TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO EN LA ESPECIALIZACION DE ELECTROTECNIA DE LA ESCUELA POLITECNICA NACIONAL.

ANALISIS Y CALCULO DE LA ESTABILIDAD DE OPERACION DE UN MOTOR SINCRONICO Y METODOS PARA MEJORAR LA - MISMA.

RAUL ASTUDILLO VINTIMILLA

QUITO, NOVIEMBRE 1.969.

CERTIFICO: QUE ESTE TRABAJO HA SIDO REALIZADO

POR EL SEÑOR RAUL ASTUDILLO VINTIMILLA.

Ing. JAIME VELASQUEZ TERAN.

INDICE :

ANALISIS Y CALCULO DE LA ESTABILIDAD DE OPERACION DE UN MOTOR - SINCRONICO Y METODOS PARA MEJORAR LA MISMA.

CAPITULO I

PAGINA.

INTRODUCCION GENERAL..... 1

CAPITULO II

CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS MOTORES SINCRONICOS

1.- Principio de operación..... 4

2.- El motor de rotor cilíndrico..... 8

2.1.- Voltaje interno e impedancia sincrónica... 8

2.2.- Torque desarrollado y ángulo de torque.... 13

2.3.- Características del ángulo de potencia.... 19

3.- El motor de polos salientes..... 22

3.1.- Reactancias y voltaje interno o de excitación..... 22

3.2.- Potencia de sincronización y ángulo de potencia..... 32

3.3.- Factor de estabilidad..... 35

4.- Determinación de las reactancias saturadas de la máquina..... 38

4.1.- Motor de rotor cilíndrico..... 38

4.2.- Motor de polos salientes..... 44

5.- Aplicaciones de los motores sincrónicos 45

CAPITULO III

LA ESTABILIDAD DE LOS MOTORES SINCRONICOS

1.- El problema general..... 49
2.- Causas de inestabilidad del motor..... 50
3.- Oscilación de la máquina por efectos de una perturbación..... 53
3.1.- Torque neto o de aceleración..... 53
3.2.- Ecuación de balanceo..... 56
3.3.- Condiciones transitorias, frecuencia de oscilación del rotor..... 59
3.4.- Condiciones iniciales..... 64
4.- Análisis de la estabilidad del motor ante variaciones de la carga..... 68
4.1.- Incrementos graduales de la carga..... 68
4.2.- Incrementos bruscos de la carga..... 70
4.3.- Disminuciones bruscas de la carga..... 75
5.- Análisis de la estabilidad del motor ante fallas, sobre la red de alimentación..... 78
5.1.- Estabilidad bajo condiciones de falla sostenida..... 78
5.2.- Estabilidad bajo condiciones de fallas no sostenidas..... 82
6.- Efecto de los arrollamientos de amortiguación..... 87

CAPITULO IV

CALCULO DE LA ESTABILIDAD. Página.

1.- Cálculo de la estabilidad ante variaciones de la carga..... 92

1.1.- Variaciones moderadas de la carga..... 93

a) Motor conectado a barras infinitas..... 93

b) Motor conectado a un generador de capaci - dad similar..... 99

1.2.- Variaciones bruscas de la carga..... 106

1.2.1.- Frecuencia natural; Cálculo de las -- constantes K1 y K2..... 106

1.2.2.- Determinación de las condiciones críticas..... 109

2.- Cálculo de la estabilidad ante fallas eléctricas... 113

2.1.- Determinación de las condiciones críticas.... 115

2.2.- Solución de la ecuación de balanceo..... 122

2.3.- Cálculo del momento de inercia y del momento angular..... 127

3.- Grado de aproximación en el cálculo..... 133

4.- Cómo mejorar la estabilidad..... 138

4.1.- Incremento de la inercia del sistema rotante. 140

4.2.- Puesta a tierra del neutro.....1 142

4.3.- Reducción de la reactancia de transferencia.. 144

4.4.- Reguladores automáticos de tensión..... 146

Página.

5.- Influencia de la inestabilidad del motor sobre el sistema de utilización general..... 149

5.1.- Características de la operación asincrónica del motor..... 149

5.2.- Conclusiones y recomendaciones..... 153

BIBLIOGRAFIA..... 158

INDICE DE GRAFICOS.

CAPITULO II

CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS MOTORES SINCRONICOS.

FIGURA		PAGINA
2.1	Campo magnético del estator y fuerza electromotriz cuando el rotor no está presente...	5
2.2	Campo magnético giratorio del rotor (excitación 100%).....	6
2.3	Deslizamiento del rotor como efecto de la aplicación de carga al eje de la máquina y diagrama vectorial de los campos magnéticos.....	9
2.4	Diagrama vectorial de fuerzas magnetomotrices y tensiones.....	14
2.5	Transmisión de potencia entre dos puntos de un sistema y diagrama vectorial de los voltajes.....	20
2.6	Inductancias propias y mutuas y ejes magnéticos de la máquina.....	23
2.7	Diagrama vectorial para el motor de polos salientes en base a las reactancias directa y en cuadratura.....	30
2.8	Diagrama vectorial para la determinación de la potencia de sincronización.....	33

FIGURA PAGINA.

2.9 Variación del torque en función del ángulo de torque para operación del motor bajo condiciones no transitorias..... 36

2.10 Variación del torque en función del ángulo de torque para operación del motor bajo condiciones transitorias..... 37

2.11 Diagrama vectorial y circuito equivalente para la determinación del factor de saturación. 40

2.12 Factor de saturación K para la determinación de las reactancias saturadas..... 43

CAPITULO III

LA ESTABILIDAD DE LOS MOTORES SINCRONICOS

3.1 Sistema de potencia : motor sincrónico conectado a barras infinitas..... 51

3.2 Sistema de potencia:dos máquinas sincrónicas interconectadas..... 51

3.3 Curvas de oscilación del motor..... 62

3.4 Curva torque-ángulo de torque para un motor de polos salientes para analizar el límite - de estabilidad en estado permanente..... 69

3.5 Análisis gráfico del comportamiento del mo - tor ante un incremento brusco de la carga... 73

3.6 Análisis gráfico del comportamiento del mo - tor ante una disminución brusca de la carga. 74

FIGURA PAGINA.

3.7 Análisis gráfico de la reversión del ángulo de torque ante una disminución brusca de la carga..... 76

3.8 Análisis gráfico de la influencia de una falla sostenida sobre la operación del motor. 80

3.9 Determinación gráfica del límite de estabilidad para el caso de falla sostenida..... 83

3.10 Análisis gráfico de la influencia de una -- falla despejada sobre la operación del mo - tor..... 86

CAPITULO IV

CALCULO DE LA ESTABILIDAD

4.1 Motor conectado a un sistema de barras infinitas..... 94

4.2 Distorsión del flujo de potencia por efecto de la variación de la tensión interna del - motor..... 98

4.3 Diagrama unifilar de un sistema formado por dos máquinas sincrónicas interconectadas a través de una reactancia exterior..... 103

4.4 Determinación gráfica de las tensiones Eg y Em cuando su defasamiento es de 90°..... 104

FIGURA PAGINA.

4.5 Determinación gráfica de la constante K2 del torque de sincronización..... 110

4.6 Determinación gráfica del límite de estabilidad ante un incremento brusco de la carga... 112

4.7 Determinación gráfica del límite de estabilidad ante una inserción brusca de la carga a partir de la operación en vacío..... 114

4.8 Límite de estabilidad ante una falla despejada (despeje instantáneo)..... 119

4.9 Límite de estabilidad ante una falla sostenida..... 120

4.10 Límite de estabilidad ante una falla despejada (despeje no instantáneo)..... 121

4.11 Curva de deceleración del motor..... 132

CAPITULO I

INTRODUCCION GENERAL.-

La estabilidad de un sistema de potencia es la capacidad - del sistema de mantenerse en equilibrio de operación frente a - determinadas situaciones de carácter anormal, mediante la creación de fuerzas iguales y opuestas a aquellas causadas por la perturbación.

El cálculo del problema de estabilidad consiste en establecer aquellas condiciones para las cuales la operación del sistema resulta ser crítica (condiciones límites); en tal forma que la estabilidad quede garantizada para cualquier otra condición menos rigurosa.

El propósito del presente trabajo es analizar, en sus diferentes aspectos el problema concreto de la estabilidad de operación del motor sincrónico, como dispositivo de conversión de potencia eléctrica en mecánica, a la vez que establecer los criterios para el cálculo del mismo y los métodos de los que se puede hacer uso con el objeto de incrementar o mejorar dicha estabilidad.

En el Capítulo II, se analizan las características del motor sincrónico tales como torque, ángulo de torque, voltaje in-

terno o de excitación, reactancias, factor de rigidez, etc. referidas siempre al punto de vista de la estabilidad; haciendo una diferenciación entre el motor de rotor devanado o cilíndrico y el de polos salientes.

Se cierra el Capítulo enumerando algunos campos de aplicación indus trial de los motores sincrónicos.

En el Capítulo III se analizan las causas capaces de arrastrar al motor a la pérdida de sincronismo o "paso"; causas provenientes sea del lado de la carga o del lado de la alimentación; y el comportamiento de la máquina en respuesta a tales perturbaciones sean éstas de carácter transitorio o no transitorio.

El estudio de este comportamiento se lo desarrolla primeramente en base a la ecuación de balanceo u oscilación del rotor y se lo complementa mediante el análisis gráfico basado en el principio denominado "de las áreas iguales".

Se cierra el capítulo analizando el efecto de los arrollamientos de amortiguación sobre las oscilaciónes del rotor.

En la práctica una solución matemáticamente exacta de un problema de estabilidad carece de importancia y su utilidad ob

jetiva no justifica lo complejo del proceso necesario para llegar a tales resultados; por tanto el cálculo más bien se lo desarrolla a partir de ciertas suposiciones y aproximaciones que simplifican enormemente el trabajo y no representan sobre el resultado final errores de consideración.

La discusión de tales criterios, el proceso de solución del problema y la evaluación de los errores en el resultado final, para cada uno de los diferentes casos típicos relacionados con la operación del motor, se presentan y desarrollan en el Capítulo IV.

Posteriormente, dentro del mismo capítulo, se exponen y analizan algunos de los principales métodos que pueden ser usados con el objeto de incrementar las condiciones de estabilidad de funcionamiento del motor.

Se complementa este capítulo con un análisis de la operación inestable oasincrónica del motor y su influencia sobre el sis tema de utilización, lo cual sirve para poner de manifiesto la importancia del problema general.

CAPITULO II

CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS MOTORES SINCRONICOS.-

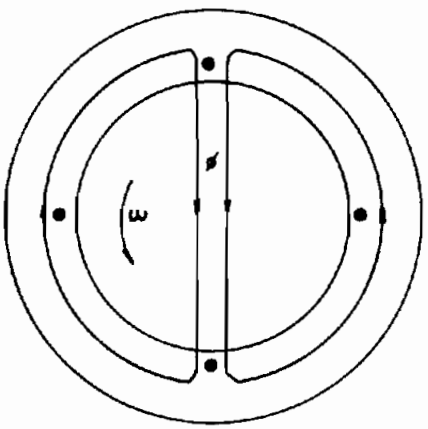
1.- PRINCIPIO DE OPERACION.

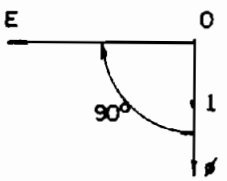
El hecho de que la corriente suministrada a un motor sincrónico sea trifásica y la disposición y conexiones de los arrollamientos de la armadura determinan que el campo magnético producido por el estator y que atraviesa el entrehierro, sea rotante, a velocidad constante, proporcional a la frecuencia aplicada.

En la Figura 2.1 se muestra el estator de una máquina bipolar y el flujo producido por los arrollamientos del mismo en un instante determinado; por ejemplo cuando sus sentido es de arriba hacia abajo. En este momento es evidente que los conductores superior e inferior cortan mayor cantidad de flujo, es decir experimentan mayor fuerza electromotriz. Por otra parte, tal flujo será naturalmente producido por una corriente que circule por una bobina horizontal como la indicada.

Si en estas circunstancias se introduce en el estator un rotor bipolar, como se ve en la figura 2.2, alineado siempre con el flujo, es decir girando a la misma velocidad que éste, la reluctancia del circuito magnético se reducirá enormemente. Asumamos que, el flujo permanece constante, entonces considerando que:

CAMPO MAGNETICO GIRATORIO DEL ESTATOR Y FUERZA ELECTROMOTRIZ CUANDO EL ROTOR NO ESTA PRESENTE





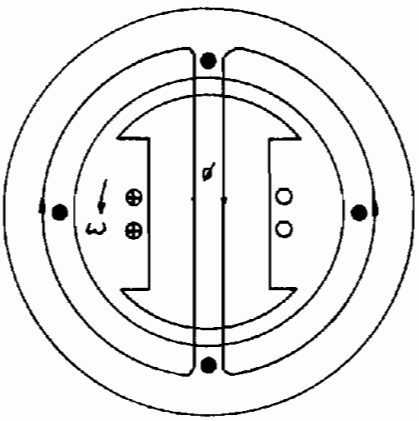
ϕ: FLUJO MAGNETICO PRODUCIDO POR EL ESTATOR

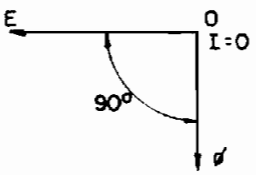
E: FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

I: CORRIENTE DEL ESTATOR

ω: VELOCIDAD DE ROTACION DEL CAMPO

CAMPO MAGNETICO GIRATORIO DEL ROTOR (EXITACION 100 %) PRODUCIENDO LA MISMA FUERZA ELECTROMOTRIZ QUE LA FIG. 2.1





ø : FLUJO MAGNETICO PRODUCIDO POR EL ROTOR

E : FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

ω : VELOCIDAD DE ROTACION DEL ROTOR Y DEL CAMPO

$$F = \phi . R$$

En donde:

F = Fuerza Magnetomotriz

ϕ = Flujo

R = Reluctancia.

Es fácil deducir que la corriente tomada por el motor de la línea, se reducirá también por ser proporcional a la fuerza magnetomotriz.

Supóngase entonces que el arrollamiento de campo en el motor es excitado mediante corriente contínua, de manera que el flujo producido por dicho campo tenga la misma dirección que el flujo del estator. Para que el flujo resultante permanezca inalterable, cualquier incremento de la corriente de campo desde su valor inicial cero determinará, como consecuencia, una reducción de la corriente del estator. La corriente de campo llega a su valor 100% cuando la corriente en la armadura se anula completamente.

Bajo las condiciones señaladas arriba, alineamiento de los dos campos y rotor girando a velocidad sincrónica, supóngase ahora que se aplica carga al eje del motor. El efecto inmediato que se obtiene es el desplazamiento ligero del rotor de su posi-

ción de alineamiento formando un ángulo δ . Véase la figura 2.3.

El torque que el motor crea entonces, a fin de balancear el efecto de la carga, se manifiesta por la tendencia del rotor a volver a su posición original, que no es sino la tendencia de - los dos campos a alinearse mutuamente, igual que dos imanes permanentes.

El deslizamiento hacia atrás del rotor, no significa que una vez estabilizado el sistema después de la aplicación de la - carga, la velocidad del rotor sea menor; dentro de condiciones - no transitorias los dos campos giran a la misma velocidad, la - sincrónica (conservando el ángulo δ en el caso de existir carga aplicada).

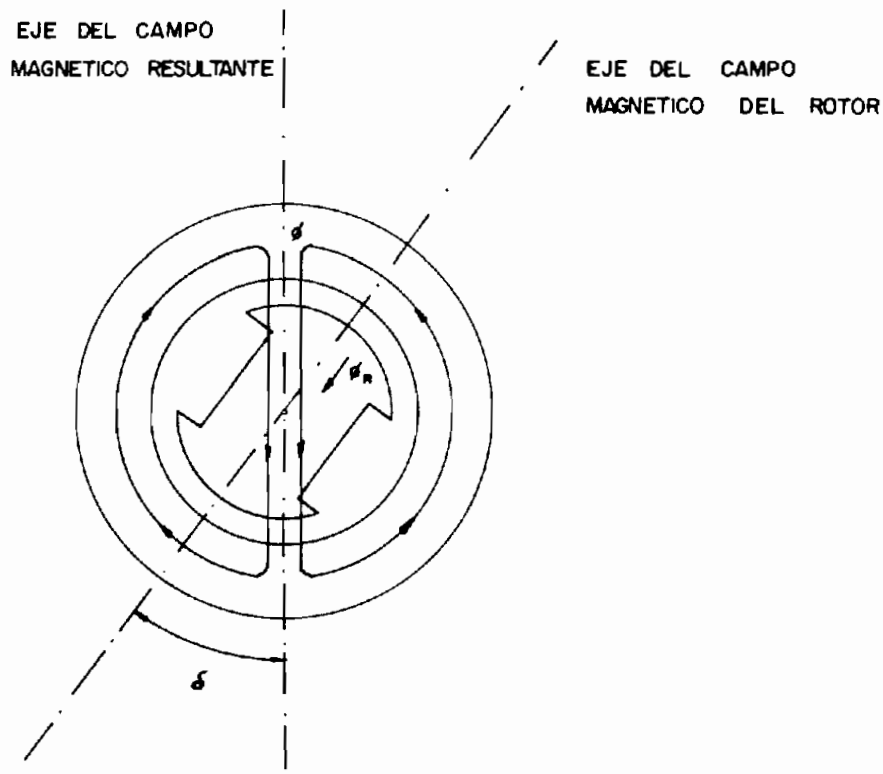
Los motores sincrónicos se clasifican en dos tipos generales: los de rotor cilíndrico o devanado y los de polos salientes, caracterizados respectivamente por la uniformidad o desuniformidad del entrehierro, que establece diferencias entre las - propiedades de uno y otro tipo.

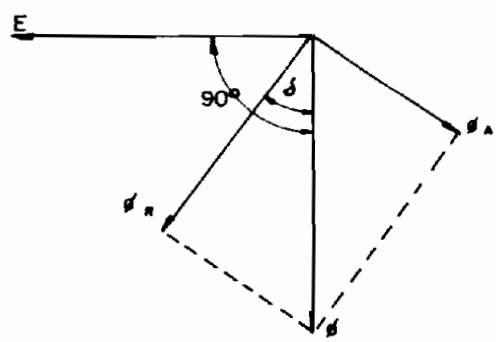
2.- EL MOTOR DE ROTOR CILINDRICO.

2.1.- VOLTAJE INTERNO E IMPEDANCIA SINCRONICA.

El motor consiste de varios arrollamientos acoplados entre

DESLIZAMIENTO DEL ROTOR COMO EFECTO DE LA APLICACION DE CARGA AL EJE DE LA MAQUINA Y DIAGRAMA VECTORIAL DE LOS CAMPOS MAGNETICOS DE LA ARMADURA, DEL ROTOR Y RESULTANTE





ø FLUJO MAGNETICO RESULTANTE

øR FLUJO MAGNETICO PRODUCIDO POR EL ROTOR

øA FLUJO MAGNETICO PRODUCIDO POR LA ARMADURA

δ ANGULO DE TORQUE

E FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

sí inductivamente (tres arrollamientos: a, b y c, formando un - grupo trifásico en el estator y el arrollamiento de campo f, en el rotor).

Para cualquiera de los circuitos de fase o de campo se cumple que la suma de las caídas de tensión es igual a la tensión aplicada:

$$v = R.i + d\phi/dt$$

En donde:

v: Voltaje instantáneo aplicado.
R: Resistencia del arrollamiento.
i: Corriente que circula por el arrollamiento.
ϕ: Concatenamiento de flujo del arrollamiento o sumatoria de las inductancias propias y mutuas multiplicadas por las respectivas corrientes.

Así por ejemplo, para la fase "a" se tiene que:

$$\phi a = \mathcal{L}aa.ia + \mathcal{L}ab.ib + \mathcal{L}ac.ic + \mathcal{L}af.if.$$

En donde:

$\mathcal{L}aa$ es la inductancia propia del arrollamiento "a";
$\mathcal{L}ab$, $\mathcal{L}ac$ y $\mathcal{L}af$ son las inductancias mutuas entre la fase - "a" y los arrollamientos "b", "c" y "f" respectivamente.

En este punto se presenta la diferencia entre el motor de rotor cilíndrico y el de polos salientes; mientras en el primero las inductancias propias y mutuas del estator no dependen de la posición del rotor que gira a velocidad sincrónica (dada la uniformidad del entrehierro) es decir son constantes con respecto al tiempo, en el de polos salientes son funciones de dicha posición del rotor o lo que es lo mismo del tiempo (como se verá más adelante).

Por tanto, para el motor de rotor cilíndrico se tiene que:

$$d\psi a/dt = Laa.dia/dt + Lab.dib/dt + Lac.dic/dt + dLaf.if/dt.$$

Si se asume que la corriente de campo es constante y que la alimentación es balanceada, se tiene que:

$$ia = I.Sen\ (wt + \Theta_o)$$
$$ib = I.Sen\ (wt - 120° + \Theta_o)$$
$$ic = I.Sen\ (wt + 120° + \Theta_o)$$
$$if = If$$

Derivando:

$$dia/dt = Iw.cos\ (wt + \Theta_o) = Iw.Sen\ (wt + \Theta_i)$$
$$dib/dt = I.W.cos\ (wt - 120° + \Theta_o) = Iw.Sen\ (wt - 120° + \Theta_i)$$
$$dic/dt = I.W.cos\ (wt + 120° + \Theta_o) = Iw.Sen\ (wt + 120° + \Theta_i)$$

En donde se ha sustituído: $\Theta_1 = 90° + \Theta_o$

Por otra parte Laf, es decir la inductancia mutua entre el arrollamiento de la fase "a" del estator y el arrollamiento de campo "f" es función de la posición del rotor (máxima para Θ = = 0°, nula para Θ = 90° y 270° y máxima negativa cuando Θ = 180°) y por tanto del tiempo. Si se asume una distribución sinusoidal del flujo se tiene entonces:

$$\mathfrak{L}af = Laf.\cos(wt + \Theta_o)$$

Y por tanto:

$$d\,\mathfrak{L}af.if/dt = Laf.w.If.\cos(wt + \Theta_1) = E$$

Efectuando las sustituciones correspondientes tenemos que:

$$va = R.ia + I.\left[Xaa.Sen(wt + \Theta_1) + Xab.Sen(wt - 120° + \Theta_1) + Xac.Sen(wt + 120° + \Theta_1)\right] + If.Xaf.\cos(-wt + \Theta_1)$$

que puede reducirse a la expresión vectorial:

$$\bar{V} = R.\bar{I} + jXs.\bar{I} + \bar{E} = \bar{E} + (R+jXs).\bar{I} = \bar{E} + Zs.\bar{I}$$

E es la tensión inducida por el campo magnético del rotor y que se denomina "voltaje interno de excitación del motor", en tanto que I.Zs es la caída de tensión en los arrollamientos del estator debida a la caída de tensión en la resistencia R y a - la inducción Xs.I; Zs y Xs son las denominadas impedancia y reac

tancia sincrónicas respectivamente.

Cuando R << Xs, se puede considerar a las tensiones V, I.Zs y E como inducidas por las fuerzas magnetomotrices F, Fa y Fr - respectivamente con relación a las cuales atrasan 90°, y trazar el diagrama vectorial de la figura 2.4.

Entonces puesto que en base al diagrama 2.3 el ángulo entre F y Fr es δ, es decir el ángulo de torque, se puede concluir - (diagrama 2.4) que el defasamiento entre las tensiones V (voltaje a los bornes del motor y E (voltaje interno) es el mismo ángulo de torque δ.

2.2.- TORQUE DESARROLLADO Y ANGULO DE TORQUE.

El propósito del desarrollo, a continuación, es determinar la relación entre el torque transmitido a través del entrehierro y el ángulo de torque definido anteriormente.

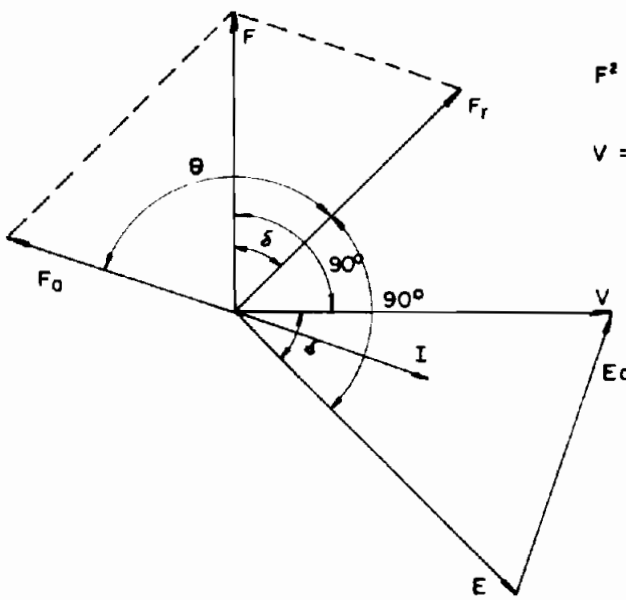
Con respecto a la figura 2.4:

Fa = Valor máximo de la onda de fuerza magnetomotriz de la armadura.

Fr = Valor máximo de la onda de fuerza magnetomotriz del - rotor.

F = Valor máximo de la onda de fuerza magnetomotriz resultante.

DIAGRAMA VECTORIAL DE FUERZAS MAGNETOMOTRICES Y TENSIONES



$F^2 = Fa^2 + Fr^2 + 2\,Fa\,Fr.\,Cos\ \Theta$

$V = E + Eo = E + IXs$

F : FUERZA MAGNETOMOTRIZ RESULTANTE
Fa : FUERZA MAGNETOMOTRIZ DE LA ARMADURA
Fr : FUERZA MAGNETOMOTRIZ DEL ROTOR
V : VOLTAJE A LOS BORNES DEL MOTOR
E : TENSION INTERNA INDUCIDA
I : CORRIENTE DE LA ARMADURA

Θ = Defasamiento entre las fuerzas magnetomotrices del - rotor y del estator.

δ = Defasamiento entre las fuerzas magnetomotrices del - rotor y resultante.

En el diagrama tenemos:

$$F^2 = Fa^2 + 2\,Fa.Fr.\cos\Theta$$

Si se asume que la densidad del flujo es uniforme a lo - largo del circuito magnético se tendrá que:

$$F = H.g$$

En donde:

H = Valor máximo de la intensidad del campo magnético.

g = Longitud de la apertura del entrehierro.

La densidad de energía magnética almacenada en el entrehierro es igual a:

$\frac{1}{2}\mu_o.\mathcal{H}^2$, en donde:

μ_o = Permeabilidad del aire.

$\mathcal{H}$ = Valor de la onda sinusoidal de la intensidad del - campo.

La energía total en el entrehierro será igual al valor promedio de la energía por el volumen del entrehierro. Puesto que

el valor promedio de una onda sinusoidal al cuadrado es igual al valor máximo de la onda dividido por dos, esa energía total será:

$$W = \frac{\mu_o}{4} \cdot \left(\frac{F}{g}\right)^2 \times \overline{\Pi}.d.l.g = \frac{\mu_o}{4g} \cdot \overline{\Pi}.d.l.F^2$$

$$= \frac{\mu_o}{4g} \cdot \overline{\Pi}.d.l.(Fa^2 + Fr^2 + 2Fa.Fr.\cos \Theta)$$

En donde:

l = Longitud axial del entrehierro.

d = Diámetro medio, entre las caras exterior e interior del entrehierro.

Es posible entonces, a partir de esta expresión, determinar el torque desarrollado por el motor, derivando parcialmente la misma con respecto al ángulo mecánico Θm; considerando previamente que la relación entre los ángulos mecánico y eléctrico viene dada por la expresión:

$$\Theta = \frac{p}{2} \Theta m$$

En donde:

p = número de polos del motor.

Al derivar se obtiene:

$$T = \frac{\delta W}{\delta \Theta m} = - \frac{P}{2} \cdot \frac{\Pi}{2} \cdot \frac{\mu_o . d . l}{g} . Fa . Fr . Sen \Theta$$

En el diagrama de las fuerzas magnetomotrices de la figura 2.4 se tiene que:

$$Fa . Sen \Theta = F . Sen \delta$$

Y además, por otra parte:

$$B = \mu . H = \mu \cdot \frac{F}{g}$$

En donde:

B = Densidad de flujo.

Efectuando estas dos sustituciones la expresión anterior - del torque se reduce a:

$$T = - \frac{P}{2} \cdot \frac{\Pi}{2} . d . l , Bar . Fr . Sen \delta$$

El flujo total ϕ es igual al valor medio de la densidad de flujo sobre un polo por el área del polo. El valor medio de una onda sinusoidal es $2/\Pi$ veces el valor máximo, es decir que:

$$\phi = \left(\frac{2}{\Pi} . B \right) \cdot \left(\frac{\Pi . d . l}{P} \right)$$

Después de esta sustitución la expresión para el torque queda:

$$T = - \frac{\Pi}{2} \cdot \left(\frac{P}{2}\right)^2 . \phi . Fr . Sen\delta$$

El signo negativo se explica por el hecho de que el torque siendo proporcional al seno del ángulo δ, tiende sin embargo a - anular dicho ángulo al tratar los dos campos magnéticos de ali - nearse mutuamente. Si se tiene presente este hecho el signo pue de omitirse.

$$T = K . \phi . Fr . Sen\delta$$

En donde:

K = es una constante.

El flujo total ϕ es prácticamente constante, independientemente de la carga aplicada al motor; lo mismo ocurre con Fr que depende del valor de la excitación de campo; por tanto cualquier variación de la carga del motor demanda únicamente ajustes en el ángulo de torque δ y el "torque máximo" que la máquina puede producir se obtiene cuando δ alcanza el valor de 90°, bajo la condición de que los voltajes aplicados a la armadura y al campo permanezcan constantes.

Así, si las exigencias de la carga exceden del valor del - torque máximo que el motor puede desarrollar, la velocidad de la máquina decae sin posibilidad de recuperación, los campos magné-

ticos del rotor y del estator dejan de ser estacionarios; es decir el motor pierde su acción sincrónica o estabilidad.

2.3.- CARACTERISTICAS DEL ANGULO DE POTENCIA.

Consideremos la potencia que se puede transmitir entre dos puntos de un sistema eléctrico a través de una impedancia inductiva. Sean a y b los puntos de recepción y entrega de potencia respectivamente, como se indica en la figura 2.5, en donde además se muestra el respectivo diagrama vectorial de voltajes.

La potencia en el punto b será:

$$Pa = Vb.I.\cos \phi$$

En vectores:

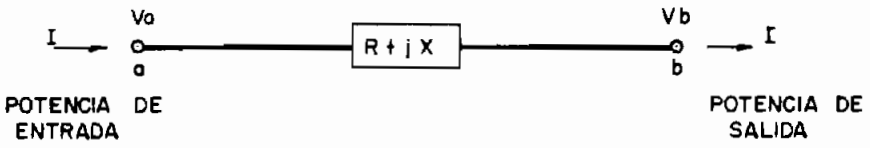
$$\bar{I} = \frac{\bar{V}a - \bar{V}b}{\bar{Z}} = \frac{Va}{Z} \angle \delta - \theta \quad - \frac{Vb}{Z} \angle 0 - \theta$$

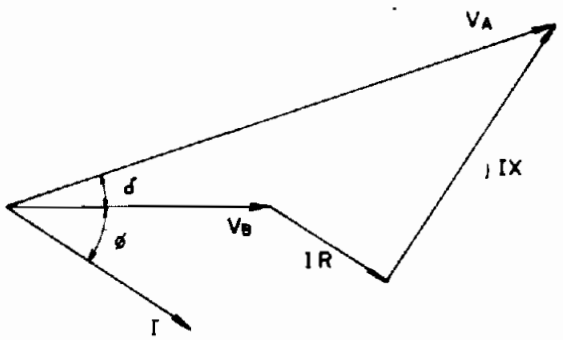
En donde θ es el ángulo de $\bar{Z}$

$$\text{Parte real de } \bar{I} = I.\cos \phi = \frac{Va}{Z} .\cos (\delta - \theta) - \frac{Vb}{Z} \cos (-\theta)$$

Pero $\cos (-\theta) = R/Z$; entonces:

TRANSMISION DE POTENCIA ENTRE DOS PUNTOS DE UN SISTEMA Y DIAGRAMA VECTORIAL DE LOS VOLTAJES





δ = ANGULO DE POTENCIA
V_A = VOLTAJE EN EL PUNTO DE ENTREGA
V_B = VOLTAJE EN EL PUNTO DE RECEPCION

$$Pb = Vb.I.\cos \phi \quad \frac{Va.Vb}{Z} \cos (\delta - \Theta) - \frac{Vb^2}{Z} . \frac{R}{Z}$$

Si, como frecuentemente sucede, $R << Z$ se tendrá que:

$$R \approx 0;\ X \approx Z;\ \Theta \approx 90°$$

Y entonces:

$$Pb = \frac{Va.Vb}{X} . \operatorname{Sen} \delta$$

Al despreciar el valor de R se establece que la potencia - en el punto de entrada "a" sea igual a Pb (pérdidas nulas).

Por tanto, la ecuación de la potencia transmitida será:

$$P = \frac{Va.Vb}{X} \operatorname{sen} \delta$$

El valor máximo de potencia que podrá transmitirse será:

$$Pmx = \frac{Va.Vb}{X} ;$$

Que se tiene para $\delta = 90°$, bajo la condición de voltajes - constantes en los puntos de recepción y entrega.

Se evidencia así cómo la potencia transmitida depende del defasamiento entre los voltajes asociados a los puntos de recep

ción y entrega denominado "ángulo de potencia o de torque".

3.- EL MOTOR DE POLOS SALIENTES.

3.1.- REACTANCIAS Y VOLTAJE INTERNO O DE EXCITACION.

Las inductancias propias y mutuas entre los arrollamientos (de la arma dura y del campo) en el motor de polos salientes dependen de la posición del rotor y son por tanto funciones del tiempo; este hecho establece la diferencia con respecto al motor de rotor cilíndrico.

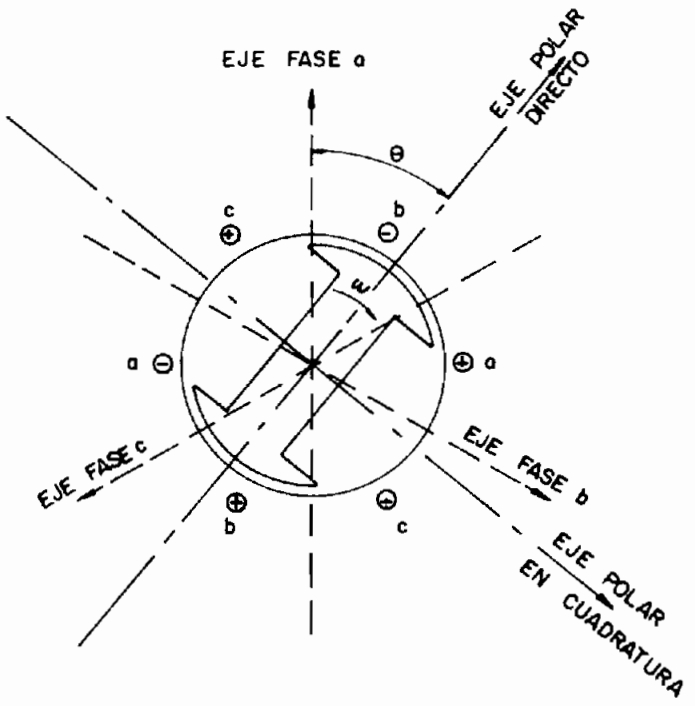
Supóngase un arrollamiento trifásico en el estator, en tal forma que los ejes magnéticos de cada fase estén separados 120° eléctricos y un rotor bipolar (con los ejes directo y en cuadratura separados 90° eléctricos) cuya posición venga dada por Θ (ángulo entre el eje directo y el eje de la fase "a") véase la figura 2.6.

La inductancia propia (L_{aa}) de la fase "a" será siempre positiva, máxima cuando $\Theta = 0°$ y mínima cuando $\Theta = 90°$. Se compone de una parte constante y de otra variable; la variación es prácticamente sinusoidal.

$$L_{aa} = L1 + L2.\cos 2\Theta \qquad (1)$$

En donde:

INDUCTANCIAS PROPIAS Y MUTUAS ENTRE LOS ARROLLAMIENTOS DE LA MAQUINA EJES MAGNETICOS DE LAS TRES FASES DEL ESTATOR Y EJES MAGNETICOS DIRECTO Y EN CUADRATURA DEL ROTOR



L1 = componente constante de la inductancia propia.

L2 = Amplitud de la componente variable.

La inductancia mutua entre dos fases es siempre negativa y su valor máximo absoluto se tiene cuando el eje directo cae justo en la mitad del espaciamiento entre el eje positivo de una - fase y el eje negativo de la otra fase (Para las fases "a" y "b", por ejemplo, cuando $\Theta = -30°$).

Por medición se puede establecer que la variación es sinusoidal y su amplitud es igual a L2; por tanto:

$$\ell ab = -(L3 + L2.\cos 2(\Theta + 30°)) \qquad (2)$$

En donde:

L3 = Componente constante de la inductancia mutua

Se mencionó, al analizar la máquina de rotor cilíndrico, - que la inductancia mutua entre los arrollamientos de fases y -- campo era también sinusoidal; máxima para $\Theta = 0°$ y mínima para $\Theta = 180°$; es decir:

$$\ell af = Laf.\cos \Theta \qquad (3)$$

La inductancia propia del arrollamiento de campo Lff es naturalmente independiente de la posición del rotor, es decir constante.

El análisis que se acaba de desarrollar para la fase "a" - es aplicable para las fases "b" y "c"; para las que basta efectuar las sustituciones de θ por $(\theta - 120°)$ y $(\theta + 120°)$ respectiva - mente.

Así:

$$\ell bb = L1 + L2.\cos 2(\theta - 120°)$$

$$\ell cc = L1 + L2.\cos 2(\theta + 120°), \text{ etc.}$$

Recuérdese que $\theta = wt + \theta_o$

Una vez establecidas las inductancias en función de la posición del rotor, pasemos a determinar las ecuaciones de voltajes de la máquina.

Los concatenamientos de flujo para cada fase y para el campo están dados por:

$$\begin{aligned} \psi a &= \ell aa.ia + \ell ab.ib + \ell ac.ic + \ell af.if \\ \psi b &= \ell ab.ia + \ell bb.ib + \ell bc.ic + \ell bf.if \\ \psi c &= \ell ac.ia + \ell bc.ib + \ell cc.ic + \ell cf.if \\ \psi f &= \ell af.ia + \ell ff.ib + \ell cf.ic + \ell ff.if \end{aligned} \qquad (4)$$

0015 2

Si en estas expresiones se sustituyen los valores de las inductancias determinadas anteriormente, se tiene:

$$\psi a = (L1+L2.\cos 2\theta)ia + [-L3+L2.\cos(2\theta - 120°)].ib + \qquad (5)$$

$$+ [-L3+L2.\cos(2\theta+120°)]\, ic + Laf.\cos\theta.if$$

$$\phi b = [-L3 + L2.\cos(2\theta - 120°)]\, ia + [L1 + L2.\cos(2\theta + 120°)]\, ib + (-L3 + L2.\cos 2\theta)\, ic + Laf.\cos(\theta - 120°).if.$$

$$\phi c = [-L3 + L2.\cos(2\theta + 120°)]\, ia + (-L3 + L2.\cos 2\theta)\, ib + [L1 + L2.\cos(2\theta - 120°)]\, ic + Laf.\cos(\theta + 120°)\, If.$$

$$\phi f = (Laf.\cos\theta)\, ia + [Laf.\cos(\theta - 120°)]\, ib + [Laf.\cos(\theta + 120°)]\, ic + Lff.if.$$

En base a estas expresiones se podrá determinar los voltajes de fase y de campo a los terminales del motor, mediante la solución de las ecuaciones

$$Va = R.ia + d\,\phi a/dt \qquad (6)$$
$$Vb = R.ib + d\,\phi b/dt$$
$$Vc = R.ic + d\,\phi c/dt$$
$$Vf = R.if + d\,\phi f/dt$$

La solución de estas ecuaciones es demasiado compleja, puesto que tanto las inductancias como las corrientes son funciones de la posición del rotor y del tiempo.

Es más conveniente, por tanto, tratar de encontrar un grupo

de variables auxiliares para concatenamientos del flujo, corrientes, voltajes, etc., cuya sustitución permita obtener expresiones en las que las inductancias sean independientes de la posición del rotor.

El grupo de variables que cumplen esta condición se obtiene al proyectar las variables de la fase sobre un par de ejes ortogonales; el uno denominado "directo", que coincide con el eje polar y el otro denominado "en cuadratura".

Así se tendrá que:

$$id = K\,[ia.\cos\Theta + ib.\cos(\Theta - 120°) + ic.\cos(\Theta + 120°)] \quad (7)$$

$$iq = -K\,[ia.\operatorname{sen}\Theta + ib.\operatorname{sen}(\Theta - 120°) + ic.\operatorname{sen}(\Theta + 120°)]$$

$$\phi d = K\,[\phi a.\cos\Theta + \phi b.\cos(\Theta - 120°) + \phi c.\cos(\Theta+120°)] \quad (8)$$

$$\phi q = -K\,[\phi a.\operatorname{sen}\Theta + \phi b.\operatorname{sen}(\Theta - 120°) + \phi c.\operatorname{sen}(\Theta +120°)]$$

$$vd = K\,[va.\cos\Theta + vb.\cos(\Theta-120°) + vc.\cos(\Theta+120°)] \quad (9)$$

$$vq = -K\,[va.\operatorname{sen}\Theta + vb.\operatorname{sen}(\Theta-120°) + vc.\operatorname{sen}(\Theta+120°)]$$

En donde la constante K es arbitraria.

Ahora es posible obtener los concatenamientos de flujo ϕd y ϕq y ϕf en función de id e iq, para lo cual basta sustituir en

las ecuaciones (8) las expresiones (5) y (7) en su orden.

El resultado es:

$$\phi d = (L1 + L3 + 3/2.L2).id + Laf.if \qquad (10)$$

$$\phi q = (L1 + L3 - 3/2.L2).iq$$

$$\phi f = 3/2.Laf.id + Lff.if$$

Es decir que:

$$\phi d = Ld.id + Laf.if \qquad (11)$$

$$\phi q = Lq.iq$$

$$\phi f = 3/2.Laf.id + Lff.if$$

En donde:

$$Ld = L1 + L3 + 3/2.L2 \qquad y$$

$$Lq = L1 + L3 - 3/2.L2$$

Vendrían a ser las inductancias directa y en cuadratura respectivamente; como se ve, son contantes (independientes de Θ).

La sustitución de las ecuaciones (6) de voltajes de fase en las ecuaciones (9) nos da, después de simplificar:

$$vd = R.id + d\,\phi d/dt - W.\phi q \qquad (13)$$

$$vq = R.iq + d\,\phi q/dt + W.\phi d$$

Para la construcción del diagrama vectorial supongamos que se tiene un sistema balanceado de secuencia positiva de corrientes de fase y que la corriente de campo es constante. En tal forma que:

$$ia = I.\cos(wt + \Theta_o) \qquad (14)$$

$$if = I.\cos(wt - 120° + \Theta_o)$$

$$ic = I.\cos(wt + 120° + \Theta_o)$$

$$if = \bar{I}f : \text{(constante)}.$$

Entonces, de acuerdo a las ecuaciones (7), en donde $K = 2/3$, se tiene:

$$id = I.\cos\Theta_o = \bar{I}d \quad \text{(constante)} \qquad (15)$$

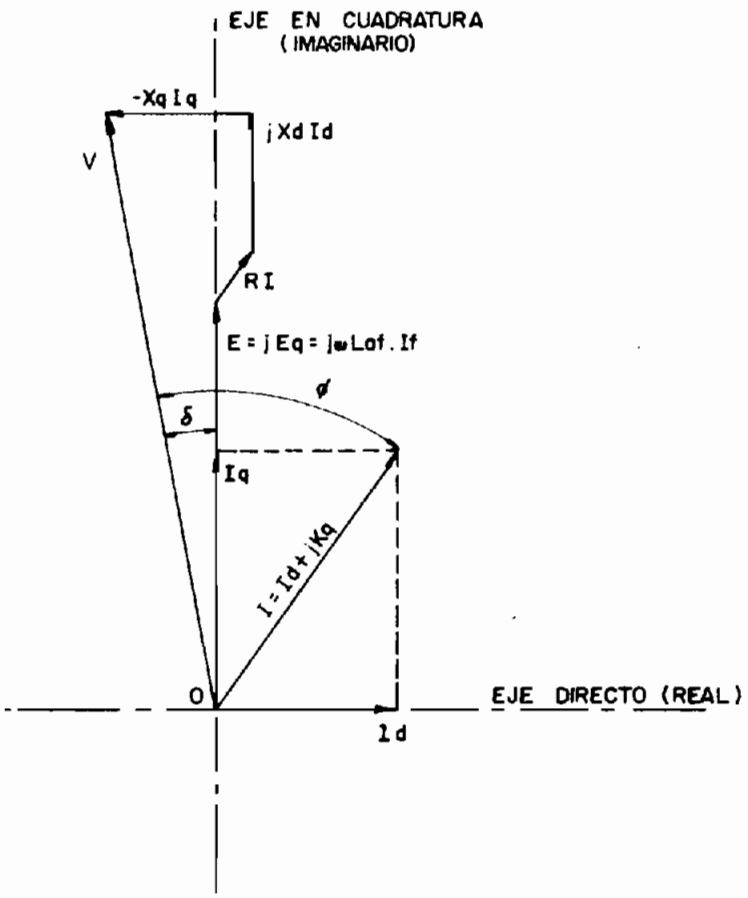
$$iq = \bar{I}.\operatorname{sen}\Theta_o = \bar{I}q \quad \text{(constante)}$$

Y según las ecuaciones (11):

$$\phi d = Ld.Id + Laf.If \quad \text{(constante)} \qquad (16)$$

$$\phi q = Lq.Iq \quad \text{(constante)}$$

DIAGRAMA VECTORIAL PARA EL MOTOR DE POLOS SALIENTES EN BASE A LAS REACTANCIAS DIRECTA Y EN CUADRATURA



V = VOLTAJE A LOS TERMINALES DEL MOTOR
E = VOLTAJE INTERNO DE LA EXCITACION
I = CORRIENTE DE LA ARMADURA
Xd = REACTANCIA SOBRE EL EJE DIRECTO
Xq = REACTANCIA SOBRE EL EJE EN CUADRATURA

$\phi f = 3/2.Laf.Id + Lff.If$ (constante)

Los voltajes según las ecuaciones (13) quedan entonces:

$vd = R.Id - W.\phi q$

$= R.Id - W.Lq.Iq$

$= R.Id - Xq.Iq = Vd$ (constante) (17)

$vq = R.iq + W.\phi d$

$= R.Iq + W.Ld.Id + W.Laf.If$

$= R.Iq + Xd.Id + Eq = Vq$ (constante) (18)

En donde:

$Eq = W.Laf.If.$ (19)

Eq es el voltaje interno o de excitación del motor (detrás de la impedancia sincrónica), directamente proporcional a la corriente de campo If.

Vectorialmente la corriente en un sistema de secuencia positiva, está dada por:

$\bar{I} = I \angle \theta$

Pero:

$$I \angle \Theta = I.\cos \Theta_o + I.\text{sen } \Theta_o$$

$$= Id + j\ Iq$$

Es decir que:

$$\bar{I} = Id + jIq$$

En forma similar:

$$\bar{E} = Ed + jEq = O + j\ Eq = jEq \qquad (20)$$

$$\bar{V} = Vd + j\ Vq \qquad (21)$$

Sustituyendo las ecuaciones (17), (18) y (20) en la ecuación (21) se obtiene:

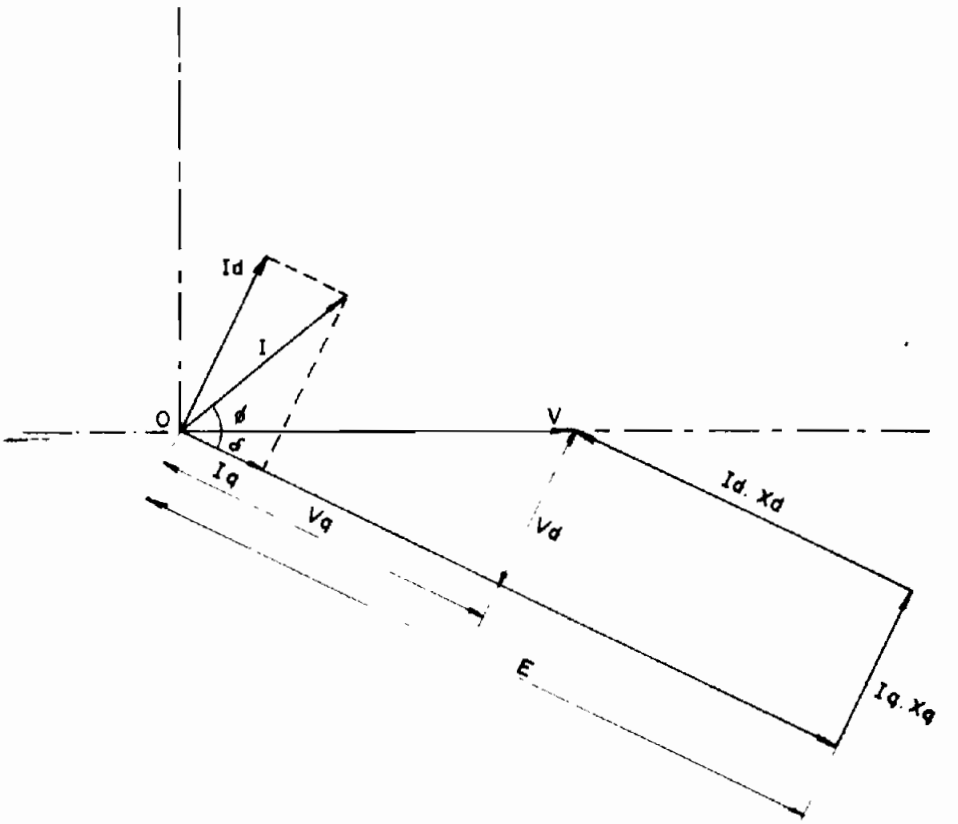
$$\bar{V} = \bar{E} + R\bar{I} + jd.Id - Xq\ Iq$$

El diagrama vectorial se muestra en la figura 2.7.

3.2.- POTENCIA DE SINCRONIZACION Y ANGULO DE POTENCIA.

A partir del diagrama vectorial de la figura 2.8, en el que se desprecia la resistencia interna, se tiene que la potencia de entrada (igual a la potencia convertida) es igual:

DIAGRAMA VECTORIAL PARA EL MOTOR DE POLOS SALIENTES PARA LA DETERMINACION DE LA POTENCIA DE SINCRONIZACION (NO SE CONSIDERA LA CAIDA DE TENSION SOBRE LA RESISTENCIA INTERNA)



V = VOLTAJE A LOS TERMINALES DEL MOTOR

E = VOLTAJE INTERNO O DE EXCITACION

I = CORRIENTE DE LA ARMADURA

Xd = REACTANCIA SOBRE EL EJE DIRECTO

Xq = REACTANCIA SOBRE EL EJE DE CUADRATURA

$$P = V.I.\cos\phi = Vq + Vd.Id = Iq.V.\cos\delta + Id.V.\operatorname{sen}\delta$$

Por otra parte:

$$V.\cos\delta = E - Id.Xd$$

$$V.\operatorname{sen}\delta = Iq.Xq$$

De donde:

$$Id = (E - V.\cos\delta)/Xd$$

$$Iq = (V.\operatorname{sen}\delta)/Xq$$

Que sustituyendo en P se obtiene:

$$P = (V.\operatorname{sen}\delta \,.V.\cos\delta)/Xq + (E - V.\cos\delta)\, V.\operatorname{sen}\delta/Xd =$$

$$= \frac{V^2}{Xq} .\operatorname{sen}\delta .\cos\delta + \frac{V.E}{Xd} \operatorname{sen}\delta - \frac{V^2}{Xd} . \operatorname{sen}\delta .\cos\delta =$$

$$= \frac{V.E}{Xd} \operatorname{sen}\delta + \frac{V^2 (Xd - Xq)}{2Xd.Xq} .\operatorname{sen} 2\delta$$

El primer término es similar al resultado obtenido para el motor de rotor cilíndrico (para el que Xd = Xq = Xs). El segundo término, que es una armónica doble proporcional a la diferen

cia (Xd - Xq), representa la potencia de reluctancia debida al efecto de "saliencia" de los polos. Esta potencia se manifiesta aún cuando la excitación es nula (independiente de E), es decir, es la máxima potencia que el motor puede desarrollar cuando su campo no está excitado.

En la figura 2.9 se grafiza el torque en función de δ con el objeto de visualizar las dos componentes. El efecto del torque de reluctancia es doble: incrementa el valor máximo del torque total y reduce el ángulo δm correspondiente a dicho valor máximo.

Haciendo el análisis para el estado transitorio se llega a una expresión similar:

$$P = \frac{V.E'}{X'd} \operatorname{sen}\delta + \frac{V^2 (X'd - Xq)}{2X'd.Xq} \operatorname{sen}\delta$$

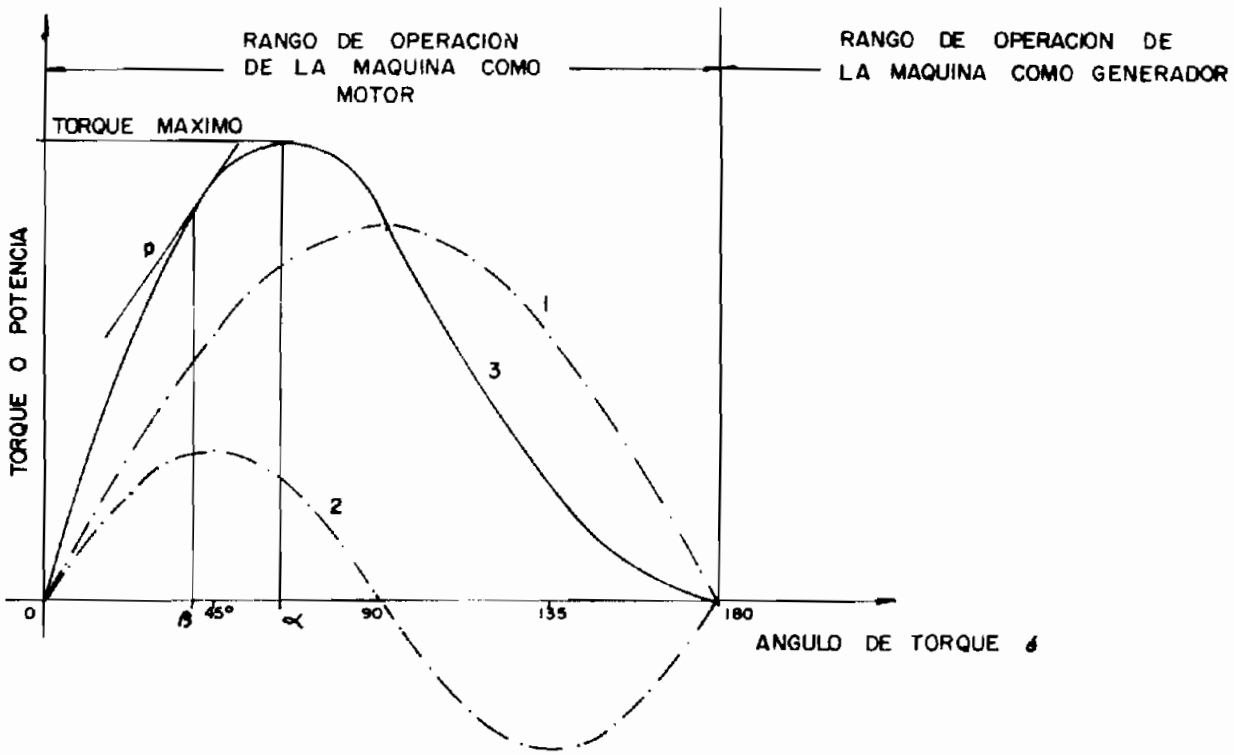
En donde E': voltaje de excitación transitorio.

X'd: reluctancia directa transitoria.

En este caso el torque de reluctancia se invierte ($X'd < Xq$), como puede observarse en la figura 2.10.

3.3.- FACTOR DE ESTABILIDAD.

VARIACION DEL TORQUE CON RESPECTO AL ANGULO DE TORQUE δ PARA LA OPERACION DEL MOTOR BAJO CONDICIONES DE ESTADO NO TRANSITORIO



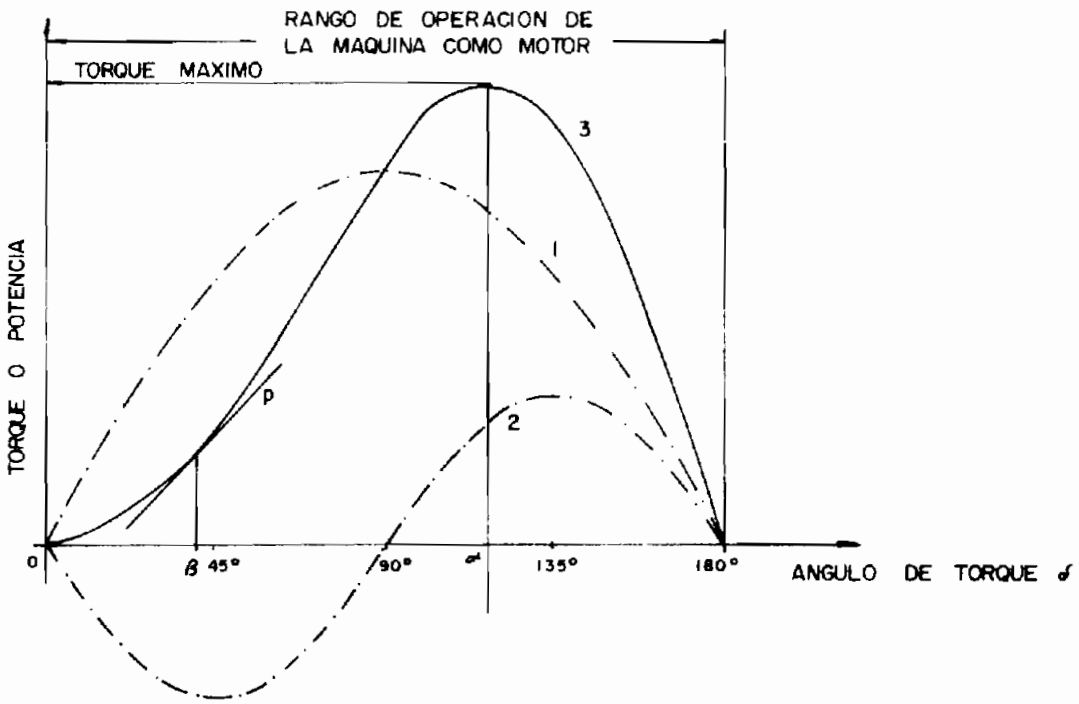
1 $P_1 = \frac{VE}{X_d} \cdot \operatorname{sen} \delta$

2 $P_2 = \frac{V(Xd - Xq)}{2\,Xd\,.\,Xq} \cdot \operatorname{sen} 2\delta$

3 $P = P_1 + P_2$

p = FACTOR DE ESTABILIDAD PARA UN ANGULO β

VARIACION DEL TORQUE CON RESPECTO AL ANGULO DE TORQUE δ PARA LA OPERACION DEL MOTOR BAJO CONDICIONES DE ESTADO TRANSITORIO



1 $P_1 = \frac{V E'}{X'd} \cdot \text{sen } \delta$

2 $P_2 = \frac{V(Xq - X'd)}{2X'd \cdot Xq} \cdot \text{sen } 2\delta$

3 $P = P_1 + P_2$

p = FACTOR DE ESTABILIDAD O RIGIDEZ PARA UN ANGULO β

Se denomina factor de estabilidad del motor a la relación de la variación de la potencia con respecto al ángulo, es decir a la derivada $dP/d\delta = p$. (Véanse las figuras 2.9 y 2.10).

Mientras más grande es p (positivo) mayor es la estabilidad del acoplamiento eléctrico del motor al sistema del que toma potencia así como también mayor es la estabilidad mecánica entre el motor y su carga como se verá más adelante al analizar el balanceo de la máquina.

4.- DETERMINACION DE LAS REACTANCIAS SATURADAS DE LA MAQUINA.

La saturación del hierro del circuito magnético de la máquina determina que la relación entre la tensión inducida interna y la excitación de campo deje de ser lineal a partir de cierto punto, desde el cual a incrementos constantes de la corriente de campo corresponden incrementos cada vez menores de la tensión inducida, como se puede observar en la curva de saturación a vacío de la figura 2.12.

La saturación en definitiva determina que la reactancia de la máquina sea progresivamente menor conforme se incrementa el voltaje inducido.

4.1.- MOTOR DE ROTOR CILINDRICO.

A continuación se desarrolla el proceso para determinar el valor de la reactancia sincrónica saturada en un motor de rotor cilíndrico.

Cuando el motor está operando bajo carga la fuerza magnetomotriz resultante en el entrehierro es igual a la diferencia vectorial entre la fuerza magnetomotriz del campo menos la fuerza magnetomotriz debida a la reacción de la armadura.

$$\bar{R} = \bar{F} - \bar{A} \qquad (1)$$

En donde:

$\bar{R}$ = Es la fuerza magnetomotriz en el entrehierro

$\bar{F}$ = Es la fuerza magnetomotriz debida a la corriente del campo.

$\bar{A}$ = Es la fuerza magnetomotriz debida a la corriente de la armadura (reacción de la armadura).

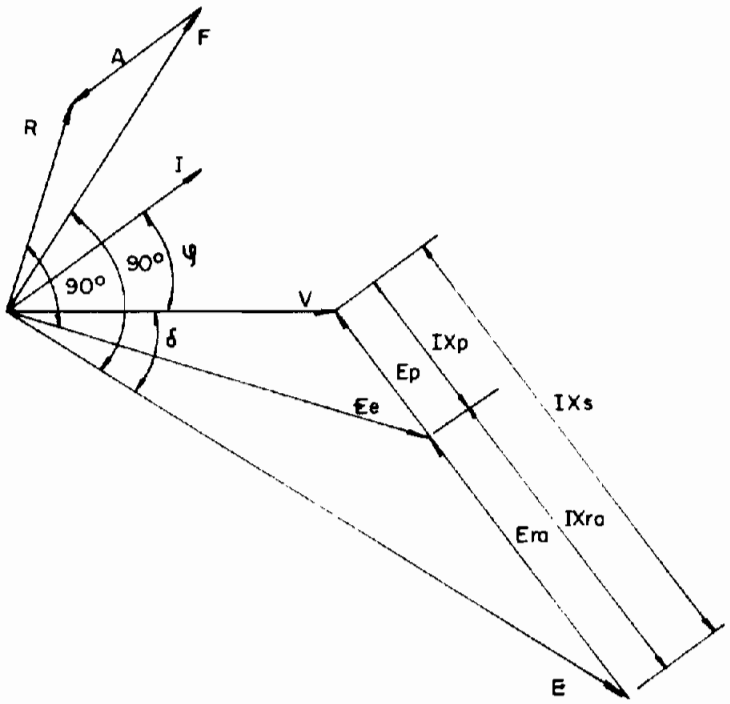
Las correspondientes tensiones inducidas deben atrasar 90° a estas fuerzas magnetomotrices; en base a lo cual se puede dibujar el diagrama vectorial de la figura 2.11.

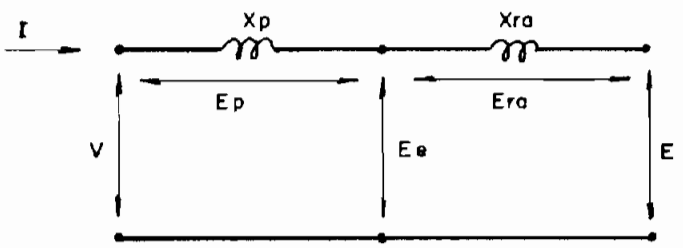
$$\bar{E}e = \bar{E} - E\bar{r}a \qquad (2)$$

En donde:

FIG. 2 . 11

DIAGRAMA VECTORIAL Y CIRCUITO EQUIVALENTE PARA LA DETERMINACION DEL FACTOR DE SATURACION





$Xs = Xra + Xp$

V : VOLTAJE A LOS BORNES DEL MOTOR
Ee : TENSION INDUCIDA EN EL ENTREHIERRO (NO SATURADA)
Era : CAIDA DE TENSION POR REACCION DE LA ARMADURA
E : VOLTAJE INTERNO DE EXITACION (NO SATURADO)
I : CORRIENTE EN LA ARMADURA
F : FUERZA MAGNETOMOTRIZ DE LA EXITACION
R : FUERZA MAGNETOMOTRIZ RESULTANTE EN EL ENTREHIERRO
A : FUERZA MAGNETOMOTRIZ DEBIDA A LA REACCION DE LA ARMADURA
Xs : REACTANCIA SINCRONICA (NO SATURADA)
Xra : REACTANCIA DE REACCION DE LA ARMADURA (NO SATURADA)
Xp : REACTANCIA DE CONCATENAMIENTO (POTIER)

$\bar{E}e$ = Tensión inducida en el entrehierro debida a R.

$\bar{E}$ = Tensión de excitación debida a F.

$\bar{E}ra$= Tensión debida a la reacción de la armadura.

$\bar{E}ra$ puede ser considerada como una caída de tensión por efecto de la corriente de armadura I.

$$\bar{E}ra = j\bar{I}.Xra \qquad (3)$$

Por otra parte la tensión en el entrehierro E_e difiere del voltaje aplicado a los bornes del motor en una caída de tensión debida también a la corriente de la armadura I y a la reactancia denominada de concatenamiento Xp.

En esta forma la reactancia sincrónica que determina la caída de tensión I.Xs entre V y E viene dada por:

$$Xs = Xp + Xra \qquad (4)$$

En la figura 2.11 se muestra el circuito equivalente correspondiente.

El circuito del flujo de concatenamiento es en su mayor parte a través del aire. Por tanto la componente Xp de la reactancia sincrónica no es afectada mayormente por la saturación y se la puede considerar constante.

El efecto de la saturación sobre la reactancia Xra puede ser determinado mediante el denominado factor de saturación (K), de la siguiente manera:

En la curva de saturación de la figura 2.12 se tiene que para una corriente de campo If la tensión inducida sería Ea, pero el valor obtenido realmente por la saturación es $E\overset{*}{a}$.

El factor de saturación se define por la relación:

$$K = \frac{Ea}{E\overset{*}{a}} = \frac{Era}{Er\overset{*}{a}} \qquad (5)$$

De donde:

$$Er\overset{*}{a} = Era/K \qquad (6)$$

Por otra parte en el diagrama vectorial se tiene que:

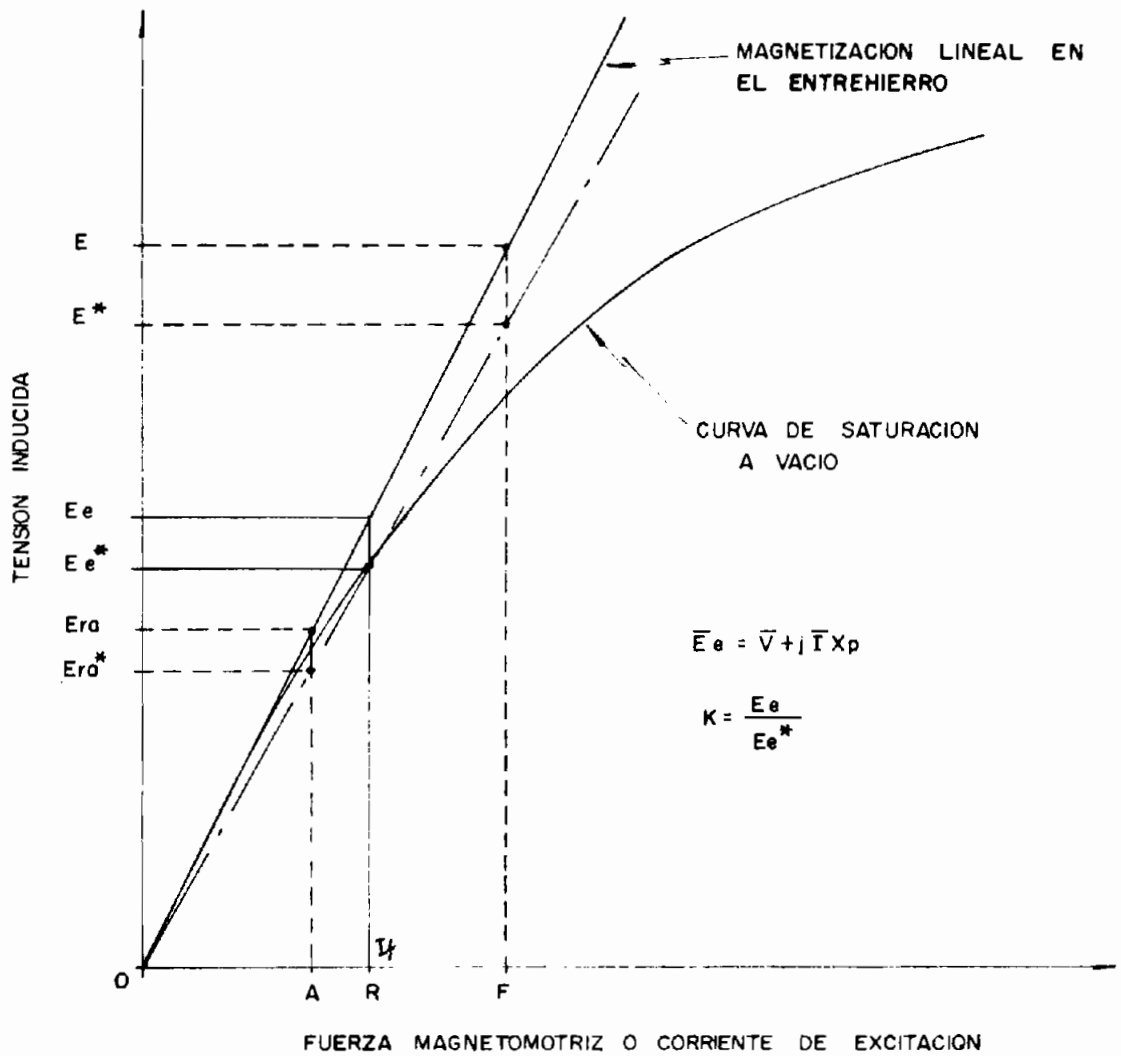
$$Era = IXs - IXp \qquad (7)$$

Entonces de (6) se tiene que:

$$Er\overset{*}{a} = I\ \frac{(Xs - Xp)}{K} \qquad (8)$$

$$I.\overset{*}{Xra} = I\ \frac{Xs - Xp}{K}$$

FACTOR DE SATURACION K PARA LA DETERMINACION DE LAS REACTANCIAS SATURADAS



E : VOLTAJE DE EXCITACION

Ee : TENSION INDUCIDA EN EL ENTREHIERRO

Era : CAIDA DE TENSION POR REACCION DE LA ARMADURA

F : FUERZA MAGNETOMOTRIZ DEBIDA A LA EXCITACION

R : FUERZA MAGNETOMOTRIZ RESULTANTE EN EL ENTREHIERRO

A : FUERZA MAGNETOMOTRIZ DEBIDA A LA REACCION DE LA ARMADURA

K : FACTOR DE SATURACION

NOTA : LOS ASTERISCOS REPRESENTAN VALORES SATURADOS

$$X_{ra}^{*} = \frac{Xs - Xp}{K}$$

La reactancia sincrónica saturada será entonces:

$$X_{s}^{*} = X_{ra}^{*} + Xp$$

$$X_{s}^{*} = \frac{Xs - Xp}{K} + Xp \qquad (9)$$

La expresión (9) sirve para evaluar la reactancia sincrónica saturada.

El valor de Xp se lo calcula en base a la curva de potencia cero, mediante el método de Poitier.

El factor K se lo calcula como se explicara anteriormente sobre la curva de saturación a vacío de la máquina.

4.2.- MOTOR DE POLOS SALIENTES.

La saturación de la reactancia sobre el eje directo Xd del motor de polos salientes puede ser determinada en forma análoga a la de la reactancia sincrónica Xs del motor de rotor cilíndrico. Es decir que:

$$X_{d}^{*} = \frac{Xd - Xp}{K} + Xp$$

En donde:

X_d^* = Reactancia directa saturada

X_d = Reactancia directa no saturada

X_p = Reactancia de concatenamiento.

K = Factor de saturación.

Los valores de Xp y K pueden ser determinados según el mismo procedimiento anterior.

Por otra parte, si se considera el gran espaciamiento de aire interpolar, la saturación de la porción de hierro del circuito magnético es prácticamente nula; es decir que se puede tomar a la reactancia en cuadratura Xq como constante.

5.- APLICACIONES DE LOS MOTORES SINCRONICOS.

Los motores sincrónicos representan un medio económico para mejorar el factor de potencia de los sistemas eléctricos, con la correspondiente reducción en el costo de la energía eléctrica. Esta característica unida a los requerimientos de velocidad constante determinados por algunos tipos de cargas, hacen necesaria la utilización de los motores sincrónicos en la industria.

Entre esos diferentes campos industriales podemos enumerar los siguientes:

1.- En canteras y fábricas de cemento para mover molinos de bolas o de rodillos sueltos para minerales; trituradores giratorios, de mandíbulas o de rodillos para productos pétreos; molinos hércules para cemento, etc.

2.- Compresores y máquinas soplantes como aventadores, - extractores de gases, ventiladores, turboventiladores, compresores centrífugos o de émbolo para aire, amoníaco, anhídrido carbónico, freón, etc.

3.- Para mover árboles de transmisión en las fábricas de harinas.

4.- En aserradores y fábricas a base de madera para propulsar sierras de cinta o circulares, astilladores, fresadoras, etc.

5.- En las fábricas de pulpa o papel para mover refinadores cónicos (Jordans), diferentes tipos de rodillos para el laminado, astilladores de madera para la obtención de la pulpa, molinos de pulpa, etc.

6.- Bombas de aplicaciones generales (regadío, drenaje de aguas impuras, bombeo de aceite, etc.) sean centrífugas, rotativas o de émbolo.

7.- En las industrias de caucho y plásticos para propulsar mezcladoras Bambury y plastificadoras, molinos de caucho bruto, rodillos para laminado, etc.

8.- En la industria del acero se usan los motores sincrónicos para mover diferentes maquinarias que requieren de velocidad constante tales como laminadoras para obtener placas, chapas, tubos, barras, palastros y flejes de acero, laminadores de hierro y aceros redondos ; máquinas rectificadoras y fresadoras, etc.

Se suele clasificar a los motores sincrónicos, para efectos de su aplicación industrial, en motores de alta velocidad y motores de baja velocidad, siendo el límite las 1.800 R.P.M.

Los motores sincrónicos de alta velocidad son recomendables para mover todos aquellos tipos de carga que requieren de velocidad constante; en tanto que los de baja velocidad, que son generalmente diseñados para acoplamiento directo con la carga a ser movida, se recomiendan para tales aplicaciones como compresores de aire o dióxido de carbono, refinadores, determinadas bombas,

astilladores, y maquinaria en fábricas de aceros

Normalmente los motores sincrónicos son diseñados para operación nominal a un factor de potencia de 100% a 80% en avance; sin embargo, cuando en el sistema se requiere una corrección adicional del factor de potencia reactiva, puede obtenerse motores diseñados para una operación nominal a factores de potencia en avance aún más bajos.

Entre los principales factores que determinan la selección de un motor para una aplicación dada se pueden mencionar: la potencia requerida por la carga; el tipo y calidad de la misma (uniforme, variable, pulsante, de alta o baja inercia, cargas que requieren continuidad de servicio, etc.); las características del sistema de alimentación; el precio de la energía que incide en la selección del factor de potencia; la necesidad de una corrección adicional del factor de potencia del sistema, etc.

CAPITULO III

LA ESTABILIDAD DE LOS MOTORES SINCRONICOS.

1.- EL PROBLEMA GENERAL.-

Estabilidad de un sistema de potencia eléctrica es aquella propiedad del mismo que garantiza que permanecerá en equilibrio ante cualquier perturbación en sus condiciones de operación normal. Se manifiesta como la capacidad del sistema de crear entre varios elementos fuerzas restauradoras iguales y opuestas a las originadas por la perturbación.

En los sistemas de potencia eléctrica alterna, la estabilidad es la capacidad de las máquinas (generadores, motores o condensadores) de mantenerse en sincronismo (en paso) ante eventuales alteraciones en las condiciones de funcionamiento normal.

No se puede hablar de estabilidad sin antes especificar las condiciones ante las cuales se trata de averiguar si el sistema es estable o no; es decir el cálculo consiste en determinar y medir esa propiedad ante ciertas condiciones especificadas previamente.

Las condiciones, en el problema concreto de la estabilidad

del motor sincrónico, dependerán principalmente de la porción - del sistema que se considere.

Así, si consideramos en primer lugar el motor en sí mismo, tomando potencia de una fuente de capacidad considerablemente más grande (barras infinitas) y transmitiendo esa potencia, a tra - vés de su reactancia interna, al eje que mueve la carga; las - condiciones ante las cuales convendrá entonces determinar la es tabilidad estarán dadas por la naturaleza de la carga, por va - riaciones de la misma, por perturbaciones provenientes de la a- limentación, etc. Véase la figura 3.1.

Si se considera en cambio que la capacidad de la red no - es lo suficientemente grande como para no ser afectada por el - funcionamiento del motor que toma potencia de la misma, será ne cesario abarcar el sistema completo a fin de determinar los e - fectos que las oscilaciones del motor puedan producir sobre la generación. Véase la Figura 3.2.

Dentro de este último punto de vis ta el caso idealizado ex tremo se tiene al considerar un sistema formado por dos máquinas sincrónicas de igual capacidad, interconectadas, la una actuando como generador y la otra como motor.

2.- CAUSAS DE INESTABILIDAD DEL MOTOR.

FIG. 3.1

SISTEMA DE POTENCIA : MOTOR SINCRONICO CONECTADO A BARRAS DE CAPACIDAD ILIMITADA (BARRAS INFINITAS)

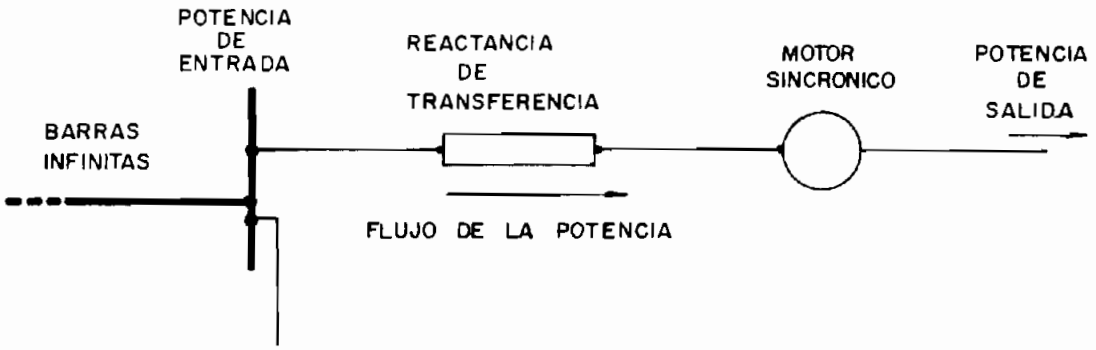


FIG. 3.2

SISTEMA DE POTENCIA : DOS MAQUINAS SINCRONICAS INTERCONECTADAS

Cualquier perturbación sobre el flujo de potencia puede presentar una causa capaz de arrastrar al motor a su pérdida de sincronismo. Las perturbaciones se manifiestan como variaciones graduales o súbitas de la potencia sea en el punto de entrada o en el de salida; provienen por tanto de la alimentación o de la carga.

Si la variación es brusca la respuesta inicial del sistema es de carácter transitorio, hasta ajustarse a las nuevas condiciones de operación; si es gradual, el cambio de una situación a la otra ocurre así mismo gradualmente (estado permanente). En esta forma se puede considerar a la perturbación como una excitación o estímulo que actúa sobre el sistema.

En uno y otro caso la pérdida de estabilidad del motor podrá ocurrir si la nueva condición de operación supera el límite de estabilidad respectivo (transitorio o permanente) como se verá más adelante, es decir si la excitación es demasiado fuerte.

Desde el lado de la alimentación las perturbaciones pueden provenir de variaciones de la tensión del sistema, aperturas o cierres de líneas, entradas o salidas súbitas de otras cargas y principalmente las fallas. El efecto de una falla es doble; primero porque drena parcial o totalmente la potencia que fluye

al motor y seguido por la desmagnetización producida por las corrientes de secuencia negativa al circular por los arrollamientos del motor.

Desde el lado de salida las perturbaciones pueden ser inserciones o incrementos sea lentos o súbitos del torque de carga, retiradas o disminuciones súbitas del mismo, etc.

La influencia de estos fenómenos sobre el comportamiento del motor será analizada más adelante.

3.- OSCILACION DE LA MAQUINA POR EFECTOS DE UNA PERTURBACION.

3.1.- TORQUE NETO O DE ACELERACION.-

Una situación de desequilibrio entre las potencias de entrada y salida provocada por una perturbación establece en el motor un torque neto igual a la suma del torque electromagnético y del torque de la carga. Por el momento descontamos cualquier amortiguamiento.

NOTA: Los términos potencia y torque son intercambiables puesto que la velocidad del motor permanece más o menos constante a menos que pierda definitivamente su estabilidad.

Si consideramos positivo al incremento del atraso del rotor

con respecto al campo magnético del estator, (o sea al ángulo de torque δ), entonces un exceso de la potencia de salida con respecto a la de entrada ($Tc > Te$) representará un torque neto negativo que tenderá a decelerar el motor.

$$- Tn = Te - Tc$$

$$Tn = Tc - Te$$

En donde:

Tn = Torque neto

Te = Torque electromagnético

Tc = Torque de la carga.

En función de la inercia del sistema rotante y de la aceleración angular el torque neto estará expresado por:

$$Tn = I.\alpha = L.d^2\Theta/dt^2$$

En donde:

I = Momento de inercia ($Kg.m.seg^2$/radián)

α = Aceleración angular (rad/seg^2)

Θ = Angulo con respecto a un eje fijo.

Puesto que más bien nos interesa la posición del rotor con respecto al campo magnético que gira a velocidad sincrónica (W1) que con respecto a un eje fijo, hagamos la sustitución:

$\delta = \Theta - W1.t$

En donde:

W1 = Velocidad sincrónica

Θ = Desplazamiento angular del rotor con respecto a un eje estático.

Derivando dos veces con respecto al tiempo se tiene:

$$d^2\delta/dt^2 = d^2\Theta/dt^2$$

Por tanto el torque neto queda:

$$Tn = I.d^2\delta/dt^2$$

Y la potencia neta o de aceleración será:

$$Pn = I.W.d^2\delta/dt^2 = M.d^2\delta/dt^2$$

M es el momento angular o constante de inercia. Es una constante de la máquina, su valor será determinado posteriormente.

El torque neto determina la tendencia del rotor a desplazarse hacia atrás o hacia adelante con referencia al campo magnético rotante. Así, si el rotor se halla girando a velocidad sincrónica, bajo condiciones permanentes, conservando un desplazamiento δ_o ajustado a su carga inicial; un torque neto positivo

determinado por un exceso de potencia de entrada con respecto a la requerida por la carga determinará que el ángulo disminuya desde su valor δ_o con una aceleración ($- d^2\delta / dt^2$). Inversamente, si el torque de carga excede al torque de entrada, el torque neto será negativo y el ángulo δ tenderá a incrementarse hasta ajustarse a las nuevas condiciones de operación.

Lo importante de este hecho es que cuando la perturbación es súbita (estado transitorio) el rotor se comporta como péndulo de torsión, oscilando alrededor del nuevo punto de operación -- con una frecuencia determinada.

3.2.- ECUACION DE BALANCEO.

La determinación de la frecuencia de esta oscilación del rotor en calidad de péndulo de torsión es de importancia ante perturbaciones de carácter pulsante, sean originadas en el lado de alimentación o en el de la carga. Tales perturbaciones pueden imprimir al rotor la denominada "oscilación forzada". Cuando la frecuencia de la perturbación se aproxima a la frecuencia natural del rotor, éste recibe impulsos que pueden amplificar su oscilación natural (fenómeno de resonancia); por otra parte si -- las dos frecuencias son distintas los impulsos se oponen a la oscilación natural amortiguando su amplitud.

El comportamiento transitorio del rotor se puede analizar -

en base a la ecuación que involucra todos los torques (en función de δ) que actúan sobre el mismo, esta ecuación la denominaremos de "balanceo del rotor".

Para determinarla consideremos estos torques, estableciendo como estímulo del sistema a cualquier perturbación sobre el torque de la carga Tc:

a) El torque de aceleración debido a la inercia de la masa - rotante, definido anteriormente:

$$Tn = I.d^2\delta /dt^2$$

b) E l torque debido a los arrollamientos de amortiguación - (será analizado posteriormente) proporcional a la velocidad de la oscilación:

$$Ta = K1.d\delta /dt$$

En donde:

K1 (kg.m.seg/rad) es la constante de amortiguamiento.

El efecto del torque de amortiguamiento es siempre opuesto al efecto del torque neto.

c) El torque electromagnético cuya expresión (en función de sen δ y sen 2δ)fue desarrollada anteriormente.

Descontando el efecto de saliencia de los polos y considerando que para oscilaciones pequeñas $\text{sen}\delta \simeq \delta$; el torque sincronizante se podrá expresar así:

$$Te = K2.\delta$$

En donde K2 será la tangente a la curva torque -ángulo de - torque en el punto de operación.

El efecto de saliencia de los polos podrá ser considerado indirectamente si el valor de K2 se lo calcula sobre la curva torque-ángulo de torque que incluya el término en función de - sen 2δ

El torque neto actuante sobre el rotor durante una situación transitoria será:

$$Tn = Tc - Te - Ta$$

Es decir que:

$$Tn + Ta + Te = Tc$$

$$I.d^2\delta/dt^2 + K1.d\delta/dt + K2.\delta = Tc.$$

Esta ecuación diferencial es similar en su forma a la de un circuito eléctrico en serie RLC:

$$L.d^2q/dt^2 + R.dq/dt + (1/c).q = e$$

En donde e y q son análogos a Tc y δ respectivamente; la analogía entre L, R y 1/c y las constantes I, K1 y K2 es obvia.

3.3.- CONDICIONES TRANSITORIAS, FRECUENCIAS DE OSCILACION DEL ROTOR.-

A fin de analizar la situación transitoria del ajuste del ángulo de torque del motor a una nueva condición de operación, interesa la solución complementaria o natural de la ecuación diferencial anterior, independientemente del tipo o carácter de perturbación (excitación), es decir cuando queda la ecuación igualada a cero.

$$I.d^2\delta/dt^2 + K1.d\delta/dt + K2.\delta = 0$$

Dicha solución será de la forma:

$$\delta(t) = A1.e^{p1.t} + A2.e^{p2.t}$$

En donde p1 y p2 son las raíces de la ecuación característica:

$$I.p^2 + K1.p + K2 = 0$$

$$P1 = -K1/2I + \sqrt{(K1/2I)^2 - K2/I}$$

$$p2 = -K1/2I - \sqrt{(K1/2I)^2 - K2/I}$$

A1 y A2 son cons tantes de integración que son determinadas a - base de las condiciones iniciales, como se verá posteriormente.

La solución puede ser analizada bajo las siguientes circuns tancias:

a) Supóngase que el efecto de los arrollamientos de amor tiguación es nulo; es decir K1 = O. En este caso la ecuación - característica será:

$$I.p^2 + K2 = O$$

$$p^2 = - K2/I$$

Si hacemos $K2/I = W_o^2$

Entonces:

$$p^2 = - W_o^2$$

De donde:

$$p1 = jW_o$$

$$P2 = - jW_o$$

La solución de la ecuación diferencial será:

$$\delta\ (t) = A1.e^{jW_o t} + A2.1^{-jW_o t} = B.\text{sen}\ w_o t$$

Representa una oscilación sinusoidal para, cuya frecuencia se denomina "frecuencia natural no amortiguada" y está dada por:

$$W_o = \sqrt{K2/I}$$

b) Se considera el efecto de amortiguamiento. La constante K1 es el elemento de disipación de energía (análoga a la resistencia R en un circuito eléctrico) y su efecto siempre está presente en la práctica.

Las raíces de la ecuación característica eran:

$$P1 = - K1/2I + \sqrt{(K1/2I)^2 - K2/I} = -a + \sqrt{a^2 - W_o^2}$$

$$P2 = - K1/2I - \sqrt{(K1/2I)^2 - K2/I} = -a - \sqrt{a^2 - W_o^2}$$

En donde:

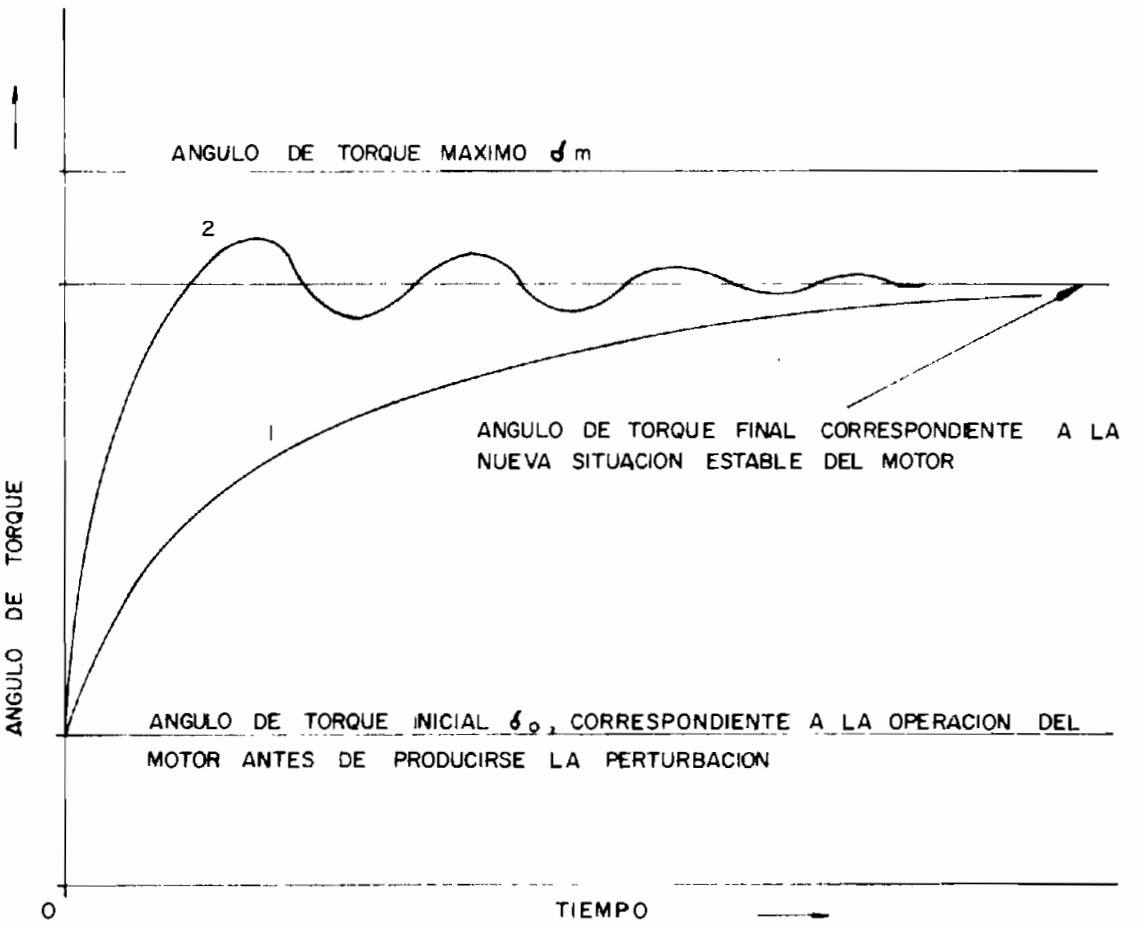
$a = K1/2I$

$W_o^2 = K2/2I$

De acuerdo a los valores relativos de a y Wo pueden presentarse los siguientes tres casos, a saber:

1o. $a^2 > Wo^2$. Las raíces p1 y p2 son entonces reales. Este caso representa la situación transitoria de acuerdo a la cual el ajuste del ángulo se efectúa sin oscilación y de una manera exponencial. Se denomina sobreamortiguado. Véase la figura 3.3.

CURVAS DE OSCILACION DEL MOTOR . (AJUSTE TRANSITORIO DEL ANGULO DE TORQUE A UNA NUEVA CONDICION DE OPERACION)



1 AJUSTE AMORTIGUADO $(K_1 / 2I)^2 > K_2 / I$

2 AJUSTE OSCILATORIO : $(K_1 / 2I)^2 < K_2 / I$

2o. $a^2 < Wo^2$. Las raíces p1 y p2 son entonces imaginarias. La respuesta es "oscilatoria amortiguada". Véase la figura 3.3.

3o. $a^2 = Wo^2$. Representa la situación límite entre los dos casos anteriores; carece de utilidad por ser poco frecuente en la práctica. Este caso se denomina "amortiguamiento crítico".

De estos tres caso el segundo es el más frecuente y por tanto el más importante en la práctica. Si $a^2 < Wo^2$ las raíces pueden ser expresadas así:

$$p1 = -a + J\sqrt{Wo^2 - a^2} = -a + jWa$$

$$p2 = -a - J\sqrt{Wo^2 - a^2} = -a - jWa$$

$$Wa = \sqrt{Wo^2 - a^2} = \sqrt{K2/I - (K1/2I)^2}$$

Representa la frecuencia natural amortiguada de la oscilación (Wo fue definido como frecuencia natural no amortiguada).

La solución de la ecuación diferencial entonces queda:

$$\delta = C.e^{-at}.\text{sen } wat$$

El caso es similar al analizado anteriormente excepto por dos circunstancias:

1.- Debido al factor e^{-at}, la oscilación sinusoidal es ahora amortiguada exponencialmente.

2.- La frecuencia natural de oscilación es menor ($wa < wo$).

Entonces $a = K1/I$ (seg^{-1}) es una "constante de amortiguamiento; su inversa $I/K1$ es el intervalo al final del cual la amplitud de la oscilación (envoltura de la curva) se reduce a $1/e = 0,368$ de su valor inicial.

3.4.- CONDICIONES INICIALES.

Las condiciones iniciales sirven para evaluar las constantes de integración.

Puesto que se desconocen únicamente dos constantes independientes A1 y A2, se requieren dos condiciones específicas que podrían ser dos valores sea del ángulo de torque δ, o de la velocidad $d\delta/dt$, o de la aceleración $d^2\delta/dt^2$, correspondientes a dos instantes diferentes. Más fácil sin embargo resulta considerar dos condiciones (ángulo y velocidad por ejemplo) para un mismo instante, aquel en el que se presente la perturbación; en este caso las condiciones se denominan iniciales.

Analicemos, por ejemplo, la respuesta transitoria del sistema para el caso de aumentos o decrementos repentinos del torque de carga.

Supóngase que la variación del torque viene dada por ΔT, positivo o negativo según represente incremento o decremento. La expresión final del torque de carga será entonces:

$$T + \Delta T$$

En donde:

T = Torque inicial.

1.- Asumamos primeramente que el sistema inmediatamente antes de la perturbación se halla en reposo, es decir bajo condiciones de estado permanente (ángulo de torque δ_o ajustado al valor inicial de la carga).

La solución completa de la ecuación diferencial será entonces:

$$= A1.e^{p1.t} + A2\ e^{p2.t} + (T + \Delta T)/K2$$

Puesto que en el instante t = O, el torque de la carga es igual al torque de sincronización, se tiene la igualdad:

$K2 \cdot \delta o = T$

Por otra parte cuando t = o

$o = A1 + A2 + (T + \Delta T)/K2$

De donde:

$$A1 + A2 = -\Delta T/K2 \qquad (1)$$

Como segunda condición consideremos el valor de la velocidad $d\delta/dt$ en el instante t = O

Una variación instantánea de la velocidad requeriría de una aceleración infinita; pero cuando t = O la aceleración tiene un valor finito; puesto que:

$$I \cdot d^2\delta/dt^2 = \Delta T$$

De donde:

$$d^2\delta/dt^2 = \Delta T/I$$

De lo cual se concluye que la velocidad es nula cuando t = O.

$$d\delta/dt = O$$

Por otra parte; al derivar la solución general con respecto al tiempo se tiene que:

$$d\delta/dt = A1.p1.e^{p1.t} + A2.p2.e^{p2.t}$$

De lo cual resulta que para t = O

$$O = A1.p1 + A2.p2 \qquad (2)$$

Resolviendo las ecuaciones (1) y (2) para A1 y A2 se tiene:

$$A1 = \frac{P2}{p1 - p2} . \Delta T/K2$$

$$A2 = \frac{- P1}{p1 - p2} . \Delta T/K2$$

Sustituyendo los valores de p1 y p2 se obtiene A1 y A2 en función de las constantes conocidas de la máquina (I, K1 y K2).

2.- Hasta el momento se ha considerado al sistema inicialmente en reposo; es decir para t = O, δ = constante y $d\delta/dt = O$.

Puede ocurrir sin embargo que para t = O el sistema esté respondiendo a una o varias perturbaciones previas (condiciones iniciales transitorias). En este caso basta considerar la cuali

dad lineal de la ecuación diferencial, en virtud de la cual es posible obtener el comportamiento transitorio completo sumando todas las respuestas inconclusas y la respuesta debida a la nueva perturbación; esta última calculada como si el sistema hubiera estado inicialmente en reposo.

4.- ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL MOTOR ANTE VARIACIONES DE LA CARGA.

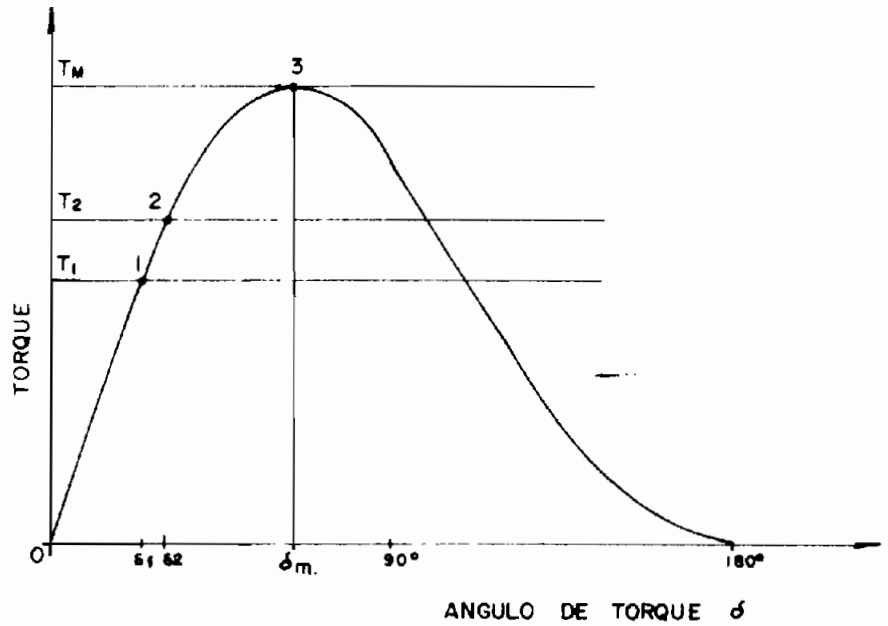
4.1.- INCREMENTOS GRADUALES DE LA CARGA.

En general la operación del motor es estable cuando el incremento del ángulo de torque representa también incremento en el torque sincronizante; es decir cuando el factor de estabilidad $dT/d\delta$ es positivo.

En la figura 3.4 se muestra una curva torque -ángulo de torque- que incluye el efecto de saliencia de los polos. Supónga se que el torque inicial requerido por la carga es T1. El torque tomado por el motor de la red será también T1 (se desprecian las pérdidas). En estas condiciones el punto de operación viene dado por el punto (1).

Considérese ahora que la carga se incrementa ligeramente hasta el valor T2; en el instante mismo en que ocurre el incremento

CURVA TORQUE - ANGULO DE TORQUE PARA UN MOTOR DE POLOS SALIENTES PARA ANALIZAR EL LIMITE DE ESTABILIDAD EN ESTADO PERMANENTE



$dT/d\delta > 0$ cuando $\delta \leq \delta_m$.

T_1 = TORQUE INICIAL DE LA CARGA

T_2 = TORQUE FINAL DE LA CARGA

T_M = LIMITE DE ESTABILIDAD EN ESTADO PERMANENTE

la potencia que la red proporciona a la máquina es menor que la potencia requerida por la carga; la diferencia entre las dos potencias queda suplida momentáneamente por un decremento de la energía cinética del rotor. Se crea pues un torque neto que tiende a decelerar a la máquina, la cual disminuye su velocidad temporalmente hasta ajustar el ángulo de torque al valor $\delta 2$, que representa nuevamente una condición de equilibrio entre las dos potencias de entrada y salida.

Así se puede aumentar gradualmente el torque de la carga hasta el valor Tm (punto 3). A partir de entonces cualquier nuevo incremento determinará un incremento también del ángulo δ más allá de δ m; esto significará que la potencia de entrada sea cada vez mayor así como también la potencia neta desacelerante; el motor al no poder restablecer el equilibrio habrá perdido su estabilidad.

Tm representa entonces el "límite de estabilidad" para estas condiciones de incremento gradual de la carga (estado permanente).

4.2.- INCREMENTOS BRUSCOS DE LA CARGA.-

En la figura 3.5 se muestra una curva de torque -ángulo de torque para un motor de rotor cilíndrico.

La horizontal Tc1 representa el torque inicial de la carga; su intersección con la curva da el punto "a" de operación del motor antes de la perturbación, correspondiente a un ángulo de torque δo.

Supóngase ahora que el torque Tc1 se incrementa súbitamente en el valor Δt; el nuevo valor de la carga vendrá entonces representado por la horizontal Tc2. En este momento el torque mecánico es mayor al torque electromagnético en Δt; este valor Δt es pues, un torque neto decelerante que obliga al motor a perder velocidad incrementando su ángulo de torque a partir de δo.

Conforme esto ocurre el torque neto disminuye hasta hacerse nulo en "c" cuando las potencias de entrada y salida se igualan. En este punto la velocidad $d\delta/dt$ es máxima.

Durante el recorrido "ac" la inercia del sistema rotante entrega energía a la carga; energía que es igual al área A1 (torque x δ = energía) y que deberá ser recuperada inmediatamente - puesto que la inercia no produce ni disipa energía.

Para que esta recuperación de energía se haga efectiva el ángulo de torque continúa incrementándose. A pa rtir de "c" el - torque neto se invierte por que la potencia de entrada es entonces mayor que la de salida.

La energía total se anula en "d", cuando el área A2 (positiva) iguala al área A1 (negativa); entonces el motor alcanza su ángulo de torque máximo δm.

Pero en "d" el torque de aceleración es máximo obligando al motor a disminuír el ángulo de torque hasta "c". El punto de operación en su recorrido "dc" barre nuevamente un área A2 que representa energía almacenada que deberá ser entregada nuevamente; esto obliga al punto a regresar hasta "a". Se cumple así una oscilación completa alrededor de "c", que se repetiría indefinidamente - En realidad estas oscilaciones mueren finalmente sobre el punto "c" debido al amortiguamiento (disipación de energía).

En la figura 4.6 se muestra el límite de estabilidad para la condición que se acaba de analizar y que viene dada por Tcm.

Para un incremento súbito de la carga mayor que Δtm el área A2 será menor que A1. Al no cumplirse la igualdad entre A1 y A2 el ángulo continuará creciendo más allá de δm. Pero para un punto cualquiera, "e" por ejemplo, la potencia neta es nuevamente negativa. Esto hará que el motor siga perdiendo velocidad, esta vez sin posibilidad de recuperación; es decir habrá perdido su estabilidad.

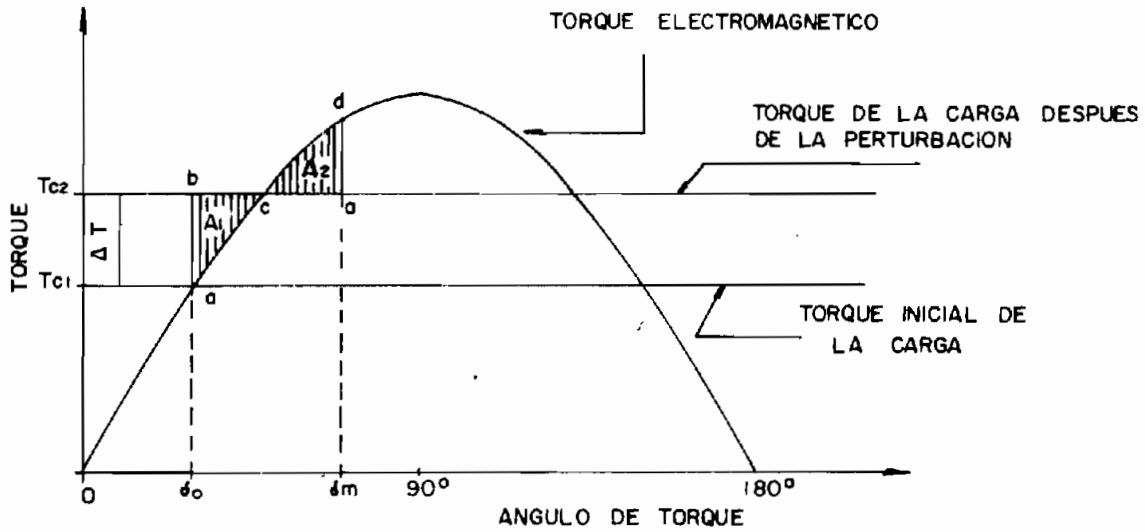
En la figura 4.7 se muestra el límite de estabilidad para u

FIG. 3.5

ANALISIS GRAFICO DEL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR ANTE INCREMENTO BRUSCO DE LA CARGA

a) APLICACION DEL CRITERIO DE LAS AREAS IGUALES
b) TORQUE O POTENCIA NETA DURANTE LA OSCILACION
c) VARIACION DE LA VELOCIDAD DURANTE LA OSCILACION

a)



δo = ANGULO DE TORQUE INICIAL
δm = ANGULO DE TORQUE MAXIMO

b)

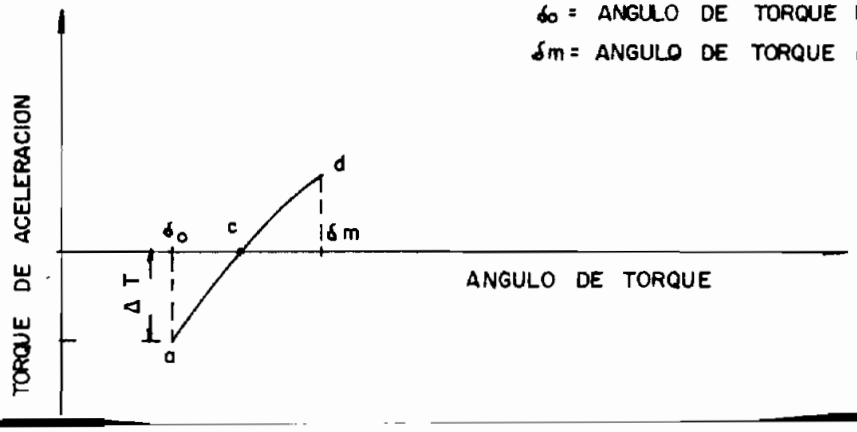
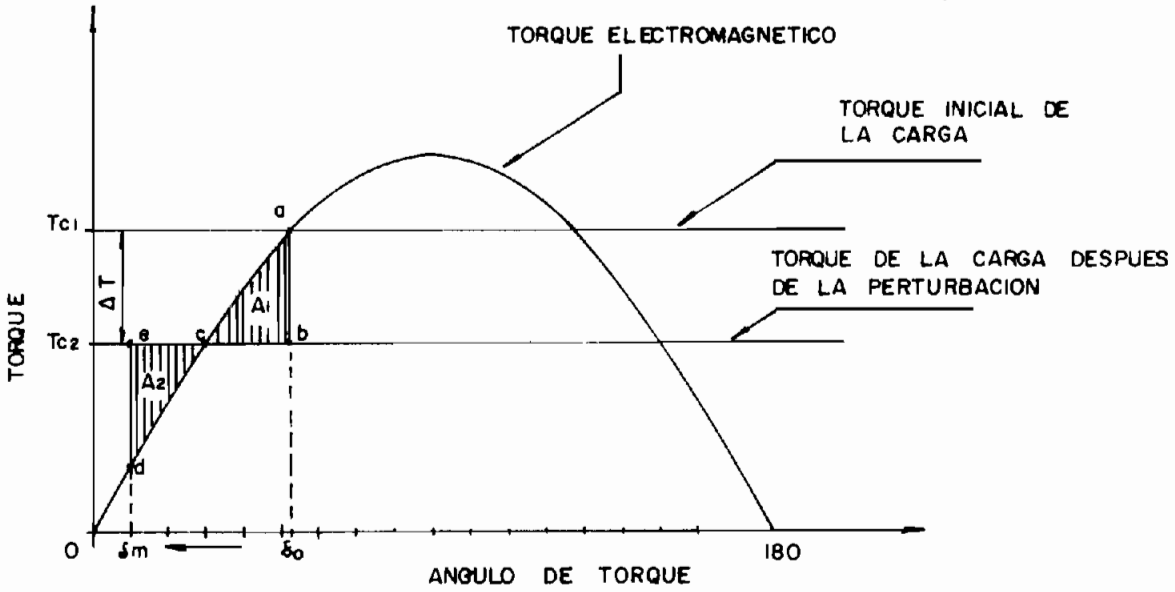


FIG. 3.6

ANALISIS GRAFICO DEL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR ANTE UNA DISMINUCION BRUSCA DE LA CARGA

a) APLICACION DEL CRITERIO DE LAS AREAS IGUALES
b) TORQUE O POTENCIA NETA DURANTE LA OSCILACION
c) VARIACION DE LA VELOCIDAD DURANTE LA OSCILACION

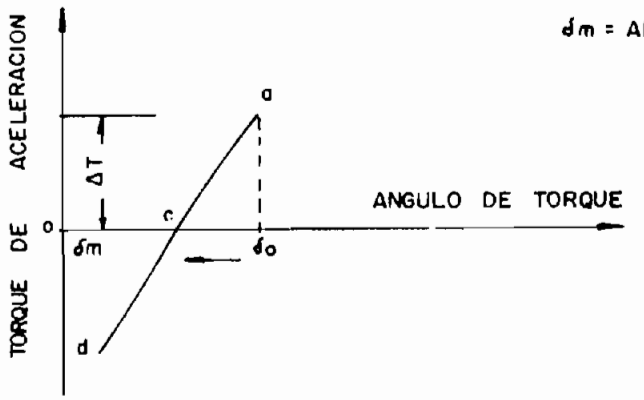
a)



δ_o = ANGULO DE TORQUE INICIAL

δ_m = ANGULO DE TORQUE MINIMO

b)



na inserción brusca de carga cuando el motor se halla operando inicialmente a vacío.

4.3.- DISMINUCION BRUSCA DE LA CARGA.

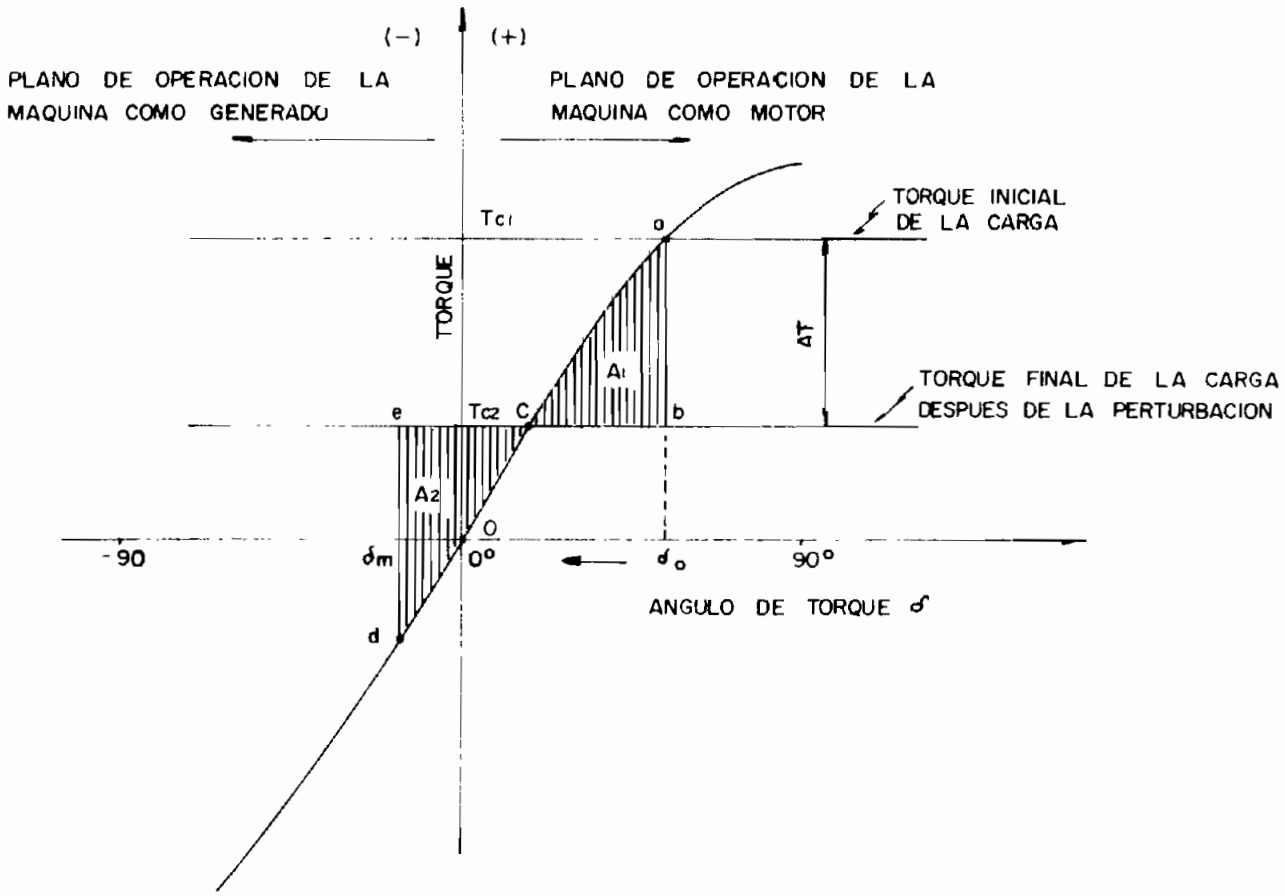
En los diagramas de la figura 3.6 se puede estudiar el comportamiento del motor cuando el torque de la carga es disminuído bruscamente. El análisis gráfico es análogo al del caso que se acaba de ver (párrafo 4.2) y por tanto no se lo presentará.

Conviene no obstante, anotar que el ajuste del motor al nuevo valor de carga se realiz a mediante una disminución del ángulo de torque δ. En ocasiones este decrecimiento, durante un medio ciclo de la oscilación, puede ser tan grande capaz de causar la inversión del ángulo δ. Convencionalmente, en el presente estudio, se ha considerado que un incremento de δ (atraso del rotor con respecto al campo magnético del estator) es positivo. Por tanto la inversión de su signo representa una situación en que el rotor se adelanta con respecto a dicho campo magnético; bajo estas condiciones la máquina opera como un generador sincrónico.

En la figura 3.7 podemos analizar gráficamente este comportamiento.

Supóngase que el punto inicial de operación es "a", corres-

ANALISIS GRAFICO DE LA REVERSION DEL ANGULO DE TORQUE ANTE UNA DISMINUCION BRUSCA DE LA CARGA



pondiente a un torque de carga Tc1. El valor de este torque se disminuye entonces bruscamente a Tc2; en este momento el torque electromagnético excede al torque mecánico en el valor Δt. La máquina se acelera y en consecuencia el ángulo de torque comienza a disminuir.

En el punto "c" las potencias de entrada y salida se igualan, es decir, se anula el torque acelerante; sin embargo la máquina ha almacenado energía cinética por efecto de la aceleración, energía que deberá ser entregada inmediatamente a la carga. Esto determina que el ángulo de torque continúe decreciendo.

El torque neto que entonces se crea es negativo (decelerante) puesto que la potencia de entrada se hace menor que la de salida.

El torque de entrada continúa decreciendo hasta anularse completamente cuando la máquina alcanza el punto de operación "O". Aquí, sin embargo A2 es aún menor que A1; el punto de operación sigue por tanto desplazándose hacia la izquierda, el ángulo de torque δ se invierte y el motor comienza a ceder parte de la energía de su oscilación a la red de alimentación.

Si la reversión del flujo de potencia es posible (cuando la

inercia total del sistema de generación no es lo suficientemente grande con respecto a la del motor, por ejemplo) las oscilaciones del motor se reflejarán en el funcionamiento de la generación.

Si la reversión del flujo no es posible (por ejemplo cuando existen las protecciones respectivas), el punto de operación no podrá desplazarse hacia la izquierda más allá de "O". Esta situación representa por tanto un amortiguamiento forzado a las oscilaciones del motor.

5.- ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL MOTOR ANTE FALLAS SOBRE LA RED DE ALIMENTACION.

5.1.- ESTABILIDAD BAJO CONDICIONES DE FALLA SOSTENIDA.-

Se define como falla sostenida aquella que se mantiene sobre el circuito aún después de desaparecer las condiciones transitorias, es decir después de que la corriente de falla alcanza su valor permanente.

El efecto de una falla sobre el comportamiento del motor es doble; por una parte disminuye la potencia de entrada y por otra provoca una desmagnetización del campo debida a las corrientes de secuencia negativa. Todo esto depende de la gravedad y naturaleza de la falla.

Es evidente que si una falla sostenida corta todo el flujo de potencia al motor, la salida de sincronismo de éste es inevitable; pero, si después de producida la falla existe aún cierta potencia fluyendo a la máquina, ésta, dentro de determinadas condiciones podrá mantenerse estable.

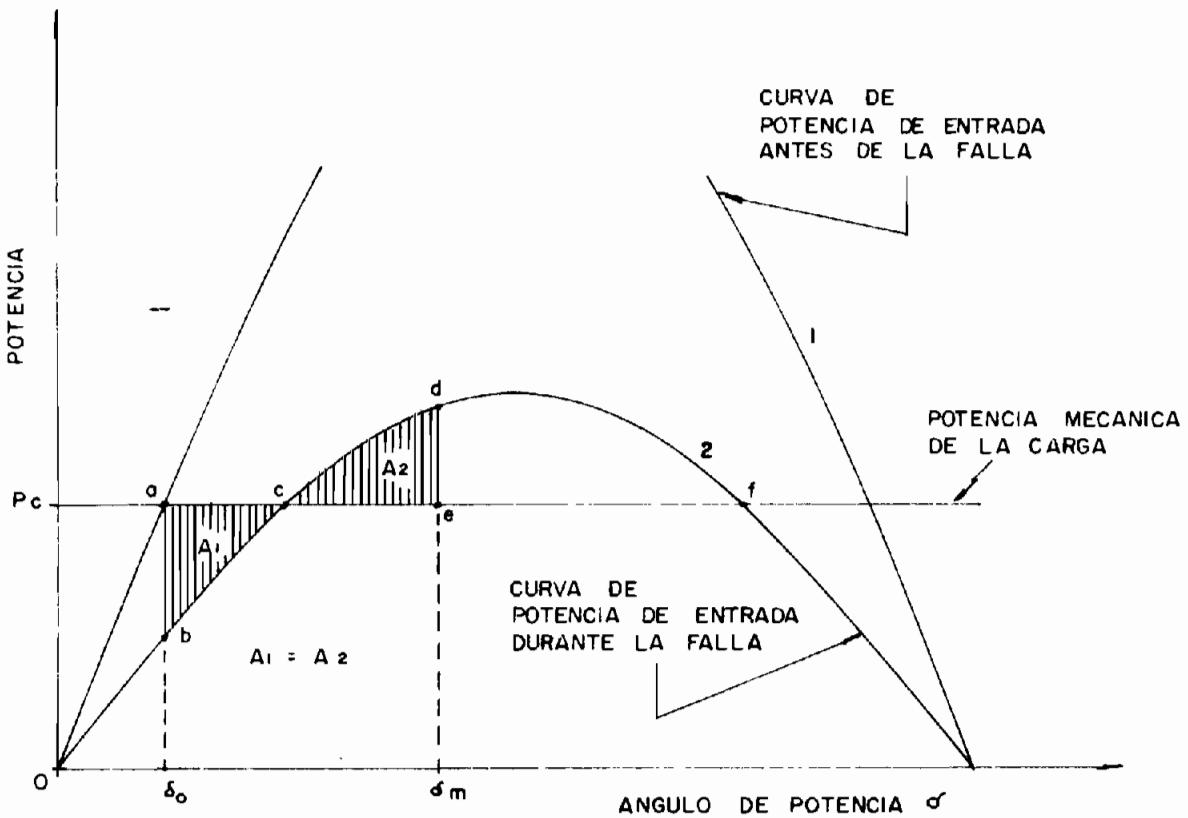
En la figura 3.8 se muestran las curvas potencia-ángulo de potencia correspondientes a las dos situaciones: antes de producirse la falla (curva 1) y cuando la falla está presente (curva 2).

Durante su funcionamiento normal el motor estará operando sobre el punto "a", para el que se cumple que las potencias de entrada y salida son iguales; el ángulo de torque correspondiente es δo.

En el momento en que se produce la falla, el flujo de potencia disminuye bruscamente; el punto de operación cae a "b" sobre la curva 2 directamente por debajo de "a".

La diferencia entre las potencias de entrada y salida (Pe-Pc) representa una potencia neta decelerante (proporcional al segmento "ab"). En consecuencia el motor comienza a perder velocidad, el ángulo se incrementa y el punto de operación se

ANALISIS GRAFICO DE LA INFLUENCIA DE UNA FALLA SOSTENIDA SOBRE LA OPERACION DEL MOTOR



δ_o = ANGULO DE POTENCIA INICIAL

δ_m = ANGULO DE POTENCIA MAXIMO

desplaza sobre la curva 2, de izquierda a derecha; la velocidad relativa negativa se incrementa también a partir de su valor inicial cero.

La potencia neta decelerante es cada vez menor conforme la máquina incrementa su ángulo de torque, hasta anularse cuando el punto de operación alcanza "c". Aquí la velocidad relativa es máxima así como también la energía cedida por la inercia del sistema rotante (área A1). Esto determina que el ángulo siga incrementándose. Entonces, a partir de "c" la potencia de aceleración se hace positiva (acelera a la máquina a su velocidad sincrónica), en tanto que la velocidad relativa negativa comienza a decrecer hasta hacerse nula cuando $\delta = \delta m$, y las áreas A1 y A2 se han igualado.

En este punto, sin embargo, existe un torque positivo máximo de aceleración (proporcional a "dc"), que tiende a incrementar la velocidad de la máquina más allá de su valor sincrónico, lo cual determina que el ángulo de torque disminuya a partir de su valor máximo δm; el punto de operación regresa entonces a "c" y después a "b", para luego continuar oscilando entre "b" y "c". En realidad las oscilaciones debido al amortiguamiento mueren finalmente sobre "c", que es el punto de equilibrio para las nuevas condiciones de operación.

Para potencias de carga mayores que Pc las áreas A1 y A2 -

serán más grandes así como también el ángulo máximo δm.

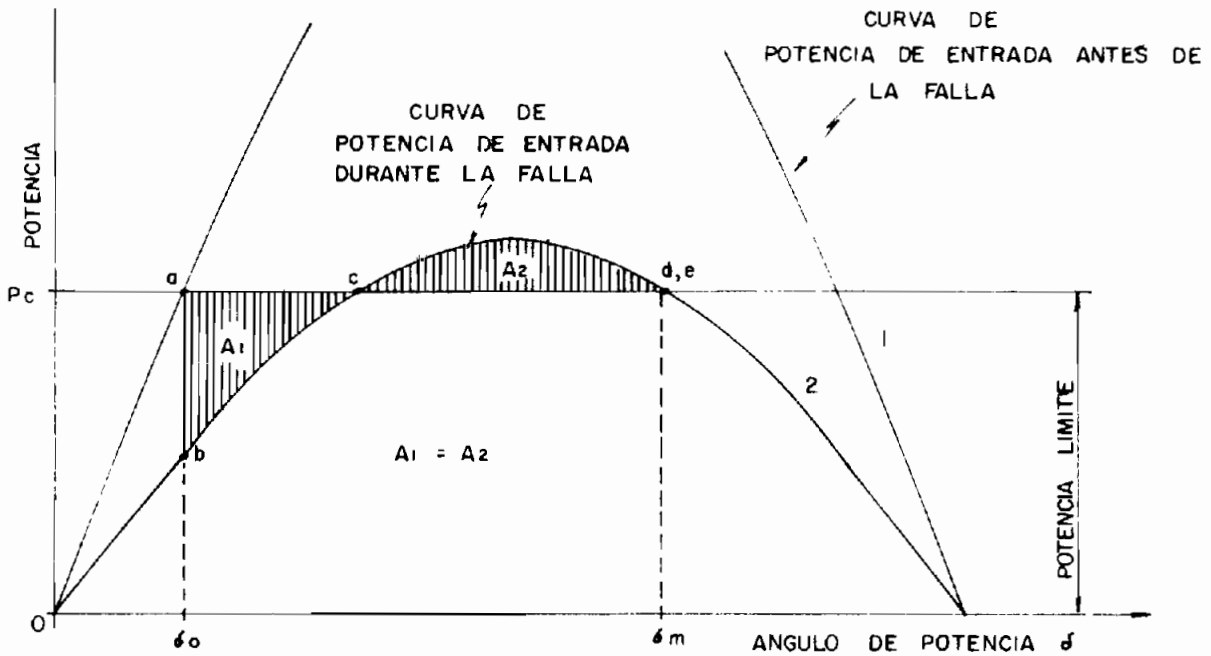
El valor más alto que permita aún a la máquina mantenerse estable ante una falla sostenida determinada será aquel para el cual δm corresponda al punto de intersección de la horizontal - que representa la potencia de carga y la curva de falla sostenida (punto "e" en la figura 3.9). En este punto muere la oscilación puesto que tanto la potencia de aceleración como la velocidad son nulas.

La potencia Pcm con la cual se obtiene esta condición crítica representa el "límite de estabilidad" bajo condiciones - transitorias porque para una potencia de carga mayor que Pcm, - al alcanzar el motor el punto de operación "e", la energía cedida sería aún menor que la recuperada ($A2 < A1$); el ángulo de - torque δ continuará incrementándose por sobre el valor δm al i - gual que la potencia neta negativa -Así, al no existir posibilidad de restauración del equilibrio, el motor perderá definitivamente su estabilidad.

5.2.- ESTABILIDAD BAJO CONDICIONES DE FALLAS NO SOSTENIDAS.-

El tiempo que dura la falla sobre el sistema, desde el instante en que ocurre hasta cuando es completamente despejada, se denomina "tiempo de despeje".

DETERMINACION GRAFICA DEL LIMITE DE ESTABILIDAD PARA EL CASO DE FALLA SOSTENIDA



δ_o = ANGULO DE POTENCIA INICIAL

δ_m = ANGULO DE POTENCIA MAXIMO (CRITICO)

Es evidente que mientras menor sea el tiempo de despeje, es decir mientras más pronto sea restablecido el flujo de potencia al motor mayores serán sus probabilidades de mantenerse en sincronismo.

Para el análisis gráfico es necesario en este caso dibujar las tres curvas potencia -ángulo de potencia correspondientes a la situación normal de operación antes de presentarse la falla - (curval), a la situación del sistema cuando la falla está presente (curva 2)) y a la situación estable de operación cuando la -- falla queda despejada (curva 3). Véase el gráfico 3.10.

La potencia de la carga está representada por la horizontal Pc. El punto de operación antes de presentarse la falla está dado por la intersección de esta recta con la curva (1), punto "a" correspondiente a un ángulo inicial δo.

Al producirse la falla el punto de operación cae a "b" sobre la curva 2. Se crea entonces una potencia neta que tiende a frenar al motor determinando consecuentemente el incremento del ángulo de potencia y el desplazamiento del punto de operación en - dirección a "c".

Si suponemos ahora que cuando el ángulo de torque alcanza el valor δc la falla es despejada (sea por sí misma o mediante -

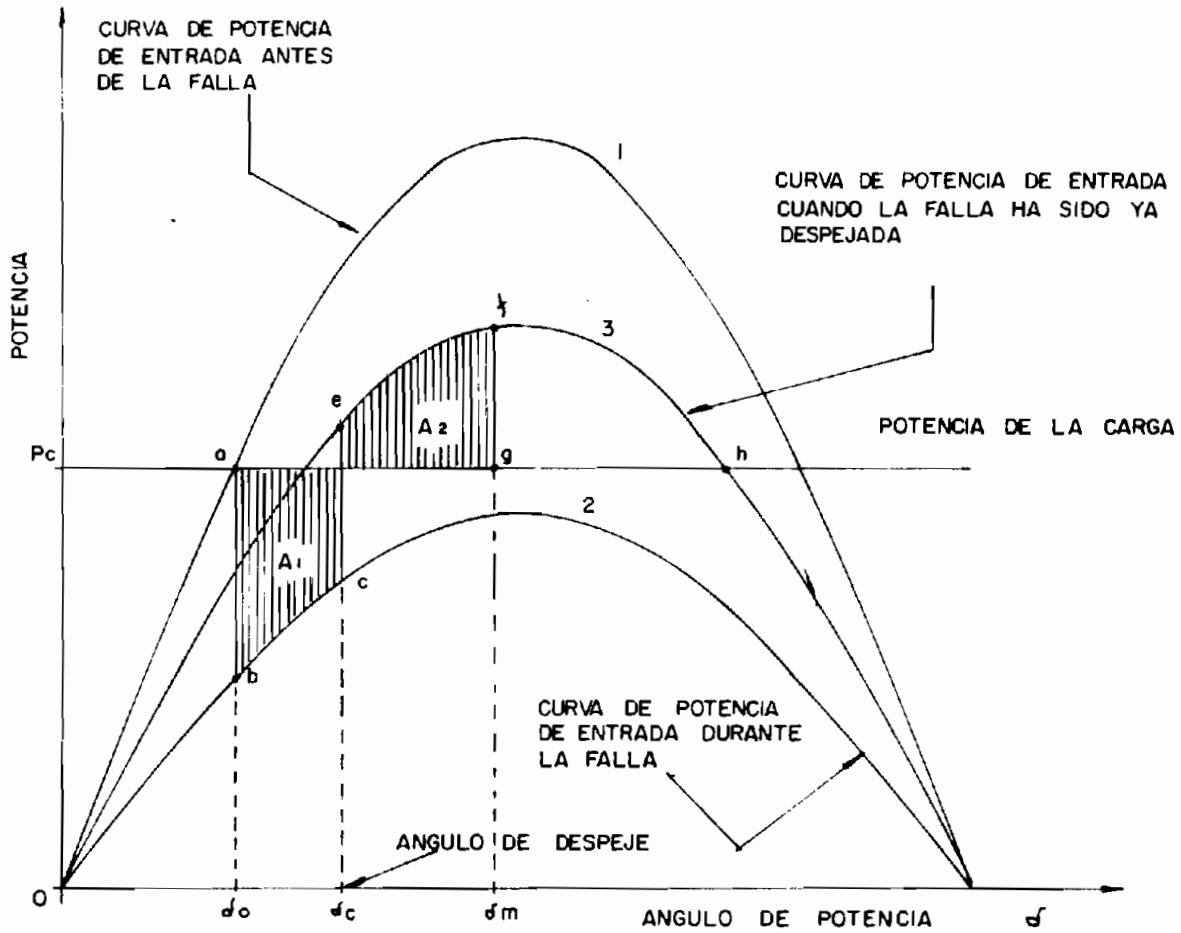
la operación de algún dispositivo de protección), entonces el punto de operación saltará a "e" sobre la curva 3, y continuará moviéndose sobre ésta hasta un punto cualquiera como "f" en el que se cumpla que A2 iguala a A1.

Conviene anotar que si al despejar la falla la reactancia equivalente del sistema no queda incrementada, como por ejemplo en el caso en que se requiera poner fuera de servicio una de -- dos o más líneas en paralelo, la curva 3 se identificará con la curva 1.

Potencias de carga mayores que la representada en la figura 3.10, determinarán que "f" se desplace más hacia la derecha (para un mismo valor δc), siendo su límite el punto "h" - En este momento, cuando "f" cae sobre "h", la potencia de carga representará el límite de estabilidad para la falla no sostenida dada. Así, si la carga del motor antes de producirse la falla fuese más grande que este límite, el motor no será capaz de mantenerse en paso después de ocurrir la perturbación.

Un tiempo de despeje mayor que el considerado establecerá que el ángulo de despeje δc sea también más grande, haciendo que "f" se aproxime a "h". Para un valor dado de potencia de carga el ángulo de despeje δc (con el cual se obtiene que "f" caiga - sobre "h" y A1 sea igual a A2) representará un valor crítico -

ANALISIS GRAFICO DE LA INFLUENCIA DE UNA FALLA DESPEJADA SOBRE LA OPERACION DEL MOTOR



por sobre el cual el motor será inestable (ángulo de despeje - crítico).

Media nte una aplicación de este análisis se puede encontrar la potencia máxima de carga (límite) en función de un ángulo - de despeje crítico δc dado; el procedimiento lo veremos más adelante. Por otra parte, en base a la curva de balanceo del ro - tor, es posible determinar el ángulo de despeje en función del tiempo de despeje. A partir de estas dos relaciones se puede entonces obtener el límite de estabilidad en función del tiempo de despeje para una falla de condiciones determinadas.

En la práctica el proceso generalmente es inverso; conocido al tiempo de despeje de los dispositivos de protección (el tiempo requerido por los relés para detectar la falla y accionar los interruptores correspondientes más el tiempo requerido por éstos para interrumpir la corriente de falla) se trata entonces de determinar la potencia máxima o límite de estabili - dad.

6.- EFECTO DE LOS ARROLLAMIENTOS DE AMORTIGUACION.-

En general todas las máquinas sincrónicas de polos salientes van dotadas de arrollamientos de amortiguación. En algu - nas ocasiones éstos son diseñados considerando únicamente sus

efectos sobre la estabilidad, pero en la mayoría de los casos el diseño reviste otros propósitos como dotar a los motores de torque de arranque (en este caso los arrollamientos actúan como el de jaula de ardilla de un motor de inducción), proteger a los arrollamientos de campo reduciendo el voltaje inducido sobre los mismos durante variaciones súbitas en la corriente de la armadura provocadas por perturbaciones en la red de suministro, etc.

Los arrollamientos de amortiguación consisten de varillas conductoras, generalmente de cobre, colocadas sobre las caras polares en ranuras paralelas al eje de la máquina y conectadas entre sí por sus extremos.

Cuando la conexión en los extremos es única, mediante dos anillos cerrados, se dice que el arrollamiento es "completo", cuando la conexión se corta en los espacios interpolares el arrollamiento se denomina "incompleto".

También se suele clasificar a estos arrollamientos de acuerdo a su resistencia eléctrica; un arrollamiento de "baja resistencia" produce, según la teoría del motor de inducción, un elevado torque a pequeños deslizamientos.

Los arrollamientos amortiguadores, al cortar durante las

oscilaciones del rotor el campo magnético del estator, absorven energía de tales oscilaciones amortiguándolas en consecuencia. La creación del torque de amortiguamiento, semejante a la del torque de un motor en inducción, y su efecto sobre la estabilidad se analizan a continuación:

a) Perturbaciones provenientes de la red de alimentación:

Una fuente desbalanceada de potencia alimentando al motor produce en éste dos campos electromagnéticos que rotan a velocidad sincrónica; el uno en sentido normal debido a la componente de secuencia positiva de la corriente del estator y el otro, en sentido opuesto debido a la corriente de secuencia negativa. A tales campos se los puede llamar de "secuencia positiva" y "negativa" respectivamente.

Según la teoría del motor de inducción, la interacción entre la corriente que circula por los arrollamientos de amortiguación y el campo magnético de secuencia positiva cortado por estos arrollamientos, cuando el rotor se desliza incrementando su ángulo δ, crea un torque de secuencia positiva es decir de igual sentido que el torque electromagnético del motor, que trata de acelerar a éste cuando pierde velocidad por efecto de la perturbación.

El torque de secuencia positiva se manifiesta durante y después de la falla, mientras subsiste la oscilación; naturalmente su efecto es mayor cuando la falla ha sido despejada -- pues entonces la componente de secuencia positiva del sistema, ya balanceado nuevamente, es mayor. Cabe anotar que cuando el motor oscila alrededor de su nuevo punto de operación, el deslizamiento es alternativamente positivo y negativo y en igual forma el torque de secuencia positiva que trata siempre de arrastrar al motor a su posición de equilibrio o sincrónica. Como se ve el efecto total va siempre en beneficio de la estabilidad.

En forma similar, cuando la alimentación al motor es desbalanceada, se crea un torque de secuencia negativa debido al campo magnético de tal secuencia.

En este caso, si "S" es el deslizamiento del rotor con respecto al campo magnético de secuencia positiva, el deslizamiento con respecto al campo de secuencia negativa será (2-S), es decir aproximadamente 2.

Este torque opuesto al de secuencia positiva, actúa siempre en el mismo sentido que el torque neto del motor y por tanto representa una desventaja en lo que respecta a la estabilidad.

Los progresos recientes obtenidos en la reducción del tiempo de despeje de las fallas, hacen cada vez menos importante el efecto perjudicial a la estabilidad del torque de secuencia negativa, por lo que puede ser despreciado en el cálculo.

b) Perturbaciones provenientes del lado de la carga:

En el caso de oscilaciones del rotor por efectos de perturbaciones provenientes desde la carga el torque de amortiguamiento creado es único, de secuencia positiva -Las consideraciones expuestas anteriormente son válidas para este caso.

CAPITULO IV

CALCULO DE ESTABILIDAD.

En general el procedimiento de cálculo de cualquier problema de estabilidad consiste en probar analíticamente el funcionamiento del sistema para determinadas condiciones de operación. Si la respuesta del sistema es crítica para las condiciones previamente asumidas, entonces es razonable suponer que la estabilidad está garantizada para otras condiciones menos rigurosas.

Las condiciones ante las cuales la operación resulta ser crítica se pueden denominar "condiciones límites o críticas".

Por otra parte, en el caso correto de la operación del motor, las causas o condiciones capaces de arrastrarle a una sustitución inestable son de diverso orden; por tanto la solución del problema de estabilidad no es única, es decir no se puede afirmar que el funcionamiento del motor será estable o inestable sin antes especificar bajo qué condiciones.

1.- CALCULO DE LA ESTABILIDAD ANTE VARIACIONES DE LA CARGA.-

En la determinación del límite de estabilidad ante pertur

baciones originadas en el lado de la carga consideraremos separadamente las situaciones en "estado permanente" y en "estado transitorio", correspondientes respectivamente, a variaciones lentas o súbitas del torque de carga aplicado al motor.

1.1.- VARIACIONES MODERADAS DE LA CARGA.-

a.- Caso del motor conectado a un sistema eléctrico de -- gran capacidad (barras infinitas). El diagrama unifilar se -- muestra en la figura 4.1.

Como punto de partida asumamos que la excitación (corriente de campo) se mantiene constante durante y después de la perturbación.

La expresión para el flujo de potencia es:

$$P = \frac{V \cdot E}{X} \operatorname{sen}\delta$$

En donde:

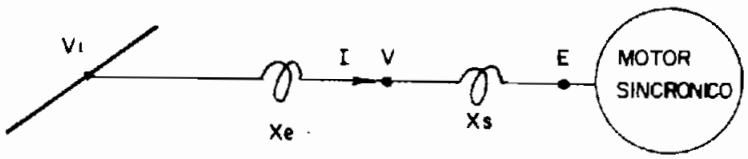
V = Voltaje del sistema de alimentación.
E = Tensión interna o de excitación del motor.
X = Reactancia de transferencia entre los puntos a los -

MOTOR SINCRONICO CONECTADO A UN SISTEMA DE BARRAS INFINITAS

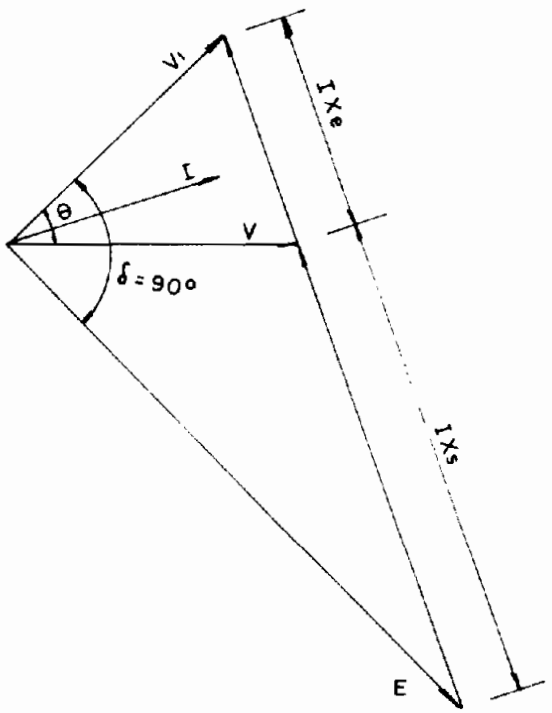
a) DIAGRAMA UNIFILAR

b) DIAGRAMA VECTORIAL QUE MUESTRA LA SITUACION EN QUE EL DEFASAMIENTO ENTRE V_1 Y E ES DE 90°(POTENCIA MAXIMA)

a)



b)



V_1 = VOLTAJE DE BARRAS DEL SISTEMA DE ALIMENTACION

V = VOLTAJE A LOS BORNES DEL MOTOR

E = VOLTAJE INTERNO DE EXITACION

Xe = REACTANCIA EXTERIOR

Xs = REACTANCIA SINCRONICA DE LA MAQUINA

I = CORRIENTE DE LINEA

que se miden. V y E (Es la reactancia del circuito $\overline{\Pi}$ equiva - lente que incluye la impedancia reactiva externa y la reactan - cia interna saturada de la máquina).

δ = Angulo de torque.

NOTA: El método para determinar la reactancia interna saturada del motor fue presentado en el segundo Capítulo.

En esta expresión no se considera el efecto de saliencia de los polos; en condiciones permanentes, como se analizara anteriormente, el efecto es mínimo y además va en beneficio de la estabilidad.

Si, como se asumió al principio, la corriente de campo - se mantiene inalterable durante la perturbación, la tensión E - de excitación del motor permanecerá también constante y el va - lor máximo de potencia (límite)se tendrá para un ángulo de torque de 90°. Este valor máximo será:

$$P_m = \frac{V \cdot E}{X}$$

Sin embargo, si la corriente de campo permanece constante, ante una variación de la carga considerablemente grande el voltaje a los terminales del motor experimentará una caída.

En la práctica, ante variaciones de carga, es mucho más fácil y útil mantener constante la tensión V a los terminales del motor antes que la tensión interna E, mediante un ajuste de la corriente de excitación en el campo. Pero en cambio, este ajuste de la excitación determina que la tensión interna varíe.

En tales circunstancias, cuando existe regulación del voltaje a los terminales del motor, para calcular la potencia máxima es necesario determinar previamente el valor de la tensión interna cuando su defasamiento con respecto a la tensión de barras del sistema de alimentación es 90°; asumiendo que el voltaje a los terminales del motor permanece constante.

El proceso de cálculo se lo realiza por tanto y puede ser llevado en la siguiente forma:

En el diagrama de la Figura 4.1, se tiene:

$\bar{V}1 = V1 \angle \Theta°$ y $\bar{V} = V \angle 0°$

De acuerdo a lo dispuesto anteriormente las tensiones V1 y V permanecen constantes en magnitud.

Se asumen entonces diferentes valores de Θ, calculando en cada caso la tensión interna E y el correspondiente ángulo de retraso de esta tensión con respecto al voltaje V1; es decir, el ángulo δ.

Supóngase que el primer valor asumido para Θ es $\Theta 1$. Entonces:

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}1 - \bar{V}}{jXe} = \frac{V1}{Xe} \angle \Theta 1 - 90^\circ - \frac{V}{Xe} \angle -90^\circ$$

$$\bar{E} = \bar{V} - j\,Xs.\bar{I} = V \angle 0^\circ - \frac{Xs}{Xe} \cdot V1 \angle \Theta 1 + \frac{Xs}{Xe} V \angle 0^\circ$$

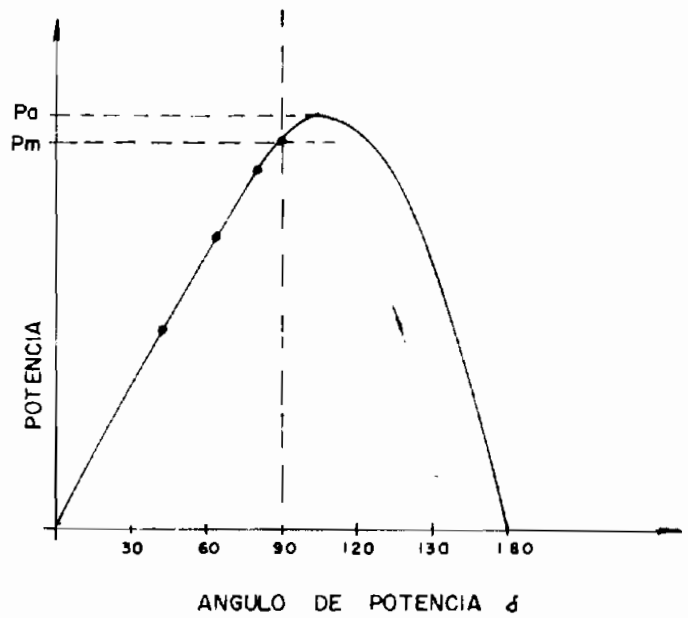
La potencia correspondiente puede ser calculada a partir de la expresión:

$$P1 = \frac{V1.E}{Xe + Xs} \cdot \mathrm{Sen}\delta$$

Se repite el mismo cálculo para nuevos valores $\Theta 2$, $\Theta 3$, etc. (en pasos de 10 o 15 grados, por ejemplo), determinando en cada caso la potencia correspondiente; hasta que se obtenga que δ sea mayor que 90°.

Al marcar todos estos valores P1, P2, P3, etc., sobre un plano potencia-ángulo de potencia, es posible trazar un lugar geométrico como el que se indica en la figura 4.2. Entonces la potencia, leída sobre tal curva, para un ángulo de 90°, representa la potencia máxima o potencia límite hasta la cual se puede in -

DISTORCION DE LA CURVA DEL FLUJO DE POTENCIA POR EFECTO DE LA VARIACION DE LA TENSION INTERNA DEL MOTOR



Pm = POTENCIA MAXIMA O LIMITE DE ESTABILIDAD

Pa = POTENCIA MAXIMA APARENTE

crementar la carga en forma gradual.

En el gráfico mencionado se puede observar que la variación de la tensión interna de la máquina distorsiona la curva de potencia desplazando su máximo aparente hacia la derecha (- más allá de los 90°) aunque el verdadero límite de estabilidad es el valor de potencia correspondiente a un ángulo $\delta = 90°$.

b.- Caso del motor alimentado por un generador cuya capacidad no excede mayormente a la del motor.

Supóngase que las dos máquinas están interconectadas a - través de una impedancia reactiva pura Xe. El hecho de que en una impedancia reactiva no existan pérdidas determina que la potencia de salida del generador sea igual a la potencia que entra al motor. Véase el diagrama unifilar de la figura 4.3.

En forma similar a la del caso anterior, asumamos primero que las dos tensiones internas del generador y del motor, Eg y Em respectivamente, detrás de las correspondientes reactancias sincrónicas saturadas, permanecen constantes. La ecuación del flujo de potencia será:

$$P = \frac{Eg.Em}{Xg + Xe + Xm} \operatorname{Sen}\delta$$

La potencia máxima se obtendrá cuando el ángulo de potencia sea igual a 90°.

$$Pm = \frac{Eg.Em}{Xg + Xe + Xm}$$

Pm representa entonces el límite o potencia máxima de carga cuando ésta es incrementada gradualmente.

Así por ejemplo, supóngase que la carga se incrementa determinando que la potencia mecánica de salida exceda momentáneamente a la potencia eléctrica de entrada; la máquina ante tal circunstancia disminuye ligeramente su velocidad con el objeto de ajustar su ángulo de torque al nuevo valor de carga.

Al mismo tiempo, conforme la potencia de entrada al motor se incrementa la potencia de salida del generador se incrementa también, excediendo momentáneamente a la potencia mecánica de entrada al mismo. Se crea pues un torque neto que obliga al generador a perder velocidad hasta que, mediante un ajuste del ángulo de torque, la potencia de entrada se incremente igualando a la potencia de salida.

La carga del motor puede seguir aumentando en esta forma, lenta y gradualmente, hasta que la potencia transmitida de la u

na máquina a la otra alcance su valor máximo Pm, cuando el ángulo δ se hace igual a 90°.

Cabe anotar que en este caso el concepto físico del ángulo de torque del sistema no comprende únicamente el ángulo de retraso del eje del motor con respecto al campo magnético del estator sino que incluye además el ángulo en avance del generador con respecto a su propio campo.

A partir de este punto cualquier incremento en la potencia de carga del motor no podrá ser balanceado por el flujo de potencia entre las dos máquinas.

Hasta el momento se ha asumido que las tensiones internas Eg y Em de las máquinas permanecen constantes lo cual realmente es falso. Si la excitación se mantiene constante, una variación pronunciada del valor de la carga determinará que los voltajes a los terminales de las dos máquinas varíen también. Generalmente a lo que se tiende mediante la regulación de voltajes es a mantener estas tensiones lo más constantes, ante cualquier variación gradual de la carga. La regulación trae como consecuencia la variación de las tensiones internas por consideraciones análogas a las del caso a). En realidad lo que ocurre es que la curva del flujo de potencia se distorsiona; su máximo se desplaza hacia la derecha, más allá de los 90°, pero el límite

real de estabilidad es el correspondiente a $\delta = 90°$.

El cálculo de este límite puede ser efectuado por tanteo - analítica o gráficamente. Este último proceso es menos engo - rroso y lo vamos a desarrollar a continuación.

En la figura 4.3 se muestra el diagrama unifilar para un - sistema de dos máquinas sincrónicas interconectadas formando - un grupo motor-generador; con sus respectivas reactancias in - ternas Xm y Xg y la reactancia exterior Xe.

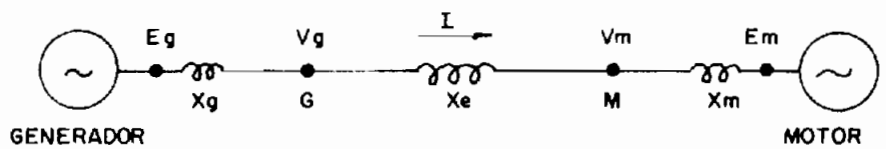
Para trazar el diagrama vectorial de este sistema que re - presente las condiciones críticas de operación se asumirá que los voltajes respectivos Vm y Vg son regulados. Dichas condi- ciones críticas se obtendrán cuando Em atrase a Eg en 90°.

Se comienza el diagrama dibujando las caídas de tensión - IXg, IXe, IXm sobre una misma recta, mediante segmentos propor cionales a las reactancias Xg, Xe y Xm respectivamente. Véase la figura 4.4.

La caída de tensión total será:

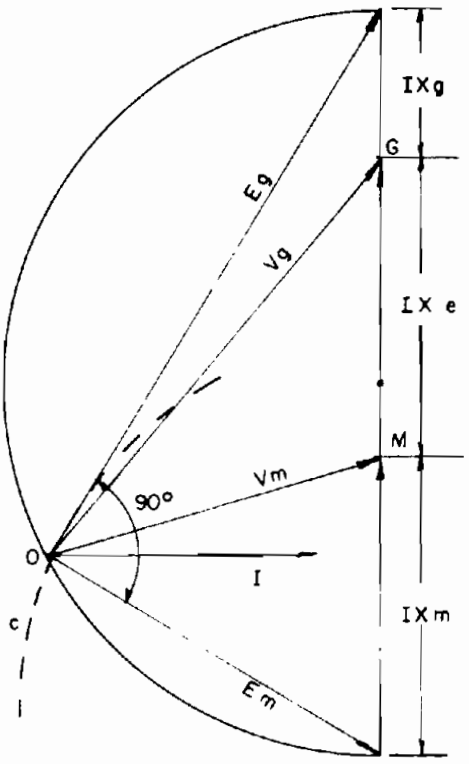
$$IX = IXg + IXe + IXm.$$

DIAGRAMA UNIFILAR DE UN SISTEMA FORMADO POR DOS MAQUINAS SINCRONICAS INTERCONECTADAS A TRAVES DE UNA REACTANCIA EXTERIOR



Eg = TENSION INTERNA DEL GENERADOR
Em = TENSION INTERNA DEL MOTOR
Vg = VOLTAJE A LOS BORNES DEL GENERADOR
Vm = VOLTAJE A LOS BORNES DEL MOTOR
I = CORRIENTE DE LINEA
Xg = REACTANCIA SINCRONICA DEL GENERADOR
Xm = REACTANCIA SINCRONICA DEL MOTOR
Xe = REACTANCIA DE INTERCONEXION

DETERMINACION GRAFICA DE LAS TENSIONES Eg Y Em , CON REFERENCIA AL DIAGRAMA UNIFILAR DE LA FIG. 4.3, CUANDO EL DEFASAMIENTO ENTRE DICHAS TENSIONES ES 90°



Eg : TENSION INTERNA DEL GENERADOR

Em . TENSION INTERNA DEL MOTOR

Vg . VOLTAJE A LOS BORNES DEL GENERADOR

Vm : VOLTAJE A LOS BORNES DEL MOTOR

I : CORRIENTE DE LA LINEA

Xg REACTANCIA SINCRONICA DEL GENERADOR

Xm : REACTANCIA SINCRONICA DEL MOTOR

Xe REACTANCIA EXTERNA DE INTERCONECCION

Luego se traza un semicírculo con IX/2 como radio, tomando como centro el punto medio del segmento IX. Cualquier punto - sobre el semicírculo que sirva de origen al diagrama vecto - rial determinará que se cumpla la condición de que Em atrase a Eg en 90°, puesto que cualquier ángulo inscrito en un semicírcu lo es ángulo recto.

Se aplica entonces la otra condición que establece que los voltajes a los terminales de las dos máquinas permanezcan invariables en magnitud; que hace que la relación Vg/Vm sea siempre constante.

La igualdad Vg/Vm = Constante, viene representada, a partir de los puntos G y M por un lugar geométrico (curva C).

La intersección de la curva C con el semicírculo nos da el punto O, que representa el origen del diagrama vectorial desde el cual se pueden entonces trazar los vectores Eg, Vg y Em y determinar los valores de estas tensiones aplicando la escala correspondiente.

Conocidos así los valores Eg y Em se puede calcular la potencia máxima o límite de estabilidad a partir de la expresión:

$$Pm = \frac{Eg.Em}{Xg + Xe + Xm}$$

1.2.- VARIACIONES BRUSCAS DE LA CARGA.

El cálculo de la estabilidad durante situaciones transitorias provocadas por perturbaciones provenientes del lado de la carga puede concretarse a los siguientes casos:

a) Determinación de la frecuencia natural del sistema, aplicable cuando el torque de carga es de tipo pulsante con una frecuencia determinada.

b) Determinación de las condiciones críticas transitorias (potencia máxima y ángulo de torque máximo) ante una inserción repentina de carga o ante un incremento repentino de la misma.

1.2.1.- FRECUENCIA NATURAL.-

CALCULO DE LAS CONSTANTES K1 y K2.-

La solución de la ecuación de balanceo desarrollada anteriormente permite establecer el carácter de las oscilaciones del rotor como respuesta transitoria a una perturbación originada en el lado de la carga.

Probablemente el aspecto más importante es la evaluación de la frecuencia natural de oscilación del sistema con el objeto de evitar cualquier posibilidad de resonancia en el caso de

cargas de tipo pulsante.

Se observó que cuando la frecuencia de este torque se aproximaba o era igual a la frecuencia natural del sistema rotante, entonces la carga pulsante podría incrementar en cada ciclo la amplitud de las oscilaciones del rotor (fenómeno de resonancia) arrastrando finalmente al motor a la pérdida de su estabilidad.

La solución misma de la ecuación diferencial respectiva fue presentada anteriormente; ahora nos concretaremos a la determinación de las constantes K1 y K2 que intervienen en dicha ecuación; de la constante de inercia I nos ocuparemos más adelante.

a) El torque de amortiguamiento fue considerado como proporcional a la velocidad de la oscilación, es decir estaba dado por la expresión:

$$K1.d\delta/dt.$$

La creación de este torque fue analizada al hablar del efecto de los arrollamientos de amortiguación sobre la estabilidad; es similar al torque del motor de inducción.

Para calcular la constante K1 se aprovecha el hecho de que

la característica torque-velocidad de un motor de inducción es prácticamente lineal en su parte más baja (pequeños desliza - mientos). Bajo esta consideración, se puede desarrollar el siguiente procedimiento:

Determinar experimentalmente el torque del motor sincrónico girando a velocidad nominal en calidad de motor de inducción (es decir con el campo desexcitado).

Supóngase que en estas circunstancias:

Ti = Torque desarrollado (Kg.m)

s = Deslizamiento (%)

n = Velocidad nominal de la máquina (R.P.M.)

Puesto que $K1.d\delta/dt$ representa torque, K1 vendrá expresado en Kg.m radianes por segundo.

La velocidad en radianes por segundo es igual a $2\pi\, n/60$.

En la parte lineal de la característica torque-velocidad - se tiene que:

$$T = K1 \cdot \frac{s}{100} \times \frac{2\pi n}{60}$$

De donde:

$$K1 = \frac{3.000\ Ti}{\Pi.n.s} \quad (Kg.m/rad\ por\ seg).$$

b) El torque de sincronización se lo había considerado como aproximadamente proporcional al ángulo de torque δ, según la expresión: $K2.\delta$.

La aproximación, válida para ángulos pequeños, fue hecha con el propósito de facilitar la solución de la ecuación diferencial.

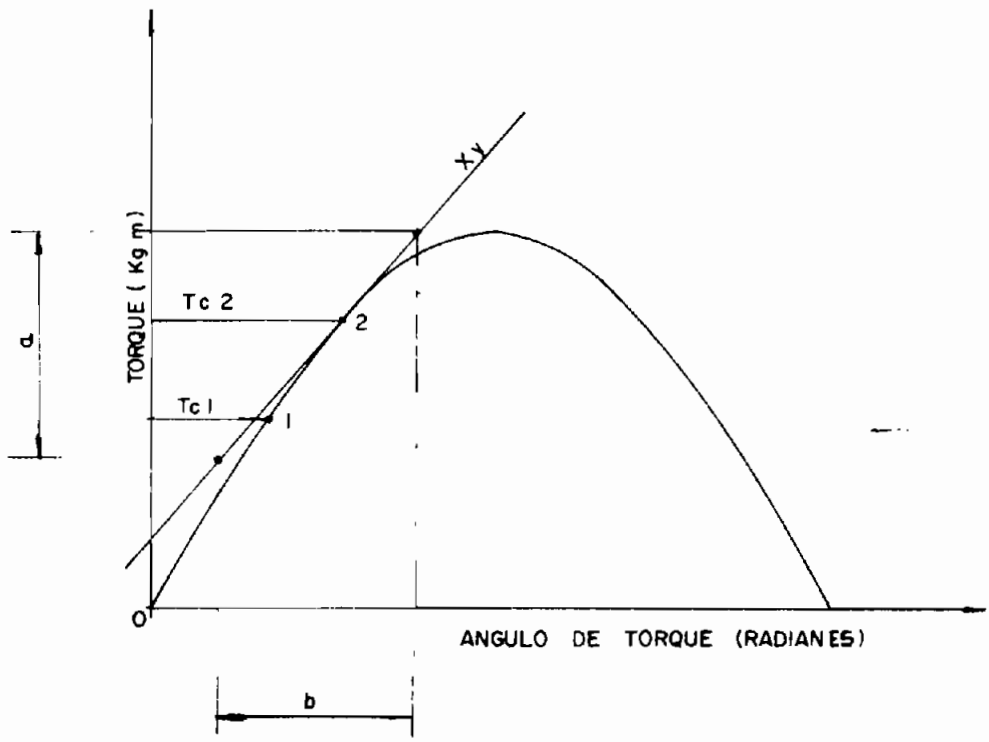
En esta forma la constante K2 viene a ser la tangente a la curva torque-ángulo de torque calculada en el punto correspondiente a las nuevas condiciones de operación del motor. Se recordará que esta constante fue definida anteriormente como factor de estabilidad dado por la derivada $P = dP/d\delta$

En la figura 4.5 se ilustra el proceso gráfico para la determinación de K2.

1.2.2.- DETERMINACION DE LAS CONDICIONES CRITICAS.

El cálculo de las condiciones críticas consiste en determinar ya sea el incremento máximo del torque de carga cuando éste inicialmente tiene un valor determinado, o el torque máximo que

DETERMINACION GRAFICA DE LA CONSTANTE K2 DEL TORQUE DE SINCRONIZACION



1) PUNTO DE OPERACION INICIAL

2) PUNTO DE OPERACION DESPUES DE UN INCREMENTO BRUSCO DE LA CARGA AL REDEDOR DEL CUAL SE PRODUCE LA OSCILACION

Xy) TANGENTE A LA CURVA SOBRE EL PUNTO 2

K2) a/b (Kg.m/rad)

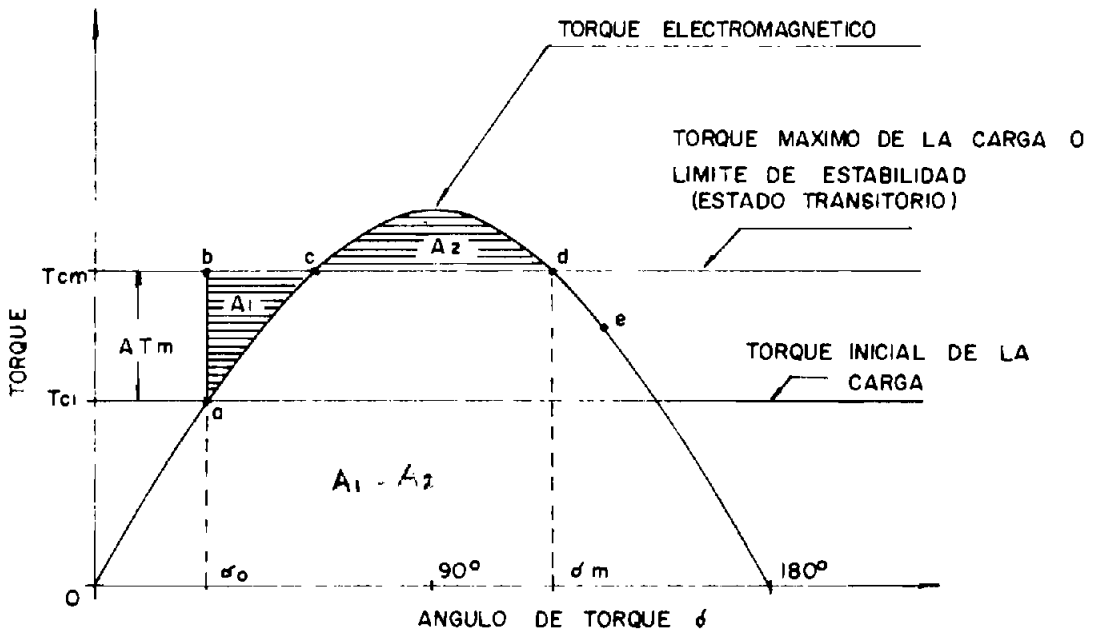
puede incrementarse al motor cuando está operando inicialmente en vacío; sin que en ningún caso se produzca la salida del sincronismo de la máquina.

Se asumirá que la tensión interna transitoria del motor permanece constante durante la perturbación. Esto estrictamente es falso cuando existe regulación del voltaje a los terminales del motor, conforme se analizara anteriormente. Sin embargo, en la regulación la respuesta de la excitación no es instantánea y por tanto su efecto no se manifiesta durante el primer ciclo de la oscilación del rotor que por esta causa y por falta de amortiguamiento resulta ser la más severa. De esto se concluye que al tomar la excitación como constante en el presente cálculo el error que se comete es despreciable.

El cálculo de las condiciones críticas (torque y ángulo de torque máximos) para las dos situaciones señaladas arriba se lo realiza gráficamente mediante la aplicación del principio de las áreas iguales.

En la figura 4.6 se ha dibujado la curva torque-ángulo de torque para un motor cuya carga inicial es Tc1. El incremento máximo ΔTm es aquel para el cual la horizontal Tcm establece que A2 = A1. El valor de Tcm se lo determina por tanteo, desplazando la horizontal más arriba o más abajo hasta obtener que

DETERMINACION GRAFICA DEL LIMITE DE ESTABILIDAD ANTE UN INCREMENTO BRUSCO EN EL VALOR DE LA POTENCIA DE LA CARGA DEL MOTOR



σo = ANGULO DE TORQUE INICIAL

σm = ANGULO DE TORQUE MAXIMO

se cumpla la igualdad anterior.

En la figura 4.7 se utiliza un procedimiento análogo para calcular la carga máxima que podría ser insertada al motor súbitamente en el caso de que éste previamente haya estado operando a vacío. Nótese que Tcm bajo estas circunstancias es menor que en el caso anterior.

2.9 CALCULO DE LA ESTABILIDAD ANTE FALLAS ELECTRICAS.

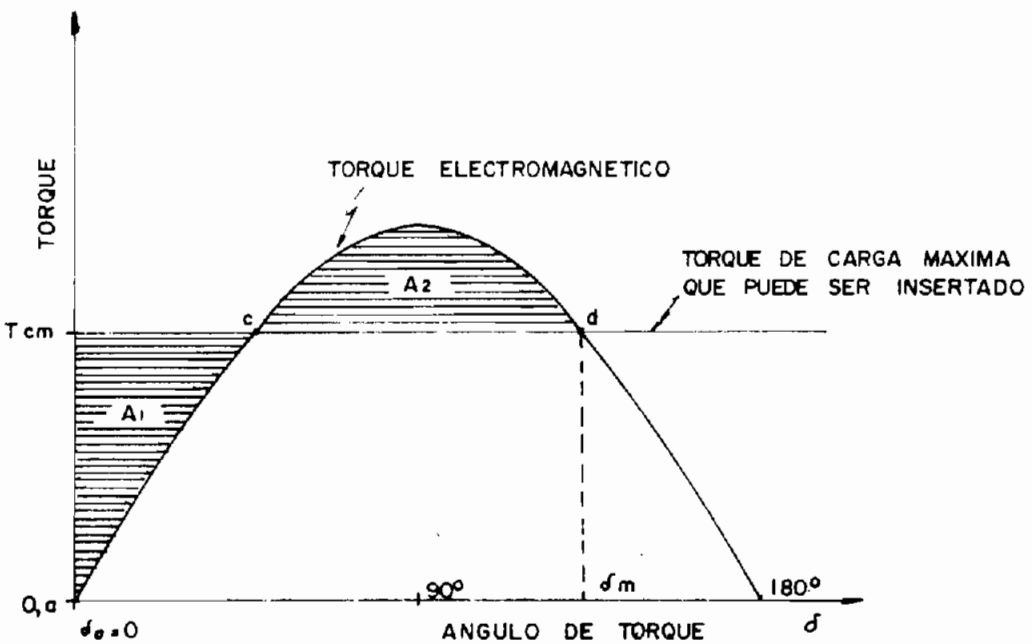
El grupo de condiciones críticas a calcularse vienen establecidas por los siguientes factores:

Rigurosidad de la falla,
Tiempo de despeje,
Carga del motor durante la perturbación.

De la interdependencia de estos tres factores pueden presentarse las siguientes alternativas de cálculo:

a) Determinación del tiempo de despeje máximo disponible para eliminar la condición de falla antes de que el motor pierda su sincronismo, cuando su carga tiene un valor determinado y el tipo de falla es especificado también. Es probablemente el caso más general.

DETERMINACION GRAFICA DEL LIMITE DE ESTABILIDAD CORRESPONDIENTE A UNA INSERCION BRUSCA DE CARGA A PARTIR DE LA OPERACION A VACIO DEL MOTOR



δ o = ANGULO DE TORQUE INICIAL CORRESPONDIENTE A LA OPERACION A VACIO

δ m = ANGULO DE TORQUE MAXIMO

b) Determinación del límite de estabilidad o valor máximo de carga del motor cuando las características de la falla y el tiempo de despeje de los aparatos de protección son conocidos.

c) Determinación de si el motor será o no capaz de conservar su estabilidad cuando las características de la falla, la carga del motor y el tiempo de despeje están dados.

2.1.- DETERMINACION DE LAS CONDICIONES CRITICAS.

Para la determinación de las condiciones críticas nos valdremos del principio de las "áreas iguales"; mediante este proceso gráfico se puede establecer la interrelación de los tres factores: tipo de falla (dado por la curva de flujo de potencia para cuando la falla está presente en el sistema), carga del motor y ángulo de despeje.

Posteriormente a base de la ecuación de balanceo se determinará la relación entre ángulo de despeje y tiempo de despeje.

El proceso del cálculo gráfico puede ser llevado de la siguiente manera:

Se establecen primero las expresiones del flujo de poten

cia eléctrica para las situaciones antes, durante y después de la falla de acuerdo a la ecuación:

$$P = \frac{V \cdot E'}{X} \operatorname{sen}\delta$$

En donde:

E': Tensión interna del motor detrás de la reactancia transitoria (tensión interna transitoria).

V: Voltaje constante del sistema de alimentación en el punto en el que se considere la recepción de la potencia.

X: Reactancia de transferencia entre los puntos a los que se miden V y E' (es decir se incluye la reactancia transitoria del motor).

La tensión interna E' se la calcula a partir del voltaje de placa a los bornes del motor, de la reactancia transitoria y de la corriente nominal. A esta tensión interna se la considera constante inmediatamente antes de presentarse la falla, cuando la falla está presente e inmediatamente después de su despeje; esto estrictamente es falso como se verá posteriormente.

Para calcular las reactancias de transferencia correspondientes a las tres situaciones antes, durante y después de la -

falla se determinan previamente las constantes de secuencia positiva, negativa y cero y se establecen los respectivos circuitos.

El circuito equivalente para la condición que considera - que la falla está presente se lo obtiene conectando los circuitos de secuencia negativa y cero de acuerdo al tipo de falla considerado; en tanto que las condiciones antes y después de la falla estarán representadas únicamente por los circuitos de secuencia positiva.

Con los tres valores de reactancia así determinados se puede entonces dibujar las curvas potencia-ángulo de potencia correspondientes a las tres situaciones antes mencionadas.

Supóngase que para una falla determinada se trata de calcular la potencia máxima que el motor puede seguir arrastrando sin perder el paso, cuando el ángulo de despeje es conocido (a partir del tiempo de despeje).

La relación entre potencia máxima de la carga Pc y ángulo crítico de despeje δc puede ser calculada gráficamente mediante el siguiente procedimiento:

Considérese primero el caso de despeje instantáneo de la - falla ($\delta c = \delta o$); en la práctica es imposible un despeje ins -

tantáneo, sin embargo esta situación puede ser considerada como el límite al cual se tiende al disminuír cada vez más el tiempo de despeje.

En la Figura 4.8 se muestran las tres curvas potencia-ángulo de potencia y la potencia de la carga representada por la horizontal Pc1. Las condiciones críticas podrán obtenerse por tanteo, desplazando esta horizontal hacia arriba o hacia abajo - cuando las áreas A1 y A2 hayan igualado.

La potencia de carga máxima para el caso de que la falla - sea sostenida, es decir el tiempo de despeje tienda a infinito, se la puede obtener mediante el mismo procedimiento, conforme - se indica en la figura 4.9.

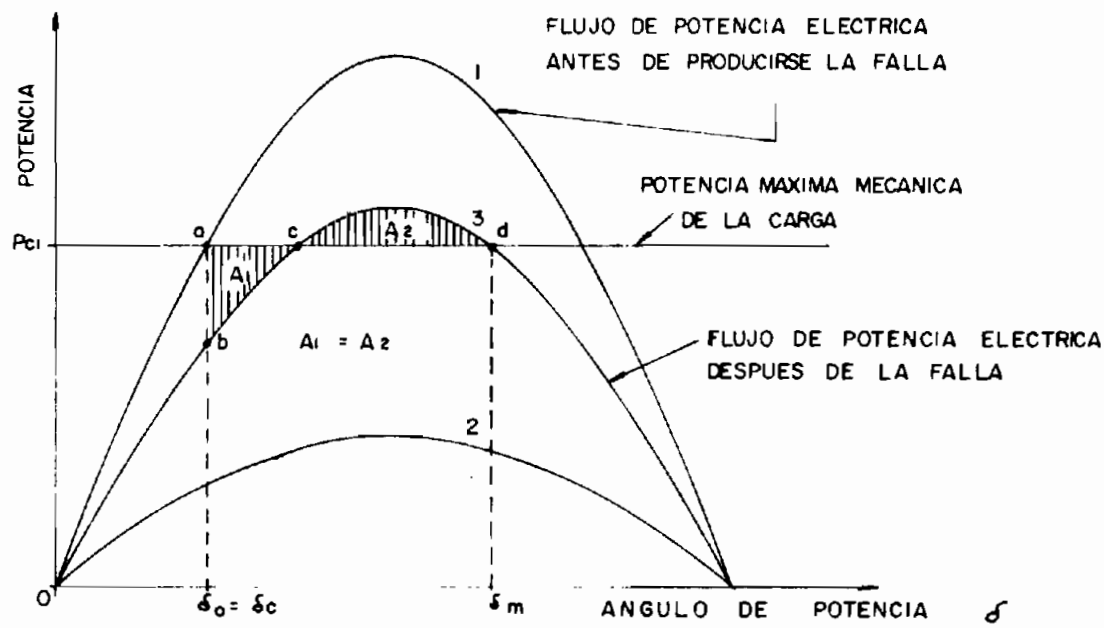
Para situaciones intermedias entre las dos condiciones que se acaban de señalar se procede a la inversa; es decir, se asumen adecuados valores de potencia de carga y se determinan luego los correspodientes ángulos de despeje críticos de la si - guiente manera:

Se dibuja como en los casos anteriores las curvas potencia-ángulo de potencia correspondientes a las condiciones del sistema antes, durante y después de la falla. Véase la figura 4.10.

Se traza entonces la horizontal (Pc3) que represente la po

DETERMINACION GRAFICA DEL LIMITE DE ESTABILIDAD ANTE UNA FALLA DESPEJADA

(DESPEJE INSTANTANEO)

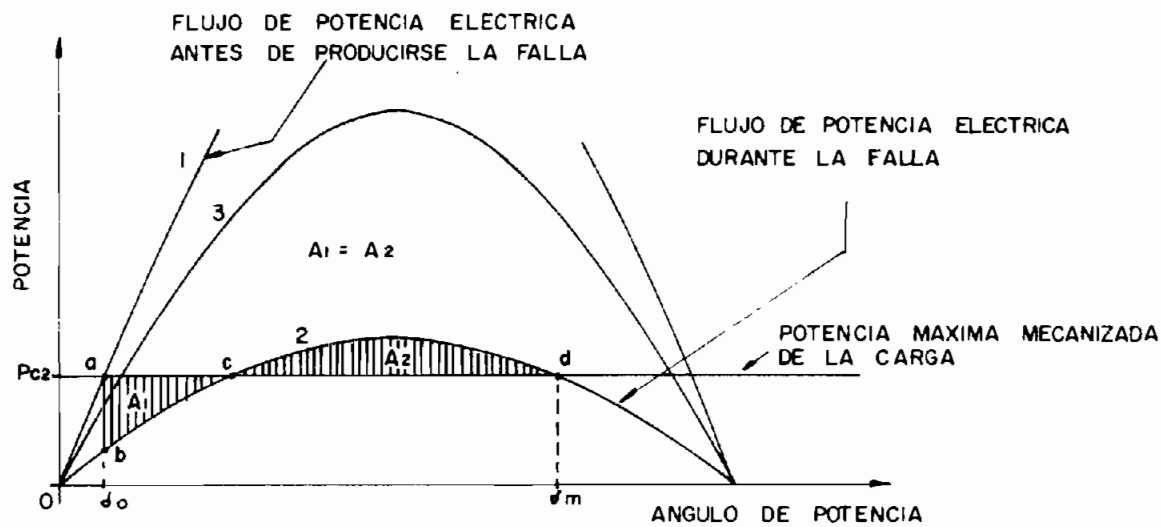


δ_o = ANGULO DE POTENCIA INICIAL

δ_c = ANGULO DE DESPEJE DE LA FALLA

δ_m = ANGULO DE POTENCIA MAXIMO

DETERMINACION GRAFICA DEL LIMITE DE ESTABILIDAD ANTE UNA FALLA SOSTENIDA

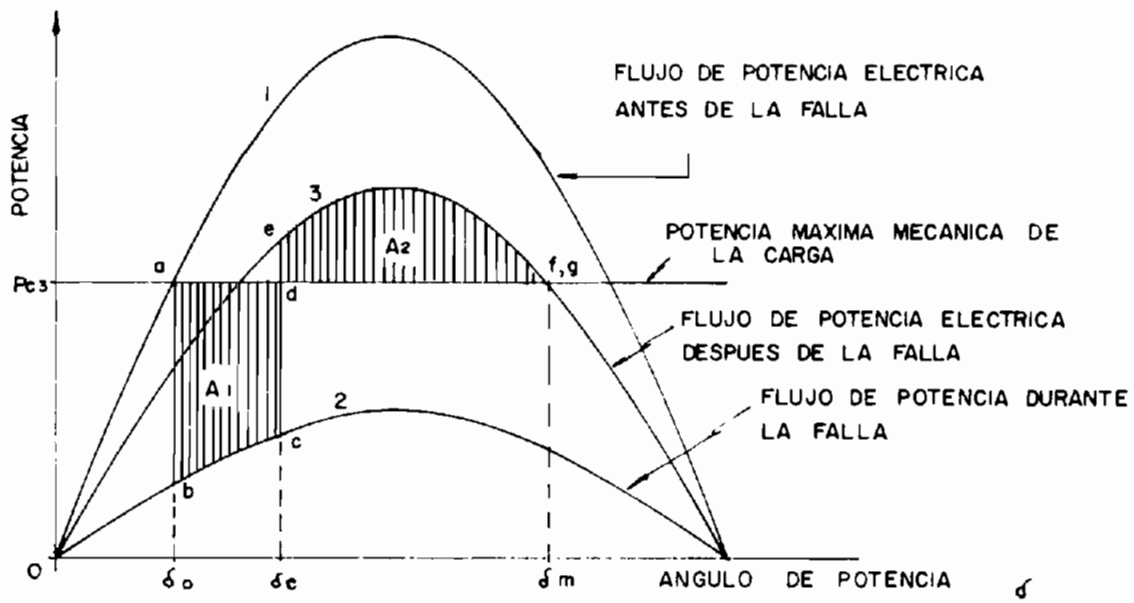


δ_o = ANGULO DE TORQUE INICIAL

δ_m = ANGULO DE TORQUE MAXIMO

FIG. 4.10

DETERMINACION GRAFICA DEL LIMITE DE ESTABILIDAD ANTE UNA FALLA DESPEJADA



$A_1 = A_2$

δ_o = ANGULO DE POTENCIA INICIAL

δ_c = ANGULO DE DESPEJE DE LA FALLA

δ_m = ANGULO DE POTENCIA MAXIMO

tencia de carga asumida. Luego se desplaza una vertical de derecha a izquierda hasta que por tanteo se obtiene que A2 sea igual a A1, el ángulo así obtenido representa el ángulo de despeje crítico δc para esa carga.

En esta forma se pueden obtener diferentes valores de potencia de carga y sus ángulos de despeje correspondientes.

Con los valores δc así obtenidos se puede determinar, mediante la solución de la ecuación de balanceo, los tiempos de despeje correspondientes y entonces establecer una relación entre la potencia de la carga y el tiempo de despeje para una falla determinada.

2.2.- SOLUCION DE LA ECUACION DE BALANCEO.

Como Se acaba de ver mediante el cálculo gráfico basado en el principio de las áreas iguales, aplicado en las proximidades del límite de estabilidad se puede determinar el ángulo de torque crítico (ángulo de despeje). Sin embargo, puesto que los relés de protección y los interruptores automáticos de corriente tienen tiempos definidos de operación, es imprescindible determinar, en un problema práctico, el tiempo de despeje máximo que permita aún al motor conservar su estabilidad, es decir el tiempo requerido por el motor para alcanzar su ángulo de torque crítico.

La relación entre ángulo de torque y tiempo viene dada por la ecuación de balanceo de la máquina.

Para el caso presente de perturbaciones provenientes desde el lado de la alimentación la ecuación de balanceo del motor difiere un tanto de la desarrollada anteriormente cuando se consideraba que las perturbaciones provenían desde la carga, por las siguientes razones:

a) La potencia de sincronización no puede ser considerada como proporcional a δ (según la aproximación: $\operatorname{sen}\delta \approx \delta$) por cuanto la caída o disminución brusca de esta potencia representa la causa de la oscilación del motor.

b) El torque de amortiguamiento puede ser despreciado por cuanto la amplitud de la oscilación para el primer ciclo es mucho mayor que para los ciclos subsiguientes. Por otra parte, si es necesario el despeje de la falla para preservar al motor de su salida de sincronismo, este despeje deberá ocurrir antes de que el rotor alcance el ángulo δ máximo correspondiente al primer ciclo, que prácticamente carece de amortiguamiento.

La potencia de aceleración una vez presentada la falla vendrá entonces expresada por la diferencia entre la potencia de la carga y la potencia eléctrica de entrada, es decir:

$$Pa = Md^2\delta / dt^2 = Pc - Pe$$

En donde:

Pa = Potencia neta de la máquina, positiva cuando tiende a incrementar el valor de δ.

Pc = Potencia mecánica constante de la carga.

Pe = Potencia eléctrica de entrada.

Por otra parte se tiene que:

$$Pe = P1.\text{sen}\,\delta + P2.\text{sen}\,2\delta$$

Que sustituyendo arriba nos da:

$$Md^2\delta / dt^2 = - (P1.\text{sen}\,\delta + P2.\text{sen}\,2\delta)$$

No es posible una solución matemática formal de esta ecuación, ni aún en el caso en que se desprecie el término (P2.sen 2δ) debido al efecto de saliencia de los polos; sin embargo, utilizando métodos más o menos aproximados se puede llegar a soluciones aceptables en caso prácticos; uno de ellos es el método "punto por punto".

Este método consiste en asumir que una o más variables per

manecen constantes durante intervalos cortos Δt, aunque sus valores sean distintos para diferentes intervalos. Los valores que se asignan a estas variables pueden ser los correspondientes al comienzo del intervalo en consideración; se calculan entonces las demás variables y en base a estos resultados se determinan los valores de las primeras variables correspondientes al final del intervalo $(t + \Delta t)$ que nuevamente se los asume constantes para el intervalo próximo.

En base a esta teoría tratemos de encontrar una expresión que permita calcular el ángulo δ en función del tiempo.

Supóngase que la potencia de aceleración al comienzo de un intervalo Δt permanece constante a lo largo del mismo.

$$Pa = M.d^2\delta / dt^2,$$

De donde:

$$Pa/M = d^2\delta / dt^2$$

Integrando se obtiene la velocidad de la oscilación que la designaremos por W.

$$W = d\delta / dt = (Pa/M).t + Wo$$

En donde:

Wo = Velocidad inicial.

Si a esta expresión se la integra nuevamente se obtendrá el ángulo de torque δ.

$$\delta = (Pa/2M).t^2 + Wot + \delta o$$

En donde:

δo = Angulo de torque inicial

El ángulo de torque δn al final del enésimo intervalo Δt, podrá ser calculado mediante la expresión anterior para la que las condiciones iniciales estarán dadas por los valores de potencia de aceleración, ángulo de torque y velocidad de la oscilación correspondientes al final del intervalo (n-1); es decir: -- Pa(n-1), δ(n-1) y W (n-1).

$$\delta n = \frac{Pa(n-1)}{2M} \cdot (\Delta t)^2 + W(n-1).\Delta t + \delta(n-1)$$

El incremento del ángulo δ durante el enésimo intervalo será:

$$\Delta \delta n = \delta n - \delta(n-1)$$

$$= \frac{Pa(n-1)}{2M} \cdot (\Delta t)^2 + W(n-1).\Delta t.$$

Similarmente para el intervalor (n-1), se tendrá que:

$$\delta(n-1) = \frac{Pa(n-2)}{2M} \cdot (\Delta t)^2 + W(n-2).\Delta t + \delta(n-2)$$

De estas ecuaciones se puede eliminar los términos en W obteniéndose la expresión:

$$\Delta\delta n = \Delta\delta(n-1) + \frac{(\Delta t)^2}{2M} \cdot [Pa(n-1) + Pa(n-2)]$$

2.3.- CALCULO DEL MOMENTO DE INERCIA Y DEL MOMENTO ANGULAR.

En las expresiones de la ecuación de balanceo se tenían las constantes M(momento angular) e I (momento de inercia) dependiendo en sí la ecuación viene expresada en términos de potencia o de torque, respectivamente.

La relación entre estas constantes es:

$$M = I.W$$

En donde:

I está expresado en kilogramos masa por metro cuadrado - ($Kg'.m^2$), W en radianes/segundo y M, por tanto en $Kg'.m^2.rad/seg.$

La información generalmente disponible para el cálculo de M o I es el momento de inercia GR^2, en donde G es el peso del motor en kilogramos y R, el radio o constante de giro en me - tros ~~al cuadrado~~. Por tanto GR^2 estará dado en $Kg.m^2$.

La relación entre GR^2 e I será por tanto:

$$I = GR^2/9.81.$$

Puesto que:

$$W = 2\ \Pi\ n/60 \text{ (rad/seg)},$$

En donde:

n = Velocidad de la máquina en R.P.M.

Se puede obtener una nueva expresión para M.

$$M = \frac{GR^2(Kg.m^2)}{9,81(m/seg^2)} \cdot \frac{2\ \Pi.n}{60} \text{ (rad/seg.)}$$

$$= \frac{2\ \Pi}{9,81 \times 60}\ GR^2.n \text{ (Kg.m.rad.seg)}$$

El término $Md^2\delta/dt^2$ representa potencia eléctrica en la e

cuación de balanceo.

Puesto que $d^2\delta/dt^2$ es aceleración angular sus unidades serán: radianes eléctricos/seg^2, se concluye que M deberá estar en $KW.seg^2$/rad eléctricos.

Considerando que:

LKW = 102 Kg.m/seg. y

1rad = p/2 rad eléctricos, en donde p = número de polos.

Se tiene que:

$$m = \frac{2\Pi}{9.81x60} \cdot GR^2.n \frac{1}{102} \cdot \frac{P}{2} \cdot (Kg.m/seg)\ (rad\ elec-$$

$$tric.).seg^2 = \frac{\Pi}{9,81x60x10^2} \cdot GR^2np(KW.rad\ electric.$$

.seg).

El momento de Inercia GR^2 es generalmente una característica de fábrica, sin embargo, una vez instalado el motor, es conveniente verificar su momento de inercia experimentalmente cuando existen las facilidades correspondientes. Los ensayos permiten además obtener la inercia del sistema mecánico completo acoplado al eje de la máquina.

Entre las diferentes pruebas que sirven para determinar el momento de inercia del motor se tiene la denominada "prueba de aceleración" que es la más fácil de llevar a la práctica en el caso de máquinas de gran tamaño, cuando se conocen previamente las pérdidas internas o la eficiencia de la máquina.

El principio sobre el que se base la prueba puede resumirse así:

Si se desconecta súbitamente la alimentación al motor que está girando normalmente, este comienza a decelerarse hasta que finalmente llega al reposo. El tiempo requerido por el motor para alcanzar este reposo es directamente proporcional a la energía cinética de la masa rotante e inversamente proporcional a la fricción y demás pérdidas que disipan esa energía cinética.

Una curva típica de deceleración se muestra en la figura 4.11.

La energía almacenada en un cuerpo rotante es igual a $I.W^2/2$. Cualquier decremento de la energía cinética de las partes rotantes debe ser igual al trabajo necesario para vencer las pérdidas durante el intervalo correspondiente, es decir:

$$P.dt = d(I.W^2/2)$$

En donde:

P = Valor de las pérdidas para la velocidad W.

Derivando se tiene que:

$$P.dt = I.W.dW$$

$$P = I.W.dW/dt = I.W.\alpha$$

En donde α (rad/seg^2) representa la deceleración.

$$I = \frac{P}{W.\alpha} \quad \text{(en unidades C.G.S)}$$

$$GR^2 = 365 \ \frac{P}{n} \ . \ \frac{1}{dn/dt} \quad (Kg.m^2),$$

En donde:

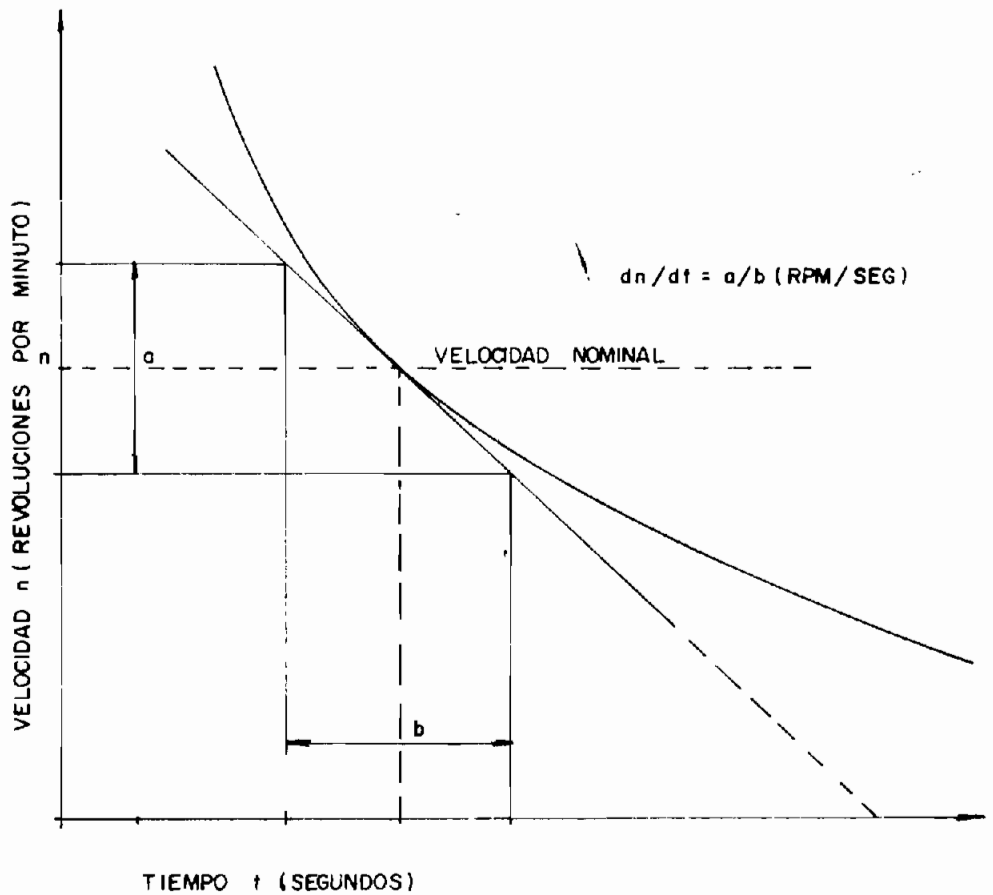
P = Pérdidas nominales en KW.

n = Velocidad de la máquina en R.P.M.

dn/dt = Deceleración en R.P.M/seg

La deceleración puede ser calculada como se indica en la figura 4.11; está representada por el valor de la tangente a la curva de deceleración en el punto correspondiente a la velocidad nominal del motor.

CURVA DE DECELERACION



3.- GRADO DE APROXIMACION EN EL CALCULO.

La utilidad práctica de una solución rigurosamente exacta de un problema de estabilidad no justifica lo complicado del - cálculo que sería necesario para llegar a tales resultados precisos; de ahí que el proceso de este cálculo se desarrolle siempre en base a aproximaciones y suposiciones, si se quiere realmente inexactas pero que no representan en el resultado final - errores de consideración y que, por otra parte, simplifican enormemente el trabajo.

En el cálculo de la estabilidad del motor ante variaciones de la carga se efectuaron ciertas proximaciones (al determinar las constantes K1 y K2 de la ecuación de balanceo) que fueron - ya discutidas anteriormente. Ahora, por tanto, nos concretamos a las aproximaciones hechas en el desarrolla del cálculo de la estabilidad ante fallas eléctricas sobre el circuito de alimentación del motor.

Al resolver la ecuación diferencial con el objeto de establecer la relación entre ángulo de torque y tiempo de despeje, se asumió que:

1.- La potencia de aceleración permanecía constante durante los intervalos considerados, siendo conocida al comienzo de

cada intervalo.

Al determinar esta potencia neta dada por la diferencia entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica desarrollada por el motor, se supuso además que esta potencia mecánica permanecía constante durante la oscilación de la máquina e igual al valor inicial de la potencia de entrada. Es decir que al presentarse una falla mientras la potencia eléctrica decae bruscamente, la potencia de salida permanece inalterable.

Esto estrictamente no es cierto, aún en el caso de que la oscilación se presente muy por debajo de las condiciones críticas (límite de estabilidad correspondiente) es decir no haya posibilidad inminente de que el motor pierda su sincronismo. La razón está en que la velocidad del motor no es constante.

Puesto que:

$P = T.W.$

Siendo el torque de la carga aplicada al eje de la máquina constante, cualquier variación de la velocidad determinará que la potencia varíe también.

Durante el primer semiciclo de la oscilación la velocidad del motor se hace ligeramente menor que la nominal (sincrónica),

mientras que, durante el segundo semiciclo, ocurre lo inverso; es decir que cuando el motor pierde velocidad la potencia de - la carga disminuye ligeramente, en tanto que cuando el motor se acelera más allá de su velocidad sincrónica, la potencia de la carga se incrementa actuando como un freno.

Se concluye entonces que el efecto total de la variación de la potencia de salida durante la oscilación es amortiguar esta oscilación, yendo por tanto en beneficio de la estabili - dad del motor. Por esta razón y además por el hecho de que la fluctuación de la velocidad es mínima, a menos que el motor - pierda definitivamente su paso, no tiene utilidad en la práctica el considerar la variación de la potencia.

2.- Se ha despreciado además el efecto de saliencia de - los polos. Al analizar la potencia electromagnética en el motor de polos salientes y deducir la expresión correspondiente, se observó que dicho efecto venía representado por un término función de $sen2\delta$, negativo en el estado transitorio, y que - se denominaba potencia de reluctancia.

$$P = P1 sen\delta - Sen2\delta$$

En donde:

P1 = Valor máximo de la potencia sincrónica propiamente-

dicha.

P2 = Valor máximo de la potencia de reluctancia.

El carácter nagativo de la potencia de reluctancia además de reducir la potencia total, determina que el valor máximo de ésta se presenta a un ángulo de torque inferior a los - 90°; es decir que el factor de rigidez o estabilidad se anule - a un ángulo $\delta < 90°$.

De esto se deduce que al no considerar el efecto de saliencia en el cálculo de la estabilidad en condiciones transitorias el error que se comete cae sobre el lado de inseguridad; sin embargo, si se considera que la relación P2/P1 es pequeña, el error en realidad es despreciable.

3.- Otro efecto que no ha sido considerado, al calcular la respuesta del motor ante perturbaciones sobre el sistema de alimentación, es el debido al torque de amortiguamiento.

Conforme se analizara anteriormente, este torque se producía por efectos de la inducción, al cortar los arrollamientos de amortiguamiento durante la oscilación el campo magnético que atraviesa el entrehierro.

Puesto que el torque de amortiguamiento se crea absorvien

do energía de las oscilaciones, su efecto es amortiguar las - mismas y por tanto va en beneficio de la estabilidad del motor.

Si como generalmente ocurre en el caso de fallas eléctri- cas, se trata de determinar si el motor conservará o no su sincronismo durante el primer ciclo de la oscilación que prácticamente carece de amortiguamiento, el efecto puede ser despreciado sin mayor error.

4.- La solución del circuito eléctrico para las tres condiciones: antes, durante y después de la falla eléctrica, se - la desarrolla bajo la suposición de que el sistema está en estado permanente durante cada una de las situaciones mencionadas. Es decir no se considera el estado transitorio debido al cambio de condiciones del circuito en el momento de producir - se la falla (transición entre las situaciones 1 y 2) ni tampoco el estado transitorio en el momento del despeje de la falla (transición entre las condiciones 2 y 3).

En términos generales, la duración de este estado de transición q ue decae exponencialmente depende de la constante de tiempo correspondiente, función a su vez de los valores de resistencia y reactancia del circuito.

Por otra parte existe un efecto transitorio debido a la

oscilación misma de la máquina que determina que el ángulo de - fase entre al campo electromagnético del estator y el eje polar del rotor no sea constante, lo cual a su vez determina que la - reactancia interna varíe también.

Sin embargo, dado que el período de las oscilaciones de - la máquina es generalmente mucho más grande que las constantes de tiempo de la red, esta puede considerarse como en estado permanente dentro y durante cada una de las tres situaciones antes señaladas y la tensión interna transitoria del motor puede ser tomada como constante.

4.- COMO MEJORAR LA ESTABILIDAD.-

Mejorar la estabilidad no significa sino incrementar la - potencia máxima o límite de estabilidad.

Pondremos especial interés en establecer las maneras de - mejorar la estabilidad durante condiciones transitorias, tales como las ocasionadas por fallas eléctricas o por variaciones repentinas del torque de la carga, partiendo de la consideración de que el límite de estabilidad es menor para dichas condiciones transitorias que para las condiciones de estado - permanente, como se analizó anteriormente. Esto hace que, -- cualquier caso que de mejorar la estabilidad se trate, se piense primero en cómo incrementar el límite de estabilidad en condiciones transitorias.

Independientemente de las características de la perturbación y de las condiciones iniciales de operación del motor, el límite de estabilidad está fijado por las características de diseño de la máquina y por las características del sistema de suministro de potencia con los respectivos dispositivos, de protección.

Haciendo referencia a las curvas potencia-ángulo de potencia, correspondientes a las tres situaciones antes, durante y -- después de una falla eléctrica (Véase la figura 4.10), es fácil observar que en el transcurso de una oscilación, la igualdad - de las áreas A1 y A2 será alcanzada tanto más rápido cuanto más pequeña sea el área A1 (energía cedida por la inercia del sistema rotante a la carga) y más pronunciado el incremento del área A2.

Para un grupo de condiciones determinadas (carga del motor, características de la falla, etc.) se podría reducir el área A1 disminuyendo el ángulo de despeje δc; es decir disminuyendo - el tiempo de despeje de la falla. También se llegaría a un resultado similar mediante una reducción de la curva potencia-ángulo de potencia, que representa el flujo de potencia antes de presentarse la falla, si es que a la vez fuera posible mantener inalterables las curvas que representan las otras dos situaciones posteriores.

Un incremento proporcional de las tres curvas es posible - (por ejemplo mediante la reducción de la reactancia de transferencia) y beneficia a la estabilidad porque a pesar de establecer incrementos tanto en A1 como en A2, el incremento del área A2 es más pronunciado. El resultado será aún más efectivo si - únicamente las curvas que representan las condiciones durante y después de la falla son las que se hacen más grandes.

Similares consideraciones pueden hacerse para el caso de - perturbaciones provenientes desde el lado de la carga (Véase - la figura 4.6.).

4.1.- INCREMENTO DE LA ENERGIA DEL SISTEMA ROTANTE.-

Al analizar la ecuación de balanceo y su solución se puede observar la interpedancia que existe entre los elementos tiempo de despeje, ángulo de despeje, inercia del sistema mecánico - rotante, etc.

Si recordamos la expresión obtenida anteriormente en el párrafo 2.2.:

$$\delta = \frac{Pa}{2M} .t^2 + Wot + \delta o$$

En donde:

Pa = Potencia de aceleración

M = Momento angular

Wo = Velocidad inicial de la oscilación.

δo = Angulo de potencia inicial.

Si suponemos que el sistema inicialmente estuvo en reposo (Wo = O), entonces se puede decir que:

$$\delta = K. \frac{t^2}{M} + \delta o$$

Expresión que para el momento del despeje de la falla - se transforma en:

$$\delta c = K. \frac{t^2 c}{M} + \delta o$$

En donde K es una constante de proporcionalidad.

Analizando esta última expresión se puede observar que:

1.- Para un tiempo de despeje dado (digamos fijado por los dispositivos de protección) puede reducirse el ángulo de despeje correspondiente mediante un incremento de la constante de inercia M. La relación es aproximadamente lineal, es decir si por ejemplo se duplica la inercia, el ángulo de despeje quedará reducido a la mitad.

Se mencionó más arriba cómo una reducción del ángulo de - despeje influía en beneficio de la estabilidad del motor.

2.- Para un mismo ángulo de despeje y demás condiciones - también fijas, un incremento de la inercia establece que el tiempo disponible para despejar la falla se incremente también. Este incremento es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada del incremento de la inercia efectiva. Es decir que si por - ejemplo, la inercia se duplica el tiempo máximo disponible para el despeje de la falla se hará $\sqrt{2}$ = 1,41 veces más grande.

La inercia mecánica puede ser incrementada mediante el uso- de ruedas volantes.

4.2.- PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO.

El sentido de la puesta a tierra del neutro con miras a mejorar la estabilidad se deriva del hecho de que una conexión a tierra representa, en ciertos tipos de falla, un incremento de la impedancia de la falla, limitando por tanto la rigurosidad de la misma.

Si la conexión a tierra no es sólida, es decir está hecha a través de una impedancia de valor Z, el circuito de secuencia cero (en el caso de fallas de una o dos líneas a tierra) resul

ta modificado por una impedancia en serie de valor 32 -En caso de cortocircuitos trifásicos el efecto de la conexión del neutro a tierra a través de una impedancia es sin embargo nulo, como puede verse con la ayuda de las componentes simétricas.

En esta forma, cuando el tiempo de despeje de las fallas determinado por los equipos de protección del motor es - demasiado grande, puede resultar más económico tratar de disminuir la rigurosidad de las fallas mediante conexiones ade - cuadas del neutro del circuito a tierra, antes que readecuar las protecciones.

Una impedancia de puesta a tierra puede ser resistiva o reactiva pura. La conexión de resistencia consumirá potencia activa cuando se presente la falla a tierra incrementando el torque de frenaje de la máquina; el efecto será tanto más grande cuanto más cerca de la máquina se encuentre la conexión. Por tanto esta clase de conexión no debe ser utilizada cerca del motor puesto que su efecto resultaría más bien perjudicial para efectos de estabilidad.

La puesta a tierra a través de una impedancia reactiva pura limita la corriente a tierra de la falla, reduciendo por tanto la caída de la potencia de sincronización. Este hecho en lo que se refiere a la estabilidad de operación del motor representa una gran ventaja en el caso de fallas a tierra.

Conviene anotar que el efecto de estas dos puestas a tierra en las proximidades de un generador es completamente opuesto a lo que se acaba de ver con respecto al caso del motor sincrónico. Así, una impedancia resistiva, al incrementar el torque de frenaje debido a la absorción de potencia activa de la línea, incrementa la estabilidad del generador que por efectos de la falla tiende a acelerarse excesivamente; por otra parte una conexión reactiva a tierra cerca del generador tiende a acelerar más a la máquina incrementando el efecto de la perturbación.

De esto se puede entonces deducir, como principio práctico, que en el punto de recepción de potencia es conveniente efectuar una puesta a tierra a través de una impedancia resistiva en tanto que cerca del motor la conexión apropiada es a través de un reactor.

El uso de modernos equipos de protección contra fallas, de operación cada vez más rápida, hace sin embargo día a día menos importantes las puestas a tierra con propósitos de obtener mejoras en la estabilidad.

4.3.- REDUCCION DE LA REACTANCIA DE TRANSFERENCIA.

El reducir la reactancia equivalente o de transferencia del circuito eléctrico permite incrementar el flujo de potencia

de sincronización, por ser este flujo inversamente proporcional a dicha reactancia, como puede observarse en la expresión correspondiente.

Analizando las curvas potencia-ángulo de potencia para las condiciones antes, durante y después de la falla (Véase la figura 4.10) se puede observar que el límite de estabilidad se incrementa notablemente ante un aumento proporcional de la amplitud de estas tres curvas, considerando que las demás condiciones (tipo de falla, tiempo de despeje, carga del motor, etc) permanecen inalterables.

El efecto es similar si se trata de perturbaciones provenientes del lado de la carga (sean de carácter transitorio o no), pues es evidente que al incrementarse la potencia de sincronización se incrementa también el límite de estabilidad.

La reactancia total de transferencia se compone de la reactancia interna del motor y de la reactancia del circuito exterior de alimentación, siendo generalmente la primera de estas la más grande..

Tratándose de motores de gran tamaño las reactancias transitorias internas poseen valores característicos que guardan relación con la capacidad de la máquina y que prácticamente no -

en diseños normales, en tal forma la única manera de conseguir menores valores de reactancia sería mediante la selección de un motor sobredimencionado, lo cual de ninguna manera representa un método económico para obtener mejoras en la estabilidad.

En esta forma resulta mucho más práctico el preocuparse más bien de la reactancia del circuito exterior.

Al respecto existen muchas maneras de reducir la reactancia en serie de un circuito como incrementando la sección de los conductores, conectando circuitos paralelos, intercalando condensadores en serie, etc. La selección del método más conveniente dependerá principalmente de consideraciones económicas.

4.4.- REGULADORES AUTOMATICOS DE TENSION.

Se mencionó anteriormente cómo la concatenación de flujo de los arrollamientos del circuito de excitación, ante una falla en el circuito de alimentación, no permanece en realidad constante como supone el principio de conservación de dicha concatenación. Una vez ocurrida la falla en la armadura se produce una reacción desmagnetizante por efecto de las corrientes de secuencia negativa que circulan por los arrollamientos de la misma; la corriente de la excitación se incrementa, entonces, sú

bitamente a un valor tal, capaz de contrarrestar este efecto desmagnetizante, haciéndose en esta forma efectivo el principio de conservación de la concatenación del flujo. Sin embargo, a menos que el voltaje del campo sea oportunamente incrementado, la corriente de excitación decae seguidamente en forma exponencial a su valor inicial (igual al voltaje de campo dividido por la resistencia total del circuito de campo); con la corriente, decae también el flujo de excitación (en forma exponencial) y consecuentemente la tensión interna de la máquina detrás de la reactancia transitoria.

El efecto de esta caída de la tensión interna del motor, en lo que se refiere a su estabilidad durante la perturbación, se manifiesta en una reducción de la potencia sincronizante correspondiente a las condiciones de operación durante y después de la falla, según se puede deducir de la expresión de la potencia:

$$P = \frac{V \cdot E'}{X} \cdot \operatorname{Sen}\delta$$

En consecuencia, el límite real de estabilidad resulta ser menor que el obtenido al despreciar esa caída del flujo.

La Constante de tiempo correspondiente es ventajosamente alta

(2 a 5 segundos) en tal forma que la variación de la tensión es pequeña cuando la falla es despejada rápidamente y el efecto es despreciable en estas circunstancias.

Sin embargo, si la falla es sostenida por un tiempo considerablemente largo, la tensión del motor puede reducirse demasiado en tal forma que el motor, a pesar de haber permanecido estable durante la primera o las primeras oscilaciones, puede a la postre perder su sincronismo en alguna de las oscilaciones siguientes.

En circunstancias, como la que se acaba de señalar, puede mejorarse la estabilidad de funcionamiento del motor dotándole de un regulador automático de tensión capaz de sentir la caída del flujo y actuar sobre el reóstato regulable del campo en tal forma de que la tensión del motor permanezca constante.

La importancia de la regulación automática de tensión ha disminuído modernamente, como consecuencia de los progresos obtenidos en el diseño de relés y disyuntores de alta velocidad, que limitan apreciablemente la duración de las corrientes de falla y por tanto su efecto desmagnetizante sobre la armadura del motor.

No obstante, si consideramos el hecho de que en muchas oca-

siones la selección de un motor sincrónico para mover determinada carga, en vez de otro tipo de motor eléctrico, viene determinada por la necesidad de mejorar el factor de potencia del sistema, dotar tal motor de un regulador automático de tensión de características adecuadas, además de mejorar la estabilidad del mismo, contribuirá a obtener un mejor rendimiento del sistema eléctrico proveyéndolo de voltamperios reactivos controlados.

Para aquellos casos en que el motor sincrónico esté destinado a impulsar cargas variadas (como en ciertas fábricas), llega a ser casi indispensable el uso de la corriente y la tensión del sistema eléctrico que alimenta al motor.

5.- INFLUENCIA DE LA INESTABILIDAD DEL MOTOR SOBRE EL SISTEMA DE UTILIZACION GENERAL.

5.1.- CARACTERISTICAS DE LA OPERACION ASINCRONICA DEL MOTOR.-

Las características de la operación asincrónica o "fuera de paso" del motor sincrónico son en cierto modo análogas a las características de funcionamiento del motor de inducción. Esta operación asincrónica se presenta como respuesta del motor a una perturbación mediante la variación de su ángulo de torque sea durante las oscilaciones del rotor (al acomodarse a su nueva posi-

ción de equilibrio) o cuando la máquina pierde definitivamente la estabilidad y el ángulo de torque se incrementa entonces indefinidamente.

a.- Refiriéndose concretamente a las condiciones de pérdida de la estabilidad, analicemos esta operación considerando primeramente que la excitación es removida oportunamente.

El torque mecánico que el motor desarrolla en estas circunstancias se debe a la inducción producida en los arrollamientos del rotor que cortan el flujo del campo sincrónico del estator a una velocidad igual a la del deslizamiento, de acuerdo a la teoría del motor de inducción. A esta velocidad se le había denominado velocidad relativa de la máquina; viene dada por la diferencia entre la velocidad de sincronismo y la velocidad real del rotor.

De acuerdo a las características del funcionamiento normal del motor de inducción, se tiene que el deslizamiento del rotor depende del valor del torque de la carga. Sin embargo, éste no es exactamente el caso del motor sincrónico durante la pérdida de su estabilidad, ya que el deslizamiento bajo tales circunstancias es independiente del torque de la carga, viniendo más bien impuesto por la potencia neta acelerante o decele -

rante de la máquina, conforme se analizara anteriormente.

En el motor de inducción la relación entre deslizamiento y torque es directamente proporcional, dentro del rango de operación normal de la máquina que va desde el valor cero hasta algo más allá de la plena carga; pasado determinado valor denominado torque crítico, el torque que desarrolla la máquina comienza a decrecer conforme el deslizamiento se incrementa, hasta -- que para un deslizamiento 1 P.U. el motor se para definitivamente cuando el torque desarrollado se hace cero.

No obstante, con el objeto de analizar la operación fuera de paso del motor, se puede hacer una consideración inversa en la siguiente forma. El torque de la carga, una vez que el motor se ha salido del sincronismo, permanece relativamente constante, en tanto que el deslizamiento se incrementa progresivamente. Esta variación del ángulo de torque determina que el - torque desarrollado por el motor sea cada vez menor; sin embargo, la máquina dentro de esta situación tiende a mantener su equilibrio en calidad de motor de inducción, incrementando para ello el torque producido a base de una mayor corriente absorbida de la red de alimentación.

Por otra parte, de acuerdo a las mismas características del

motor de inducción, un incremento exagerado del deslizamiento - (más allá del valor correspondiente al torque crîtico) trae como consecuencia la caída del factor de potencia inductivo del - motor.

La influencia de la pérdida de estabilidad del motor sobre el sistema del cual absorbe potencia, se podría por tanto resumir así: gran absorción de corriente a un bajo factor de po - tencia inductivo. En general esta influencia depende de la relación entre la capacidad del motor y la capacidad total del sistema que lo alimenta. Habrá ocasiones en que el sistema no podrá tolerar la absorción de corriente cada vez más grande del motor - durante su pérdida de sincronismo, siendo necesaria la desconexión del mismo.

b.- Hasta el momento no se ha tomado en cuenta el efecto de - la corriente de campo durante la operación asincrónica del motor, partiendo de la consideración de que durante este trance la excitación ha sido removida.

Si la corriente de excitación se mantiene sobre el motor, el flujo magnético rotativo de este campo es cortado por los conductores de los arrollamientos del estator a la velocidad de deslizamiento. Se inducen por tanto en ellos corrientes alternas cuya magnitud depende del valor de la excitación y del deslizamien

to. Estas corrientes llegan a veces a ser tan grandes, capaces de destruír tales arrollamientos por efectos del sobrecalenta - miento.

Este es el efecto principal de la corriente de excitación durante el funcionamiento asincrónico del motor, perjudicial a - la máquina misma, que hace imprescindible el equipamiento de dis positivos de protección capaces de cortar la excitación una vez que el motor ha perdido el paso y el ángulo de torque se ha incrementado más allá de su valor crîtico.

5.2.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Un sistema eléctrico puede ser diseñado y operado con bastante éxito sin un conocimiento consciente de los aspectos refe rentes a estabilidad.

Esto frecuentemente hace pensar que no es necesario el estudio de este problema, si se consideran además los grandes pro gresos obtenidos en la técnica de diseño y construcción de todo equipo eléctrico o instalación en general; progresos que hacen - que las perturbaciones sobre los sistemas sean cada vez menos - frecuentes y perjudiciales.

Sin embargo, tal desconocimiento del problema puede signi-

ficar que la eficiencia del sistema no esté siendo aprovechada en su totalidad; es decir que la inclusión de los factores referentes a estabilidad podría haber determinado una reducción de los costos de operación y de la inversión del sistema por unidad de carga.

Estas consideraciones por una parte y por otra el efecto perjudicial de las oscilaciones de la máquina o de su pérdida del sincronismo sobre la red de suministro, sobre la carga (procesos que requieren de continuidad de servicio o velocidad cons tante, por ejemplo) y sobre la máquina misma ponen de manifiesto la importancia del estudio del problema en el caso concreto de la operación del motor sincrónico como parte de un sistema de potencia.

El problema puede referirse sea al diseño de una instalación nueva o al mejoramiento de las condiciones de una instalación existente. En el primer caso será necesario, en definitiva, acoplar las características del motor a las características de la red de suministro y a las de la carga; en el segundo, se tratará de incrementar el límite de estabilidad según el método más adecuado.

En uno y otro caso pueden diferenciarse los siguientes aspectos:

a) Se admite la posibilidad de pérdida del paso del motor. La máquina deberá ser equipada con dispositivos (relés "fuera - de paso") capaces de retirar la excitación del campo y en algunos casos, desconectar a la máquina del sistema rápidamente - ante una eventual salida del sincronismo, por las razones discutidas anteriormente.

Puesto que la resincronización se opera en forma similar al arranque de la máquina, los motores diseñados e instalados para arrancar a vacío no podrán ser resincronizados bajo carga; en estas circunstancias la carga debe también ser retirada antes de que el motor pueda ser llevado nuevamente a su paso. Tales motores requieren entonces de dispositivos automáticos capaces de retirar tanto la excitación del campo como la carga, pudiendo ser resincronizados antes de que la pérdida de velocidad sea considerable; puesto que, al ser desconectada la carga, la caída de velocidad de la máquina es más lenta.

Sin embargo, las características de determinados procesos industriales no permiten la retirada inmediata de la carga; en estas circunstancias, a fin de evitar una caída considerable de la velocidad o la desconexión completa del motor, será necesario ya sea disponer de un motor capaz de resincronizarse bajo condiciones de plena carga o diseñar el sistema en tal forma que una pérdida de la estabilidad resulte improbable.

La resincronización de aquellos motores que pueden ser a - rrancados y resincronizados a plena carga, se efectúa entonces mediante una oportuna retirada de la excitación del campo y de la carga al ocurrir la pérdida del sincronismo, sin necesidad de desconectar la máq uina de la red de suministro y la subsi -- guiente reconexión de la excitación inmediatamente después de que la perturbación haya pasado.

b.- En ocasiones las características, sea de la red o de la carga, harán indispensable el diseño de una instalación del motor para la cual se prevea que la salida de sincronismo de la - máquina no ocurra nunca o al menos sea poco probable.

En estos casos el problema se concreta a mantener el ángulo de torque máximo, correspondiente al ciclo más grande de la oscilación del rotor, lo suficientemente por debajo del valor crítico correspondiente a la pérdida del paso de la máquina. Sobre este punto no existe ninguna norma establecida y cualquier factor de seguridad depende enteramente del criterio del ingeniero.

c.- Bajo la condición de que las oscilaciones del motor se presenten por debajo del correspondiente límite de estabilidad; es decir descontando una eventual pérdida del paso, el problema se concreta a mantener la amplitud de tales oscilaciones que se reflejan sobre la corriente que la máquina toma de la red, por

debajo del valor que se considere intolerable para el sistema - de utilización general.

Al respecto el Código NEMA establece que "la inercia y - demás características de la instalación completa deberán limi - tar las variaciones de la corriente de la armadura del motor a un valor que no exceda del 66% del valor de plena carga".

En sistemas instalados, tales variaciones pueden ser determinadas y medidas mediante oscilogramas; sin embargo los métodos de cálculo analítico presentados aquí, que por otra parte son necesarios al tratarse de instalaciones por montarse, pueden proporcionar iguales resultados.

BIBLIOGRAFIA

1.- ALTERNATING CURRENT MACHINES
Puchstein, Conrad y Lloyd
John Willey and sons, Inc.
Nex York, 1960.

2.- POWER SYSTEM STABILITY
(Volumen 1) ELEMENTS OF STABILITY CALCULATIONS
Edwar Wilson Kimbark, Sc.D
John Willey and Sons, Inc.
New York, 1967

3.- POWER SYSTEM STABILITY
(Volúmen 2) SYNCHRONOUS MACHINES
Edward Wilson Kimbark Sc.D
John Willey and Sons, Inc.
New York, 1967

4.- ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION
POWER SYSTEM STABILITY: Basic Elements of Theory and
Aplication. R.D. Evans, H.N. Ruller Jr.
Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh
Pensylvania, 1964

5.- ELECTRICAL MACHINERY
The Dynamics and Statics of Electromechanical energy Conversion.
A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr.
Mc Graw-Hill Book Company, Inc.
Kogakusha Company, Ltd; Tokio, 1961

6.- POWER SYSTEM STABILITY
(Volumen 1) Steady State Stability
S.B. Crary
John Willey and Sons, Inc.
New York, 1945

7.- POWER SYSTEM STABILITY
(Volumen 2) Transient State Stability
S.B. Crary
John Willey and Sons
New York, 1945

8.- INTRODUCTORY CIRCUIT THEORY
E.A. Guillemin
John Willey and Sons, Inc.
New York, London, 1960

9.- SYNCHRONIZING POWER IN SYNCHRONOVS MACHINES UNDER STEADY

AND TRANSIENT CONDITIONS.
H.V. Putman
Publicaciones de la A.I.E.E.
1927

10.- PULL IN CHARACTERISTICS OF SYMCHRONOUS MOTORS
D.R. Shoults, A.H.Lander, S.B. Crary
Publicaciones de la A.I.E.E.
1935.

11.- SYNCHRONOUS MOTORS WITH CONTROLLED EXCITATION FOR SUDDENLY APPLIED LOADS.
W.K. Boice, B.H. Caldwell, M.N. Halberg.
Publicaciones de la A.I.E.E (Volumen 62)
1943

12.- MAQUINAS ELECTRICAS DE CORRIENTE ALTERNA
Apuntes de clases, Cuarto Curso
Profesor: Ing. Jaime Velásquez
Escuela Politécnica Nacional
Quito, 1965-1966

13.- LABORATORIO DE MAQUINAS ELECTRICAS
Apuntes de clase, Cuarto Curso.
Profesor: Ing. Jaime Velásquez
Escuela Politécnica Nacional
Quito 1.965-1966.