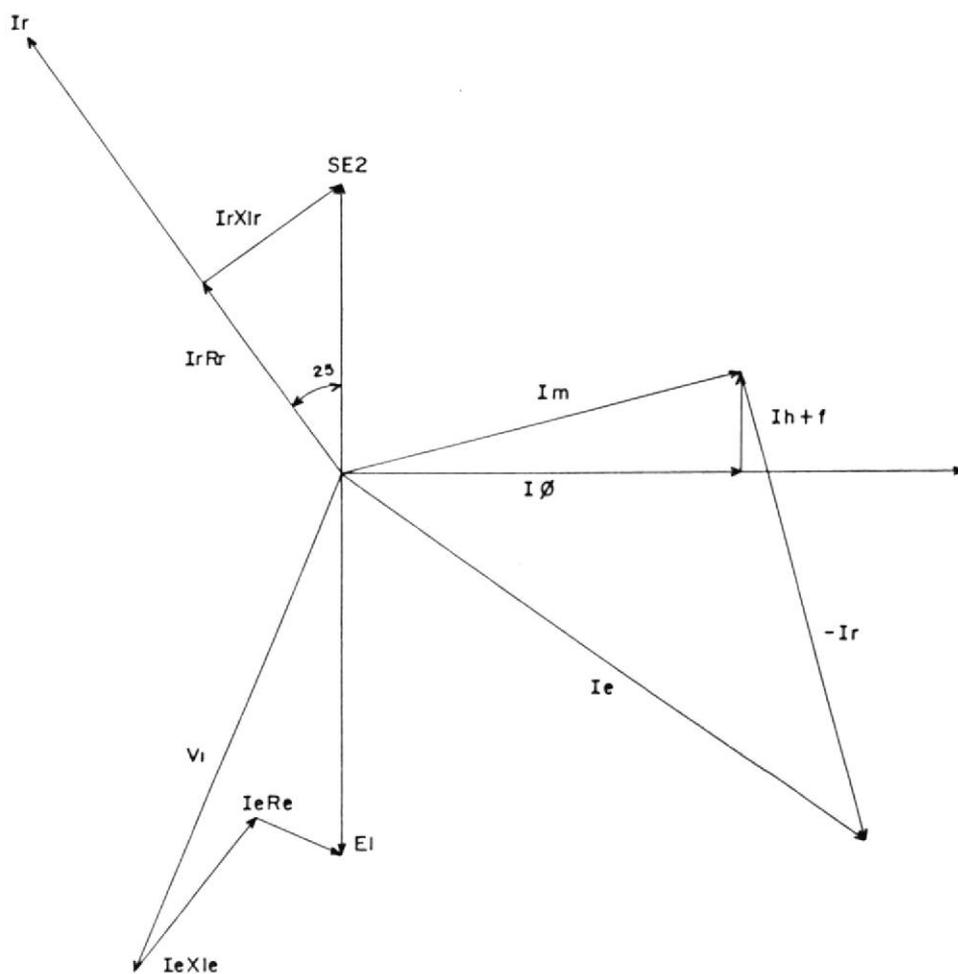


Fig. 1.18 Diagrama vectorial de un generador de inducción

donde:

$$I_e X I_e \perp I_e$$

$$I_e R_e \parallel I_e$$

1.3.2 OPERACION DEL GENERADOR DE INDUCCION

La máquina de inducción actúa como un generador cuando es movida por un primo-motor; y cuando la velocidad del rotor es incrementada hasta igualar la velocidad síncrona, no hay movimiento relativo entre los conductores del rotor y el flujo giratorio, luego no se induce voltaje o corriente en los conductores del rotor. Un mayor incremento en la velocidad del rotor causa una inversión en la dirección relativa de rotación entre los conductores del rotor y el flujo, y el voltaje y corriente del rotor son correspondientemente invertidas. El deslizamiento, bajo estas condiciones, es considerado negativo. El torque suministrado por el eje del primo-motor transferido a través del entrehierro al estator, desde el cual es entregado al sistema como potencia generada. La potencia neta de salida es la potencia suministrada al eje menos las pérdidas de la máquina y es una función del deslizamiento.

El circuito equivalente aproximado y el diagrama fasorial de un generador de inducción son mostrados en las figuras 1.19 y 1.20 respectivamente.

Por simplicidad, se ha despreciado las pérdidas en el núcleo en este circuito equivalente.

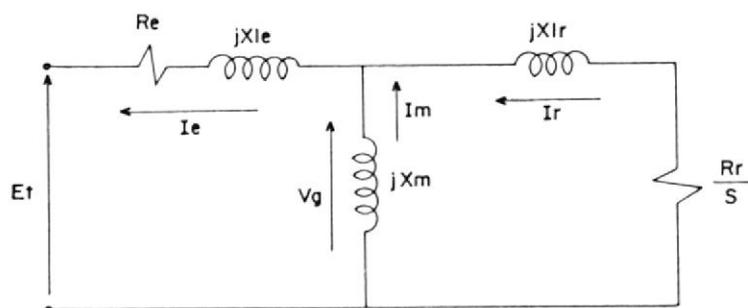


Fig. 1.19 Circuito equivalente aproximado para un generador de inducción.

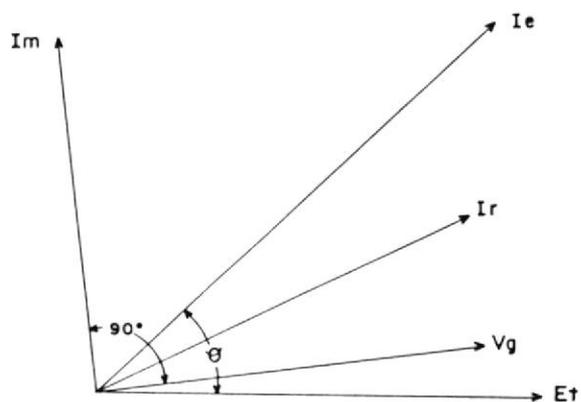


Fig. 1.20 Diagrama fasorial del circuito equivalente aproximado del generador de inducción.

El circuito equivalente contiene dos variables, el deslizamiento s , el cual es función de la velocidad, y la reactancia magnetizante la cual es determinada por la saturación y es una función del voltaje en el entrehierro V_g .

La reactancia magnetizante puede ser obtenida de la curva de saturación para la máquina en cuestión; pero para variaciones de voltaje terminal con límites estrechos (normalmente encontrados en sistemas de potencia), es suficientemente exacto considerar la reactancia magnetizante una constante.

La potencia de salida de un generador de inducción puede ser deducida a partir del circuito equivalente de la fig. 1.19.

Cuando el deslizamiento es conocido o asumido y la reactancia magnetizante X_m es también conocida, el circuito equivalente puede ser reducido a una simple impedancia:

$$Z = R_e + j X_{le} + (R_r/s + jX_{lr}) (jX_m) / (R_r/s + j(X_{lr} + X_m)) \quad (1.69)$$

La corriente del estator es:

$$I_e = - V_t / Z \quad (1.70)$$



relación, se muestran en la figura 1.21.

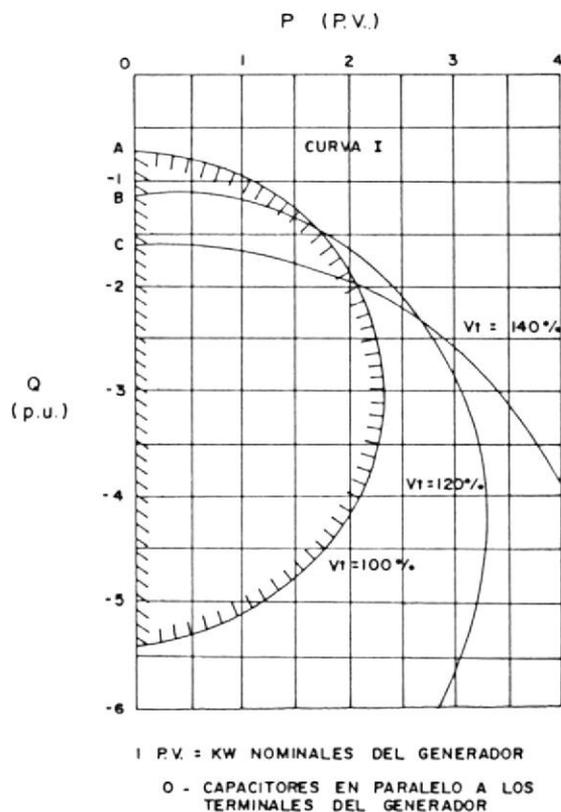


Fig. 1.21 Curvas P vs. Q para un generador de inducción a un voltaje del 100, 120 y 140 por ciento, y a una frecuencia del 100%.

Se notará que para estas curvas hay un límite definido para la potencia de salida del generador de inducción.

Este valor límite de potencia será llamado límite de potencia del generador y está dado por la siguiente ecuación:

$$P_{lim} = E_t^2 (X_m + X_{le} - X' - 2 R_e) / 2(R_e^2 + (X_m + X_{le}) X') \quad (1.73)$$

donde:

P_{lim} = potencia límite

$$X' = X_{le} + X_m X_{lr} / (X_m + X_{lr})$$

Si se desprecia la resistencia del estator ($R_e \Rightarrow 0$) y se usa la definición de X' , la expresión para la potencia límite puede ser escrita de la siguiente manera:

$$P_{lim} = E_t^2 / 2 \{ (X_m + X_{le}) (X_m + X_{lr}) [X_e + (X_m X_{lr}) / (X_m + X_{lr})] / X_m \} \quad (1.74)$$

Curvas con las características típicas de un generador de inducción se muestran en la figura 1.22.

La eficiencia es buena para cargas mayores al 25% de la carga nominal; por lo tanto esto es comparable a un generador sincrónico.

El factor de potencia, por otro lado, progresivamente disminuye cuando la carga y el deslizamiento son reducidos de sus valores nominales. La razón de esto es que mientras el voltaje en el entre-hierro permanezca

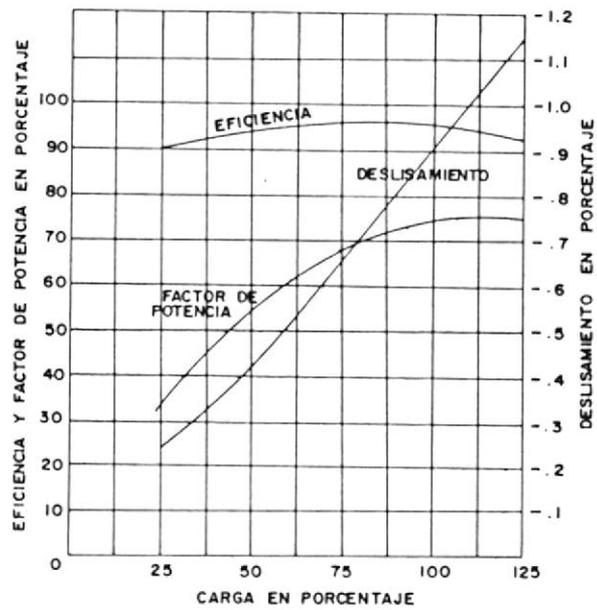


Fig. 1.22 Curvas características de un generador de inducción.

constante, la corriente magnetizante será constante. Así, la corriente reactiva requerida por el generador es sustancialmente constante a través de todo el rango de carga. Consecuentemente, para obtener el factor de potencia más favorable, la máquina deberá operar tan cerca a la carga nominal como sea posible todo el tiempo.

C A P I T U L O I I

ANALISIS DEL GENERADOR DE INDUCCION COMO UN SISTEMA AISLADO

2.1 EL PROCESO DE AUTO-EXCITACION EN GENERADORES DE INDUCCION

En esta sección se examinará el fenómeno de auto-excitación en máquinas de inducción, además se presentará una interpretación física de cómo ocurre la auto-excitación.

2.1.1 INTRODUCCION

En muchas de sus aplicaciones un generador de inducción debe operar como un sistema aislado, y consecuentemente es imperativo que ocurra la auto-excitación y se mantenga.

Se estudiará el procedimiento mediante el cual se realiza la auto-excitación y se discutirá cómo el voltaje terminal puede, bajo condiciones favorables, aumentar desde un valor relativamente insignificante causado por el magnetismo remanente en el rotor y crecer hasta el voltaje nominal de la máquina.

La física del proceso es desarrollada

considerando el comportamiento de la máquina primero como una máquina síncrona que posee un rotor permanentemente magnetizado y luego como una máquina asíncrona cuando el voltaje terminal alcance un valor que evidencie que la auto-excitación se ha producido.

La máquina arranca como un generador con polos permanentes (figura 2.1) y luego es conectada como una máquina asíncrona (figura 2.2), la transición dependerá de los parámetros de la máquina, la velocidad del rotor y el tamaño de los capacitores. Los parámetros de los circuitos son asumidos todos constantes excepto la inductancia magnetizante, la cual varía tal como se muestra en la figura 2.3.

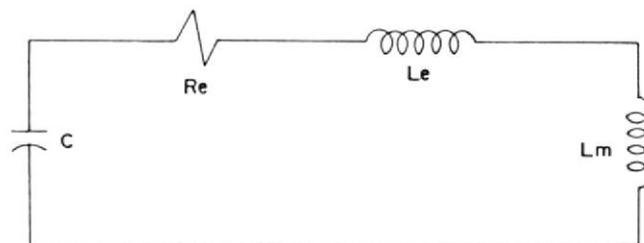


Fig. 2.1 Modelo síncrono del generador de inducción auto-excitado.

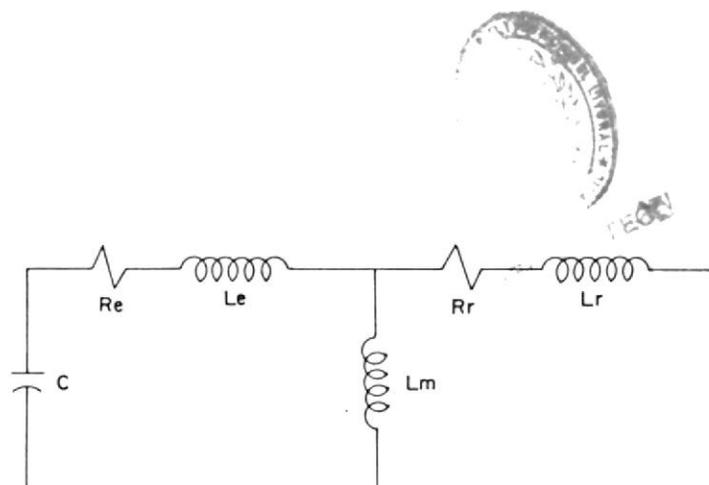


Fig. 2.2 Modelo asíncrono del generador de inducción auto-excitado.

La caída de la inductancia a valores elevados de corriente magnetizante es bien conocida y determina el voltaje final de estado estable. Mientras que su comportamiento a valores bajos de corriente magnetizante no ha sido investigado profundamente, si bien en este rango es donde se determina las características iniciales de la auto-excitación de la máquina.

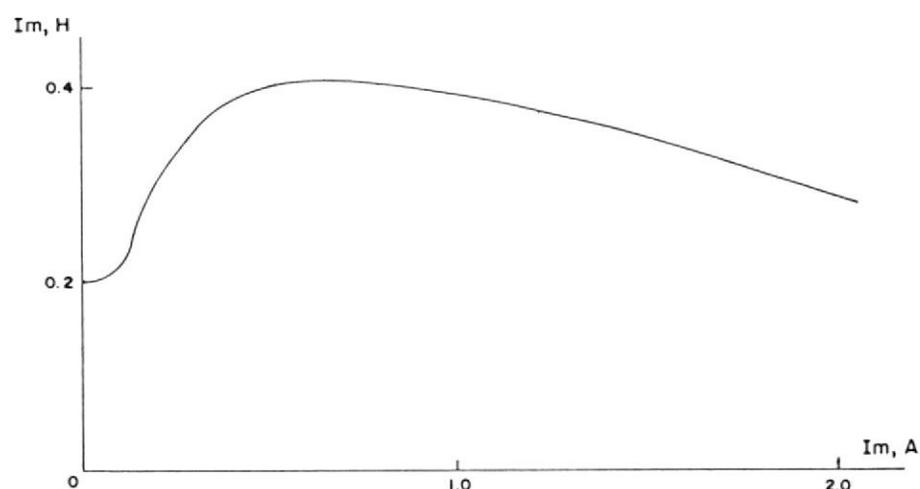


Fig. 2.3 Variación de la inductancia magnetizante con la corriente magnetizante.

2.1.2 CONSIDERACIONES TEORICAS

Para los dos circuitos equivalentes simples mostrados en las figuras 2.1 y 2.2, se realizará un análisis de las relaciones entre el voltaje terminal, corriente y velocidad del rotor.

2.1.2.1 MODELO SINCRONO

El circuito equivalente para el modelo síncrono, figura 2.1, tiene la forma de un circuito resonante en el cual la función forzante es el magnetismo remanente en el rotor, induciendo corrientes en el estator a frecuencia de línea.

El magnetismo remanente presente en el rotor es medido en términos del voltaje a circuito abierto (capacitores desconectados) a su respectiva frecuencia. Para determinar la respuesta de la función forzante, se incorpora al circuito equivalente una fuente de voltaje, donde su magnitud y frecuencia depende de la velocidad del rotor, tal como se muestra en la figura

2.4.

De la figura 2.4, la corriente magnetizante I_m puede ser determinada:

$$I_m = K\omega_r / (R_e + j(\omega_r(L_e + L_m) - (1/\omega_r C))) \quad (2.1)$$

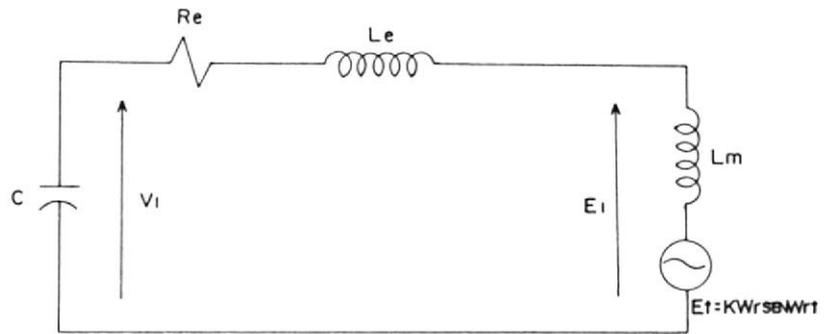


Fig. 2.4 Circuito equivalente del modelo síncrono, incorporando el magnetismo remanente como una fuente de voltaje dependiente de la frecuencia.

Donde ω_r es la frecuencia eléctrica síncrona proporcional a la velocidad del rotor, $K = V_{oc}/\omega_o$ (una constante proporcional a la densidad de flujo magnético remanente en el rotor) y V_{oc} el voltaje a circuito abierto producido a frecuencia nominal del sistema ω_o .

En este circuito, la respuesta normal



de un circuito resonante frente a una función forzante es modificada por una inductancia magnetizante no lineal y la variación en magnitud de la función forzante con la velocidad del rotor.

Resolviendo la ecuación (2.1), usando los valores para la inductancia magnetizante y corriente de la figura (2.3) y los siguientes parámetros de una máquina experimental; $R_r = 2,1$, $R_e = 2,98$, $L_r = L_e = 13,5$ mH y $C = 25$ uF (parámetros de una máquina de inducción trifásica, 4 polos, 2,25 KW), se pueden obtener una serie de posibles puntos de operación síncrona.

Graficando estos puntos se obtienen curvas como las que se muestran en la figura 2.5 para valores de magnetismo remanente, variando el voltaje a circuito abierto de 0,5 V a 0,1 V a 50 Hz.

Las curvas crecen gradualmente mientras el incremento de corriente causa un rápido crecimiento de la

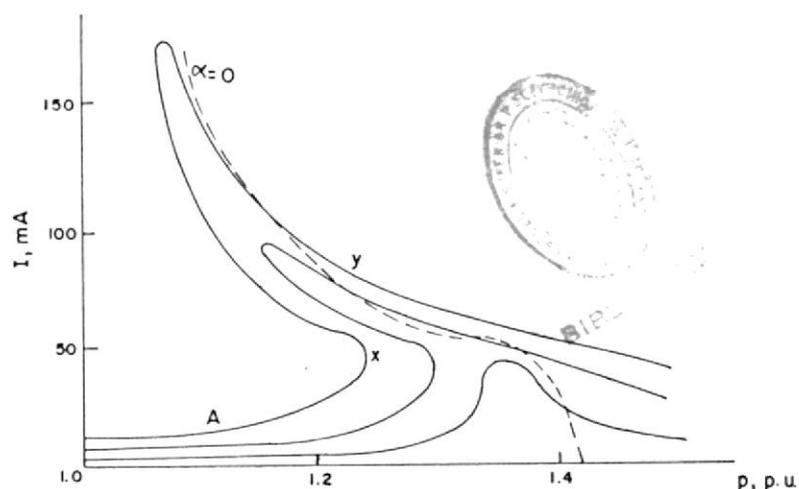


Fig. 2.5 Puntos de posible operación de un generador de inducción en modo síncrono para tres niveles de magnetismo remanente.

inductancia magnetizante (ver figura 2.3), y una disminución repentina asociada con la frecuencia resonante síncrona la cual causa que las curvas se desplomen.

Si la velocidad de la máquina es incrementada desde cero, la respuesta produce una curva de la forma hasta antes de alcanzar el codo (punto X), en dicho punto, el incremento de la velocidad del rotor puede causar un salto pasando a la resonancia síncrona (punto Y).

Debe de notarse que estas curvas junto con aquellas para el modo asíncrono, pueden ser alteradas con respecto a la

velocidad de la máquina simplemente variando la capacitancia conectada a la máquina. El rango 1.0 a 1.4 por unidad fue conveniente para el equipo usado como primo-motor de la máquina de inducción. Este rango de velocidad puede ser reducido simplemente incrementando la capacitancia.

2.1.2.2 MODELO ASINCRONO

Utilizando el circuito de la figura 2.2, la corriente suministrada por la máquina al capacitor (corriente del estator) I_{est} , está dada por:

$$I_{est} = \text{Real} (I_e e^{m t}) \quad (2.2)$$

donde Real significa la parte real, I_e es la corriente compleja del estator y $m = \alpha + j\omega$.

Similarmente, para el circuito del rotor, la corriente del rotor I_{ro} es:

$$I_{ro} = \text{Real} (I_r e^{(m-jv)t}) \quad (2.3)$$

donde I_r es la corriente del rotor compleja y v es la velocidad del rotor.



Usando las ecuaciones de lazo de Kirchhoff con la notación estandar tenemos:

$$I_e (R_e + m(L_e + L_m) + 1/mc) + I_r m L_m = 0 \tag{2.4}$$

y

$$I_r (R_r + (m - jv)(L_r + L_m)) + I_e(m - jv)L_m = 0 \tag{2.5}$$

Resolviendo las ecuaciones (2.4) y (2.5) para I_r tenemos:

$$\left((m^2 c(L_e + L_m) + m^2 c R_e + 1) (-R_r - (m - jv)(L_r + L_m)) - m(m - jv)c L_m \right) I_r = 0 \tag{2.6}$$

Asumiendo $I_r = 0$, y simplificando la ecuación (2.6) en términos de m , tenemos:

$$m^3 c ((L_r + L_m)(L_e + L_m) - L_m^2) + m^2 c ((L_e + L_m) R_r + (L_r + L_m) R_e - jv((L_r + L_m)(L_e + L_m) - L_m^2)) + m(c R_e R_r + (L_r + L_m) - jvc(L_r + L_m) R_e) + (R_r - jv(L_r + L_m)) = 0 \tag{2.7}$$

En este punto, la ecuación puede ser normalizada convirtiéndola a valores

por unidad. Entonces, si v es expresada como una fracción de W_o , se tendría a partir de la ecuación (2.7):

$$\begin{aligned} & (m/W_o)^3 ((X_r+X_m) (X_e+X_m) - X_m^2) + \\ & (m/W_o)^2 ((X_e+X_m) R_r + (X_r+X_m) R_e - jv \\ & ((X_r+X_m) (X_e+X_m) - X_m^2)) + (m/W_o) (R_e \\ & R_r + X_c(X_r+X_m) - jv (X_r+X_m) R_e) + X_c \\ & (R_r - jv (X_r+X_m)) = 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Las raíces de esta ecuación cúbica definen condiciones bajo las cuales es posible la operación de la máquina asíncrona.

Resolviendo para $m = \alpha + j\omega$ siempre se obtienen dos raíces que tienen α negativo y no son de interés aquí. Sin embargo, la tercera raíz tiene un α que puede ser negativo, positivo o cero, y es esta raíz que determina si la corriente del rotor, la corriente y voltaje del estator, decrecen, se incrementan o se mantienen. La figura 2.6 muestra un gráfico de α versus la velocidad de la máquina para dos valores de L_m . Una velocidad resonante

ocurre para $\alpha = 0$.

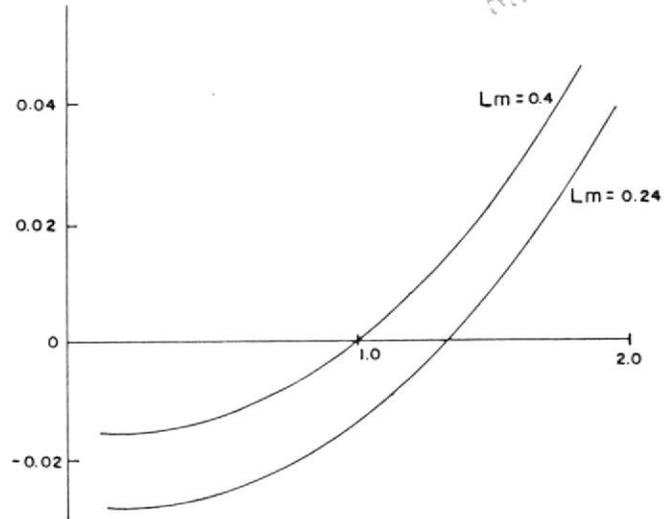


Fig. 2.6 Gráfico de α vs. velocidad de la máquina para dos valores de inductancia magnetizante. $L_m = 0.4$ H y 0.24 H.

Para que crezcan las corrientes asíncronas, y por lo tanto para que ocurra autoexcitación, debe excederse la velocidad resonante. La velocidad a la cual ocurre resonancia puede ser reducida mediante el incremento de la capacitancia terminal.

A partir de los valores de inductancia magnetizante mostrados en la figura 2.3, pueden obtenerse curvas de corriente y velocidad de la máquina para diferentes valores de α , tal como

se muestra en la figura 2.7.

La operación en estado estable de la máquina debe ser en un punto de resonancia; por ejemplo $\alpha = 0$.

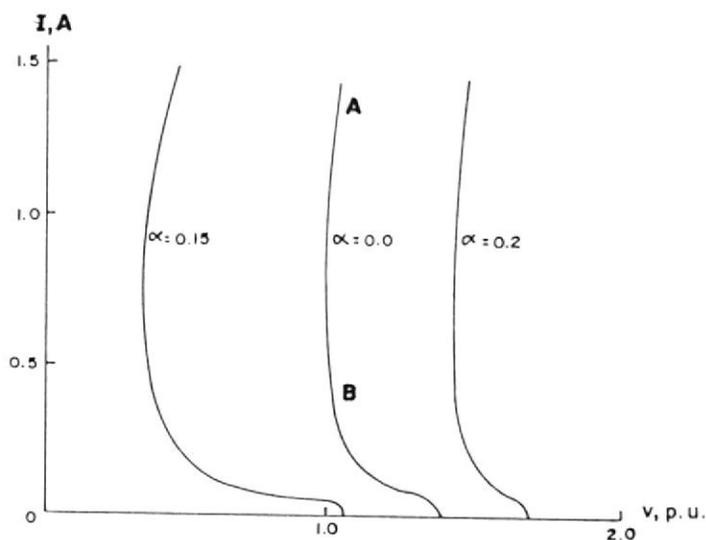


Fig. 2.7 Curvas de α presentando un crecimiento y decrecimiento exponencial de corrientes asíncronas. (máquina de inducción con parámetros dados anteriormente).

Pero como puede observarse, a una velocidad particular, existen dos puntos que satisfacen este criterio, A y B.

El punto A representa el punto al cual la máquina está completamente excitada. El punto B, sin embargo, representa una condición inestable, en el cual

cualquier cambio en la velocidad causará que la máquina salga de resonancia, el incremento en la velocidad tendiendo a causar auto-excitación con resonancia obtenida en el punto A, causará que la máquina retorne al modo síncrono. Es el punto B el de interés, y la figura 2.8 muestra curvas desarrolladas alrededor de esta área.

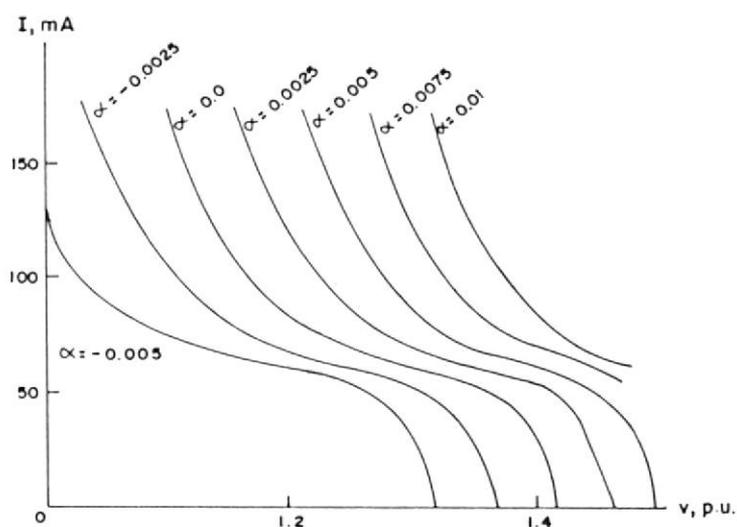


Fig. 2.8 Curvas de α para el área de operación crítica de la máquina con iniciación de auto-excitación. α positivo correspondiendo al crecimiento de corrientes asíncronas con excitación dominante.



2.1.2.3 Interacción entre modelos

La interacción entre los modelos síncronos y asíncronos puede ser observado combinando la curva $\alpha = 0$, para operación asíncrona, con las curvas para la respuesta síncrona mostradas en la figura 2.5. Para un valor dado de magnetismo remanente, una máquina arrancada del reposo tendrá una corriente en la capacitancia que sigue la curva síncrona apropiada (A) hasta el punto de codo (X). Si la velocidad se incrementa más, la corriente deberá saltar discontinuamente al punto Y, el cual se encuentra en el area donde la operación asíncrona es posible.

Bajo estas condiciones, una componente asíncrona crecerá rápidamente y el voltaje terminal se incrementará al valor apropiado. Los polos fijos del rotor debido a la remanencia son destruidos y la componente síncrona de la corriente decae a cero. Si el punto de operación síncrona está cerca del

punto X, sólo un pequeño disturbio se requiere para iniciar la auto-excitación.

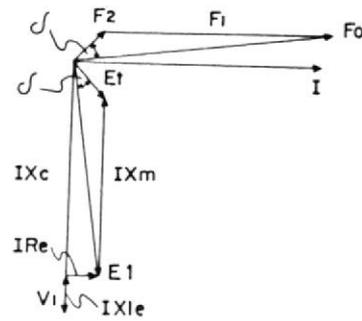


Fig. 2.9 Diagrama vectorial correspondiente al punto X (en la figura 2.5 para el circuito mostrado en la figura 2.4).

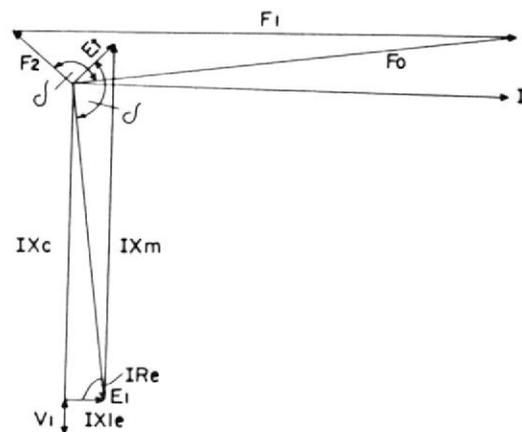


Fig. 2.10 Diagrama vectorial correspondiente al punto Y.

El efecto de esta transición sobre la máquina síncrona puede observarse en los diagramas vectoriales de las figuras 2.9 y 2.10 (para el circuito de la figura 2.4). Bajo resonancia, el ángulo de carga es tal que la fuerza magnetomotiva F_1 , producida por la corriente fluyente, refuerza la fuerza magnetomotiva remanente F_2 que produce la fuerza magnetomotiva resultante F_0 . Mientras sube la resonancia, la corriente actúa para reducir el magnetismo remanente. El cambio en fase de la corriente entre los dos puntos de operación es del orden de 150 grados. Para que la frecuencia de resonancia de línea sea superada y la auto-excitación ocurra, la máquina síncrona debe sostener esta variación grande, en fase con una oscilación considerable del ángulo de carga.

2.1.3 CONSIDERACIONES PRACTICAS

Un problema importante en la operación de generadores de inducción, como unidades aisladas, es el hecho de garantizar la auto-

excitación cuando la máquina tiene una cantidad desconocida de magnetismo remanente en el rotor y este es acelerado desde el reposo. Un entendimiento del mecanismo de auto-excitación permite hacer ciertas recomendaciones para mejorar la confiabilidad de la operación.

Una reducción en el magnetismo remanente puede conducir a rangos de aceleración reducidos, como previamente se mostró, si los capacitores terminales permanecen conectados mientras la máquina se acelera.

Similarmente, cualquier carga conectada a la máquina reduce la habilidad de esta para excitarse. Por lo tanto, para mejorar la confiabilidad de operación, es recomendable que, en toda situación los capacitores permanezcan desconectados hasta que se alcance la velocidad final de la máquina y además que cualquier carga mayor permanezca desconectada hasta que la máquina esté plenamente excitada (usualmente, debido a dispositivos de control, alimentará cierta carga conectada a la salida del generador).

Adicionalmente, la confiabilidad en el arranque puede asegurarse si se cumple con alguna de las cuatro consideraciones siguientes:

a) Pasando corriente DC a través de la máquina antes de su arranque para garantizar suficiente magnetismo remanente.

b) Conectando capacitores terminales cargados. Si los capacitores están cargados a un alto voltaje, respecto al rango de voltaje de la máquina, la corriente de descarga es normalmente suficiente para causar auto-excitación.

c) Incrementando la velocidad de la máquina sobre su valor nominal, causando que la velocidad resonante a magnetización baja sea excedida, y por consiguiente iniciar la auto-excitación (notar que los rodamientos y el rotor de la máquina, deben estar diseñados para velocidades mayores).

d) Añadiendo suficiente capacitancia terminal para reducir la velocidad resonante por debajo de la velocidad nominal de la máquina.

En los últimos dos métodos, debe tenerse

cuidado para evitar sobrevoltajes altos cuando se excita la máquina. En máquinas grandes estos dos métodos pueden no ser prácticos por causa de la reducción en la inductancia magnetizante a muy bajas corrientes.

Típicamente, la relación entre la inductancia en el rango de operación esencialmente lineal y la inductancia para muy bajas corrientes está por el orden de 5:1 sólo para el hierro. La presencia del entrehierro reduce la relación. Esto es, una máquina pequeña puede tener una relación de 2:1, mientras que máquinas grandes alcanzarán 5:1. Con relaciones altas, capacitancias muy altas o velocidades de la máquina muy altas se requerirán para asegurar auto-excitación por cualquiera de los últimos dos métodos.

Trabajos experimentales en esta área son algunas veces un poco confusos debido a comportamientos iniciales inesperados.

Un ejemplo es que el pequeño transiente resultante del desconectar y reconectar la capacitancia a una máquina no excitada, parece ser suficiente para empezar la auto-excitación.



También máquinas pequeñas de inducción con anillos deslizantes, pueden no excitarse por causa de la caída de voltaje discreta en los contactos de las escobillas.

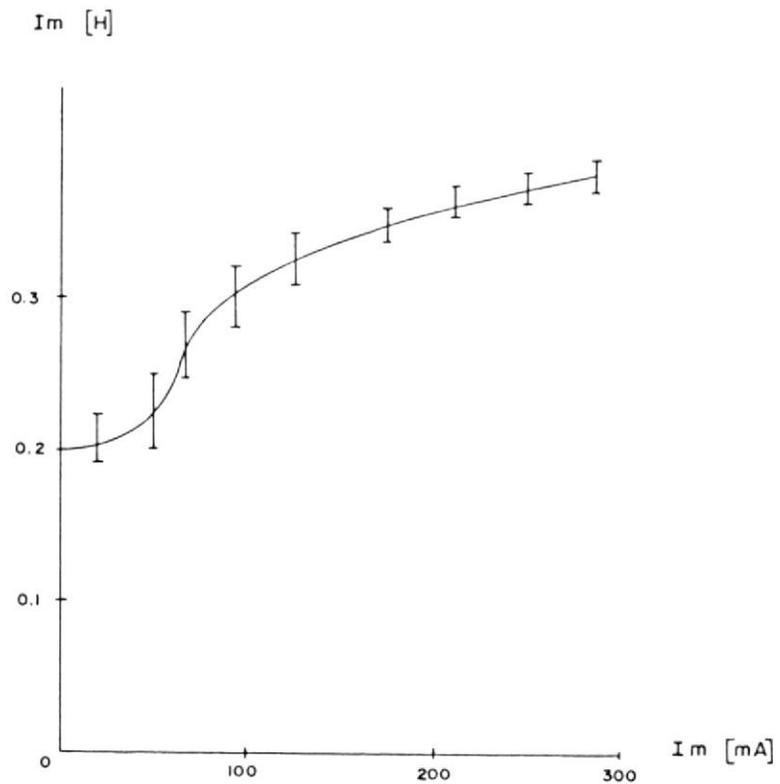


Fig. 2.11 Gráfico de la inductancia magnetizante mostrando barras de error.

2.2 TECNICA ANALITICA PARA ESTUDIAR EL COMPORTAMIENTO EN ESTADO ESTABLE DEL GENERADOR DE INDUCCION AUTO-EXCITADO

En esta sección se desarrolla una técnica analítica usando el método de Newton-Raphson para analizar la reactancia magnetizante saturada y la frecuencia generada de un generador de inducción auto-excitado para valores dados de capacitancia, velocidad y carga.

2.2.1 INTRODUCCION

Como ya se ha mencionado anteriormente, si un banco de capacitores trifásico apropiado se conecta a los terminales de una máquina de inducción en funcionamiento, una FEM es inducida en los devanados de la máquina debido a la excitación provocada por los capacitores. Este fenómeno se denomina "Auto-excitación por capacitor", el cual puede ser usado para operar una máquina de inducción como generador.

Los voltajes y corrientes inducidos continuarían creciendo, pero la saturación magnética alcanza un estado de equilibrio.

El análisis de estado estable del generador de



inducción es de interés, tanto del punto de vista de diseño como del punto de vista operacional. Conociendo los parámetros de la máquina, debería ser posible determinar su funcionamiento para condiciones dadas de capacitancia, velocidad y carga. Si el voltaje terminal y frecuencia son conocidos, como en el caso de una máquina conectada a una barra infinita, la predicción del funcionamiento es directo. Sin embargo, en un generador excitado por capacitor, usado como una fuente de potencia aislada, el voltaje terminal y la frecuencia son desconocidos y tienen que ser calculados para valores dados de velocidad, capacitancia e impedancia de carga. El análisis es complicado debido a la saturación magnética en la máquina y la necesidad de escoger parámetros adecuados correspondientes a esta condición saturada.

Con la ayuda del método de Newton-Raphson se desarrolla un procedimiento para identificar los parámetros saturados y la frecuencia generada para una carga dada. Con el uso de estos valores identificados el funcionamiento de estado estable puede ser fácilmente

calculado a partir del circuito equivalente. El procedimiento es simple, comprensible, eficiente, y muy adecuado para una simulación digital.

2.2.2 BASES TEORICAS

Para el análisis presentado en esta sección, se harán las siguientes asunciones:

a) Se asume que la saturación magnética sólo afecta a la reactancia magnetizante mientras que todos los otros parámetros del circuito equivalente serán asumidos constantes.

De la auto-excitación resulta la saturación del flujo principal. Como el valor de la reactancia magnetizante X_m refleja la magnitud del flujo principal, es esencial incorporar en el análisis, la variación de X_m con respecto al nivel de saturación del flujo principal.

El paso de los flujos de dispersión ocurre principalmente en el aire, y por consiguiente estos flujos no están afectados por la saturación del flujo principal.

b) Las reactancias de dispersión del estator y rotor, en por unidad, serán tomadas iguales.

Esta asunción es normalmente válida en análisis de máquinas de inducción.

c) Se desprecian las pérdidas en el núcleo.

d) Armónicas de espacio de FMM y armónicas de tiempo en el voltaje inducido y formas de onda de la corriente serán ignoradas.

Esta asunción es válida en máquinas bien diseñadas. Además, las formas de onda experimentales de voltajes generados exhiben armónicas de tiempo despreciables.

El circuito equivalente de estado estable de un generador de inducción auto-excitado por capacitor con una carga conectada a sus terminales se muestra en la figura 2.12.

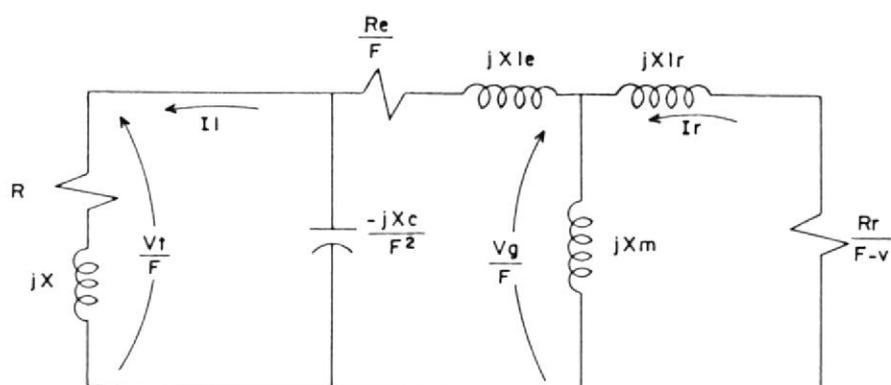


Fig. 2.12 Circuito Equivalente del generador de inducción con carga.



Donde:

R_e, R_r = Resistencia por fase del estator y rotor (referida al estator).

X_{le}, X_{lr} = Reactancia de dispersión del estator y rotor (referida al estator).

X_m = Reactancia magnetizante.

X_c = Reactancia capacitiva por fase del capacitor terminal c .

$Z = (R + jX)$ = Impedancia de carga por fase.

(Todas las reactancias están calculadas a frecuencia base).

F, v = Frecuencia y velocidad en p.u. respectivamente.

I_e, I_r, I_l = Corriente del estator, rotor (referida al estator) y carga por fase.

V_t, V_g = Voltaje terminal y del entrehierro, respectivamente.

Luego, en la figura 2.12, los valores de estado estable de X_m y F son desconocidos y tienen que ser determinados para valores dados de capacitancia, velocidad y carga, para de esta manera calcular la respuesta de estado estable

usando este circuito equivalente. Se explica un procedimiento a continuación:

De la figura 2.12, considerando una carga resistiva pura, la ecuación de lazo para la corriente I_e puede escribirse como:

$$Z_n I_e = 0 \quad (2.10)$$

donde

$$Z_n = \left(\frac{-jX_c R/F^3}{R/F - jX_c/F^2} \right) + \left(\frac{R_e/F + jX_{le}}{(jX_m(R_r/(F-v) + jX_{lr})) / (R_r/(F-v) + j(X_m + X_{lr}))} \right) \quad (2.11)$$

Bajo estado estable auto-excitación implica $I_e \neq 0$.

Por lo tanto, de la ecuación 2.10, $Z_n = 0$, lo que implica que tanto la parte real como la parte imaginaria del lado derecho de la ecuación 2.11 deben ser separadamente igual a cero. Sustituyendo $X_{le} = X_{lr} = X_l$, se simplifican las siguientes dos ecuaciones simultáneas no lineales con X_m y F como variables desconocidas:

$$f(X_m, F) = (C_1 X_m + C_2) F^3 + (C_3 X_m + C_4) F^2 + (C_5 X_m + C_6) F + (C_7 X_m + C_8) = 0 \quad (2.12)$$

$$g(X_m, F) = (D_1 X_m + D_2) F^2 + (D_3 X_m + D_4) F + D_5 = 0 \quad (2.13)$$

donde:

$$\begin{aligned} C_1 &= -2X_1 R \\ C_2 &= -X_1^2 R \\ C_3 &= 2X_1 R \\ C_4 &= X_1^2 R = -C_2 \\ C_5 &= X_c (R + R_e + R_r) \\ C_6 &= X_c X_1 (R + R_e + R_r) + R_e R R_r \\ C_7 &= -X_c (R_e + R) \\ C_8 &= -X_1 X_c (R_e + R) \end{aligned} \quad (2.14)$$

y

$$\begin{aligned} D_1 &= 2X_1 X_c + R (R_e + R_r) \\ D_2 &= R X_1 (R_e + R_r) + X_1^2 X_c \\ D_3 &= R_e R + 2X_1 X_c \\ D_4 &= -X_1 (R_e R + X_1 X_c) \\ D_5 &= -X_c R_r (R + R_e) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Para resolver las ecuaciones 2.12 y 2.13 se adoptará una técnica numérica encontrando así los valores de la reactancia magnetizante saturada X_m y la frecuencia de salida en p.u. F para los valores dados de los parámetros de la máquina, R , X_c y v .

Aquí, el método de Newton-Raphson es muy apropiado para resolver las ecuaciones 2.12 y 2.13. En este método la matriz Jacobiano $[J]$ está dada por:

$$[J] = \begin{bmatrix} J11 & J12 \\ J21 & J22 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

donde

$$\begin{aligned} J11 &= \partial f / \partial X_m & J12 &= \partial g / \partial F \\ J21 &= \partial f / \partial X_m & J22 &= \partial g / \partial F \end{aligned} \quad (2.17)$$

El método de Newton-Raphson requiere una suposición inicial de las variables desconocidas, por ejemplo X_{m0} , F_0 . Debido a que $F \cong v$ y X_m es menos que la no saturada, X_{m0} y F_0 pueden escogerse como:

$$\begin{aligned} X_{m0} &= X_m \text{ (no saturada)} \\ F_0 &= v \end{aligned} \quad (2.18)$$

Ahora $f_0 = f(X_{m0}, F_0) = 0$ y $g_0 = g(X_{m0}, F_0) = 0$.

Después de la primera iteración, X_m y F asumirán los valores de $X_m + h$ y $F_0 + k$ en el proceso para satisfacer las ecuaciones



2.12 y 2.13; los incrementos h y k están dados por:

$$\begin{bmatrix} h \\ k \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} -f_0 \\ -g_0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Este proceso de iteración continuará hasta que se alcance la precisión deseada, por ejemplo cuando $|f(X_m, F)| < \epsilon$ y $|g(X_m, F)| < \epsilon$. Un algoritmo computacional simple se desarrolla más adelante incorporando el procedimiento anterior y los valores de estado estable de X_m y F podrán computarse para cualquier valor de C , v y R .

Habiendo determinado F y X_m , el siguiente paso es calcular el voltaje en el entrehierro V_g y el voltaje terminal V_t (fig. 2.12).

Para este propósito se puede obtener información observando la variación de X_m con la cantidad V_g/F la cual relaciona el flujo del entrehierro. La información requerida puede ser obtenida experimentalmente llevando la máquina de inducción a la velocidad síncrona correspondiente a la frecuencia de línea, por ejemplo $F=1$, y midiendo la reactancia

magnetizante para valores diferentes de voltaje de entrada a frecuencia de línea. Este procedimiento se denomina prueba de velocidad síncrona (sección 1.2.1.5). Una curva de V_g/F versus X_m puede graficarse usando los resultados experimentales. Esta curva puede ser linealizada obteniéndose una expresión de la forma $V_g=A-BX_m$, o si se desea mayor exactitud se puede obtener un polinomio de mayor orden (sección 3.2.1).

Conociendo X_m saturada de estado estable y F , puede calcularse el voltaje V_g del entrehierro.

Con V_g , X_m , F , X_c , v , R y los parámetros de la máquina, el cálculo del voltaje terminal V_t y la corriente de carga es directo usando el circuito equivalente de la figura 2.12.

A continuación se resumen expresiones para las respectivas variables.

$$I_e = (V_g/F) / (R_e/F + jX_{le} - jX_{cR}/(F - jFX_c))$$

$$I_r = (-V_g/F) / (R_r/(F-v) + jX_{lr}) \quad (2.20)$$

$$I_l = -jX_{cl}I_e / (R_f - jX_c)$$

$$V_t = I_l R$$

$$\text{Potencia de entrada} = P_{ent.}$$



$$P_{ent.} = -q I_r^2 R_r F / (F - v)$$

(q = número de fases)

Potencia de salida = P_s

(2.20)

$$P_s = q |I_1|^2 R$$

Basándose en la técnica analítica explicada, en el APENDICE "A" se desarrolla un programa computacional el cual calcula el funcionamiento en estado estable de la unidad, para valores dados de velocidad, capacitancia terminal y resistencia de carga. El programa puede ser utilizado para determinar las características de operación del generador.

Este programa es utilizado para determinar las características de carga calculando V_t , F , P_s , etc. cuando la conductancia de carga $b_l = 1/R$ es variada en pasos regulares (Δb_l) desde b_{lmin} a b_{lmax} .

2.3 REQUERIMIENTOS MINIMOS DE POTENCIA REACTIVA

A partir de la técnica analítica desarrollada para estudiar el comportamiento del generador de inducción, es posible establecer los requerimientos mínimos de potencia reactiva para la autoexcitación de un generador de inducción, encontrando el valor de la capacitancia mínima (C_{\min}) requerida, utilizando el método analítico que se describe a continuación y partiendo del punto en que las ecuaciones 2.12 y 2.13 son resueltas numéricamente para obtener la reactancia magnetizante saturada X_m y la frecuencia en por unidad F . Además conociendo la relación entre X_m y V_g/F , a partir de la prueba de velocidad síncrona:

a) Se asume un valor de capacitancia C y se resuelven las ecuaciones 2.12 y 2.13 para X_m y F . El valor inicial de C debería ser lo suficiente grande para causar la autoexcitación del generador por ejemplo, que X_m tenga un valor que caiga en la región de saturación.

b) Gradualmente disminuir el valor de C en pasos y calcular X_m correspondiente a cada valor de C . Se obtiene una grafica de X_m versus C .

c) C_{\min} se obtiene del gráfico como la intrersección de la curva X_m versus C y la línea $X_m = X_{m\max}$, donde $X_{m\max}$ es la reactancia máxima saturada de la máquina la cual puede medirse experimentalmente llevando la máquina a $v=1$ p.u.,

aplicando un voltaje de prueba variable manteniendo $F = 1$ p. u. y midiendo X_m para cada nivel de voltaje (prueba de velocidad síncrona).

A partir del programa desarrollado en el APENDICE "A" para calcular el comportamiento del generador de inducción en estado estable, en el capítulo III se desarrolla un programa que calcula la capacitancia mínima requerida para la auto-excitación de un generador de inducción.

2.3.1 REQUERIMIENTOS DE CAPACITANCIA EN VACIO

Para el caso de vacío o no carga, se desarrolla un modelo analítico simplificado, el cual da una buena estimación de la capacitancia mínima (C_{\min}).

Usando los datos obtenidos de las pruebas para conseguir los parámetros de la máquina, las ecuaciones 2.12 y 2.13 son resueltas para diferentes valores de velocidad. Con el propósito de obtener dicha solución, es esencial especificar el valor de la capacitancia C . Estos valores de C son obtenidos empleando el método discutido en la sección anterior.

Esto es, el valor de F fue encontrado para cada velocidad correspondiente a una capacitancia terminal la cual es suficiente para provocar la auto-excitación.

La tabla I muestra la relación F/v para diferentes velocidades para una máquina de prueba con los siguientes parámetros en por unidad:

$R_e = 0,062$; $R_r = 0,07$; $X_{le} = X_{lr} = 0,093$ y $X_{smáx} = 2,31$.

Es obvio, de la tabla I, que cuando se cumplen las condiciones para auto-excitación ($C = C_{mín}$), F es muy cercano a la velocidad por unidad.

TABLA I

Velocidad (r.p.m)	F/v
500	0,996
800	0,997
1100	0,998
1500	0,999

Variación de F/v con la velocidad
(velocidad base= 1500 r. p. m.)

En vacío, el circuito equivalente de la figura 2.13 puede ser usado en lugar del que se muestra en la figura 2.12 sin una considerable pérdida de precisión.

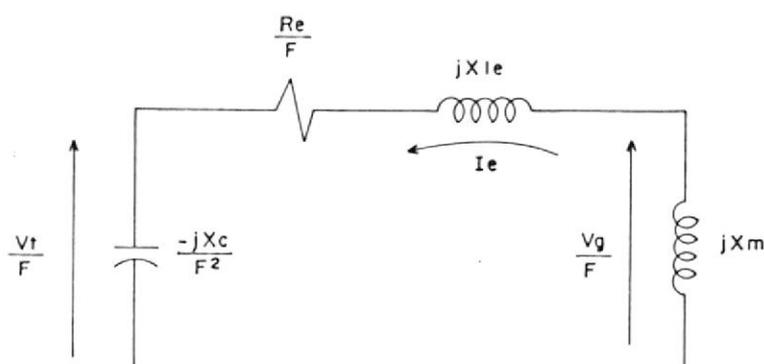


Fig. 2.13 Circuito equivalente en vacío.

Como se discutió previamente, cuando el generador es auto-excitado por capacitores, el valor de X_m cae en la región de saturación. En el umbral de la auto-excitación: $X_m = X_{sm\acute{a}x}$.

Esto es asumiendo $X_m = X_{sm\acute{a}x}$ y $F = v$, ecuaciones 2.12 y 2.13 pueden ser resueltas para el valor de $X_c = (1/\omega C)$.

En dicha solución aplicada a las ecuaciones 2.12 y 2.13 se obtienen los siguientes dos valores de X_c :

$$X_c = - R_e R_r / (X_{sm\acute{a}x} - v) \quad (2.21)$$

$$X_c = v^2 (X_{le} + X_{sm\acute{a}x}) \quad (2.22)$$

La ecuación 2.21 da un valor negativo de capacitancia terminal C , lo cual no es real y no es de mucha importancia.

Sin embargo, de la ecuación 2.22, el mínimo valor de capacitancia terminal (en Faradios) requerido para auto-excitación está dado por:

$$C_{\min} = 1 / \omega^2 (X_{le} + X_{sm\acute{a}x}) \quad (2.23)$$

Esto es, C_{\min} es inversamente proporcional al cuadrado de la velocidad de la máquina en p.u. (ω). Es también inversamente proporcional a la reactancia magnetizante no-saturada $X_{sm\acute{a}x}$ ($X_{le} + X_{sm\acute{a}x} + X_{sm\acute{a}x} =$ reactancia magnetizante no-saturada).

El valor de C_{\min} determinado a partir de la ecuación 2.23 es suficiente para tener auto-excitación en estado estable.

Bajo condiciones transientes, el proceso de excitación es también afectado por la aceleración de la máquina. Si un capacitor terminal, $C = C_{\min}$, es usado y el generador es arrancado partiendo del reposo, el voltaje puede que no crezca para cada caso. Por esto, en la práctica, el capacitor terminal C deberá tener un valor algo mayor que C_{\min} para asegurar la auto-excitación.

2.3.2 REQUERIMIENTOS DE CAPACITANCIA BAJO CARGA

La ecuación 2.23 da el valor mínimo de la capaci-

tancia requerida para mantener la auto-excitación en condiciones de vacío. Pero cuando se conecta carga a la máquina, el valor de la capacitancia terminal se deberá incrementar. La cantidad de este incremento dependerá de la máquina, así como también de los parámetros de la carga.

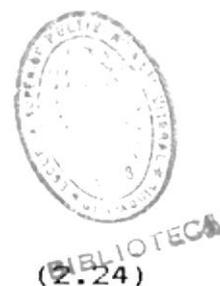
No es posible derivar una expresión analítica simple relacionando la capacitancia terminal con la carga, parámetros de la máquina y velocidad.

Por lo tanto, para una máquina cargada el valor requerido de capacitancia terminal puede ser computado usando el método analítico descrito anteriormente en el inicio de la sección 2.3.

Con el propósito de realizar un estudio, y con la ayuda de un programa que se desarrolla al final del capítulo III, los requerimientos de capacitancia han sido computados para valores diferentes de impedancia de carga, factor de potencia de carga, así como también para diferentes valores de velocidad de la máquina.

Los resultados están dados en las figuras 2.14 a 2.16.

Debería notarse que el valor mínimo requerido de capacitancia terminal para una máquina cargada ($C_{l\min}$)



está dado por :

$$C_{l\min} = K C_{m\min}$$

donde $C_{m\min}$ es la capacitancia terminal mínima en vacío requerida para producir auto-excitación (Ec. 2.23) y el valor del factor k es dado en las figuras 2.14 a 2.16.

Es obvio, de estas figuras, que los requerimientos de capacitancia dependen de la impedancia de carga, factor de potencia de la carga (cargas inductivas) y velocidad de la máquina.

Las figuras 2.14 a 2.16 son de una máquina la cual tiene los siguientes parámetros:

$Z_{base} = 43,3$ Ohmios, $R_e = 0,071$; $R_r = 0,0881$; $X_{le} = X_{lr} = 0,1813$ y $X_{sm\max} = 3,23$ (todos en por unidad).

Para máquinas con parámetros del circuito equivalente diferentes, el valor del factor k es ligeramente diferente. Sin embargo, se pueden usar los valores de la constante k dados en las figuras 2.14 a 2.16 como una guía aproximada, cuando se desee estimar la capacitancia de excitación requerida bajo condiciones de velocidad y carga conocida.

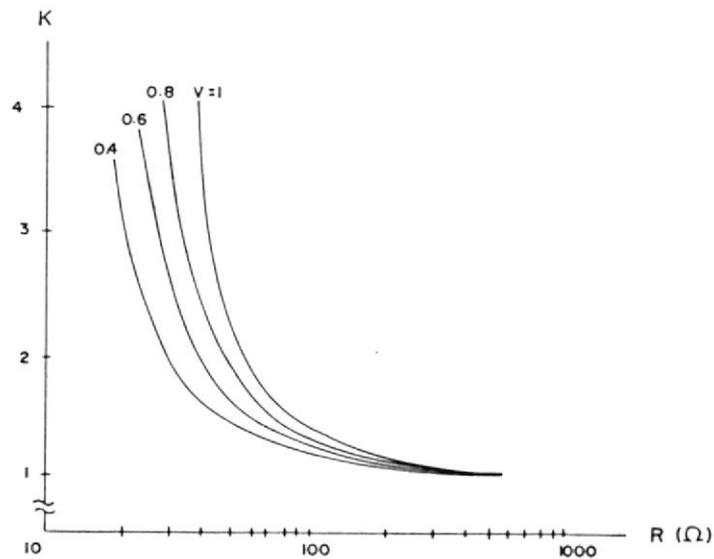


Fig. 2.14 Variación de K con respecto a R y v .

Es importante puntualizar que el factor de potencia de la carga mencionado en las figuras 2.15 y 2.16 corresponden a la frecuencia base. El valor real del factor de potencia de la carga dependerá de la frecuencia real F (la cual depende de los parámetros de la máquina, su velocidad e impedancia de carga).

La figura 2.14 muestra que para una velocidad dada, cuando la resistencia de carga disminuye, el factor k se incrementa.

Generalmente para un valor dado de R , k es más pequeño para valores más bajos de velocidad. Ya que el valor real de la capacitancia requerida es kC_{\min} y C_{\min} es inversamente proporcional a V^2 , el valor de la capacitancia requerida bajo carga aumenta cuando la velocidad disminuye.

Sin embargo en contraste con el caso en vacío, para un valor fijo de carga resistiva, este incremento es menor que $1/V^2$.

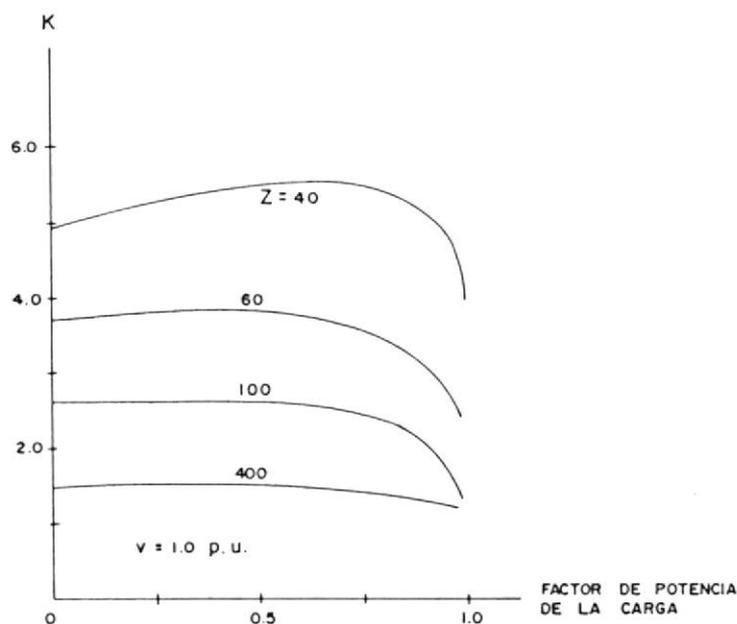


Fig. 2.15 Variación de k con respecto a Z y al factor de potencia de la carga.

La figura 2.15 muestra que cuando el factor de potencia de la carga es disminuido gradualmente, el valor de k inicialmente se incrementa, hasta un valor máximo y entonces declina.

Cuando una carga puramente inductiva es conectada a la máquina, la potencia de salida es cero. Por tanto, se

puede usar el circuito aproximado de la figura 2.13.

Consecuentemente, el valor de k para una carga puramente inductiva es independiente de V y está dada por:

$$K = 1 + ((X_{le} + X_{smáx}) / X) \quad (2.25)$$

Para cargas R-L de factor de potencia variable, el valor de k es afectado debido a dos razones: En primer lugar cuando el factor de potencia disminuye, la corriente de carga se torna más inductiva y así la capacitancia terminal tiene que ser incrementada para compensar esta componente inductiva, en adición al suministro de los requerimientos de excitación de la máquina.

En segundo lugar, para valores fijos de Z y v , cuando el factor de potencia disminuye, la potencia de salida decrece con tendencia a incrementar la razón F/V , con lo cual se aproxima al caso en vacío. En tales casos, los requerimientos de excitación se deben principalmente al estator y se requiere menos capacitancia comparado al caso cuando la potencia de salida de la máquina es alta la razón F/V es baja y así los requerimientos de excitación son para el estator así como también para el rotor.

La influencia neta de estos dos factores es el comportamiento no lineal de k versus la característica del factor de potencia como se muestra en la figura 2.15.

Estas características no lineales son también evidentes en la figura 2.16, la cual muestra que k es también afectado por la velocidad cuando el factor de potencia es mayor que cero. Sin embargo, para factor de potencia cero, k no depende de la velocidad como es evidente en la ecuación 2.25.

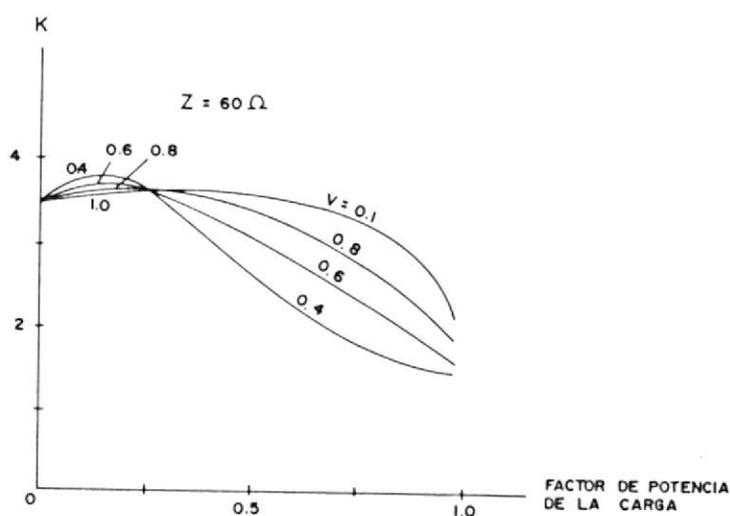


Fig. 2.16 Variación de K con respecto a v y al factor de potencia de la carga.



2.4 APLICACION DE CAPACITORES ESTATICOS A GENERADORES DE INDUCCION QUE ALIMENTAN LINEAS MONOFASICAS

En esta sección se estudiará una aplicación particular de los generadores de inducción auto-excitados actuando como unidades aisladas. Estos estarán alimentando líneas monofásicas utilizando diferentes métodos de auto-excitación.

2.4.1 INTRODUCCION

Los capacitores de arranque y de trabajo para motores de inducción han sido ampliamente usados en sistemas monofásicos de 2 hilos.

Estos motores tienen un devanado en cuadratura e internamente son similares a una máquina bifásica. El flujo giratorio no es constante en amplitud y el devanado en cuadratura es un compromiso entre una alta eficiencia a plena carga y a distintos valores de carga.

Una máquina de inducción trifásica tiene un flujo giratorio de amplitud constante y tiene una eficiencia cerca del 12 % más alta y un costo más bajo que una máquina monofásica.

Todo compromiso usando una máquina trifásica

puede ser en los circuitos externos mas no en los internos.

A potencia constante (lo cual es típico en una turbina Pelton) la máquina trifásica puede ser operada balanceadamente usando dos capacitores diferentes para los dos voltajes monofásicos diferentes (3 hilos, monofásico) para proveer exactamente la corriente requerida y el ángulo de fase para el tercer terminal de la máquina.

2.4.2 EXCITACION CON DOS CAPACITORES

El circuito mostrado en la figura 2.17 tiene dos capacitores. El capacitor C2 es conectado entre los terminales B y C, y el capacitor C3 entre el terminal C y la derivación central monofásica (puesta a tierra). Las corrientes por los capacitores son I2 e I3 respectivamente.

El generador de inducción trifásico, 240 voltios, será operado con voltajes balanceados y corrientes balanceadas y un ángulo de factor de potencia entre el voltaje y la corriente en los devanados de ϕ grados. ϕ es típicamente cercano a sesenta grados.

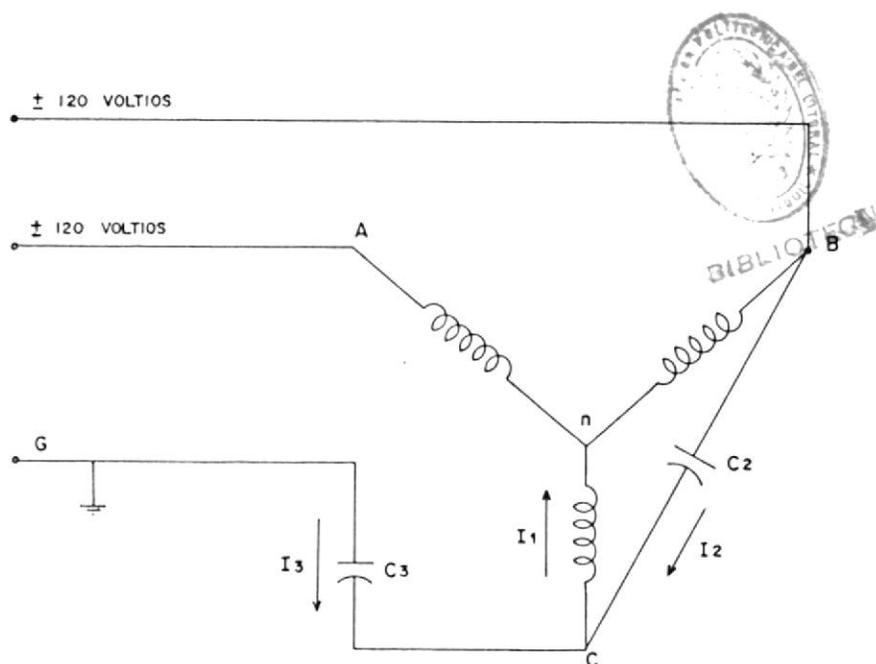


Fig. 2.17 Circuito modelo A para un generador de inducción trifásico, usando una línea monofásica 3 hilos, 120/240 voltios.

Este generador de inducción trifásico puede alimentar la línea monofásica 120/240 voltios, 3 hilos con la adecuada selección de los capacitores y un transformador.

El diagrama fasorial para el circuito, modelo A, se muestra en la figura 2.18.

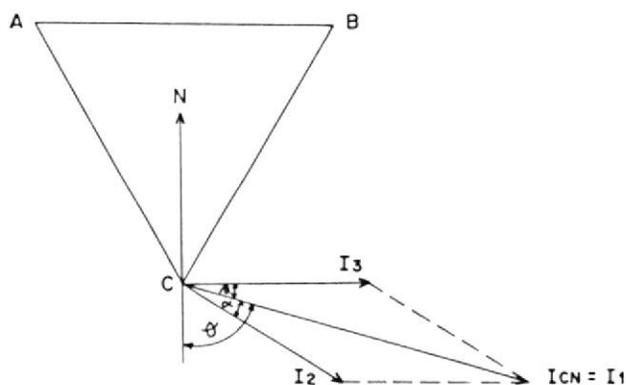


Fig. 2.18 Diagrama fasorial del circuito modelo A.

I_1 es la corriente en el devanado, desde el punto C hasta el neutro N.

Del diagrama fasorial tenemos que:

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (2.26)$$

$$\alpha = \varphi - 60^\circ$$

$$\beta = 90^\circ - \varphi$$

$$\alpha + \beta = 30^\circ$$

$$\text{sen}(\alpha + \beta) = 0,5$$

$$\text{sen} \beta = \cos \varphi$$

de la ley del seno:

$$\text{sen} \alpha / I_3 = \text{sen} \beta / I_2 = \text{sen}(180 - \alpha - \beta) / I_1 = 0,5 I_1$$

$$I_2 / I_1 = 2 \cos \varphi \implies I_2 = 2 I_1 \cos \varphi \quad (2.27)$$

$$I_3 / I_1 = 2 \text{sen} \alpha \implies I_3 = 2 I_1 \text{sen} \alpha \quad (2.28)$$

Los voltajes en los capacitores son:

$$V_{BC} = \sqrt{3} V_{CN} \quad (2.29)$$

$$V_{GC} = 1,5 V_{CN} \quad (2.30)$$

Los voltio-amperios del generador de inducción son:

$$V_{AGEN} = 3 V_{CN} I_1 \quad (2.31)$$

Los voltio-amperios del capacitor C2 son:

$$VA_{c2} = 2 \sqrt{3} V_{CN} I_1 \cos \varphi \quad (2.32)$$

Los voltio-amperios del capacitor C3 son:

$$VA_{c3} = 2(1,5) V_{CN} I_1 \sin \alpha \quad (2.33)$$

Las relaciones entre los voltio-amperios de los capacitores con los voltio-amperios del generador son:

$$VA_{c2} / VA_{gen} = \cos \varphi (2/3) \quad (2.34)$$

$$VA_{c3} / VA_{gen} = \sin \alpha \quad (2.35)$$

Cuando el generador es desconectado y desacelerado, el capacitor C2 entre los terminales BC causará auto-excitación. El contactor debería tener 3 polos, uno para abrir el circuito del capacitor C2 y los otros dos para abrir las líneas de potencia. Si el capacitor C2 no es desconectado, la máquina tiende a frenar muy rápido, probablemente debido a una acción de frenado por las corrientes de Eddy.

Para el caso de un generador de inducción trifásico a 120 Voltios, operando en un sistema 120/240 Volt. 3 hilos se tiene el circuito modelo A', el cual se muestra en la figura 2.19.

Este circuito es adecuado para máquinas con ángulos de fase interno entre 30 y 60 grados. Para un ángulo de fase de 30 grados, C_2 es cero y la corriente I_6 a través de C_6 es la corriente de la máquina.

Para un ángulo de fase de 60 grados, C_6 es cero y la corriente I_2 a través de C_2 es la corriente de la máquina.

Para ángulos de fase intermedios, ambos C_2 y C_6 tendrán corriente.

En la figura 2.20 se muestra el diagrama fasorial para este circuito.

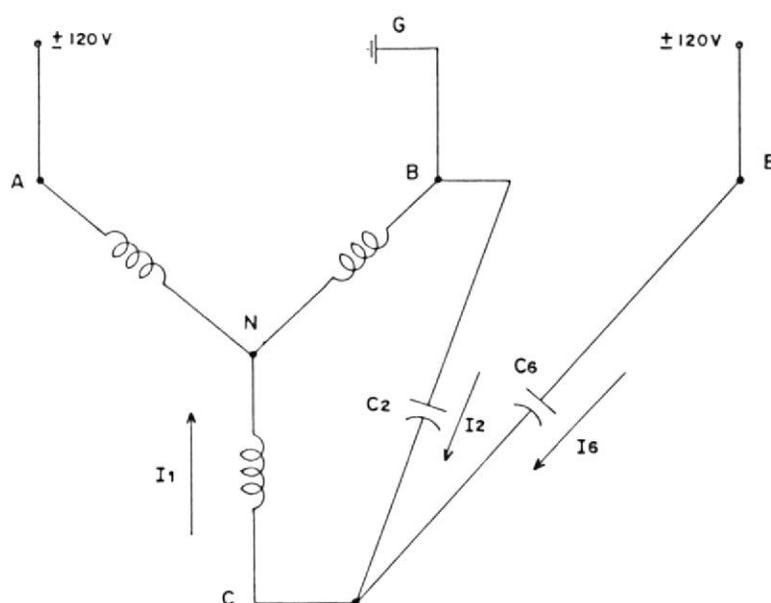


Fig. 2.19 Circuito modelo A'

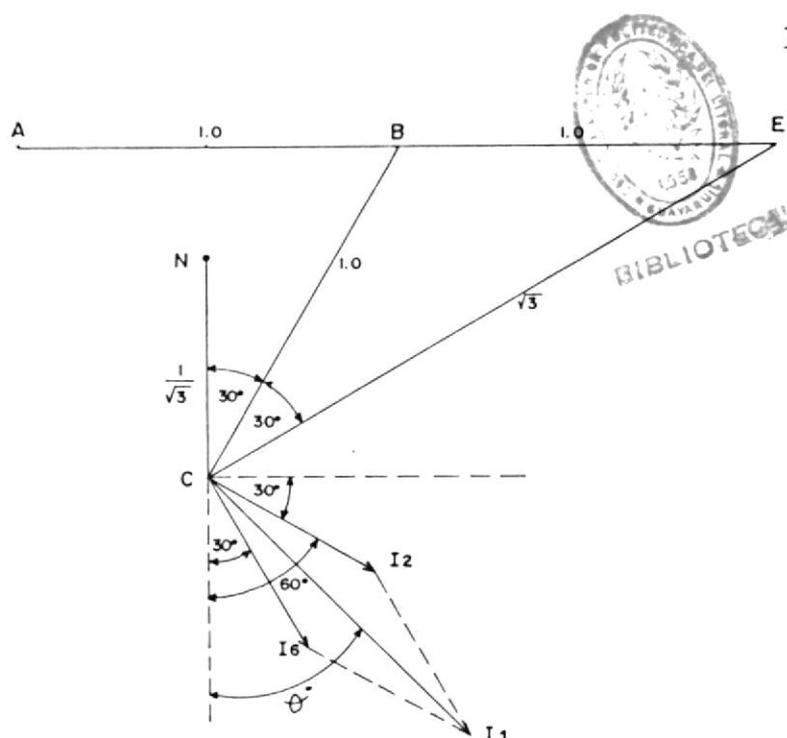


Fig. 2.20 Diagrama fasorial para el circuito A'

2.5.3 EXCITACION CON TRANSFORMADOR Y DOS CAPACITORES

El modelo anterior fue conveniente para generadores de inducción cuyos ángulos de factor de potencia fueran mayores a 60 grados. El modelo B, que se muestra en la figura 2.21 es adecuado para generadores de inducción trifásicos en los cuales la corriente tiene un ángulo de fase menor que 60 grados. En la figura 2.22, un transformador con relación de vueltas unitaria tiene su primario conectado desde la línea B a tierra, y el secundario es conectado al terminal B, por lo tanto el voltaje desde el terminal D a tierra será el doble que el voltaje de B a tierra. La fase C

es alimentada por el capacitor C2 desde el terminal B y también por el capacitor C4 desde el terminal D.

El diagrama fasorial del circuito modelo B es mostrado en la figura 2.22.

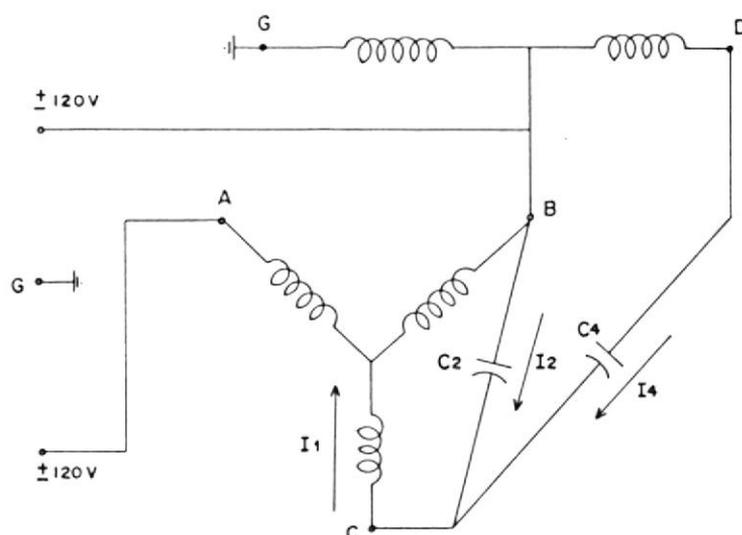


Fig. 2.21 Circuito modelo B

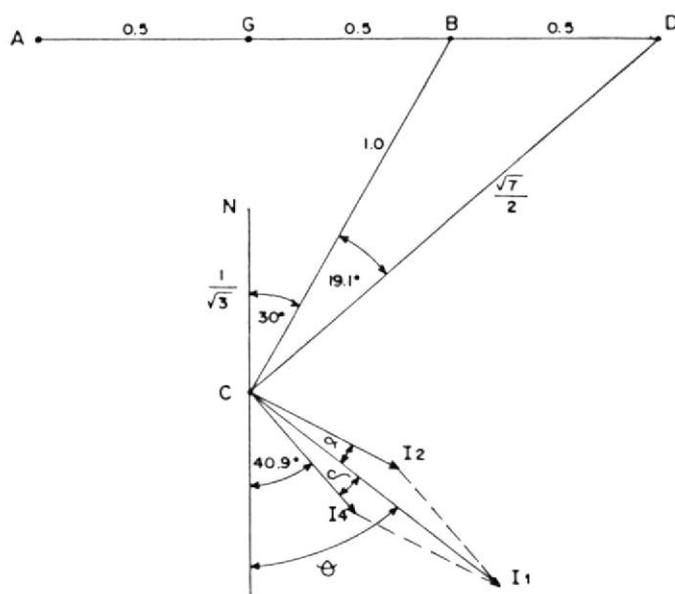


Fig. 2.22 Diagrama fasorial del circuito modelo B.

$$I_1 = I_2 + I_4 \quad (2.36)$$

El ángulo entre I_2 e I_4 es:

$$\text{sen}^{-1} (2/\sqrt{7}) - 30^\circ = 19,1^\circ$$

Se define:

$$\alpha = 60^\circ - \vartheta$$

$$\delta = 19,1^\circ - \alpha = \vartheta - 40,9^\circ$$

$$\text{sen}(\alpha + \delta) = \text{sen } 19,1^\circ = 0,3273$$

de la ley del seno:

$$\text{sen } \alpha / I_4 = \text{sen } \delta / I_2 = \text{sen}(180^\circ - \alpha - \delta) / I_1 = 0,3273 / I_1$$

$$(2.37)$$

$$I_4 / I_1 = 3,055 \text{ sen } \alpha = \sqrt{7} \text{ sen } \vartheta - 1,528 \text{ cos } \vartheta$$

$$(2.38)$$

Los voltajes de los capacitores son:

$$V_{bc} = \sqrt{3} V_{cn} \quad (2.39)$$

$$V_{dc} = \sqrt{21} / 2 V_{cn} \quad (2.40)$$

Los voltios-amperios del capacitor C_2 son:

$$VA_{C_2} = \sqrt{3} V_{cn} (2,309 \text{ sen } \vartheta - 2 \text{ cos } \vartheta) I_1 \quad (2.41)$$

Los voltios-amperios del capacitor C_4 , son:

$$VA_{C4} = V_{CN}\sqrt{21} (3,055)/2 \quad \text{sen } \alpha \quad I_1 \quad (2.42)$$

Las relaciones de los voltio-amperios de los capacitores con los voltio-amperios del generador son :

$$VA_{C2}/VA_{\text{gen}} = (2,309 \text{ sen } \vartheta - 2,0 \text{ cos } \vartheta) / 3 \quad (2.43)$$

$$VA_{C4}/VA_{\text{gen}} = (3,055/6)\sqrt{21} \text{ sen } \alpha = 2,33 \text{ sen } \alpha \quad (2.44)$$

Para el caso de una alimentación de 240 voltios-2hilos, con el devanado del estator conectado en delta (triángulo), se usaría el modelo C mostrado en la figura 2.23, el cual consta de un transformador 240/240 voltios, cuyo terminal E está a 240 voltios del terminal B, a 360 Voltios del potencial de tierra y a 480 voltios del terminal A. El terminal E es conectado al terminal C del motor a través del capacitor C5. El capacitor C2 es usado aquí también, entre los terminales B y C.

El diagrama fasorial para este modelo es mostrado en la figura 2.24.

El fasor correspondiente al voltaje BC es uno por unidad y el fasor del voltaje EC es $\sqrt{3}$ por

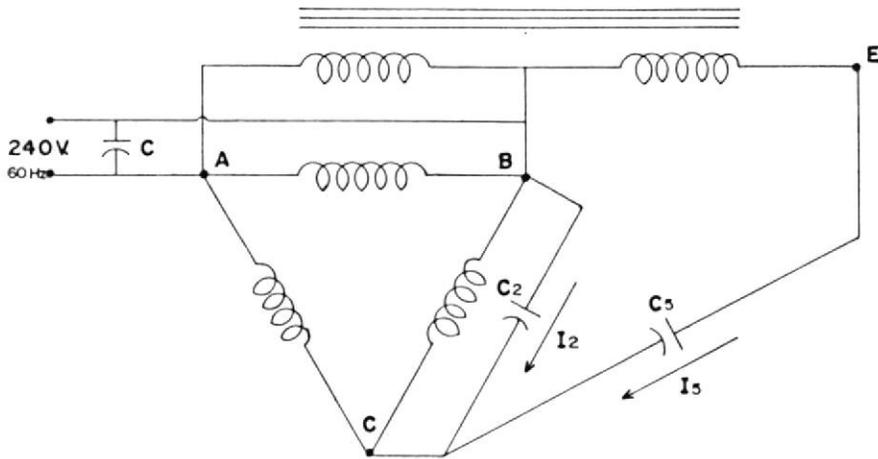


Fig. 2.23 Circuito modelo C.

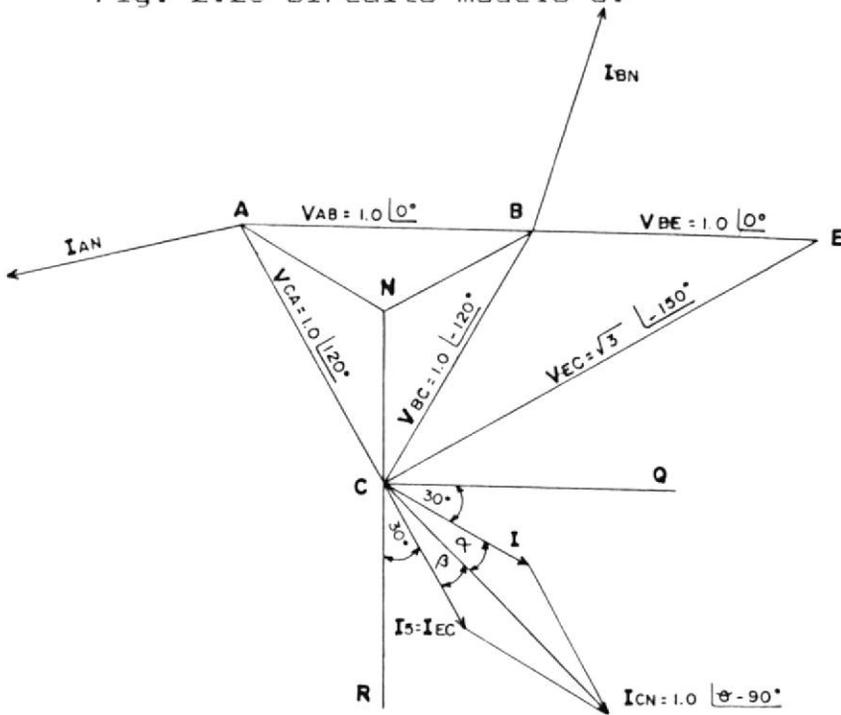


Fig. 2.24 Diagrama fasorial del circuito modelo C.

unidad. El fasor de la corriente I_2 atrasa al voltaje V_{BC} en 90 grados. El fasor de la corriente I_5 atrasa a V_{EC} en 90 grados. La suma de estos dos fasores es I_{CN} , que corresponde a la corriente en el devanado de uno por unidad a un ángulo de fase igual a ϕ .

Las componentes, en fase y fuera de fase, de la corriente en el devanado son respectivamente:

$$R = 15 \sqrt{3} / 2 + 12/2 \quad (2.45)$$

$$Q = 15/2 + 12 \sqrt{3} / 2 \quad (2.46)$$

$$\phi = \cos^{-1} (\text{f.p.}) = \tan^{-1} (Q/R)$$

$$1,0 = R^2 + Q^2$$

de la ley del seno para este triángulo:

$$15 = 2 \sin \alpha = 2 \sin (60^\circ - \phi) \quad (2.47)$$

$$12 = 2 \sin \beta = 2 \sin (\phi - 30^\circ) \quad (2.48)$$

Los VARS del capacitor C_5 son:

$$\text{VAR } C_5 = (2 \sqrt{3}) \sin (60^\circ - \phi) \quad (2.49)$$

y del capacitor C_2 :

$$\text{VAR } C_2 = 2 \sin (\phi - 60^\circ) \quad (2.50)$$

Los VA en el devanado secundario del transformador son:

$$VA T = 2 \text{ sen } (60^\circ - \phi) \quad (2.51)$$

Las relaciones de los VA de los capacitores y del transformador con respecto a los VA de la máquina son:

$$VA T / VA \text{ gen} = 2/\sqrt{3} \text{ sen } (60^\circ - \phi) \quad (2.52)$$

$$VAR C2 / VA \text{ gen} = 2/\sqrt{3} \text{ sen } (\phi - 30^\circ) \quad (2.53)$$

$$VAR C5 / VA \text{ gen} = 2 \text{ sen } (60^\circ - \phi) \quad (2.54)$$

Los VARS de la máquina son :

$$VAR \text{ maq.} / VA \text{ gen} = \text{sen } \phi \quad (2.55)$$

La compensación capacitiva para la línea monofásica es:

$$VAR C6 / VA \text{ gen} = \text{sen } \phi - (VA C2 / VA \text{ gen}) - (VA C5 / VA \text{ gen}) \quad (2.56)$$

Estos requerimientos de VA son mostrados en la figura 2.25.

El circuito de este modelo puede ser usado para máquinas con ángulo de factor de potencia ϕ entre 30° y 60° grados. Para ϕ entre 49° y 60°

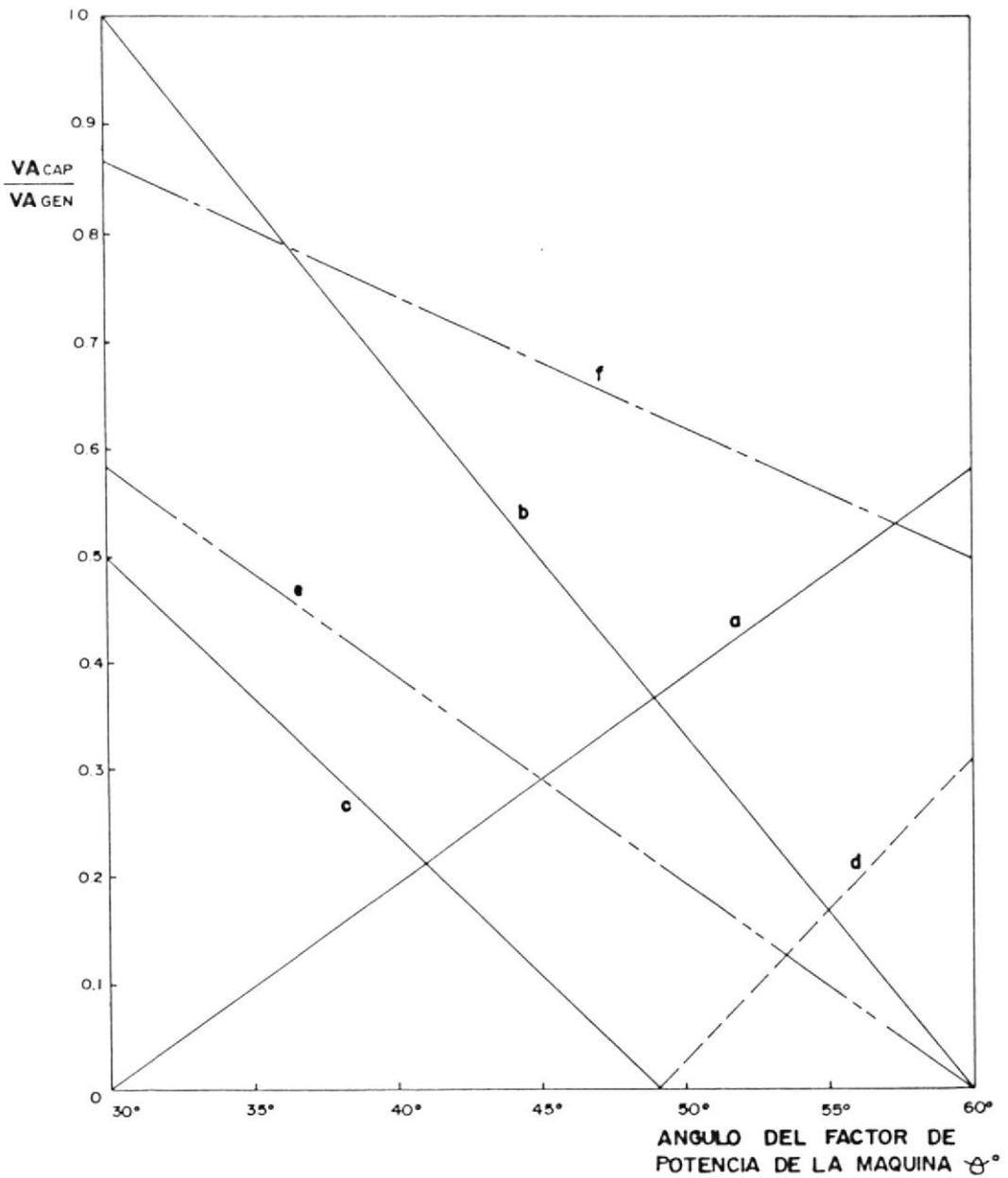


Fig. 2.25 Requerimientos de Voltio-amperios de capacitores V_{cap} vs. Angulo del factor de potencia de la máquina ϕ° .

Voltio-amperios internos del generador $VA_{gen} = 3$.

- a) Capacitor C2 a voltaje uno por unidad.
- b) Capacitor C5 a voltaje 3 por unidad.
- c) VAR / VA gen sistema capacitivo.
- d) VAR / VA gen sistema inductivo. También VA C6/VA gen.
- e) VA trans / VA gen.
- f) Sólo factor de potencia de la máquina.

grados, un capacitor C_6 puede ser usado entre las líneas monofásicas para compensar el factor de potencia a la unidad.

Para ϕ menores que 49 grados, la línea monofásica tiene un factor de potencia en atraso, y el capacitor C_6 no puede usarse para una corrección capacitiva.

El circuito modelo C es adecuado para factores de potencia entre 0.866 y 0.70.

El circuito modelo B tiene algunas ventajas para factores de potencia entre 0.70 y 0.50, sólo si no se desea tener un factor de potencia unitario en la línea monofásica.

Considerando los VAR capacitivos de C_2, C_5 y C_6 , los circuitos modelo B y modelo C son equivalentes.

La figura 2.26 es un gráfico de los voltio-amperios requeridos por los capacitores como una función del ángulo del factor de potencia del generador de inducción trifásico.

Una observación de las curvas en la figura 2.26 muestra que la mayoría de ellos son casi líneas rectas.

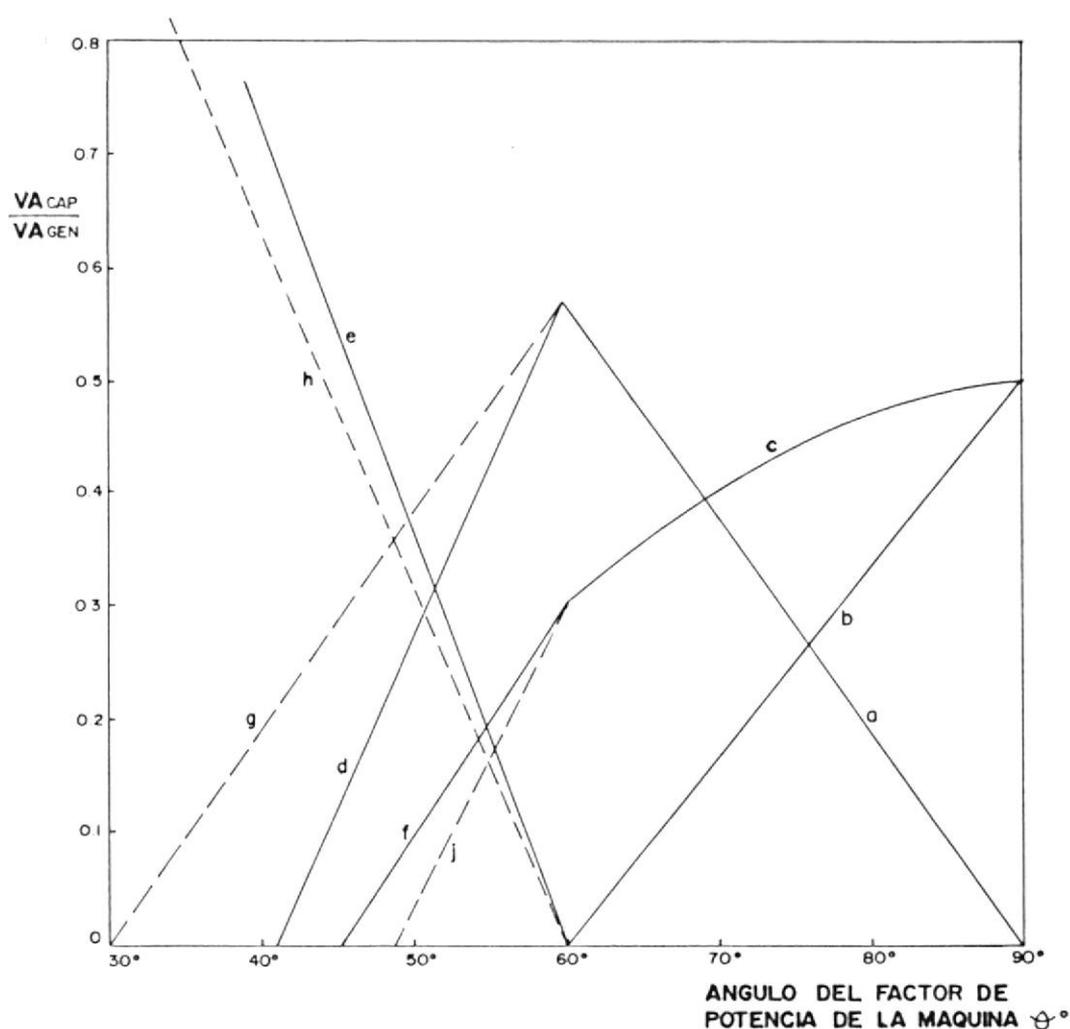


Fig. 2.26 Requerimientos de Voltio-amperios vs. Angulo del factor de potencia de la máquina.

Modelo A es de 60° a 90°.

Modelo B es de 41° a 60°.

Modelo C es de 30° a 60°.

a) VA C2 para capacitor C2, modelo A

b) Capacitor C3 modelo A.

c) Capacitor C6 modelo A.

d) Capacitor C2 modelo B.

e) Capacitor C4 modelo B.

f) Capacitor C6 modelo B.

g) Capacitor C2 modelo C.

h) Capacitor C5 modelo C.

i) Capacitor C6 modelo C.

Aproximaciones prácticas para el modelo A son:

$$VA_{C2/VA_{gen}} = 0,187 (91^\circ - \varphi) \quad (2.57)$$

$$VA_{C3/VA_{gen}} = 0,0173 (\varphi - 60^\circ) \quad (2.58)$$

$$VA_{C6/VA_{gen}} = 0,5 - 0,0052313 (90^\circ - \varphi) - 6,0448 * 10^{-5} (90^\circ - \varphi)^2 \quad (2.59)$$

Aproximaciones prácticas para el modelo B son:

$$VA_{C2/VA_{gen}} = 0,577 - 0,0298(60^\circ - \varphi) \quad (2.60)$$

$$VA_{C4/VA_{gen}} = 0,0403(60^\circ - \varphi) \quad (2.61)$$

$$VA_{C6/VA_{gen}} = 0,2887 - 0,02067(60^\circ - \varphi) \quad (2.62)$$

En las expresiones anteriores, C_6 es la capacitancia entre la línea monofásica para producir factor de potencia unitaria en la línea.

Aproximaciones prácticas para el modelo C son:

$$VA_{C2/VA_{gen}} = 0,019246 (\varphi - 30^\circ) \quad (2.63)$$

$$VA_{C5/VA_{gen}} = 0,03333 (60^\circ - \varphi) \quad (2.64)$$

$$VA_{C6/VA_{gen}} = 0,2887 - 0,02625 (60^\circ - \varphi) \quad (2.65)$$

C A P I T U L O I I I

PRUEBAS EXPERIMENTALES

En este capítulo se pretende básicamente, realizar un estudio comparativo entre valores obtenidos experimentalmente con los valores obtenidos teóricamente.

Para ello se ha utilizado una máquina de inducción acoplada a un motor de corriente continua, de las que dispone el laboratorio de maquinaria de la ESPOL.

En primer lugar se determinan los parámetros y curvas necesarias de la máquina de inducción, utilizando para ello las pruebas convencionales explicadas en el capítulo I. Luego, se estudia el comportamiento del generador de inducción, relacionando la capacitancia con diferentes parámetros. Además con la ayuda del programa desarrollado en el apéndice A se establece la comparación teórica - experimental del generador de inducción.

Finalmente se desarrolla un programa computacional para obtener los requerimientos mínimos de potencia reactiva (capacitancia mínima).

3.1 OBTENCION DE PARAMETROS

Del laboratorio de maquinaria de la ESPOL, se ha

escogido una máquina KATO, cuyos datos de placa son los siguientes:

MAQUINA DE INDUCCION (como motor):

Potencia de salida: 1,5 HP

Velocidad nominal: 1715 r.p.m.

Voltaje nominal: 220 V

Corriente nominal: 4.2 A

Frecuencia nominal: 60 Hz

Número de polos: 4

Fases: 3

Clase de aislamiento: B

MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA (PRIMO - MOTOR)

Modelo: IEA 69

Tipo: 14054

Potencia de salida: 1.5 HP

Velocidad: 1800 r.p.m.

Voltaje nominal: 125 V

Corriente nominal: 12 A

Trabajo continuo

Temperatura: 50° C

Voltaje del devanado de campo: 70 V

Corriente del devanado de campo: 0,32 A

Por conveniencia, en la mayoría de los casos, se han utilizado sólo valores en por unidad, para lo cual se definen las siguientes constantes base:

Voltaje base: $V_{base} = 220 \text{ V}$

Corriente base: $I_{base} = 4,2 \text{ A}$

Impedancia base: $Z_{base} = V_{base} / I_{base} = 52,38$

Admitancia base: $Y_{base} = 1 / Z_{base} = 0,0191 \text{ S}$

Potencia base: $P_{base} = V_{base} I_{base} = 924 \text{ W}$

Velocidad base: $N_{base} = 1800 \text{ rev/min}$

Frecuencia base: $F_{base} = 60 \text{ Hz}$

A partir de las pruebas explicadas en la sección 1.2.1, se han tomado los siguientes datos:

TABLA II
DATOS DE LA PRUEBA VOLTIMETRO-AMPERIMETRO

Voltaje (Vdc)	Corriente (Idc)	$Re = Vdc / 2Idc (\Omega)$
4,903	1 A	2,45
7,376	1,5 A	2,46
9,729	2 A	2,43
14,20	3 A	2,37

$$Re = Re \text{ promedio} = 2,43 \quad (3.1)$$

TABLA III
DATOS DE LA PRUEBA EN VACIO

V1-1 (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	P1 (W)	P2 (W)
216,9	3,35	3,25	3,5	-240	430

$$V_n = 125,2 \text{ V} \quad (3.2)$$

$$I_o = 3,37 \text{ A} \quad (3.3)$$

$$P_o = 190 \text{ W} \quad (3.4)$$

$$\cos \theta_o = 0,15 \quad (3.5)$$

TABLA IV

DATOS DE LA PRUEBA DE VACIO IDEAL

V1-1 (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	P1 (W)	P2 (W)
217,2	3,4	3,3	3,45	-260	420

$$V_n' = 125,4 \text{ V} \quad (3.6)$$

$$I_o' = 3,38 \text{ A} \quad (3.7)$$

$$P_o' = 160 \text{ W} \quad (3.8)$$

$$P_{h+f} = P_o' - m_1 I_o'^2 R_e = 76,72 \text{ W} \quad (3.9)$$

$$G_c = P_{h+f} / m_1 V_g^2 = 18,23 \times 10^{-4} \quad (3.10)$$

$$V_g = V_n - I_o (R_e + jX_{le}) = 118,43 \text{ V} \quad (3.11)$$

$$I_c = V_g G_c = 0,215936 \text{ A} \quad (3.12)$$

$$I_m = \sqrt{I_o^2 - I_c^2} = 3,373 \text{ A} \quad (3.13)$$

$$B_m = I_m / V_g = 0,02848 \quad (3.14)$$

TABLA V

DATOS DE LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

V1-1 (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	P1 (W)	P2 (W)
36,9	4,15	4,0	4,3	40	150

$$V_{cc} = 21,30 \text{ V} \quad (3.15)$$

$$I_n = 4,15 \text{ A} \quad (3.16)$$

$$P_{cc} = 190 \text{ W} \quad (3.17)$$

$$\cos \theta_{cc} = 0,716 \quad (3.18)$$

$$Z_{cc} = V_{cc}/I_n = 5,20 \quad (3.19)$$

$$R_{cc} = P_{cc} / (m1 I_n^2) = 3,68 \quad (3.20)$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} = 3,67 \quad (3.21)$$

$$X_{cc}/2 = X_{1e} = X_{1r} = 1,84 \quad (3.22)$$

$$R_r = R_{cc} - R_e = 1,25 \quad (3.23)$$

TABLA VI
DATOS DE LA PRUEBA DE VELOCIDAD SINCRONA

V_{1-1} (V)	I_e (A)	P_1+P_2 (W)	$V_g/F=V_{11}-I_e Z_e$ (p.u.)	$X_m=(V_{1-1}/I_e)-Z_e$ (p.u.)
14,84	0,4	2	0,11032	1,15601
40,01	1,13	17	0,29667	1,10067
51,85	1,40	27	0,38544	1,15398
69,40	1,87	49	0,51598	1,15654
87,06	2,30	75	0,64806	1,18093
101,27	2,67	102	0,75384	1,18325
118,36	3,17	143	0,88021	1,16368
125,00	3,43	165	0,92824	1,13420
132,11	3,80	194	0,97831	1,07952
142,54	4,43	249	1,05015	0,99411
153,43	5,35	333	1,12109	0,87954
165,55	6,66	466	1,19517	0,75244
170,17	7,12	518	1,22417	0,72136
175,48	8,32	648	1,24662	0,62877

NOTA: Por disponibilidad de voltaje variable, para esta prueba el estator fue conectado en delta ($V_{base}=127\text{ V}$).

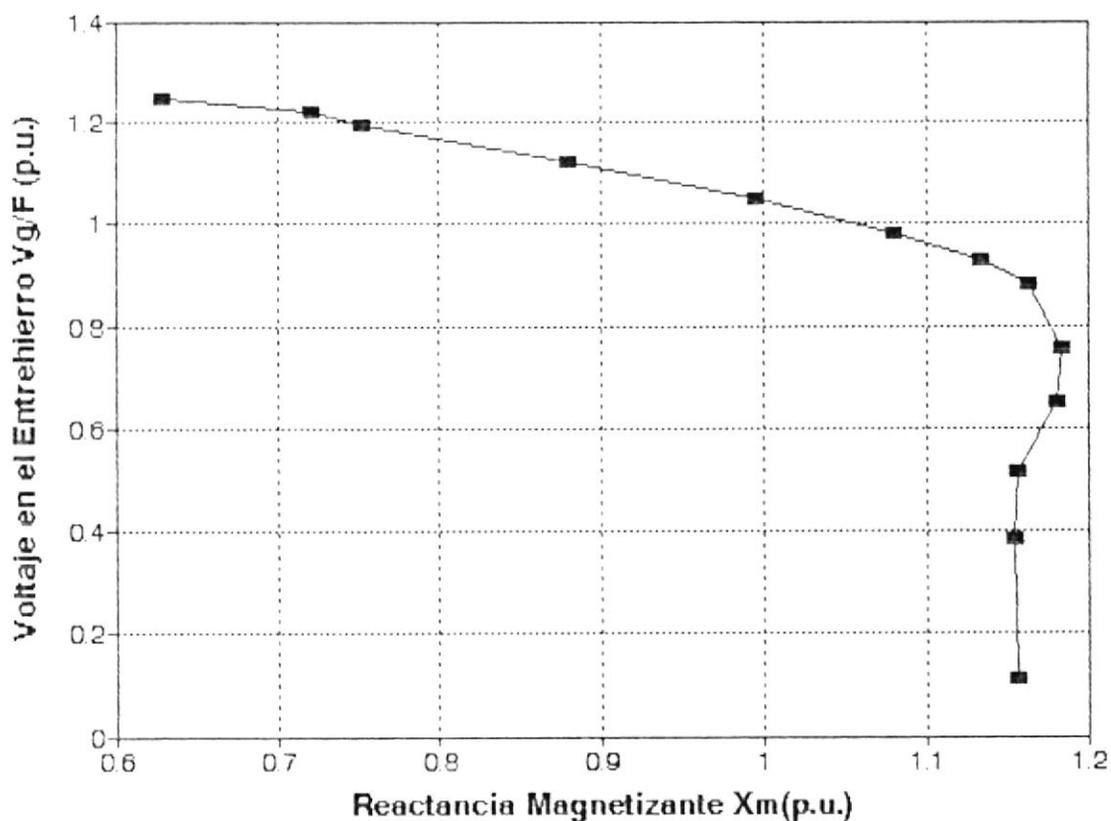


Fig. 3.1 Variación de V_g/F con respecto a X_m , a partir de la prueba de velocidad síncrona.

3.2 COMPORTAMIENTO DEL GENERADOR DE INDUCCION

3.2.1 RELACION ENTRE CAPACITANCIA Y VOLTAJE EN VACIO

El voltaje en los terminales de un generador de inducción como un sistema aislado depende de la velocidad, de la carga y del valor de la capacitancia terminal. Si $C < C_{\min}$ el voltaje no crecerá y por el contrario si $C \gg C_{\min}$, el voltaje en los terminales puede ser excesivo y peligroso. Por lo tanto, para una operación segura, es conveniente encontrar una relación entre voltaje en los terminales, velocidad y capacitancia terminal.

Para el caso en vacío dicha relación se la describe a continuación.

El voltaje terminal en vacío puede ser obtenido a partir del circuito equivalente aproximado de la Fig. 2.14. Para auto-excitación dicho circuito debería tener una impedancia de lazo mínima. El valor de X_m que satisface este requerimiento está dado por:

$$X_m = \sqrt{(X_c/v)^2} - X_{le} \quad (3.24)$$

Para máquinas de inducción, y utilizando la prueba de velocidad síncrona explicada en la sección 1.2.1.5, es posible expresar la variación del voltaje en el entrehierro en función de X_m (fig. 3.1) por un polinomio de segundo orden del siguiente tipo:

$$V_g = F (A X_m^2 + B X_m + C) \quad (3.25)$$

de la fig. 3.1 (ver APENDICE "B")

$$V_g/F = -3,732 X_m^2 + 2,614 X_m + 0,778 \quad (3.26)$$

De las ecuaciones 3.24 y 3.25 se puede escribir:

$$V_g = v [A(X_c/v^2 - X_{le})^2 + B(X_c/v^2 - X_{le}) + C] \quad (3.27)$$

ya que $F = v$.

Sustituyendo los valores de los parámetros de la máquina, es posible expresar el voltaje del entre-hierro V_g en términos de la reactancia capacitiva terminal X_c y la velocidad v por una relación de la forma:

$$V_g = A X_c^2 / v^3 - B' X_c / v + C' v \quad (3.28)$$

donde A , B' y C' son constantes. Por lo tanto, una vez que la máquina es excitada, V_g



progresivamente se incrementa a medida que crece la capacitancia C . Conociendo V_g , es sencillo determinar el voltaje en los terminales V_t , resolviendo el circuito de la figura 2.14.

$$V_t = I_o Z_e + V_g \quad (3.29)$$

Para el caso de la máquina Kato:

$$V_t = I_o (0,0464 + j0,0351) + V_g \text{ [p.u.]} \quad (3.30)$$

La tabla VII muestra los datos experimentales obtenidos a partir de la máquina Kato conectada bajo el esquema de la figura 3.2, así como también los datos calculados a partir del método simplificado que se acaba de desarrollar.

En la figura 3.3 se muestra la variación del voltaje terminal con respecto a la capacitancia, cuando el generador se encuentra en vacío.

Se puede observar que puede utilizarse el método simplificado para predecir el voltaje terminal V_t en vacío, sin una considerable pérdida de exactitud.

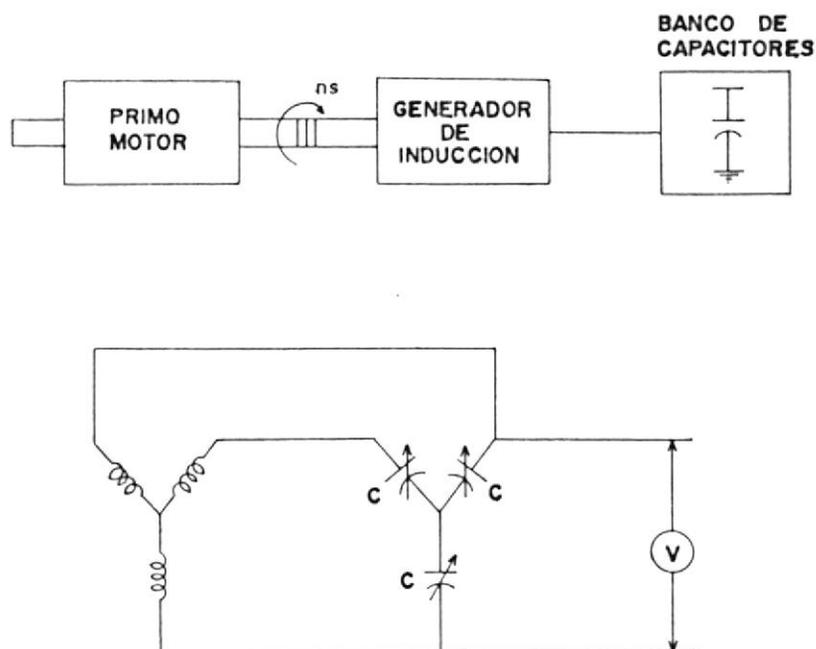


Fig. 3.2 Esquema de conexión para determinar el voltaje terminal en vacío V_t , con respecto a la variación de C .

TABLA VII

VALORES DEL VOLTAJE TERMINAL V_t PARA UNA VARIACION DE LA CAPACITANCIA C EN VACIO.

Capacitancia C (μF)	V_t experimental (p.u.)	V_t calculado (p.u.)
70	0,8914	0,8770
75	1,1000	1,0341
80	1,1991	1,1417
85	1,2455	1,2140
90	1,3068	1,2609

Nota: Los voltajes son por fase.

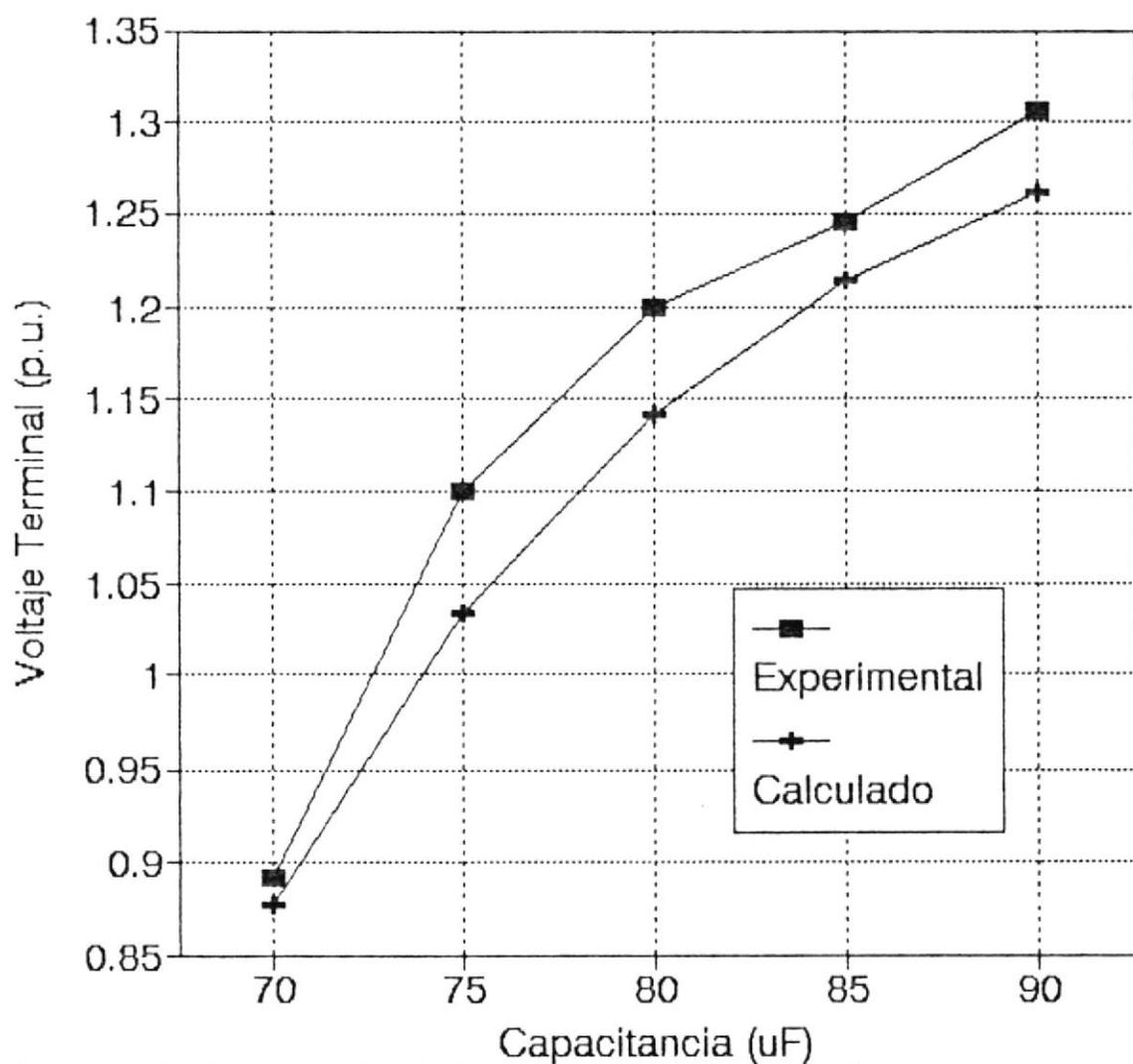


Fig. 3.3 Variación del voltaje terminal U_t , con respecto a la capacitancia C (en vacío).

3.2.2 RELACION ENTRE POTENCIA MAXIMA Y CAPACITANCIA

Existe un cierto valor de potencia máxima, $P_{m\acute{a}x}$, el cual puede ser obtenido de un generador de inducción aislado teniendo un valor de capacitancia fijo.

Cuando la impedancia de carga decrece gradualmente, la potencia de salida inicialmente se incrementa desde cero a $P_{m\acute{a}x}$.

Sin embargo, cualquier disminución mayor de la impedancia de carga, resulta en una disminución de la potencia de salida. Este comportamiento continua hasta que la capacitancia terminal es insuficiente para mantener la auto-excitación del generador y es entonces cuando se produce un colapso en el voltaje terminal a cero.

El valor de esta potencia máxima es análogo al límite de estabilidad en estado estable de una máquina síncrona. Las figuras 3.4 y 3.5 muestran la potencia máxima para una carga resistiva de la máquina Kato.

Como se puede observar en la figura 3.4, para un valor de velocidad dado, $P_{m\acute{a}x}$ se incrementa en una forma aproximadamente lineal con

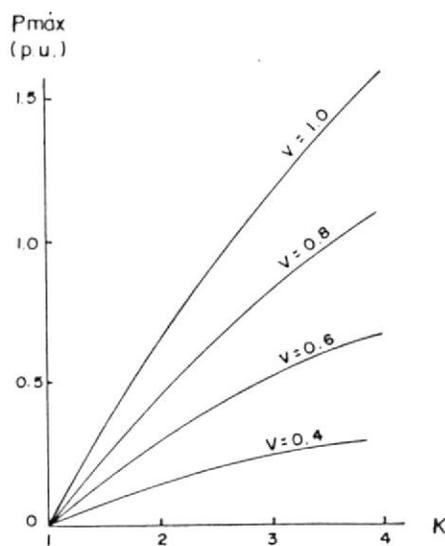


Fig. 3.4 Variación de P_{\max} con respecto a K .

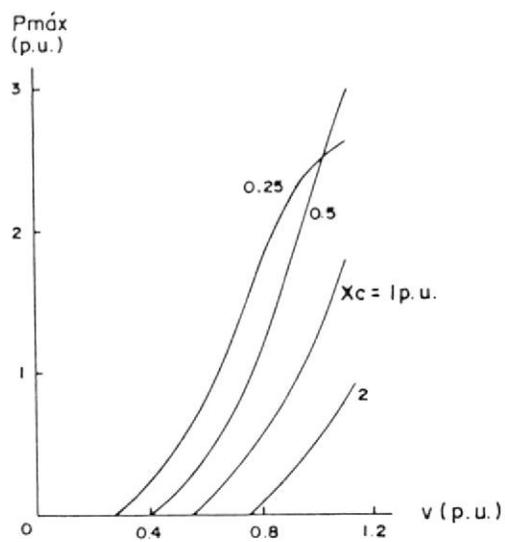


Fig. 3.5 Variación de P_{\max} con respecto a v y X_c .

respecto a K .

Si se fija el valor de la capacitancia terminal, entonces la $P_{\text{máx}}$ varía con respecto a la velocidad en una forma no lineal.

La figura 3.5 muestra la variación de $P_{\text{máx}}$ con respecto a la velocidad en por unidad para diferentes valores de reactancia capacitiva terminal X_c . Es interesante notar que a velocidades más bajas, $P_{\text{máx}}$ aumenta con la capacitancia terminal C . Sin embargo, a velocidades más altas, esta inicialmente aumenta pero luego disminuye cuando C se incrementa.

Por esta razón, se tiene que considerar cuidadosamente ambos parámetros v y C para obtener el valor óptimo de $P_{\text{máx}}$.

3.2.3 CARACTERÍSTICA DE CARGA DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN

La característica de carga del generador de inducción indica la variación del voltaje terminal y frecuencia, con respecto a la potencia de salida a un valor fijo de capacitancia.

Mediante la utilización del programa desarrollado en el apéndice A, para estudiar el comportamiento del generador de inducción, se puede determinar fácilmente el voltaje y la frecuencia terminal para un rango de conductancia de carga dado (carga con f. p. unitario), un valor fijo de capacitancia C y a un valor de velocidad constante.

Las figuras 3.6, 3.7 y 3.8 muestran las características de carga de la máquina Kato para tres valores de capacitancia por fase C (70, 80 y 90 F respectivamente) a velocidad constante, $v = 1$ p.u.

La tabla VIII muestra los valores experimentales obtenidos con la máquina Kato para los valores de capacitancia antes mencionados.

Como se esperaba el voltaje terminal cae conforme aumenta la carga, hasta llegar al colapso (voltaje igual a cero). Se puede observar que para valores de capacitancia mayores, la potencia de salida se incrementa considerablemente, siendo una restricción el voltaje de salida el cual puede elevarse a valores peligrosos.

TABLA VIII
 CARACTERISTICA DE CARGA DE LA MAQUINA KATO

CAPACITANCIA C [μ F]	POTENCIA SALIDA P _s [p.u.]	VOLTAJE TERMINAL V _t [p.u.]	FRECUENCIA F [p.u.]
70	0,0937	0,8027	0,9947
	0,1875	0,7082	0,9935
	0,2812	0,6218	0,9932
	0,3750	0,4382	0,9930
	0,4687	0,0000	0,0000
80	0,0937	1,1655	0,9928
	0,1875	1,1418	0,9900
	0,2812	1,1314	0,9905
	0,3750	1,1027	0,9880
	0,4687	1,0827	0,9868
	0,5624	1,0573	0,9862
	0,6562	1,0236	0,9835
	0,7499	0,9914	0,9822
	0,8436	0,9595	0,9815
	0,9374	0,9136	0,9798
	1,0311	0,8609	0,9785
	1,1249	0,7809	0,9765
	1,2186	0,6745	0,9748
1,3123	0,4782	0,9742	
1,4061	0,0000	0,0000	

CAPACITANCIA C [μ F]	POTENCIA SALIDA P_s [p.u.]	VOLTAJE TERMINAL V_t [p.u.]	FRECUENCIA F [p.u.]
90	0,0937	1,2418	0,9798
	0,1875	1,2245	0,9787
	0,3750	1,1895	0,9763
	0,5624	1,1550	0,9742
	0,7499	1,1123	0,9702
	0,9374	1,0673	0,9675
	1,1249	1,0123	0,9647
	1,3123	0,9532	0,9630
	1,6873	0,7036	0,9572
	1,7810	0,6068	0,9565
	1,8748	0,0000	0,0000



BIBLIOTECA

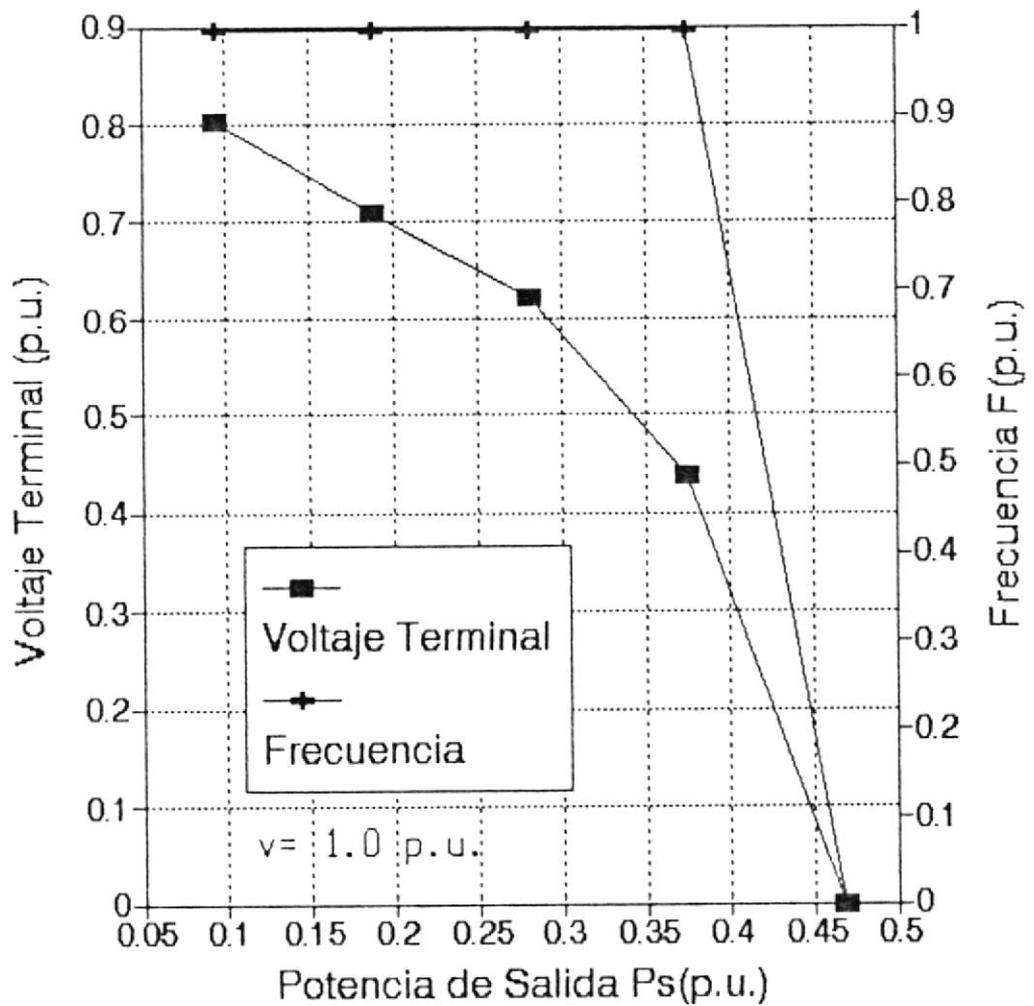


Fig. 3.6 Característica de carga del generador de inducción para $70 \mu\text{F}$ (máquina Kato).

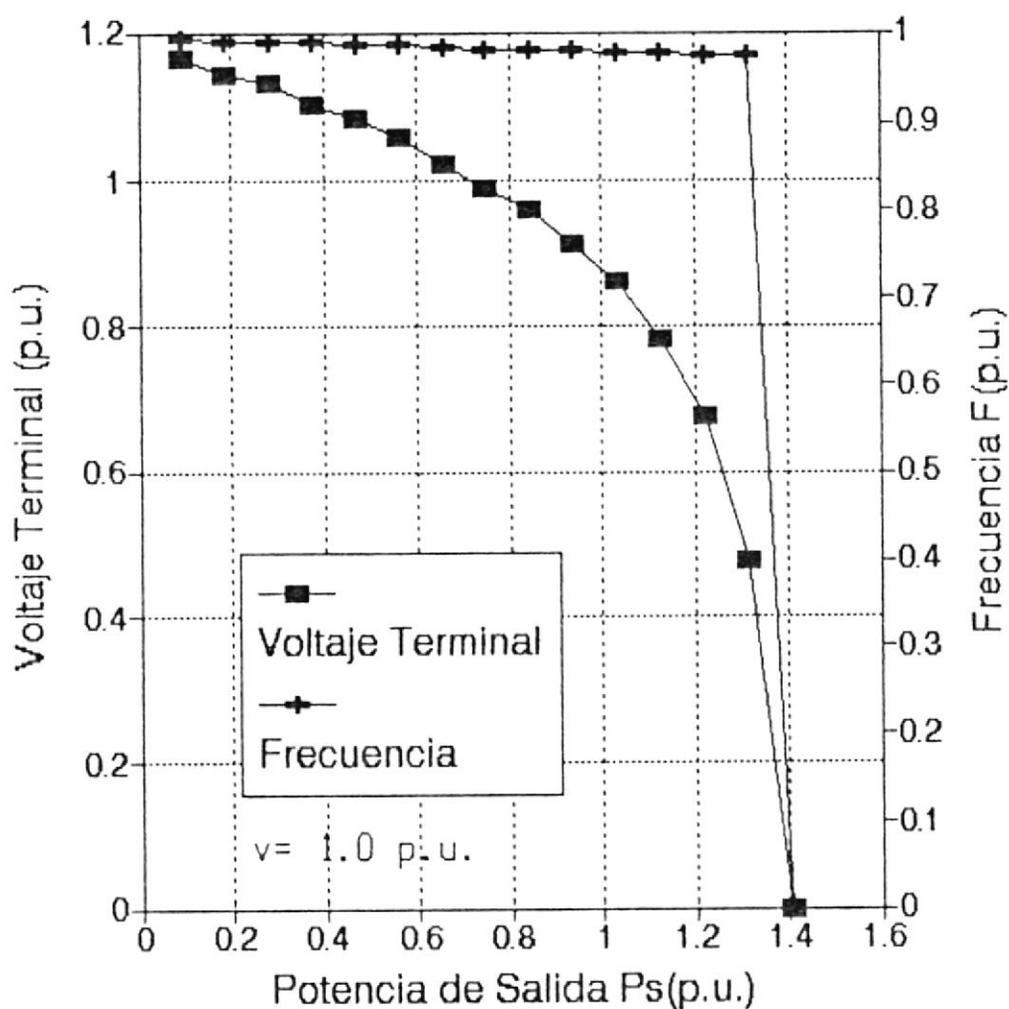


Fig. 3.7 Características de carga del generador de inducción para $80 \mu F$ (Máquina Kato).

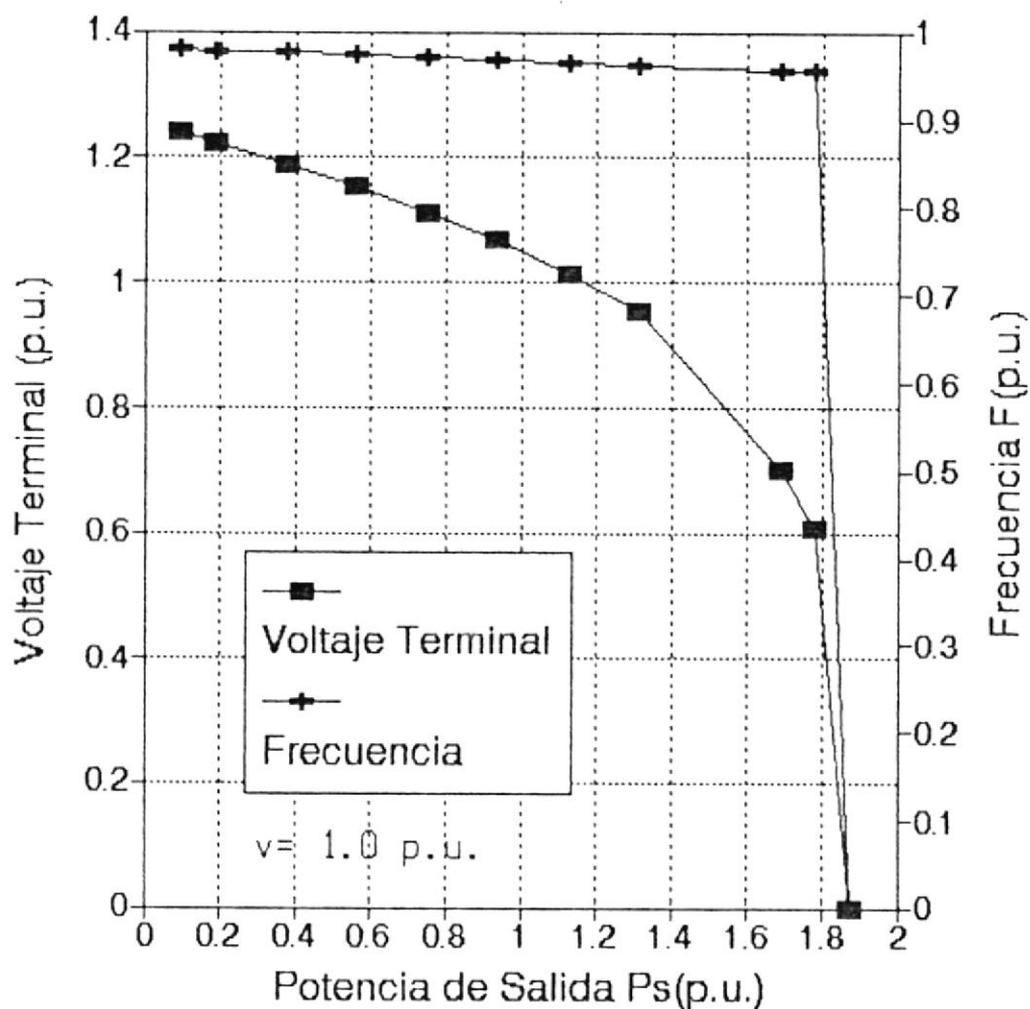


Fig. 3.8 Característica de carga del generador de indicción para $90 \mu\text{F}$ (Máquina Kato)

3.2.4 RELACION ENTRE FACTOR DE POTENCIA DE LA CARGA Y CAPACITANCIA.

Hasta ahora sólo se ha estudiado el comportamiento y los requerimientos de potencia reactiva del generador de inducción cuando este alimenta cargas resistivas. Si bien es cierto que en la mayoría de los casos, las cargas resistivas no se ven afectadas por la frecuencia de alimentación, pero cuando se necesite un control exacto de la frecuencia y del voltaje terminal, el generador deberá ir acoplado a un sistema de control con componentes de estado sólido. Dicho tema no será tratado en el presente trabajo.

Si la carga que se desea acoplar al generador de inducción no es completamente resistiva, entonces la característica de carga del generador de inducción será como se muestra en la figura 3.9.

Para impedancias de carga inductivas, los capacitores terminales deben suministrar los requerimientos de potencia reactiva de la carga así como también los requerimientos de magnetización del generador de inducción.



Mientras que para impedancias de carga capacitivas, la capacitancia de la carga ayuda a suministrar los requerimientos de potencia reactiva del generador de inducción.

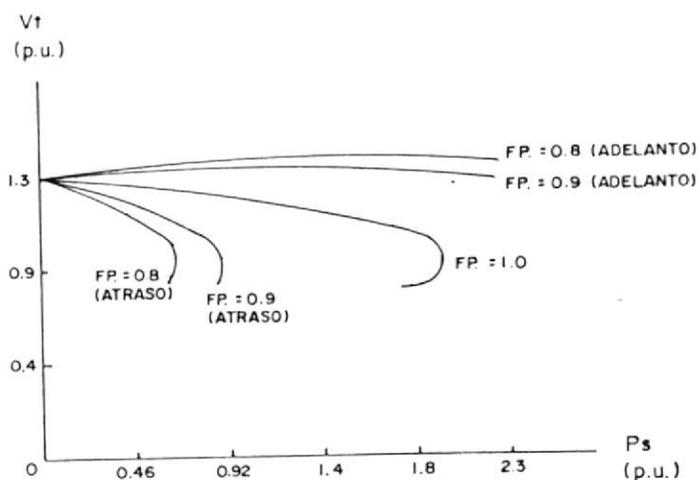


Fig. 3.9 Característica de carga del generador de inducción, para diferentes factores de potencia.

3.3 PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA OBTENER LOS DIFERENTES REQUERIMIENTOS DE CAPACITANCIA MINIMA

3.3.1 DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA

Este sistema tiene como objetivo determinar la reactancia capacitiva correspondiente a la capacitancia mínima requerida para la auto-excitación de un generador de inducción, operando como un sistema aislado.

El lenguaje utilizado para codificar este sistema es el PASCAL, debido a las múltiples ventajas y facilidades que presta por ser un lenguaje estructurado y aplicable para programación de tipo científico.

Mediante el ingreso de los parámetros de la máquina de inducción y los valores de la carga, el usuario podrá determinar el valor de la reactancia capacitiva máxima requerida para provocar y mantener la auto-excitación del generador de inducción, mediante una solución gráfica y numérica.

3.3.2 ANALISIS DETALLADO

El programa se denomina CMIN y se requiere ingresar los valores de los parámetros de la

máquina de inducción y de la carga, en por unidad, por fase y en el siguiente orden:

Resistencia del estator (R_e)

Resistencia del rotor (R_r)

Reactancia del estator y rotor ($X_{le}=X_{lr}=X_l$)

Resistencia de la carga (R)

Reactancia capacitiva en paralelo (X_c)

Este es un valor arbitrario que se toma, pero que procede de un valor de capacitancia lo suficientemente grande, como para provocar que la reactancia magnetizante caiga en la región de saturación.

Delta X_c

Corresponde al valor con que se desea que aumente la reactancia capacitiva, hasta que encuentre el valor que corresponda a la capacitancia mínima.

Reactancia magnetizante máxima (X_{smax})

Este valor corresponde a la reactancia máxima no saturada, obtenida a partir de la prueba de velocidad síncrona.

Reactancia magnetizante inicial (X_{mo})

Corresponde a un valor inicial supuesto, para resolver las ecuaciones (2.12) y (2.13) por el método de Newton Raphson. Como X_m es menor que la no saturada, $X_{m0} = \text{no saturada}$.

Velocidad (v)

Debido a que la aplicación principal de generadores de inducción es para cargas resistivas, el sistema sólo acepta valores reales de impedancia de carga.

Si se requiere determinar el valor de la capacitancia mínima requerida para mantener la auto-excitación del generador de inducción cuando alimenta impedancias de carga inductivas, las ecuaciones (2.12) y (2.13) deberán reemplazarse por las ecuaciones (3.31) y (3.32)

$$f(X_m, F) = (a_1 X_m + a_2) F^3 + (a_3 X_m + a_4) F^2 + (a_5 X_m + a_6) F + (a_7 X_m + a_8) = 0 \quad (3.31)$$

$$g(X_m, F) = (b_1 X_m + b_2) F^4 + (b_3 X_m + b_4) F^3 + (b_5 X_m + b_6) F^2 + (b_7 X_m + b_8) F + b_9 = 0 \quad (3.32)$$

Por lo que las constantes $c_1 \dots c_8$ y $d_1 \dots d_5$ de las ecuaciones (2.14) y (2.15) respectivamente, deberán reemplazarse por las constantes $a_1 \dots a_8$



y $b_1..b_9$, ecuaciones (3.33) y (3.34) respectivamente.

$$\begin{aligned}
 a_1 &= -(R_r X + R X_{1r} + R X_{1e} + R_e X) \\
 a_2 &= -(X_{1e} (R_r X + R X_{1r}) + X X_{1r}) \\
 a_3 &= v(R X_{1r} + R X_{1e} + R_e X) \\
 a_4 &= X_{1r} (X_{1e} R + X)v + R R_r R_e \\
 a_5 &= (R R_r R_e) X_c \\
 a_6 &= R_r X_c (X + X_{1e}) + (R + R_e) X_c X_{1r} \\
 a_7 &= -v(R + R_e) X_c \\
 a_8 &= -v X_c X_{1r} (R + R_e)
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

$$\begin{aligned}
 b_1 &= -X (X_{1r} + 1) \\
 b_2 &= -X X_{1r} \\
 b_3 &= v X (X_{1r} + 1) \\
 b_4 &= v X X_{1r} + R R_r X_{1e} \\
 b_5 &= R R_e + R R_r + X_c(X + X_{1r} + 1) \\
 b_6 &= [R R_e + X_c (X + 1)] X_{1r} + R_e X \\
 b_7 &= -v [R R_e + X_c (X + X_{1r} + 1)] \\
 b_8 &= -v [R R_e + X_c (X + 1)] X_{1r} \\
 b_9 &= -R_r X_c (R + R_e)
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

Tanto los datos de entrada como los valores calculados para obtener la solución, son almacenados en un archivo de salida (Ej. RESULT.COM), pero la solución también es

obtenida gráficamente por pantalla como resultado de la intersección de dos curvas, tal como se explicó en el capítulo dos sección 2.3.

3.3.3 DIAGRAMA DE FLUJO

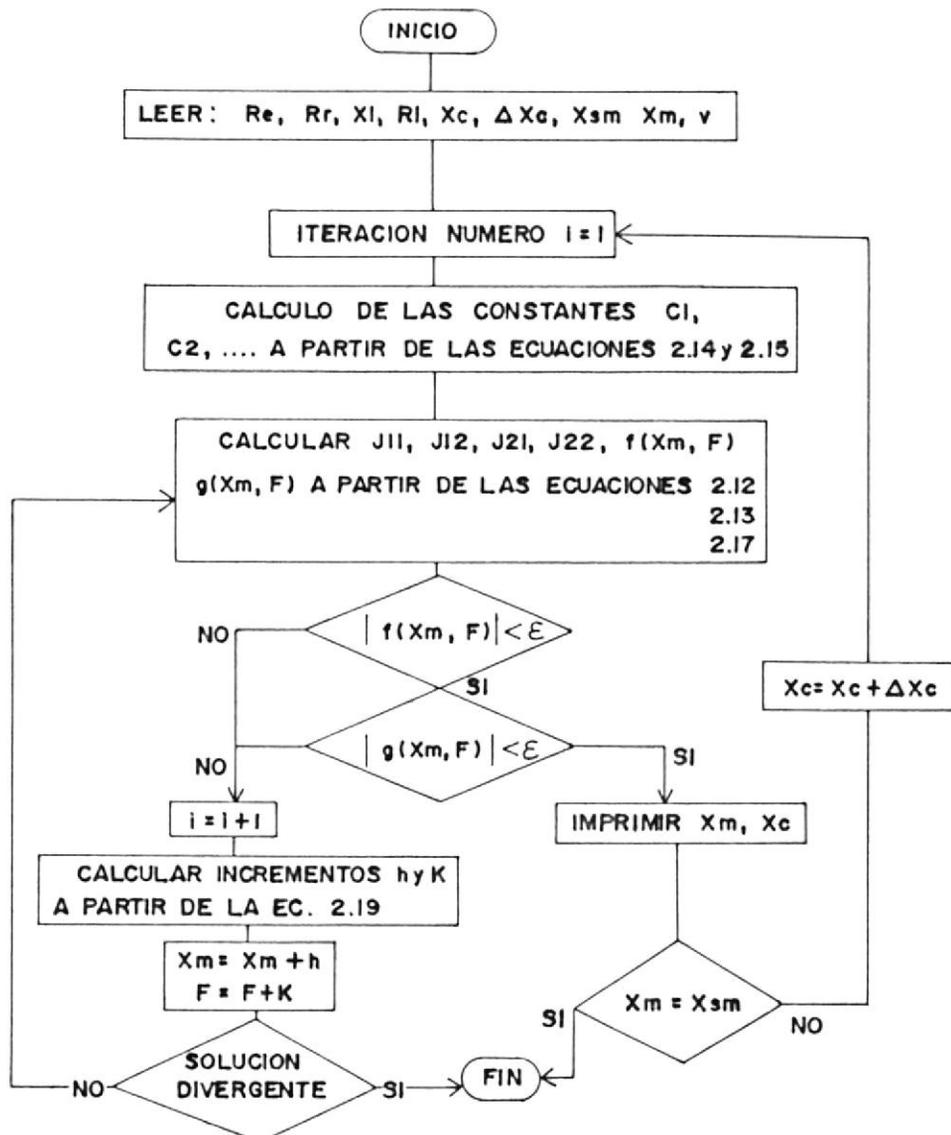


Fig. 3.10 Diagrama de flujo del sistema que determina los requerimientos de capacitancia mínima, para la auto-excitación del generador de inducción.

3.3.4 LISTADO DEL PROGRAMA

```

program coin;

  const

  {Definición de constantes}

    eps=0.0001;
    f=60;
    q=3;

  {Definición de variables}

  var
    textfile:text;
    s1,s2,s3,s4:string[80];
    c1,c2,c3,c4,c5,c6,c7,c8,db1,inic,d1,d2,d3,d4,d5,birr,dirr,bill,dill:real;
    i,j,k,l,para,vel,aa1,aa2,b1,b2,ii:integer;
    alfa,beta,delta,rr,Db,bl,blmax,r1,xl,xc,rs,bvt,dvt,bpi:real;
    cont,fn,gn,xm0,xsm,Dc,aa,bb,fo,x,vf,a,b,c,xi,fi,d:real;
    opci:char;

  {Ecuaciones simultaneas no-lineales f y g, en función de F y Xm, ecs. (2.12) y (2.13)}

  function ff(f,xm:real):real;
  begin
    ff:=((c1*xm+c2)*f*f*f)+((c3*xm+c4)*f*f)+((c5*xm+c6)*f)+(c7*xm+c8);
  end;

  function gg(f,xm:real):real;
  begin
    gg:=((d1*xm+d2)*f*f)+((d3*xm+d4)*f)+(d5);
  end;

  {Matriz Jacobiano}

  function j11(f:real):real;
  begin
    j11:=(c1*f*f*f)+(c3*f*f)+(c5*f)+c7;
  end;

  function j12(f,xm:real):real;
  begin
    j12:=(3*(c1*xm+c2)*f*f)+(2*(c3*xm+c4)*f)+(c5*xm+c6);
  end;

  function j21(f:real):real;

```

```

begin
  j21:=(d1*f*f)+(d3*f);
end;

function j22(f,xm:real):real;
begin
  j22:=(2*(d1*xm+d2)*f)+(d3*xm+d4);
end;

```

(Programa principal)

```

begin
  textbackground(11);
  textcolor(15);
  clrscr;
  textbackground(0);
  window(15,2,65,23);
  clrscr;
  window(15,2,65,24);
  s1:='_';
  for i:=1 to 80 do
    s1:=concat(s1,'_');
  gotoxy(1,1);
  writeln(' ',copy(s1,1,47),' ');
  for i:=1 to 20 do
    begin
      gotoxy(2,i+1);
      write(' ');
      gotoxy(50,i+1);
      write(' ');
    end;
  gotoxy(1,22);
  write('L',copy(s1,1,47),' ');
  gotoxy(12,5);
  write('PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA');
  gotoxy(8,7);
  write('OBTENER LA CAPACITANCIA MINIMA DE');
  gotoxy(4,9);
  write('AUTOEXCITACION DEL GENERADOR DE INDUCCION ');
  gotoxy(5,15);
  write('Tesis de Grado de:');
  gotoxy(10,17);
  write('ARTURO DAVID PEREZ ROLANDO');
  cont:=0;
  repeat
    cont:=cont+0.5;
  until cont=15000;
  window(1,1,80,25);
  textbackground(11);
  textcolor(15);

```



{Ingreso de parámetros de la máquina de inducción y datos de carga}

```

clrscr;
textbackground(1);
gotoxy(54,2);
write(' ',copy(s1,1,24),' ');
gotoxy(54,3);
write('   DATOS DE ENTRADA   ');
gotoxy(54,4);
write(' ');
gotoxy(54,5);
write(' Ingrese los siguientes ');
gotoxy(54,6);
write(' datos en par unidad : ');
gotoxy(54,7);
writeln('L',copy(s1,1,24),' ');
window(2,2,52,23);
clrscr;
window(2,2,52,24);

gotoxy(1,1);
writeln(' ',copy(s1,1,47),' ');
for i:=1 to 20 do
begin
gotoxy(2,i+1);
write(' ');
gotoxy(50,i+1);
write(' ');
end;
gotoxy(1,22);
write('L',copy(s1,1,47),' ');
gotoxy(5,3);
write('Resistencia del Estator ( Re )');
gotoxy(5,5);
write('Resistencia del Rotor ( Rr )');
gotoxy(5,7);
write('Reactancia Est./Rotor (Xle=Xlr)');
gotoxy(5,9);
write('Res. de Carga ( RL )');
gotoxy(5,11);
write('Reac. Cap. en Paralelo ( Xc )');
gotoxy(5,13);
write('Delta Xc ');
gotoxy(5,15);
write('Reactancia Magnetizante máx.( Xsm )');
gotoxy(5,17);
write('Reactancia Magnetizante ( Xm )');
gotoxy(5,19);
write('Velocidad ( v )');

repeat

```

```
repeat
  {$i-}
  gotoxy(41,3);
  readln(rs);
  {$i+}
until ioresult=0;
repeat
  {$i-}
  gotoxy(41,5);
  readln(rr);
  {$i+}
until ioresult=0;
repeat
  {$i-}
  gotoxy(41,7);
  readln(xl);
  {$i+}
until ioresult=0;
repeat
  {$i-}
  gotoxy(41,9);
  readln(rl);
  {$i+}
until ioresult=0;
repeat
  {$i-}
  gotoxy(41,11);
  readln(xc);
  {$i+}
until ioresult=0;
repeat
  {$i-}
  gotoxy(41,13);
  readln(Dc);
  {$i+}
until ioresult=0;
repeat
  {$i-}
  gotoxy(41,15);
  readln(xsm);
  {$i+}
until ioresult=0;
repeat
  {$i-}
  gotoxy(41,17);
  readln(xmo);
  {$i+}
until ioresult=0;
repeat
  {$i-}
  gotoxy(41,19);
```



```

    readln(vel);
    {%i+}
until iorresult=0;

opci:='n';
gotoxy(3,21);
write('Desea corregir algún valor? (s/n) ==> ');
readln(opci);
gotoxy(3,21);
write(' ');
until opci='n';

```

```

window(54,10,79,14);
clrscr;
window(54,10,80,16);
writeln(' ',copy(s1,1,24),' ');
writeln(' ');
writeln(' ');
writeln(' ',copy(s1,1,24),' ');
gotoxy(3,3);
write('Salida : ');
readln(s1);

```

(Registro de datos para impresión)

```

assign(textfile,s1);
rewrite(textfile);
writeln(textfile);

```

```

PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA');
OBTENER LA CAPACITANCIA MINIMA DE AUTOEXCITACION');
DEL GENERADOR DE INDUCCION ');

```

```

*** DATOS DE ENTRADA ***);

```

```

Resistencia del Estator ( Re ) = ',rs:10:3);
Resistencia del Rotor ( Rr ) = ',rr:10:3);
Reactancia Est./Rotor (Xle=Xlr) = ',xl:10:3);
Res. de Carga ( RL ) = ',rl:10:3);
Reac. Cap. en Paralelo ( Xc ) = ',xc:10:3);
Delta Xc = ',Dc:10:3);
React. Magnetizante Max. ( Xsm ) = ',xsm:10:3);
Reactancia Magnetizante ( Xm ) = ',xmo:10:3);
Velocidad ( v ) = ',vel:10);

```

```

writeln(textfile,' Xsm Xc ');
writeln(textfile,' ');

```

```

para=-1;
textcolor(14);
window(1,1,80,25);
hires;
hirescolor(15);
graphbackground(14);
draw(115,18,615,18,1);
draw(115,18,115,179,1);
draw(115,179,615,179,1);
draw(615,18,615,179,1);
gotoxy(53,25);
write('      Xc (p.u.) ');
gotoxy(2,2);
write('Xm (p.u.)');
s3=concat('Xm ', ' ', 'Vs.', ' ', 'Xc ');
i=length(s3);
gotoxy(40-round(i/2),1);
write(s3);
draw(115,58,615,58,1);
gotoxy(2,8);
write(' Xsm -->');
gotoxy(2,9);
write(xsm:10:3);
ii=0;

repeat

```

{Aplicación del método de Newton-Raphson para resolver las ecuaciones (2.12) y (2.13)}

```

c1=-2*xl*rl;
c2=-xl*xl*rl;
c3=2*xl*rl;
c4=xl*xl*rl;
c5=xc*(rl+rs+rr);
c6=xc*xl*(rl+rs+rr);
c7=-xc*(rs+rl);
c8=-xl*xc*(rs+rl);

d1=(2*xl*xc)+rl*(rs+rr);
d2=(rl*xl*(rs+rr))+xl*xl*xc;
d3=rs*rl+(2*xl*xc);
d4=-xl*(rs*rl+(xl*xc));
d5=-xc*rr*(rl+rs);

i=1;
xi=xm0;
fi=vel;

fn=ff(fi,xi);
gn=gg(fi,xi);

```

```

while ((abs(fn)>eps) or (abs(qn)>eps)) and (i<1000)
begin

    a:=j11(fi);
    b:=j12(fi,xi);
    c:=j21(fi);
    d:=j22(fi,xi);

    delta:=(a*d)-(b*c);( writeln(delta,' ',fn,' ',qn);)
    alfa:=(b*qn-(fn*d))/delta;
    beta:=(fn*c-(a*qn))/delta;

    xi:=xi+alfa;
    fi:=fi+beta;
    i:=i+1;

    fn:=ff(fi,xi);
    qn:=qq(fi,xi);

end;

```

(Solución gráfica)

```

if i<1000 then
begin
    if ii=0 then
    begin
        aa1:=115;
        aa2:=115;
        b2:=179;
        db1:=(xsm-xi)/121;
        inic:=xi;
        b1:=179;
        ii:=2;
        gotoxy(2,19);
        gotoxy(26,4);
        write('      X = ',aa2,'   Y = ',b2,'   Xc = ',xc:10:3);
        gotoxy(3,24);
        write(' Xm inic. ');
    end
    else
    begin
        aa2:=aa1+1;
        b2:=179-round((xi-inic)/db1);
        draw(aa1,b1,aa2,b2,1);
        gotoxy(26,4);
        write('      X = ',aa2,'   Y = ',b2,'   Xc = ',xc:10:3);
        aa1:=aa2;
        para:=para-1;
        if xi>xsm then
        begin

```

```

        gotoxy(round(aal/8),24);
        write(' Xc ( Cmin)');
        gotoxy(round(aal/8),25);
        write(xc:10:3);
        para:=20;
    end;
    b1:=b2;
end;

        writeln(textfile,'          ',xsm:10:3,' p.u. ',xi:10:3,' p.u. ',xc:8:4,' p.u. ');
        xc:=xc+Dc;
    end
    else writeln('el sistema es divergente');
until (i>1000) or (para=0) or (aa2>=615) or (xi>xsm);
repeat until keypressed ;
close(textfile);
textmode;
end.

procedure imprime(infi :string[80]);

begin
    assign(textfile,sl);
    {$i-} reset (textfile){$i+};
    ok:=(ioresult = 0);
    if (not ok) then
        begin
            gotoxy(i,j);
            write('Archivo no existente');
        end;
    if ok then
        begin
            repeat
                readln(texto,sttr);
                writeln(lst,sttr);
            until sttr='FIN';
        end;
    end;
end;

```

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Hay que diferenciar el comportamiento del generador de inducción cuando este trabaja en paralelo a la red pública (barra infinita) y cuando trabaja como un sistema aislado.

Cuando trabaja conectado a una barra infinita ofrece algunas ventajas sobre el generador síncrono convencional:

- No tiene efecto sobre la frecuencia del sistema.
- No tiene efecto sobre el voltaje del sistema.
- No necesita equipo de sincronización para conectarse a la red.
- No necesita una fuente de voltaje D.C. para su excitación.
- El control y los dispositivos de protección son básicamente los mismos que para un motor.
- No puede contribuir con corriente de cortocircuito en una falla del sistema.
- Tiende a amortiguar cualquier armónica no deseada en la forma de onda del voltaje del sistema.
- Su rotor, sin escobillas (Jaula de ardilla), es el más simple y de construcción más robusta de cualquier máquina eléctrica.
- Fácilmente disponibles a 3600 o 1800 r.p.m. para

capacidades desde 100 a 1000 KW.

-Reducido costo de la unidad.

-Fácil mantenimiento.

Los generadores de inducción, cuando trabajan conectados a una barra infinita, ha sido solicitados particularmente en instalaciones hidroeléctricas de capacidades relativamente pequeñas en donde algunas máquinas pueden ser instaladas para abarcar la capacidad total. En esta forma, el número de máquinas en operación puede ser variada dependiendo de las condiciones de agua para que cada máquina sea operada a plena carga todo el tiempo. La localización ideal de la planta es donde se requieren capacidades pico, en un punto del sistema donde hay disponible suficiente reactivos que provean la excitación del generador.

La utilización del generador de inducción, cuando trabaja como un sistema aislado, se ha desarrollado debido a los enfatizados cambios sobre los problemas de la energía, adquiriendo gran importancia debido al desarrollo de primo motores movidos por fuentes de energía no-convencionales tales como el viento, el mar, biogas, etc.. Sumándosele a esto el desarrollo de convertidores de energía estáticos, lo que facilita el control de generadores auto-excitados en término de frecuencia y voltaje de salida.

De la experiencia del presente trabajo se sugieren las siguientes recomendaciones:

Si un capacitor terminal $C=C_{\min}$ se utiliza y el generador se arranca partiendo del reposo, el voltaje terminal puede que no crezca para cada caso. Por esto, en la práctica, el capacitor terminal C deberá tener un valor algo mayor que C_{\min} para asegurar la auto-excitación.

El método para arrancar puede variar de una instalación a otra, sin embargo usando los métodos descritos en la sección 2.1.3, la confiabilidad de arrancar puede ser muy alta.

Finalmente se recomienda que este trabajo sea continuado con el desarrollo de un control en términos de frecuencia y voltaje de salida con la ayuda de convertidores de energía estáticos.

A P E N D I C E " A "

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS

1. DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA.-

Este sistema tiene por objetivo realizar los cálculos necesarios para estudiar el comportamiento del generador de inducción, en estado estable, obteniendo resultados a través de las ecuaciones 2.20, y mediante la aplicación de la técnica analítica explicada en la sección 2.2.

Al igual que en el sistema desarrollado en el capítulo tres, el lenguaje utilizado para la codificación es el PASCAL, debido a la estructuración y a las ventajas que presta por ser un lenguaje aplicable para la programación de tipo científico.

Lo que se ha querido conseguir con el sistema es facilitar al usuario la realización de los cálculos que con lleva al estudio del comportamiento del generador de inducción auto-excitado, cuando opera como una unidad aislada.

2. ANALISIS DETALLADO

Se requiere cargar el programa TURBO PASCAL en un

computador con un sistema operativo DOS.

El programa se denomina ANALIS y se requiere ingresar por pantalla los valores de los parámetros de la máquina de inducción y de la carga, en por unidad, por fase y en el siguiente orden:

Resistencia del estator (R_e)

Resistencia del rotor (R_r)

Reactancia del estator y rotor ($X_{le}=X_{lr}=X_l$)

Resistencia de carga máxima ($1/b_{lmin}$)

Corresponde al valor de conductancia de carga mínima del rango de carga en estudio.

Resistencia de carga mínima ($1/b_{lmax}$)

Corresponde al valor de conductancia de carga máxima del rango de carga en estudio.

Delta b_l

Corresponde al tamaño con que se desea dividir el rango de carga en estudio.

Reactancia capacitiva (X_c)

Corresponde al valor de la reactancia capacitiva en paralelo y por fase que se conecta al generador.

Reactancia magnetizante (X_m)

Corresponde a un valor inicial supuesto, para resolver las ecuaciones (2.12) y (2.13) por el método de Newton-Raphson. Como X_m es menor que la no saturada, $X_{mo} = \text{no saturada}$.

Velocidad (v)

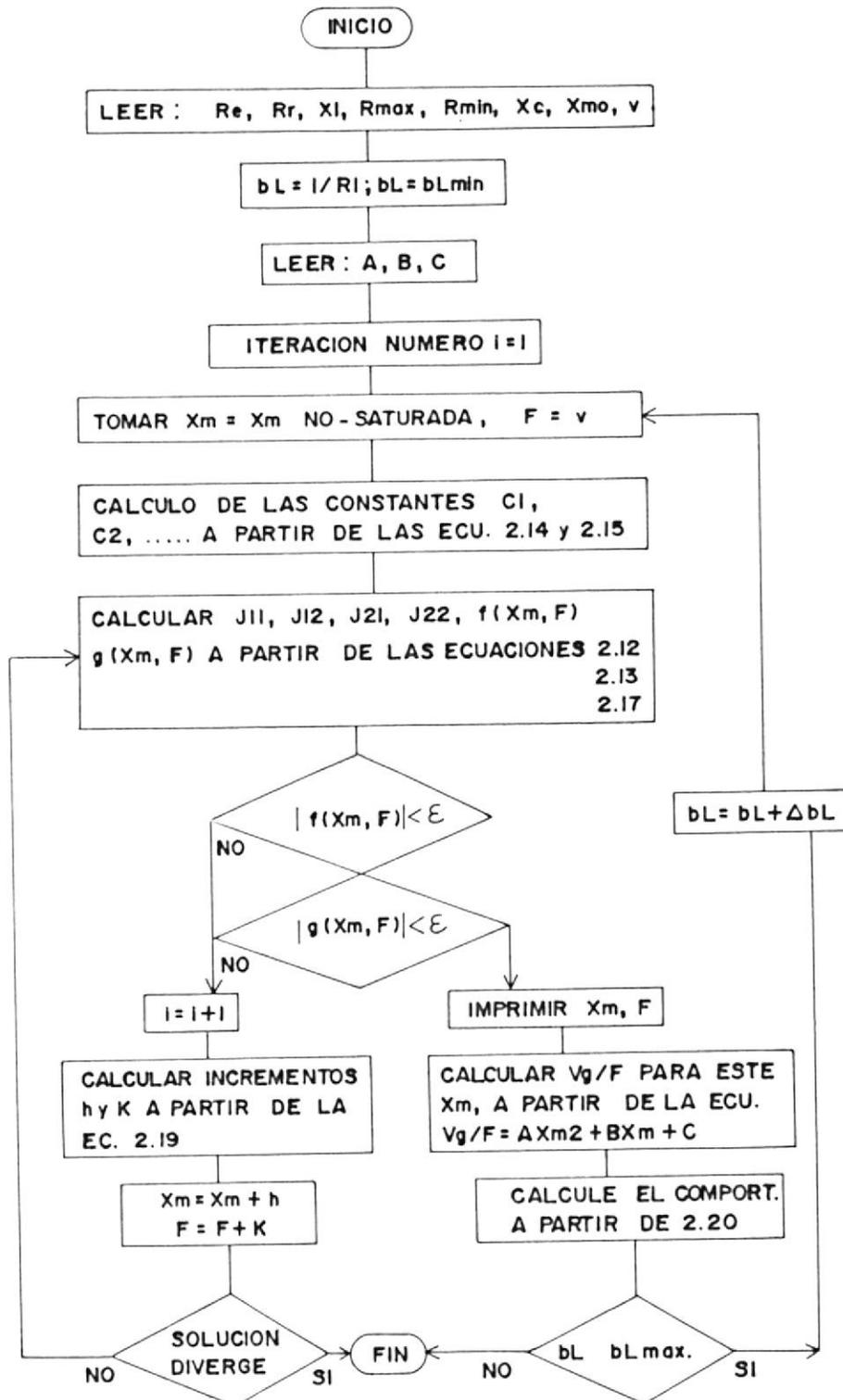
Además, será necesario el ingreso de las constantes que integran el modelo matemático que relaciona el voltaje en el entre-hierro (V_g/F) con la reactancia magnetizante X_m , modelo obtenido a partir de los datos de la prueba de velocidad síncrona (sección 3.1 y apéndice B).

El programa considera que el modelo obtenido es un polinomio de segundo orden, de la forma $V_g/F = A X_m^2 + B X_m + C$, por lo que los valores de las constantes a ingresar son A, B y C.

Luego el programa pide un nombre para el archivo de salida, donde almacenará los resultados.

Al finalizar el proceso de ingreso de datos, es posible rectificar todos o algunos de ellos.

3. DIAGRAMA DE FLUJO



4. LISTADO DEL PROGRAMA

```
program analisis;
```

```
{ Definición de Constantes }
```

```
const
  puntos=10;
  eps=0.0001;
  f=60;
  q=3;
```

```
{ Definición de tipos }
```

```
type
  valor=array[1..puntos] of real;
```

```
{ Definición de Variables }
```

```
var
  textfile:text;
  s1,s2,s3,s4:string[80];
  c1,c2,c3,c4,c5,c6,c7,c8,d1,d2,d3,d4,d5:real;
  birr,beta,delta,dirr,bill,dill,xi,fi,vf,
  bvt,dvt,bpi,dpi,bl:valor;
  z,i,j,k,l,vel:integer;
  alfa,rr,Db,blmax,r1,x1,xc,rs,
  fn,gn,xmo,aa,bb,cc,fo,x,a,b,c,d:real;
  cont:real;
  opci:char;
```

```
{Ecuaciones simultaneas no-lineales f y g, en Función de F y Xm, ecs. (2.12) y (2.13)}
```

```
function ff(f,xm:valor):real;
begin
```

```
ff:=((c1*xm[z]+c2)*f[z]*f[z]*f[z])+((c3*xm[z]+c4)*f[z]* f[z])+((c5 *xm[z]+c 6)*f[z])+((c7*xm[z]+c8);
end;
```

```
function gg(f,xm:valor):real;
begin
```

```
gg:=((d1*xm[z]+d2)*f[z]*f[z])+((d3*xm[z]+d4)*f[z])+((d5) ;
end;
```

```
{Matriz Jacobiano}
```

```
function j11(f:valor):real;
begin
```

```
j11:=(c1*f[z]*f[z]*f[z])+((c3*f[z]*f[z])+((c5*f[z])+c7;
```

```

end;

function j12(f,xm:valor):real;
begin
j12:=(3*(c1*xm[z]+c2)*f[z]*f[z])+(2*(c3*xm[z]+c4)*f[z]) +(c5*xm[z] +c6);
end;

function j21(f:valor):real;
begin
j21:=(d1*f[z]*f[z])+(d3*f[z]);
end;

function j22(f,xm:valor):real;
begin
j22:=(2*(d1*xm[z]+d2)*f[z])+(d3*xm[z]+d4);
end;

Procedure pscreen(bbl,xxi,ffi,vgf,bet,del:valor);
begin
gotoxy(5,z+5);
write(bbl[z]:4:3,' ',xxi[z]:4:3,' ',ffi[z]:4:3,' ',vgf[z]:4:3,' ',bet[z]:4:3,
'+j(',del[z]:4:3,')')
end;

procedure printer(bbl,bir,dir,bil,dil,bt,dt:valor);
begin
gotoxy(3,z+5);
write(' ',bbl[z]:4:3,' ',bir[z]:4:3,'+j(',dir[z]:4:3,')',' ',bil[z]:4:3,'+j(',dil[z]:4:3,')',' ',
bt[z]:4:3,'+j(',dt[z]:4:3,')')
end;

procedure ppout(bbl,pin,pout:valor);
begin
gotoxy(3,z+5);
write(' ',bbl[z]:4:3,' ',pin[z]:4:3,' ',pout[z]:4:3);
end;

procedure encera(xxi,ffi,vgf,bet,del,bir,dir,bil,dil,
bt,dt,bi,di:valor);
begin
for z:=1 to puntos do
begin
xxi[z]:=0;ffi[z]:=0;bet[z]:=0;del[z]:=0;
bir[z]:=0;dir[z]:=0;bil[z]:=0;dil[z]:=0;
bt[z]:=0;dt[z]:=0;bi[z]:=0;di[z]:=0;
end
end;
end;

```

{ Programa Principal }

begin

```

textbackground(11);
textcolor(15);
clrscr;
textbackground(0);
window(15,2,65,23);
clrscr;
window(15,2,65,24);
s1:='-';
for i:=1 to 80 do
s1:=concat(s1,'-');
gotoxy(1,1);
writeln('┌',copy(s1,1,47),'┐');
for i:=1 to 20 do
begin
gotoxy(2,i+1);
write('|');
gotoxy(50,i+1);
write('|');
end;
gotoxy(1,22);
write('└',copy(s1,1,47),'┘');
gotoxy(12,5);
write('PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA');
gotoxy(4,7);
write('ESTUDIAR EL COMPORTAMIENTO EN ESTADO ESTABLE');
gotoxy(4,9);
write('          DEL GENERADOR DE INDUCCION ');
gotoxy(5,15);
write('Tesis de Grado de:');
gotoxy(10,17);
write('ARTURO DAVID PEREZ ROLANDO');
cont:=0;
repeat
cont:=cont+0.25
until cont=15000;
window(1,1,80,25);
textbackground(11);
textcolor(15);
clrscr;

```

{ Ingreso de parámetros de la máquina de inducción y datos de carga }

```

textbackground(1);
gotoxy(54,2);
write('┌',copy(s1,1,24),'┐');
gotoxy(54,3);
write('|  DATOS DE ENTRADA  |');

```



```

gotoxy(54,4);
write(' | ');
gotoxy(54,5);
write(' | Ingrese los siguientes | ');
gotoxy(54,6);
write(' | datos en por unidad: | ');
gotoxy(54,7);
writeln(' L',copy(sl,1,24),' | ');
window(2,2,52,23);
clrscr;
window(2,2,52,24);

gotoxy(1,1);
writeln(' L',copy(sl,1,47),' | ');
for i:=1 to 20 do
begin
gotoxy(2,i+1);
write(' | ');
gotoxy(50,i+1);
write(' | ');
end;
gotoxy(1,22);
write(' L',copy(sl,1,47),' | ');
gotoxy(5,4);
write('Resistencia del Estator ( Re )');
gotoxy(5,6);
write('Resistencia del Rotor ( Rr )');
gotoxy(5,8);
write('Reactancia Est./Rotor (Xle=Xlr)');
gotoxy(5,10);
write('Res. de Carga max. ( 1/bL mín )');
gotoxy(5,12);
write('Res. de Carga min. ( 1/bL máx )');
gotoxy(5,14);
write('Reactancia Capacitiva ( Xc )');
gotoxy(5,16);
write('Reactancia Magnetizante ( Xmo )');
gotoxy(5,18);
write('Velocidad ( v )');
repeat
repeat
{ $i- }
gotoxy(40,4);
readln(rs);
{ $i+ }
until ioreult=0;
repeat
{ $i- }
gotoxy(40,6);
readln(rr);

```

```

    {$i+}
until ioresult=0;
repeat
    {$i-}
    gotoxy(40,8);
    readln(xl);
    {$i+}
until ioresult=0;
repeat
    {$i-}
    gotoxy(40,10);
    readln(rl);
    {$i+}
until ioresult=0;
repeat
    {$i-}
    gotoxy(40,12);
    readln(alfa);
    {$i+}
until ioresult=0;
repeat
    {$i-}
    gotoxy(40,14);
    readln(xc);
    {$i+}
until ioresult=0;
repeat
    {$i-}
    gotoxy(40,16);
    readln(xmo);
    {$i+}
until ioresult=0;
repeat
    {$i-}
    gotoxy(40,18);
    readln(vel);
    {$i+}
until ioresult=0;

opci:='n';
gotoxy(3,20);
write(' ');
gotoxy(3,20);
write('Desea corregir algún valor? (S/N) ==> ');
readln(opci);
gotoxy(3,20);
write(' ');
until opci='n';
bl[1]:=1/rl;           {Cálculo de conductancia mínima}
bLmax:=1/alfa;       {Cálculo de conductancia máxima}

```

```
Db:=(bLmax-bl[1])/puntos; {Cálculo de delta}
```

```
window(54,8,79,17);
clrscr;
```

{Ingreso de las constantes para el polinomio de segundo orden que relaciona el voltaje en el entre-hierro V_g/F con la reactancia magnetizante X_m }

```
window(54,8,80,24);
writeln(' ',copy(s1,1,24),' ');
writeln(' Aproximación Polinomial ');
writeln(' de la variación del ');
writeln(' voltaje en el entre- ');
writeln(' hierro con respecto ');
writeln(' a la reactancia ');
writeln(' magnetizante ');
writeln(' ');
writeln('  $V_g/F = A X_m^2 + B X_m + C$  ');
writeln(' ',copy(s1,1,24),' ');
gotoxy(4,10);
write(' A = ');
gotoxy(4,11);
write(' B = ');
gotoxy(4,12);
write(' C = ');
repeat
  repeat
    {$i-}
    gotoxy(14,10);
    readln(aa);
    {$i+}
  until ioread=0;
  repeat
    {$i-}
    gotoxy(14,11);
    readln(bb);
    {$i+}
  until ioread=0;
  repeat
    {$i-}
    gotoxy(14,12);
    readln(cc);
    {$i+}
  until ioread=0;
```

```

gotoxy(2,14);
write(' ');
gotoxy(2,14);
write('Corregir? (s/n) ');
readln(opci);
gotoxy(2,14);
write(' ');
until opci='n';

gotoxy(3,13);
write('Salida : ');
readln(s1);

assign(textfile,s1);
rewrite(textfile);
writeln(textfile);
writeln(textfile,' PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA');
writeln(textfile,' ESTUDIAR EL COMPORTAMIENTO EN ESTADO ESTABLE');
writeln(textfile,' DEL GENERADOR DE INDUCCION ');
writeln(textfile);
writeln(textfile,' *** DATOS DE ENTRADA ***');
writeln(textfile);
writeln(textfile,' Resistencia del Estator ( Re ) = ',rs:10:3);
writeln(textfile,' Resistencia del Rotor ( Rr ) = ',rr:10:3);
writeln(textfile,' Reactancia Est./Rotor (Xle=Xlr) = ',xl:10:3);
writeln(textfile,' Res. de Carga máx. ( 1/bL min ) = ',rl:10:3);
writeln(textfile,' Res. de Carga mín. ( 1/bL máx ) = ',alfa:10:3);
writeln(textfile,' Delta bL = ',Db:10:3);
writeln(textfile,' Reactancia Capacitiva ( Xc ) = ',xc:10:3);
writeln(textfile,' Reactancia Magnetizante ( Xmo ) = ',xmo:10:3);
writeln(textfile,' Velocidad ( v ) = ',vel:10);
writeln(textfile);
writeln(textfile);
writeln(textfile);
writeln(textfile,' Vg/F = A Xm^2 + B Xm + C ');
writeln(textfile);
writeln(textfile,' A = ',aa:10);
writeln(textfile,' B = ',bb:10);
writeln(textfile,' C = ',cc:10);
writeln(textfile);

encera(xi,fi,vf,beta,delta,birr,dirr,bill,dill,
      bvt,dvt,bpi,dpi);

z:=0;

repeat

```

```

z:=z+1;
r1:=1/bl[z];

c1:=-2*xl*r1;
c2:=-xl*xl*r1;
c3:=2*xl*r1;
c4:=xl*xl*r1;
c5:=xc*(r1+rs+rr);
c6:=xc*xl*(r1+rs+rr);
c7:=-xc*(rs+r1);
c8:=-xl*xc*(rs+r1);

d1:=(2*xl*xc)+r1*(rs+rr);
d2:=(r1*xl*(rs+rr))+(xl*xl*xc);
d3:=rs*r1+(2*xl*xc);
d4:=-xl*(rs*r1+(xl*xc));
d5:=-xc*rr*(r1+rs);

i:=1;

xi[z]:=xno;
fi[z]:=vel;

fn:=ff(fi,xi);
gn:=gg(fi,xi);

while ((abs(fn)>eps) or (abs(gn)>eps)) and (i<1000)
begin

a:=j11(fi);
b:=j12(fi,xi);
c:=j21(fi);
d:=j22(fi,xi);

delta[z]:=(a*d)-(b*c);
alfa:=(b*gn-(fn*d))/delta[z];
beta[z]:=(fn*c-(a*gn))/delta[z];

xi[z]:=xi[z]+alfa;
fi[z]:=fi[z]+beta[z];
i:=i+1;

fn:=ff(fi,xi);
gn:=gg(fi,xi);

end;

if i<1000 then
begin

```

```

window(1,1,80,25);
textbackground(15);
textcolor(15);
clrscr;
textbackground(1);
window(2,2,79,23);
clrscr;

vf[z]:=(aa*xi[z]*xi[z])+(bb*xi[z])+cc;

{ Cálculo de las ecuaciones 2.20 }

a:=fi[z]*fi[z]*fi[z];
b:=fi[z]*fi[z];
alfa:=((fi[z]*rl*rs+(fi[z]*xc*xl))*(fi[z]*rl*rs+(fi[z]*xc*xl))); alfa:=vf[z]/(alfa+((b*xl*rl-(rs*xc)-
(xc*rl))*(b*xl*rl-(rs*xc)-(xc*rl)))); beta[z]:=(a*rl*rl*rs+(a*rl*xc*xl)-
(a*xl*xc*rl)+(fi[z]*xc*xc*rs)+(fi[z]*xc*xc*rl)); delta[z]:=(b*rl*rs*xc+(b*xc*xc*xl)+(a*fi[z]*xl*rl*rl)-(b*rl*rs*xc)-(b*rl*rl*xc));
beta[z]:=alfa*beta[z];
delta[z]:=alfa*delta[z];
alfa:=vf[z]/((rr/(fi[z]-vel))*(rr/(fi[z]-vel))+xl*xl);
birr[z]:=-rr/(fi[z]-vel)*alfa;
dirr[z]:=alfa*xl;
alfa:=xc/((rl*fi[z])*(rl*fi[z]))+(xc*xc);
bill[z]:=alfa*(beta[z]*xc+(delta[z]*rl*fi[z]));
dill[z]:=alfa*(delta[z]*xc-(rl*fi[z]*beta[z]));
bvt[z]:=bill[z]*rl;
dvt[z]:=dill[z]*rl;
bpi[z]:=-q*(birr[z]*birr[z]+dirr[z]*dirr[z])*rr*fi[z]/(fi[z]-vel);
dpi[z]:=q*(bill[z]*bill[z]+dill[z]*dill[z])*rl;

bl[z+1]:=bl[z]+Db;

end
else writeln('el sistema es divergente');
until ((bl[z]-Db)>blmax) or (i>1000);

{ PRIMERA TABLA }

clrscr;
gotoxy(2,2);
write('CONDUCTANCIA REACTANCIA FRECUENCIA VOLTAJE DEL CORRIENTE');
gotoxy(2,3);
write(' DE CARGA MAGNET. ENTREHIERRO ESTATOR');
gotoxy(2,4);
writeln(' (p.u.) (p.u.) (p.u.) (p.u.) (p.u.)');

for z:=1 to puntos do
  pscreen(bl,xi,fi,vf,beta,delta); { Presentación de la primera tabla de }
  { valores }

```

```

gotoxy(5,20);
write('Presione cualquier tecla para continuar');
repeat until keypressed;

{ Guardando Resultados en el Archivo de Salida }
writeln(textfile);
writeln(textfile);
writeln(textfile,'CONDUCTANCIA REACTANCIA FRECUENCIA VOLTAJE DEL CORRIENTE');
writeln(textfile,' DE CARGA MAGNET. ENTREHIERRO ESTATOR');
writeln(textfile,' (p.u.) (p.u.) (p.u.) (p.u.) (p.u.)');
writeln(textfile);
for z:=1 to puntos do
  writeln(textfile,' ',bl[z]:4:3,' ',xi[z]:4:3,' ',fi[z]:4:3,' ',vf[z]:4:3,' ',beta[z]:4:3,
'+j(',delta[z]:4:3,')');
writeln(textfile);
writeln(textfile);

{ SEGUNDA TABLA }
clrscr;
gotoxy(2,2);
write('CONDUCTANCIA CORRIENTE CORRIENTE VOLTAJE');
gotoxy(2,3);
write(' DE CARGA ROTOR DE CARGA TERMINAL');
gotoxy(2,4);
write(' (p.u.) (p.u.) (p.u.) (p.u.)');

for z:=1 to puntos do
  printer(bl,birr,dirr,bill,dill,bvt,dvt); { Presentación de la segunda }
                                         { tabla de valores }

gotoxy(5,20);
write('Presione cualquier tecla para continuar');
repeat until keypressed;

{ Guardando Resultados en el Archivo de Salida }
writeln(textfile);
writeln(textfile);
writeln(textfile,'CONDUCTANCIA CORRIENTE CORRIENTE VOLTAJE');
writeln(textfile,' DE CARGA ROTOR DE CARGA TERMINAL');
writeln(textfile,' (p.u.) (p.u.) (p.u.) (p.u.)');
writeln(textfile);
for z:=1 to puntos do
  writeln(textfile,' ',bl[z]:4:3,' ',birr[z]:4:3,'+j(',dirr[z]:4:3,')',
',bill[z]:4:3,'+j(',dill[z]:4:3,')',', ',bvt[z]:4:3,'+j(',dvt[z]:4:3,')');
writeln(textfile);
writeln(textfile);

{ TERCERA TABLA }
clrscr;
gotoxy(2,2);

```

```

write('CONDUCTANCIA      POTENCIA DE      POTENCIA DE');
gotoxy(2,3);
write(' DE CARGA          ENTRADA          SALIDA');
gotoxy(2,4);
write(' (p.u.)            (p.u.)          (p.u.)');
  for z:=1 to puntos do
    ppout(bl,bpi,dpi);

  gotoxy(5,20);
  write('Presione cualquier tecla para continuar');
  repeat until keypressed;

writeln(textfile,'CONDUCTANCIA      POTENCIA DE POTENCIA DE');
writeln(textfile,' DE CARGA          ENTRADA SALIDA');
writeln(textfile,' (p.u.)            (p.u.) (p.u.)');
writeln(textfile);
  for z:=1 to puntos do
    writeln(textfile,' ',bl[z]:4:3,' ',bpi[z]:4:3,' ',dpi[z]:4:3);

clrscr;
close(textfile);
end.

```

```

procedure imprime(infi :string[80]);

```

```

begin
  assign(textfile,sl);
  {%i-} reset (textfile){%i+};
  ok:=(ioresult = 0);
  if (not ok) then
    begin
      gotoxy(i,j);
      write('Archivo no existente');
    end;
  if ok then
    begin
      repeat
        readln(texto,sttr);
        writeln(lst,sttr);
      until sttr='FIN';
    end;
end;

```

PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA
ESTUDIAR EL COMPORTAMIENTO EN ESTADO ESTABLE
DEL GENERADOR DE INDUCCION
(Ag/12/92)

*** DATOS DE ENTRADA ***

Resistencia del Estator (Re)	=	0.062
Resistencia del Rotor (Rr)	=	0.070
Reactancia Est./Rotor (Xle=Xlr)	=	0.093
Res. de Carga máx. (1/bL mín)	=	1.890
Res. de Carga mín. (1/bL máx)	=	0.940
Delta bL	=	0.053
Reactancia Capacitiva (Xc)	=	1.312
Reactancia Magnetizante (Xmo)	=	2.180
Velocidad (v)	=	1

$$Vg/F = A X_m^2 + B X_m + C$$

A	=	-1.950E-01
B	=	1.4900E-01
C	=	1.3740E+00

CONDUCTANCIA DE CARGA (p.u.)	REACTANCIA MAGNET. (p.u.)	FRECUENCIA (p.u.)	VOLTAJE DEL ENTREHIERRO (p.u.)	CORRIENTE ESTATOR (p.u.)
0.529	0.210	0.961	1.397	0.824+j(-0.938)
0.583	0.201	0.958	1.396	0.894+j(-0.916)
0.636	0.192	0.954	1.395	0.962+j(-0.894)
0.690	0.185	0.951	1.395	1.029+j(-0.871)
0.743	0.178	0.948	1.394	1.094+j(-0.849)
0.796	0.171	0.944	1.394	1.159+j(-0.826)
0.850	0.166	0.941	1.393	1.222+j(-0.803)
0.903	0.160	0.938	1.393	1.284+j(-0.781)
0.957	0.156	0.935	1.392	1.345+j(-0.758)
1.010	0.151	0.932	1.392	1.405+j(-0.735)

CONDUCTANCIA DE CARGA (p.u.)	CORRIENTE ROTOR (p.u.)	CORRIENTE DE CARGA (p.u.)	VOLTAJE TERMINAL (p.u.)
0.529	0.769+j(0.039)	-0.163+j(-0.713)	-0.308+j(-1.347)
0.583	0.838+j(0.047)	-0.099+j(-0.792)	-0.170+j(-1.360)
0.636	0.906+j(0.055)	-0.026+j(-0.864)	-0.041+j(-1.358)
0.690	0.973+j(0.063)	0.054+j(-0.928)	0.078+j(-1.345)
0.743	1.039+j(0.072)	0.139+j(-0.983)	0.187+j(-1.323)
0.796	1.103+j(0.082)	0.227+j(-1.031)	0.285+j(-1.295)
0.850	1.166+j(0.091)	0.318+j(-1.072)	0.374+j(-1.261)
0.903	1.228+j(0.101)	0.410+j(-1.105)	0.454+j(-1.223)
0.957	1.289+j(0.112)	0.503+j(-1.132)	0.525+j(-1.183)
1.010	1.349+j(0.123)	0.595+j(-1.153)	0.589+j(-1.141)

CONDUCTANCIA DE CARGA (p.u.)	POTENCIA DE ENTRADA (p.u.)	POTENCIA DE SALIDA (p.u.)
0.529	3.096	3.031
0.583	3.362	3.281
0.636	3.620	3.523
0.690	3.872	3.756
0.743	4.117	3.982
0.796	4.355	4.199
0.850	4.587	4.410
0.903	4.814	4.613
0.957	5.034	4.810
1.010	5.249	5.000

A P E N D I C E " B "

OBTENCION DE UN MODELO CON EL CUAL SE RELACIONA EL VOLTAJE EN EL ENTREHIERRO (Vg/F),
EN FUNCION DE LA REACTANCIA MAGNETIZANTE (Xm).

Modelo escogido: $Vg/F (Xm) = a Xm^2 + b Xm + c$

Variabes: Dependiente ==> Vg/F (efecto)
Independiente ==> Xm (causa)

Datos experimentales (n): 9 (De los 14 datos sólo se toman los 9 que se encuentran en la zona de saturación magnética).

Dato #	Volt.Entreh Vg/F(p.u.)	Reac.Ma. Xm(p.u.)	Xm ⁴	Xm ³	Xm ²	Vg/F*Xm ²	Vg/F*Xm	Vg/F calc.
1	0,75	0,68	0,22	0,32	0,47	0,35	0,51	0,82
2	0,88	0,67	0,20	0,30	0,45	0,40	0,59	0,85
3	0,93	0,65	0,18	0,28	0,43	0,40	0,61	0,89
4	0,98	0,62	0,15	0,24	0,39	0,38	0,61	0,96
5	1,05	0,57	0,11	0,19	0,33	0,35	0,60	1,05
6	1,12	0,51	0,07	0,13	0,26	0,29	0,57	1,14
7	1,20	0,43	0,04	0,08	0,19	0,23	0,52	1,21
8	1,22	0,42	0,03	0,07	0,17	0,21	0,51	1,22
9	1,25	0,36	0,02	0,05	0,13	0,16	0,45	1,24
Sumatoria	9,38	4,93	1,01	1,67	2,82	2,76	4,98	9,38

$$\begin{array}{r}
 \begin{array}{ccc|ccc}
 \text{Sum } Xm^4 & \text{Sum } Xm^3 & \text{Sum } Xm^2 & : & : & a & : & \text{Sum } (Vg/F * Xm^2) & : \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & & \vdots & & \vdots & \\
 \text{Sum } Xm^3 & \text{Sum } Xm^2 & \text{Sum } Xm & : & : & b & : & \text{Sum } (Vg/F * Xm) & : \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & & \vdots & = & \vdots & \\
 \text{Sum } Xm^2 & \text{Sum } Xm & n & : & : & c & : & \text{Sum } Vg/F & : \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & & \vdots & & \vdots &
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 \det. &= 0,000738692 & a' &= -0,00275 \\
 & & b' &= 0,001931 \\
 & & c' &= 0,000574
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a &= a' / \det. = -3,732083 \\
 b &= b' / \det. = 2,6143617 \\
 c &= c' / \det. = 0,7782128
 \end{aligned}$$

$$Vg/F(Xm) = -3,732 Xm^2 + 2,614 Xm + 0,778 \quad (3.26)$$

E J E M P L O

OBTENCION DE UN MODELO CON EL CUAL SE RELACIONA EL VOLTAJE EN EL ENTREHIERRO (V_q/F),
EN FUNCION DE LA REACTANCIA MAGNETIZANTE (X_m),
(Datos de la máquina para ejemplo del Apéndice A)

Modelo escogido: $V_q/F(X_m) = a X_m^2 + b X_m + c$

Variabes: Dependiente ==> V_q/F (efecto)
Independiente ==> X_m (causa)

Datos experimentales (n): 12 puntos que se encuentran en la zona de saturación magnética.

Dato #	Volt.Entreh. Vq/F(p.u.)	Reac.Maq. Xm(p.u.)	X_m^4	X_m^3	X_m^2	$V_q/F \cdot X_m^2$	$V_q/F \cdot X_m$	V_q/F calc.
1	0,74	2,14	20,87	9,76	4,57	3,39	1,59	0,80
2	0,82	2,10	19,38	9,24	4,40	3,60	1,71	0,83
3	0,92	2,05	17,61	8,60	4,20	3,86	1,88	0,86
4	0,99	1,90	13,10	6,88	3,62	3,57	1,88	0,95
5	1,05	1,74	9,24	5,30	3,04	3,20	1,84	1,04
6	1,14	1,55	5,83	3,75	2,41	2,75	1,77	1,14
7	1,21	1,33	3,14	2,36	1,77	2,15	1,61	1,23
8	1,24	1,27	2,63	2,07	1,62	2,01	1,58	1,25
9	1,27	1,13	1,60	1,43	1,27	1,61	1,43	1,30
10	1,30	1,02	1,08	1,06	1,04	1,36	1,33	1,32
11	1,35	0,95	0,82	0,86	0,91	1,22	1,28	1,34
12	1,39	0,90	0,65	0,72	0,80	1,12	1,24	1,35
Sumatoria	13,42	16,08	95,96	52,03	29,65	29,83	19,14	13,42

$$\begin{array}{l}
 \left\{ \begin{array}{l} \text{Sum } X_m^4 \\ \text{Sum } X_m^3 \\ \text{Sum } X_m^2 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} a \\ b \\ c \end{array} \right. = \left\{ \begin{array}{l} \text{Sum } (V_q/F \cdot X_m^2) \\ \text{Sum } (V_q/F \cdot X_m) \\ \text{Sum } V_q/F \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\text{det.} = 6,424398623 \quad a' = -1,25215$$

$$b' = 0,959670$$

$$c' = 8,830691$$

$$a = a' / \text{det.} = -0,194905$$

$$b = b' / \text{det.} = 0,1493790$$

$$c = c' / \text{det.} = 1,3744618$$

$$V_q/F(X_m) = -0,195 X_m^2 + 0,149 X_m + 1,374$$

B I B L I O G R A F I A

1. Michael Liwschitz - Garik Clyde C. Whipple
"Máquinas de Corriente Alterna"
2. Fitzgerald, Kingsley, Umans "Electric Machinery"
3. G. Raina and O. P. Malik "Wind Energy Conversion Using a Self-Excited Induction Generator", (IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-102, No. 12, Diciembre 1.983).
4. A. K. Tandon, S.S. Murthy and G.J. Berg "Steady State Analysis of Capacitor Self-Excited Induction Generators" (IEEE Transactions on PAS. Vol. PAS-103, No. 3, marzo 1.984).
5. J.M. elder, J.T. boys and J.L. Woodward "The Process of Self-Excitation in Induction Generators" (IEEE PROC., Vol. 130, Pt. B, No 2, marzo de 1.983).
6. S.S. Yegna Narayanan and V.J. Johnny "Contributions to the Steady State Analysis of Wind-Turbine Driver Self-Excited Induction Generators" (IEEE Trans. on E.C., Vol. EC-1, No 1 March 1.986).
7. J.E. Barkle and B.W. Ferguson "Theory and

- Applications of induction Generators" (AIEE, Febrero 1.954).
8. William D. Bolin "Power Cost Reduction Using Small Induction Generators" (IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-20, No. 5, septiembre/octubre 1.984).
 9. N.H. Malik and A.A. Mazi "Capacitance Requirements for Self-Excited Induction Generators" (IEEE Trans. on E.C., Vol. EC-2, No. 1, March 1.987).
 10. Lahcene Ouazene and George McPherson, Jr. "Analysis of Isolated Induction Generators" (IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-102, No. 8 1.983).
 11. Z.M. Salameh and L.F. Kazda "Analysis of Steady State Performance of The Double Output Induction Generator" (IEEE Trans. on E.C., Vol. EC-1, No. 1, marzo 1.986).
 12. Jhon R. Parsons, Jr. "Cogeneration Application of Induction Generators" (IEEE Trans. on I.A., Vol. IA-20, No. 3, mayo/junio 1.984).
 13. TURBO PASCAL Reference Manual.