

RESUMEN

En este trabajo se examinan los factores que limitan la capacidad de un generador sincrónico, cuando este trabaja desde una central eléctrica entregando potencia a una carga, a fin de estructurar un diagrama que permita visualizar tales limitaciones.

Los factores limitantes que conforman este diagrama son específicamente: las capacidades térmicas del aislamiento de los devanados, la potencia mecánica efectiva que la máquina impulsora puede proporcionar al generador, las condiciones de estabilidad en estado estable del sistema, así como requerimientos por mínima excitación; estos factores y sus características han sido revisados en este estudio, a fin de lograr un diagrama completo que sirva de guía al operar un generador en condiciones satisfactorias para la máquina y el sistema.

INTRODUCCION

El objeto del presente trabajo tiende a la consecución de una guía en los diagramas, para optimizar en alguna forma el trabajo que ejecuta manualmente el personal que opera una central de generación eléctrica, bajo las diferentes características con que puede presentarse la carga en el sistema.

Con tal fin el diagrama está dimensionado por potencias activa y reactiva en sus ejes condensationados y proporciona además de la configuración límite del generador, los lugares geométricos para distintos valores de sus variables tales como: corriente de excitación, corriente de carga y factor de potencia, que permitan fijar el punto en que opera el generador.

Los principios básicos de estos diagramas fueron enunciados por J. H. Walker¹ en 1953 y complementados luego por R. M. Gove² en 1965 en la construcción del límite de estabilidad. La deducción teórica y la construcción geométrica de los distintos límites se la realiza a partir de los diagramas fasoriales de tensiones del generador de polos salientes.

El trabajo se complementa con la ejecución de los diagramas en el computador mediante un programa digital implementario para el efecto.

1. CONSTRUCCION DE LOS DJAGRAMAS DE POTENCIA

1.1. DESCRIPCION DEL SISTEMA EN ESTUDIO

Para el estudio se considera a un generador sincrónico de polos salientes entregando potencia a un sistema representado por una barra infinita a través de una reactancia externa X_e , el voltaje terminal es mantenido constante por medio de un regulador activado por señales de voltaje, que actúa sobre la excitatriz, como se representa en la Fig. 1.

Adicionalmente para el estudio se hacen las siguientes consideraciones:

- Se asume una máquina sincrónica ideal sin pérdidas ni saturación.

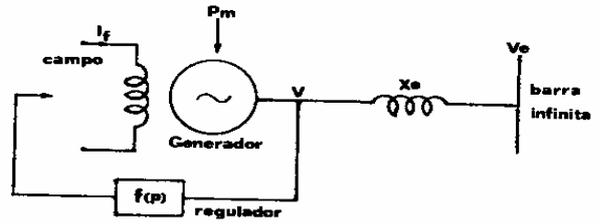


Fig. 1

- El análisis está restringido a condiciones de estado estable.
- La potencia de la máquina impulsora es constante y sin cambios de velocidad.
- La resistencia de los devanados y de las líneas es despreciada.
- Para el análisis de estabilidad no se toma en cuenta la influencia del regulador de voltaje en el sistema de excitación, ni a los devanados de damping.

1.2. DJAGRAMAS FASORIALES

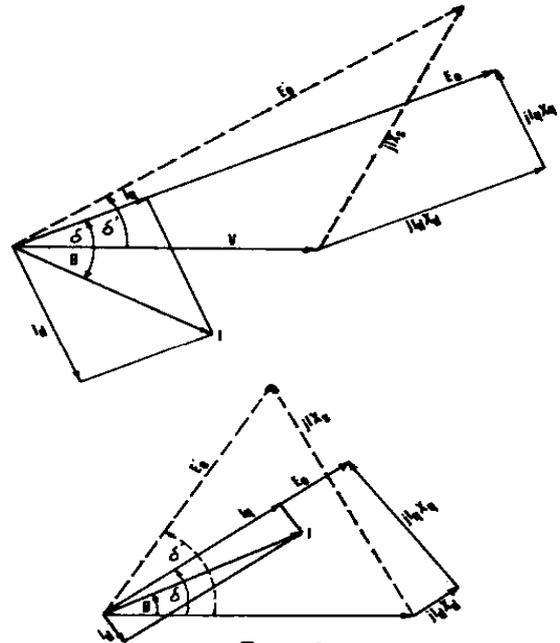


Fig. 2

Diagramas fasoriales de tensiones del generador sincrónico, con f.p. en atraso y adelanto.

En la Fig. 2 se muestran los diagramas fasoriales de tensiones de un alternador de polos salientes para factores de potencia en atraso y en adelanto respectivamente; con línea cortada superpuestos se encuentran los diagramas correspondientes a la teoría de rotor cilíndrico, de esta composición de diagramas se puede visualizar los

Los errores al aplicar la teoría de rotor cilíndrico a un generador de polos salientes, notándose que: la magnitud del voltaje interno inducido E_0 , no tiene diferencia significativa para ambas teorías, no así el ángulo de carga δ , que a medida que se avanza hacia factores de potencia en adelanto, la diferencia es más pronunciada.

1.2.1. REPRESENTACIÓN ADECUADA DE LOS DIAGRAMAS FASORIALES PARA LA DEDUCCIÓN DE LAS CURVAS LÍMITES

Con el fin de presentar los diagramas con la simplicidad de la teoría de rotor cilíndrico evitando la introducción de los errores mencionados se ha estructurado el diagrama de la Fig. 3, mediante un arreglo geométrico del diagrama fasorial asociando ambas teorías.

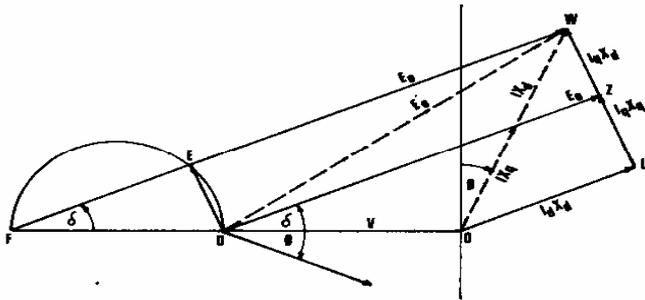


Fig. 3

En el anterior diagrama puede apreciarse que UZ se ha prolongado a UW y FW es paralela a NZ , de manera que $NZ = EW = E_0$; el ángulo de carga δ permanece invariable; el segmento $ED = WZ = -I_q(X_d - X_q)$; puede ser interpretado como la contribución del efecto de polos salientes al voltaje interno.

Dispuesto el diagrama de esta manera, sus fasores componentes pueden ser expresados en función de corrientes, dividiéndolos por X_d y en función de potencias mediante la multiplicación por V/X_d puesto que V es constante para este estudio.

En el diagrama puede observarse que para rotor cilíndrico $X_d = X_q$, el semicírculo desaparece y lo que queda representa el diagrama para su propia teoría.

1.3. CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS LÍMITES

Los factores limitantes que se toman en cuenta en este trabajo son los siguientes:

- Estabilidad en el sistema
- Elevación de temperatura en el devanado de campo.
- Elevación de temperatura en el devanado estatórico.
- Potencia mecánica que se dispone en la máquina impulsora.
- Corriente mínima de excitación.

La deducción de las ecuaciones que rigen las curvas se ha realizado refiriéndolas todas a un mismo punto de origen.

1.3.1. LÍMITE POR ESTABILIDAD EN EL SISTEMA

Una descripción de lo que significa este límite puede ser mejor entendida mediante la siguiente definición:

"El límite de estabilidad en estado estable de un circuito particular de un sistema de potencia, se puede definir como la máxima potencia en un punto de recepción del circuito que puede ser transmitida sin pérdida de sincronismo, si la carga se incrementa en pasos muy pequeños y si la corriente de campo es cambiada después de cada incremento de carga tal que se restablezcan las condiciones normales de operación, manteniendo el voltaje terminal constante."

Si bien en la descripción del sistema consta un regulador de voltaje actuando sobre la excitación la influencia de éste no se la toma en cuenta en la construcción del límite, en todo caso el límite así obtenido constituye un límite conservador frente a la inclusión de un equipo de regulación de voltaje, teniendo en cuenta los beneficios que presta frente a la estabilidad la utilización de tal equipo.

Para el generador de nuestro sistema el diagrama fasorial modificado del numeral 1.2.1., es el de la Fig. 4, expresado en función de potencias y dimensiones sus ejes vertical y horizontal en potencias activa y reactiva respectivamente.

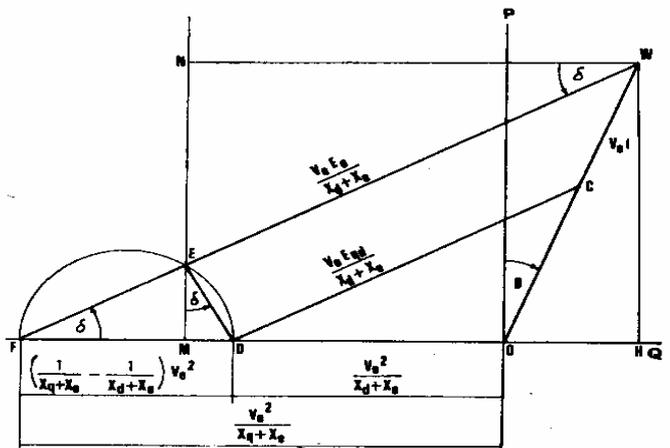


Fig. 4

El punto de trabajo del generador es W, su proyección sobre el eje vertical representa la potencia activa suministrada por el generador y dada por:

$$P = NE + EN$$

$$P = \frac{V_e E_0}{X_d + X_e} \sin \delta + \frac{V_e^2}{2} \left(\frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) \sin 2\delta \quad (1)$$

Que es la ecuación de la potencia activa de un generador de polos salientes, por lo tanto la máxima potencia que puede ser transmitida por el generador está dada por:

$$\frac{dP}{d\delta} = 0$$

$$\frac{V_e E_0}{X_d + X_e} \cos \delta + \frac{V_e^2}{2} \left(\frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) \cos 2\delta = 0 \quad (2)$$

△ OFW y ODC semejantes, entonces: $\frac{FW}{FO} = \frac{DC}{DO}$

$$\frac{V_e E_o}{X_d + X_e} + V_e^2 \left(\frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) \cos \delta = \frac{V_e E_{q1}}{X_d + X_e} = \frac{V_e^2}{X_d + X_e}$$

$$\frac{V_e E_o}{X_d + X_e} = \frac{V_e E_{q1}}{X_q + X_e} - V_e^2 \left(\frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) \cos \delta$$

Multiplicando la expresión anterior por $\cos \delta$:

$$\frac{V_e E_o \cos \delta}{X_d + X_e} = \frac{V_e E_{q1} \cos \delta}{X_q + X_e} - V_e^2 \left(\frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) \cos^2 \delta \quad (3)$$

Reemplazando (3) en (2):

$$\frac{V_e E_{q1} \cos \delta}{X_q + X_e} + V_e^2 \left(\frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) (\cos^2 \delta - \cos^2 \delta) = 0$$

Resolviendo $\cos^2 \delta$:

$$\frac{V_e E_{q1} \cos \delta}{X_q + X_e} - V_e^2 \left(\frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) \sin^2 \delta = 0 \quad (4)$$

Desde la semejanza de triángulos anterior:

$$\frac{FW}{V_e E_{q1}} = \frac{V_e^2}{X_q + X_e} \quad FH = \frac{V_e E_{q1} \cos \delta}{X_q + X_e} \quad (5)$$

$$\text{Además: } MD = V_e^2 \left(\frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) \sin^2 \delta \quad (6)$$

$$(5) \text{ y } (6) \text{ en } (4): \quad \frac{dP}{d\delta} = FH - MD = 0$$

Desde la Fig. 5, que representa el diagrama fasorial para factor de potencia en adelanto donde el punto de trabajo W se encuentra en una zona subexcitada se advierte que:

$$MD = FR \text{ y } \frac{dP}{d\delta} = FH - FR = RH = 0$$

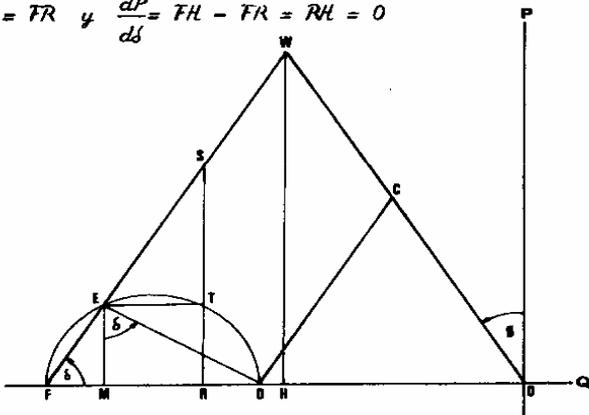


Fig. 5

Interpretando este resultado tendríamos que el punto crítico de operación estable ocurre cuando RH se hace cero, es decir cuando la carga y excitación varían dando lugar a que el punto de trabajo W coincida con S; por lo tanto el punto S constituye el límite de estabilidad, su construcción completa se muestra en la Fig. 6.

El anterior representa al límite teórico que en vista de las imprecisiones de los parámetros uti-

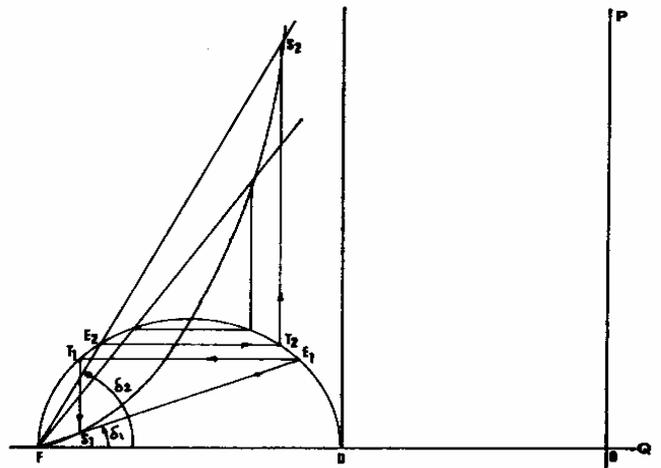


Fig. 6

lizados y las eventualidades que pueden presentarse en el sistema, debe ser sustituido por un límite práctico que contemple tales situaciones mediante la introducción de un factor de seguridad de la manera indicada en la Fig. 7, el factor de seguridad h , es el 10% de la potencia nominal.

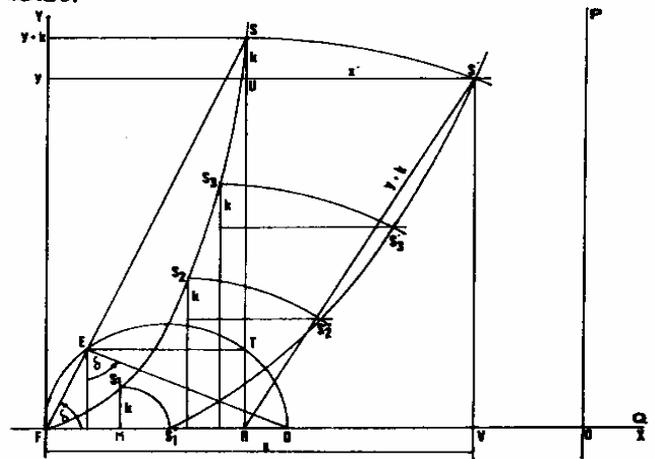


Fig. 7

La ecuación que rige esta curva se deduce a continuación:

$$\text{Desde Fig. 4: } r = \frac{V_e^2}{2} \left(\frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right)$$

$$\text{En la Fig. 7: } x = FR + x' \quad (1)$$

$$FR = MD = 2r \sin^2 \delta; \quad x' = \sqrt{(y + k)^2 - y^2} = \sqrt{k^2 + 2ky}$$

$$\triangle FSR: \quad \sin \delta = \frac{y + k}{\sqrt{(x - x')^2 + (y + k)^2}} \quad (2)$$

$$x = 2r \sin^2 \delta + \sqrt{k^2 + 2ky}$$

$$x = \frac{2r(y + k)^2}{(x - x')^2 + (y + k)^2} + \sqrt{k^2 + 2ky} \quad (3)$$

La expresión (3) es la que define el límite de estabilidad práctico aplicable a generadores con rotor de polos salientes y de rotor cilíndrico.

1.3.2. LÍMITE TEMPERA DEL CAMPO

Los límites permisibles de temperatura de los devanados de una máquina están dados por la máxima temperatura en condiciones de servicio continuo-

que puede resistir el aislamiento con que ha sido construida, por lo tanto teniendo en cuenta que las máquinas están diseñadas para funcionamiento confiable en su capacidad nominal, el límite que se establece por condiciones térmicas del campo es la corriente de excitación necesaria para sustentar condiciones nominales de operación del generador, cuando su enfriamiento es del tipo convencional, mientras que con enfriamiento de hidrógeno el límite constituyen las corrientes permitidas a las distintas presiones de hidrógeno.

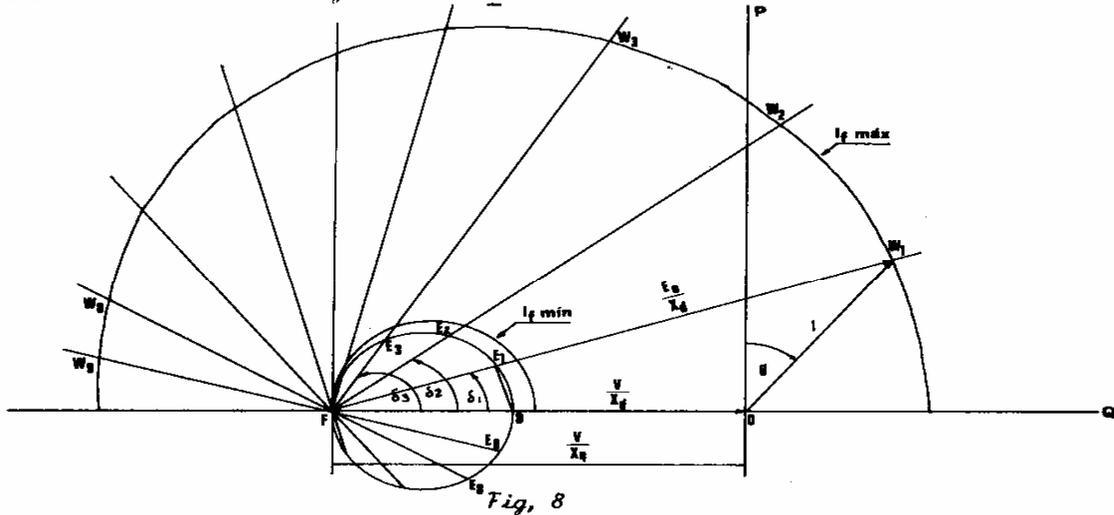
Su construcción se muestra en la Fig. 8, a partir del diagrama fasorial planteado anteriormente. Cada punto del límite obedece a las siguientes ecuaciones

paramétricas en función del ángulo

$$x = V \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) \cos^2 \delta + \frac{E_o}{X_d} \cos \delta$$

$$y = \frac{V}{2} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) \sin^2 \delta + \frac{E_o}{X_d} \sin \delta$$

Puesto que el voltaje interno es directamente proporcional a la corriente de campo E_o , entonces E_o nominal constituye el valor límite en las ecuaciones anteriores, estas son aplicables a rotor cilíndrico ya que en tal caso $X_d = X_q$, desapareciendo los primeros términos de las expresiones anteriores.



1.3.3. LÍMITE TÉRMICO DE LA ARMADURA

Bajo consideraciones similares a las hechas en el apartado anterior, el límite de la armadura se establece para la corriente de carga nominal que fluye por sus devanados. Su construcción se muestra en la Fig. 9, y corresponde a una circunferencia de radio I_m , y obedece a la siguiente ecuación:

$$y = +\sqrt{I_m^2 - (x - V/X_q)^2}$$

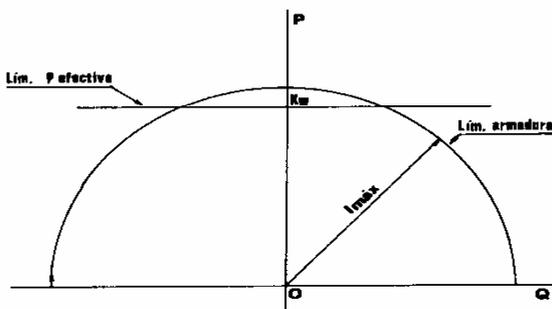


Fig. 9

1.3.4. LÍMITE POR CORRIENTE MÍNIMA DE EXCITACION

Este límite se establece a fin de evitar pérdidas de sincronismo por insuficiente excitación, por esta razón inclusive las excitatrices son diseñadas para no reducir la corriente de excitación de ciertos valores, este límite puede constituirse para un 5 o 10% de la corriente nominal de operación, su representación se muestra en la Fig. 8, y obedece también a las ecuaciones paramétricas dadas en 1.3.2.

1.3.5. LÍMITE POR POTENCIA EFECTIVA

Este límite está dado por la potencia mecánica efectiva que puede entregar la máquina impulsora del generador y expresada por la potencia eléctrica activa que puede obtenerse del mismo. Este límite se presenta en la Fig. 9, y obedece a la ecuación:

$$y = kw$$

1.4. CONSTRUCCION PRACTICA DEL DIAGRAMA P-Q

Los anteriores límites se han superpuesto en solo diagrama a fin de obtener una configuración cerrada donde la operación de un generador es confiable; adicionalmente se incorporan al diagrama los lugares geométricos para distintos valores de corrientes de campo y carga como de factor de potencia, que permitan en un instante cualquiera fijar el punto de trabajo del generador en el diagrama mediante los valores que arrojan los instrumentos de: KW, KVAR, $\cos \phi$, I de carga, I de excitación, para fijando este punto dirigir la operación cuando varía la carga.

En la Fig. 10, se puede observar un ejemplo del diagrama completo ejecutado por el computador.

1.5. EJECUCION DE LOS DIAGRAMAS EN EL COMPUTADOR

La ejecución de los diagramas en el computador se realiza mediante un programa digital para el sistema TETRANIX 4051, en el lenguaje BASIC en 536 instrucciones bajo el nombre de TESJS/CTOBAR, almacenado en un DISQUETTE en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la U.P.N.

Se escogió este sistema en razón de que los trazos se obtienen en línea llena en diferentes colores simultáneamente y se puede hacer uso de papel milimetrado corriente.

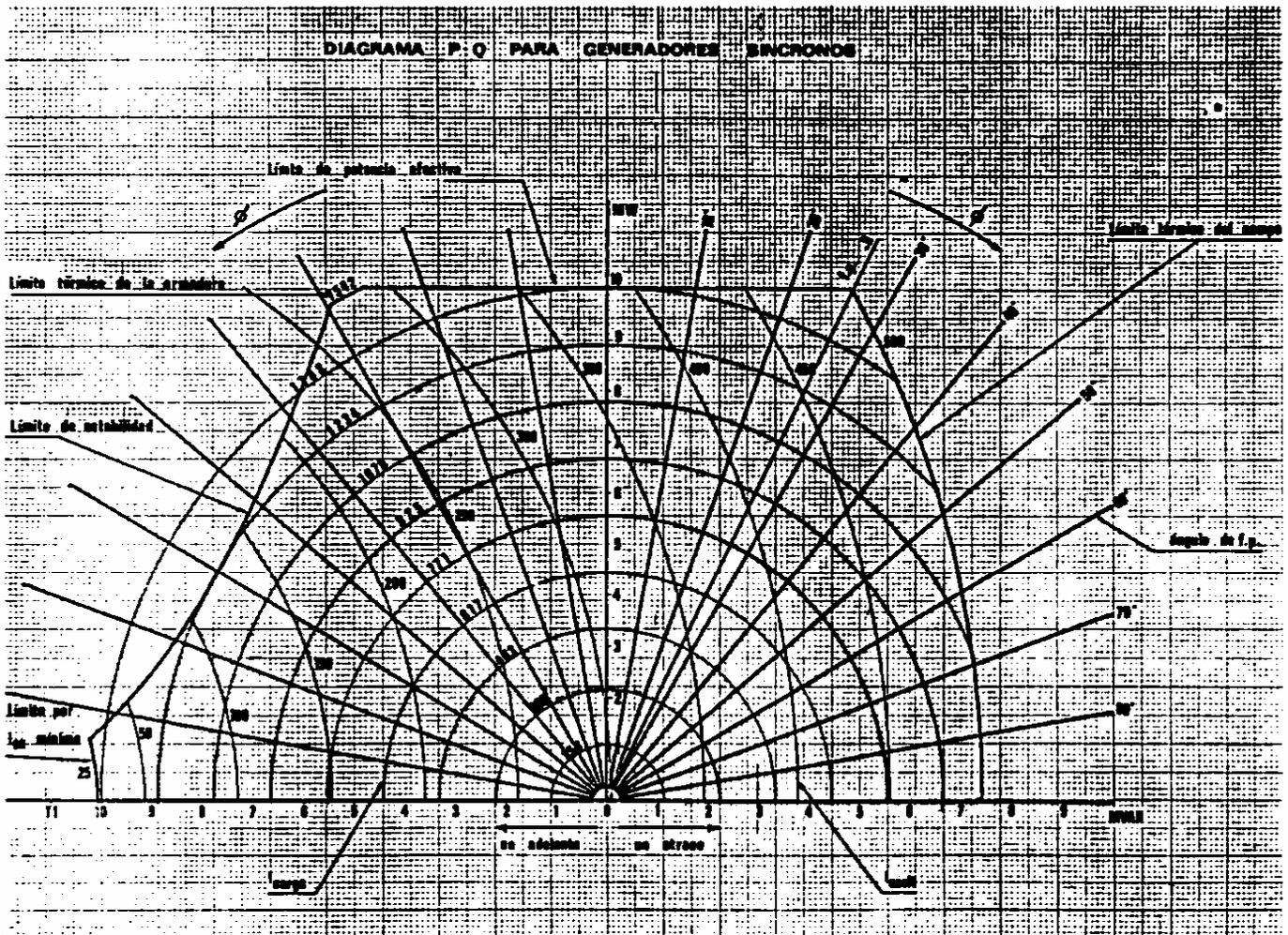


Fig. 10

Los datos que se proporcionan al computador son: V , V_e , $\cos \delta$, X_d , X'_d , X_e , J_m ; en el sistema p.u.

2. CONCLUSIONES

- Los diagramas muestran en forma clara y sencilla el modo como varían la capacidad y los distintos parámetros de los generadores sincrónicos bajo todas las condiciones posibles de operación.
- Los diagramas prestarian gran ayuda en la operación de generadores de centrales relativamente pequeñas, destinadas a tomar cargas fluctuantes y cuya operación se la hace en forma manual.
- La forma de utilización del diagrama no demanda complejidad y podría ser fácilmente aplicada por personal dedicado a labores de operación de generadores.
- La ejecución de los diagramas en el computador presta la precisión suficiente así como ahorro de tiempo en la obtención de los mismos, además de la ventaja de que cada curva puede ser ejecutada en diferente color.
- El trabajo en general tiene su limitación en cuanto a la precisión que pueda brindar el límite

teórico de estabilidad con equipo automático de regulación de voltaje, por lo que sería importante tomar en cuenta este efecto en una complementación de este trabajo.

REFERENCIAS

- 1.- Walker, J.H., "Operating Characteristics of Salient-Pole Machines", Proc. IEE, 1953, 100 Pt II, p. 13.
- 2.- Gove, R.J., "Geometric Construction of the Stability Limits of Synchronous Machines", Proc. IEE, May 1965, Vol. 112, No. 5, p. 977
- 3.- Lawson, W.F. y Brown, H.E., "Digital computation of Synchronous Generator Pullout Characteristics", AIEE Transactions, Feb. 1959, p. 1315-18.
- 4.- Jones, J.W. y Hoest, J.G., "Guide for Operation and Maintenance of Turbine-Generators", IEEE No. 67, Nov. 1963.
- 5.- "Standard Specification for Rotating Electrical Machines" Part. 1, General, VDE 0530 = 1/1.66 (ENVL), Junio 1967.
- 6.- Tokar C., "Diagramas P-Q para Generadores sincrónicos", Tesis de Grado, E.P.N., 1981.