

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

Tesis previa a la obtención del Título de
Ingeniero Eléctrico

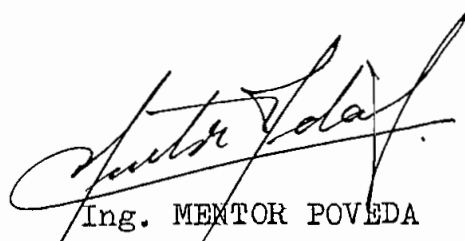
ANALISIS DIGITAL DE LA PERDIDA DE EXCITACION DE
LA MAQUINA SINCRONICA

JOSE R. LOPEZ GONZALEZ

Noviembre de 1979

Quito

Certifico que el presente trabajo
de Tesis ha sido realizado en su
totalidad por el señor JOSE LOPEZ
GONZALEZ.



Ing. MENTOR POVEDA
DIRECTOR DE TESIS

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

Al Sr. Ing. MENTOR POVEDA, Director de la presente Tesis, quien con sus valiosas indicaciones y sugerencias ha hecho posible la realización de este trabajo.

A las personas que forman el Departamento de Potencia, especialmente a quienes integran el área de MAQUINAS ELECTRICAS.

A los integrantes del Centro de Informática y Computación de la EPN, y en forma especial al buen amigo y compañero PATRICIO PROAÑO.

A todos GRACIAS

I N D I C E

<u>Contenido</u>	<u>Págs.</u>
INTRODUCCION	1
 <u>CAPITULO I: LA MÁQUINA SINCRÓNICA</u>	
1.1. Introducción	4
1.2. Ecuaciones de la máquina sincrónica	5
1.2.1. Ecuaciones de voltaje	6
1.2.2. Ecuaciones de las concatenaciones de flujo	8
1.2.3. Ecuaciones de las inductancias	9
1.3. Ecuaciones de la máquina sincrónica referidas al estator	12
1.4. Ecuaciones de la máquina sincrónica en la re- ferencia del rotor	18
1.4.1. La transformada de Park	18
1.4.2. Ecuaciones de las concatenaciones en los ejes q, d, o	21
1.4.3. Ecuaciones de voltajes en los ejes q, d, o	23
1.4.4. Ecuaciones de potencia y torque	26
1.5. Ecuaciones de la máquina sincrónica en por unidad	28

Contenido

Págs

CAPITULO II: OPERACION ASINCRONICA DE LA MAQUINA
SINCRONICA

2.1.	Introducción	34
2.2.	Comportamiento de la máquina sincrónica al perder la excitación	35
2.3.	Principio de funcionamiento de una máquina de <u>in</u> ducción	37

CAPITULO III: ANALISIS MATEMATICO DE LA OPERACION
ASINCRONICA

3.1.	Introducción	46
3.2.	Ecuaciones de voltaje, concatenaciones de flujo y corrientes en los ejes q, d, o	47
3.2.1.	Circuitos equivalentes de las reactancias opera- cionales en los ejes directo y en cuadratura ...	47
3.3.	Ecuaciones de corriente, potencias activa y reac- tiva	68
3.3.1.	Ecuación de corriente	68
3.3.2.	Ecuación de potencia activa	70
3.3.3.	Ecuación de potencia reactiva	72

<u>Contenido</u>	<u>Págs</u>
3.4. Estudio del campo	74
3.4.1. Corriente inducida en el campo cuando el bobinado de campo está cortocircuitado	74
3.4.2. Voltaje inducido en el campo cuando el bobinado de campo está en circuito abierto	77

CAPITULO IV: PROGRAMA DIGITAL

4.1. Descripción general del programa	81
4.2. Diagramas de flujo	84
4.3. Desarrollo de un ejemplo	91
4.3.1. Obtención de la constante H	91
4.3.2. Resultados	99
4.4. Comentarios sobre los resultados	112

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones	115
5.2. Recomendaciones	117

Contenido

Págs

ANEXOS

ANEXO A: Parámetros de la máquina sincrónica	118
ANEXO B: Manual de uso del programa	126
ANEXO C: Listados del programa	132
BIBLIOGRAFIA	136

ANALISIS DIGITAL DE LA

PERDIDA DE EXCITACION

DE UNA

MAQUINA SINCRONICA

INTRODUCCION

En la actualidad, las fallas que se presentan en los alternadores son pocas, como resultado, tanto de los diseños modernos, como por la calidad de los materiales empleados en su construcción.

No todas las fallas requieren necesariamente de la desconexión de la máquina, y esto es importante en un sistema de potencia, el cual tiene como uno de sus objetivos principales, el dar un servicio lo más continuo y confiable como sea posible. Este es el caso de la pérdida de excitación, que si bien es una falla que requiere la protección adecuada, no necesariamente implica la desconexión de la máquina. Desde éste punto de vista, es importante estudiar el comportamiento de la máquina sincrónica conectada a un sistema eléctrico de potencia cuando pierde su excitación. Este es el objetivo de la presente tesis.

La máquina sincrónica puede perder la excitación, ya sea debido a un circuito abierto o a un cortocircuito en el circuito de excitación. En éstas circunstancias, y bajo ciertas condiciones, la máquina sincrónica puede permanecer conectada al sistema de potencia, pero en éste caso, pasa a un es-

tado de funcionamiento asincrónico.

En primer término, se desarrollan las ecuaciones generales de la máquina sincrónica, y a partir de éstas, se realiza el análisis matemático que va a permitir obtener las condiciones de funcionamiento de la máquina en el modo asincrónico. Este análisis matemático, se basa en la suposición de un sistema cuasiestacionario, en el cual el deslizamiento se su
pone constante. Esta consideración, nos permite calcular para diferentes valores de deslizamiento, diferentes valores de potencias, corrientes, etc.; por lo que puede considerarse a este análisis matemático como un método de "punto por punto".

Cabe señalar, que durante la operación asincrónica, existen fluctuaciones de deslizamientos asociados con fluctuaciones de potencia, que dependen de las condiciones del sistema y de los parámetros de la máquina. En este caso, el análisis exacto del problema requiere la solución de las ecuaciones diferenciales no lineales. Sin embargo, la suposición de deslizamiento constante, hace posible obtener resultados con suficiente aproximación.

Finalmente, utilizando una de las máquinas sincrónicas existente en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la

Escuela Politécnica Nacional, se prueba el programa digital e laborado para estudiar la operación asincrónica de las máquinas sincrónicas.

C A P I T U L O I

LA MAQUINA SINCRONICA

1.1. INTRODUCCION

En una máquina sincrónica existe una relación constante entre la velocidad y la frecuencia de la línea o red de suministro de energía eléctrica.

Como toda máquina eléctrica, las máquinas sincrónicas son de funcionamiento reversible, y están excitados por una corriente que alimenta al arrollamiento de excitación desde una red de energía de continua, o desde una máquina d.c., llamada excitatriz.

La máquina sincrónica contiene en general cuatro bobinados básicos: tres bobinados del estator idénticos y distribuidos simétricamente a lo largo del estator, y un bobinado del rotor o bobinado de campo. Además de estos bobinados, comúnmente la máquina viene con arrollamientos amortiguadores alojados en el rotor.

El principio de funcionamiento de la máquina sincrónica es esencialmente el mismo que el de una máquina de corriente continua, con la diferencia que en la máquina sincrónica, no es necesario rectificar la fuerza electromotriz del inducido que es función del tiempo.

El objeto del presente capítulo, no es precisamente describir el funcionamiento cualitativo de la máquina sincrónica, sino por el contrario, tiene por objeto estudiar la máquina sincrónica desde el punto de vista matemático, de manera de poder predecir cuantitativamente el funcionamiento de la máquina. En base a esto, en primer lugar se deducirán las ecuaciones que describen el comportamiento de la máquina sincrónica para acción motora, y posteriormente se transformarán estas ecuaciones a una referencia en la cual, puedan eliminarse aquellas variables que dependen del tiempo, de manera que sean fácilmente manejables.

1.2. ECUACIONES DE LA MAQUINA SINCRONICA

Las ecuaciones generales de la máquina sincrónica, son desarrolladas en base a la máquina sincrónica elemental trifásica de dos polos indicada en la figura 1.1 y en la cual se han realizado las siguientes suposiciones:

1. Circuito magnético lineal.
2. Distribución uniforme de los bobinados del estator, así como, el establecimiento de una onda de fuerza magnetomotriz sinusoidal a lo largo del entrehierro.

3. Las ranuras del estator producen variaciones despreciables en las inductancias.

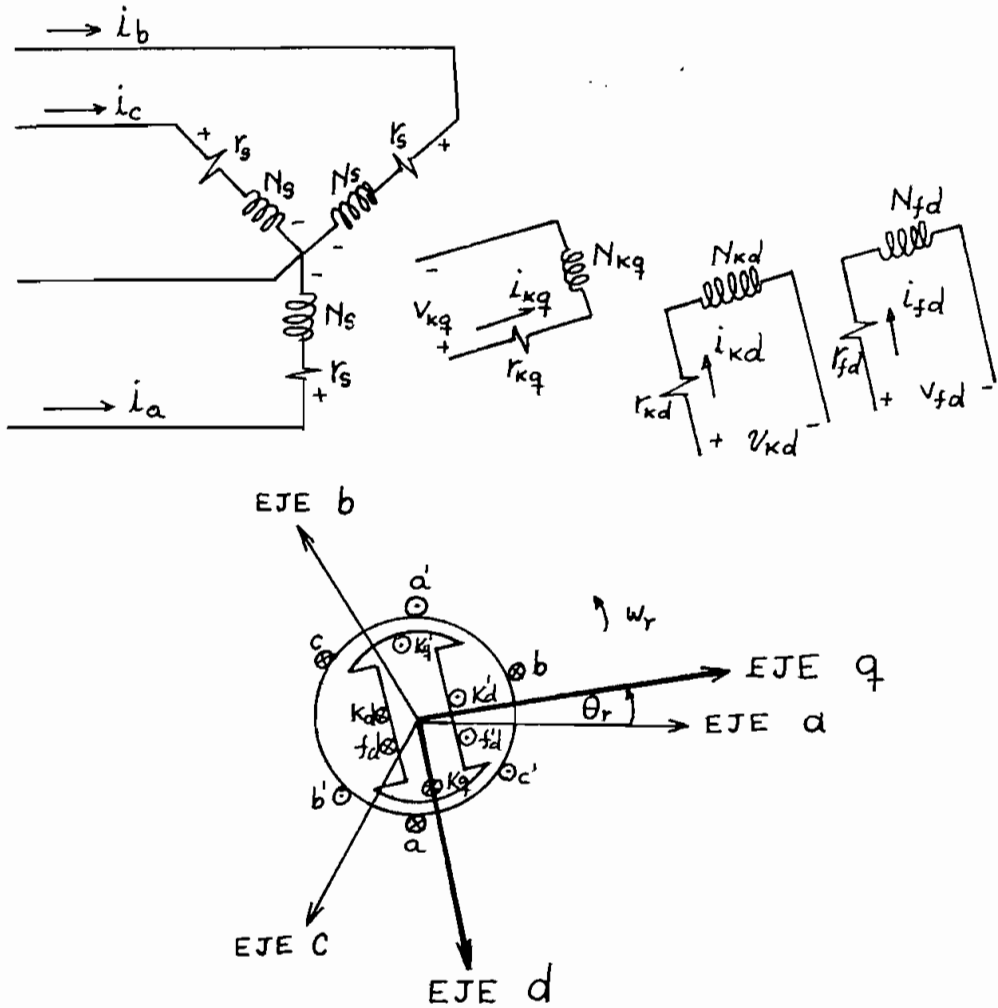


FIG. 1.1.

1.2.1. VOLTAJES (Bibl. 1,2,3)

A cada uno de los seis devanados de la figura 1.1 es aplicable la siguiente ecuación de voltaje.

$$v = ri + p\lambda \quad 1.1.$$

Donde:

v = voltaje de cada devanado.

r = resistencia total de cada devanado.

λ = concatenaciones totales de flujo.

p = operador $\frac{d}{dt}$

$$v_{as} = r_s i_{as} + p\lambda_{as}$$

$$v_{bs} = r_s i_{bs} + p\lambda_{bs}$$

$$v_{cs} = r_s i_{cs} + p\lambda_{cs}$$

$$v_{kq} = r_{kq} i_{kq} + p\lambda_{kq}$$

$$v_{kd} = r_{kd} i_{kd} + p\lambda_{kd}$$

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + p\lambda_{fd}$$

1.2

escribiendo 1.2. en notación matricial.

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \\ \hline v_{kq} \\ v_{kd} \\ v_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & | & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & | & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & | & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & r_{kq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 & r_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & r_{fd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ \hline i_{kq} \\ i_{kd} \\ i_{fd} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \\ \hline \lambda_{kq} \\ \lambda_{kd} \\ \lambda_{fd} \end{bmatrix} \quad 1.3$$

La ecuación matricial anterior puede escribirse de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} [v_s] \\ [v_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s] & [0] \\ [0] & [R_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} [\lambda_s] \\ [\lambda_r] \end{bmatrix} \quad 1.4.$$

$$[v] = [R][I] + p[\lambda] \quad 1.5.$$

En donde:

El subíndice "s" se refiere a todas las cantidades del estator.

El subíndice "r" se refiere a todas las cantidades del rotor.

1.2.2. CONCATENACIONES DE FLUJO (Bibl. 1,2)

Las concatenaciones de flujo pueden ser expresadas co

mo:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \\ \lambda_{kq} \\ \lambda_{kd} \\ \lambda_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{asas} & L_{asbs} & L_{ascs} & L_{askq} & L_{askd} & L_{asfd} \\ L_{bsas} & L_{bsbs} & L_{bscs} & L_{bskq} & L_{bskd} & L_{bsfd} \\ L_{csas} & L_{csbs} & L_{cscs} & L_{cskq} & L_{cskd} & L_{csfd} \\ L_{kqas} & L_{kqbs} & L_{kqcs} & L_{kqkq} & L_{kqkd} & L_{kqfd} \\ L_{kdas} & L_{kdbs} & L_{kdcs} & L_{kdkq} & L_{kdkd} & L_{kdfd} \\ L_{fdas} & L_{fdbs} & L_{fdcs} & L_{fdkq} & L_{fdkd} & L_{fdfd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{kq} \\ i_{kd} \\ i_{fd} \end{bmatrix} \quad 1.6$$

Al igual que la ecuación matricial de voltajes, la ecuación 1.6 puede escribirse como sigue:

$$\begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{sr}^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad 1.7.$$

$$[\lambda] = [L] [I] \quad 1.8.$$

1.2.3. INDUCTANCIAS (Bibl. 1,2,4)

Si bien las inductancias del rotor son constantes e independientes del desplazamiento angular del rotor θ_r , sin embargo, las inductancias propias de los bobinados del estator y las inductancias mutuas entre bobinados del estator, como también, entre bobinados del estator y rotor, son funciones sinusoidales de θ_r .

Las siguientes ecuaciones determinan las inductancias dadas en 1.6.

INDUCTANCIAS PROPIAS DEL ESTATOR

$$L_{sas} = L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta_r$$

$$L_{bsbs} = L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$L_{cscs} = L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Donde L_{ls} es la inductancia de dispersión de cada bobinado del estator y L_A y L_B son constantes.

INDUCTANCIAS PROPIAS DEL ROTOR

$$L_{kqkq} = L_{lkq} + L_{mkq}$$

$$L_{kdkd} = L_{lkd} + L_{mkd}$$

$$L_{fdfd} = L_{lfd} + L_{mf}$$

Donde L_{lkq} , L_{lkd} , L_{lfd} son las respectivas inductancias de dispersión.

INDUCTANCIAS MUTUAS ENTRE LAS FASES DEL ESTATOR

$$L_{asbs} = L_{bsas} = -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right)$$

$$L_{ascs} = L_{csas} = -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right)$$

$$L_{bscs} = L_{csbs} = -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r + \pi\right)$$

INDUCTANCIAS MUTUAS ENTRE LOS DEVANADOS DEL ROTOR

$$L_{kqkd} = L_{kdkq} = 0$$

$$L_{kqfd} = L_{fdkq} = 0$$

$$L_{kdfd} = L_{fdkd} = M_{fd}$$

INDUCTANCIAS MUTUAS ENTRE LOS DEVANADOS DEL ESTATOR Y ROTOR

$$L_{askq} = L_{kqas} = L_{sq} \cos \theta_r$$

$$L_{askd} = L_{kdas} = L_{sd} \sin \theta_r$$

$$L_{asfd} = L_{fdas} = L_{sf} \sin \theta_r$$

$$L_{bskq} = L_{kqbs} = L_{sq} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3})$$

$$L_{bskd} = L_{kdbs} = L_{sd} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3})$$

$$L_{bsfd} = L_{fdbs} = L_{sf} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3})$$

$$L_{cskq} = L_{kqcs} = L_{sq} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3})$$

$$L_{cskd} = L_{kdcs} = L_{sd} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3})$$

$$L_{csfd} = L_{fdcs} = L_{sf} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3})$$

Substituyendo estas inductancias en 1.6., las submatrices de inductancias en 1.7. quedan de la siguiente forma:

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{1s} + L_A - L_B \cos 2\theta_r & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & L_{1s} + L_A - L_B \cos 2(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \pi) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{1s} + L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{sq} \cos \theta_r & L_{sd} \sin \theta_r & L_{sf} \sin \theta_r \\ L_{sq} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{sd} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{sf} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{sq} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sd} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sf} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad 1.10.$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lkq} + L_{mkq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{lkd} + L_{mkd} & M_{fd} \\ 0 & M_{fd} & L_{lfd} + L_{mf} \end{bmatrix} \quad 1.11.$$

③ válido para máquinas de polos salientes

1.3. ECUACIONES DE LA MAQUINA SINCRONICA REFERIDAS AL ESTATOR (Bibl. 1,2,3,5)

En el estudio de los fenómenos que tienen lugar en una máquina sincrónica, es necesario expresar las variables de los devanados del rotor en términos del estator, ya que sino, suele dificultarse la apreciación cuantitativa del proceso, así como, la representación de diagramas fasoriales. Por otra parte, como generalmente los parámetros de la máquina son medidos con respecto al estator, es conveniente reducir los devanados del rotor al estator.

④

El método para reducir los devanados del rotor al es

tator, no es otro, que el de transformar el devanado del rotor en otro equivalente, del mismo número de espiras que el devanado del estator, siempre que no resulten afectadas las condiciones de funcionamiento en el proceso de reducción del rotor al estator. De esto resulta, que la transformación se realiza multiplicando los valores del rotor por una adecuada relación de espiras.

A continuación, se presentan para un solo devanado, los valores referidos al estator (notados con prima "'".) Transformaciones similares se aplican a los otros devanados.

$$v'_{fd} = \frac{N_s}{N_{fd}} v_{fd}$$

$$\lambda'_{fd} = \frac{N_s}{N_{fd}} \lambda_{fd}$$

$$i'_{fd} = \frac{2}{3} \left(\frac{N_{fd}}{N_s} \right) i_{fd}$$

$$r'_{fd} = \frac{3}{2} \left(\frac{N_s}{N_{fd}} \right)^2 r_{fd}$$

$$L'_{lfd} = \frac{3}{2} \left(\frac{N_s}{N_{fd}} \right)^2 L_{lfd}$$

$$L_{mf} = \frac{2}{3} \left(\frac{N_{fd}}{N_s} \right)^2 L_{ad}$$

$$M_{fd} = \frac{2}{3} \left(\frac{N_{fd}}{N_s} \right)^2 L_{ad}$$

$$L_{sf} = \frac{2}{3} \left(\frac{N_{fd}}{N_s} \right) L_{ad}$$

1.12.

El factor $\frac{2}{3}$ en las ecuaciones 1.12 como se observará posteriormente, es debido a que la máquina trifásica ha sido sustituida por una bifásica equivalente. Este factor es necesario incluir, para permitir que el sistema bifásico produzca la misma fuerza magnetomotriz que el sistema trifásico original.

Reemplazando 1.12. en la matriz $[v_r]$ (ecuación 1.3):

$$[v_r] = \begin{bmatrix} v_{kq} \\ v_{kd} \\ v_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Nkq}{Ns} v'_{kq} \\ \frac{Nkd}{Ns} v'_{kd} \\ \frac{Nfd}{Ns} v'_{fd} \end{bmatrix}$$

La ecuación anterior puede escribirse así:

$$[v_r] = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{Nkq}{Ns} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Nkd}{Ns} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Nfd}{Ns} \end{bmatrix}}_{N^{-1}} \begin{bmatrix} v'_{kq} \\ v'_{kd} \\ v'_{fd} \end{bmatrix} \quad 1.13.$$

Por tanto:

$$[v_r] = [N]^{-1} [v'_r] \quad 1.14.$$

$$\therefore [v'_r] = [N] [v_r] \quad 1.15.$$

Donde:

$$[N] = \begin{bmatrix} \frac{Ns}{Nkq} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Ns}{Nkd} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Ns}{Nfd} \end{bmatrix} \quad [v'_r] = \begin{bmatrix} v'_{kq} \\ v'_{kd} \\ v'_{fd} \end{bmatrix}$$

Al igual que con los voltajes, procediendo en forma similar con las matrices $[\lambda_r]$ e $[I_r]$ de las ecuaciones 1.7. y 1.4, éstas se transforman en:

$$[\lambda_r] = [N]^{-1} [\lambda'_r] \quad 1.16.$$

$$\therefore [\lambda'_r] = [N] [\lambda_r] \quad 1.17.$$

$$[I_r] = \frac{2}{3} [N] [I'_r] \quad 1.18.$$

$$\therefore [I'_r] = \frac{3}{2} [N]^{-1} [I_r] \quad 1.19.$$

Donde:

$$[\lambda'_r] = \begin{bmatrix} \lambda'_{kq} \\ \lambda'_{kd} \\ \lambda'_{fd} \end{bmatrix} \quad [I'_r] = \begin{bmatrix} i'_{kq} \\ i'_{kd} \\ i'_{fd} \end{bmatrix}$$

Reemplazando 1.12 en 1.11 :

$$[L_r] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \left(\frac{Nkq}{Ns}\right)^2 & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{Nkd}{Ns}\right)^2 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{Nfd}{Ns}\right)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L'_{lkq} + Laq & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lkd} + Lad & Lad \\ 0 & Lad & L'_{lfd} + Lad \end{bmatrix}$$

Por tanto:

$$[L_r] = \frac{2}{3} [N]^{-1} [N]^{-1} [L'_r] \quad 1.20.$$

$$\therefore [L'_r] = \frac{3}{2} [N] [N] [L_r] \quad 1.21.$$

donde:

$$[L'_r] = \begin{bmatrix} L'_{lkq} + Laq & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lkd} + Lad & Lad \\ 0 & Lad & L'_{lfd} + Lad \end{bmatrix} \quad 1.22.$$

Reemplazando las relaciones 1.12. en la matriz $[R_r]$

de la ecuación 1.4. tenemos:

$$[R_r] = \frac{2}{3} [N]^{-1} [N]^{-1} [R'_r] \quad 1.23.$$

$$\therefore [R'_r] = \frac{3}{2} [N] [N] [R_r] \quad 1.24.$$

Donde:

$$[R'_r] = \begin{bmatrix} r'_{kq} & 0 & 0 \\ 0 & r'_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & r'_{fd} \end{bmatrix}$$

Reemplazando 1.12 en 1.10

$$[L_{sr}] = \frac{2}{3} [L_M] [N]^{-1} \quad 1.25.$$

$$\therefore [L_M] = \frac{3}{2} [L_{sr}] [N] \quad 1.26.$$

Donde:

$$[L_M] = \begin{bmatrix} Laq \cos \theta_r & Lad \sin \theta_r & Lad \sin \theta_r \\ Laq \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & Lad \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & Lad \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ Laq \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & Lad \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & Lad \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad 1.27.$$

Obteniendo las transpuestas respectivas en las ecuaciones 1.25 y 1.26 :

$$[L_{sr}]^T = \frac{2}{3} [N]^{-1} [L_M]^T \quad 1.28.$$

$$\therefore [L_M]^T = \frac{3}{2} [N] [L_{sr}]^T \quad 1.29.$$

Reemplazando 1.14, 1.16, 1.18 y 1.23 en 1.4 tenemos:

$$\begin{bmatrix} [v_s] \\ [v_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s] & [0] \\ [0] & [R_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} + \dot{p} \begin{bmatrix} [\lambda_s] \\ [\lambda_r] \end{bmatrix} \quad 1.30.$$

Reemplazando 1.16, 1.18, 1.20, 1.25 y 1.28 en 1.7 se obtiene:

$$\begin{bmatrix} [\lambda_s] \\ [\lambda_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [L_M] \\ \frac{2}{3} [L_M]^T & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad 1.31.$$

Las ecuaciones 1.30 y 1.31 son las ecuaciones correspondientes a las ecuaciones 1.4 y 1.7 pero con los valores referidos del rotor al estator.

1.4. ECUACIONES DE LA MAQUINA SINCRONICA EN LA REFERENCIA DEL ROTOR

1.4.1. LA TRANSFORMADA DE PARK (Bibl. 1,2,3)

En el análisis de máquinas de corriente alterna, es costumbre emplear un cambio de variables que formulen transformación de las variables del estator y rotor a una referencia común.

Las ecuaciones de transformación pueden entonces ser ideadas para transformar éstas variables a una referencia que gira a una velocidad angular arbitraria. Sin embargo, el estator o rotor de una máquina es asimétrica, y los coeficientes que varían con el tiempo aparecerán en las ecuaciones de voltaje en todas las referencias, excepto para aquella fijada en la máquina donde la asimetría exista. En nuestro caso, es conveniente por lo tanto seleccionar una referencia fijada en el rotor.

La transformada de Park, constituye las ecuaciones de transformación, que establece, el cambio de variables del estator a la referencia del rotor. Hay que aclarar que esta transformación es matemática y más precisamente una transformación trigonométrica, y por lo tanto, no presenta en sí un significado físico.

La transformada de Park, recibe también el nombre de transformada en los ejes q, d, o y viene dada por las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} f_{qs} &= \frac{2}{3} \left[f_{as} \cos \theta_r + f_{bs} \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) + f_{cs} \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ f_{ds} &= \frac{2}{3} \left[f_{as} \operatorname{sen} \theta_r + f_{bs} \operatorname{sen} \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) + f_{cs} \operatorname{sen} \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ f_{os} &= \frac{1}{3} \left[f_{as} + f_{bs} + f_{cs} \right] \end{aligned}$$

En donde:

f representa voltaje, corriente o concatenaciones de flujo.
 θ_r es el desplazamiento angular del rotor y se define como:

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r dt + \theta_{r(0)}$$

La variable f_{os} es incorporada, pues es necesario tener tres variables independientes, ya que se va a transformar un sistema de tres variables (a, b, c). Sin embargo, general

mente el estator es un sistema simétrico de tres devanados y por lo tanto $f_{os} = 0$. El factor $\frac{2}{3}$ es debido a que se va a transformar un sistema trifásico en uno equivalente bifásico.

Escribiendo la transformada de Park en notación matricial:

$$\begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \\ f_{os} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix} \quad [F_s]_{qdo} = [T_s] [F_s]_{abc} \quad 1.32.$$

$$\begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_s \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \\ f_{os} \end{bmatrix} \quad [F_s]_{abc} = [T_s]^{-1} [F_s]_{qdo} \quad 1.33$$

Donde:

$$[T_s] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \text{sen}\theta_r & \text{sen}(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$[T_s]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \text{sen } \theta_r & 1 \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

1.4.2. ECUACIONES DE LAS CONCATENACIONES DE FLUJO EN LOS EJES q, d, o (Bibl. 1,5)

Desarrollando la ecuación 1.31 y utilizando la transformación 1.33, se puede determinar las concatenaciones de flujo en los ejes q, d, o. Así:

Desarrollando $[\lambda_s]$ de 1.31 :

$$\begin{aligned} [\lambda_s]_{abc} &= [L_s]_{abc} [I_s]_{abc} + [L_M]_{abc} [I'_r]_{qdo} \\ [T_s]^{-1} [\lambda_s]_{qdo} &= [L_s]_{abc} [T_s]^{-1} [I_s]_{qdo} + [L_M]_{abc} [I'_r]_{qdo} \\ [\lambda_s]_{qdo} &= \{ [T_s] [L_s]_{abc} [T_s]^{-1} \} [I_s]_{qdo} + \{ [T_s] [L_M]_{abc} \} [I'_r]_{qdo} \quad 1.34. \end{aligned}$$

Desarrollando $[\lambda'_r]$ de 1.31 :

$$\begin{aligned} [\lambda'_r]_{qdo} &= \frac{2}{3} [L_M]_{abc}^T [I_s]_{abc} + [L'_r]_{qdo} [I'_r]_{qdo} \\ [\lambda'_r]_{qdo} &= \left\{ \frac{2}{3} [L_M]_{abc}^T [T_s]^{-1} \right\} [I_s]_{qdo} + [L'_r]_{qdo} [I'_r]_{qdo} \quad 1.35. \end{aligned}$$

Escribiendo en forma matricial 1.34 y 1.35 :

$$\begin{bmatrix} [\lambda_s]_{qdo} \\ \hline [\lambda'_r]_{qdo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T_s][L_s]_{abc}[T_s]^{-1} & [T_s][L_M]_{abc} \\ \hline \frac{2}{3}[L_M]^T_{abc}[T_s]^{-1} & [L'_r]_{qdo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s]_{qdo} \\ \hline [I'_r]_{qdo} \end{bmatrix} \quad 1.36.$$

Donde los subíndices "abc" representan a las variables originales y los subíndices "qdo" representan a la referencia en el rotor.

Observando la ecuación matricial 1.36., podemos dar las siguientes definiciones:

$$[L_s]_{qdo} = [T_s][L_s]_{abc}[T_s]^{-1} \quad 1.37.$$

$$[L_M]_{qdo} = [T_s][L_M]_{abc} \quad 1.38.$$

$$[L_M]^T_{qdo} = [L_M]^T_{abc}[T_s]^{-1} \quad 1.39.$$

Y la ecuación matricial quedaría:

$$\begin{bmatrix} [\lambda_s]_{qdo} \\ \hline [\lambda'_r]_{qdo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s]_{qdo} & [L_M]_{qdo} \\ \hline \frac{2}{3}[L_M]^T_{qdo} & [L'_r]_{qdo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s]_{qdo} \\ \hline [I'_r]_{qdo} \end{bmatrix} \quad 1.40.$$

Finalmente, desarrollando las ecuaciones 1.37, 1.38, y 1.39, y reemplazando en la ecuación 1.40. se obtienen las expresiones matemáticas de las concatenaciones de flujo:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{os} \\ \lambda'_{kq} \\ \lambda'_{kd} \\ \lambda'_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2}(L_A - L_B) & 0 & 0 & Laq & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3}{2}(L_A + L_B) & 0 & 0 & Lad & Lad \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ Laq & 0 & 0 & L'_{lkq} + Laq & 0 & 0 \\ 0 & Lad & 0 & 0 & L'_{lkd} + Lad & Lad \\ 0 & Lad & 0 & 0 & Lad & L'_{lfd} + Lad \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i'_{kq} \\ i'_{kd} \\ i'_{fd} \end{bmatrix}$$

1.41.

$$\text{Si: } Laq = \frac{3}{2}(L_A - L_B)$$

$$Lad = \frac{3}{2}(L_A + L_B)$$

De 1.41. tenemos:

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + Laq(i_{qs} + i'_{kq})$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + Lad(i_{ds} + i'_{kd} + i'_{fd})$$

$$\lambda_{os} = L_{ls} i_{os}$$

1.42.

$$\lambda'_{kq} = L'_{lkq} i'_{kq} + Laq(i_{qs} + i'_{kq})$$

$$\lambda'_{kd} = L'_{lkd} i'_{kd} + Lad(i_{ds} + i'_{kd} + i'_{fd})$$

$$\lambda'_{fd} = L'_{lfd} i'_{fd} + Lad(i_{ds} + i'_{kd} + i'_{fd})$$

1.4.3. ECUACIONES DE VOLTAJES EN LOS EJES q, d, o (Bibl. 2,5)

Desarrollando 1.30 y utilizando la transformación da

da por la ecuación 1.33, puede determinarse los voltajes en los ejes q, d, o en función de las concatenaciones de flujo.

Desarrollando $[\bar{v}_s]$ de 1.30 :

$$\begin{aligned}
 [\bar{v}_s]_{abc} &= [R_s]_{abc} [\bar{i}_s]_{abc} + p [\lambda_s]_{abc} \\
 [T_s]^{-1} [\bar{v}_s]_{qdo} &= [R_s]_{abc} [T_s]^{-1} [\bar{i}_s]_{qdo} + p [T_s]^{-1} [\lambda_s]_{qdo} \\
 [\bar{v}_s]_{qdo} &= \{ [T_s] [R_s]_{abc} [T_s]^{-1} \} [\bar{i}_s]_{qdo} + [T_s] p \{ [T_s]^{-1} [\lambda_s]_{qdo} \} \\
 [\bar{v}_s]_{qdo} &= [R_s]_{qdo} [\bar{i}_s]_{qdo} + [T] [\bar{\lambda}_s]_{qdo} + p [\lambda_s]_{qdo} \quad 1.43.
 \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 [R_s]_{qdo} &= [T_s] [R_s]_{abc} [T_s]^{-1} \\
 [T] &= [T_s] p [T_s]^{-1}
 \end{aligned}$$

Desarrollando $[\bar{v}'_r]$ de 1.30 :

$$[\bar{v}'_r]_{qdo} = [R'_r]_{qdo} [\bar{i}'_r]_{qdo} + p [\bar{\lambda}'_r]_{qdo} \quad 1.44.$$

Desarrollando las ecuaciones matriciales 1.43 y 1.44 se obtienen las siguientes ecuaciones de voltajes:

$$\begin{aligned}
 v_{qs} &= r_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + \lambda_{ds} p \theta_r \\
 v_{ds} &= r_s i_{ds} + p \lambda_{ds} - \lambda_{qs} p \theta_r
 \end{aligned} \quad 1.45.$$

$$v_{os} = r_s i_{os} + p\lambda_{os}$$

$$v'_{kq} = r'_{kq} i'_{kq} + p\lambda'_{kq}$$

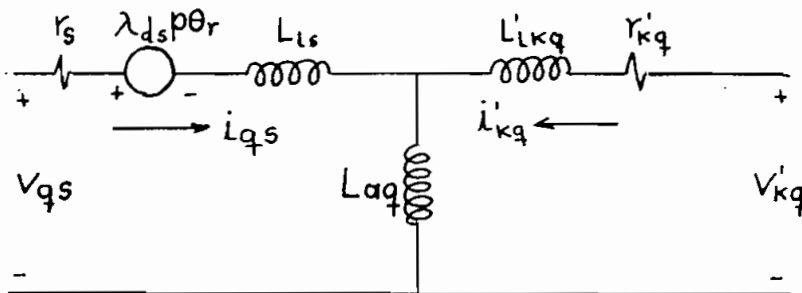
$$v'_{kd} = r'_{kd} i'_{kd} + p\lambda'_{kd}$$

$$v'_{fd} = r'_{fd} i'_{fd} + p\lambda'_{fd}$$

1.45.

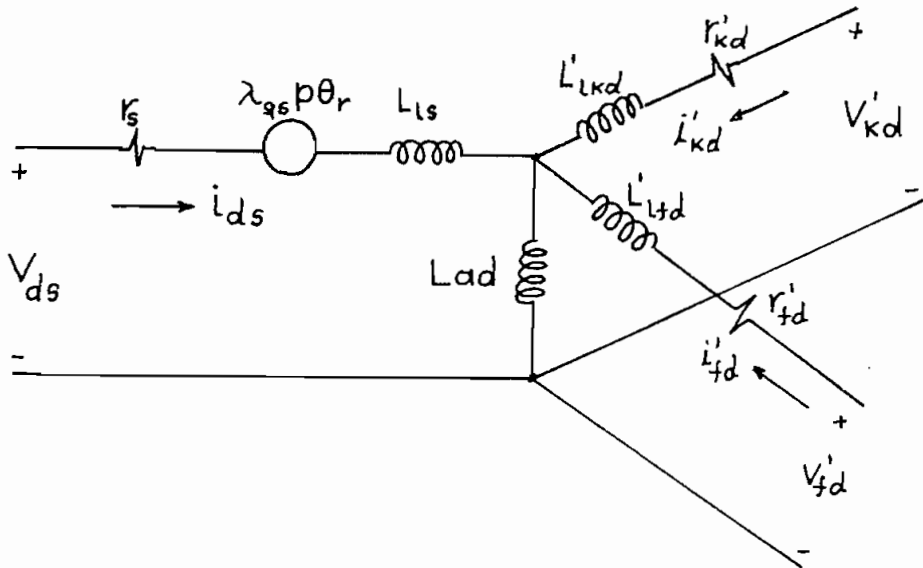
En el segundo miembro de las ecuaciones 1.45, los primeros términos representan la caída óhmica debido a las resistencias de los devanados, los segundos términos representan los voltajes de transformación y los terceros representan los voltajes de velocidad.

Las ecuaciones 1.42 y 1.45 sugieren los siguientes circuitos equivalentes:

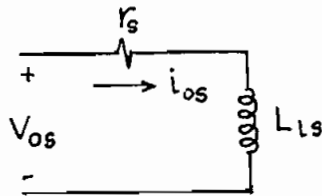


EJE 6





EJE d



EJE o

1.4.4. ECUACIONES DE POTENCIA Y TORQUE (Bibl. 1,2,4)

La potencia instantánea a los terminales de la armadura viene dado por:

$$P_s = v_{as} i_{as} + v_{bs} i_{bs} + v_{cs} i_{cs} \quad 1.46.$$

Escribiendo 1.46. en forma matricial y aplicando las transformaciones 1.32 y 1.33 :

$$[P_s]_{abc} = [v_s]_{abc}^T [I_s]_{abc}$$

$$[P_s]_{qdo} = [v_s]_{qdo}^T \left\{ [T_s]^{-1} \right\}^T [T_s]^{-1} [I_s]_{qdo}$$

Desarrollando la ecuación anterior:

$$[P_s]_{qdo} = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{qs} + v_{ds} + 2v_{os} i_{os}) \quad 1.47.$$

Sustituyendo 1.45 en 1.47

$$P_{qdo} = P_R + P_T + P_V \quad 1.48.$$

Donde:

$$P_R = \frac{3}{2} (r_s i_{qs}^2 + r_s i_{ds}^2 + 2r_s i_{os}^2)$$

$$P_T = \frac{3}{2} p (\lambda_{qs} i_{qs} + \lambda_{ds} i_{ds} + 2 \lambda_{os} i_{os})$$

$$P_V = \frac{3}{2} w_r (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds})$$

De 1.48 se concluye, que cada uno de los voltajes de las ecuaciones 1.45 producen sus respectivas potencias. La potencia electromagnética es aquella correspondiente a los voltajes de velocidad.

$$P_e = \frac{3}{2} w_r (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad 1.49.$$

Y por definición se obtiene la ecuación del torque e lectromagnético:

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{3}{2}(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) \quad 1.50.$$

Las ecuaciones anteriores describen el comportamiento de una máquina sincrónica trifásica de dos polos, sin embargo, puede extenderse a una máquina de cualquier número de polos multiplicando la ecuación de torque por el número de pares de polos ($\frac{P}{2}$).

$$T_e = \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) \quad 1.51.$$

1.5. ECUACIONES DE LA MAQUINA SINCRONICA EN POR UNIDAD

(Bibl. 5,7)

La comparación de las máquinas sincrónicas, tanto en tensión y potencia de salida nominales, así como para diversas formas y estados de funcionamiento, se efectúa preferentemente expresando sus valores fundamentales y parámetros no en unidades físicas, sino en unidades relativas que pueden ser calculadas como porcentajes o valores fraccionarios, de una cantidad que se toma como referencia llamada "cantidad base".

De acuerdo a esto, se define el valor por unidad de una magnitud cualquiera, como la razón de su valor real al valor base.

$$\text{VALOR}_u = \frac{\text{VALOR REAL}}{\text{VALOR BASE}} \quad 1.52.$$

Donde el subíndice "u" significa valor en "por unidad".

1.5.1. VALORES BASE

Las tensiones, corrientes, potencias y reactancias, están relacionadas entre sí, de tal forma que la elección de los valores base para dos magnitudes cualesquiera, determina los valores base de las otras.

a) Valores base seleccionados

V_B = tensión nominal fase-neutro.

S_B = potencia nominal monofásica de la máquina. |

ω_B = velocidad angular correspondiente a la sincrónica.

b) Corriente, resistencia y reactancia bases

$$I_B = \frac{S_B}{V_B} \quad 1.53.$$

$$R_B = X_B = \frac{V_B}{I_B} \quad 1.54.$$

c) Concatenaciones de flujo

$$\lambda_B = L_B I_B \quad 1.55.$$

$$\Psi_B = w_e \lambda_B$$

De 1.54 y 1.55 se demuestra que $\Psi_B = V_B$

1.5.2. ECUACIONES DE CONCATENACIONES DE FLUJO Y VOLTAJES

Multiplicando a los dos miembros de cada una de las ecuaciones 1.42. por w_e , éstas se transforman en:

$$\begin{aligned} \Psi_{qs} &= x_{ls} i_{qs} + x_{aq}(i_{qs} + i'_{kq}) \\ \Psi_{ds} &= x_{ls} i_{ds} + x_{ad}(i_{ds} + i'_{kd} + i'_{fd}) \\ \Psi_{os} &= x_{ls} i'_{os} \\ \Psi'_{kq} &= x'_{lkq} i'_{kq} + x_{aq}(i_{qs} + i'_{kq}) \\ \Psi'_{kd} &= x'_{lkd} i'_{kd} + x_{ad}(i_{ds} + i'_{kd} + i'_{fd}) \\ \Psi'_{fd} &= x'_{lfd} i'_{fd} + x_{ad}(i_{ds} + i'_{kd} + i'_{fd}) \end{aligned} \quad 1.56.$$

Sabiendo que $p\theta_r = w_r$ y utilizando la relación $\Psi = w_e \lambda$ las ecuaciones 1.45. se transforman en:

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{p}{w_e} \psi_{qs} + \frac{w_r}{w_e} \psi_{ds}$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{p}{w_e} \psi_{ds} - \frac{w_r}{w_e} \psi_{qs}$$

$$v_{os} = r_s i_{os} + \frac{p}{w_e} \psi_{os}$$

1.57.

$$v'_{kq} = r'_{kq} i'_{kq} + \frac{p}{w_e} \psi'_{kq}$$

$$v'_{kd} = r'_{kd} i'_{kd} + \frac{p}{w_e} \psi'_{kd}$$

$$v'_{fd} = r'_{fd} i'_{fd} + \frac{p}{w_e} \psi'_{fd}$$

Las magnitudes de las ecuaciones 1.56 y 1.57, están expresadas en sus respectivas unidades. Para expresarlas en por unidad, basta emplear la definición dada en 1.52.

Así, expresando en por unidad ψ_{qs} de la ecuación 1.56:

$$\psi_{qs} = x_{ls} i_{qs} + x_{aq} (i_{qs} + i'_{kq})$$

$$\psi_{qsu} \psi_B = x_{lsu} i_{qsu} X_B I_B + x_{aqu} X_B I_B (i_{qsu} + i'_{kqu})$$

$$\psi_{qsu} = x_{lsu} i_{qsu} + x_{aqu} (i_{qsu} + i'_{kqu}) \quad 1.58.$$

Expresando en por unidad v_{qs} de la ecuación 1.57:

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{p}{w_e} \psi_{qs} + \frac{w_r}{w_e} \psi_{ds}$$

$$v_{qsu} V_B = r_{su} i_{qsu} R_B I_B + \frac{p}{w_e} \psi_{qsu} \psi_B + \frac{w_r}{w_e} \psi_{dsu} \psi_B$$

$$v_{qsu} = r_{su} i_{qsu} + \frac{p}{w_e} \psi_{qsu} + \frac{w_r}{w_e} \psi_{dsu} \quad 1.59.$$

Puede notarse que las ecuaciones 1.58 y 1.59 no han sufrido mayor transformación con respecto a 1.56 y 1.57, pudiendo por lo tanto asumirse que las ecuaciones 1.56 y 1.57, están expresadas en por unidad, aunque se ha omitido el subíndice "u".

1.5.3. ECUACIONES DE POTENCIA Y TORQUE

Multiplicando y dividiendo la ecuación 1.49 por w_e :

$$P_e = \frac{3}{2} \frac{w_r}{w_e} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})$$

$$P_e = \frac{3}{2} V_B I_B w_{ru} (\psi_{dsu} i_{qsu} - \psi_{qsu} i_{dsu})$$

$$\frac{P_e}{\frac{3}{2} V_B I_B} = w_{ru} (\psi_{dsu} i_{qsu} - \psi_{qsu} i_{dsu})$$

$$Peu = w_{ru} (\psi_{dsu}^i{}_{qsu} - \psi_{qsu}^i{}_{dsu}) \quad 1.60.$$

Y por definición:

$$Teu = \frac{Peu}{w_{ru}}$$

$$Teu = \psi_{dsu}^i{}_{qsu} - \psi_{qsu}^i{}_{dsu} \quad 1.61.$$

C A P I T U L O I I

OPERACION ASINCRONICA DE LA
MAQUINA SINCRONICA

2.1. INTRODUCCION (Bibl. 8,10)

Cuando una máquina sincrónica, opera dentro de un gran sistema de potencia, uno de los problemas más complejos está asociado con el análisis del comportamiento asincrónico. Estabilidad, oscilaciones, comportamiento ante fallas desbalanceadas, indican algunas de las áreas en las cuales, el comportamiento asincrónico es de fundamental importancia.

Un generador sincrónico conectado a un sistema de potencia puede perder sincronismo debido a:

1. Pérdida de excitación.
2. Despeje de una falla con insuficiente rapidez.
3. Repentinos y grandes cambios en carga.

Es una práctica convencional desconectar la máquina del sistema en tales circunstancias, pero la parada de una unidad y la subsecuente reconexión, implica una interrupción en el suministro de potencia a algunos consumidores. Sin embargo, la máquina puede permanecer conectada al sistema bajo ciertas condiciones, siendo capaz de liberar un porcentaje de su potencia nominal como generador asincrónico.

Esta operación asincrónica, sólo es posible para un período limitado de tiempo, y durante este período, el generador podría otra vez llegar al sincronismo. Este arreglo, eliminaría el retardo que implica la parada de la unidad y la reconexión posterior al sistema, como también, previene la pérdida total de la potencia de la unidad generadora.

2.2. COMPORTAMIENTO DE LA MAQUINA SINCRONICA AL PERDER LA EXCITACION (Bibl. 8,9,10)

Es importante mantener el generador conectado entregando potencia activa al sistema el mayor tiempo posible, especialmente cuando la máquina representa una porción considerable del sistema. Sin embargo, algunos sistemas no pueden tolerar el funcionamiento de un generador sin excitación, y pueden tender hacia la inestabilidad como consecuencia de esta falla, lo que obligaría a la separación del generador.

Cuando un generador sincrónico pierde la excitación, y si el sistema es suficientemente grande como para suplir la deficiencia de excitación a través de la armadura, entonces, el generador sincrónico opera como un generador de inducción que gira sobre la velocidad sincrónica entregando potencia activa al sistema.

Como los generadores sincrónicos no están diseñados para este tipo de operación, la potencia de salida de la máquina oscilará un poco, y esto, debido al esfuerzo del rotor por ponerse en sincronismo.

La pérdida de excitación puede deberse a:

- Pérdida de energía en el sistema de excitación.
- Cortocircuito en los polos del campo.
- Disparo del interruptor de campo.

La pérdida de excitación de la máquina, hace que ésta absorba potencia reactiva del sistema, lo cual puede provocar una reducción marcada de voltaje, y la consecuente inestabilidad del sistema.

El tiempo que un generador puede operar sin excitación (operación asincrónica), está limitado por algunos factores, tales como sobrecalentamientos, torques pulsantes, etc..

Un generador de rotor cilíndrico se calentará rápidamente debido a las corrientes inducidas que fluyen en el hierro del rotor, en tanto que en una máquina de polos salientes

las corrientes inducidas son transportadas por las bobinas de amortiguamiento, y no se producirán calentamientos excesivos en el rotor.

Para cualquier tipo de máquina, el estator se sobrecalentará debido a las sobrecorrientes producidas en las bobinas. Estas corrientes pueden alcanzar valores tan altos como de dos a cuatro veces la corriente nominal, dependiendo sobre todo del deslizamiento, y de la forma en que se encuentra conectado el campo.

2.3. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE UNA MAQUINA DE INDUCCION (Bibl. 5,7,11)

Puesto que la pérdida de excitación de una máquina sincrónica, hace que ésta pase a funcionar como una máquina de inducción, se ha creído conveniente incluir en este trabajo, los principios fundamentales que rigen el funcionamiento de las máquinas de inducción.

Cuando el arrollamiento del estator, es alimentado por un sistema trifásico de corrientes, se crea un campo magnético rotatorio, que gira a la velocidad sincrónica w_e .

$$w_e = \frac{120f_s}{P} \quad 2.1.$$

Donde:

P = número de polos.

f_s = frecuencia de la línea o red de suministro de energía eléctrica.

El funcionamiento de la máquina de inducción, se basa en el principio de la interacción electromagnética entre este campo magnético giratorio, y las corrientes inducidas en el rotor cuando sus conductores son cortados por el campo giratorio. Esta interacción sólo es posible, cuando existe una diferencia de velocidades entre la velocidad de rotación del campo (w_e) y la velocidad del rotor (w_r). Esta diferencia expresada en por unidad con respecto a w_e se denomina deslizamiento.

$$s = \frac{w_e - w_r}{w_e} \quad 2.2.$$

De lo anterior se concluye, que el rotor se desliza con respecto al campo magnético giratorio a la velocidad:

$$\begin{aligned} w_e - w_r &= s w_e \\ f_e - f_r &= s f_e \end{aligned} \quad 2.3.$$

La frecuencia " sf_e ", recibe el nombre de "frecuencia de deslizamiento".

La fuerza magnetomotriz debida a la corriente del rotor, aunque gira a la velocidad de deslizamiento con respecto al rotor ($w_e - w_r$), es arrastrada por el rotor (w_r). Por lo cual:

$$(w_e - w_r) + w_r = w_e \quad 2.4.$$

Puede por lo tanto considerarse que las fmm del estator y rotor son estacionarias entre sí, pudiendo combinarse y producir la fmm resultante, que a su vez establece el flujo ϕ_m necesario para el funcionamiento de la máquina.

De 2.1 y 2.3 se observa que respecto al estator, el efecto del campo magnético giratorio es lo mismo que si cada fase estuviese enlazada por un flujo ϕ_m alterno a la frecuencia f_e , en cambio, en lo que se refiere al rotor, el efecto es el mismo que si cada fase estuviese enlazada por el flujo ϕ_m a la frecuencia de deslizamiento sf_e .

En reposo ($s=1$), la frecuencia del rotor es la misma que la de la línea, por lo tanto, las fem E_1 y E_2 creadas en

los devanados del estator y la reactancia del rotor vienen dadas por las fórmulas 2.5.

$$\begin{aligned} E_1 &= K_1 4,44 f N_1 \phi_m \\ E_2 &= K_2 4,44 f_e N_2 \phi_m \\ x_2 &= 2 \pi f_e L_2 \end{aligned} \quad 2.5.$$

A medida que aumenta la velocidad, la frecuencia del rotor va disminuyendo continuamente, y la fem así como la reactancia del rotor vendrán ahora dadas por 2.6.:

$$\begin{aligned} E_{2s} &= K_2 4,44 s f_e N_2 \phi_m \\ x_{2s} &= 2 \pi s f_e L_2 \end{aligned} \quad 2.6.$$

Comparando 2.5 y 2.6:

$$\begin{aligned} E_{2s} &= s E_2 \\ x_{2s} &= s x_2 \end{aligned} \quad 2.7.$$

Lo que demuestra, que el movimiento relativo de los conductores del rotor respecto al campo giratorio induce una "fem de frecuencia de deslizamiento", y además, que la reac

tancia del rotor disminuye proporcionalmente a medida que aumenta la velocidad.

Si el circuito del rotor está cerrado, se producirá en él una corriente dada por:

$$I_2 = \frac{sE_2}{r_2 + jsx_2} \quad 2.8.$$

De igual forma como se hizo con las máquinas sincrónicas, es posible referir las magnitudes del rotor al estator

$$I'_2 = \frac{sE'_2}{r'_2 + jsx'_2} \quad 2.9.$$

$$I'_2 = \frac{E'_2}{\frac{r'_2}{s} + jx'_2} \quad 2.10.$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{x'_2}{r'_2/s}$$

La ecuación 2.10. hace posible considerar a la máquina de inducción como si estuviese fija, ya que en lugar de la reactancia sx'_2 correspondiente al rotor en movimiento, actúa la reactancia x'_2 correspondiente al rotor fijo; y en lugar de

la resistencia r'_2 correspondiente al rotor en movimiento, tenemos la resistencia variable r'_2/s que puede escribirse como:

$$\frac{r'_2}{s} = r'_2 + r'_2 \frac{1-s}{s} \quad 2.11.$$

De esta consideración, y por analogía con el transformador, obtenemos el siguiente circuito equivalente:

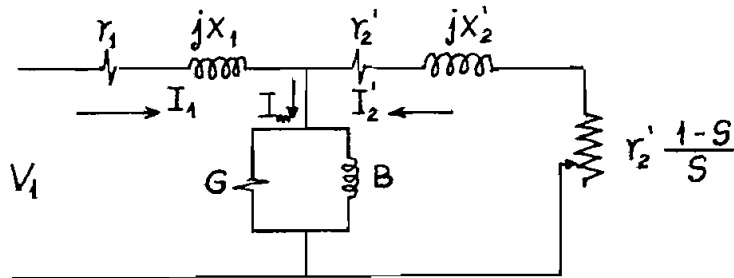


FIG. 2.1.

En reposo ($s=1$), el circuito equivalente demuestra como las condiciones son idénticas a las de un transformador fijo en cortocircuito, y en este caso se obtienen las pérdidas eléctricas de los devanados primario y secundario, lo que significa, que la potencia desarrollada por el motor en su eje durante la rotación será igual a la potencia consumida en la resistencia adicional $r'_2 \frac{1-s}{s}$.

$$P_m = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s} \quad 2.12.$$

Y la ecuación de torque por definición será:

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_r} \quad 2.13.$$

En las ecuaciones anteriores y dependiendo de la relación existente entre las velocidades ω_e y ω_r , el valor del deslizamiento puede ser positivo o negativo, lo que determina las condiciones de funcionamiento indicadas en la fig. 2.2.

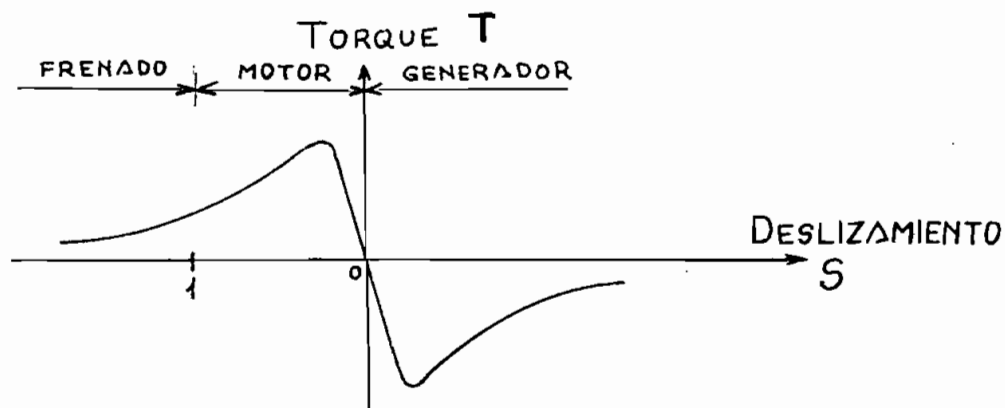


FIG. 2.2.

Así, una máquina de inducción funciona como motor, cuando la velocidad del rotor está entre el reposo ($s=1$) y el sincronismo ($s=0$) siendo el sentido de rotación el mismo que el campo magnético giratorio. La sustitución de estos valo-

res de s ($0 < s < 1$) en 2.12., demuestra que tanto la potencia como el torque son positivos para acción motriz. El diagrama vectorial para un motor de inducción se presenta en la figura 2.3.

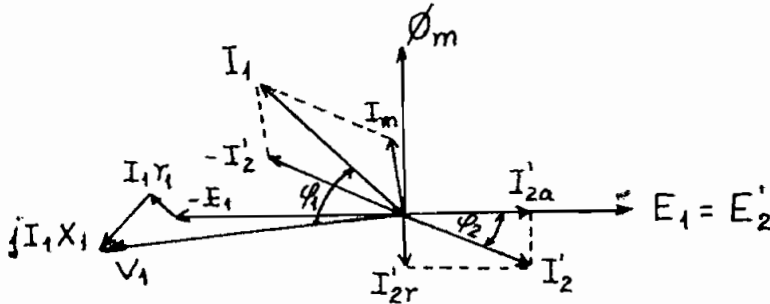


FIG. 2.3.

$$I'_{2a} = I'_2 \cos \varphi_2 = \frac{sE'_2 r'_2}{(r'_2)^2 + (sx'_2)^2}$$

2.14.

$$I'_{2r} = I'_2 \sen \varphi_2 = \frac{s^2 E'^2_2 x'_2}{(r'_2)^2 + (sx'_2)^2}$$

Si se aumenta la velocidad del rotor hasta una velocidad $w_r > w_e$, el deslizamiento se hace negativo. Si bien el campo magnético continúa girando a la velocidad w_e , sin embargo, su rotación relativa con respecto al rotor se invierte, lo que significa que la máquina pasa a funcionar como GENERADOR. La sustitución de estos valores de deslizamiento ($s < 0$)

en 2.12. y 2.13., demuestra que tanto la potencia como el tor que son negativos para acción generatriz.

En las ecuaciones 2.14., se comprueba como la compo nente activa de la corriente del rotor cambia de sentido con deslizamientos negativos, en tanto que la componente reactiva no. De esta consideración, se obtiene el diagrama vectorial para acción generatriz indicado en la figura 2.4.

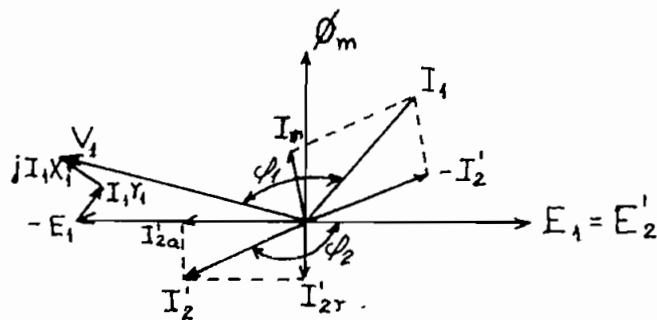


FIG. 2.4.

C A P I T U L O I I I

ANALISIS MATEMATICO
DE LA
OPERACION ASINCRONICA

3.1. INTRODUCCION

Para analizar un dispositivo cualquiera, el procedimiento básico es formular inicialmente las ecuaciones que lo describen, y posteriormente resolver estas ecuaciones de manera que pueda obtenerse una información útil. El propósito de este capítulo, es precisamente el de obtener las expresiones matemáticas necesarias para estudiar el funcionamiento asincrónico de una máquina sincrónica.

El estudio se realiza en base al modelo de un generador idealizado, el cual se supone está operando a deslizamiento constante.

Si bien es cierto que el deslizamiento no es estrictamente constante, sin embargo, la suposición de un deslizamiento constante hace factible obtener expresiones analíticas sencillas, que describen con suficiente exactitud el comportamiento asincrónico de los generadores sincrónicos.

Es necesario además indicar, que el presente análisis matemático se realiza en base a la referencia bibliográfica # 12, aunque en ésta no se desarrollan los circuitos equivalentes para operación asincrónica que es la base del presente

te estudio.

3.2. ECUACIONES DE VOLTAJE, CONCATENACIONES DE FLUJO Y CORRIENTES EN LOS EJES q, d, o (Bibl. 2,12)

El método de análisis a seguirse es el siguiente:

- a) En base a las ecuaciones de la máquina sincrónica desarrolladas en el capítulo 1., se obtendrán los circuitos equivalentes de las reactancias operacionales en los ejes directo y en cuadratura.
- b) El análisis se realiza considerando en primer término, la forma que toman las ecuaciones de la máquina ante la ausencia de la excitación. Posteriormente, ya que se ha supuesto la linealidad del circuito magnético, se incluirá el efecto de la excitación por superposición en estas ecuaciones.

3.2.1. CIRCUITOS EQUIVALENTES DE LAS REACTANCIAS OPERACIONALES EN LOS EJES DIRECTO Y EN CUADRATURA

Reescribiendo las ecuaciones 1.56. y 1.57 expresadas en por unidad, y sustituyendo en éstas $v'_{kd} = v'_{kq} = 0$ que co-

responden a los devanados amortiguadores (arrollamientos cor-
tocircuitados) se tiene:

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{p}{w_e} \psi_{qs} + \frac{w_r}{w_e} \psi_{ds} \quad 3.1.$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{p}{w_e} \psi_{ds} - \frac{w_r}{w_e} \psi_{qs} \quad 3.2.$$

$$v_{os} = r_s i_{os} + \frac{p}{w_e} \psi_{os} \quad 3.3.$$

$$0 = r'_{kq} i'_{kq} + \frac{p}{w_e} \psi'_{kq} \quad 3.4.$$

$$0 = r'_{kd} i'_{kd} + \frac{p}{w_e} \psi'_{kd} \quad 3.5.$$

$$v'_{fd} = r'_{fd} i'_{fd} + \frac{p}{w_e} \psi'_{fd} \quad 3.6.$$

$$\psi_{qs} = x_{ls} i_{qs} + x_{aq}(i_{qs} + i'_{kq}) \quad 3.7.$$

$$\psi_{ds} = x_{ls} i_{ds} + x_{ad}(i_{ds} + i'_{kd} + i'_{fd}) \quad 3.8.$$

$$\psi_{os} = x_{ls} i_{os} \quad 3.9.$$

$$\psi'_{kq} = x'_{lkq} i'_{kq} + x_{aq}(i_{qs} + i'_{kq}) \quad 3.10.$$

$$\psi'_{kd} = x'_{lkd} i'_{kd} + x_{ad}(i_{ds} + i'_{kd} + i'_{fd}) \quad 3.11.$$

$$\psi'_{fd} = x'_{lfd} i'_{fd} + x_{ad}(i_{ds} + i'_{kd} + i'_{fd}) \quad 3.12.$$

3.2.1.a OBTENCION DE $X_d(p)$

La reactancia operacional en el eje directo, se obtiene a partir de una combinación de todas aquellas ecuaciones asociadas con el mencionado eje. Así:

Sustituyendo 3.11 y 3.12 en 3.5 y 3.6 se tiene:

$$-\frac{p}{w_e} x_{ad} i_{ds} = \left[(r'_{kd} + \frac{p}{w_e} x'_{lkd}) + \frac{p}{w_e} x_{ad} \right] i'_{kd} + \frac{p}{w_e} x_{ad} i'_{fd}$$

$$v'_{fd} - \frac{p}{w_e} x_{ad} i_{ds} = \frac{p}{w_e} x_{ad} i'_{kd} + \left[(r'_{fd} + \frac{p}{w_e} x'_{lfd}) + \frac{p}{w_e} x_{ad} \right] i'_{fd}$$

Si se designa:

$$A = r'_{fd} + \frac{p}{w_e} x'_{lfd}$$

$$B = r'_{kd} + \frac{p}{w_e} x'_{lkd}$$

Las ecuaciones anteriores se escriben así:

$$-\frac{p}{w_e} x_{ad} i_{ds} = (B + \frac{p}{w_e} x_{ad}) i'_{kd} + \frac{p}{w_e} x_{ad} i'_{fd} \quad 3.13.$$

$$v'_{fd} - \frac{p}{w_e} x_{ad} i_{ds} = \frac{p}{w_e} x_{ad} i'_{kd} + (A + \frac{p}{w_e} x_{ad}) i'_{fd} \quad 3.14.$$

Resolviendo 3.13 y 3.14 para i'_{kd} e i'_{fd} :

$$\Delta = \begin{vmatrix} B + \frac{p}{w_e} xad & \frac{p}{w_e} xad \\ \frac{p}{w_e} xad & A + \frac{p}{w_e} xad \end{vmatrix}$$

$$\Delta = AB + \frac{p}{w_e} xad(A+B)$$

$$\Delta_{i'_{kd}} = \begin{vmatrix} -\frac{p}{w_e} xad i_{ds} & \frac{p}{w_e} xad \\ v'_{fd} - \frac{p}{w_e} xad i_{ds} & A + \frac{p}{w_e} xad \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{i'_{kd}} = -A \frac{p}{w_e} xad i_{ds} - v'_{fd} \frac{p}{w_e} xad$$

$$\Delta_{i'_{fd}} = \begin{vmatrix} B + \frac{p}{w_e} xad & -\frac{p}{w_e} xad i_{ds} \\ \frac{p}{w_e} xad & v'_{fd} - \frac{p}{w_e} xad i_{ds} \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{i'_{fd}} = -B \frac{p}{w_e} xad i_{ds} + (B + \frac{p}{w_e} xad)v'_{fd}$$

$$i'_{kd} = \frac{\Delta i'_{kd}}{\Delta}$$

$$i'_{fd} = \frac{\Delta i'_{fd}}{\Delta}$$

3.15.

Reemplazando 3.15 en 3.8:

$$\psi_{ds} = x_{ls} i_{ds} + x_{ad} \left(i_{ds} + \frac{\Delta i'_{kd}}{\Delta} + \frac{\Delta i'_{fd}}{\Delta} \right)$$

3.16.

Sustituyendo Δ , $\Delta i'_{kd}$, $\Delta i'_{fd}$ en 3.16:

$$\psi_{ds} = \left[x_{ls} + \frac{x_{ad} AB}{AB + \frac{p}{w_e} x_{ad}(A+B)} \right] i_{ds} + \left[\frac{B x_{ad}}{AB + \frac{p}{w_e} x_{ad}(A+B)} \right] v'_{fd}$$

$$\psi_{ds} = X_{d(p)} i_{ds} + Y_{(p)} v'_{fd}$$

3.17.

donde:

$$X_{d(p)} = x_{ls} + \frac{x_{ad} AB}{AB + \frac{p}{w_e} x_{ad}(A+B)}$$

$$Y_{(p)} = \frac{B x_{ad}}{AB + \frac{p}{w_e} x_{ad}(A+B)}$$

$X_{d(p)}$ puede escribirse de la siguiente manera:

$$X_{d(p)} = x_{ls} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{p/w_e}{B} + \frac{p/w_e}{A}}$$

Multiplicando por p/w_e

$$X_{d(p)} \frac{p}{w_e} = \frac{p}{w_e} x_{ls} + \frac{1}{\frac{\frac{p}{w_e}}{x_{ad}} + \frac{1}{B} + \frac{1}{A}} \quad 3.18.$$

La ecuación 3.18., sugiere el circuito equivalente de la figura 3.1. correspondiente a la reactancia operacional en el eje directo:

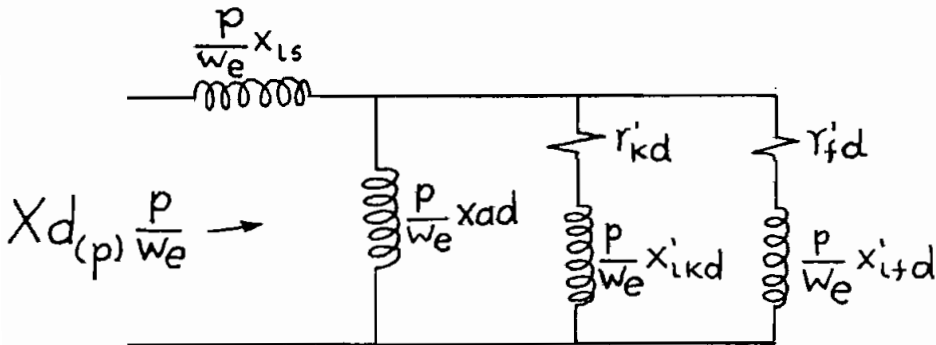


FIG. 3.1.

3.2.1.b OBTENCION DE $X_{q(p)}$

Sustituyendo 3.10 en 3.4.

$$0 = i'_{kq} \left[(r'_{kq} + \frac{p}{w_e} x'_{lkq}) + \frac{p}{w_e} x_{aq} \right] + \frac{p}{w_e} x_{aq} i_{qs}$$

Llamando:

$$C = r'_{kq} + \frac{p}{w_e} x'_{lkq}$$

La ecuación anterior se escribe:

$$0 = i'_{kq} (C + \frac{p}{w_e} x_{aq}) + \frac{p}{w_e} x_{aq} i_{qs}$$
$$i'_{kq} = - \frac{\frac{p}{w_e} x_{aq} i_{qs}}{C + \frac{p}{w_e} x_{aq}} \quad 3.19.$$

Reemplazando 3.19 en 3.7:

$$\psi_{qs} = x_{ls} + \frac{C x_{aq}}{C + \frac{p}{w_e} x_{aq}} i_{qs}$$
$$\psi_{qs} = X_{q(p)} i_{qs} \quad 3.20.$$

Donde:

$$X_{q(p)} = x_{ls} + \frac{C x_{aq}}{C + \frac{p}{w_e} x_{aq}}$$

$$X_{q(p)} = x_{ls} + \frac{1}{\frac{1}{x_{aq}} + \frac{p/w_e}{C}}$$

Multiplicando a los dos miembros por p/w_e

$$X_{q(p)} \frac{p}{w_e} = \frac{p}{w_e} x_{ls} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{p}{w_e} x_{aq}} + \frac{1}{C}} \quad 3.21.$$

La ecuación 3.21 sugiere el circuito equivalente de la figura 3.2. correspondiente a la reactancia operacional en el eje en cuadratura.

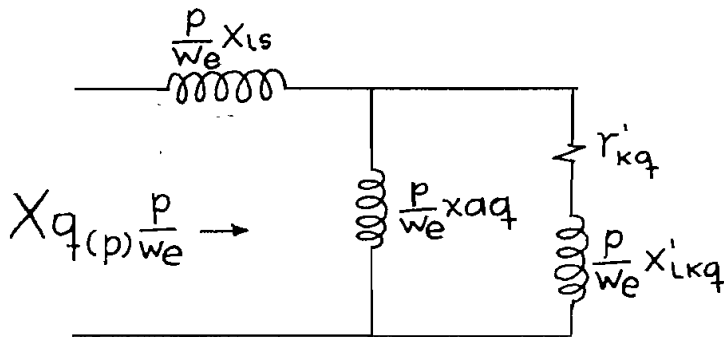


FIG. 3.2.

Para acción generatriz, las ecuaciones 3.17 y 3.20. vienen dadas por:

$$\psi_{ds} = - X_{d(p)} i_{ds} + Y(p) v'_{fd} \quad 3.22.$$

$$\psi_{qs} = - X_{q(p)} i_{qs} \quad 3.23.$$

3.2.2. VOLTAJES EN LOS EJES q, d

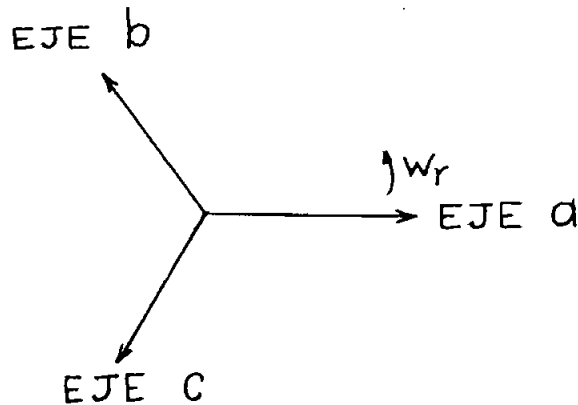


FIG. 3.3.

Para crear un campo magnético rotatorio en el sentido determinado por la fig. 3.3., se escoge el siguiente sistema balanceado:

$$v_{as} = V_{max} \cos \theta_e$$

$$v_{bs} = V_{max} \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_{cs} = V_{\max} \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Utilizando la transformada de Park:

$$v_{qs} = \frac{2}{3} \left[v_{as} \cos\theta_r + v_{bs} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + v_{cs} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

$$v_{qs} = V_{\max} \cos(\theta_e - \theta_r) \quad 3.24.$$

$$v_{ds} = \frac{2}{3} \left[v_{as} \operatorname{sen}\theta_r + v_{bs} \operatorname{sen}\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + v_{cs} \operatorname{sen}\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

$$v_{ds} = -V_{\max} \operatorname{sen}(\theta_e - \theta_r) \quad 3.25.$$

$$\theta_e = \int_0^t \omega_e dt + \theta_{e(0)}$$

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r dt + \theta_{r(0)}$$

De donde:

$$\theta_e - \theta_r = \int_0^t (\omega_e - \omega_r) dt - [\theta_{r(0)} - \theta_{e(0)}]$$

Como se ha señalado en la introducción, el análisis se basa en la suposición de que la máquina opera asincrónicamente a deslizamiento constante. Por lo tanto, la velocidad permanece constante y la ecuación anterior queda de la manera

siguiente:

$$\theta_e - \theta_r = (w_e - w_r)t - [\theta_{r(0)} - \theta_{e(0)}]$$
$$\theta_e - \theta_r = sw_e t - \theta_0 \quad 3.26.$$

Donde:

sw_e = frecuencia de deslizamiento (ecuación 2.3.)

$$\theta_0 = \theta_{r(0)} - \theta_{e(0)}$$

Sustituyendo 3.26. en 3.24 y 3.25 y considerando los valores eficaces se tiene:

$$v_{qs} = v \cos(sw_e t - \theta_0) \quad 3.27.$$

$$v_{ds} = -v \operatorname{sen}(sw_e t - \theta_0) \quad 3.28.$$

3.2.3. DETERMINACION DE LAS CONCATENACIONES DE FLUJO Y CORRIENTES CUANDO NO SE CONSIDERA EL EFECTO DE LA EXCITACION

Si la máquina no está excitada, las cantidades variarán en los ejes sinusoidalmente a la frecuencia de deslizamiento, pudiendo entonces las ecuaciones de la máquina ser es

critas en forma de fasores.

Las ecuaciones 3.27 y 3.28 se transforman en las siguientes ecuaciones fasoriales:

$$\bar{V}_{qs} = \bar{V} \quad 3.29.$$

$$\bar{V}_{ds} = j\bar{V}$$

donde:

$$\bar{V} = v \left[\underline{-\theta_0} \right]$$

v = valor eficaz del voltaje.

La barra horizontal indica que son fasores.

La sustitución de $p = j\omega_e$ y $\omega_r = (1-s)\omega_e$ en las ecuaciones 3.1, 3.2, 3.22 y 3.23 para acción generatriz da como resultado las siguientes ecuaciones fasoriales:

$$\bar{V} = -r_s \bar{I}_{qs} + js \bar{\Psi}_{qs} + (1-s) \bar{\Psi}_{ds} \quad 3.30.$$

$$j\bar{V} = -r_s \bar{I}_{ds} + js \bar{\Psi}_{ds} - (1-s) \bar{\Psi}_{qs} \quad 3.31.$$

$$\bar{\Psi}_{ds} = -X_d(j\omega_e) \bar{I}_{ds} \quad 3.32.$$

$$\bar{\Psi}_{qs} = -\bar{X}_q(j\omega_e)\bar{I}_{qs} \quad 3.33.$$

De 3.32 y 3.33:

$$\bar{I}_{ds} = -\frac{1}{\bar{X}_d(j\omega_e)}\bar{\Psi}_{ds} \quad 3.34.$$

$$\bar{I}_{qs} = -\frac{1}{\bar{X}_q(j\omega_e)}\bar{\Psi}_{qs} \quad 3.35.$$

Como $\bar{X}_d(j\omega_e)$ y $\bar{X}_q(j\omega_e)$ se obtienen de los circuitos equivalentes de las figuras 3.1 y 3.2, se deduce lo siguiente:

$$\frac{1}{\bar{X}_d(j\omega_e)} = D + jE$$

$$\frac{1}{\bar{X}_q(j\omega_e)} = F + jG$$

Y las ecuaciones 3.34 y 3.35 se escriben así:

$$\bar{I}_{ds} = -(D + jE)\bar{\Psi}_{ds} \quad 3.36.$$

$$\bar{I}_{qs} = -(F + jG) \bar{\Psi}_{qs} \quad 3.37.$$

Sustituyendo 3.36 y 3.37 en 3.30 y 3.31 :

$$\bar{V} = [r_s F + j(r_s G + s)] \bar{\Psi}_{qs} + (1-s) \bar{\Psi}_{ds} \quad 3.38$$

$$j\bar{V} = -(1-s) \bar{\Psi}_{qs} + [r_s D + j(r_s E + s)] \bar{\Psi}_{ds} \quad 3.39$$

Resolviendo 3.38 y 3.39 para $\bar{\Psi}_{qs}$ y $\bar{\Psi}_{ds}$

$$\Delta = \begin{vmatrix} [r_s F + j(r_s G + s)] & (1-s) \\ -(1-s) & [r_s D + j(r_s E + s)] \end{vmatrix}$$

$$\Delta = [(1-2s) - sr_s(E+G) + r_s^2(DF-EG)] + j[sr_s(D+F) + r_s^2(DG+EF)] \quad 3.40.$$

$$\Delta \bar{\Psi}_{qs} = \begin{vmatrix} \bar{V} & (1-s) \\ j\bar{V} & [r_s D + j(r_s E + s)] \end{vmatrix}$$

$$\Delta \bar{\Psi}_{qs} = \bar{V} \{ r_s D + j[r_s E - (1-2s)] \} \quad 3.41.$$

$$\Delta \bar{\Psi}_{ds} = \begin{vmatrix} [r_s F + j(r_s G + s)] & \bar{V} \\ -(1-s) & j\bar{V} \end{vmatrix}$$

$$\Delta \bar{\Psi}_{ds} = \bar{V} \{ [(1-2s) - r_s G] + jr_s F \} \quad 3.42.$$

De 3.40, 3.41 y 3.42

$$\bar{\psi}_{ds} = \frac{\Delta \bar{\psi}_{ds}}{\Delta} \quad \Rightarrow \quad \bar{\psi}_{ds} = \frac{\Delta \bar{\psi}_{ds} \cdot \Delta^*}{\Delta_1} \quad 3.43.$$

$$\bar{\psi}_{qs} = \frac{\Delta \bar{\psi}_{qs}}{\Delta} \quad \Rightarrow \quad \bar{\psi}_{qs} = \frac{\Delta \bar{\psi}_{qs} \cdot \Delta^*}{\Delta_1} \quad 3.44.$$

Donde:

Δ^* = conjugada de Δ

$$\Delta_1 = \Delta \cdot \Delta^*$$

$$\Delta_1 = \left[(1-2s) - sr_s(E+G) + r_s^2(DF-EG) \right]^2 + \left[sr_s(D+F) + r_s^2(DG+EF) \right]^2$$

Realizando las operaciones indicadas en las ecuaciones 3.43 y 3.44 se obtienen las ecuaciones 3.45 y 3.46:

$$\bar{\psi}_{ds} = \bar{v}(k_{1d} + jk_{2d}) \quad 3.45.$$

$$\bar{\psi}_{qs} = \bar{v}(k_{1q} + jk_{2q}) \quad 3.46.$$

Donde:

$$k_{1d} = \frac{(1-2s) \left[(1-2s) - r_s G - s r_s (E+G) + r_s^2 (DF-EG) \right] + s r_s^2 (F^2+G^2+DF+EG) + r_s^3 E (F^2+G^2)}{\Delta_1}$$

$$k_{2d} = \frac{(1-2s) \left[r_s F - s r_s (D+F) - r_s^2 (DG+EF) \right] - s r_s^2 (EF-DG) + r_s^3 D (F^2+G^2)}{\Delta_1}$$

$$k_{1q} = \frac{(1-2s) \left[r_s D - s r_s (D+F) - r_s^2 (DG+EF) \right] + s r_s^2 (EF-DG) + r_s^3 F (D^2+E^2)}{\Delta_1}$$

$$k_{2q} = \frac{(1-2s) \left[(2s-1) + r_s E + s r_s (E+G) - r_s^2 (DF-EG) \right] - s r_s^2 (D^2+E^2+DF+EG) - r_s^3 G (D^2+E^2)}{\Delta_1}$$

De 3.27 y 3.28 se concluye:

$$\bar{V} = v_{qs} - j v_{ds} \quad 3.47.$$

Reemplazando 3.47 en 3.45 y 3.46:

$$\bar{\Psi}_{ds} = (k_{1d} v_{qs} + k_{2d} v_{ds}) + j(k_{2d} v_{qs} - k_{1d} v_{ds}) \quad 3.48.$$

$$\bar{\Psi}_{qs} = (k_{1q} v_{qs} + k_{2q} v_{ds}) + j(k_{2q} v_{qs} - k_{1q} v_{ds}) \quad 3.49.$$

Las corrientes se determinan substituyendo las ecuaciones 3.48 y 3.49 respectivamente en las ecuaciones 3.36. y 3.37:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{ds} = & \left[(Ek_{2d} - Dk_{1d})v_{qs} - (Dk_{2d} + Ek_{1d})v_{ds} \right] \\ & + j \left[-(Dk_{2d} + Ek_{1d})v_{qs} + (Dk_{1d} - Ek_{2d})v_{ds} \right] \end{aligned} \quad 3.50.$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{qs} = & \left[(Gk_{2q} - Fk_{1q})v_{qs} - (Fk_{2q} + Gk_{1q})v_{ds} \right] \\ & + j \left[-(Fk_{2q} + Gk_{1q})v_{qs} + (Fk_{1q} - Gk_{2q})v_{ds} \right] \end{aligned} \quad 3.51.$$

3.2.4. DETERMINACION DE LAS CONCATENACIONES DE FLUJO Y CORRIENTES INCLUYENDO EL EFECTO DE LA EXCITACION

La consideración que únicamente el arrollamiento de excitación de la máquina está alimentado, permite concluir que tanto las concatenaciones de flujo como las corrientes resultantes de la excitación del campo son cantidades constantes. Estas concatenaciones y corrientes pueden obtenerse por substitución de $v_{ds} = v_{qs} = 0$ y $p = 0$ en las ecuaciones 3.1, 3.2, 3.17 y 3.20

$$0 = -r_s i_{qsf} + (1-s) \psi_{dsf} \quad 3.52.$$

$$0 = -r_s i_{dsf} - (1-s) \psi_{qsf} \quad 3.53.$$

$$\psi_{dsf} = -x_d i_{dsf} + \frac{x_{ad}}{r'_{fd}} v'_{fd} \quad 3.54.$$

$$\psi_{qsf} = -x_q i_{qsf} \quad 3.55.$$

El subíndice "f" denota la componente de la resultante por la presencia de la excitación del campo.

Despejando i_{qsf} e i_{dsf} de 3.54 y 3.55:

$$i_{qsf} = -\frac{\psi_{qsf}}{x_q} \quad 3.56.$$

$$i_{dsf} = \frac{x_{ad} v'_{fd}}{x_d r'_{fd}} - \frac{\psi_{dsf}}{x_d} \quad 3.57.$$

Sustituyendo 3.56 y 3.57 respectivamente en 3.52. y 3.53.

$$0 = \frac{r_s}{x_q} \psi_{qsf} + (1-s) \psi_{dsf} \quad 3.58.$$

$$\frac{r_s x_{ad} v'_{fd}}{x_d r'_{fd}} = -(1-s) \psi_{qsf} + \frac{r_s}{x_d} \psi_{dsf} \quad 3.59.$$

Resolviendo 3.58 y 3.59 para ψ_{qsf} y ψ_{dsf} :

$$\Delta = \begin{vmatrix} \frac{r_s}{x_q} & (1-s) \\ -(1-s) & \frac{r_s}{x_d} \end{vmatrix}$$

$$\Delta = \frac{r_s^2}{x_d x_q} + (1-s)^2 \quad 3.60.$$

$$\Delta \psi_{qsf} = \begin{vmatrix} 0 & (1-s) \\ \frac{r_s x_{ad} v'_{fd}}{x_d r'_{fd}} & \frac{r_s}{x_d} \end{vmatrix}$$

$$\Delta \psi_{qsf} = -(1-s) \frac{r_s x_{ad} v'_{fd}}{x_d r'_{fd}} \quad 3.61.$$

$$\Delta \psi_{dsf} = \begin{vmatrix} \frac{r_s}{x_q} & 0 \\ -(1-s) & \frac{r_s x_{ad} v'_{fd}}{x_d r'_{fd}} \end{vmatrix}$$

$$\Delta \psi_{dsf} = \frac{r_s^2 x_{ad} v'_{fd}}{x_d x_q r'_{fd}} \quad 3.62.$$

De 3.61 y 3.62:

$$\psi_{qsf} = \frac{\Delta\psi_{qsf}}{\Delta} \quad \psi_{dsf} = \frac{\Delta\psi_{dsf}}{\Delta}$$

Sustituyendo $\Delta\psi_{qsf}$, $\Delta\psi_{dsf}$ y Δ :

$$\psi_{qsf} = k_{fq} v'_{fd} \quad 3.63.$$

$$\psi_{dsf} = k_{fd} v'_{fd} \quad 3.64.$$

Donde:

$$k_{fq} = - \frac{(1-s) \frac{r_s x_{ad}}{x_d}}{\Delta_2}$$

$$k_{fd} = \frac{\frac{r_s^2 x_{ad}}{x_d x_q}}{\Delta_2}$$

$$\Delta_2 = r'_{fd} \left[\frac{r_s^2}{x_d x_q} + (1-s)^2 \right]$$

Sustituyendo 3.63 y 3.64 en 3.56 y 3.57:

$$i_{qsf} = - \frac{k_{fq}}{x_q} v'_{fd} \quad 3.65.$$

$$i_{dsf} = \frac{1}{x_{ad}} \left(\frac{x_{ad}}{r'_{fd}} - k_{fd} \right) v'_{fd} \quad 3.66.$$

Por superposición de las ecuaciones correspondientes a las concatenaciones de flujo y corrientes desarrolladas en el numeral anterior (3.2.3.), y las ecuaciones 3.63., 3.64., 3.65 y 3.66., como también el reemplazo respectivo de v_{qs} y v_{ds} (ecuaciones 3.27 y 3.28), se obtienen las expresiones matemáticas resultantes para las concatenaciones de flujo y corrientes incluyendo el efecto de la excitación. Así:

De 3.48 y 3.64

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= \text{Real} (\bar{\psi}_{ds}) + \psi_{dsf} \\ \psi_{ds} &= v \left[k_{1d} \cos(\omega_e t - \theta_0) - k_{2d} \text{sen}(\omega_e t - \theta_0) \right] + k_{fd} v'_{fd} \quad 3.67. \end{aligned}$$

De 3.49 y 3.63

$$\begin{aligned} \psi_{qs} &= \text{Real} (\bar{\psi}_{qs}) + \psi_{qsf} \\ \psi_{qs} &= v \left[k_{1q} \cos(\omega_e t - \theta_0) - k_{2q} \text{sen}(\omega_e t - \theta_0) \right] + k_{fq} v'_{fd} \quad 3.68. \end{aligned}$$

De 3.50 y 3.66.

$$i_{ds} = \text{Real} (\bar{I}_{ds}) + i_{dsf}$$

$$i_{ds} = v \left[(Ek_{2d} - Dk_{1d}) \cos(\omega_e t - \theta_0) + (Dk_{2d} + Ek_{1d}) \text{sen}(\omega_e t - \theta_0) \right] \\ + \frac{1}{x_d} \left(\frac{x_{ad}}{r'_{fd}} - k_{fd} \right) v'_{fd} \quad 3.69.$$

De 3.51 y 3.65

$$i_{qs} = \text{Real} (\bar{I}_{qs}) + i_{qsf}$$

$$i_{qs} = v \left[(Gk_{2q} - Fk_{1q}) \cos(\omega_e t - \theta_0) + (Fk_{2q} + Gk_{1q}) \text{sen}(\omega_e t - \theta_0) \right] \\ - \frac{k_{fq}}{x_q} v'_{fd} \quad 3.70.$$

Las ecuaciones 3.27, 3.28, 3.67, 3.68, 3.69 y 3.70 son las ecuaciones de voltajes, concatenaciones y corrientes en los ejes q y d.

3.3. ECUACIONES DE CORRIENTE, POTENCIAS ACTIVA Y REACTIVA

3.3.1. ECUACION DE CORRIENTE

Utilizando la transformada inversa de Park descrita en el capítulo 1. (ecuación 1.33.), se obtiene para la corriente de armadura la siguiente expresión:

$$i_{as} = i_{qs} \cos \theta_r + i_{ds} \sin \theta_r \quad 3.71.$$

Sustituyendo 3.69 y 3.70 en 3.71:

$$\begin{aligned} i_{as} = & v \left[(Gk_{2q} - Fk_{1q}) \cos(sw_e t - \theta_0) + (Fk_{2q} + Gk_{1q}) \sin(sw_e t - \theta_0) \right] \cos \theta_r \\ & + v \left[(Ek_{2d} - Dk_{1d}) \cos(sw_e t - \theta_0) + (Dk_{2d} + Ek_{1d}) \sin(sw_e t - \theta_0) \right] \sin \theta_r \\ & + v'_{fd} \left[-\frac{k_{fq}}{x_q} \cos \theta_r + \frac{1}{x_d} \left(\frac{x_{ad}}{r'_{fd}} - k_{fd} \right) \sin \theta_r \right] \quad 3.72. \end{aligned}$$

Reemplazando el valor de θ_r (ecuación 3.25) en 3.72. y realizando las correspondientes operaciones trigonométricas se obtiene:

$$\begin{aligned} i_{as} = & \frac{v}{2} \left[k_1 \cos w_e t + k_2 \sin w_e t + k_3 \cos \{(1-2s)w_e t + 2\theta_0\} + k_4 \sin \{(1-2s)w_e t + 2\theta_0\} \right] \\ & + v'_{fd} \left[k_5 \cos \{(1-s)w_e t + \theta_0\} + k_6 \sin \{(1-s)w_e t + \theta_0\} \right] \quad 3.73. \end{aligned}$$

donde:

$$k_1 = Gk_{2q} - Fk_{1q} - Dk_{2d} - Ek_{1d}$$

$$k_2 = Fk_{2q} + Gk_{1q} + Ek_{2d} - Dk_{1d}$$

$$k_3 = Gk_{2q} - Fk_{1q} + Dk_{2d} + Ek_{1d}$$

$$k_4 = -Fk_{2q} - Gk_{1q} + Ek_{2d} - Dk_{1d}$$

$$k_5 = -\frac{k_{fq}}{x_q}$$

$$k_6 = \frac{1}{x_d} \left(\frac{x_{ad}}{r'_{fd}} - k_{fd} \right)$$

De la ecuación 3.73 se desprende que la corriente está formada por tres componentes: una de frecuencia fundamental y las otras de frecuencias $(1-2s)\omega_e$ y $(1-s)\omega_e$ respectivamente. Por lo tanto, la ecuación 3.73 puede escribirse de la siguiente manera:

$$i_{as} = i_{a1} + i_{a2} + i_{a3} \quad 3.74.$$

Donde:

$$i_{a1} = \frac{v}{2} [k_1 \cos \omega_e t + k_2 \text{sen } \omega_e t]$$

$$i_{a2} = \frac{v}{2} [k_3 \cos \{(1-2s)\omega_e t + 2\theta_0\} + k_4 \text{sen} \{(1-2s)\omega_e t + 2\theta_0\}]$$

$$i_{a3} = v'_{fd} [k_5 \cos \{(1-s)\omega_e t + \theta_0\} + k_6 \text{sen} \{(1-s)\omega_e t + \theta_0\}]$$

3.3.2. ECUACION DE POTENCIA ACTIVA

La potencia activa puede calcularse a partir de la

siguiente ecuación:

$$P = v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds} \quad 3.75.$$

Sustituyendo 3.27, 3.28, 3.69 y 3.70 en 3.75:

$$P = v^2 \cos(sw_e t - \theta_0) \left[(Gk_{2q} - Fk_{1q}) \cos(sw_e t - \theta_0) + (Fk_{2q} + Gk_{1q}) \operatorname{sen}(sw_e t - \theta_0) \right] \\ - v^2 \operatorname{sen}(sw_e t - \theta_0) \left[(Ek_{2d} - Dk_{1d}) \cos(sw_e t - \theta_0) + (Dk_{2d} + Ek_{1d}) \operatorname{sen}(sw_e t - \theta_0) \right] \\ - vv'_{fd} \left[\frac{k_{fq}}{x_q} \cos(sw_e t - \theta_0) + \frac{1}{x_d} \left(\frac{x_{ad}}{r'_{fd}} - k_{fd} \right) \operatorname{sen}(sw_e t - \theta_0) \right] \quad 3.76.$$

Resolviendo las operaciones matemáticas indicadas:

$$P = \frac{v^2}{2} \left[k_7 + k_8 \cos(2sw_e t - 2\theta_0) + k_9 \operatorname{sen}(2sw_e t - 2\theta_0) \right] \\ + v v'_{fd} \left[k_{10} \cos(sw_e t - \theta_0) + k_{11} \operatorname{sen}(sw_e t - \theta_0) \right] \quad 3.77.$$

Donde:

$$k_7 = k_1$$

$$k_8 = k_3$$

$$k_9 = -k_4$$

$$k_{10} = k_5$$

$$k_{11} = -k_6$$

La ecuación 3.77. indica que la potencia activa está formada por tres componentes: una independiente del tiempo y dos de frecuencias $2\omega_e$ y ω_e respectivamente. Por lo tanto, la ecuación 3.77 puede escribirse como:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad 3.78.$$

Donde:

$$P_1 = \frac{v^2}{2} k_7$$

$$P_2 = \frac{v^2}{2} [k_8 \cos(2\omega_e t - 2\theta_0) + k_9 \sin(2\omega_e t - 2\theta_0)]$$

$$P_3 = v v'_{fd} [k_{10} \cos(\omega_e t - \theta_0) + k_{11} \sin(\omega_e t - \theta_0)]$$

3.3.3. ECUACION DE POTENCIA REACTIVA

La potencia reactiva puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \quad 3.79.$$

Al igual que para el cálculo de la potencia activa,

sustituyendo en 3.79 las ecuaciones 3.27, 3.28, 3.69, 3.70 y realizando las correspondientes operaciones matemáticas se obtiene:

$$Q = \frac{v^2}{2} \left[k_{12} + k_{13} \cos(2sw_e t - 2\theta_0) + k_{14} \operatorname{sen}(2sw_e t - 2\theta_0) \right] + v v'_{fd} \left[k_{15} \cos(sw_e t - \theta_0) + k_{16} \operatorname{sen}(sw_e t - \theta_0) \right] \quad 3.80.$$

Donde:

$$k_{12} = k_2$$

$$k_{13} = k_4$$

$$k_{14} = k_3$$

$$k_{15} = k_6$$

$$k_{16} = k_5$$

La potencia Q también está formada por tres componentes: una independiente del tiempo y dos de frecuencias $2sw_e$ y sw_e respectivamente. Por lo tanto, la ecuación 3.80. queda de la siguiente manera:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad 3.81.$$

Donde:

$$Q_1 = \frac{v^2}{2} k_{12}$$

$$Q_2 = \frac{v^2}{2} [k_{13} \cos(2s\omega_e t - 2\theta_0) + k_{14} \text{sen}(2s\omega_e t - 2\theta_0)]$$

$$Q_3 = v v'_{fd} [k_{15} \cos(s\omega_e t - \theta_0) + k_{16} \text{sen}(s\omega_e t - \theta_0)]$$

3.4. ESTUDIO DEL CAMPO

3.4.1. CORRIENTE INDUCIDA EN EL CAMPO CUANDO EL BOBINADO DE CAMPO ESTA CORTOCIRCUITADO

Cuando el generador está operando asincrónicamente, el rotor gira a una velocidad diferente de la sincrónica y una corriente se inducirá en el bobinado de campo si éste está cortocircuitado.

La expresión matemática de la corriente inducida se obtiene a partir de las ecuaciones de voltaje del circuito de campo y del devanado amortiguador en el eje d. Así, haciendo $v'_{fd} = 0$ y substituyendo las ecuaciones 3.11 y 3.12 respectivamente en las ecuaciones 3.5 y 3.6 se tiene:

$$-\frac{p}{w_e} x_{ad} i'_{fd} = (B + \frac{p}{w_e} x_{ad}) i'_{kd} + \frac{p}{w_e} x_{ad} i_{ds} \quad 3.82.$$

$$-(A + \frac{p}{w_e} x_{ad}) i'_{fd} = \frac{p}{w_e} x_{ad} i'_{kd} + \frac{p}{w_e} x_{ad} i_{ds} \quad 3.83.$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores para i'_{kd} e i_{ds}

$$\Delta = \begin{vmatrix} (B + \frac{p}{w_e} x_{ad}) & \frac{p}{w_e} x_{ad} \\ \frac{p}{w_e} x_{ad} & \frac{p}{w_e} x_{ad} \end{vmatrix}$$

$$\Delta = B \frac{p}{w_e} x_{ad}$$

$$\Delta i'_{kd} = \begin{vmatrix} -\frac{p}{w_e} x_{ad} i'_{fd} & \frac{p}{w_e} x_{ad} \\ -(A + \frac{p}{w_e} x_{ad}) i'_{fd} & \frac{p}{w_e} x_{ad} \end{vmatrix}$$

$$\Delta i'_{kd} = \frac{p}{w_e} x_{ad} A i'_{fd}$$

$$\Delta i_{ds} = \begin{vmatrix} (B + \frac{p}{w_e} x_{ad}) & -\frac{p}{w_e} x_{ad} i'_{fd} \\ \frac{p}{w_e} x_{ad} & -(A + \frac{p}{w_e} x_{ad}) i'_{fd} \end{vmatrix}$$

$$i_{ds} = - \left[AB + \frac{p}{w_e} x_{ad}(A+B) \right] i'_{fd}$$

$$i'_{kd} = \frac{\Delta i'_{kd}}{\Delta}$$

3.84.

$$i_{ds} = \frac{\Delta i_{ds}}{\Delta}$$

Sustituyendo 3.84 en 3.8, y reemplazando los valores correspondientes de Δ , $\Delta i'_{kd}$ y Δi_{ds} :

$$\Psi_{ds} = \left[\frac{-AB(x_{1s} + x_{ad}) - \frac{p}{w_e} x_{ad} x_{1s}(A+B)}{\frac{p}{w_e} x_{ad} B} \right] i'_{fd}$$

$$i'_{fd} = F(p) \Psi_{ds} \quad 3.85.$$

Donde:

$$F(p) = - \frac{\frac{p}{w_e} x_{ad} B}{AB(x_{1s} + x_{ad}) + \frac{p}{w_e} x_{ad} x_{1s}(A+B)}$$

Si el deslizamiento es constante, la corriente de campo variará sinusoidalmente a la frecuencia de deslizamiento y por lo tanto la igualdad 3.85 puede considerarse como una ecuación fasorial.

$$\bar{I}'_{fd} = \bar{F}(j\omega_e) \bar{\Psi}_{ds} \quad 3.86.$$

La sustitución de los fasores $\bar{F}(j\omega_e) = F_1 + jF_2$, y de $\bar{\Psi}_{ds}$ (ecuación 3.48) en 3.86:

$$\begin{aligned} \bar{I}'_{fd} &= (F_1 + jF_2) \left[(k_{1d} v_{qs} + k_{2d} v_{ds}) + j(k_{2d} v_{qs} - k_{1d} v_{ds}) \right] \\ i'_{fd} &= \text{Real}(\bar{I}'_{fd}) + \frac{v'_{fd}}{r'_{fd}} \\ i'_{fd} &= v \left[(F_1 k_{1d} - F_2 k_{2d}) \cos(\omega_e t - \theta_0) - (F_1 k_{2d} + F_2 k_{1d}) \text{sen}(\omega_e t - \theta_0) \right] \\ &\quad + \frac{v'_{fd}}{r'_{fd}} \quad 3.87. \end{aligned}$$

3.4.2. VOLTAJE INDUCIDO EN EL CAMPO CUANDO EL BOBINADO DE CAMPO ESTA EN CIRCUITO ABIERTO

De las ecuaciones 3.6 y 3.12, y sustituyendo en éstas el valor de $i'_{fd} = 0$ se tiene:

$$v'_{fd} = \frac{p}{\omega_e} (x_{ad} i_{ds} + x_{kd} i'_{kd}) \quad 3.88.$$

De las ecuaciones 3.5 y 3.11:

$$0 = r'_{kd} i'_{kd} + \frac{p}{w_e} (x'_{lkd} i'_{kd} + x_{ad} i_{ds} + x_{ad} i'_{kd}) \quad 3.89.$$

Despejando i'_{kd} de la ecuación 3.89, y reemplazando en la ecuación 3.88 se obtiene la ecuación 3.90:

$$v'_{fd} = -H(p) i_{ds} \quad 3.90.$$

Donde:

$$H(p) = \frac{\frac{p}{w_e} x_{ad} B}{\frac{p}{w_e} x_{ad} + B}$$

Si el deslizamiento es constante, éste voltaje variará sinusoidalmente a la frecuencia de deslizamiento, pudiendo la ecuación 3.90 considerarse como una ecuación fasorial:

$$\bar{v}'_{fd} = -\bar{H}(jsw_e) \bar{i}_{ds} \quad 3.91.$$

La substitución de \bar{i}_{ds} (ecuación 3.50) y del fasor $\bar{H}(jsw_e) = H_1 + jH_2$ en 3.91 y considerando únicamente la parte real de este resultado permite determinar el voltaje inducido en el campo

$$v'_{fd} = \text{Real} (\bar{V}'_{fd})$$

$$v'_{fd} = v \left[H_1 (Dk_{1d} - Ek_{2d}) - H_2 (Dk_{2d} + Ek_{1d}) \right] \cos (s w_e t - \theta_0) \\ - v \left[H_1 (Dk_{2d} + Ek_{1d}) + H_2 (Dk_{1d} - Ek_{2d}) \right] \sin (s w_e t - \theta_0) \quad 3.92.$$

Las ecuaciones 3.74, 3.78 y 3.81. correspondientes a la corriente de armadura, potencias activa y reactiva, conjuntamente con las ecuaciones 3.87 y 3.92 correspondientes al campo, representan las expresiones necesarias para estudiar el comportamiento de los generadores sincrónicos cuando operan asincrónicamente a deslizamiento constante.

De las ecuaciones 3.74, 3.78 y 3.81 se desprenden las siguientes conclusiones:

- La corriente, potencia activa y potencia reactiva tienen tres componentes, lo que permite suponer que el torque e lectromagnético también consistirá de componentes similares.
- Las componentes i_{a3} , P_3 y Q_3 desaparecerán si el bobinado de campo no está excitado.

3.92
 Te
 0

- Si el rotor es perfectamente simétrico, esto es, si se substituye $D=F$ y $E=G$ se obtienen las siguientes igualdades:

$$k_3 = k_4 = 0$$

$$k_8 = k_9 = 0$$

$$k_{13} = k_{14} = 0$$

$$\therefore i_{a2} = P_2 = Q_2 = 0$$

Lo que significa que las componentes i_{a2} , P_2 y Q_2 son debidas a la saliencia del rotor, sin embargo, hay que es

(9) tablecer que esta asimetría del rotor existe aún para el caso de máquinas de rotor cilíndrico.

Estas ecuaciones conjuntamente con la ecuación 1.50. correspondiente al torque electromagnético y la ecuación del movimiento 3.93.

$$\Delta w_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \Delta t \quad 3.93.$$

son las ecuaciones a utilizarse en la elaboración del modelo que se describe en el siguiente capítulo.

C A P I T U L O I V

PROGRAMA DIGITAL

4.1. DESCRIPCION GENERAL DEL PROGRAMA

El programa digital está escrito en FORTRAN IV, y se probó en el computador digital IBM/370 del Instituto de Informática y Computación de la Escuela Politécnica Nacional.

El programa digital consta de un programa principal y tres subrutinas, los mismos que se describen a continuación

PROGRAMA PRINCIPAL

El programa principal se encarga de:

- Proceso iterativo para el cálculo de variables tales como: velocidad angular, voltajes, corrientes, potencias y torque.
- Estudio del campo (circuito abierto o cortocircuito)
- Almacenaje de los valores calculados.
- Prueba de terminación.

SUBROUTINA ENT

Esta subrutina se encarga de:

- Escritura de títulos.
- Lectura e impresión de los parámetros de la máquina y de las condiciones iniciales
- Cálculo del ángulo delta.

SUBROUTINA CONST

Esta subrutina se encarga del cálculo de todos los valores reales y complejos que dependen únicamente del deslizamiento, y que son solicitados por el programa principal para el cálculo de voltajes, corrientes, etc.

SUBROUTINA DIBUJO

Esta subrutina presenta los resultados en forma gráfica. Puede dibujar hasta dos variables a la vez, las mismas que se representan respectivamente con los símbolos '*' y '+'

El eje de las ordenadas, está formado por un número de puntos igual a NC, en tanto que el eje de las abscisas por un número de puntos aproximadamente igual a NPUN/5. Las variables NC y NPUN están descritas en el anexo B.

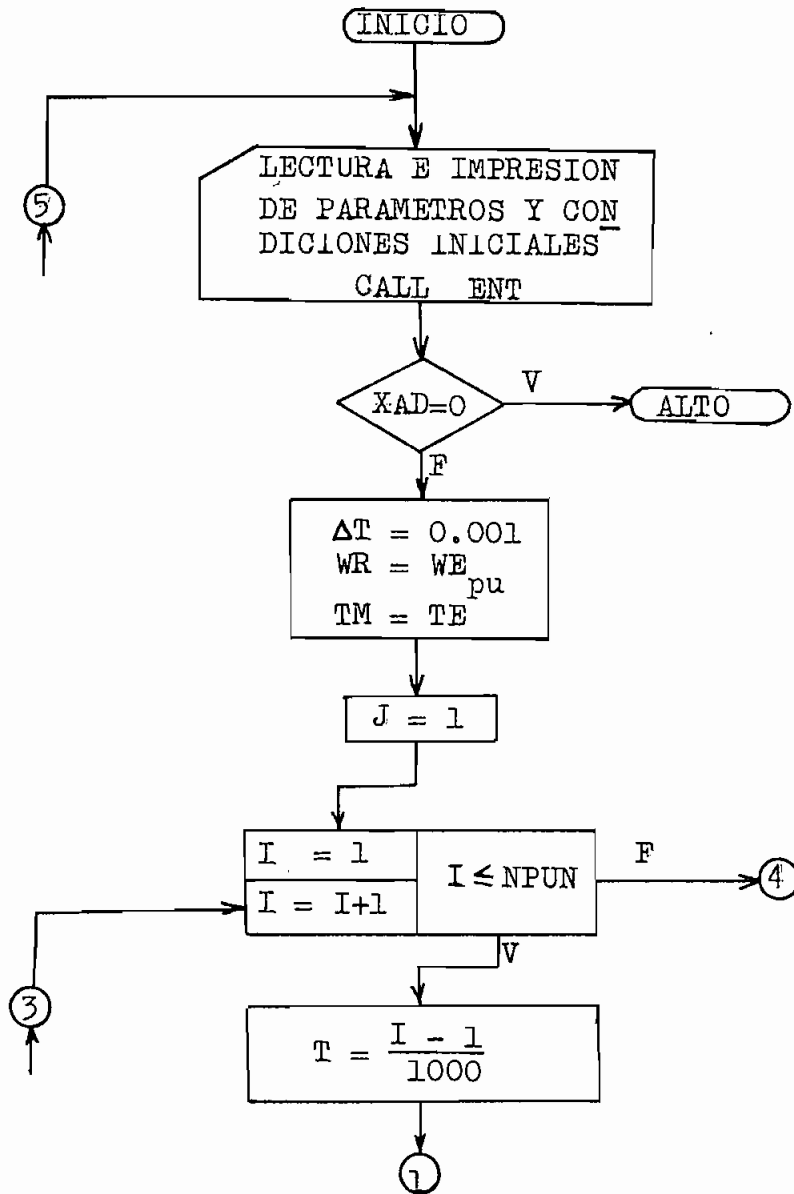
Para facilitar la lectura de los valores dibujados,

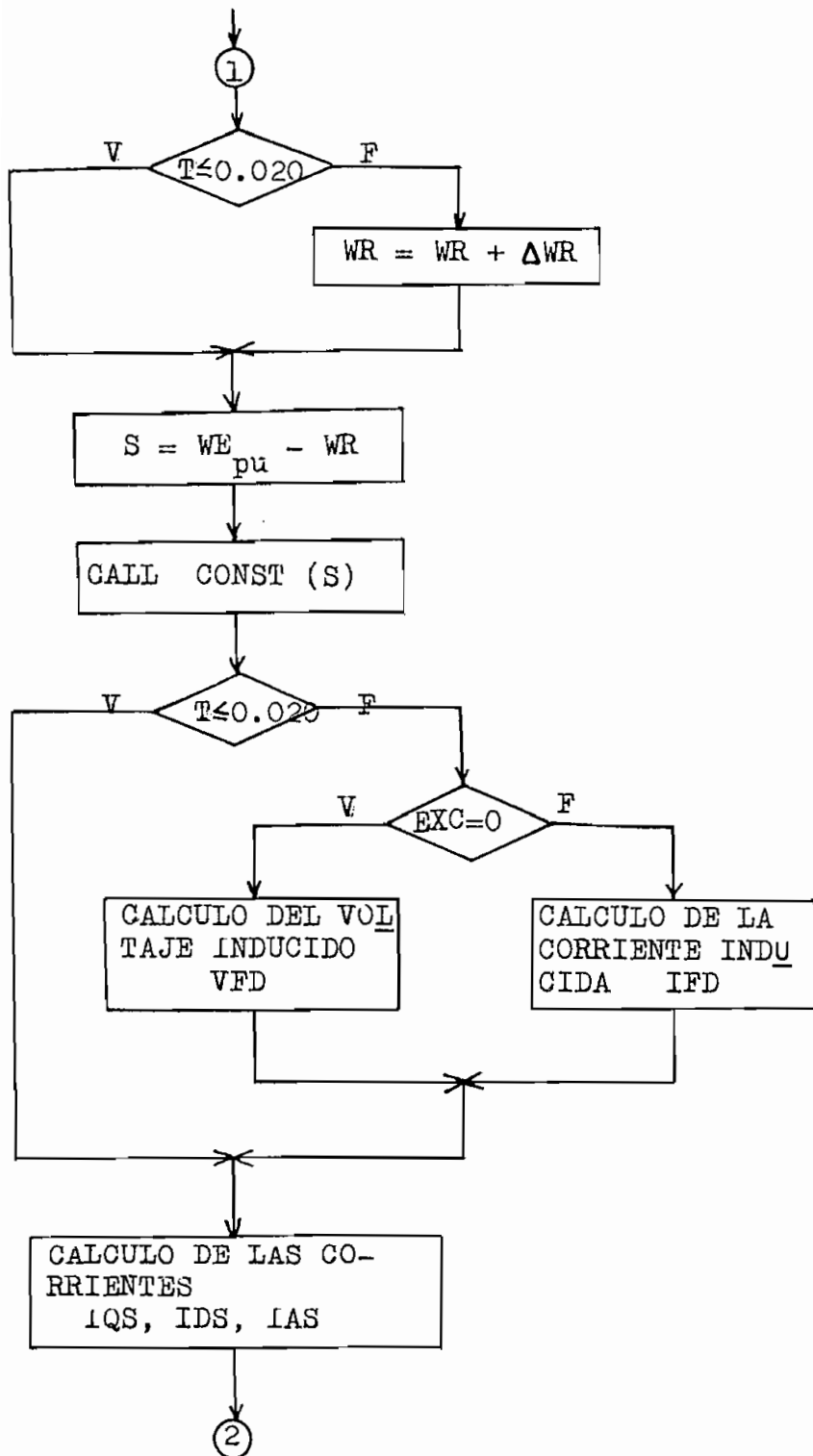
se imprimen cada diez divisiones los valores tanto para el eje de las abscisas como para el eje de las ordenadas.

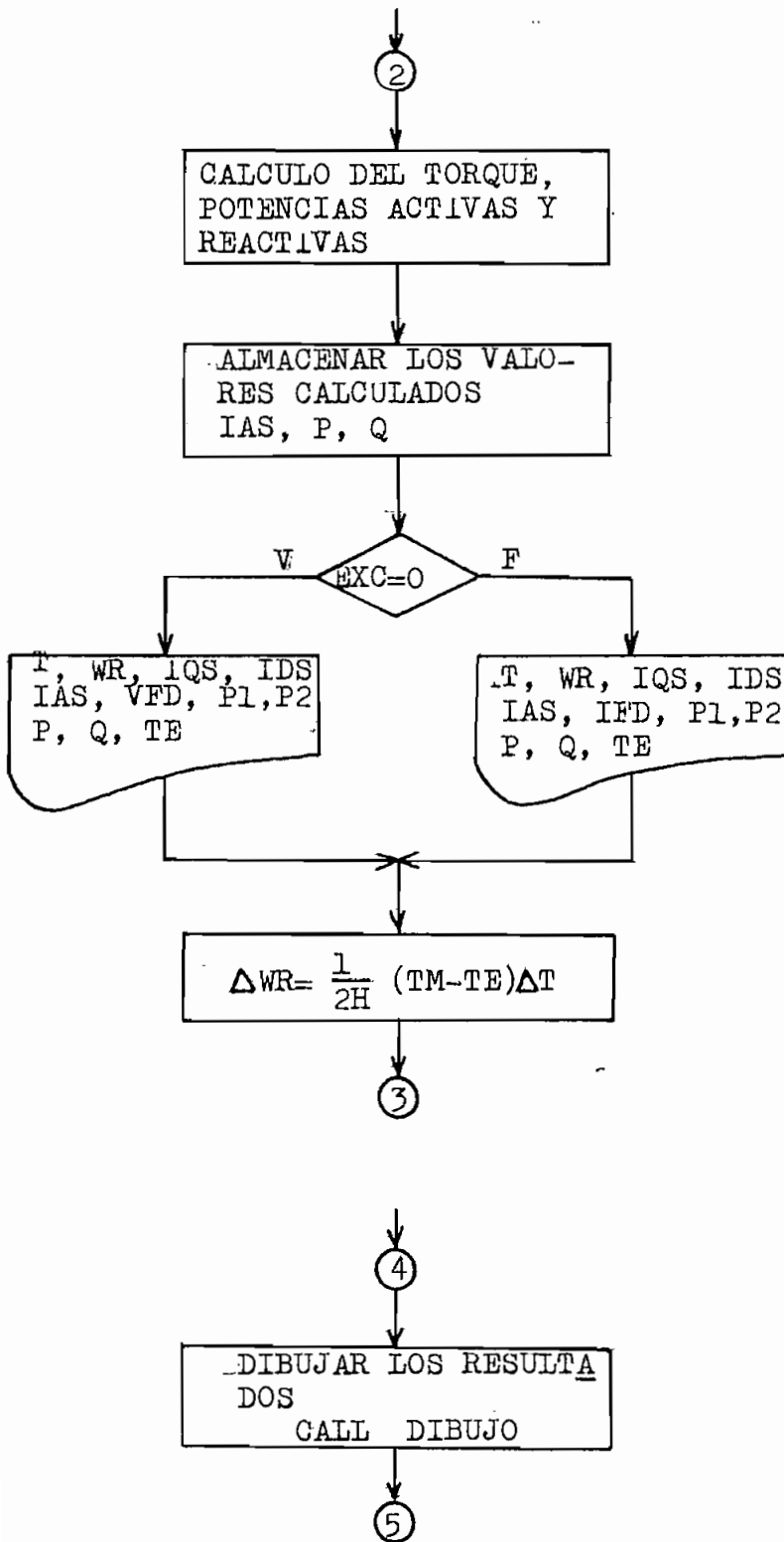
Una descripción más clara del programa principal así como de las subrutinas, se obtiene examinando los diagramas de flujo que se presentan a continuación.

4.2. DIAGRAMAS DE FLUJO (Bibl. 13)

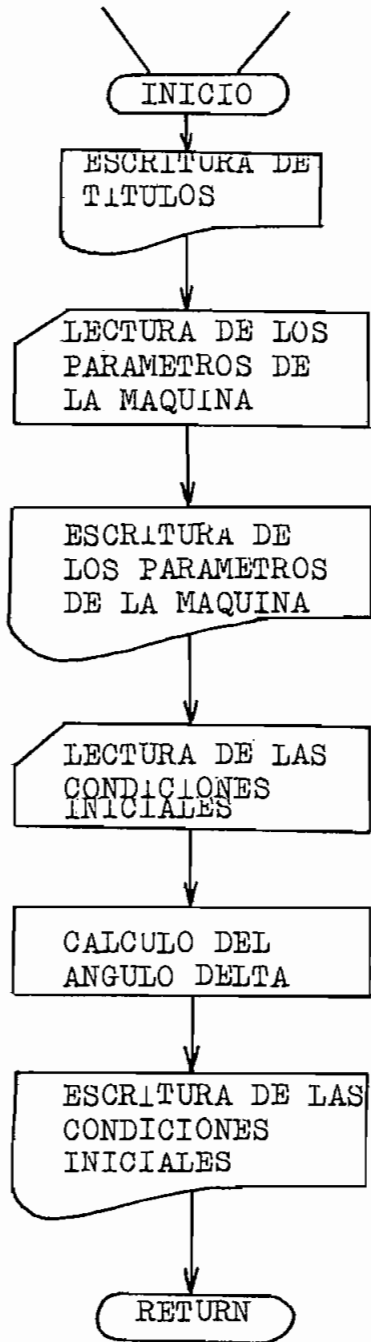
PROGRAMA PRINCIPAL



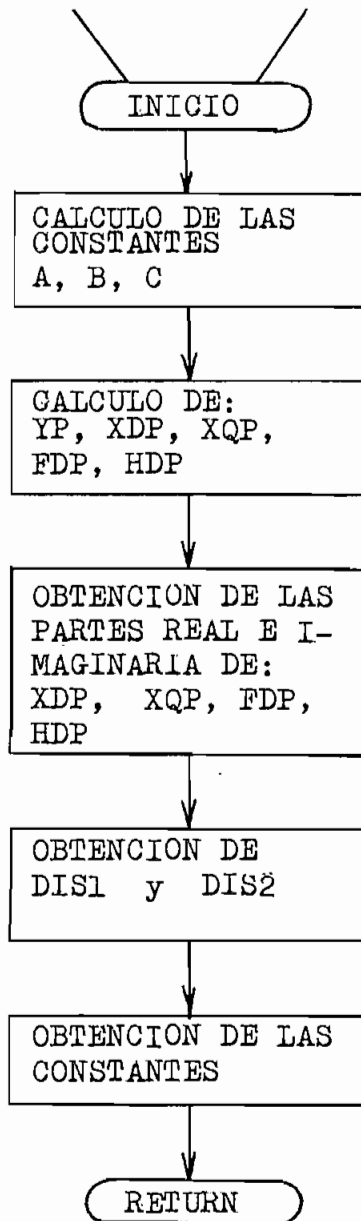


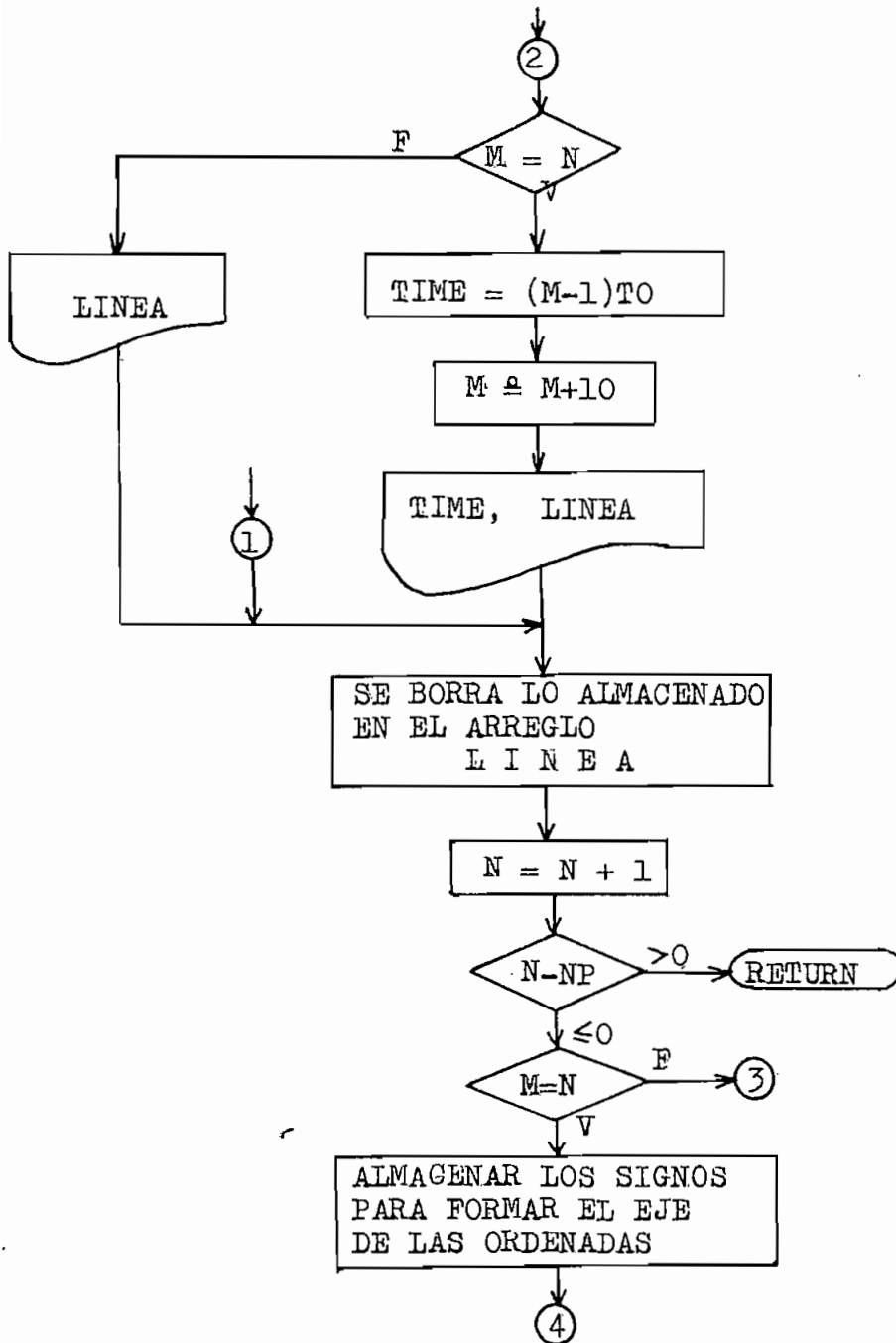


SUBROUTINA ENT



SUBROUTINA CONST





4.3. DESARROLLO DE UN EJEMPLO

El programa digital fue probado para la máquina sin crónica cuyas características y parámetros fundamentales es tán determinados en el anexo A.

En el siguiente ejemplo, se estudian los efectos de la pérdida de excitación, tanto para la condición de cortocircuito como para la condición de circuito abierto en el campo, cuando la máquina operaba normalmente con los valores siguientes:

$$S = 0.642$$

$$V = 0.869$$

$$f_p = 0.8 \text{ en atraso}$$

*datos de parámetros de
lab. anterior*

Tomando como base los valores nominales de la máqui-
na.

4.3.1. OBTENCION DE LA CONSTANTE H (Bibl. 14, 15)

Observando el anexo B, puede notarse que una de las variables de entrada que necesita el programa es la constante

de inercia del conjunto máquina impulsora-generador sincrónico (representada en el programa con la variable HI).

La determinación de H se obtiene a partir del conocimiento del momento de inercia J.

La determinación de J se realiza en base a la llamada prueba de desaceleración, que consiste en registrar la variación $w_r = f(t)$, al interrumpir el suministro de energía a la máquina cuando ésta se encuentra girando a una velocidad conocida (w_e). En estas condiciones, la ecuación diferencial que rige el movimiento queda:

$$J \frac{d w_r}{dt} + D_{\Theta} w_r + T_F = 0 \quad 4.1.$$

Donde:

D_{Θ} = coeficiente de roce viscoso.

T_F = torque de roce seco.

Considerando que en esta tesis se realiza una primera aproximación a la simulación del fenómeno de pérdida de excitación, la obtención de J no se justifica realizarla con ma

yor precisión que con la que se hizo, sino que se obtiene un valor aproximado en base a las siguientes suposiciones:

a) El momento de inercia del conjunto máquina impulsora -máquina sincrónica-tacómetro es aproximado al momento de inercia del conjunto máquina impulsora-máquina sincrónica.

b) Puesto que D_{θ} es prácticamente despreciable, se han considerado a los dos últimos términos de la ecuación 4.1. como un torque T independiente de w_r .

c) La suposición anterior, permite considerar a la variación de $w_r = f(t)$ prácticamente como una función lineal lo cual es correcto para valores de w_r comprendidos entre w_e y $\frac{1}{e}w_e$ ($w_e > w_r > \frac{1}{e}w_e$) como se comprobará posteriormente, en la determinación experimental del momento de inercia.
(fig. 4.3.)

En base a las suposiciones realizadas anteriormente, la ecuación 4.1. que rige el movimiento se expresa de la siguiente manera:

$$J \frac{d w_r}{dt} + T = 0 \quad 4.2.$$

Resolviendo 4.2.

$$w_r = -\frac{T}{J} t + C \quad 4.3.$$

Sustituyendo en 4.3. las igualdades $w_r = w_e$ para $t = 0$:

$$w_r = -\frac{T}{J} t + w_e \quad 4.4.$$

Sustituyendo para $t=t'$, $w_r = \frac{1}{e} w_e$ en 4.4. y despejando J se obtiene:

$$J = \frac{T}{(1 - \frac{1}{e})w_e} t' \quad 4.5.$$

Los valores T y t' necesarios en la ecuación 4.5. para la determinación de J, se obtienen experimentalmente con la prueba de desaceleración, para lo cual, se emplean los circuitos de fuerza y control representados respectivamente por las figuras 4.1 y 4.2.

El conjunto máquina impulsora-generador sincrónico-- (Siemens), está acoplado mecánicamente al tacómetro (tipo 2611) cuya salida es rectificadora por el equipo Ferranti y és-

ta señal es llevada al osciloscopio a través de un divisor de tensión:

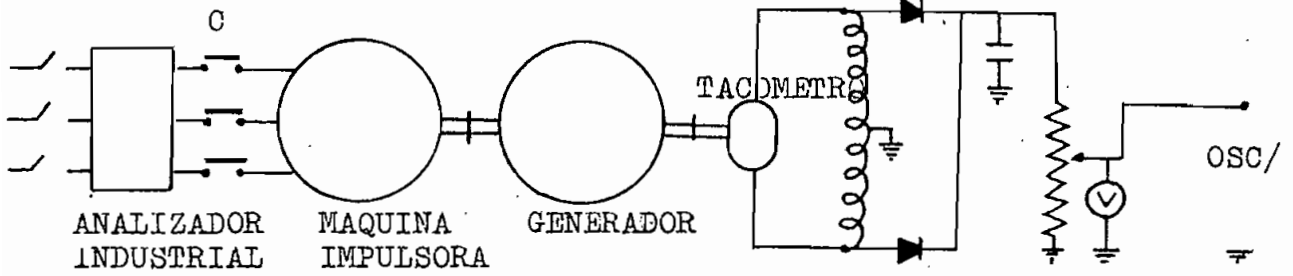


FIG. 4.1.

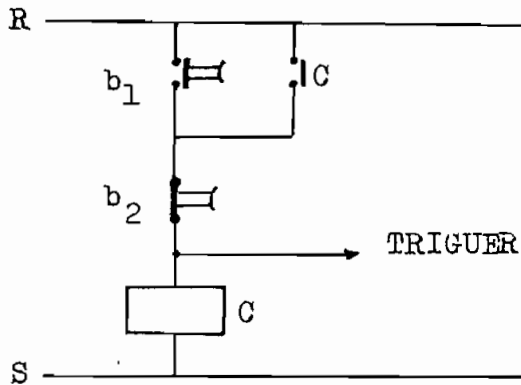


FIG. 4.2.

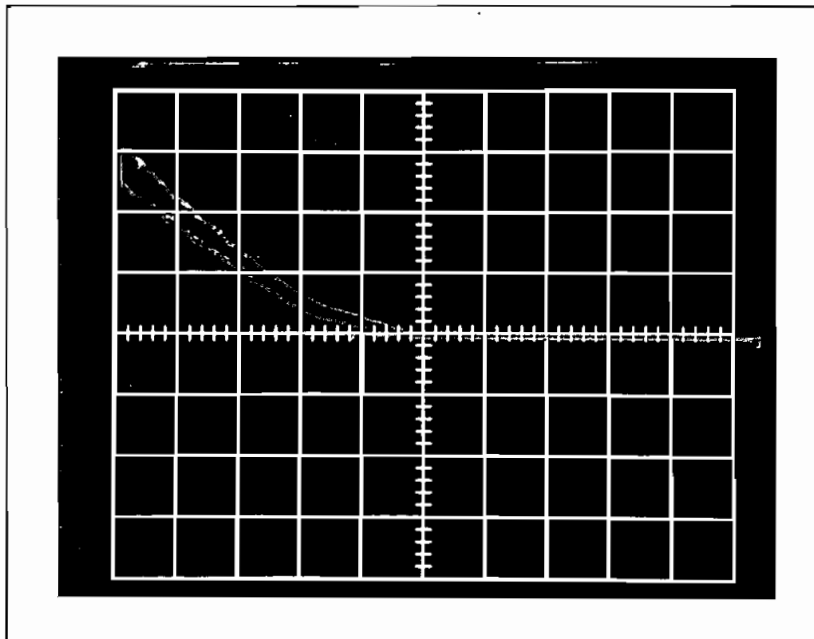
El procedimiento a seguirse es el siguiente:

1. El pulsante b_1 acciona el conjunto máquina impulsora-máquina sincrónica sin excitación-tacómetro y se toman valores de voltaje para diferentes valores de velocidad, obteniéndose la siguiente tabla:

VELOCIDAD (rpm)	VOLTAJE (volt)
1500	4.6
1600	5
1700	5.5
1800	6
1900	6.45
2000	6.9
2100	7.4
2200	7.85
2300	8.3
2400	8.8
2500	9.3

2. Llevando el conjunto a la velocidad sincrónica, se toma el valor de la potencia de entrada P . En este instante y

con el pulsante b_2 se suspende el suministro de energía a la máquina obteniéndose la señal $v=f(t)$ que se observa en la figura 4.3.



2 vol/div.

5 seg/div.

fig. 4.3.

3. De 1. y 2. se establece una relación $v=f(\omega_r)$ y por lo tanto $\omega_r=f(t)$

Tomando de la tabla los siguientes valores:

$$\omega_1 = 1900 \text{ RPM}$$

$$\omega_2 = 1800 \text{ RPM}$$

$$v_1 = 6.45 \text{ v}$$

$$v_2 = 6 \text{ v}$$

Y sustituyéndolos en la ecuación de la recta:

$$\frac{v - v_1}{w - w_1} = \frac{v_2 - v_1}{w_2 - w_1}$$

se obtiene la ecuación 4.6. :

$$v = 0.0045 w - 2.1 \quad 4.6.$$

Donde: w está en RPM; y
 v está en voltios.

Sustituyendo $w = \frac{1}{e} w_e$ en 4.6. :

$$v = 0.88 \text{ vol}$$

Con este valor de voltaje y de la figura 4.3. se determina t'

$$t' = 16 \text{ seg} \quad 4.7.$$

De los valores tomados en el punto 2. de este procedimiento:

$$T = \frac{P}{w_e} = \frac{460 w}{188.5 \text{ rad/seg}} = 2.44 \text{ newton-metro} \quad 4.8.$$

Sustituyendo 4.7 y 4.8 en 4.5:

$$J = 0.327 \text{ Kg m}^2$$

Y de acuerdo a la referencia bibliográfica N°15 se obtiene el valor de H de la siguiente manera:

$$H = \frac{\text{Energía almacenada}}{KVA_n}$$

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_e^2}{KVA_n}$$

$$H = \frac{\frac{1}{2} (0.327)(188.5)^2 10^{-3}}{3.5} \text{ seg}$$

$$H = 1.65 \text{ seg}$$

4.3.2. RESULTADOS

Los resultados se presentan a continuación, primero en forma de lista y luego en forma gráfica. Para el ejemplo desarrollado se han escogido los valores NC=101 y NPUN=501 .

PERDIDA DE EXCITACION DE UN GENERADOR SINCRONICO

PARAMETROS DE LA MAQUINA EN POR UNIDAD

XAD =	0.55403	XLS =	0.04146	XLFD =	0.13498	XLKD =	0.08204	XLKO =	0.24437
XAO =	0.30701	RS =	0.02690	RFD =	0.00507	RKD =	0.00860	RKC =	0.01323

CONDICIONES INICIALES

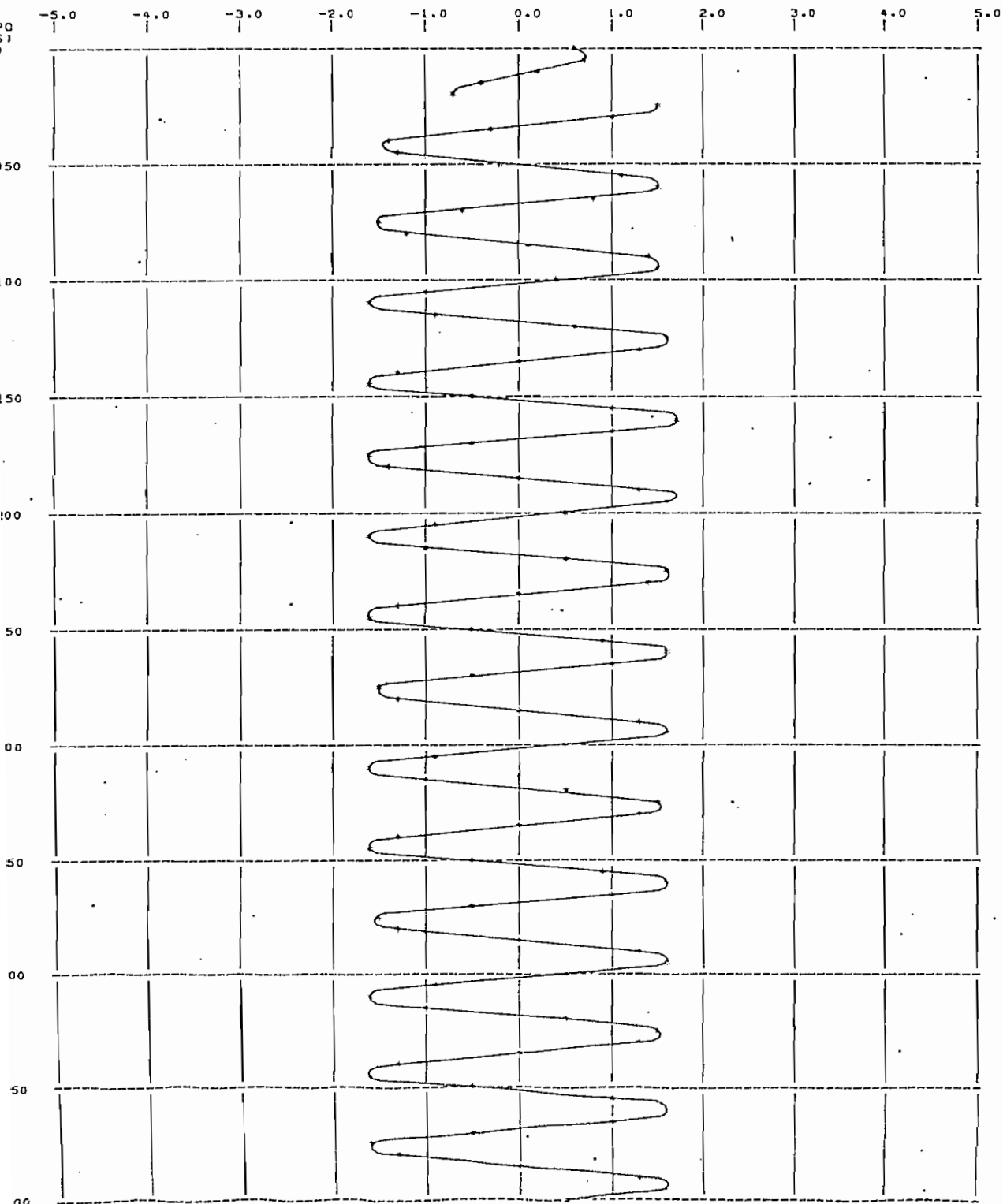
POTENCIA =	0.642	FACTOR DE POTENCIA =	-36.870	EXC =	1
VOLTAJE =	0.869	VELOCIDAD ANGULAR =	188.50	H =	1.65
DELTA =	0.1846	IFD =	2.1312		

170	1.00533	0.0422	-1.2866	-0.1614	0.0597	-0.0770	0.5370	1.3621	0.5348
171	1.00534	0.0438	-1.2452	-0.4934	0.0595	0.6111	-0.0727	0.5386	0.5358
172	1.00533	0.0453	-1.2838	-0.7891	0.0603	0.6394	-0.0713	0.5389	0.5365
173	1.00532	0.0462	-1.2810	-1.0717	0.0611	0.6099	-0.0701	0.5364	0.5360
174	1.00531	0.0496	-1.2795	-1.4376	0.0517	0.6086	-0.0687	0.5399	0.5371
175	1.00530	0.0510	-1.2780	-1.8396	0.0527	0.6078	-0.0673	0.5404	0.5375
176	1.00529	0.0524	-1.2765	-2.2711	0.0536	0.6070	-0.0660	0.5409	0.5379
177	1.00528	0.0539	-1.2756	-2.7346	0.0542	0.6061	-0.0646	0.5415	0.5384
178	1.00527	0.0551	-1.2743	-3.2303	0.0550	0.6052	-0.0632	0.5420	0.5389
179	1.00526	0.0563	-1.2731	-3.7584	0.0558	0.6042	-0.0619	0.5424	0.5391
180	1.00525	0.0578	-1.2717	-4.3201	0.0565	0.6033	-0.0604	0.5429	0.5395
181	1.00525	0.0588	-1.2704	-4.9164	0.0573	0.6023	-0.0590	0.5433	0.5400
182	1.00525	0.0600	-1.2692	-5.5483	0.0580	0.6013	-0.0576	0.5437	0.5409
183	1.00524	0.0612	-1.2681	-6.2166	0.0587	0.6004	-0.0563	0.5441	0.5413
184	1.00524	0.0624	-1.2670	-6.9213	0.0594	0.5994	-0.0550	0.5445	0.5417
185	1.00522	0.0636	-1.2654	-7.6628	0.0709	0.5984	-0.0535	0.5449	0.5421
186	1.00521	0.0646	-1.2642	-8.4419	0.0716	0.5975	-0.0521	0.5452	0.5425
187	1.00520	0.0657	-1.2631	-9.2586	0.0603	0.5964	-0.0507	0.5456	0.5429
188	1.00519	0.0667	-1.2619	-10.1131	0.0730	0.5942	-0.0493	0.5460	0.5432
189	1.00514	0.0678	-1.2607	-11.0084	0.0737	0.5931	-0.0479	0.5463	0.5435
190	1.00517	0.0686	-1.2596	-11.9379	0.0744	0.5921	-0.0465	0.5466	0.5438
191	1.00516	0.0696	-1.2584	-12.9028	0.0751	0.5910	-0.0450	0.5472	0.5441
192	1.00515	0.0706	-1.2573	-13.9033	0.0757	0.5899	-0.0435	0.5476	0.5444
193	1.00514	0.0718	-1.2562	-14.9404	0.0764	0.5888	-0.0420	0.5478	0.5447
194	1.00513	0.0728	-1.2551	-16.0149	0.0771	0.5878	-0.0404	0.5479	0.5450
195	1.00512	0.0737	-1.2540	-17.1270	0.0777	0.5866	-0.0389	0.5480	0.5453
196	1.00511	0.0744	-1.2529	-18.2777	0.0783	0.5855	-0.0373	0.5481	0.5455
197	1.00510	0.0754	-1.2519	-19.4670	0.0790	0.5843	-0.0357	0.5482	0.5457
198	1.00509	0.0762	-1.2508	-20.6959	0.0796	0.5831	-0.0341	0.5483	0.5459
199	1.00508	0.0769	-1.2499	-21.9644	0.0802	0.5819	-0.0324	0.5484	0.5461
200	1.00507	0.0778	-1.2488	-23.2725	0.0808	0.5807	-0.0307	0.5485	0.5463
201	1.00506	0.0786	-1.2478	-24.6201	0.0814	0.5795	-0.0291	0.5486	0.5465
202	1.00505	0.0794	-1.2468	-26.0072	0.0820	0.5783	-0.0274	0.5487	0.5466
203	1.00504	0.0801	-1.2459	-27.4338	0.0826	0.5771	-0.0257	0.5488	0.5468
204	1.00503	0.0808	-1.2449	-28.9000	0.0832	0.5759	-0.0240	0.5489	0.5470
205	1.00502	0.0816	-1.2439	-30.4058	0.0838	0.5747	-0.0223	0.5490	0.5471
206	1.00501	0.0823	-1.2429	-31.9512	0.0844	0.5735	-0.0206	0.5491	0.5473
207	1.00500	0.0830	-1.2421	-33.5362	0.0849	0.5723	-0.0189	0.5492	0.5475
208	1.00499	0.0837	-1.2411	-35.1607	0.0854	0.5711	-0.0172	0.5493	0.5477
209	1.00498	0.0844	-1.2402	-36.8248	0.0860	0.5699	-0.0155	0.5494	0.5478
210	1.00497	0.0851	-1.2393	-38.5285	0.0865	0.5687	-0.0138	0.5495	0.5479
211	1.00496	0.0859	-1.2384	-40.2718	0.0871	0.5675	-0.0121	0.5496	0.5480
212	1.00495	0.0865	-1.2375	-42.0548	0.0876	0.5663	-0.0104	0.5497	0.5481
213	1.00494	0.0871	-1.2366	-43.8775	0.0882	0.5651	-0.0087	0.5498	0.5482
214	1.00493	0.0878	-1.2358	-45.7399	0.0887	0.5639	-0.0070	0.5499	0.5483
215	1.00492	0.0884	-1.2349	-47.6420	0.0892	0.5627	-0.0053	0.5500	0.5484
216	1.00490	0.0890	-1.2341	-49.5848	0.0897	0.5614	-0.0036	0.5501	0.5485
217	1.00489	0.0894	-1.2334	-51.5683	0.0902	0.5602	-0.0019	0.5502	0.5486
218	1.00488	0.0899	-1.2326	-53.5924	0.0906	0.5590	0.0000	0.5503	0.5487
219	1.00487	0.0903	-1.2318	-55.6571	0.0911	0.5578	0.0017	0.5504	0.5488
220	1.00486	0.0908	-1.2311	-57.7624	0.0916	0.5566	0.0034	0.5505	0.5489
221	1.00485	0.0912	-1.2304	-59.9083	0.0920	0.5554	0.0051	0.5506	0.5490
222	1.00484	0.0918	-1.2296	-62.0948	0.0925	0.5542	0.0068	0.5507	0.5491
223	1.00482	0.0922	-1.2287	-64.3219	0.0929	0.5530	0.0085	0.5508	0.5492
224	1.00481	0.0926	-1.2282	-66.5896	0.0934	0.5518	0.0102	0.5509	0.5493
225	1.00480	0.0931	-1.2274	-68.9079	0.0938	0.5506	0.0119	0.5510	0.5494
226	1.00479	0.0935	-1.2267	-71.2668	0.0943	0.5494	0.0136	0.5511	0.5495
227	1.00478	0.0940	-1.2260	-73.6663	0.0947	0.5482	0.0153	0.5512	0.5496
228	1.00477	0.0946	-1.2253	-76.1064	0.0951	0.5471	0.0170	0.5513	0.5497
229	1.00476	0.0951	-1.2245	-78.5871	0.0956	0.5460	0.0187	0.5514	0.5498
230	1.00475	0.0954	-1.2239	-81.1084	0.0960	0.5449	0.0204	0.5515	0.5499
231	1.00474	0.0959	-1.2232	-83.6703	0.0964	0.5438	0.0221	0.5516	0.5500
232	1.00473	0.0963	-1.2225	-86.2728	0.0968	0.5427	0.0238	0.5517	0.5501
233	1.00472	0.0968	-1.2219	-88.9159	0.0972	0.5416	0.0255	0.5518	0.5502
234	1.00471	0.0973	-1.2212	-91.5996	0.0976	0.5405	0.0272	0.5519	0.5503
235	1.00469	0.0977	-1.2205	-94.3239	0.0980	0.5394	0.0289	0.5520	0.5504
236	1.00468	0.0981	-1.2199	-97.0888	0.0984	0.5383	0.0306	0.5521	0.5505
237	1.00467	0.0985	-1.2193	-100.8943	0.0988	0.5372	0.0323	0.5522	0.5506
238	1.00466	0.0990	-1.2186	-104.7404	0.0992	0.5361	0.0340	0.5523	0.5507
239	1.00465	0.0994	-1.2180	-108.6271	0.0996	0.5350	0.0357	0.5524	0.5508
240	1.00464	0.0998	-1.2174	-112.5544	0.0999	0.5339	0.0374	0.5525	0.5509
241	1.00463	1.0001	-1.2168	-116.5223	0.1003	0.5328	0.0391	0.5526	0.5510
242	1.00462	1.0005	-1.2162	-120.5308	0.1006	0.5317	0.0408	0.5527	0.5511
243	1.00461	1.0009	-1.2156	-124.5799	0.1010	0.5306	0.0425	0.5528	0.5512
244	1.00460	1.0013	-1.2150	-128.6696	0.1013	0.5295	0.0442	0.5529	0.5513
245	1.00459	1.0016	-1.2145	-132.7999	0.1017	0.5284	0.0459	0.5530	0.5514
246	1.00458	1.0019	-1.2140	-136.9708	0.1020	0.5273	0.0476	0.5531	0.5515
247	1.00457	1.0022	-1.2134	-141.1823	0.1022	0.5262	0.0493	0.5532	0.5516
248	1.00456	1.0025	-1.2129	-145.4344	0.1025	0.5251	0.0510	0.5533	0.5517
249	1.00455	1.0029	-1.2124	-149.7271	0.1028	0.5240	0.0527	0.5534	0.5518
250	1.00454	1.0033	-1.2118	-154.0604	0.1030	0.5230	0.0544	0.5535	0.5519
251	1.00453	1.0034	-1.2113	-158.4343	0.1033	0.5219	0.0561	0.5536	0.5520
252	1.00452	1.0036	-1.2109	-162.8488	0.1036	0.5208	0.0578	0.5537	0.5521
253	1.00451	1.0040	-1.2104	-167.3039	0.1039	0.5197	0.0595	0.5538	0.5522
254	1.00450	1.0043	-1.2099	-171.7996	0.1042	0.5186	0.0612	0.5539	0.5523
255	1.00449	1.0047	-1.2093	-176.3359	0.1045	0.5175	0.0629	0.5540	0.5524
256	1.00448	1.0047	-1.2088	-180.9128	0.1048	0.5164	0.0646	0.5541	0.5525
257	1.00446	1.0050	-1.2082	-185.5303	0.1050	0.5153	0.0663	0.5542	0.5526
258	1.00445	1.0052	-1.2075	-190.1884	0.1053	0.5142	0.0680	0.5543	0.5527
259	1.00444	1.0052	-1.2068	-194.8871	0.1056	0.5131	0.0697	0.5544	0.5528
260	1.00443	1.0054	-1.2062	-199.6264	0.1059	0.5120	0.0714	0.5545	0.5529
261	1.00442	1.0054	-1.2056	-204.4063	0.1061	0.5109	0.0731	0.5546	0.5530
262	1.00441	1.0054	-1.2050	-209.2268	0.1064	0.5098	0.0748	0.5547	0.5531
263	1.00440	1.0054	-1.2044	-214.0879	0.1066	0.5087	0.0765	0.5548	0.5532
264	1.00439	1.0053	-1.2038	-218.9896	0.1068	0.5076	0.0782	0.5549	0.5533
265	1.00438	1.0053	-1.2032	-223.9319	0.1071	0.5065	0.0799	0.5550	0.5534
266	1.00437	1.0052	-1.2026	-228.9148	0.1073	0.5054	0.0816	0.5551	0.5535
267	1.00436	1.0051	-1.2020	-233.9383	0.1075	0.5043	0.0833	0.5552	0.5536
268	1.00435	1.0050	-1.2014	-238.9924	0.1078	0.5032	0.0850	0.5553	0.5537
269	1.00434	1.0049	-1.2008	-244.0771	0.1080	0.5021	0.0867	0.5554	0.5538
270	1.00433	1.0048	-1.2002	-249.1924	0.1082	0.5010	0.0884	0.5555	0.5539
271	1.00432	1.0047	-1.1996	-254.3383	0.1085	0.4999	0.0901	0.5556	0.5540
272	1.00431	1.0046	-1.1990	-259.5148	0.1087	0.4988	0.0918	0.5557	0.5541
273	1.00430	1.0045	-1.1984	-264.7219	0.1090	0.4977	0.0935	0.5558	0.5542
274	1.00429	1.0044	-1.1978	-270.0596	0.1092	0.4966	0.0952	0.5559	0.5543
275	1.00428	1.0043	-1.1972	-275.5279	0.1094	0.4955	0.0969	0.5560	0.5544
276	1.00427	1.0042	-1.1966	-281.0268	0.1097	0.4944	0.0986	0.5561	0.5545
277	1.00426	1.0041	-1.1960	-286.5563	0.1101	0.4933	0.1003	0.5562	0.5546
278	1.00425	1.0040	-1.1954	-292.1164	0.1103	0.4922	0.1020	0.5563	0.5547
279									

0.344	0.00571	1.229	1.143	-1.6216	0.119	0.4274	0.1159	0.5374	1.334	0.5374	0.5374
0.345	0.00371	1.222	1.137	-1.5599	0.119	0.4277	0.1156	0.5373	1.335	0.5373	0.5373
0.346	0.00370	1.225	1.135	-1.4427	0.119	0.4270	0.1153	0.5372	1.336	0.5372	0.5372
0.347	0.00369	1.230	1.131	-1.5131	0.119	0.4211	0.1160	0.5371	1.336	0.5371	0.5371
0.348	0.00369	1.230	1.131	-1.0613	0.119	0.4203	0.1177	0.5370	1.3297	0.5370	0.5370
0.349	0.00368	1.232	1.129	-1.1827	0.119	0.4195	0.1174	0.5369	1.3297	0.5369	0.5369
0.350	0.00367	1.234	1.127	-1.2727	0.119	0.4187	0.1181	0.5368	1.3297	0.5368	0.5368
0.351	0.00367	1.237	1.125	-1.3700	0.119	0.4180	0.1188	0.5367	1.3297	0.5367	0.5367
0.352	0.00366	1.239	1.123	-1.4744	0.119	0.4172	0.1194	0.5366	1.3297	0.5366	0.5366
0.353	0.00365	1.241	1.122	-1.5859	0.119	0.4164	0.1201	0.5365	1.3297	0.5365	0.5365
0.354	0.00365	1.243	1.120	-1.7044	0.119	0.4157	0.1208	0.5364	1.3297	0.5364	0.5364
0.355	0.00364	1.245	1.119	-1.8299	0.119	0.4150	0.1215	0.5363	1.3297	0.5363	0.5363
0.356	0.00363	1.247	1.117	-1.9624	0.119	0.4142	0.1222	0.5362	1.3297	0.5362	0.5362
0.357	0.00363	1.249	1.116	-2.1019	0.119	0.4133	0.1229	0.5361	1.3297	0.5361	0.5361
0.358	0.00362	1.250	1.114	-2.2484	0.119	0.4125	0.1236	0.5360	1.3297	0.5360	0.5360
0.359	0.00361	1.252	1.113	-2.4019	0.119	0.4118	0.1241	0.5359	1.3297	0.5359	0.5359
0.360	0.00361	1.254	1.111	-2.5624	0.119	0.4110	0.1248	0.5358	1.3297	0.5358	0.5358
0.361	0.00360	1.256	1.110	-2.7299	0.119	0.4102	0.1254	0.5357	1.3297	0.5357	0.5357
0.362	0.00359	1.257	1.109	-2.9044	0.119	0.4094	0.1261	0.5356	1.3297	0.5356	0.5356
0.363	0.00359	1.259	1.107	-3.0859	0.119	0.4086	0.1267	0.5355	1.3297	0.5355	0.5355
0.364	0.00358	1.260	1.106	-3.2744	0.119	0.4078	0.1274	0.5354	1.3297	0.5354	0.5354
0.365	0.00357	1.261	1.105	-3.4699	0.119	0.4071	0.1280	0.5353	1.3297	0.5353	0.5353
0.366	0.00357	1.263	1.103	-3.6724	0.119	0.4063	0.1286	0.5352	1.3297	0.5352	0.5352
0.367	0.00356	1.264	1.103	-3.8819	0.119	0.4055	0.1293	0.5351	1.3297	0.5351	0.5351
0.368	0.00355	1.265	1.102	-4.0984	0.119	0.4047	0.1299	0.5350	1.3297	0.5350	0.5350
0.369	0.00355	1.266	1.101	-4.3219	0.119	0.4039	0.1305	0.5349	1.3297	0.5349	0.5349
0.370	0.00354	1.267	1.100	-4.5524	0.119	0.4031	0.1311	0.5348	1.3297	0.5348	0.5348
0.371	0.00353	1.273	1.100	-4.7899	0.119	0.4023	0.1318	0.5347	1.3297	0.5347	0.5347
0.372	0.00353	1.276	1.100	-5.0344	0.119	0.4015	0.1324	0.5346	1.3297	0.5346	0.5346
0.373	0.00352	1.279	1.100	-5.2859	0.119	0.4007	0.1330	0.5345	1.3297	0.5345	0.5345
0.374	0.00352	1.282	1.100	-5.5444	0.119	0.4000	0.1337	0.5344	1.3297	0.5344	0.5344
0.375	0.00351	1.285	1.100	-5.8099	0.119	0.3992	0.1343	0.5343	1.3297	0.5343	0.5343
0.376	0.00351	1.287	1.100	-6.0824	0.119	0.3984	0.1349	0.5342	1.3297	0.5342	0.5342
0.377	0.00350	1.290	1.100	-6.3619	0.119	0.3976	0.1355	0.5341	1.3297	0.5341	0.5341
0.378	0.00349	1.292	1.100	-6.6484	0.119	0.3968	0.1361	0.5340	1.3297	0.5340	0.5340
0.379	0.00349	1.296	1.100	-6.9419	0.119	0.3960	0.1367	0.5339	1.3297	0.5339	0.5339
0.380	0.00348	1.298	1.100	-7.2424	0.119	0.3952	0.1373	0.5338	1.3297	0.5338	0.5338
0.381	0.00348	1.301	1.100	-7.5499	0.119	0.3944	0.1379	0.5337	1.3297	0.5337	0.5337
0.382	0.00347	1.303	1.100	-7.8644	0.119	0.3936	0.1385	0.5336	1.3297	0.5336	0.5336
0.383	0.00347	1.306	1.100	-8.1859	0.119	0.3928	0.1391	0.5335	1.3297	0.5335	0.5335
0.384	0.00346	1.308	1.100	-8.5144	0.119	0.3920	0.1397	0.5334	1.3297	0.5334	0.5334
0.385	0.00345	1.311	1.100	-8.8499	0.119	0.3912	0.1403	0.5333	1.3297	0.5333	0.5333
0.386	0.00345	1.314	1.100	-9.1924	0.119	0.3904	0.1409	0.5332	1.3297	0.5332	0.5332
0.387	0.00344	1.315	1.100	-9.5419	0.119	0.3896	0.1415	0.5331	1.3297	0.5331	0.5331
0.388	0.00344	1.318	1.100	-9.8984	0.119	0.3888	0.1421	0.5330	1.3297	0.5330	0.5330
0.389	0.00343	1.322	1.100	-10.2619	0.119	0.3880	0.1427	0.5329	1.3297	0.5329	0.5329
0.390	0.00343	1.326	1.100	-10.6324	0.119	0.3872	0.1433	0.5328	1.3297	0.5328	0.5328
0.391	0.00342	1.329	1.100	-11.0099	0.119	0.3864	0.1439	0.5327	1.3297	0.5327	0.5327
0.392	0.00341	1.332	1.100	-11.3944	0.119	0.3856	0.1445	0.5326	1.3297	0.5326	0.5326
0.393	0.00341	1.336	1.100	-11.7859	0.119	0.3848	0.1450	0.5325	1.3297	0.5325	0.5325
0.394	0.00340	1.339	1.100	-12.1844	0.119	0.3840	0.1456	0.5324	1.3297	0.5324	0.5324
0.395	0.00340	1.342	1.100	-12.5899	0.119	0.3832	0.1461	0.5323	1.3297	0.5323	0.5323
0.396	0.00339	1.344	1.100	-12.9924	0.119	0.3824	0.1466	0.5322	1.3297	0.5322	0.5322
0.397	0.00339	1.347	1.100	-13.4019	0.119	0.3816	0.1471	0.5321	1.3297	0.5321	0.5321
0.398	0.00338	1.349	1.100	-13.8184	0.119	0.3808	0.1476	0.5320	1.3297	0.5320	0.5320
0.399	0.00337	1.351	1.100	-14.2419	0.119	0.3800	0.1481	0.5319	1.3297	0.5319	0.5319
0.400	0.00337	1.354	1.100	-14.6724	0.119	0.3792	0.1486	0.5318	1.3297	0.5318	0.5318
0.401	0.00336	1.356	1.100	-15.1099	0.119	0.3784	0.1491	0.5317	1.3297	0.5317	0.5317
0.402	0.00336	1.359	1.100	-15.5544	0.119	0.3776	0.1496	0.5316	1.3297	0.5316	0.5316
0.403	0.00335	1.361	1.100	-16.0059	0.119	0.3768	0.1501	0.5315	1.3297	0.5315	0.5315
0.404	0.00335	1.364	1.100	-16.4644	0.119	0.3760	0.1506	0.5314	1.3297	0.5314	0.5314
0.405	0.00334	1.366	1.100	-16.9299	0.119	0.3752	0.1511	0.5313	1.3297	0.5313	0.5313
0.406	0.00333	1.369	1.100	-17.4024	0.119	0.3744	0.1516	0.5312	1.3297	0.5312	0.5312
0.407	0.00333	1.371	1.100	-17.8819	0.119	0.3736	0.1521	0.5311	1.3297	0.5311	0.5311
0.408	0.00332	1.374	1.100	-18.3684	0.119	0.3728	0.1526	0.5310	1.3297	0.5310	0.5310
0.409	0.00332	1.376	1.100	-18.8619	0.119	0.3720	0.1531	0.5309	1.3297	0.5309	0.5309
0.410	0.00331	1.379	1.100	-19.3624	0.119	0.3712	0.1536	0.5308	1.3297	0.5308	0.5308
0.411	0.00331	1.381	1.100	-19.8699	0.119	0.3704	0.1541	0.5307	1.3297	0.5307	0.5307
0.412	0.00330	1.384	1.100	-20.3844	0.119	0.3696	0.1546	0.5306	1.3297	0.5306	0.5306
0.413	0.00330	1.386	1.100	-20.9059	0.119	0.3688	0.1551	0.5305	1.3297	0.5305	0.5305
0.414	0.00329	1.389	1.100	-21.4344	0.119	0.3680	0.1556	0.5304	1.3297	0.5304	0.5304
0.415	0.00329	1.391	1.100	-21.9699	0.119	0.3672	0.1561	0.5303	1.3297	0.5303	0.5303
0.416	0.00328	1.394	1.100	-22.5124	0.119	0.3664	0.1566	0.5302	1.3297	0.5302	0.5302
0.417	0.00328	1.396	1.100	-23.0619	0.119	0.3656	0.1571	0.5301	1.3297	0.5301	0.5301
0.418	0.00327	1.399	1.100	-23.6184	0.119	0.3648	0.1576	0.5300	1.3297	0.5300	0.5300
0.419	0.00327	1.401	1.100	-24.1819	0.119	0.3640	0.1581	0.5299	1.3297	0.5299	0.5299
0.420	0.00326	1.404	1.100	-24.7524	0.119	0.3632	0.1586	0.5298	1.3297	0.5298	0.5298
0.421	0.00326	1.406	1.100	-25.3299	0.119	0.3624	0.1591	0.5297	1.3297	0.5297	0.5297
0.422	0.00325	1.409	1.100	-25.9144	0.119	0.3616	0.1596	0.5296	1.3297	0.5296	0.5296
0.423	0.00325	1.411	1.100	-26.5059	0.119	0.3608	0.1601	0.5295	1.3297	0.5295	0.5295
0.424	0.00324	1.414	1.100	-27.1044	0.119	0.3600	0.1606	0.5294	1.3297	0.5294	0.5294
0.425	0.00324	1.416	1.100	-27.7099	0.119	0.3592	0.1611	0.5293	1.3297	0.5293	0.5293
0.426	0.00323	1.419	1.100	-28.3224	0.119	0.3584	0.1616	0.5292	1.3297	0.5292	0.5292
0.427	0.00323	1.421	1.100	-28.9419	0.119	0.3576	0.1621	0.5291	1.3297	0.5291	0.5291
0.428	0.00322	1.424	1.100	-29.5684	0.119	0.3568	0.1626	0.5290	1.3297	0.5290	0.5290
0.429	0.00322	1.426	1.100	-30.2019	0.119	0.3560	0.1631	0.5289	1.3297	0.5289	0.5289
0.430	0.00321	1.429	1.100	-30.8424	0.119	0.3552	0.1636	0.5288	1.3297	0.5288	0.5288
0.431	0.00321	1.431	1.100	-31.4899	0.119	0.3544	0.1641	0.5287	1.3297	0.5287	0.5287
0.432	0.00320	1.434	1.100	-32.1444	0.119	0.3536	0.1646	0.5286	1.3297	0.5286	0.5286
0.433	0.00320	1.436	1.100	-32.8059	0.119	0.3528	0.1651	0.5285	1.3297	0.5285	0.5285
0.434	0.00319	1.439	1.100	-33.4744	0.119	0.3520	0.1656	0.5284	1.3297	0.5284	0.5284
0.435	0.00319	1.441	1.100	-34.1499	0.119	0.3512					

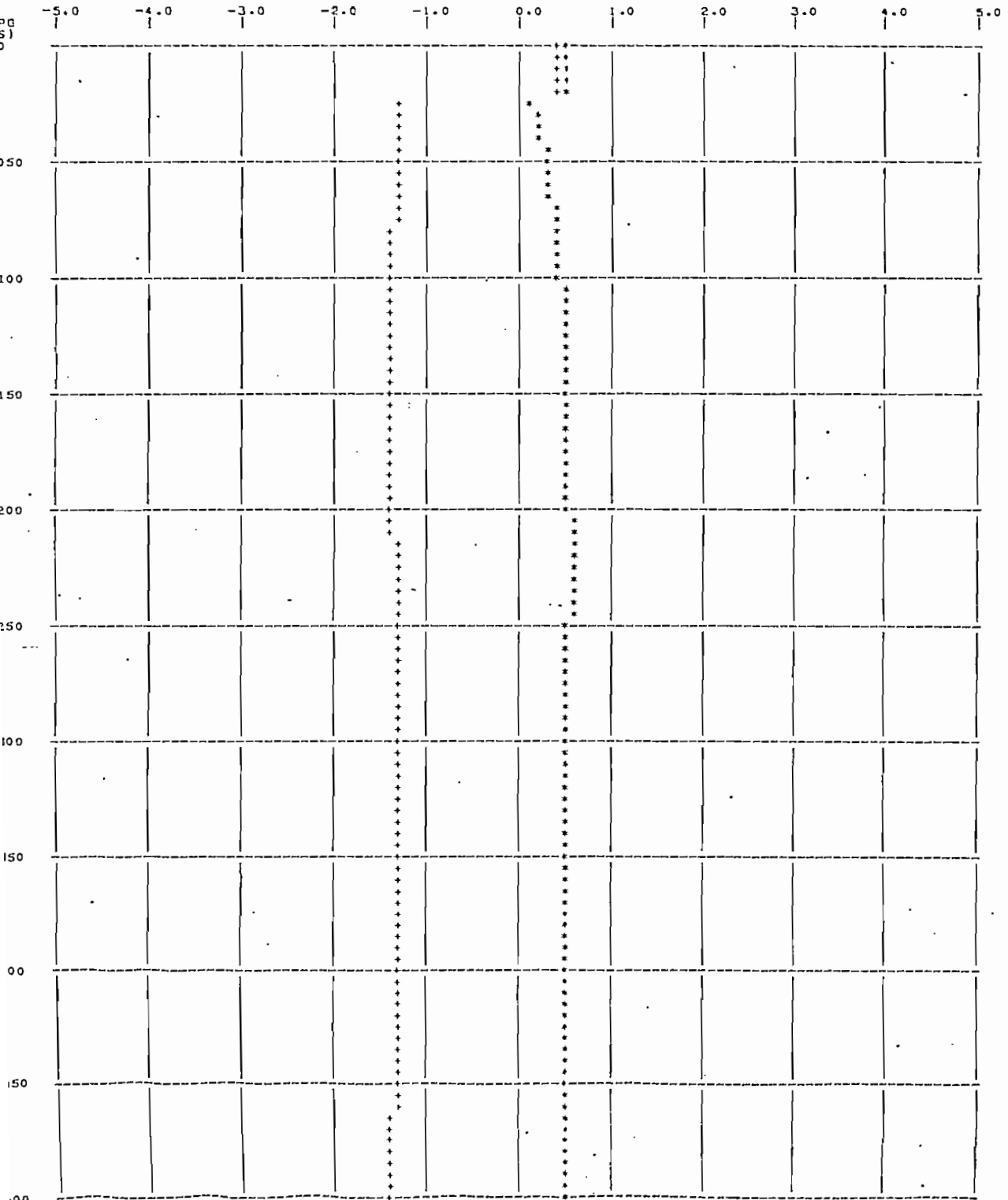
RESULTADOS GRAFICOS

IAS



R E S U L T A D O S G R A F I C O S

P Y G



[Handwritten signature]

PERDIDA DE EXCITACION DE UN GENERADOR SINCRONICO

PARAMETROS DE LA MAQUINA EN POR UNIDAD

XAD =	0.55403	XLS =	0.04146	XLFD =	0.13498	XLKD =	0.08204	XLKC =	0.24437
XAQ =	0.30701	RS =	0.02690	RFD =	0.00507	RKD =	0.00860	RKC =	0.01323

CONDICIONES INICIALES

POTENCIA =	0.642	FACTOR DE POTENCIA =	-36.870	EXC =	0
VOLTAJE =	0.869	VELOCIDAD ANGULAR =	188.50	H =	1.65
DELTA =	0.1846	VFD =	0.0108		

T	NR	ICS	IDE	IAS	VFD	P1	P2	P	O	TE
0.0	0.00000	0.45822	0.52552	0.58552	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.001	0.00000	0.45822	0.52552	0.65552	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.002	0.00000	0.45822	0.52552	0.70177	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.003	0.00000	0.45822	0.52552	0.72795	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.004	0.00000	0.45822	0.52552	0.71266	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.005	0.00000	0.45822	0.52552	0.68277	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.006	0.00000	0.45822	0.52552	0.63425	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.007	0.00000	0.45822	0.52552	0.58784	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.008	0.00000	0.45822	0.52552	0.46144	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.009	0.00000	0.45822	0.52552	0.33455	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.010	0.00000	0.45822	0.52552	0.22244	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.011	0.00000	0.45822	0.52552	0.05033	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.012	0.00000	0.45822	0.52552	-0.04555	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.013	0.00000	0.45822	0.52552	-0.18066	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.014	0.00000	0.45822	0.52552	-0.30682	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.015	0.00000	0.45822	0.52552	-0.42111	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.016	0.00000	0.45822	0.52552	-0.52282	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.017	0.00000	0.45822	0.52552	-0.61122	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.018	0.00000	0.45822	0.52552	-0.67335	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.019	0.00000	0.45822	0.52552	-0.71116	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.020	0.00000	0.45822	0.52552	-0.72423	0.0108	0.0	0.1616	0.5136	0.2697	0.5136
0.021	0.00000	0.3457	0.44501	-1.02500	0.0	-0.037H	0.1616	0.1228	-1.2695	0.5136
0.022	0.00000	0.3528	0.44501	-1.2125	0.0	-0.0232	0.1616	0.1332	-1.2695	0.5136
0.023	0.00023	0.3600	0.44501	-1.3546	-0.0000	-0.0028	0.1449	0.1351	-1.2697	0.1351
0.024	0.00035	0.3671	0.44500	-1.4500	-0.0000	-0.0055	0.1406	0.1367	-1.2697	0.1405
0.025	0.00046	0.3742	0.44311	-1.4954	-0.0001	-0.0081	0.1367	0.1381	-1.2697	0.1459
0.026	0.00058	0.3812	0.44122	-1.5408	-0.0001	-0.0108	0.1329	0.1395	-1.2697	0.1511
0.027	0.00068	0.3883	0.43933	-1.5862	-0.0001	-0.0134	0.1291	0.1409	-1.2697	0.1562
0.028	0.00079	0.3953	0.43743	-1.6316	-0.0001	-0.0160	0.1253	0.1423	-1.2697	0.1612
0.029	0.00089	0.4022	0.43554	-1.6770	-0.0001	-0.0187	0.1215	0.1437	-1.2697	0.1661
0.030	0.00099	0.4092	0.43364	-1.7224	-0.0001	-0.0213	0.1177	0.1451	-1.2697	0.1709
0.031	0.00110	0.4161	0.43175	-1.7678	-0.0002	-0.0240	0.1139	0.1465	-1.2697	0.1756
0.032	0.00120	0.4231	0.42985	-1.8132	-0.0002	-0.0266	0.1101	0.1479	-1.2697	0.1802
0.033	0.00130	0.4300	0.42796	-1.8586	-0.0003	-0.0292	0.1063	0.1493	-1.2697	0.1847
0.034	0.00140	0.4370	0.42606	-1.9040	-0.0003	-0.0319	0.1025	0.1507	-1.2697	0.1892
0.035	0.00150	0.4439	0.42417	-1.9494	-0.0003	-0.0345	0.0987	0.1521	-1.2697	0.1936
0.036	0.00160	0.4509	0.42227	-1.9948	-0.0004	-0.0371	0.0949	0.1535	-1.2697	0.1978
0.037	0.00169	0.4578	0.42038	-2.0402	-0.0004	-0.0397	0.0911	0.1549	-1.2697	0.2020
0.038	0.00179	0.4648	0.41848	-2.0856	-0.0005	-0.0423	0.0873	0.1563	-1.2697	0.2061
0.039	0.00188	0.4717	0.41659	-2.1310	-0.0005	-0.0449	0.0835	0.1577	-1.2697	0.2102
0.040	0.00197	0.4787	0.41469	-2.1764	-0.0005	-0.0475	0.0797	0.1591	-1.2697	0.2141
0.041	0.00206	0.4856	0.41279	-2.2218	-0.0006	-0.0501	0.0759	0.1605	-1.2697	0.2180
0.042	0.00215	0.4926	0.41089	-2.2672	-0.0006	-0.0527	0.0721	0.1619	-1.2697	0.2218
0.043	0.00224	0.4995	0.40900	-2.3126	-0.0006	-0.0553	0.0683	0.1633	-1.2697	0.2255
0.044	0.00233	0.5065	0.40710	-2.3580	-0.0007	-0.0579	0.0645	0.1647	-1.2697	0.2292
0.045	0.00242	0.5134	0.40520	-2.4034	-0.0007	-0.0605	0.0607	0.1661	-1.2697	0.2328
0.046	0.00251	0.5204	0.40330	-2.4488	-0.0008	-0.0631	0.0569	0.1675	-1.2697	0.2365
0.047	0.00258	0.5273	0.40140	-2.4942	-0.0008	-0.0657	0.0531	0.1689	-1.2697	0.2401
0.048	0.00266	0.5343	0.39950	-2.5396	-0.0008	-0.0683	0.0493	0.1703	-1.2697	0.2438
0.049	0.00274	0.5412	0.39760	-2.5850	-0.0009	-0.0709	0.0455	0.1717	-1.2697	0.2474
0.050	0.00283	0.5482	0.39570	-2.6304	-0.0009	-0.0735	0.0417	0.1731	-1.2697	0.2510
0.051	0.00291	0.5551	0.39380	-2.6758	-0.0009	-0.0761	0.0379	0.1745	-1.2697	0.2546
0.052	0.00299	0.5621	0.39190	-2.7212	-0.0010	-0.0787	0.0341	0.1759	-1.2697	0.2582
0.053	0.00306	0.5690	0.39000	-2.7666	-0.0010	-0.0813	0.0303	0.1773	-1.2697	0.2618
0.054	0.00315	0.5760	0.38810	-2.8120	-0.0011	-0.0839	0.0265	0.1787	-1.2697	0.2653
0.055	0.00321	0.5829	0.38620	-2.8574	-0.0011	-0.0865	0.0227	0.1801	-1.2697	0.2689
0.056	0.00328	0.5899	0.38430	-2.9028	-0.0011	-0.0891	0.0189	0.1815	-1.2697	0.2724
0.057	0.00336	0.5968	0.38240	-2.9482	-0.0012	-0.0917	0.0151	0.1829	-1.2697	0.2759
0.058	0.00344	0.6038	0.38050	-3.0000	-0.0012	-0.0943	0.0113	0.1843	-1.2697	0.2794
0.059	0.00350	0.6107	0.37860	-3.0518	-0.0013	-0.0969	0.0075	0.1857	-1.2697	0.2829
0.060	0.00358	0.6177	0.37670	-3.1036	-0.0013	-0.0995	0.0037	0.1871	-1.2697	0.2864
0.061	0.00365	0.6246	0.37480	-3.1554	-0.0014	-0.1021	0.0000	0.1885	-1.2697	0.2899
0.062	0.00372	0.6316	0.37290	-3.2072	-0.0014	-0.1047	0.0000	0.1899	-1.2697	0.2934
0.063	0.00379	0.6385	0.37100	-3.2590	-0.0015	-0.1073	0.0000	0.1913	-1.2697	0.2969
0.064	0.00385	0.6455	0.36910	-3.3108	-0.0015	-0.1099	0.0000	0.1927	-1.2697	0.3004
0.065	0.00392	0.6524	0.36720	-3.3626	-0.0016	-0.1125	0.0000	0.1941	-1.2697	0.3039
0.066	0.00399	0.6594	0.36530	-3.4144	-0.0016	-0.1151	0.0000	0.1955	-1.2697	0.3074
0.067	0.00405	0.6663	0.36340	-3.4662	-0.0017	-0.1177	0.0000	0.1969	-1.2697	0.3109
0.068	0.00412	0.6733	0.36150	-3.5180	-0.0017	-0.1203	0.0000	0.1983	-1.2697	0.3144
0.069	0.00419	0.6802	0.35960	-3.5698	-0.0018	-0.1229	0.0000	0.1997	-1.2697	0.3179
0.070	0.00425	0.6872	0.35770	-3.6216	-0.0018	-0.1255	0.0000	0.2011	-1.2697	0.3214
0.071	0.00431	0.6941	0.35580	-3.6734	-0.0019	-0.1281	0.0000	0.2025	-1.2697	0.3249
0.072	0.00437	0.7011	0.35390	-3.7252	-0.0019	-0.1307	0.0000	0.2039	-1.2697	0.3284
0.073	0.00444	0.7080	0.35200	-3.7770	-0.0020	-0.1333	0.0000	0.2053	-1.2697	0.3319
0.074	0.00449	0.7150	0.35010	-3.8288	-0.0020	-0.1359	0.0000	0.2067	-1.2697	0.3354
0.075	0.00455	0.7219	0.34820	-3.8806	-0.0021	-0.1385	0.0000	0.2081	-1.2697	0.3389
0.076	0.00461	0.7289	0.34630	-3.9324	-0.0021	-0.1411	0.0000	0.2095	-1.2697	0.3424
0.077	0.00467	0.7358	0.34440	-3.9842	-0.0022	-0.1437	0.0000	0.2109	-1.2697	0.3459
0.078	0.00473	0.7428	0.34250	-4.0360	-0.0022	-0.1463	0.0000	0.2123	-1.2697	0.3494
0.079	0.00479	0.7497	0.34060	-4.0878	-0.0023	-0.1489	0.0000	0.2137	-1.2697	0.3529
0.080	0.00485	0.7567	0.33870	-4.1396	-0.0023	-0.1515	0.0000	0.2151	-1.2697	0.3564
0.081	0.00491	0.7636	0.33680	-4.1914	-0.0024	-0.1541	0.0000	0.2165	-1.2697	0.3599
0.082	0.00496	0.7706	0.33490	-4.2432	-0.0024	-0.1567	0.0000	0.2179	-1.2697	0.3634
0.083	0.00502	0.7775	0.33300	-4.2950	-0.0025	-0.1593	0.0000	0.2193	-1.2697	0.3669
0.084	0.00507	0.7845	0.33110	-4.3468	-0.0025	-0.1619	0.0000	0.2207	-1.2697	0.3704
0.085	0.00513	0.7914	0.32920	-4.3986	-0.0026	-0.1645	0.0000	0.2221	-1.2697	0.3739
0.086	0.00518	0.7984	0.32730	-4.4504	-0.0026	-0.1671	0.0000	0.2235	-1.2697	0.3774
0.087	0.00523	0.8053	0.32540	-4.5022	-0.0027	-0.1697	0.0000	0.2249	-1.2697	0.3809
0.088	0.00529	0.8123	0.32350	-4.5540	-0.0027	-0.1723	0.0000	0.2263	-1.2697	0.3844
0.089	0.00534	0.8192	0.32160	-4.6058	-0.0028	-0.1749	0.0000	0.2277	-1.2697	0.3879
0.090	0.00539	0.8262	0.31970	-4.6576	-0.0028	-0.1775	0.0000	0.2291	-1.2697	0.3914
0.091	0.00544	0.8331	0.31780	-4.7094	-0.0028	-0.1801	0.0000	0.2305	-1.2697	0.3949
0.092	0.00550	0.8401	0.31590	-4.7612	-0.0029	-0.1827	0.0000	0.2319	-1.2697	0.3984
0.093	0.00555	0.8470	0.31400	-4.8130	-0.0029	-0.1853	0.0000	0.2333	-1.2697	0.4019
0.094	0.00560	0.8540	0.31210	-4.8648	-0.0030	-0.1879	0.0000	0.2347	-1.2697	0.4054
0.095	0.00565	0.8609	0.31020	-4.9166	-0.0030	-0.1905	0.0000	0.2361	-1.2697	0.4089
0.096	0.00570	0.8679	0.30830	-4.9684</						

0.164	0.00494	1.4025	-2.4673	-0.5765	-0.0072	1.1292	-0.1950	0.3373	-2.7425	0.3373
0.165	0.00904	1.4170	-2.4751	-1.0960	-0.0072	1.1319	-0.1941	0.3356	-2.4727	0.3370
0.170	0.00910	1.4217	-2.4830	-1.5804	-0.0073	1.1365	-0.1932	0.3326	-2.4806	0.3370
0.171	0.00915	1.4264	-2.4910	-2.0648	-0.0073	1.1412	-0.1923	0.3296	-2.4885	0.3369
0.172	0.00921	1.4311	-2.4992	-2.5492	-0.0075	1.1458	-0.1914	0.3274	-2.4964	0.3368
0.173	0.00927	1.4358	-2.5075	-3.0336	-0.0076	1.1505	-0.1904	0.3246	-2.5043	0.3367
0.174	0.00933	1.4405	-2.5160	-3.5180	-0.0077	1.1552	-0.1894	0.3218	-2.5122	0.3366
0.175	0.00939	1.4452	-2.5246	-4.0024	-0.0077	1.1600	-0.1884	0.3190	-2.5201	0.3365
0.176	0.00945	1.4499	-2.5333	-4.4868	-0.0078	1.1647	-0.1874	0.3162	-2.5280	0.3364
0.177	0.00950	1.4546	-2.5421	-4.9712	-0.0079	1.1695	-0.1864	0.3134	-2.5359	0.3363
0.178	0.00956	1.4593	-2.5510	-5.4556	-0.0080	1.1742	-0.1854	0.3106	-2.5438	0.3362
0.179	0.00962	1.4640	-2.5600	-5.9400	-0.0081	1.1790	-0.1844	0.3078	-2.5517	0.3361
0.180	0.00968	1.4687	-2.5690	-6.4244	-0.0082	1.1837	-0.1834	0.3050	-2.5596	0.3360
0.181	0.00974	1.4734	-2.5780	-6.9088	-0.0083	1.1885	-0.1824	0.3022	-2.5675	0.3359
0.182	0.00980	1.4781	-2.5870	-7.3932	-0.0084	1.1932	-0.1814	0.2994	-2.5754	0.3358
0.183	0.00986	1.4828	-2.5960	-7.8776	-0.0085	1.1980	-0.1804	0.2966	-2.5833	0.3357
0.184	0.00992	1.4875	-2.6050	-8.3620	-0.0086	1.2027	-0.1794	0.2938	-2.5912	0.3356
0.185	0.00998	1.4922	-2.6140	-8.8464	-0.0087	1.2075	-0.1784	0.2910	-2.5991	0.3355
0.186	0.01004	1.4969	-2.6230	-9.3308	-0.0088	1.2122	-0.1774	0.2882	-2.6070	0.3354
0.187	0.01010	1.5016	-2.6320	-9.8152	-0.0089	1.2170	-0.1764	0.2854	-2.6149	0.3353
0.188	0.01016	1.5063	-2.6410	-10.3000	-0.0090	1.2217	-0.1754	0.2826	-2.6228	0.3352
0.189	0.01022	1.5110	-2.6500	-10.7844	-0.0091	1.2265	-0.1744	0.2798	-2.6307	0.3351
0.190	0.01028	1.5157	-2.6590	-11.2688	-0.0092	1.2312	-0.1734	0.2770	-2.6386	0.3350
0.191	0.01034	1.5204	-2.6680	-11.7532	-0.0093	1.2360	-0.1724	0.2742	-2.6465	0.3349
0.192	0.01040	1.5251	-2.6770	-12.2376	-0.0094	1.2407	-0.1714	0.2714	-2.6544	0.3348
0.193	0.01046	1.5298	-2.6860	-12.7220	-0.0095	1.2455	-0.1704	0.2686	-2.6623	0.3347
0.194	0.01052	1.5345	-2.6950	-13.2064	-0.0096	1.2502	-0.1694	0.2658	-2.6702	0.3346
0.195	0.01058	1.5392	-2.7040	-13.6908	-0.0097	1.2550	-0.1684	0.2630	-2.6781	0.3345
0.196	0.01064	1.5439	-2.7130	-14.1752	-0.0098	1.2597	-0.1674	0.2602	-2.6860	0.3344
0.197	0.01070	1.5486	-2.7220	-14.6596	-0.0099	1.2645	-0.1664	0.2574	-2.6939	0.3343
0.198	0.01076	1.5533	-2.7310	-15.1440	-0.0100	1.2692	-0.1654	0.2546	-2.7018	0.3342
0.199	0.01082	1.5580	-2.7400	-15.6284	-0.0101	1.2740	-0.1644	0.2518	-2.7097	0.3341
0.200	0.01088	1.5627	-2.7490	-16.1128	-0.0102	1.2787	-0.1634	0.2490	-2.7176	0.3340
0.201	0.01094	1.5674	-2.7580	-16.5972	-0.0103	1.2835	-0.1624	0.2462	-2.7255	0.3339
0.202	0.01100	1.5721	-2.7670	-17.0816	-0.0104	1.2882	-0.1614	0.2434	-2.7334	0.3338
0.203	0.01106	1.5768	-2.7760	-17.5660	-0.0105	1.2930	-0.1604	0.2406	-2.7413	0.3337
0.204	0.01112	1.5815	-2.7850	-18.0504	-0.0106	1.2977	-0.1594	0.2378	-2.7492	0.3336
0.205	0.01118	1.5862	-2.7940	-18.5348	-0.0107	1.3025	-0.1584	0.2350	-2.7571	0.3335
0.206	0.01124	1.5909	-2.8030	-19.0192	-0.0108	1.3072	-0.1574	0.2322	-2.7650	0.3334
0.207	0.01130	1.5956	-2.8120	-19.5036	-0.0109	1.3120	-0.1564	0.2294	-2.7729	0.3333
0.208	0.01136	1.6003	-2.8210	-19.9880	-0.0110	1.3167	-0.1554	0.2266	-2.7808	0.3332
0.209	0.01142	1.6050	-2.8300	-20.4724	-0.0111	1.3215	-0.1544	0.2238	-2.7887	0.3331
0.210	0.01148	1.6097	-2.8390	-20.9568	-0.0112	1.3262	-0.1534	0.2210	-2.7966	0.3330
0.211	0.01154	1.6144	-2.8480	-21.4412	-0.0113	1.3310	-0.1524	0.2182	-2.8045	0.3329
0.212	0.01160	1.6191	-2.8570	-21.9256	-0.0114	1.3357	-0.1514	0.2154	-2.8124	0.3328
0.213	0.01166	1.6238	-2.8660	-22.4100	-0.0115	1.3405	-0.1504	0.2126	-2.8203	0.3327
0.214	0.01172	1.6285	-2.8750	-22.8944	-0.0116	1.3452	-0.1494	0.2098	-2.8282	0.3326
0.215	0.01178	1.6332	-2.8840	-23.3788	-0.0117	1.3500	-0.1484	0.2070	-2.8361	0.3325
0.216	0.01184	1.6379	-2.8930	-23.8632	-0.0118	1.3547	-0.1474	0.2042	-2.8440	0.3324
0.217	0.01190	1.6426	-2.9020	-24.3476	-0.0119	1.3595	-0.1464	0.2014	-2.8519	0.3323
0.218	0.01196	1.6473	-2.9110	-24.8320	-0.0120	1.3642	-0.1454	0.1986	-2.8598	0.3322
0.219	0.01202	1.6520	-2.9200	-25.3164	-0.0121	1.3690	-0.1444	0.1958	-2.8677	0.3321
0.220	0.01208	1.6567	-2.9290	-25.8008	-0.0122	1.3737	-0.1434	0.1930	-2.8756	0.3320
0.221	0.01214	1.6614	-2.9380	-26.2852	-0.0123	1.3785	-0.1424	0.1902	-2.8835	0.3319
0.222	0.01220	1.6661	-2.9470	-26.7696	-0.0124	1.3832	-0.1414	0.1874	-2.8914	0.3318
0.223	0.01226	1.6708	-2.9560	-27.2540	-0.0125	1.3880	-0.1404	0.1846	-2.8993	0.3317
0.224	0.01232	1.6755	-2.9650	-27.7384	-0.0126	1.3927	-0.1394	0.1818	-2.9072	0.3316
0.225	0.01238	1.6802	-2.9740	-28.2228	-0.0127	1.3975	-0.1384	0.1790	-2.9151	0.3315
0.226	0.01244	1.6849	-2.9830	-28.7072	-0.0128	1.4022	-0.1374	0.1762	-2.9230	0.3314
0.227	0.01250	1.6896	-2.9920	-29.1916	-0.0129	1.4070	-0.1364	0.1734	-2.9309	0.3313
0.228	0.01256	1.6943	-3.0010	-29.6760	-0.0130	1.4117	-0.1354	0.1706	-2.9388	0.3312
0.229	0.01262	1.6990	-3.0100	-30.1604	-0.0131	1.4165	-0.1344	0.1678	-2.9467	0.3311
0.230	0.01268	1.7037	-3.0190	-30.6448	-0.0132	1.4212	-0.1334	0.1650	-2.9546	0.3310
0.231	0.01274	1.7084	-3.0280	-31.1292	-0.0133	1.4260	-0.1324	0.1622	-2.9625	0.3309
0.232	0.01280	1.7131	-3.0370	-31.6136	-0.0134	1.4307	-0.1314	0.1594	-2.9704	0.3308
0.233	0.01286	1.7178	-3.0460	-32.0980	-0.0135	1.4355	-0.1304	0.1566	-2.9783	0.3307
0.234	0.01292	1.7225	-3.0550	-32.5824	-0.0136	1.4402	-0.1294	0.1538	-2.9862	0.3306
0.235	0.01298	1.7272	-3.0640	-33.0668	-0.0137	1.4450	-0.1284	0.1510	-2.9941	0.3305
0.236	0.01304	1.7319	-3.0730	-33.5512	-0.0138	1.4497	-0.1274	0.1482	-3.0020	0.3304
0.237	0.01310	1.7366	-3.0820	-34.0356	-0.0139	1.4545	-0.1264	0.1454	-3.0099	0.3303
0.238	0.01316	1.7413	-3.0910	-34.5200	-0.0140	1.4592	-0.1254	0.1426	-3.0178	0.3302
0.239	0.01322	1.7460	-3.1000	-35.0044	-0.0141	1.4640	-0.1244	0.1398	-3.0257	0.3301
0.240	0.01328	1.7507	-3.1090	-35.4888	-0.0142	1.4687	-0.1234	0.1370	-3.0336	0.3300
0.241	0.01334	1.7554	-3.1180	-35.9732	-0.0143	1.4735	-0.1224	0.1342	-3.0415	0.3299
0.242	0.01340	1.7601	-3.1270	-36.4576	-0.0144	1.4782	-0.1214	0.1314	-3.0494	0.3298
0.243	0.01346	1.7648	-3.1360	-36.9420	-0.0145	1.4830	-0.1204	0.1286	-3.0573	0.3297
0.244	0.01352	1.7695	-3.1450	-37.4264	-0.0146	1.4877	-0.1194	0.1258	-3.0652	0.3296
0.245	0.01358	1.7742	-3.1540	-37.9108	-0.0147	1.4925	-0.1184	0.1230	-3.0731	0.3295
0.246	0.01364	1.7789	-3.1630	-38.3952	-0.0148	1.4972	-0.1174	0.1202	-3.0810	0.3294
0.247	0.01370	1.7836	-3.1720	-38.8796	-0.0149	1.5020	-0.1164	0.1174	-3.0889	0.3293
0.248	0.01376	1.7883	-3.1810	-39.3640	-0.0150	1.5067	-0.1154	0.1146	-3.0968	0.3292
0.249	0.01382	1.7930	-3.1900	-39.8484	-0.0151	1.5115	-0.1144	0.1118	-3.1047	0.3291
0.250	0.01388	1.7977	-3.1990	-40.3328	-0.0152	1.5162	-0.1134	0.1090	-3.1126	0.3290
0.251	0.01394	1.8024	-3.2080	-40.8172	-0.0153	1.5210	-0.1124	0.1062	-3.1205	0.3289
0.252	0.01400	1.8071	-3.2170	-41.3016	-0.0154	1.5257	-0.1114	0.1034	-3.1284	0.3288
0.253	0.01406	1.8118	-3.2260	-41.7860	-0.0155	1.5305	-0.1104	0.1006	-3.1363	0.3287
0.254	0.01412	1.8165	-3.2350	-42.2704	-0.0156	1.5352	-0.1094	0.0978	-3.1442	0.3286
0.255	0.01418	1.8212	-3.2440	-42.7548	-0.0157	1.5400	-0.1084	0.0950	-3.1521	0.3285
0.256	0.01424	1.8259	-3.2530	-43.2392	-0.0158	1.5447	-0.1074	0.0922	-3.1600	0.3284
0.257	0.01430	1.8306	-3.2620	-43.7236	-0.0159	1.5495	-0.1064	0.0894	-3.1679	0.3283
0.258	0.01436	1.8353	-3.2710	-44.2080	-0.0160	1.5542	-0.1054	0.0866	-3.1758	0.3282
0.259	0.01442	1.8400	-3.2800	-44.6924	-0.0161	1.5590	-0.1044	0.0838	-3.1837	0.3281
0.260	0.01448	1.8447	-3.2890	-45.1768	-0.0162	1.5637	-0.1034	0.0810	-3.1916	0.3280
0.261	0.01454	1.8494	-3.2980	-45.6612	-0.0163	1.5685	-0.1024	0.0782	-3.1995	0.3279
0.262	0.01460	1.8541	-3.3070	-46.1456	-0.0164	1.5732	-0.1014	0.0754	-3.2074	0.3278
0.263	0.01466	1.8588	-3.3160	-46.6300	-0.0165	1.5780	-0.1004	0.0726	-3.2153	0.3277
0.264	0.01472	1.8635	-3.3250	-47.1144	-0.0166	1.5827	-0.0994	0.0698	-3.2232	0.3276
0.265										

0.344	0.0418	-1.0253	2.2521	-0.4230	-0.0240	7.2011	-1.1182	1.0352	-2.6609	0.9923
0.345	0.0404	-1.0253	2.2520	-0.4230	-0.0240	7.2224	-1.1164	1.0372	-2.6609	0.9917
0.346	0.0459	-1.0233	2.2649	-0.4230	-0.0245	7.2248	-1.1154	1.0366	-2.6609	0.9912
0.347	0.0457	-1.0211	2.2646	-0.4230	-0.0245	7.2271	-1.1154	1.0366	-2.6609	0.9907
0.348	0.0450	-1.0187	2.2633	-0.4230	-0.0245	7.2294	-1.1143	1.0358	-2.6609	0.9902
0.349	0.0450	-1.0161	2.2619	-0.4230	-0.0245	7.2316	-1.1133	1.0350	-2.6609	0.9897
0.350	0.0453	-1.0133	2.2616	-0.4230	-0.0244	7.2337	-1.1114	1.0341	-2.6609	0.9893
0.351	0.0451	-1.0103	2.2600	-0.4230	-0.0244	7.2358	-1.1103	1.0330	-2.6609	0.9888
0.352	0.0450	-1.0073	2.2585	-0.4230	-0.0243	7.2379	-1.1092	1.0320	-2.6609	0.9884
0.353	0.0445	-1.0043	2.2569	-0.4230	-0.0243	7.2398	-1.1079	1.0308	-2.6609	0.9879
0.354	0.0447	-1.0007	2.2545	-0.4230	-0.0243	7.2417	-1.1057	1.0296	-2.6609	0.9875
0.355	0.0459	-0.9974	2.2525	-0.4230	-0.0242	7.2437	-1.1041	1.0283	-2.6609	0.9871
0.356	0.0445	-0.9945	2.2509	-0.4230	-0.0242	7.2455	-1.1025	1.0265	-2.6609	0.9867
0.357	0.0431	-0.9901	2.2476	-0.4230	-0.0242	7.2473	-1.1006	1.0254	-2.6609	0.9863
0.358	0.0416	-0.9864	2.2451	-0.4230	-0.0242	7.2491	-1.0992	1.0240	-2.6609	0.9859
0.359	0.0402	-0.9824	2.2423	-0.4230	-0.0241	7.2509	-1.0978	1.0224	-2.6609	0.9855
0.360	0.0380	-0.9784	2.2397	-0.4230	-0.0241	7.2526	-1.0964	1.0208	-2.6609	0.9851
0.361	0.0437	-0.9745	2.2367	-0.4230	-0.0241	7.2543	-1.0949	1.0191	-2.6609	0.9847
0.362	0.0430	-0.9704	2.2338	-0.4230	-0.0241	7.2559	-1.0930	1.0174	-2.6609	0.9843
0.363	0.0436	-0.9662	2.2307	-0.4230	-0.0241	7.2575	-1.0910	1.0156	-2.6609	0.9839
0.364	0.0432	-0.9621	2.2273	-0.4230	-0.0240	7.2591	-1.0889	1.0137	-2.6609	0.9835
0.365	0.0431	-0.9579	2.2240	-0.4230	-0.0240	7.2606	-1.0865	1.0114	-2.6609	0.9831
0.366	0.0430	-0.9530	2.2208	-0.4230	-0.0240	7.2622	-1.0842	1.0099	-2.6609	0.9827
0.367	0.0420	-0.9484	2.2174	-0.4230	-0.0240	7.2637	-1.0821	1.0075	-2.6609	0.9823
0.368	0.0427	-0.9432	2.2140	-0.4230	-0.0240	7.2651	-1.0801	1.0058	-2.6609	0.9819
0.369	0.0426	-0.9392	2.2105	-0.4230	-0.0240	7.2666	-1.0782	1.0038	-2.6609	0.9815
0.370	0.0424	-0.9345	2.2070	-0.4230	-0.0239	7.2680	-1.0763	1.0017	-2.6609	0.9811
0.371	0.0426	-0.9296	2.2033	-0.4230	-0.0239	7.2694	-1.0741	0.9995	-2.6609	0.9807
0.372	0.0422	-0.9247	2.1997	-0.4230	-0.0239	7.2707	-1.0718	0.9973	-2.6609	0.9803
0.373	0.0420	-0.9201	2.1962	-0.4230	-0.0239	7.2721	-1.0693	0.9951	-2.6609	0.9799
0.374	0.0419	-0.9151	2.1925	-0.4230	-0.0239	7.2734	-1.0669	0.9928	-2.6609	0.9795
0.375	0.0418	-0.9102	2.1889	-0.4230	-0.0239	7.2747	-1.0645	0.9905	-2.6609	0.9791
0.376	0.0419	-0.9054	2.1851	-0.4230	-0.0239	7.2760	-1.0621	0.9882	-2.6609	0.9787
0.377	0.0415	-0.9003	2.1817	-0.4230	-0.0238	7.2772	-1.0597	0.9859	-2.6609	0.9783
0.378	0.0412	-0.8954	2.1781	-0.4230	-0.0238	7.2784	-1.0573	0.9836	-2.6609	0.9779
0.379	0.0412	-0.8904	2.1747	-0.4230	-0.0238	7.2797	-1.0549	0.9813	-2.6609	0.9775
0.380	0.0416	-0.8853	2.1710	-0.4230	-0.0238	7.2809	-1.0494	0.9785	-2.6609	0.9771
0.381	0.0410	-0.8803	2.1675	-0.4230	-0.0238	7.2820	-1.0470	0.9765	-2.6609	0.9767
0.382	0.0409	-0.8753	2.1641	-0.4230	-0.0238	7.2832	-1.0446	0.9741	-2.6609	0.9763
0.383	0.0403	-0.8703	2.1606	-0.4230	-0.0237	7.2844	-1.0421	0.9716	-2.6609	0.9759
0.384	0.0405	-0.8650	2.1570	-0.4230	-0.0237	7.2855	-1.0397	0.9692	-2.6609	0.9755
0.385	0.0402	-0.8600	2.1536	-0.4230	-0.0237	7.2866	-1.0373	0.9668	-2.6609	0.9751
0.386	0.0403	-0.8550	2.1500	-0.4230	-0.0237	7.2877	-1.0349	0.9644	-2.6609	0.9747
0.387	0.0407	-0.8500	2.1467	-0.4230	-0.0237	7.2888	-1.0325	0.9615	-2.6609	0.9743
0.388	0.0401	-0.8448	2.1432	-0.4230	-0.0237	7.2899	-1.0301	0.9594	-2.6609	0.9739
0.389	0.0402	-0.8398	2.1400	-0.4230	-0.0236	7.2909	-1.0277	0.9570	-2.6609	0.9735
0.390	0.0399	-0.8347	2.1373	-0.4230	-0.0236	7.2919	-1.0253	0.9545	-2.6609	0.9731
0.391	0.0397	-0.8296	2.1346	-0.4230	-0.0236	7.2929	-1.0229	0.9520	-2.6609	0.9727
0.392	0.0395	-0.8245	2.1311	-0.4230	-0.0236	7.2939	-1.0205	0.9496	-2.6609	0.9723
0.393	0.0393	-0.8194	2.1282	-0.4230	-0.0236	7.2949	-1.0182	0.9471	-2.6609	0.9719
0.394	0.0391	-0.8143	2.1252	-0.4230	-0.0235	7.2959	-1.0158	0.9446	-2.6609	0.9715
0.395	0.0389	-0.8092	2.1222	-0.4230	-0.0235	7.2969	-1.0135	0.9422	-2.6609	0.9711
0.396	0.0391	-0.8045	2.1195	-0.4230	-0.0235	7.2979	-1.0112	0.9397	-2.6609	0.9707
0.397	0.0390	-0.7994	2.1165	-0.4230	-0.0235	7.2989	-1.0089	0.9372	-2.6609	0.9703
0.398	0.0389	-0.7943	2.1137	-0.4230	-0.0235	7.2999	-1.0065	0.9347	-2.6609	0.9699
0.399	0.0388	-0.7894	2.1108	-0.4230	-0.0235	7.3009	-1.0043	0.9323	-2.6609	0.9695
0.400	0.0387	-0.7845	2.1080	-0.4230	-0.0234	7.3018	-1.0021	0.9299	-2.6609	0.9691
0.401	0.0385	-0.7795	2.1052	-0.4230	-0.0234	7.3027	-1.0000	0.9274	-2.6609	0.9687
0.402	0.0384	-0.7746	2.1024	-0.4230	-0.0234	7.3036	-0.9978	0.9250	-2.6609	0.9683
0.403	0.0383	-0.7698	2.1011	-0.4230	-0.0234	7.3045	-0.9956	0.9226	-2.6609	0.9679
0.404	0.0382	-0.7648	2.0986	-0.4230	-0.0234	7.3054	-0.9931	0.9202	-2.6609	0.9675
0.405	0.0381	-0.7599	2.0962	-0.4230	-0.0233	7.3063	-0.9909	0.9177	-2.6609	0.9671
0.406	0.0380	-0.7550	2.0937	-0.4230	-0.0233	7.3072	-0.9887	0.9153	-2.6609	0.9667
0.407	0.0379	-0.7500	2.0912	-0.4230	-0.0233	7.3080	-0.9865	0.9129	-2.6609	0.9663
0.408	0.0377	-0.7455	2.0888	-0.4230	-0.0233	7.3088	-0.9846	0.9107	-2.6609	0.9659
0.409	0.0376	-0.7408	2.0863	-0.4230	-0.0232	7.3097	-0.9825	0.9083	-2.6609	0.9655
0.410	0.0375	-0.7361	2.0838	-0.4230	-0.0232	7.3105	-0.9804	0.9061	-2.6609	0.9651
0.411	0.0374	-0.7314	2.0813	-0.4230	-0.0232	7.3113	-0.9783	0.9037	-2.6609	0.9647
0.412	0.0373	-0.7267	2.0788	-0.4230	-0.0232	7.3121	-0.9762	0.9014	-2.6609	0.9643
0.413	0.0372	-0.7221	2.0763	-0.4230	-0.0231	7.3129	-0.9741	0.8992	-2.6609	0.9639
0.414	0.0371	-0.7174	2.0738	-0.4230	-0.0231	7.3137	-0.9720	0.8969	-2.6609	0.9635
0.415	0.0370	-0.7127	2.0713	-0.4230	-0.0231	7.3145	-0.9699	0.8946	-2.6609	0.9631
0.416	0.0369	-0.7080	2.0688	-0.4230	-0.0231	7.3153	-0.9678	0.8924	-2.6609	0.9627
0.417	0.0368	-0.7033	2.0663	-0.4230	-0.0230	7.3161	-0.9657	0.8901	-2.6609	0.9623
0.418	0.0367	-0.6986	2.0638	-0.4230	-0.0230	7.3169	-0.9636	0.8879	-2.6609	0.9619
0.419	0.0366	-0.6940	2.0613	-0.4230	-0.0230	7.3177	-0.9615	0.8856	-2.6609	0.9615
0.420	0.0365	-0.6893	2.0588	-0.4230	-0.0230	7.3185	-0.9594	0.8834	-2.6609	0.9611
0.421	0.0364	-0.6847	2.0563	-0.4230	-0.0229	7.3193	-0.9573	0.8812	-2.6609	0.9607
0.422	0.0363	-0.6800	2.0538	-0.4230	-0.0229	7.3201	-0.9552	0.8790	-2.6609	0.9603
0.423	0.0362	-0.6754	2.0513	-0.4230	-0.0229	7.3209	-0.9531	0.8768	-2.6609	0.9599
0.424	0.0361	-0.6708	2.0488	-0.4230	-0.0228	7.3217	-0.9510	0.8746	-2.6609	0.9595
0.425	0.0360	-0.6662	2.0463	-0.4230	-0.0228	7.3225	-0.9489	0.8724	-2.6609	0.9591
0.426	0.0359	-0.6616	2.0438	-0.4230	-0.0228	7.3233	-0.9468	0.8702	-2.6609	0.9587
0.427	0.0358	-0.6570	2.0413	-0.4230	-0.0227	7.3241	-0.9447	0.8680	-2.6609	0.9583
0.428	0.0357	-0.6524	2.0388	-0.4230	-0.0227	7.3249	-0.9426	0.8658	-2.6609	0.9579
0.429	0.0356	-0.6478	2.0363	-0.4230	-0.0227	7.3257	-0.9405	0.8636	-2.6609	0.9575
0.430	0.0355	-0.6432	2.0338	-0.4230	-0.0226	7.3265	-0.9384	0.8614	-2.6609	0.9571
0.431	0.0354	-0.6386	2.0313	-0.4230	-0.0226	7.3273	-0.9363	0.8592	-2.6609	0.9567
0.432	0.0353	-0.6340	2.0288	-0.4230	-0.0226	7.3281	-0.9342	0.8570	-2.6609	0.9563
0.433	0.0352	-0.6294	2.0263	-0.4230	-0.0225	7.3289	-0.9321	0.8548	-2.6609	0.9559
0.434	0.0351	-0.6248	2.0238	-0.4230	-0.0225	7.3297	-0.9300	0.8526	-2.6609	0.9555
0.435	0.0350	-0.6202	2.0213	-0.4230	-0.0225	7.3305	-0.9279	0.8504	-2.6609	0.9551
0.436	0.0349	-0.6156	2.0188	-0.4230	-0.0225	7.3313	-0.9258	0.8482	-2.6609	0.9547
0.437	0.0348	-0.6110	2.0163	-0.4230	-0.0224	7.3321	-0.9237	0.8460	-2.6609	0.9543
0.438	0.0347	-0.6064	2.0138	-0.4230	-0.0224	7.3329	-0.9216	0.8438	-2.6609	0.9539
0.439	0.0346	-0.6018	2.0113	-0.4230	-0.0224	7.3337	-0.9195	0.8416	-2.6609	0.9535
0.440	0.0345	-0.6000	2.0088	-0.4230	-0.0223	7.3345	-0.9174	0.8394	-2.6609	0.9531
0.441	0.0344	-0.5982	2.0063	-0.4230	-0.0223	7.3353	-0.9153	0.8372	-2.6609	0.9527
0.442	0.0343	-0.5964	2.0038	-0.4230	-0.02					

RESULTADOS GRAFICOS

P Y D



4.4. COMENTARIOS SOBRE LOS RESULTADOS

Es necesario indicar, que en este modelo matemático, no se ha considerado el efecto del regulador de velocidad, y además, no se han obtenido los resultados de los voltajes, ya que el estudio se realiza sobre una máquina conectada a la barra infinita.

Al producirse la pérdida de excitación, se interrumpe el equilibrio existente en la máquina, lo que causa que ésta aumente su velocidad sobre la sincrónica. Esto se nota examinando los resultados de WR, en donde se observa que la máquina se acelera tanto para el caso de circuito abierto en el campo como para el de cortocircuito, siendo mayor cuando sucede el circuito abierto. En cualquier caso, esta aceleración es pequeña.

Durante los primeros veinte milisegundos, se observa en los resultados que tanto IQS como IDS son constantes, esto demuestra, que las ecuaciones desarrolladas para el funcionamiento asincrónico son también válidas para el estudio del generador sincrónico en estado estable.

Para el caso de cortocircuito, la corriente de armadura aumenta oscilando alrededor de dos veces la corriente nominal como puede verse más claramente en los resultados gráficos de IAS. Para el caso de circuito abierto, la corriente de armadura es mayor llegándose incluso a valores tan altos como cuatro veces la nominal. Además, los gráficos de IAS, indican como las oscilaciones de la máquina son más pronunciadas con el campo en circuito abierto.

En los resultados, las potencias activa y reactiva se han dibujado en el mismo gráfico, con el fin de obtener una idea más clara del comportamiento de la máquina cuando opera en el modo asincrónico. Así, para el caso de cortocircuito en el campo, se nota como la máquina pese a estar fuera de la velocidad sincrónica sigue entregando potencia activa al sistema llegando a valores cercanos al 55% del valor nominal. Esta potencia, es la resultante de dos componentes (P_1 y P_2): La una, originada por el asincronismo de la máquina, y cuya presencia, se basa en el principio de las máquinas de inducción ya que se originan corrientes inducidas en los devanados cortocircuitados de damping; y la segunda debida a la reluctancia, esto es, a la asimetría de la máquina. El mismo gráfico indica como la máquina absorbe energía reactiva del siste

ma como consecuencia de la deficiencia de excitación, pero esta deficiencia es suministrada por el sistema permitiendo así el funcionamiento asincrónico del generador.

Para el caso de circuito abierto, en el campo, el comportamiento es similar como el caso anterior, así en el instante en que se produce la falla, la máquina sigue entregando potencia activa al sistema mientras absorbe reactivos del mismo. Esto puede notarse hasta alrededor de los doscientos milisegundos, ya que posteriormente y por muy poco tiempo la máquina absorbe potencia activa como consecuencia del régimen inestable en que trabaja la máquina, inestabilidad que se manifiesta en la potencia. Posteriormente, entrega activos cercanos al valor nominal, en tanto que los reactivos que requiere y próximos a dos veces el nominal son suministrados por el sistema.

El torque electromagnético, no se ha presentado en forma gráfica, ya que como se observa en los resultados listados, sigue aproximadamente a las variaciones de potencia activa, lo cual es correcto puesto que el torque y la potencia activa están íntimamente relacionados entre sí.

C A P I T U L O V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Una falla en el campo, provoca un aumento de la corriente de armadura, aumento que lógicamente se traduce en el sobrecalentamiento del estator, siendo éste uno de los factores limitantes de tiempo para que la máquina funcione asincrónicamente.

- Sin embargo de que el generador sincrónico ha perdido su excitación, continúa entregando potencia activa al sistema. *¿que tiempo?*

- El sistema al cual la máquina está conectada, proporciona los requerimientos de excitación del generador sincrónico cuando éste opera asincrónicamente.

- En el funcionamiento asincrónico, el peligro de que se dañe la máquina es mayor con el bobinado de campo en circuito abierto, porque como se ha establecido anteriormente, para esta forma de conexión del campo la armadura soporta una mayor corriente, y además por el sobrevoltaje que aparecerá a los terminales del campo en el instante de producirse un circuito abierto repentino.

de donde
compañía

- El análisis matemático basado en el principio de un sistema cuasiestacionario en el cual el deslizamiento se mantiene constante, entrega resultados bastante aproximados a los reales.

- Del análisis matemático se desprende que las potencias activa y reactiva constan de tres componentes: una independiente del tiempo (P_1 y Q_1), una segunda que es debida a los polos salientes (P_2 y Q_2) y finalmente una tercera debida a la excitación del campo (P_3 y Q_3).

- Las reactancias operacionales desarrolladas, toman en consideración la variación de los parámetros de la máquina sincrónica en función del deslizamiento.

- Realizando el operador $p=0$, se comprueba como éstas ecuaciones que describen el comportamiento asincrónico del generador sincrónico, son también válidas para el funcionamiento en estado estable.

5.2. RECOMENDACIONES

- Realizar el estudio del funcionamiento asincrónico mediante la solución de las ecuaciones diferenciales no lineales, a fin de establecer una comparación con el método desarrollado en esta tesis.
- Estudiar el comportamiento asincrónico de la máquina sincrónica para el caso de una máquina de rotor cilíndrico.
- Utilizar un método similar al desarrollado para estudiar, el comportamiento de una máquina de reluctancia.
- En base a los resultados obtenidos puede realizarse el estudio de la protección contra pérdida de excitación.

A N E X O A

PARAMETROS FUNDAMENTALES DE LA

MAQUINA A ESTUDIARSE

ANEXO A

PARAMETROS DE LA MAQUINA SINCRONICA

A.1. OBTENCION DE LOS PARAMETROS FUNDAMENTALES DE LA MAQUINA
QUINA (Bibl. 16)

Los parámetros que generalmente vienen dados en las especificaciones de una máquina sincrónica son:

x_d = reactancia sincrónica de eje directo.

x'_d = reactancia transitoria de eje directo.

x''_d = reactancia subtransitoria de eje directo.

x_q = reactancia sincrónica de eje en cuadratura.

x''_q = reactancia subtransitoria de eje en cuadratura.

T'_{do} = constante de tiempo transitoria de eje directo de circuito abierto.

T'_d = Constante de tiempo transitoria de eje directo de cortocircuito.

T''_{do} = constante de tiempo subtransitoria de eje directo de circuito abierto.

T''_d = constante de tiempo subtransitoria de eje directo de cortocircuito.

T''_{q0} = constante de tiempo subtransitoria en cuadratura en circuito abierto.

T''_q = constante de tiempo subtransitoria en cuadratura en cortocircuito.

A menudo vienen también dados la resistencia de secuencia cero y las reactancias de secuencia cero y de dispersión del estator.

Para fines de simulación, es necesario obtener los parámetros fundamentales de la máquina tales como: reactancia de dispersión y de magnetización en los ejes directo y en cuadratura, como también, las resistencias y reactancias de dispersión en cada uno de los bobinados del rotor.

Los parámetros fundamentales son:

r_s = resistencia de armadura.

x_{ls} = reactancia de dispersión de la armadura.

x_{ad} = reactancia de magnetización de eje directo.

x_{aq} = reactancia de magnetización de eje en cuadratura.

r'_{fd} = resistencia del campo.

x'_{lfd} = reactancia de dispersión del campo.

r'_{kd} = resistencia del arrollamiento de damping en el eje directo.

x'_{lkd} = reactancia de dispersión del arrollamiento de damping en el eje directo.

r'_{kq} = resistencia del arrollamiento de damping en el eje en cuadratura.

x'_{lkq} = reactancia de dispersión del arrollamiento de damping en el eje en cuadratura.

REACTANCIAS

Usualmente viene dada la reactancia de dispersión de la armadura, o en caso contrario, la reactancia de secuencia cero que es igual a la de dispersión de la armadura.

$$x_{1s} = x_0$$

A.1.1.

Como: $x_d = x_{1s} + x_{ad}$

$$x_q = x_{1s} + x_{aq}$$

$$\begin{aligned} & \text{27-100} \\ \Rightarrow \quad x_{ad} &= x_d - x_{ls} \\ \Rightarrow \quad x_{aq} &= x_q - x_{ls} \end{aligned} \quad \text{A.1.2.}$$

La reactancia de dispersión del campo, puede obtenerse a partir de la definición de x'_d :

$$\begin{aligned} x'_d &= x_{ls} + \frac{x_{ad} \cdot x'_{lfd}}{x_{ad} + x'_{lfd}} \\ \therefore x'_{lfd} &= \frac{x_{ad}(x'_d - x_{ls})}{x_{ad} - (x'_d - x_{ls})} = \frac{25.12 \cdot 6.1 - 1.98}{25.12 - 6.1 - 1.98} = \frac{123.5904}{20.2} = 6.118336634 \end{aligned} \quad \text{A.1.3.}$$

La reactancia de dispersión del arrollamiento de dam ping en eje directo, se obtiene a partir de la definición de x''_d :

$$\begin{aligned} x''_d &= x_{ls} + \frac{x_{ad} \cdot x'_{lfd} \cdot x'_{lkd}}{x_{ad} \cdot x'_{lfd} + x_{ad} x'_{lkd} + x'_{lfd} \cdot x'_{lkd}} \\ \therefore x'_{lkd} &= \frac{(x''_d - x_{ls}) x_{ad} \cdot x'_{lfd}}{x'_{lfd} \cdot x_{ad} - (x''_d - x_{ls})(x_{ad} + x'_{lfd})} \end{aligned} \quad \text{A.1.4.}$$

La reactancia de dispersión del arrollamiento de dam ping en el eje en cuadratura, se obtiene a partir de la definición de x''_q :

$$x''_q = x_{1s} + \frac{x_{aq} \cdot x'_{1kq}}{x_{aq} + x'_{1kq}}$$

$$\therefore x'_{1kq} = \frac{x_{aq} (x''_q - x_{1s})}{x_{aq} - (x''_q - x_{1s})} \quad \text{A.1.5.}$$

RESISTENCIAS

La resistencia de secuencia positiva es normalmente un parámetro dado y es igual a la resistencia del estator.

La resistencia de campo puede ser calculada de la ecuación de la constante de tiempo transitoria de eje directo de circuito abierto:

$$T'_{do} = \frac{1}{w \cdot r'_{fd}} (x'_{1fd} + x_{ad})$$

$$\therefore r'_{fd} = \frac{1}{w \cdot T'_{do}} (x'_{1fd} + x_{ad}) \quad 44.8 \quad \text{A.1.6.}$$

6.11 8336634

$T_{d'o} = 0.00185$

La resistencia del arrollamiento de damping en el eje directo puede calcularse de T''_{do} :

$$T''_{do} = \frac{1}{w \cdot r'_{kd}} \left(x'_{1kd} + \frac{x_{ad} \cdot x'_{1fd}}{x_{ad} + x'_{1fd}} \right)$$

$$\therefore r'_{kd} = \frac{1}{w \cdot T''_{do}} \left(x'_{lkd} + \frac{x_{ad} \cdot x'_{lfd}}{x_{ad} + x'_{lfd}} \right) \quad A.1.7.$$

La resistencia del arrollamiento de damping en cuadratura, se calcula a partir de T''_{qo} :

$$T''_{qo} = \frac{1}{w \cdot r'_{kq}} (x'_{lkq} + x_{aq})$$

$$\therefore r'_{kq} = \frac{1}{w \cdot T''_{qo}} (x'_{lkq} + x_{aq}) \quad A.1.8.$$

A.2. OBTENCION DE LOS PARAMETROS FUNDAMENTALES DE LA MAQUINA SINCRONICA A ESTUDIARSE *Referencia*

$$r_s = 1.22 \ \Omega$$

$$x_d = 27 \ \Omega$$

$$T'_{do} = 0.36 \text{ s}$$

$$x'_d = 6.8 \ \Omega$$

$$T'_d = 0.0915 \text{ s}$$

$$x''_d = 4.0 \ \Omega$$

$$T''_{do} = 0.0585 \text{ s}$$

$$x_q = 15.8 \ \Omega$$

$$T''_d = 0.0345 \text{ s}$$

$$x''_q = 8.05 \ \Omega$$

$$T''_{qo} = 0.1092 \text{ s}$$

$$x_o = 1.88 \ \Omega$$

$$T''_q = 0.0555 \text{ s}$$

Los parámetros anteriores, se han obtenido de la referencia bibliográfica # 17 y que corresponden a los de la máquina sincrónica a estudiarse y que tiene las siguientes características:

3 ϕ de polos salientes y con arrollamientos amortiguadores.

$$S = 3.5 \text{ KVA}$$

$$v = 230 \text{ vol (en delta)}$$

$$I = 8.7 \text{ A}$$

$$n = 1800 \text{ RPM}$$

$$f = 60 \text{ c/seg}$$

$$V_{exc} = 110 \text{ vol}$$

$$f_p = 0.8$$

Aplicando las fórmulas desarrolladas en A.1., se obtienen los parámetros fundamentales de esta máquina:

$$x_{1s} = 1.88 \text{ ohm}$$

$$r_s = 1.22 \text{ ohm}$$

$$x_{ad} = 25.12 \text{ Ohm}$$

$$r'_{fd} = 0.23 \text{ ohm}$$

$$x_{aq} = 13.92 \text{ Ohm}$$

$$r'_{kd} = 0.39 \text{ ohm}$$

$$x'_{lfd} = 6.12 \text{ ohm}$$

$$r'_{kq} = 0.60 \text{ ohm}$$

$$x'_{lkd} = 3.72 \text{ ohm}$$

A.3. OBTENCION DE LOS PARAMETROS FUNDAMENTALES EN POR UNIDAD

De acuerdo a la teoría desarrollada en el capítulo I se toman como valores base los correspondientes a la máquina sincrónica:

$$V_B = 230 \text{ v}$$

$$S_B = \frac{3500 \text{ VA}}{3}$$

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B}$$

$$Z_B = 3 \frac{(230)^2}{3500} = 45.34 \text{ ohm}$$

$$x_{pu} = \frac{x(\text{ohm})}{Z_B}$$

$$r_{pu} = \frac{r(\text{ohm})}{Z_B}$$

$$x_{ls} = 0.04146$$

$$r_s = 0.02690$$

$$x_{ad} = 0.55403$$

$$r'_{fd} = 0.00507$$

$$x_{aq} = 0.30701$$

$$r'_{kd} = 0.00860$$

$$x'_{lfd} = 0.13498$$

$$r'_{kq} = 0.01323$$

$$x'_{lkd} = 0.08204$$

$$x'_{lkq} = 0.24437$$

A N E X O B

MANUAL DE USO DEL PROGRAMA

ANEXO B

MANUAL DE USO DEL PROGRAMA

El programa digital desarrollado en la presente tesis, permite obtener las características de funcionamiento de un generador sincrónico cuando éste opera asincrónicamente debido a la pérdida de excitación, ya sea debido a un cortocircuito o a un circuito abierto en el campo.

VARIABLES DE ENTRADA

<u>SIMBOLO</u>	<u>DESCRIPCION</u>
EXC	Indicador de alternativas: Cero (0) para el caso en que el campo está en circuito <u>a</u> bierto; Uno (1) para el caso en que el <u>cam</u> po está en cortocircuito.
FP	Angulo expresado en grados correspondiente al factor de potencia. Positivo en <u>adelan</u> to y negativo en atraso.
HI	Constante de inercia en segundos.
NC	Número de puntos que forman el eje de <u>las</u> ordenadas.

SIMBOLO

DESCRIPCION

NPUN	Número de puntos calculados de corrientes, potencias, etc.
RFD	Resistencia del campo en por unidad.
RKD	Resistencia del arrollamiento de damping en el eje directo en por unidad.
RKQ	Resistencia del arrollamiento de damping en el eje en cuadratura en por unidad.
RS	Resistencia de armadura en por unidad.
V	Voltaje a los terminales de la máquina en por unidad.
VA	Potencia aparente en por unidad.
WE	Velocidad angular correspondiente a la de sincronismo expresada en rad/seg.
XAD	Reactancia de magnetización de eje directo en por unidad.
XAQ	Reactancia de magnetización de eje en cuadratura en por unidad.
XLFD	Reactancia de dispersión del campo en por unidad.
XLKD	Reactancia de dispersión del arrollamiento de damping en el eje directo en por unidad

<u>SIMBOLO</u>	<u>DESCRIPCION</u>
XLKQ	Reactancia de dispersión del arrollamiento de damping en el eje en cuadratura en por unidad.
XLS	Reactancia de dispersión de la armadura en por unidad.

VARIABLES DE SALIDAD

<u>SIMBOLO</u>	<u>DESCRIPCION</u>
DELTA	Angulo de potencia.
IAS	Corriente de armadura en por unidad.
IDS	Componente en el eje directo de la corriente de armadura en por unidad.
IFD	Corriente inducida en el campo en por unidad.
IQS	Componente en cuadratura de la corriente de armadura en por unidad.
P	Potencia activa en por unidad.
P1	Potencia asincrónica en por unidad.
P2	Potencia de reluctancia en por unidad.

SIMBOLO

DESCRIPCION

Q	Potencia reactiva en por unidad.
T	Tiempo en segundos.
TE	Torque electromagnético en por unidad.
VFD	Voltaje inducido en el campo en por unidad
WR	Velocidad mecánica en por unidad.

Para un problema específico, los datos del programa, se introducen en tres tarjetas, las mismas que se describen a continuación:

PRIMERA TARJETA.- La primera tarjeta de datos, corresponde a los parámetros de la máquina expresados en por unidad con formato F10.5, en el orden indicado en la figura B.1.

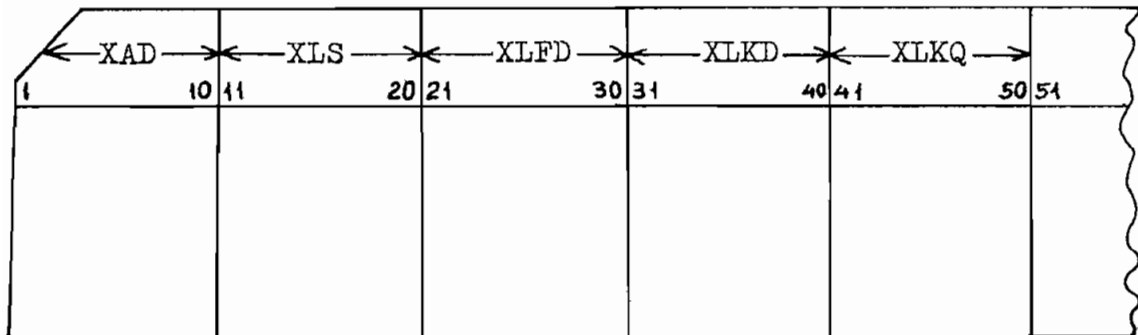


FIG. B.1.

SEGUNDA TARJETA.- La segunda tarjeta de datos también corresponde a los parámetros de la máquina, y al igual que la tarjeta anterior se perfora con formato F10.5 en el orden indicado en la figura B.2.

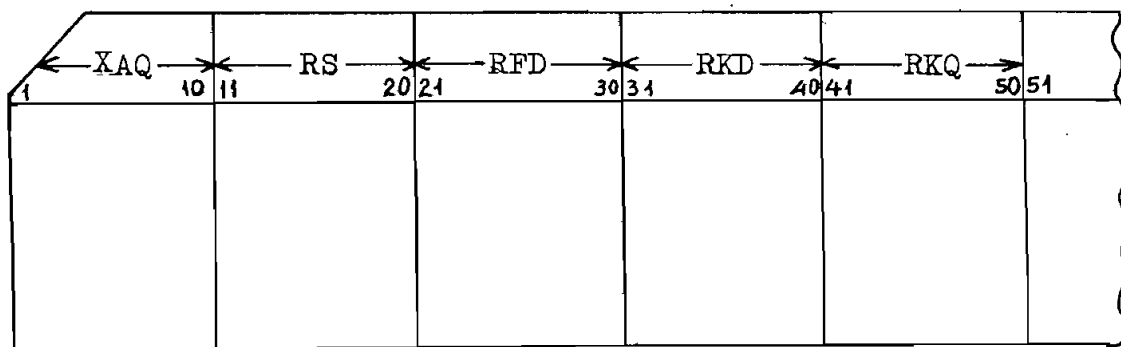


FIG. B.2.

TERCERA TARJETA.- La tercera tarjeta de datos, corresponde a las condiciones iniciales y se perforan de acuerdo al formato y orden indicado en la figura B.3.

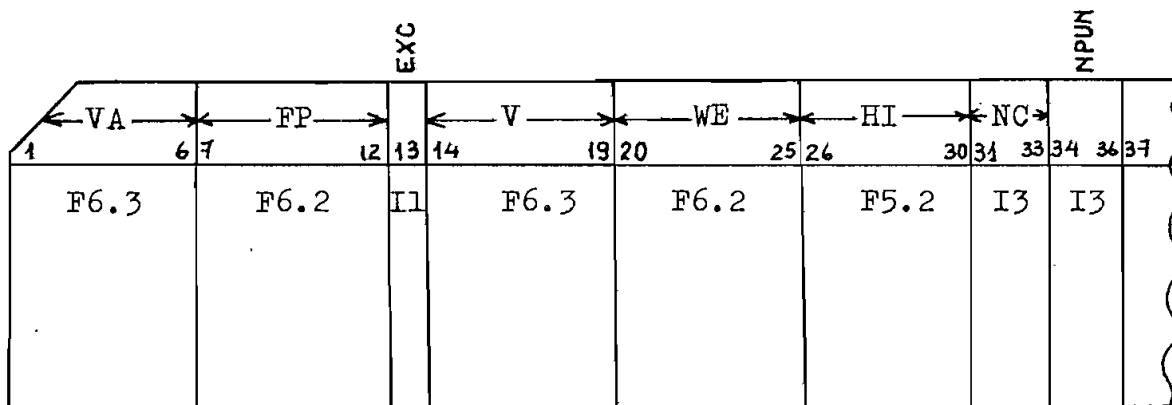


FIG. B.3.

Es necesario señalar, que se introducen tantos bloques de tres tarjetas de datos, como ejercicios deseen realizarse. Para la terminación, hay que introducir un bloque de datos el cual tenga el valor $XAD = 0$.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- LIPO THOMAS A., KRAUSE PAUL C., "Stability Analysis of a Reluctance Synchronous Machine", Manuscrito, Septiembre, 1966.
- 2.- POVEDA MENTOR, "Apuntes de Máquinas Eléctricas III", Quito, EPN, 1977.
- 3.- KIMBARK E.w., "Power System Stability", vol. III, 1^{ra} Edición, New York, 1948.
- 4.- ELGERD O. I., "Electric Energy Systems Theory", 1^{ra} Edición, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1971.
- 5.- TOAPANTA MILTON, "Estado transitorio del motor de inducción", Quito, Noviembre de 1977.
- 6.- THALER G., WILCOX J., "Máquinas Eléctricas", Ed. Limusa, Wyley S/A., México 1969.
- 7.- FITGERALD, A.E. KINGSLEY, "Electric Machinery", Mc Graw Hill Book Company, Tokio 2^{da} Edición, 1961.
- 8.- JURADO MARCO, "Apuntes sobre Protecciones de Generadores" Quito, EPN 1976.
- 9.- MOORE ERIC, "Apuntes sobre Protecciones", Quito, EPN 1978
- 10.- LANGSDORF ALEXANDER, "Teoría de las Máquinas de Corriente Alterna", Mc Graw Hill, 2^{da} Edición, 1971.

- 11.- KOSTENKO Y PIOTROVSKY, "Máquinas Eléctricas", vol. II,-
Barcelona 1968.
- 12.- SEETHARAMAN, VERMA, SERAFI, "Operation of Synchronous Ge
nerators in the Asynchronous mode", Department of Elec -
trical Engineering, University of Saskatchewan, Canadá.
1973.
- 13.- FORSYTHE, KEENAN, ORGANICK, STENBERG, "Lenguajes de Dia
gramas de Flujo", Ed. Limusa-Wiley S.A. México, 1973.
- 14.- LABORATORIO DE MAQUINAS ELECTRICAS, "Determinación de los
Parámetros Mecánicos de la Máquina Primitiva", EPN 1975.
- 15.- STEVENSON W., "Análisis de Sistemas Eléctricos de Poten
cia", Mc Graw Hill, México, 1965.
- 16.- BAKER D. H., "Converting Machine Parameter in Synchronous
Machines", Report supported by PEPC, Marzo 1972.
- 17.- ARGUELLO GABRIEL, "Método de determinación de los paráme
tros en régimen transitorio de una máquina sincrónica" ,
EPN, Quito.