



UTILIZACION DEL DIAGRAMA R-X EN SISTEMAS
DE POTENCIA

TESIS PROFESIONAL

ROLANDO RAMIREZ BAUTISTA

MEXICO, D. F.

1967

13

28



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

1087

FACULTAD DE INGENIERIA
Dirección
Núm. 73-
Exp. Núm. 73/214.2/1.-

Al Pasante señor Rolando RAMIREZ BAUTISTA
P r e s e n t e

En atención a su solicitud relativa
se es grato transcribir a usted a continuación el tema que apro-
bado por esta Dirección por parte del señor profesor Ingeniero Ger-
gilio Guerrero Alcázar, para que lo desarrolle como tesis en su
examen profesional de Ingeniero MECANICO ELECTRICISTA.

UTILIZACION DEL DIAGRAMA R-X EN SISTEMAS DE
ELECTRICIDAD

1. Qué es el diagrama R-X
2. Relación del diagrama R-X con el diagrama P-Q
3. Representación de condiciones de sistemas en el diagrama R-X
4. Representación de características de relés óhmicos en el diagrama R-X.
5. Estudio de la relación existente entre las caracte-
rísticas de los relés y del sistema mediante el
diagrama R-X.

Ruego a usted tomar debida nota de
que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones,
deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis
meses como requisito indispensable para sustentar examen profe-
sional; así como de la disposición de la Dirección General de
Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visi-
ble de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Muy atentamente,
"POR MI B. EN LA MATERIA DEL C. DIRECTOR"
Mexico, D.F. 3 de Octubre de 1967.
EL DIRECTOR

Ing. Manuel Paulín Ortiz

MEMORIO'eag.

1/10/67

A Eunice que ha sido una inspiración.

A mis Padres que me enseñaron el camino de la
entrega a una idea.

A mis amigos que hicieron posible
esta Tesis.

A todos aquellos que han entregado su vida a la

Industria Electrica, sin demagogia

y con responsabilidad.

INTRODUCCION .

Los Sistemas Eléctricos han ido creciendo constantemente bien por interconexión con otros Sistemas para mejorar condiciones de operación, por las demandas que las necesidades de la población exigen. Los Sistemas actuales constan de Plantas Generadoras de gran capacidad y de grandes Líneas de Transmisión que llevan cargas del orden de 300 MW, que es el caso de la Línea-Infiernillo-Nopala en nuestro País.

Los problemas en grandes Sistemas se complican y la protección de estas líneas no es posible confiarla a los relés sencillos que operan a base de una sola cantidad, tales como los de sobrecorriente o sobretensión.

Desde hace muchos años se vienen usando en todas partes los relés de distancia que operan a base de 3 cantidades: Corriente, Voltaje y Angulo de fase entre ellas.

La protección de estas líneas es sumamente importante para el sistema y el trabajo de los relés es difícil ya que esencialmente deben:

- a) Disparar para todo tipo de falla que ocurra dentro de la zona que sea responsable de esta protección.
- b) Deben librar las fallas muy rápidamente, ya que cualquier retardo o indecisión al enviar su orden, puede provocar serios trastornos en el Sistema.

Por si esto fuera poco los relés no deben:

- a) Disparar en cualquier tipo de falla fuera de la zona de protección excepto como asistencia o respaldo a una protección cercana que ha fallado.
- b) No deben disparar bajo condiciones de carga alta, cualquiera que sea ésta.
- c) No deben disparar en oscilaciones de potencia.

Hasta la fecha los relés que cumplen mejor los cometidos anteriores son los de distancia, cuyo principio se enuncia a continuación.

La impedancia de una línea de transmisión que tenga entre su extensión el mismo calibre y la misma separación entre conductores, es proporcional a su distancia. Como la relación V/I es la impedancia, entonces un relé de distancia alimentado con el voltaje entre fases y diferencia de corrientes en las mismas fases medirá la impedancia de la línea en cualquier condición.

Para proteger las 3 fases para fallas entre fases, se necesitan 3 relevadores cada uno con voltaje entre 2 fases y la diferencia de corriente entre ellas. En la protección de fallas a tierra se necesitan también 3 relevadores cada uno de ellos está comparando constantemente el voltaje de fase a tierra y la corriente de esa misma fase.

Cuando ocurra una falla entre fases el relé correspondiente medirá la verdadera impedancia de esa línea en las fases involucradas y enviará su disparo. Los

otros dos relés medirán también una cierta impedancia, y cualquiera que sea el valor de ésta no deben enviar disparo.

Durante oscilaciones de potencia habrá instantes en que la impedancia medida por los relés bajo esas condiciones anormales será exactamente igual a la de una falla y el relé opera. En algunos casos es conveniente esta operación y en otros casos son muy perjudiciales. Hay que analizar cuidadosamente para saber donde, cuando y como deben operar los relevadores.

El diagrama R-X es una herramienta útil y necesaria en el análisis de la operación de los relevadores de distancia bajo condiciones de falla y oscilaciones de potencia en un sistema determinado.

Se pretende en este trabajo dar una idea de como se puede utilizar el diagrama R-X en forma útil, rápida y sencilla, teniendo los conocimientos básicos de relés de distancia y de sistemas en condiciones anormales.

QUE ES EL DIAGRAMA R-X

En Ingeniería Eléctrica se usan una gran variedad de gráficas, diagramas y representaciones que ayudan grandemente a comprender el comportamiento de circuitos eléctricos.

El principal problema que se tiene en estas representaciones gráficas, es el número de variables que se tienen en las ecuaciones.

En teoría de los circuitos, es común que los diagramas muestren el comportamiento de una red en función de la frecuencia. Por lo tanto, la Impedancia o la admitancia de un circuito se pueden representar como las variables dependientes y la frecuencia como la variable independiente. Ya que la Impedancia y la admitancia son cantidades complejas, se necesitan dos cantidades para poder ser representadas, una magnitud y un ángulo o bien una componente real y una imaginaria.

Para lo cual, obviamente se necesitan tres planos ya que son tres variables: La frecuencia, la componente real y la imaginaria. Nuestro problema se enfoca ahora a la representación de dos, tres o cuatro variables sobre superficies de dos dimensiones como la que el lector tiene a la vista.

Representemos las curvas de una inductancia pura y una capacitancia pura en función de la frecuencia, sabemos que:

$$X_L = \omega L; X_C = -1/\omega C; B_L = -1/\omega L \text{ y } B_C = \omega C. \quad (1.1)$$

En un sistema de coordenadas rectangulares, representemos la Reactancia en el eje de las ordenadas y la frecuencia o bien " ω " en el de las abscisas.

En la figura 1a se muestran las curvas correspondientes. Nótese una dualidad muy importante, ya que siendo 4, solo son dos curvas diferentes, así mismo la forma, dos son líneas rectas y dos son hipérbolas rectas y todas tienen pendiente positiva.

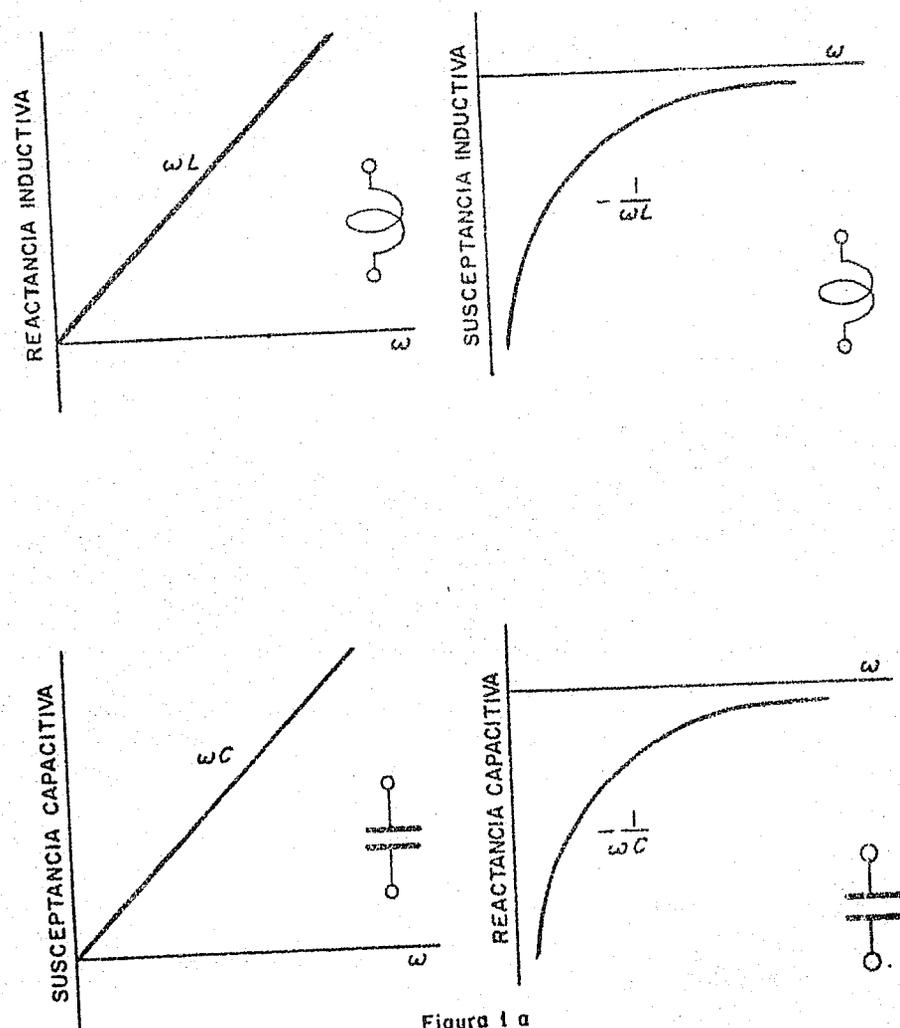
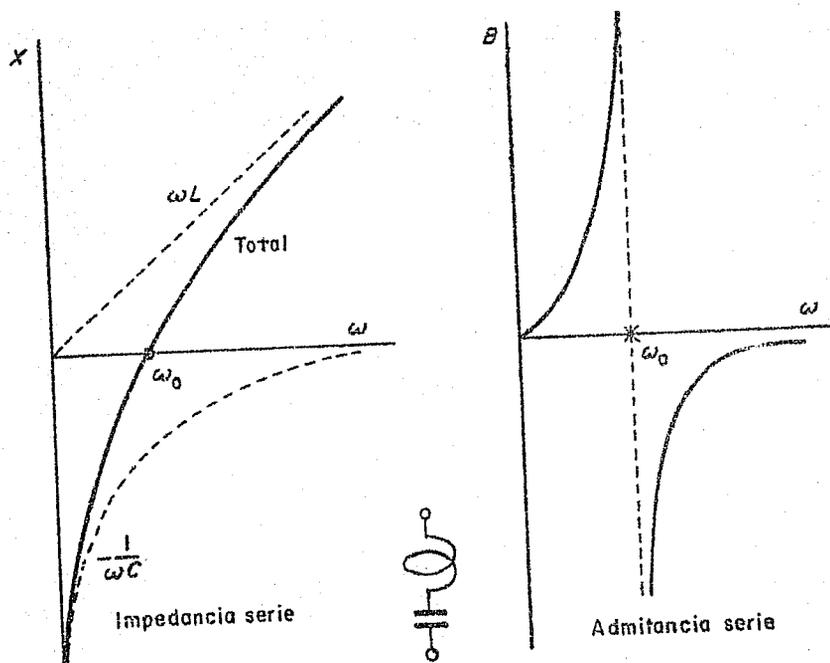


Figura 1 a

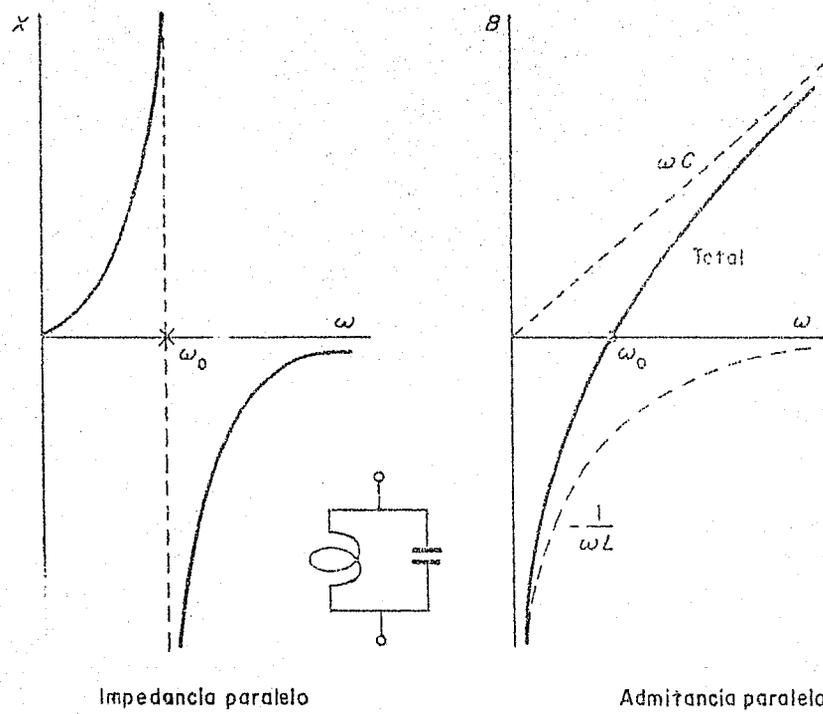
Si ahora conectamos en serie la inductancia y la capacitancia, la curva correspondiente será la suma de las anteriores (Fig. 1b). $Z = j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$ El punto en el cual la suma es igual a cero es la frecuencia de resonancia del circuito. La susceptancia de los dos elementos en serie es el recíproco negativo de la reactancia, $B = -1/X$ (cierto porque no hay resistencia).

Cuando $X = -\infty$, $B = 0$ y cuando $X = 0$, $B = \pm\infty$. Cuando X sea finito pero negativo, B será finito y positivo, etc.

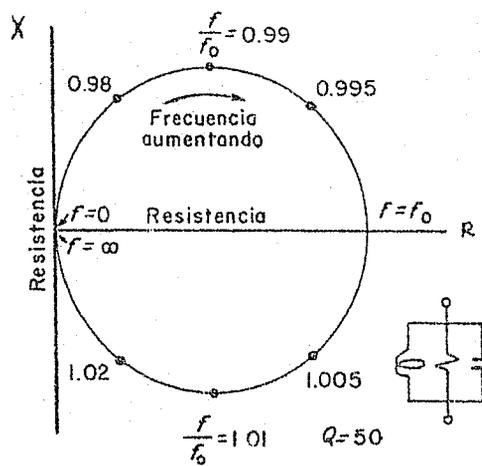
Vemos que esta función tiene pendiente positiva, lo cual comprobamos derivando la ecuación correspondiente.



ELEMENTO SERIE
Figura 1 b



ELEMENTOS EN PARALELO
Figura 1 c



CIRCUITO RESONANTE PARALELO EN EL PLANO Z
Figura 1 d

Ahora conectemos en paralelo las dos reactancias y tracemos sus curvas correspondientes y veremos otra vez la correspondencia natural que aprendimos en circuitos eléctricos, la reactancia del elemento serie corresponde a la susceptancia del paralelo y la susceptancia del serie a la reactancia del paralelo, Fig. 1c.

Sigamos con un circuito resonante paralelo, y concentremos nuestra atención a la representación en un plano.

En la Fig. 1d no representamos la variación de la frecuencia en un eje, sino sobre la curva con puntos en los cuales se ha anotado la relación f/f_0 . Empezando con frecuencia cero en el origen y siguiendo en el sentido del reloj, pasando por la frecuencia de resonancia, en el cual corta al eje de las abscisas hasta volver al origen a frecuencia infinito. Los ejes sobre los cuales se traza la curva son: En las abscisas, resistencia "R" y en las ordenadas la reactancia "X", tal plano se conoce como "Plano de Impedancia" o plano "Complejo" o "Plano R-X".

Foedemos trazar la curva correspondiente sobre un plano "Y" con ejes "G" y "B" como abscisas y ordenadas respectivamente, tal plano se llama de Admitancias

El lugar geométrico de la curva será una línea recta vertical a una distancia G_0 del origen, que es el punto de la frecuencia de resonancia. Naturalmente en un circuito resonante serie, la curva del plano de impedancias será la del plano de admitancias del circuito paralelo, y la curva de admitancias del serie la de impedancias del paralelo, Fig. 1e.

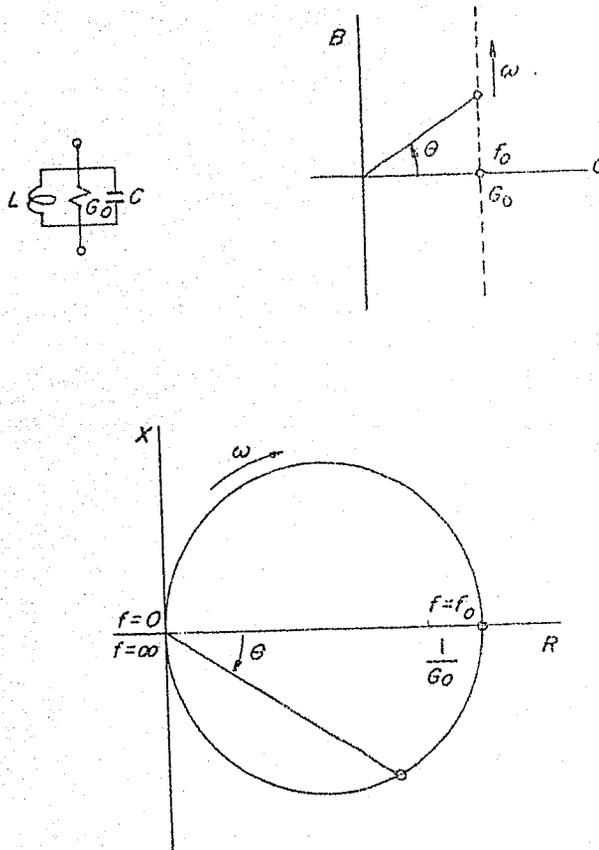


Figura 1 a

Geometría Analítica del Plano Complejo

En el plano complejo como en el cartesiano existe una Geometría Analítica. Sabemos que:

$$Z = X + jy \quad (1.3)$$

Siendo "X" y "y" reales por definición, si tenemos "u" una variable real y "n" una constante real y si hacemos que: $X = u$ y $y = m$, nuestra ecuación se convierte en:

$$Z = u + jm \quad (1.4)$$

Que será la ecuación de una recta horizontal - en el plano "Z" a una distancia "n" sobre el eje horizontal.

Sea ahora: $X = u$ $y = u,$

Tendremos:

$$Z = u + ju \quad (1.5)$$

La curva será una línea recta que pase por el origen y tenga una pendiente con ángulo de 45° .

Pasemos ahora a una relación muy importante:

$$A = \frac{A+Bu}{C+Du} \quad (1.6)$$

En la cual, A, B, C y D son constantes complejos y "u" es una variable real. En la igualdad anterior "Z" es una línea recta o un círculo en el plano complejo, (recordemos que una línea recta es considerada el límite de un círculo). De esta fórmula podemos tener casos especiales muy interesantes.

Si $D = 0$, "Z" será una línea recta:

$$Z = \frac{A}{C} + \frac{B}{C} u \quad (1.7)$$

Si $D = 0$ y $\frac{B}{C}$ es real, "Z" será una línea recta horizontal:

$$Z = \frac{A}{C} + mu \quad (1.8)$$

Y la ecuación 1.4 será un caso especial de ésta. Pero si $\frac{B}{C}$ es imaginaria "Z" es una línea vertical recta:

$$Z = \frac{A}{C} + jmu \quad (1.9)$$

Si $A = 0$ en cualquiera de los ejemplos anterior

res, las líneas pasan por el origen.

$$Z = \frac{B}{C} u \quad (1.10)$$

La ecuación 1.5 es un caso especial de 1.10. Ahora hagamos $A = C = m$ y $B = jn$ y $D = -jn$, en donde "m" y "n" son reales y constantes.

$$Z = \frac{m + jnu}{m - jnu} = \frac{\sqrt{m^2 + n^2} u^2 e^{j\theta}}{\sqrt{m^2 + n^2} u^2 e^{-j\theta}} = e^{j2\theta} \quad (1.11)$$

$$y \quad \theta = \tan^{-1} nu/m.$$

Como "u" puede tener cualquier valor real, 2θ podrá tener cualquier valor entre $-\pi$ y $+\pi$. "Z" es un círculo con centro en el origen y de radio 1.

Ahora multipliquemos el numerador de la ecuación 1.11 por una constante real "r" y tendremos $A = rm$, $C = m$, $B = jrn$ y $D = -jn$.

$$Z = r \frac{m + jnu}{m - jnu} = re^{j2\theta} \quad (1.12)$$

Que es un círculo con radio "r" y con centro en el origen.

Otro caso importante es:

$$Z = g + jh + r \frac{m + jnu}{m - jnu} = \frac{A + Bu}{m - jnu} \quad (1.13)$$

Que es un círculo con radio "r" y centro en el punto $g + jh$.

Como caso especial de esta última ecuación, sea: $A = 1$, $B = 0$ y $C = m$ y $D = jn$.

$$Z = \frac{1}{m + jnu} \quad (1.14)$$

Nos valdremos de las siguientes operaciones para saber el lugar geométrico de esta ecuación.

$$m + jnu = \frac{1}{Z} = \frac{1}{X + jy} = \frac{X - jy}{X^2 + y^2} \quad (1.15)$$

Igualando las partes reales:

$$m = \frac{X}{X^2 + y^2} \quad \text{ó} \quad X^2 - \frac{X}{m} + y^2 = 0 \quad (1.16)$$

Que podemos escribir:

$$\left(X - \frac{1}{2m}\right)^2 + y^2 = \left(\frac{1}{2m}\right)^2 \quad (1.17)$$

Que es la ecuación muy conocida en Geometría Análítica de un círculo con radio $\frac{1}{2m}$ y con centro en los puntos $X = \frac{1}{2m}$ y $y = 0$.

Otro caso importante de la ecuación 1.6 es, si $A = 1$, $B = 0$, $C = jn$ (constante imaginaria) y $D = m$, una constante real, la ecuación será:

$$Z = \frac{1}{jn + mu} \quad (1.18)$$

Aquí "Z" es un círculo que pasa a través del origen, con centro en $X = 0$, $y = -j\frac{1}{2n}$

Resistencia y reactancia en serie.

El lugar geométrico en el plano R-X y de Admitancias de un circuito serie de resistencia constante y reactancia inductiva variable, es nuestro siguiente material de estudio. La ecuación será:

$$Z = R_0 + j\omega L \quad (1.19)$$

En el plano R-X, la ecuación anterior será una línea recta vertical a una distancia R_0 del origen. En el plano de admitancias, la ecuación será:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R_0 + j\omega L} \quad (1.20)$$

Que es la ecuación de un círculo en el plano Y, que pasa a través del origen y tiene como centro el eje horizontal en el punto $G = \frac{1}{2R_0}$

Resistencia e inductancia variable en serie.

La ecuación representativa en este caso será:

$$Z = R + j\omega L \quad (1.21)$$

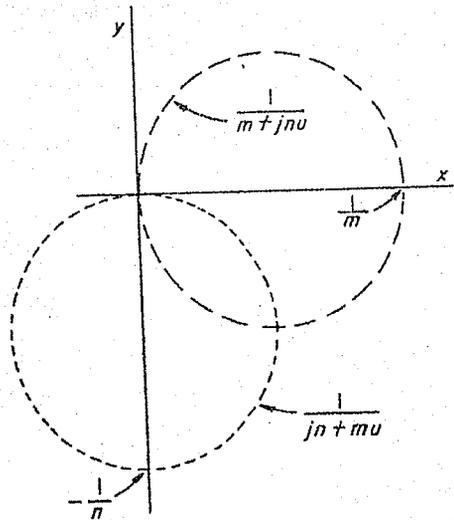


Figura 1 f

Otra interesante manera de comprender el diagrama R-X es la siguiente:

El valor numérico de la relación de voltaje entre fases a corriente de fase, $\frac{V}{I}$ se muestra como la longitud de un radio vector tal como "Z" y el ángulo de fase θ entre V e I determinan la posición del vector, en un diagrama en el que la abscisa sea "R" (Resistencia) y las ordenadas sean "X" (Reactancia).

Si V e I están en fase, "Z" está sobre + R, si I está defasado 180° de V, entonces se tendrán puntos sobre - R.

Si V está adelante de I, se tiene una componente + X, pero si V está atrás entonces el vector tiene una componente - X.

En esta forma hemos encontrado un plano, el R-X para representar tres variables V, I y el ángulo θ entre ellas. Ya que además $R = Z \cos \theta$ y $X = Z \sin \theta$.

En nuestra convención de signos llamaremos a θ positivo si I está atrás de V. R y X pueden ser negativos pero nunca "Z", cualquier valor negativo de "Z" obtenido en la sustitución de ciertos valores de θ , debe ser ignorado y no tendrá ningún significado. Los valores de θ se miden positivos en sentido contrario a las manecillas del reloj a partir de +R. Si varían θ , V e I bajo una función determinada, es posible trazar una curva característica.

EL DIAGRAMA "P-Q" Y SU RELACION CON EL "R-X"

Para tener una idea muy clara del diagrama -- "P-Q", recordemos su relación con los diagramas circulares de líneas de transmisión, ya que básicamente -- nuestro estudio se dedica a esas importantes partes de un sistema de potencia.

Consideremos primeramente el circuito equivalente de una línea corta, en la que se considera el valor de la admitancia despreciable y solamente se representa por una impedancia serie $Z = R + jX$ entre el lado generador y el receptor.

En el diagrama vectorial correspondiente, la -- tensión en el lado generador es igual a la suma de la tensión receptora y la caída de tensión por resistencia y reactancia, IR e IX respectivamente. Suponiendo que las magnitudes de la corriente y voltaje no se alteran cuando el factor de potencia de la carga varía.

Del diagrama, deducimos que V_s debe variar y -- que el lugar geométrico de la punta del vector es un -- semicírculo, que tiene como radio $IR + IX$ sumadas en -- forma vectorial.

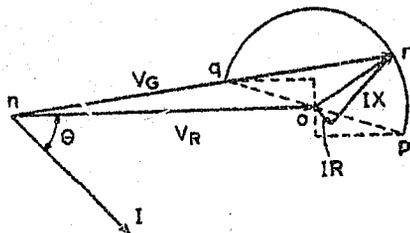


Figura 2a.

Ahora examinemos nuestra Línea de Transmisión representándola esta vez por un diagrama "T".

El diagrama vectorial de este circuito tomando el voltaje generador como referencia, nos muestra que:

$$V_S = AV_R + EI_R \quad (2.1)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.2)$$

Los valores de las constantes son:

$$A = I + YZ_1 \quad (2.3)$$

$$B = Z_1 + Z_2 + YZ_1Z_2 \quad (2.4)$$

$$C = Y \quad (2.5)$$

$$D = I + YZ_2 \quad (2.6)$$

Que podemos considerar como:

$$A = |A| \angle \alpha$$

$$B = |B| \angle \beta$$

$$D = |D| \angle \Delta$$

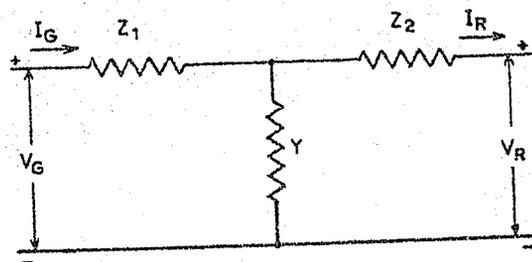


Figura 2 b

Los ángulos de diferencia entre los vectores - se muestran en el diagrama. Todos los vectores corresponden a valores de voltaje con excepción de I_R y como queremos tener valores de potencia, debemos multiplicar estos vectores por corrientes. Escogamos V_R/B como el multiplicador por las siguientes razones: a) es una corriente y b) el producto de este por BI_R será $V_R I_R$, - que son los voltamperes en el lado receptor.

Como resultado de esta operación tendremos un nuevo diagrama.

Examinemos el nuevo diagrama que resulta de - nuestra multiplicación de vectores. Como V_R es el vector de referencia, su ángulo es 0° y el vector V_R está desplazado de la referencia el ángulo β ya que:

$$\frac{V_R \angle 0^\circ}{B \angle \beta} = \frac{V_R}{B} \angle -\beta = \frac{V_R}{B} e^{-j\beta}$$

Por lo tanto, la multiplicación de los vectores de voltaje sobre el diagrama de la Fig. 2d por $\frac{B_R}{B}$ los hace girar un ángulo β

Por conveniencia, el origen del Sistema de coordenados es colocado en el punto 0 en el nuevo diagrama. Ahora $V_R I_R$ está a un ángulo $-\theta_R$ o bien un ángulo θ_R a bajo de la horizontal, y es el producto de BI_R a un ángulo $(B - \theta_R)$ y $\frac{V_R}{B}$ a un ángulo $-\beta$

Como $V_R I_R$ cruza el eje horizontal en el origen a un ángulo por el cual la corriente atrasa el Voltaje, la componente horizontal de $V_R I_R$ es la potencia real y la componente reactiva es la componente vertical. Los ejes coordenados pueden marcarse en Watts y vars.

En la construcción de la Fig. 2d la corriente se ha tomado atrás del voltaje, es decir una carga inductiva, y sobre el diagrama, los vars de una carga inductiva o mejor dicho fluyendo hacia una carga inductiva, son negativos. Los Ings. electricistas no están todos de acuerdo en el signo de la potencia reactiva, pero la mayoría de los Ings. en Sistemas de potencia usan signo positivo para indicar los vars atrasados o sea los vars de una carga inductiva. Con base a esta convención, un capacitor recibe vars negativos de la Línea. Los Ings. de Sistemas de Potencia encontraron que es conveniente considerar que un capacitor suministra vars positivos en lugar de considerar que recibe vars negativos. Este concepto de la acción de un capacitor está de acuerdo con la adopción del signo positivo de los vars recibidos por una carga inductiva. El capacitor síncrono es tratado como un generador que alimenta los vars requeridos por una carga inductiva. Cuando un capacitor síncrono o estático se encuentra en un centro de carga, podemos pensar que los vars requeridos para una carga atrasada viene, al menos parcialmente, del capacitor. Como los vars atrasados no provienen de la Línea de Transmisión, la Línea opera a un factor de potencia más alto y con regulación de tensión menor.

La potencia compleja se define como $P+jQ$, en donde P es la potencia real y Q es la potencia reactiva. Como el conjugado de un vector es otro que tiene la misma magnitud y ángulo, solamente que este último tiene el signo cambiado, la potencia compleja en el lado de recepción de una red de dos pares de terminales es:

$$\begin{aligned} V_R I_R^* &= V_R \times I_R \cos \theta_R + V_R \times I_R \text{ sen } \theta_R \\ &= P_R + jQ_R \end{aligned} \quad (2.7)$$

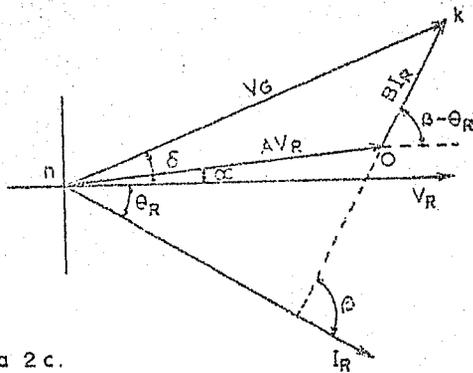


Figura 2c.

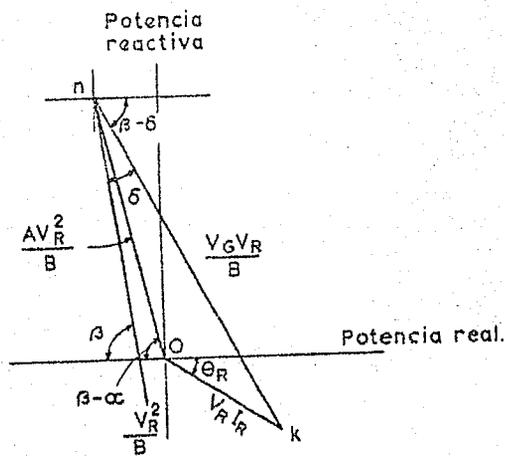


Figura 2d.

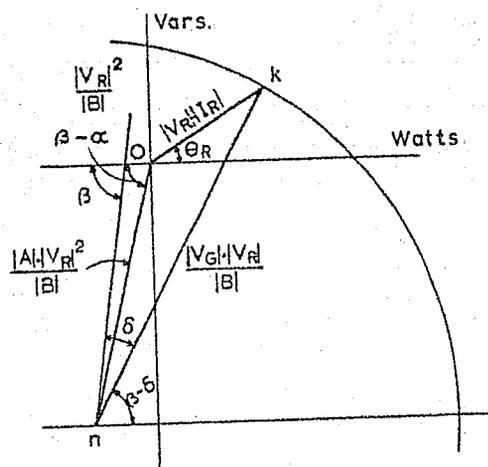


Figura 2e

en donde el asterisco indica que tomamos el conjugado del vector asociado (en este caso el conjugado de la corriente), el ángulo θ_R es igual al ángulo de fase del voltaje menos el ángulo de fase de la corriente, es decir el ángulo de la impedancia compleja en el lado receptor. Entonces tendremos que θ_R es positivo cuando la corriente va atrás del voltaje y negativa cuando la corriente va adelante. El signo de Q obtenido en la ecuación 2.7 está de acuerdo con la convención que especifica un valor positivo para la potencia reactiva de una carga inductiva. Usando el conjugado del voltaje multiplicado por la corriente, nos da el signo opuesto para la potencia reactiva. Por supuesto el desarrollo se aplica en forma general y los sufijos particulares de la ecuación anterior no restringen nuestra discusión de potencia compleja y el signo de la potencia reactiva. Usaremos el signo positivo para indicar los vars atrasados consumidos por una carga inductiva. La única alteración requerida en el diagrama de potencia de la Fig. "2d" es el intercambio de puntos arriba y abajo del eje horizontal por el giro de todo el diagrama sobre el eje horizontal. El resultado se muestra en la Fig. 2e las distancias se marcan solamente como magnitud, ya que no tienen la misma relación angular con el eje horizontal como referencia, tal y como corresponde a las distancias de la Fig. anterior.

Por supuesto, los diagramas vectoriales de corriente y voltaje no son afectados por la convención adoptada para los signos de la potencia reactiva.

Sabemos que un capacitor puro lo podemos considerar como un productor de potencia reactiva en lugar de decir que su consumo de reactivos es negativo, así

como un generador es una fuente de potencia activa, un capacitor es una fuente de potencia reactiva. El circuito inductivo consume potencia reactiva y un capacitivo produce potencia reactiva. Para la capacitancia como para la inductancia $Q = I^2 X$, más en un circuito puramente capacitivo X debe ser negativo.

Lo anterior lo podemos resumir en la siguiente figura:

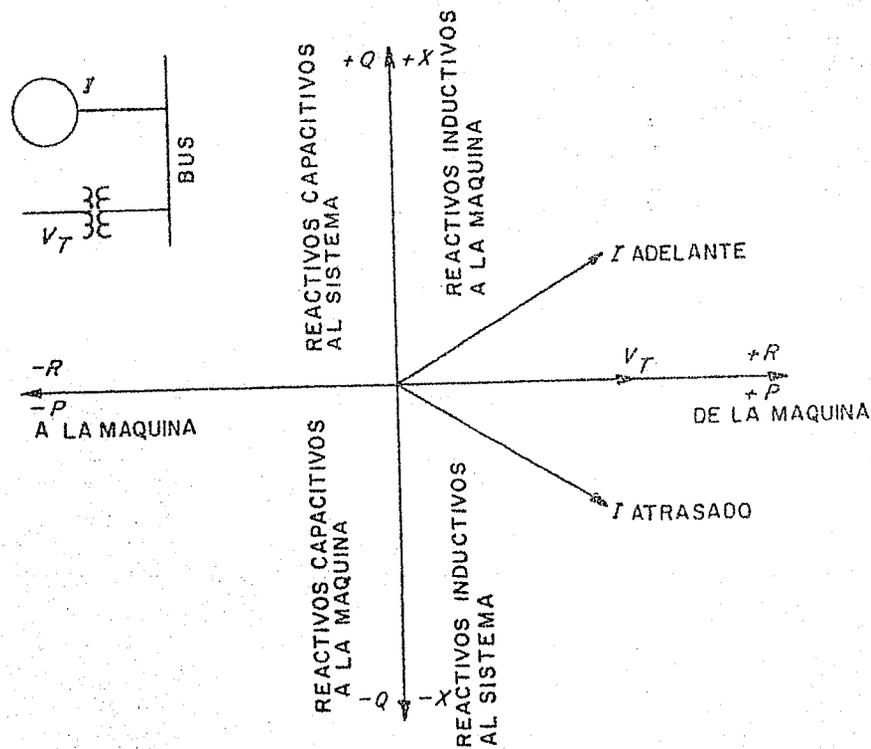
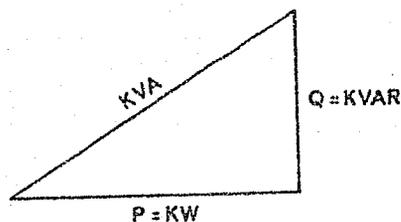


Figura 2 f

De las fórmulas conocidas: $P = I^2 R$ y $Q = I^2 X$

Podemos obtener la relación de los diagramas:
"P-Q" y "R-X".

Sabemos que la potencia aparente es igual a $-$
 VI y que $KVA^2 = P^2 + Q^2$.



$$I^2 = \frac{P^2 + Q^2}{V^2}$$

Y como $P = I^2 R$

$$I^2 = \frac{P}{R}$$

Igualando: $\frac{P^2 + Q^2}{V^2} = \frac{P}{R}$

Despejando el valor de R: $R = \frac{PV^2}{P^2 + Q^2}$

En la misma forma para X: $X = \frac{QV^2}{P^2 + Q^2}$

Las fórmulas de conversión del diagrama P-Q al
R-X y viceversa, son dadas a continuación:

$$R = \frac{PV^2}{P^2 + Q^2}$$

$$P = \frac{RV^2}{R^2 + X^2}$$

$$X = \frac{QV^2}{P^2 + Q^2}$$

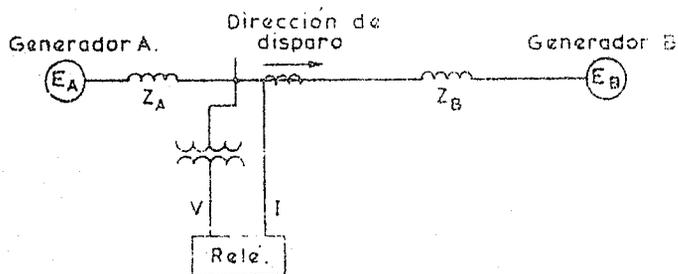
$$Q = \frac{XV^2}{R^2 + X^2}$$

Para que las fórmulas anteriores sean validas, será necesario que se usen unidades del mismo sistema, o bien si se usan en por Unidad, que todo sea por Unidad,

R = Resistencia de fase a neutro en ohms,
 X = Reactancia de fase a neutro en ohms,
 V = Voltaje de fase a fase en Volts,
 P = Potencia trifásica en Watts,
 Q = Volt-amperes,

Todos los datos anteriores son valores de se-
 cuencia positiva.

Con estos conceptos ya claros y los del diagrama R-X, a continuación se da una tabla en la cual se muestran los signos convencionales que deben tener R y X según el circuito de la figura.



Condición:	Signo de R	Signo de X
Potencia de A hacia B	+	
Potencia de B hacia A	-	
Potencia Reactiva atrasada de A hacia B,		+
Potencia Reactiva atrasada de B hacia A,		-
Potencia Reactiva adelantada de A hacia B		-
Potencia Reactiva adelantada de B hacia A		+

Si aplicamos los signos adecuados de R y X, podemos localizar el punto sobre este plano de cualquier condición balanceada trifásica.

Recordemos también que nos será útil la representación gráfica de P y Q en Líneas de Transmisión para condiciones estables y fenómenos transitorios también.

ELEMENTOS OHMICOS EN EL DIAGRAMA R-X

¿Qué es un relé Ohmico?, se ha aplicado el nombre de "Ohmico" por la característica de que estos relés operan en respuesta a 3 variables: voltaje, corriente y ángulo de fase. Para poder entender este nombre y apreciar la operación de estos relés, debemos considerar individualmente los elementos de los relés.

En general, estos elementos responden a 3 de los 4 "pares" conocidos.

- 1.- Componentes de voltaje (par proporcional a E^2),
- 2.- Componente de corriente (par proporcional a I^2),
- 3.- Componente de producto (par proporcional a $E \times I \times f(\theta)$)
- 4.- Par del espiral de control,

Podremos escribir una ecuación general del par, para un elemento Ohmico:

$$\text{Par} = \pm IK_1 E^2 \pm K_2 I^2 \pm K_3 E I f(\gamma, \theta) \pm K_4 \quad (3.1)$$

Las convenciones que se han adaptado para esta ecuación son:

- a) El par que tiende a cerrar los contactos, - es positivo.
- b) K_1 , K_2 y K_3 son constantes de diseño, que - pueden usarse con cualquier signo y variarse en magnitud de acuerdo con las necesidades;
- c) K_4 representa el par del resorte que se su-

pone constante.

d) γ es el ángulo para el par máximo de diseño.

e) E, I, θ son las cantidades de operación que alimentan al relé (γ y θ son ángulos, atrás I de E).

Como primer ejemplo al uso de esta ecuación, seleccionaremos $K_1 = K_2 = 0$, K_4 es despreciable, K_3 es positivo y $F(\gamma, \theta) = \text{sen}(90^\circ + \gamma - \theta)$.

La ecuación se convierte ahora en:

$$T = +K_3 EI \text{ sen}(150^\circ - \theta) \quad (3.2)$$

Para un relé en el cual $\gamma = 60^\circ$. Lo anterior es un elemento direccional en donde el par es positivo y tiende a cerrar sus contactos para valores de θ entre 330° y 150° con par máximo positivo de $\theta = 60^\circ$.

Como segundo ejemplo, escogemos $K_1 = 0$, K_4 despreciable, K_2 positivo, $F(\gamma, \theta) = \text{sen } \theta$ y K_3 negativo.

Nuestra ecuación se convierte en:

$$T = +K_2 I^2 - K_3 E I \text{ sen } \theta. \quad (3.3)$$

Para analizar esta ecuación, sustituimos (E/I) $\text{sen } \theta = X$, y tendremos:

$$T = +K_2 I^2 - K_3 I^2 X \quad (3.4)$$

Y será la ecuación para un elemento de reactancia que operará cerrando sus contactos, si X tiene un valor tal que T sea positivo, de acuerdo con la proporción K_2 a K_3 . La representación en un diagrama E-X será una línea horizontal a una distancia X del origen -

sobre este eje.

El siguiente ejemplo, será el elemento de impedancia en donde seleccionaremos K_1 como negativo, K_2 positivo, K_3 cero y K_4 , despreciable. Nuestra ecuación será:

$$T = -K_1 E^2 + K_2 I^2 \quad (3.5)$$

Para facilitar el análisis, nos ayudaremos de la relación $E/I = Z$. Teniendo ahora la ecuación:

$$T = +K_2 I^2 - K_1 I^2 Z^2 \quad (3.6)$$

Es decir, nuestro elemento operará, cerrando sus contactos si Z tiene un valor abajo del determinado por K_2 y K_1 .

El último elemento sujeto a discusión, será un direccional con restricción de voltaje.

Seleccionaremos $K_2 = 0$, K_4 despreciable, K_1 con signo negativo y $F(\gamma, \theta) = \text{sen}(90^\circ + \gamma - \theta)$, K_3 positivo. Tendremos la siguiente ecuación.

$$T = +K_3 EI \text{ sen}(90^\circ + \gamma - \theta) - K_1 E^2 \quad (3.7)$$

Si usamos la relación $E/I = Z$ para simplificar la ecuación, tendremos:

$$T = K_3 I^2 Z \text{ sen}(90^\circ + \gamma - \theta) - K_1 I^2 Z^2 \quad (3.8)$$

Este relé operará cuando $K_1 Z^2$ sea menor que $K_3 Z \text{ sen}(90^\circ + \gamma - \theta)$.

Todo esto es muy interesante, pero como evaluamos las características de operación?

Examinemos el último elemento descrito por 3.7

El par positivo se efectuará si $K_3 EI \sin (90^\circ + \gamma - \theta)$ es mayor que $K_1 E^2$.

Un par negativo se tendrá si lo anterior es al contrario.

Los límites de operación del relé se definen para $T = 0$, o sea cuando el par positivo es igual al negativo.

Ahora podemos trazar:

$$I \sin (150^\circ - \theta) = K_1 / K_3 E \quad (3.9)$$

Para $\gamma = 60^\circ$ y para un valor único y definido de voltaje $E = E_s$ como se muestra en la Fig. 3a.

Si nosotros seleccionamos otros valores de voltaje, debemos trazar nuevas curvas como se muestra en la Fig. 3b, para $E = 0.5 E_s, 1.0 E_s, 2.0 E_s$. Es decir hemos trazado I Vs θ usando E_s como parámetro.

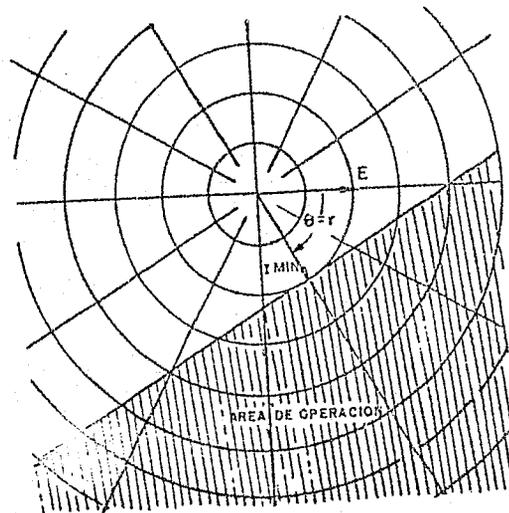


Figura 3 a.

Otra vez nos encontramos con algo muy interesante, pero cómo podemos aplicarlo a un relé si el voltaje en él será diferente para varias fallas en el Sistema y más aún el voltaje será diferente para la misma falla si existen diferentes condiciones en el Sistema?

La contestación se puede encontrar en el diagrama R-X. Podemos valorar el diagrama R-X por 2 puntos:

1.- Las características de relés Chmicos se pueden mostrar fácilmente, ya que se pueden trazar en términos de solo dos variables, R y X (o bien Z y ϕ), en lugar de las 3 variables E , I y ϕ .

2.- Las condiciones del Sistema que afectan la operación de estos relés se pueden mostrar en el mismo diagrama. Estos puntos se estudiarán separadamente como primer paso y después se considerarán juntos.

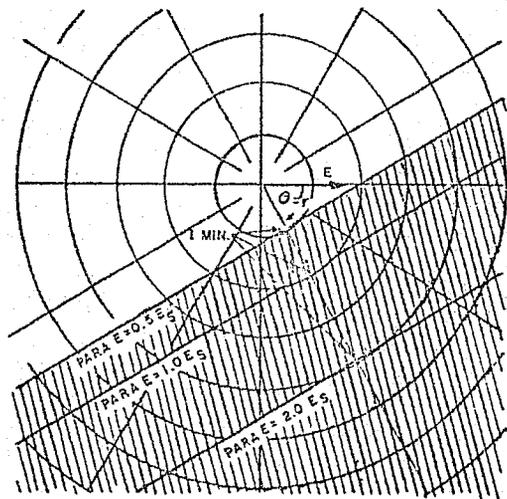


Figura 3 b.

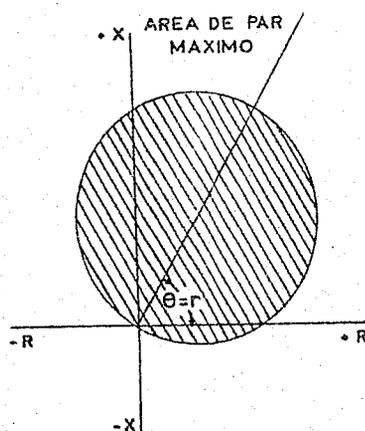
Consideremos otra vez la ecuación usada en la Fig. 3a:

$$I \text{ sen } (150^\circ - \theta) = (K_1/K_2) E$$

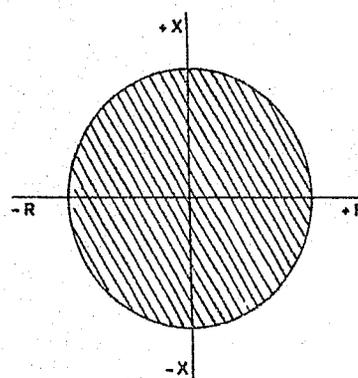
La impedancia que un relé "vé" en una falla es la relación del voltaje a la corriente en la fase o fases involucradas en la falla, $E/I = Z$, nuestra ecuación se convierte en:

$$(K_2/K_1) \text{ sen } (150^\circ - \theta) = Z$$

Esta ecuación define el punto de operación del relé en términos de Z y puede representarse en un diagrama R-X como se muestra en la Fig. 3c. El par positivo o sea aquel que tiende a cerrar sus contactos, se efectúa cuando $(K_2/K_1) \text{ sen } (150^\circ - \theta)$ es mayor que Z , es decir cuando la impedancia de falla cae dentro del círculo. Esta curva no depende de los parámetros de las cantidades de operación pero define las características para todos los valores de E , I y θ .



ELEMENTO MHO 60°



ELEMENTO DE IMPEDANCIA.

Figuras 3c.

En la misma forma podemos trazar el lugar geométrico de un elemento de impedancia que tiene la siguiente ecuación de operación:

$$T = -K_1 E^2 + K_2 I^2$$

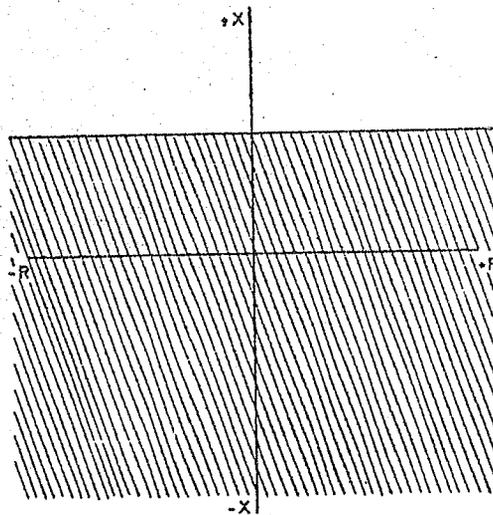
La cual, en función de Z será:

$$K_2/K_1 = Z^2$$

Que es la ecuación de un círculo con centro en el origen y radio igual a $\sqrt{K_2/K_1}$. Finalmente consideremos un elemento de reactancia que en el punto de equilibrio se tiene la siguiente ecuación:

$$K_2/K_3 = X$$

El lugar geométrico de esta ecuación es una línea recta horizontal y a una distancia del origen igual a X , Fig. 3d.



ELEMENTO DE REACTANCIA.

Figura 3 d.

Ahora consideremos la siguiente ecuación:

$T = +K_3 EI \sin(150^\circ - \theta)$ en la que vemos que el par se desarrolla para todos los valores E e I excepto para $\theta = 150^\circ$ y 330° . El par será positivo si θ varía de 330° a 0° y de 0° a 150° , y negativo para valores de 150° a 330° . El par máximo se desarrollará a 60° con signo positivo y 240° con signo negativo. Esto se puede representar en la Fig. 3c. Aún cuando el elemento direccional no es Ohmico, su característica puede representarse en un diagrama R-X. Otra característica útil es el "offset mho". Este elemento es similar al mho pero tiene una parte de la corriente de operación introducida en el voltaje, y cambiando esta fracción de la corriente de operación podemos trasladar el círculo característico.

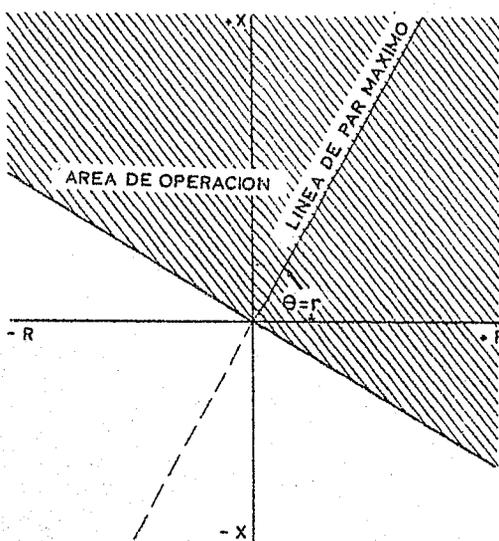


Figura 3 c.

Los relés de distancia están formados por 3 elementos de los estudiados anteriormente, divididos en 3 zonas de alcance y diferente tiempo de operación para cada una de ellas, la primera zona generalmente es instantánea y la segunda y tercera zonas completan sus circuitos de disparo a través de un temporizador para tener retardo de tiempo. La Fig. 3f nos da una idea completa de lo que acabamos de explicar.

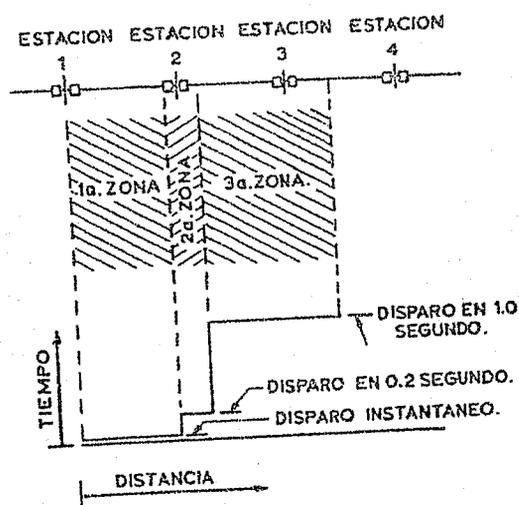


Figura 3f.

Básicamente existen 3 relés de distancia, de Impedancia, de Reactancia y de Admitancia, a continuación hay una breve descripción de cada una de estas:

Relés de Impedancia.- Se componen de 3 elementos de impedancia ajustados para diferentes alcances - Ohmicos. El elemento direccional controla el circuito de disparo para los 3 elementos previniendo operación para fallas en dirección contraria. Las característi-

cas de este relé se muestran en la Fig. 3g.

Relé de Reactancia.- Se compone de un elemento de reactancia que ofrece protección para la. y 2a. zonas, y un elemento mho que tiene doble trabajo, unidad de arranque y elemento de 3a. zona. Los contactos de la unidad de arranque y los de reactancia se conectan en serie, en tal forma que el disparo se efectúe para impedancias dentro del área de las líneas gruesas de la Fig. 3h. En esta forma aseguramos la operación de los relés de reactancia, solamente en sentido del disparo y para fallas.

Relé de Admitancia.- Se compone de 3 elementos mho con diferente ajuste cada uno, solo que en este caso no necesitamos de un elemento limitador como en los dos anteriores, es decir el elemento mho casi alcanza las condiciones de un relé ideal de distancia. El elemento de 3a. zona puede ser usado como en la Fig. - - 3.10a o bien como en la Fig. 3.10b, cambiando el sentido del alcance de la 3a. zona, para diferentes aplicaciones. Los relés de "bloqueo de oscilaciones" están formados generalmente por cualquiera de los siguientes elementos básicos: (1) un elemento de impedancia; (2) un elemento mho. Como ejemplo de las características de este relé se muestran las Figs. 3.i.1 y 3.i.2.

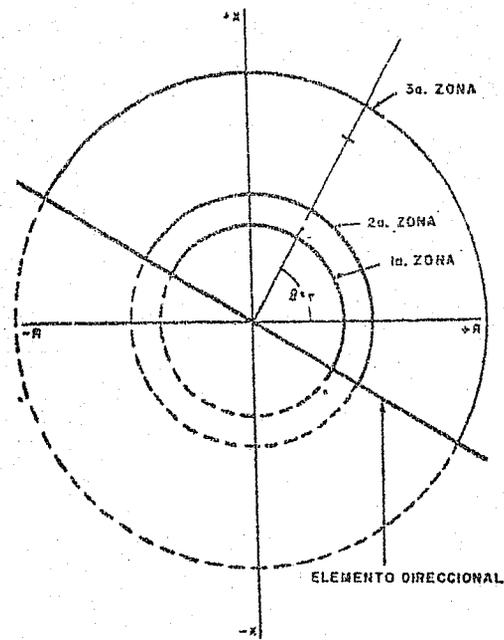


Figura 3 g
 CARACTERISTICAS DEL RELE DE
 IMPEDANCIA CON TRES ZONAS

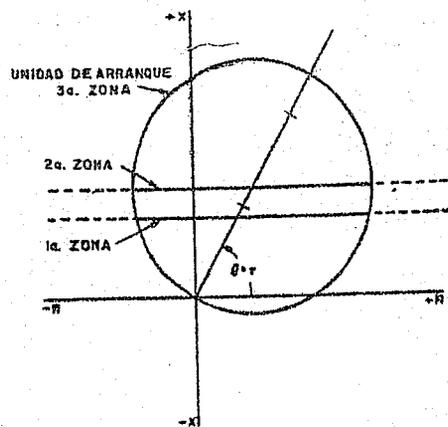


Figura 3 h
 CARACTERISTICAS DEL RELE DE
 REACTANCIA CON TRES ZONAS

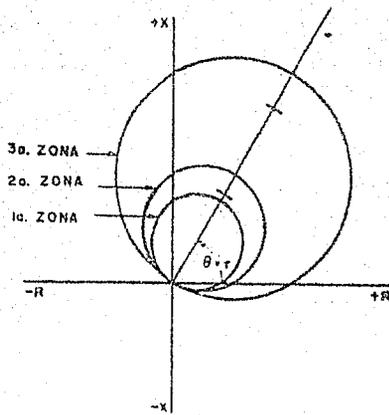


Figura 3 i-1
RELE MHO CON TRES ZONAS

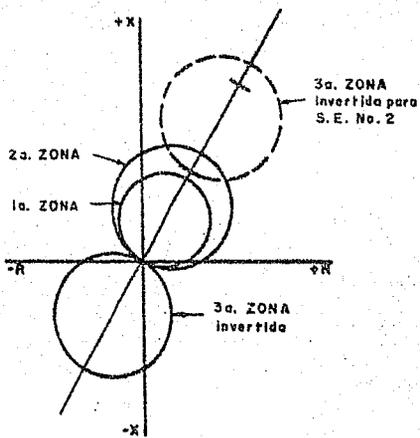


Figura 3 i-2
RELE MHO CON TRES ZONAS
Y LA 3a. ZONA INVERTIDA

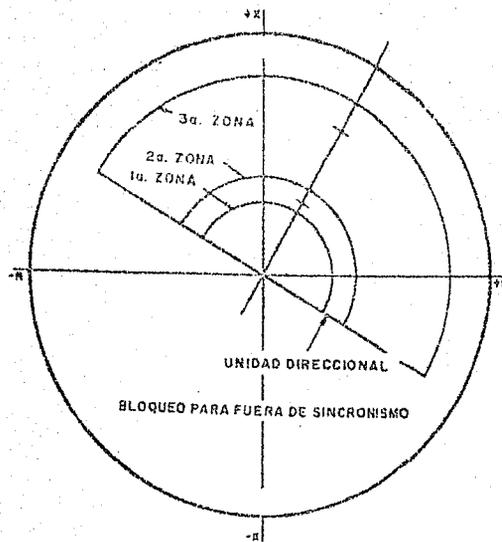


Figura 3 j

RELE DE IMPEDANCIA CON BLOQUEO
USANDO ELEMENTO DE IMPEDANCIA

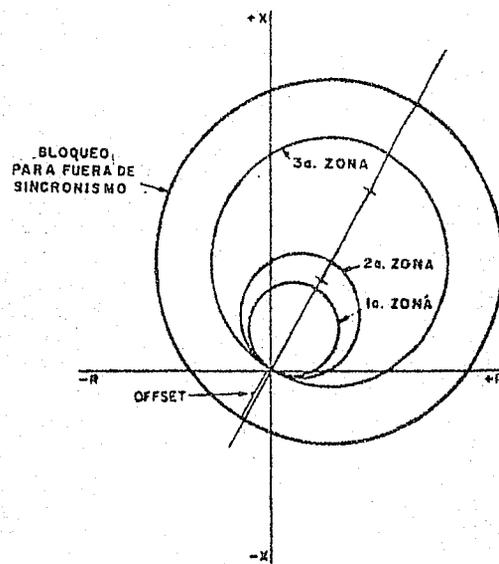


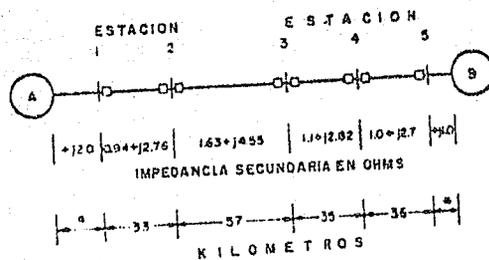
Figura 3 h

RELE MHO CON BLOQUEO MHO CON OFFSET

CONDICIONES DE SISTEMAS SOBRE DIAGRAMAS R-X.

Para mayor facilidad debemos empezar con un sistema equivalente de 2 máquinas y una línea de transmisión entre ellas. Las impedancias usadas pueden representar sistemas combinados en cualquiera de las terminales de la línea. Nuestro ejemplo será el sistema que se muestra en la figura 4a. Los ohms usados son "ohms secundarios", para representarlo sobre un diagrama R-X seguiremos los siguientes pasos: Empezando con el generador A, la impedancia secundaria es $(C+j2.C)$ ohms, este valor se traza en el eje de las K en dirección positiva (Fig. 4b1). Seguimos ahora con la línea entre la Subestación 1 y la Subestación 2 que tiene una $Z=C.94+j2.76$. Del punto uno de la Fig. 4b1 seguimos con el valor anterior o sea 0.94 paralelo al eje R y en sentido positivo y 4.76 sobre el eje K igual en sentido positivo.

Continuando en la misma forma llegamos a la Fig. 4b3. La impedancia equivalente del sistema es: $Z = 4.67 + j15.23$ ohms.



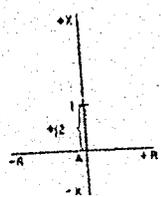


Figura 4 b-1

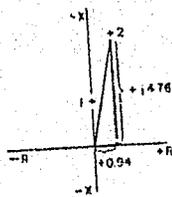


Figura 4 b-2

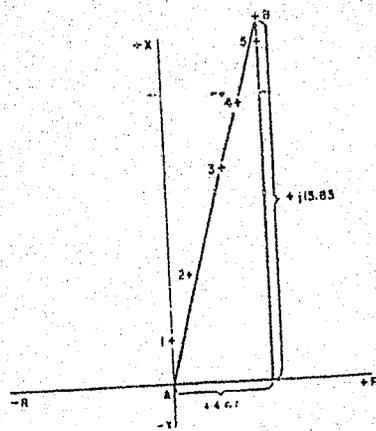


Figura 4 b-3

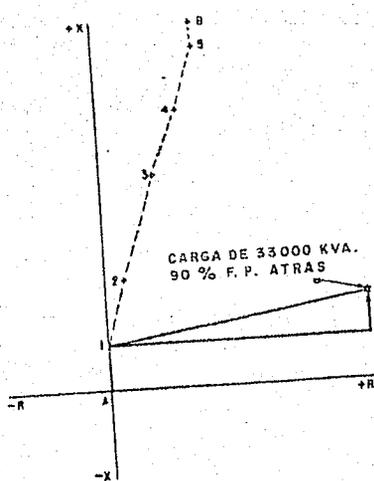


Figura 4 b-4

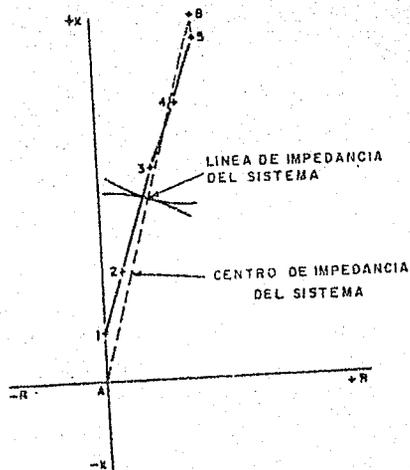


Figura 4 b-5

Hagamos una breve pausa para revisar y enfatizar algunas de las convenciones que hemos adoptado.

1.- Las Unidades de R y X están a la misma escala, es decir una resistencia de un Ohm es una Unidad en escala horizontal, y una reactancia de un Ohm es una Unidad en escala vertical.

2.- Hemos adoptado una convención de signos, +R a la derecha y +X hacia arriba, como se "ven" las impedancias de A hacia B. La importancia de esta convención de signos se verá, si conectamos una carga alta - con factor de potencia atrasado en la instalación 1, - con la Planta B desconectada, en este caso el relé en A verá una gran +R y una pequeña +X, (Fig. 4b5) el valor graficado representa una carga aproximada de 33,000 KVA que es justamente el doble de la carga normal de esta línea.

3.- La convención de signos permanece solamente cuando "vemos" en la misma dirección que cuando trazamos el diagrama. Una falla en 4 (o una carga con factor de potencia atrasado en la instalación 4) cuando se vea desde la estación B, obviamente debe aparecer - como +R y +X, estrictamente hablando, un nuevo diagrama R-X debe trazarse para esta condición, pero el ejercicio mental necesario presenta pocos problemas - cuando se compara con la ventaja de usar el mismo diagrama para ambas direcciones en este caso sencillo.

4.- La localización del origen se supuso en el generador A.- Esto es conveniente para transferencias y penduleos de carga entre Plantas cuando las vemos -- desde A. Pero no es muy conveniente cuando consideramos operaciones de relés en instalaciones intermedias. Afortunadamente podemos evitar la incomodidad de res--

tar el vector impedancia entre la Planta A y la instalación intermedia, si movemos el origen al lugar donde esté localizado el relé. Esto nos capacita para medir directamente la impedancia vista por el relé en diferentes condiciones.

Entraremos de lleno al estudio sobre el diagrama R-X de condiciones anormales del Sistema, tales como fallas y penduleos de carga.

Una de las primeras investigaciones será determinar en forma cualitativa el funcionamiento de los relevadores durante oscilaciones de carga partiendo de nuestro nuevo concepto del Sistema y de relés. C. R. Mason presentó un trabajo ⁽¹⁾ en 1937 en AIEE en el cual analizó el funcionamiento de los relés durante oscilaciones de carga; los resultados de sus análisis se sintetizaron en gráficas del par de relé como una función del ángulo de separación entre las 2 máquinas del Sistema equivalente. Al mismo tiempo Mr. J. H. Neher ⁽²⁾ presentó el primer escrito sobre características de relés de distancia graficados en un diagrama de impedancia y dió valiosas sugerencias al Sr. Mason. Neher estableció que para iguales voltajes de generación y la misma reactancia de las máquinas ($EA/EB = 1.0$), la impedancia aparente del Sistema varió (cuando las 2 máquinas deslizaban un polo con respecto a otro) a lo largo de una línea que tiene como visector perpendicular la línea de impedancia del Sistema. En discusiones posteriores de su escrito, Mason mostró esta "línea de oscilación" sobre el mismo diagrama R-X con diferentes características del relé. Este fué el primer salto hacia adelante en el análisis de un problema que se agudizaba cada vez más.

Empezaremos con un breve análisis matemático -- de fallas y "Power Swings", pero antes aclaremos el -- significado de la impedancia que ven los relés y la -- del diagrama R-X.

Significado de Z . Como estamos acostumbrados a asociar la impedancia con algún elemento tal como una bobina o una parte de un circuito, tal vez tendremos -- confusión y nos preguntamos cual es el significado de la impedancia expresada por la relación del voltaje a la corriente que alimenta un relé de distancia.

Depende entre otras cosas, de la forma en que se obtiene el voltaje y corriente de alimentación. Para la protección de líneas de transmisión contra circuitos cortos, que es la mayor aplicación de los relés de distancia, esta impedancia es proporcional dentro de ciertos límites a la distancia física del relé al punto de falla. Sin embargo el relé alimentado con el mismo voltaje y la misma corriente operará en condiciones en que no hay cortos-circuitos, tales como carga normal o cuando parte del sistema pierde sincronismo contra la otra, etc. Bajo tales condiciones la impedancia tiene un significado diferente que durante cortos-circuitos.

En la siguiente Fig. podemos deducir fácilmente el valor de Z .

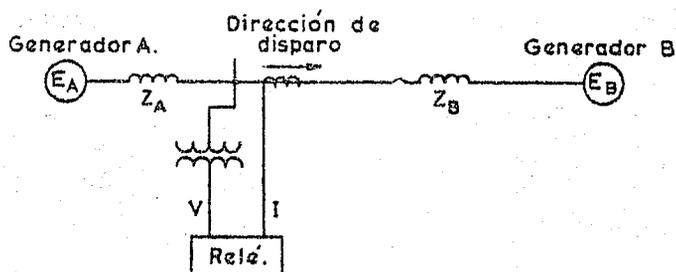


Figura 4c.

$$\frac{V}{I} = Z = \frac{E_A Z_B + E_B Z_A}{E_A - E_B}$$

En la que todas las cantidades son números complejos; E_A y E_B son tensiones de generador.

CORTOS CIRCUITOS

Para mayor facilidad los estudiaremos suponiendo el sistema equivalente de la Fig. 4d, los voltajes de los generadores se suponen iguales y en fase. El efecto de la inducción mutua no se considera, así como las corrientes de carga; si las corrientes de falla son muy bajas esto último debe tomarse en consideración.

De la Fig. 4d deducimos los siguientes valores:

$$Z = \text{Impedancia del sistema hasta el punto de falla} = \frac{Z_X Z_Y}{Z_X + Z_Y}$$

$$C = a \text{ la relación de la corriente en el relé a la corriente total de la falla} = \frac{Z_Y}{Z_X + Z_Y}$$

Los sufijos a, b y c corresponden a las fases a, b y c respectivamente. Los sufijos 1, 2 y 0 indican secuencia positiva, negativa y cero respectivamente. Consideraremos secuencia 1-2-3 para la positiva.

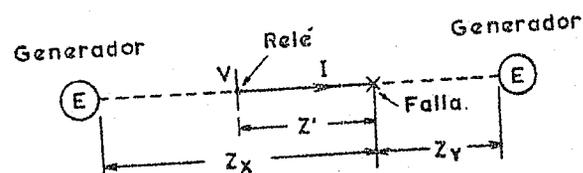
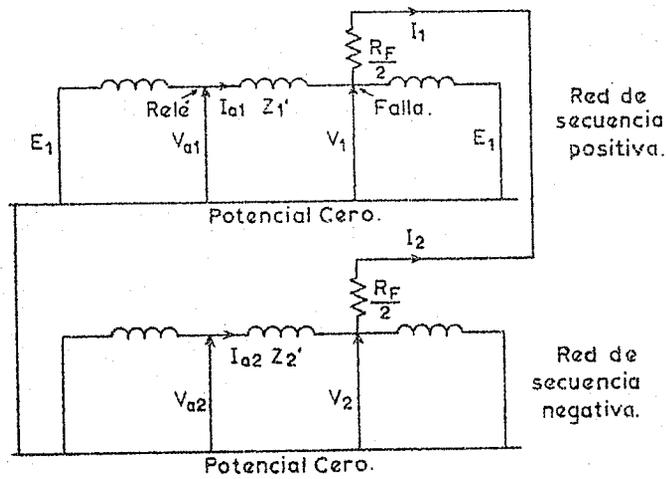
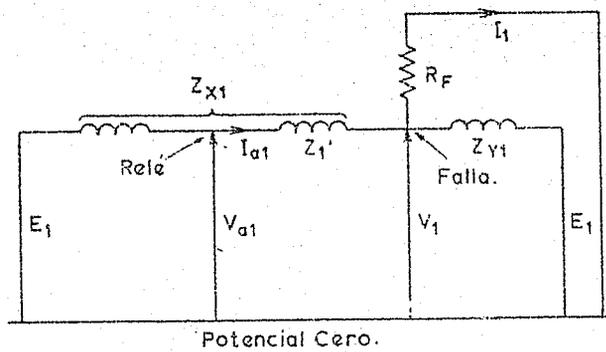


Figura 4 d



Figuras 4d.

CORTOS CIRCUITOS TRIFÁSICOS.

Para una falla trifásica la red de secuencia positiva será la mostrada en la Fig. 4d para la fase a. Para una falla trifásica solo existen valores de secuencia positiva, ya que se considera una falla balanceada. R_F es la resistencia en el corto circuito, y es te valor es de fase a neutro en cada fase.

De la Fig. 4d podemos escribir:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + R_F}$$

$$I_{a1} = \frac{Z_{Y1} I_1}{Z_{Y1} + Z_{X1}} = C_1 I_1 = \frac{C_1 E_1}{Z_1 + R_F}$$

$$V_1 = I_1 R_F = \frac{E_1 R_F}{Z_1 + R_F}$$

$$V_{a1} = V_1 + I_{a1} Z_1' = \frac{E_1 R_F}{Z_1 + R_F} + \frac{C_1 E_1 Z_1'}{Z_1 + R_F}$$

Hagamos: $\frac{E_1}{Z_1 + R_F} = \frac{1}{K}$

De donde tendremos: $K I_{a1} = C_1$

$$K V_{a1} = R_F + C_1 Z_1'$$

Y como no hay cantidades de secuencia cero y -
negativa para una falla trifásica:

$$K I_{a2} = 0$$

$$K I_{a0} = 0$$

$$K V_{a2} = 0$$

$$K V_{a0} = 0$$

Entonces las corrientes de fase y los voltajes
serán:

$$K I_a = K I_{a1} + K I_{a2} + K I_{a0} = C_1$$

$$K I_b = a^2 K I_{a1} + a K I_{a2} + K I_{a0} = a^2 C_1$$

$$K I_c = a K I_{a1} + a^2 K I_{a2} + K I_{a0} = a C_1$$

$$K V_a = K V_{a1} + K V_{a2} + K V_{a0} = R_F + C_1 Z_1'$$

$$K V_b = a^2 K V_{a1} + a K V_{a2} + K V_{a0} = a^2 (R_F + C_1 Z_1')$$

$$KV_c = aKV_{a1} + a^2KV_{a2} + KV_{a0} = a(R_F + C_1Z_1')$$

Si tenemos transformadores de corriente en conexión delta:

$$K(I_a - I_b) = (1 - a^2)C_1$$

$$K(I_b - I_c) = (a^2 - a)C_1$$

$$K(I_c - I_a) = (a - 1)C_1$$

Los voltajes de fase a fase serán:

$$KV_{ab} = K(V_a - V_b) = (1 - a^2)(R_F + C_1Z_1')$$

$$KV_{bc} = K(V_b - V_c) = (a^2 - a)(R_F + C_1Z_1')$$

$$KV_{ca} = K(V_c - V_a) = (a - 1)(R_F + C_1Z_1')$$

CORTOS CIRCUITOS DE FASE A FASE

La Fig. 4d muestra una red de secuencia positiva para una falla entre fases "b" y "c". En donde:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + R_F} = \frac{E_1}{2Z_1 + R_F}$$

Supongamos que $Z_2 = Z_1$. Usemos la misma relación que en fallas trifásicas:

$$\frac{1}{K} = \frac{E_1}{2Z_1 + R_F}$$

Aún cuando los valores de R_F por ser falla entre fases pueden ser diferentes, ya que según el señor A.R. Van C. Warrington, este valor será:

$$R_{arco} = \frac{8750}{1.4}$$

l es la longitud del arco en pies, sin viento.

I es la corriente de falla.

Si el arco dura más de 1 segundo:

$$R_{\text{arco}} = \frac{8750 (S + 3ut)}{I^{1.4}}$$

S es la separación entre conductores en pies.

u la velocidad del viento en millas por hora.

t el tiempo en segundos.

De la Fig. 4d:

$$V_1 = (I_1 - I_2) \frac{R_F}{2} - I_2 Z_2$$

$$= I_1 R_F + I_1 Z_1 \text{ ya que } I_2 = -I_1 \text{ y } Z_2 = Z_1$$

$$V_{a1} = V_1 + I_{a1} Z_1'$$

$$= I_1 (R_F + Z_1 + C_1 Z_1') \text{ y como } I_{a1} = C_1 I_1 \text{ Tenemos:}$$

$$= \frac{1}{K} (R_F + Z_1 + C_1 Z_1')$$

$$KV_{a1} = R_F + Z_1 + C_1 Z_1'$$

$$V_2 = -I_2 Z_2 = I_1 Z_1$$

$$V_{a2} = V_2 + I_{a2} Z_2'$$

En Líneas de Transmisión $Z_2' = Z_1'$ y por definición $I_{a2} = C_2 I_2$.

Y tendremos:

$$V_{a2} = I_1 Z_1 + C_2 I_2 Z_1'$$

Como hemos supuesto que:

$$C_2 I_2 = - C_1 I_1$$

Deducimos que:

$$V_{a2} = I_1 Z_1 - C_1 I_1 Z_1'$$

$$= I_1 (Z_1 - C_1 Z_1')$$

$$KV_{a2} = Z_1 - C_1 Z_1'$$

Como por definición $I_{a1} = C_1 I_1$,

$$KI_{a1} = C_1$$

Asimismo $I_{a2} = - I_{a1}$,

$$KI_{a2} = - KI_{a1} = - C_1$$

En este tipo de fallas no tendremos cantidades de secuencia cero:

$$KV_{a0} = 0$$

$$KI_{a0} = 0$$

Siguiendo los mismos procedimientos que en fallas trifásicas, encontramos los valores de voltaje y corriente. En la misma forma podemos proceder para fallas de fase a tierra. Los resultados se muestran en las tablas I y II.

TABLA I.-VALORES DE CORRIENTE EN VARIOS TIPOS DE FALLA.

Valores en el relé	Trifásica	Entrefases "b" y "c"	Fase "a" a tierra.
KI_{a1}	C_1	C_1	C_1
KI_{a2}	0	$-C_1$	C_1
KI_{a0}	0	0	C_0
KI_a	C_1	0	C_0+2C_1
KI_b	a^2C_1	$(a^2-a)C_1$	C_0-C_1
KI_c	aC_1	$-(a^2-a)C_1$	C_0-C_1
$K(I_a-I_b)$	$(1-a^2)C_1$	$-(a^2-a)C_1$	$3C_1$
$K(I_b-I_c)$	$(a^2-a)C_1$	$2(a^2-a)C_1$	0
$K(I_c-I_a)$	$(a-1)C_1$	$-(a^2-a)C_1$	$-3C_1$
$K(I_a+I_b+I_c)$	0	0	$3C_0$
K	$\frac{Z_1+R_F}{E_1}$	$\frac{2Z_1+R_F}{E_1}$	$\frac{2Z_1+Z_0+3R_F}{E_1}$

TABLA II.-VALORES DE VOLTAJE DURANTE VARIOS TIPOS DE FALLA.

Valores en el Relé.	Trifásica.	Entrefases "b" y "c"	Fase "a" a tierra.
KV_{a1}	$C_1 Z_1' + R_F$	$C_1 Z_1' + Z_1 R_F$	$C_1 Z_1' + Z_1 + Z_0 + 3R_F$
KV_{a2}	0	$Z_1 - C_1 Z_1'$	$C_1 Z_1' - Z_1$
KV_{a0}	0	0	$C_0 Z_0' - Z_0$
KV_a	$C_1 Z_1' + R_F$	$2Z_1 + R_F$	$2C_1 Z_1' + C_0 Z_0' + 3R_F$
KV_b	$a^2(C_1 Z_1' + R_F)$	$(a^2 - a)C_1 Z_1' - Z_1 + a^2 R_F$	$-C_1 Z_1' + (a^2 - a)Z_1 + (a^2 - 1)Z_0 + C_0 Z_0' + 3a^2 R_F$
KV_c	$a(C_1 Z_1' + R_F)$	$(a - a^2)C_1 Z_1' - Z_1 + a R_F$	$-C_1 Z_1' + (a - a^2)Z_1 + (a - 1)Z_0 + C_0 Z_0' + 3a R_F$
$K(V_a - V_b)$	$(1 - a^2)(C_1 Z_1' + R_F)$	$(a - a^2)C_1 Z_1' + 3Z_1 + (1 - a^2)R_F$	$3C_1 Z_1' - (a^2 - a)Z_1 - (a^2 - 1)(Z_0 + 3R_F)$
$K(V_b - V_c)$	$(a^2 - a)(C_1 Z_1' + R_F)$	$2(a^2 - a)C_1 Z_1' + (a^2 - a)R_F$	$2(a^2 - a)Z_1 + (a^2 - a)(Z_0 + 3R_F)$
$K(V_c - V_a)$	$(a - 1)(C_1 Z_1' + R_F)$	$(a - a^2)C_1 Z_1' - 3Z_1 + (a - 1)R_F$	$-3C_1 Z_1' + (a - a^2)Z_1 + (a - 1)(Z_0 + 3R_F)$
$K(V_a + V_b + V_c)$	0	0	$3(C_0 Z_0' - Z_0)$
K	$\frac{Z_1 + R_F}{E_1}$	$\frac{2Z_1 + R_F}{E_1}$	$\frac{2Z_1 + Z_0 + 3R_F}{E_1}$

POWER SWING Y PÉRDIDA DE SINCRONISMO.

"Power Swing" puede describirse como oleadas de potencia que surgen después de librar un corto-circuito o bien al conectar un generador fuera de sincronismo a un sistema. La característica de un Power Swing, que llamaremos en español "penduleo de carga", es la misma en los primeros instantes a una pérdida de sincronismo, por lo tanto la característica de pérdida de sincronismo describe ambos fenómenos.

Consideremos el diagrama unifilar de la Fig. 1 en que se muestra una línea de transmisión con fuentes de generación en ambos lados, sin tomar en cuenta las estaciones 2, 3, 4 y 5 del ejemplo inicial. Sigamos representando nuestro sistema de dos generadores equivalentes. Debemos mostrar el relé cuya respuesta a la pérdida de sincronismo se va a estudiar. Cada fuente de generación puede ser un solo generador o la equivalencia de un grupo, siempre y cuando permanezca en sincronismo. Los efectos de la capacitancia en paralelo se desprecian.

La Fig. 4e nos muestra el diagrama de impedancia de secuencia positiva de fase a neutro, asimismo las corrientes de fase y el voltaje de fase a neutro. La impedancia del generador que usaremos en este circuito equivalente corresponde al 90% de la reactancia transitoria de eje directo, a la corriente nominal. Se considera que la reactancia del generador y el voltaje permanecen constantes.

La corriente, impedancia y voltaje del relé serán las siguientes:

$$I = \frac{E_A - E_B}{Z_A + Z_L + Z_B}$$

$$V = E_A - IZ_A = E_A - \frac{(E_A - E_B)Z_A}{Z_A + Z_L + Z_B}$$

$$\frac{V}{I} = Z \frac{E_A}{E_A - E_B} (Z_A + Z_L + Z_B) - Z_A$$

Si tomamos E_B como referencia y suponemos que E_A va adelante un ángulo θ , y la magnitud de E_A la hacemos igual a nE_B , en que n es una cantidad escalar, tendremos:

$$\frac{E_A}{E_A - E_B} = \frac{n(\cos \theta + j \sin \theta)}{n(\cos \theta + j \sin \theta) - 1}$$

Resultando esta ecuación en la siguiente forma:

$$\frac{E_A}{E_A - E_B} = \frac{n[(n - \cos \theta) - j \sin \theta]}{(n - \cos \theta)^2 + \sin^2 \theta}$$

Para un caso especial en donde $n = 1$, la ecuación será:

$$\frac{E_A}{E_A - E_B} = \frac{1}{2} (1 - j \cot \frac{\theta}{2})$$

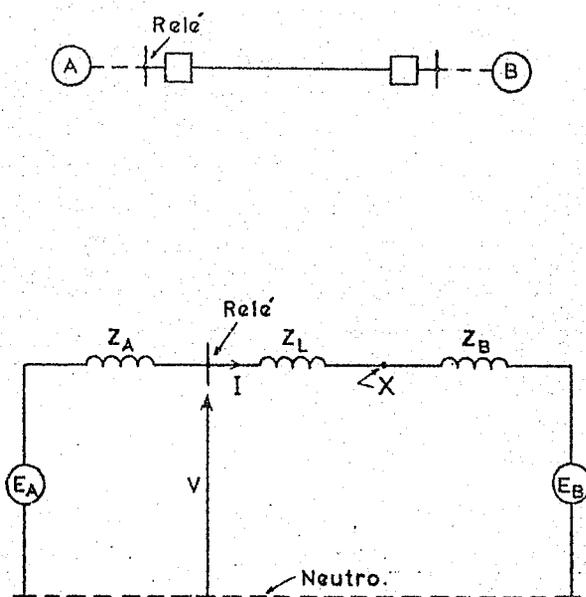
Y, Z será:

$$Z = \frac{Z_A + Z_L + Z_B}{2} (1 - j \cot \frac{\theta}{2}) - Z_A$$

Este valor de Z se muestra sobre el diagrama $R-X$ de la figura 4f para un valor de θ menor de 180° . El punto F será entonces un punto sobre la característica de pérdida de sincronismo. Cálculos iguales para diferentes valores de θ nos demostrarán que todos los puntos de la característica de pérdida de sincronismo se encuentran sobre la línea PP' , que es un bisector perpendicular a la línea recta que conecta A y B .

La característica de pérdida de sincronismo ha sido expresada en términos de la relación de voltaje a neutro a la correspondiente corriente de fase. Bajo -- condiciones balanceadas trifásicas que existen durante pérdida de sincronismo, esta relación es exactamente -- igual a la relación de voltaje delta a corriente delta, que se usó en la descripción de cortos-circuitos.

Entonces, estamos autorizados a sobreponer características de pérdida de sincronismo, de corto circuito y de relés de distancia sobre el mismo diagrama R-X. Por ejemplo, una falla trifásica (X de la figura 4e) sobre la línea protegida, es vista por un relé de distancia como el punto Z_L como se muestra en la figura 4f.



Figuras 4e.

En la intersección de la línea de pérdida de sincronismo FP' con la línea de impedancia del sistema representa también un punto de una falla trifásica. En otras palabras, hay un instante durante la pérdida de sincronismo, en que las condiciones son exactamente iguales a la de una falla trifásica en el punto medio, eléctricamente hablando entre los extremos del sistema. Este punto se llama "centro eléctrico" o "centro de impedancia" del sistema. Este punto estará exactamente a la mitad, si todas las impedancias tienen la misma relación X/R , es decir si están sobre una misma línea. El punto en donde la característica de pérdida de sincronismo corta la línea de impedancia AR es aquel cuando el generador A avanza 180° adelante del generador B .

Como se muestra en la Fig. 4g el punto F para cualquier ángulo θ entre los generadores puede encontrarse gráficamente trazando una línea recta desde una de las terminales de la línea de impedancia a un ángulo $(90^\circ - \theta/2)$, el punto F es la intersección de esta línea recta con la característica de pérdida de sincronismo. Cuando θ es 90° P se encuentra en un círculo cuyo diámetro es la línea de impedancia AB . No hay que olvidar esto, ya que es un método sencillo para localizar un punto que corresponde aproximadamente a la máxima transferencia de carga.

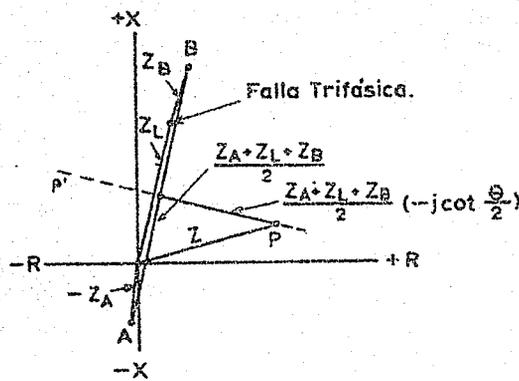


Figura 4 f.

El círculo en línea discontinuada A, B, P', P y P'', es interesante ya que todos los puntos a la derecha de la línea AB, como P', P y P'' son para el mismo ángulo θ de adelanto del generador A sobre el generador B, esto puede comprobarse trazando líneas desde cualquier punto de la circunferencia hacia A y B, los ángulos de estas líneas deben ser iguales.

Otro aspecto interesante de los diagramas de la figura 4h es que $P'A/P'B = n$. De aquí deducimos un método sencillo para trazar gráficamente la característica de pérdida de sincronismo para cualquier valor de n , con un compás se pueden localizar estos 3 puntos, y fácilmente podemos trazar la circunferencia deseada.

Podemos asimismo, obtener la expresión matemática que nos determina completamente el círculo, o sea el centro y el radio, para lo cual supongamos los dos posibles puntos de P' sobre la línea B y su prolongación como se muestra en la figura 4i y solo resta obtener

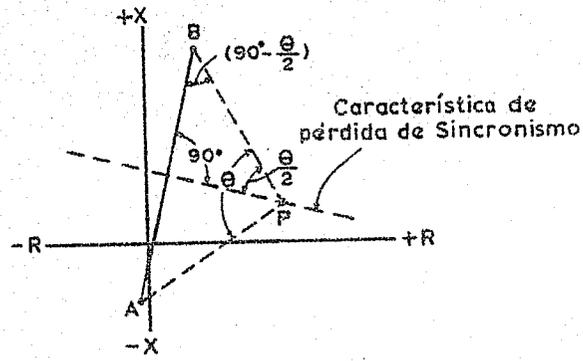


Figura 4 g.

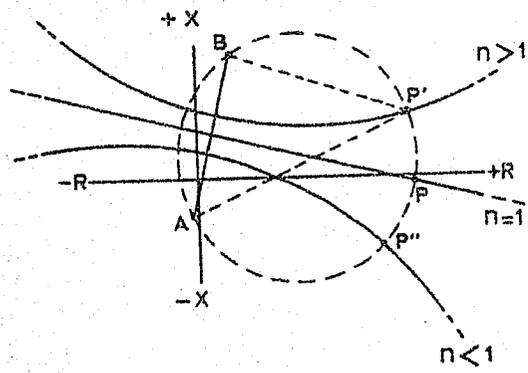


Figura 4 h.

ner el círculo que satisfaga la relación $P'A/P'B = n$ para los dos puntos. Si Z_T es la impedancia total del sistema entonces para $n = 1$, la distancia de B al centro del círculo será:

$$\frac{Z_T}{n^2 - 1}$$

Y el radio del círculo será:

$$\frac{nZ_T}{n^2 - 1}$$

Ver figura 4i.

Los círculos para $n = 1$ son simétricos a los de $n = 1$, pero con su centro adelante de A.

La construcción de la característica de pérdida de sincronismo se complica si tomamos en cuenta el efecto de la capacitancia en paralelo.

El desarrollo anterior de la característica de pérdida de sincronismo fué para el caso especial de $n = 1$. En la mayoría de los casos la característica que resulta de esta suposición es suficiente para entender la respuesta de los relés de distancia en los casos de pérdida de sincronismo. Sin embargo es más conveniente considerar casos generales en donde n sea mayor o menor que la unidad.

Todas las características de pérdida de sincronismo son círculos que tienen su centro a lo largo de la línea de impedancia. La característica cuando $n = 1$ es un círculo de radio infinito. Cualquiera de estas características puede ser obtenida por cálculos sucesivos, si suponemos un valor para n y hacemos variar θ de 0° a 360° en la fórmula:

$$Z = (Z_A + Z_L + Z_B) n \frac{(n - \cos \theta) - j \sin \theta}{(n - \cos \theta)^2 + \sin^2 \theta} - Z_A$$

O bien podemos manipular la fórmula matemática y encontrar expresiones del círculo que nos den el diámetro y las coordenadas del centro para cualquier valor de n . La Fig. 4h muestra 3 características de pérdidas de sincronismo, para $n > 1$, $n = 1$ y $n < 1$.

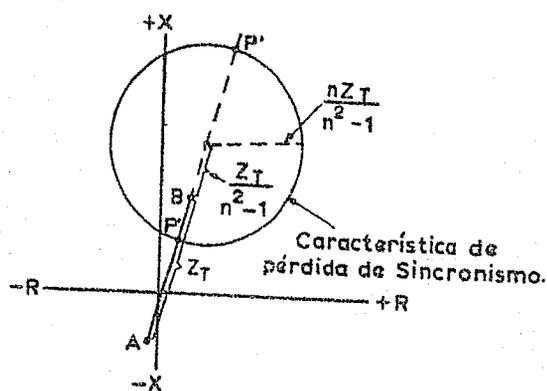


Figura 4i.

Posteriores autores han ahondado en este concepto y han desarrollado curvas para diferentes relaciones de E_A/E_B . En estos trabajos se ha comprobado que la impedancia aparente durante condiciones fuera de sincronismo siguen un círculo definido para cada valor E_A/E_B . Aunque repitamos conceptos, conviene hacer énfasis en algunos que son sumamente importantes. Estos círculos tienen su centro en la línea de impedancia del sistema con radios y traslaciones determinados por los diferentes valores de esta relación de voltajes. Estas características circulares son dibujadas en la figura 4j, nótese que el caso específico de $E_A/E_B=1.0$ es un límite lógico del incremento circular (el radio y la traslación son infinitos en este caso). NCTA: se han supuesto ciertas simplificaciones las más importantes son:

- 1).-El sistema puede ser representado por un solo circuito entre la Planta A y la Planta B.
- 2).-El voltaje efectivo de excitación permanece constante.
- 3).-Las impedancias de las máquinas permanecen constantes.

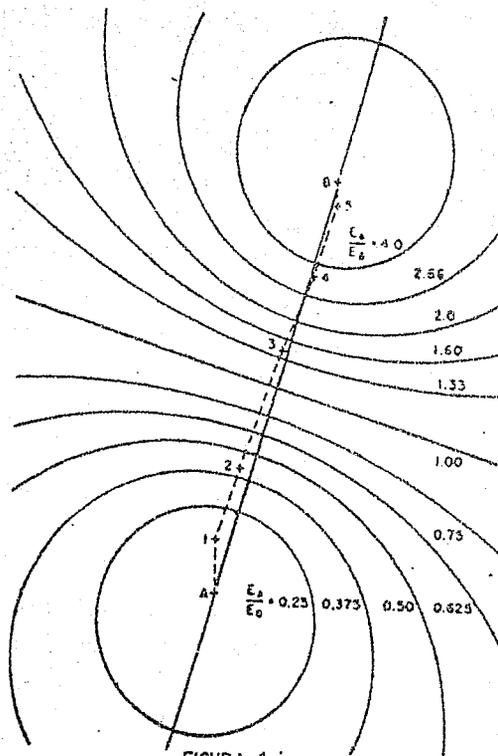


FIGURA 4 j
CIRCULOS EN RELACION
DE VOLTAJE CONSTANTE

Las matemáticas y las curvas para un caso general han sido resumidas y presentadas en un escrito por la Srta. Edith Clarke en el que presenta otra serie de curvas a las cuales debemos prestarles atención. Estas curvas representan iguales separaciones angulares. Si la separación angular de las 2 máquinas permanece constante mientras que la relación de voltajes varía, la impedancia aparente será un sector de una circunferen-

cia que pase a través de A y B y cuyo centro caiga sobre el bisector perpendicular a la línea de impedancia del sistema. El radio y los centros de estas circunferencias son determinados por la separación angular de A y B. Estos círculos son mostrados en la Fig.4k. La línea A-B es una porción de un círculo que tiene un radio infinito el cual representa una separación de 0° y 180° y sirve como referencia para separar las partes de circunferencia teniendo 180° de diferencia entre los lados de la derecha y la izquierda, es decir, si a la derecha es 90° a la izquierda tendrá una separación de 270° .

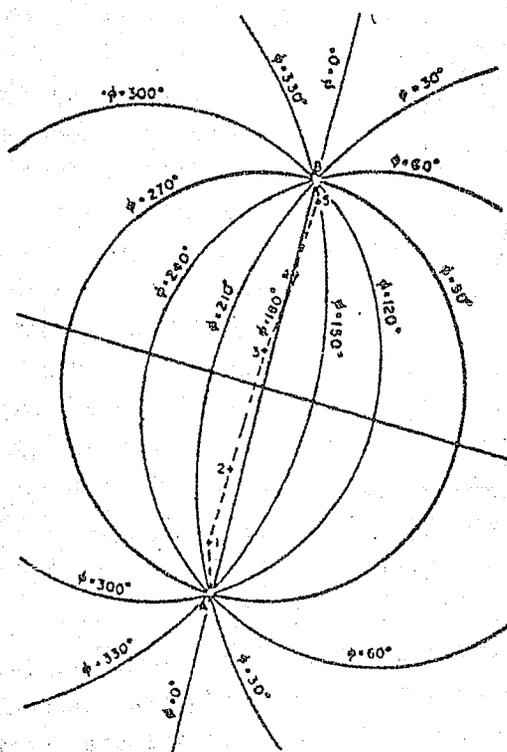


FIGURA 4 k
CARACTERÍSTICA DE SEPARACION
ANGULAR CONSTANTE.

Los comentarios siguientes serán más claros si consideramos el diagrama por unidad de la Fig.41, el cual reduce el tiempo de cálculo según el escrito de Miss Clarke. Para usar este diagrama es necesario girar el eje vertical hasta que coincida con el ángulo de impedancia del sistema. No existe en la actualidad una discusión detallada de este diagrama; para entenderlo nos ayudarán 2 casos generales, para el primero $EA/EB=1.0$ es decir nuestra característica de oscilación es la línea horizontal. Supongamos que empieza nuestra oscilación cuando A va adelante de B 25° , tracemos una trayectoria en donde:

a- 25° , b- 45° , c- 90° , d- 180° y e- 330° . Aparte tracemos otra trayectoria en que $EA/EB=C.5$. Cuando existe una separación de C° , la máquina A "vé" que es predominante -K (punto F de la Fig.41). La experiencia nos mostrará que para la máquina B aparece como si fuera una carga inductiva. Podemos ahora trazar puntos alrededor de este círculo para varios ángulos: G- 25° , H- 45° , K- 90° , M- 180° , N- 340° . Antes que terminemos con este diagrama revisemos brevemente el círculo de 90° de separación, que tiene su centro en el centro de impedancia del sistema y pasa por A y B. Para cualquier valor de EA/EB , la impedancia aparente del sistema debe pasar a través de este círculo cuando el ángulo de separación alcance y pase los 90° . El cual es importante porque indica un límite aproximado de separación angular para oscilaciones de potencia, sin que se excedan los límites de estabilidad, en estado estable. Además este círculo es fácil de recordarse.

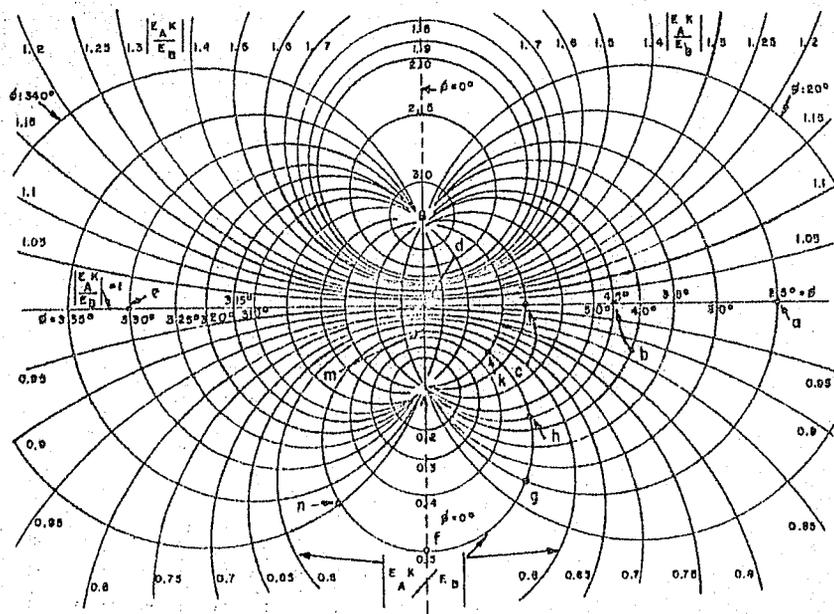


Figura 4 l.

ESTUDIO DE LA RELACION DE CARACTERISTICAS DE RELES Y -
CONDICIONES DEL SISTEMA EN DIAGRAMA R-X.

A continuación estudiaremos la representación gráfica de diversas clases de fallas y la forma en que son "vistas" por relés de distancia, usando como herramienta, el diagrama R-X. Empezaremos con falla entre - fases.

La Fig. 5a es un diagrama de impedancia con resistencia y reactiva en un plano "R-X". La línea AB es un vector que representa la impedancia verdadera (secuencia positiva) de la línea de transmisión protegida en donde F es la localización de la falla. Las líneas AS y EL representan la impedancia total del sistema atrás del relé o antes del relé y más allá de la línea protegida respectivamente y puede ser calculada fácilmente por el conocimiento de las corrientes de corto-circuito en las terminales A y B de la línea, deduciendo la corriente que fluye a través de la línea.

La impedancia medida por el relé en las fases 2 y 3 falladas (despreciando la resistencia de arco), está representada por la línea AF que es la impedancia de secuencia positiva y de fase a neutro de la línea entre el relé y la falla, a la que nos referimos como la impedancia verdadera. El relé de la fase 3-1 ve una impedancia, la cual está adelantada a la impedancia verdadera, y el relé de la fase 1-2 una impedancia atrasada, las cuales se obtienen en la siguiente forma:

Juntando SF y dibujando líneas desde S, formando 60° en cada lado de SF, hasta encontrar las perpendiculares a SF trazadas desde F hasta M y N. AM será la impedancia vista por el relé 3-1 y AN la impedancia vista por el relé 1-2.

En la Fig. 5b, y en todos los diagramas subse-

cuentas la resistencia de arco está considerada, pero con el objeto de simplificar la explicación, todas las impedancias del sistema son consideradas que están en el mismo ángulo de fase, es decir el sistema es homogéneo y los puntos B, A, H y I están en la misma línea recta. Como se mostró en el párrafo anterior y en la Fig. 5a, si el ángulo de fase no es uniforme en todo el sistema, es necesario solamente dibujar la línea SF.

SF está trazada a 60° adelantándose a SF, como en la Fig. 5a, pero la resistencia de arco R_p/C es suada a 60° adelantada al eje "R" así que la impedancia total Z'_{31} vista por el relé de la fase 3-1 es el vector SF. Z'_{12} se encuentra de una manera similar, pero usando un defasamiento de 60° atrasado. Por el trazado de las perpendiculares desde A en lugar de F los puntos H_A y H_B pueden ser encontrados, los cuales dan las impedancias para una falla en el relé localizado en A. La edición de la resistencia de arco localiza los puntos Z'_{31} y Z'_{12} de manera que ahora han sido localizados cuatro puntos los cuales definen las áreas de falla: - estas áreas están sombreadas en la Fig. 5c y muestran su relación con las áreas típicas de disparo del relé, las cuales serán utilizadas más adelante.

La resistencia de arco está expresada como R_p/C en lugar de R_p debido a que solamente la fracción C de la corriente de falla fluye a través del relé; el resto viene desde la sección de la línea en el otro lado del arco.

Relés de tierra con falla de línea a línea, Figs. 5d y 5c.

El procedimiento para las Figs. 5d y 5c es casi el mismo que el usado en las Figs. 5b y 5c. Los diagramas

tanto un poco menos conveniente que el anterior y es -
como sigue:

Dibuje una línea FM a través de F y en ángulo recto a SP de tal manera que $FM = FN = \sqrt{3} Z_n/C'$. -
Trace $MT = \sqrt{3} Z_o/C'$ adelantándose a SP por 30° y trace $NW = \sqrt{3} Z_o/C'$, atrasándose a SP por 30° . Finalmente dibuje la componente de la resistencia de arco $\sqrt{3} RF/C'$ en T , adelantándose al eje R por 30° y dibuje $\sqrt{3} RF/C'$ en W , atrasándose con respecto al eje R por 30° .

Se notará que este diagrama fué dibujado con una escala más pequeña debido a que la cantidad $\sqrt{3} RF/C'$ es muy grande para la misma escala por usar.

Relés de fase con una falla doble a tierra Fig. 5j.

Un relé de fase mide la impedancia verdadera a la falla, y es el que está asociado con las dos fases incluídas en la doble falla a tierra. Las expresiones para las impedancias medidas por los otros dos relés son muy complicadas para ser mostradas gráficamente, pero ya que las componentes de secuencia cero de la corriente y potencial tienden a cancelarla, debido a las conexiones en delta del relé, la impedancia medida por los relés será similar para una falla de línea a línea, Fig. 5b. Esta consideración será verificada más tarde cuando se realice el análisis matemático. En la Fig. 5j un caso típico se ha elaborado en el cual se puede ver que las impedancias Z'_{31} y Z'_{12} son prácticamente las mismas que la Fig. 5b, tomando en cuenta el cambio de escala.

Relés de tierra con una falla doble a tierra, Fig. 5k y 5l.

mas son similares excepto por los siguientes puntos: -
 (a) que el ángulo al cual S_1 y S_2 forman desde SF es de 30° en esta ocasión y (b) la resistencia de arco es menor por la razón $\sqrt{3}$ y está trazada a 30° con el eje R . Estas relaciones y ángulos están resumidos para las diferentes fallas en la tabla. Z'_{12} es la impedancia presentada al relé de la fase 1, es infinito y por lo tanto no se muestra en las Figs. 5a y 5b.

Relés de fase con fallas de línea a tierra, Figs. 5f y 5g.

La Fig. 5f muestra la impedancia producida por una falla a tierra cuando es vista por los relés de fase. Las líneas S_1 y S_2 están dibujadas a 30° en cada lado de SF , como en la Fig. 5d pero ellas están ahora prolongadas hasta 1 y 2 por la componente de secuencia cero $Z_0/C \sqrt{3}$ debido al circuito de tierra que es incluido. La resistencia de arco es entonces añadida cuando aparece al relé, y es $\sqrt{3} R_0/C$, a 30° desde el eje R (vea la tabla). Z'_{23} no está mostrada debido a que es infinita.

Relés de tierra con una falla de línea a tierra, Figs. 5h y 5i.

En este caso la corriente del relé es una mezcla de la corriente residual y de fase y el valor C es reemplazado por un valor híbrido el cual se puede llamar C' y que es:

$$\frac{C - C_0 Z'_0}{Z'_p} = C'$$

Esto significa que SM y SN ya no son más grandes a 30° ó 60° desde SF pero el ángulo depende de los valores relativos de C y C_0 . La construcción es por lo

Aquí otra vez la impedancia medida por los relés en las dos fases sin fallar es también compleja para mostrarla gráficamente, pero más tarde se podrá mostrar que en una fase el relé mide una reactancia igual o mayor que la reactancia verdadera a la falla, mientras que el relé en la otra fase mide una reactancia igual o menor que el valor real. Aquí hemos mencionado la reactancia debido a que los relés de impedancia y ϕ son raramente usados para fallas a tierra tomando en cuenta su vulnerabilidad a la resistencia de falla la cual puede ser muy alta en fallas a tierra. El ejemplo de la Fig. 6A fué calculada para un amplio rango de condiciones y muestra la comparación de las impedancias medidas con la impedancia real Z_F . La Fig. 5e muestra las áreas de falla de impedancia vista por los relés bajo el mismo rango de condiciones, para fallas en toda la sección.

Refiriéndose a los diagramas vectoriales, Figs. 5m y 5n, muestran porqué un relé mide más reactancia y el otro mide menos. En la Fig. 5m, la cual representa el caso general donde C y C_0 son comparables en magnitud, el potencial V'_2 del relé se ve que casi está en fase con la corriente I'_2 de tal manera que la reactancia medida por el relé de la fase 2 es pequeña y el relé tendrá sobrealcance; el potencial V'_3 del relé, sin embargo se adelanta a su corriente I'_3 por un ángulo considerable de tal manera que su impedancia medida es grande y el relé tendrá un alcance real menor, la impedancia verdadera será aproximadamente la mitad del potencial V'_{23} dividido por una de las componentes I'_ϕ . I'_ϕ es la corriente que podrá fluir entre los conductores si la tierra no está incluida.

La Fig. 5n representa el caso en donde el neutro aterrizado de un transformador se encuentra cerca, pero con generación pequeña, de manera de que C es pe-

mas son similares excepto por los siguientes puntos -
 (a) que el ángulo el cual SF y SN forman desde SF es -
 de 30° en esta ocasión y (b) la resistencia de arco es
 menor por la razón $\sqrt{3}$ y está trazada a 30° con el e-
 je R. Estas relaciones y ángulos están resumidos para
 las diferentes fallas en la tabla. Z'_{12} es la impedan-
 cia presentada al relé de la fase 1, es infinito y por
 lo tanto no se muestra en las Figs. 5a y 5b.

Relés de fase con fallas de línea a tierra, Figs. 5f y
5g.

La Fig. 5f muestra la impedancia producida por
 una falla a tierra cuando es vista por los relés de fa-
 se. Las líneas SF y SN están dibujadas a 30° en cada -
 lado de SF, como en la Fig. 5d pero ellas están ahora
 prolongadas hasta T y B por la componente de secuencia
 cero $Z_0/C \sqrt{3}$ debido al circuito de tierra que es in-
 cluido. La resistencia de arco es entonces añadida -
 cuando aparece al relé, y es $\sqrt{3} R_p/C$, a 30° desde
 el eje R (vea la tabla). Z'_{23} no está mostrada debi-
 do a que es infinita.

Relés de tierra con una falla de línea a tierra, Figs.
5h y 5i.

En este caso la corriente del relé es una mez-
 cla de la corriente residual y de fase y el valor C es
 reemplazado por un valor híbrido el cual se puede lla-
 mar C' y que es:

$$C - C_0 \frac{Z'_0}{Z'_p} = C'$$

Esto significa que SM y SN ya no son más gran-
 des a 30° ó 60° desde SF pero el ángulo depende de los
 valores relativos de C y C_0 . La construcción es por lo

tanto un poco menos conveniente que el anterior y es -
como sigue:

Dibuje una línea FM a través de F y en ángulo recto a SF de tal manera que $FM = FN = \sqrt{3} Z_n/C'$. -
Trace MT = $\sqrt{3} Z_o/C'$ adelantándose a SF por 30° y
trace NW = $\sqrt{3} Z_o/C'$, atrasándose a SF por 30° . Fi-
nalmente dibuje la componente de la resistencia de ar-
co $\sqrt{3} RF/C'$ en T, adelantándose al eje R por 30° y
dibuje $\sqrt{3} RF/C'$ en W, atrasándose con respecto al
eje R por 30° .

Se notará que este diagrama fué dibujado con una escala más pequeña debido a que la cantidad $\sqrt{3} RF/C'$ es muy grande para la misma escala por usar.

Relés de fase con una falla doble a tierra Fig. 5j.

Un relé de fase mide la impedancia verdadera a la falla, y es el que está asociado con las dos fases incluídas en la doble falla a tierra. Las expresiones para las impedancias medidas por los otros dos relés son muy complicadas para ser mostradas gráficamente, pero ya que las componentes de secuencia cero de la corriente y potencial tienden a cancelarla, debido a las conexiones en delta del relé, la impedancia medida por los relés será similar para una falla de línea a línea, Fig. 5b. Esta consideración será verificada más tarde cuando se realice el análisis matemático. En la Fig. 5j un caso típico se ha elaborado en el cual se puede ver que las impedancias Z'_{31} y Z'_{12} son prácticamente las mismas que la Fig. 5b, tomando en cuenta el cambio de escala.

Relés de tierra con una falla doble a tierra, Fig. 5k y 5l.

Aquí otra vez la impedancia medida por los relés en las dos fases sin fallar es también compleja para mostrarla gráficamente, pero más tarde se podrá mostrar que en una fase el relé mide una reactancia igual o mayor que la reactancia verdadera a la falla, mientras que el relé en la otra fase mide una reactancia igual o menor que el valor real. Aquí hemos mencionado la reactancia debido a que los relés de impedancia y ϕ son raramente usados para fallas a tierra tomando en cuenta su vulnerabilidad a la resistencia de falla la cual puede ser muy alta en fallas a tierra. El ejemplo de la Fig. 6A fué calculada para un amplio rango de condiciones y muestra la comparación de las impedancias medidas con la impedancia real AF. La Fig. 5e muestra las áreas de falla de impedancia vista por los relés bajo el mismo rango de condiciones, para fallas en toda la sección.

Refiriéndose a los diagramas vectoriales, Figs. 5m y 5n, muestran porqué un relé mide más reactancia y el otro mide menos. En la Fig. 5m, la cual representa el caso general donde C y C_0 son comparables en magnitud, el potencial V'_2 del relé se ve que casi está en fase con la corriente I'_2 de tal manera que la reactancia medida por el relé de la fase 2 es pequeña y el relé tendrá sobrealcance; el potencial V'_3 del relé, sin embargo se adelanta a su corriente I'_3 por un ángulo considerable de tal manera que su impedancia medida es grande y el relé tendrá un alcance real menor, la impedancia verdadera será aproximadamente la mitad del potencial V'_{23} dividido por una de las componentes I'_ϕ . I'_ϕ es la corriente que podrá fluir entre los conductores si la tierra no está incluida.

La Fig. 5n representa el caso en donde el neutro aterrizado de un transformador se encuentra cerca, pero con generación pequeña, de manera de que C es pe-

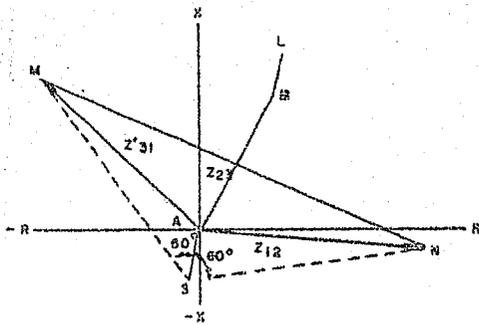


Fig. 5a-Impedancia vista por relés de fases en falla entre fases 2 y 3.

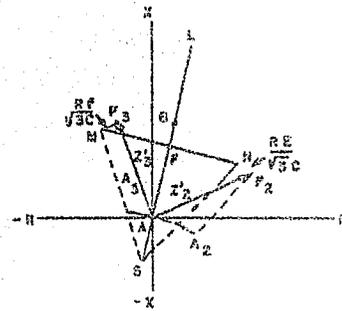


Fig. 5d-Impedancia vista por relés de tierra en falla entre fases.

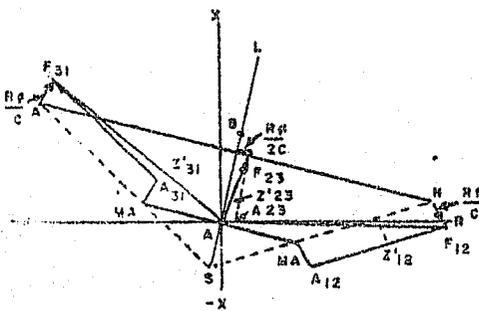


Fig. 5b-Igual que 5a. sólo que una línea homogénea.

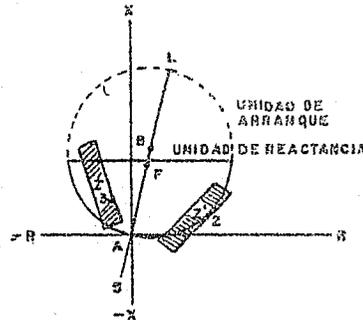


Fig. 5e-Características de relés de tierra en falla entre fases.

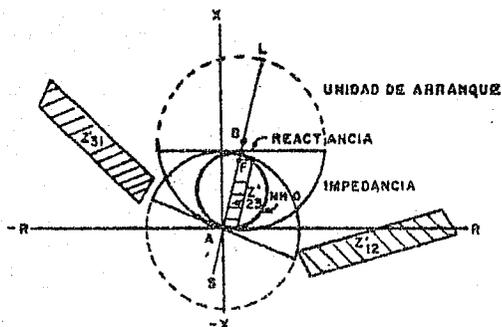


Fig. 5c-Diagrama características de relés de fases con falla entre fases.

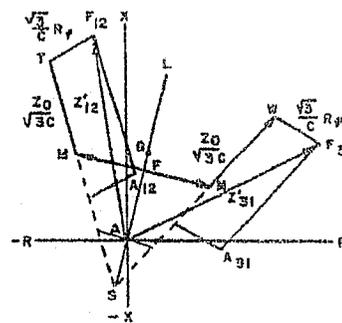


Fig. 5f-Impedancia vista por relés de fases en falla a tierra.

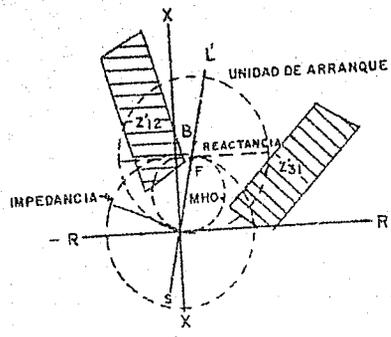


Fig. 5h-Características de relés de fases en falla a tierra.

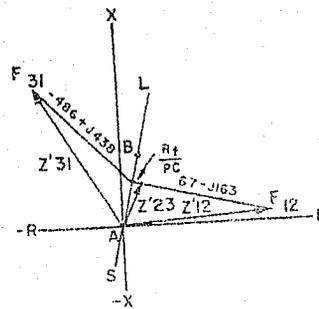


Fig. 5k-Impedancia en doble falla a tierra.

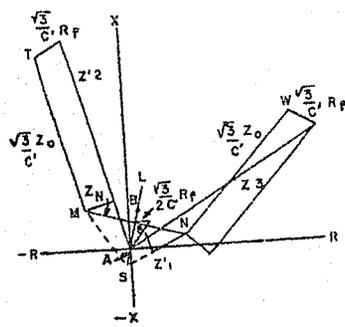


Fig. 5i-Impedancia vista por relés de tierra en falla de fase a tierra.

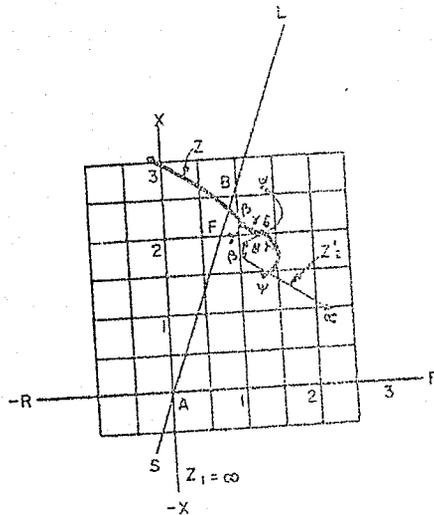


Fig. 5l-Impedancia vista por relés de tierra en doble falla a tierra.

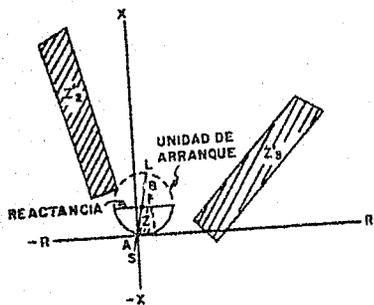


Fig. 5j-Características en relés de tierra con falla de fase a tierra.

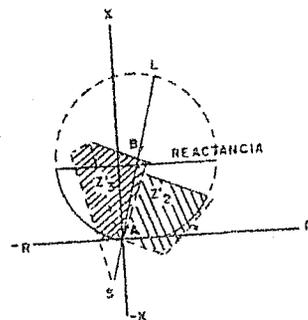


Fig. 5m-Características de relés de tierra en falla doble a tierra.

queña comparada con C_0 . En este caso se podrá ver que el relé de la fase 2 medirá una reactancia igual o mayor que la del relé de la fase 3.

Derivación de los parámetros y las constantes.

Z_0 puede ser obtenida del diagrama de impedancia del sistema. R_F puede ser estimada o puede ser calculada. C y C_0 pueden ser ambas cero ó uno en un sistema radial, pero en un sistema promedio con muchas conexiones y trayectorias en paralelo, sus valores usualmente son del orden en C.3 y C.7. C puede ser también que tenga una componente angular, por ejemplo, donde hay una alimentación con doble final con un desplazamiento de fase entre los generadores en los dos extremos, la componente angular de C está adelantada en un lado de la falla y atrasada en la otra, la suma de estos dos ángulos será igual al ángulo entre las fuentes de generación. Por ejemplo, si existen 25° entre f.e.m. generada en S y la f.e.m. generada en L, la componente angular de C podrá ser de 12° en A y 13° en B, la cual puede ser despreciada en casi todos los casos. La componente angular de C_0 puede despreciarse debido a que la única fuente de potencial de secuencia cero es la falla. En muchos casos los relés en las otras fases no operarán para fallas externas en un margen considerable, de manera que el ángulo de fase de C puede ignorarse. En un caso límite es aconsejable recalcular, tomando en cuenta el ángulo de C . En el caso del relé de tierra con fallas monofásicas a tierra el valor $C-C_0 - Z'_0/Z'_p$ es usualmente pequeña de manera que la impedancia vista por los relés de tierra en las otras fases es muy grande y no necesitan calcularse ya que los relés no operarán.

Superposición de las características del relé.

El objeto de hacer estos diagramas de impedancia, es por supuesto encontrar la forma de como responden los relés cuando una falla ocurre. Esto puede realizarse con exactitud dibujando las características del relé en el diagrama, usando la misma escala óhmica. Los relés que tienen exactitud y características consistentes serán por supuesto fáciles de manejar. En otras palabras si el relé tiene una característica circular perfecta la cual permanece en un amplio rango de corriente o potencial, el comportamiento del relé puede ser determinado al momento tomando un par de compases y dibujando el círculo. Si la característica del relé no es circular, o si varía, será necesario dibujar una familia de curvas.

Las características de relés mostradas superpuestas en algunos diagramas son aquellas de los relés típicos de distancia para líneas cortas y largas. El relé para línea larga es un relé cuyo característica circular es la más pequeña mostrada entre el origen A (localización del relé) y la falla F. La característica pequeña del relé es mejor para líneas largas debido a que es poco probable de que dispare en las oscilaciones de potencia; se mostrará más tarde que esta pequeñez es deseable en cualquier línea debido a la pequeñez de la característica, la mayor efectividad del relé está confinada al disparo únicamente de fallas dentro de la zona y la fase con la cual está asociada.

El relé característico de una línea corta es el de reactancia el cual ya fue descrito. El relé de reactancia se previene de disparar en fallas más allá del bus por una unidad de arranque direccional que es

también una unidad mho, de manera que el área del disparo es el área encerrada entre la característica de reactancia y el círculo mho mayor. Los primeros relés de reactancia (cuyas unidades direccionales o de arranque fueron polarizadas por potencial desde el otro par de fases) tienen un ángulo y un diámetro que dependen del tipo de falla y el ángulo del potencial de polarización; para tales relés el círculo de la unidad de arranque puede ser dibujado en diferentes posiciones dependiendo de las fases con las cuales los relés están asociados.

Áreas de falla.

La resistencia de arco es una función de la corriente de falla y el espaciamiento del conductor. Se ha mostrado como un valor constante en los diagramas con objeto de simplificar. En la práctica será menor en la terminal de la línea la cual tiene la corriente más fuerte de corto-circuito.

En la figura 5b el punto N indica la impedancia por el relé en la fase par 3-1 para una falla en 2-3, en el punto F, mientras el punto M_A indica la impedancia medida para una falla en A con fallas sólidas en ambos casos. Similarmente N y N_A son los valores correspondientes medidos por el relé de la fase 1-2. Los puntos F_{31} , A_{31} , F_{12} y A_{12} son los valores correspondientes para fallas con arqueos.

COMPORTAMIENTO DE LOS RELÉS DE FASE.

La figura 5c muestra las características de los relés típicos de distancia superpuestas en la figura 5b. La unidad direccional de arranque la cual limita las características de la unidad de reactancia es -

tambien una unidad mho; es aparente que ninguno de los relés de reactancia o mho pueden operar para fallas en otros pares de fases con este arreglo particular. O de otra manera, si el generador S estuviera cercano al relé A, los puntos M_A y N_A estarán cerca de A y el relé de la fase 3l puede operar. Es completamente claro que ninguno de los relés en los pares de fases no falladas tendrá sobrealcance.

Dibujando las características del relé en la figura 5f uno puede ver, en la figura 5h que una falla a tierra cercana en la fase 1 puede operar un relé de fase de distancia en las fases 1-2 y 3-1. Esto da la ventaja que los relés de fase pueden enviar disparos con gran velocidad para fallas a tierra cercanas, las cuales de otra manera serían disparadas en un tiempo muy grande por los relés residuales de tiempo inverso; la desventaja es que la tarjeta de fase mostrada en la estación A puede contradecir la tarjeta de tierra en el otro extremo de la línea y producir confusión a menos que esta condición se tome en cuenta. El relé 2-3 no tiene corriente de falla y no operará.

Cuando las tarjetas aparezcan en dos de los relés de fase en un extremo de la línea y solamente en un relé en el otro extremo, se puede pensar que una de las tarjetas falló. Una mejor explicación debe ser que ocurrió una falla doble a tierra o de fase a fase y -- que los relés trabajaron bien en cada extremo, más un relé adicional en el extremo en el cual está cerca una estación generadora, por ejemplo, donde AS es pequeña.

Comportamiento del relé de tierra.

La figura 5e muestra las áreas de falla construidas en la figura 5d con la característica de un relé de reactancia superpuesta en el diagrama. Los círculos del relé de impedancia y del relé mho no fueron trazados debido a que son raramente usados para fallas a tierra por considerar la probabilidad de una resistencia apreciable de las fallas a tierra. Se podrá ver que dos relés de reactancia a tierra pueden operar para fallas de fase a fase, con un aumento del alcance del relé adelantado y una disminución del alcance en el relé atrasado. Las figuras 5m y 5n muestran la misma tendencia en fallas dobles a tierra. Es por esta razón que se ha acostumbrado a suministrar un relé de bloqueo con los relés de distancia para fallas a tierra con el cual se evita que dispare cuando la falla incluye más de una fase. De otra manera si el relé de bloqueo fue arreglado para bloquear solamente el relé de tierra -- que haya aumentado su alcance, el otro relé puede operar correctamente pensando que no se aumentará su alcance óhmico.

PENDULEOS EN UN SISTEMA Y CARACTERISTICAS DE RELES,
EN UN DIAGRAMA R-X.

En la figura 5a, que es el diagrama R-X del sistema que hemos tomado como ejemplo (figura 4a) al que se le han sobrepuesto algunas referencias. Se muestra la línea de penduleo para $E_1/E_2=1.0$, y los segmentos de circunferencias para separación de 90° a 120° .— Además un punto P que indica la impedancia vista, para una carga de 25kW. Notemos que el origen ha sido cambiado a la estación 2.

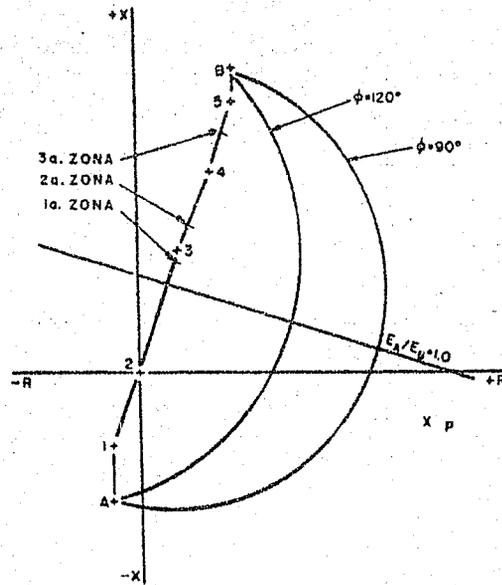


Figura 5 a.

Consideremos varios relés de distancia para --- proteger la línea entre Subestaciones 2 y 3, cada uno con la. 2a. y 3a. zonas. Las características de un relé de impedancia se muestran en la figura 5b, sobre--- puestas a nuestro ejemplo.

Nótese que el disparo de la tercera zona ocurre rá para una separación angular mayor de 90° ($E_A/E_B=1.0$) y aún para separación angular menor de 90° si --- $E_A/E_B < 1.0$.

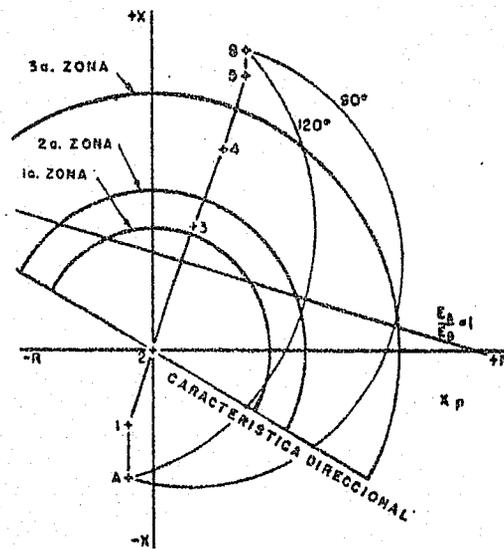


Figura 5 b

Más aún, para ciertos valores de E_1/E_2 la operación instantánea de primera zona se extiende al área de 120° . Como la separación de 120° es un límite aproximado de estabilidad transitoria para la mayoría de los sistemas de este tipo, algunas formas de bloqueo para penduleos de carga oscilaciones de potencia son casi siempre indispensables. Si quisiéramos tener bloqueo para todo el relé, encontraríamos que nuestro elemento de impedancia para bloqueo encerraría parte del área de carga (véase la figura 5c) Esto por supuesto es intolerable si esperamos tener sobrecargas considerables en esta línea ya que nuestros relés de línea estarían bloqueados continuamente durante todos los períodos de carga alta.

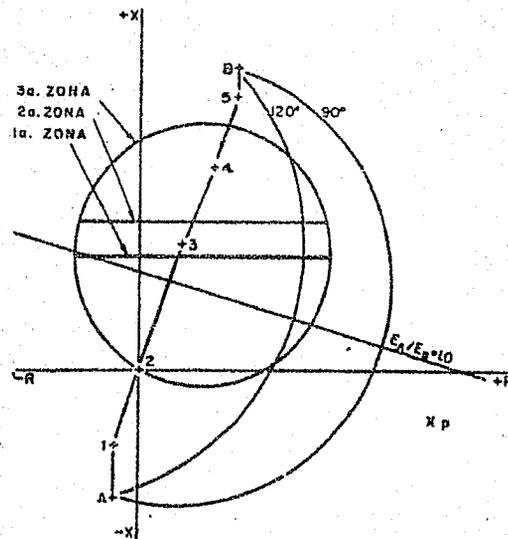


Figura 5 c

EMPRESA CENTRAL
C. S. A.

El relé de reactancia con un elemento mho de arranque se muestra sobrepuesto en el diagrama sobre el que estamos trabajando en la figura 5c. Una ojeada muestra la necesidad de limitar la unidad de arranque. Por ejemplo en flujos de carga hacia B para todos los valores prácticos de relación de tensiones (E_A/E_B), caerán en el rango de operación del elemento de reactancia. El rango de disparo del relé es limitado por las características de la unidad de arranque en tal forma que el área de disparo del relé es cambiado rápidamente hasta en las áreas de sobrecargas. Es interesante ver que la unidad de tercera zona teniendo el mismo alcance que la unidad de impedancia (véase la figura 5b) nunca cae dentro de la curva de separación de 90° ; por otro lado el relé de reactancia para esta línea es más vulnerable que el relé de impedancia a operaciones instantáneas en oscilaciones severas que se extienden en la región de 120° . Hagamos aquí una breve pausa y revisemos las causas de nuestras dificultades en aplicar un relé a una línea. Parte de estas dificultades se originan en el hecho de que en esta línea se encuentra el centro de impedancia del sistema. Esto es, la impedancia aparente de cualquier oscilación de potencia severa, se moverá alrededor del área de operación de las características del relé, alcanzando puntos muy adentro y cercanos al centro de esta área. Por lo anterior vemos que la dimensión de las características del relé en la dirección de alcance de oscilaciones debe ser tan pequeña como sea posible. Esto es necesario en los casos de elementos instantáneos y de alta velocidad. Una segunda fuente de dificultades ligada a los efectos anteriores, es el caso de una línea larga; la longitud es determinada por los "OHMS" secundarios de la línea, en este caso 4.8 ohms y larga en el sentido que comprende un porcentaje considerable de

la impedancia total del sistema. Los 2 aspectos de --- nuestros enunciados se tornan claros si consideramos, que el primero lo utilizamos para determinar el "tamaño" necesario de las características del relé sobre el diagrama R-X, mientras que el segundo nos sirve para determinar el tamaño relativo de las características del relé de acuerdo con las características del sistema, por ejemplo al tamaño de la separación de las curvas de 90° y 120° .

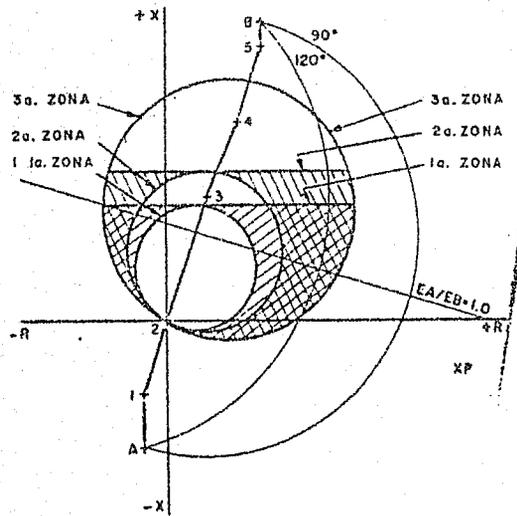


Figura 5 d

Las consideraciones anteriores nos llevan a una investigación del relé mho para esta aplicación. En la figura 5d se muestran los diagramas, compuestos de las características de relés de reactancia, y mho, con el mismo alcance para cada zona correspondiente. Se ha sombreado para mayor énfasis, el área de diferencia entre los disparos de 1a. y 2a. zonas, en caracte-

rística Mho. Es decir cada área sombreada representa - aquellas regiones en donde el elemento de reactancia - debe disparar y en las cuales el elemento Mho no debe disparar en el caso de una impedancia aparente motivada por una oscilación de potencia en el área considerada. La figura 5d nos ilustra que el relé Mho en este caso, no es susceptible de disparos instantáneos de alta velocidad durante oscilaciones de potencia excepto para aquellas oscilaciones que excedan la separación de 120° .

Hemos materialmente reducido las áreas de primera y segunda zona por el uso de relés Mhos, pero no se ha cambiado el área cubierta por la tercera zona. Esto puede efectuarse cambiando la tercera zona, es decir usando el Offset. Las características de un relé - con la tercera zona volteada se ha mostrado en la figura 3i2. Si aplicamos este tratamiento a la línea en consideración, podremos cubrir con la tercera zona un respaldo para la estación 2 para fallas en la línea de la estación 2 a la estación 1. La Responsabilidad para protección de respaldo en fallas en la sección de línea entre la estación 3 y estación 4, se debe asignar ahora al relé de la estación 3 (mirando hacia la estación A), cambiando en la misma forma la tercera zona. El resultado obtenido en la reducción del área de disparo por el cambio del elemento de tercera zona como protección de respaldo, es mostrado en el área sombreada de la figura 5e. Esta ilustración muestra la enorme reducción sobre todo en dimensiones laterales, del área del disparo del relé, lo cual se hace posible por el uso del relé tipo Mho con su tercera zona volteada. En este caso, hemos tenido cuidado en que las características de disparo de todo el relé estén muy por encima de aquellas áreas que han sido usadas para deli-

near oscilaciones violentas de potencia de condiciones estables del sistema.

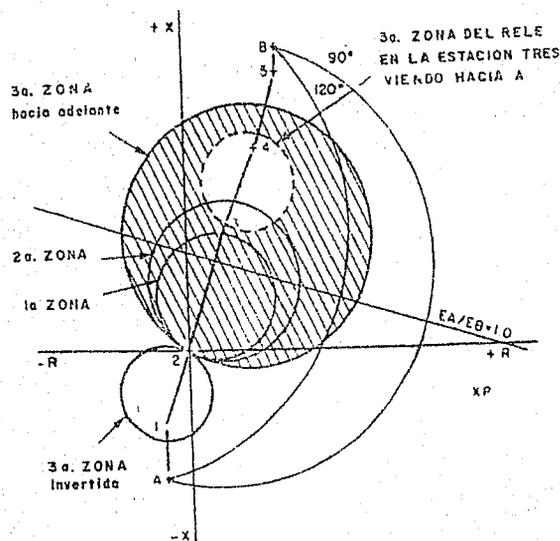


Figura 5 e

Bloqueo para condiciones fuera de sincronismo.

Hemos visto que durante condiciones de oscilaciones, la impedancia aparente sigue una curva definida y la curva particular dependerá de las relaciones de voltaje. Es aparente que (cómo esta curva cruza la línea entre A y B a 180°) cuando el sistema se acerca a un ángulo de separación de 180° , la impedancia aparente puede ser la misma que la impedancia de una falla real en la línea. ¿Cómo puede, en estos casos, un relé diferenciar entre los 2?

Sobre la figura 5f. En el sistema existe un

intercambio de carga como el mostrado en el punto P, -- una falla en ese momento sobre la línea 2-3, hará que cambie la impedancia de P a F en un tiempo cero para todo fin práctico. Por otro lado durante los primeros ciclos de oscilación, la impedancia aparente giraba alrededor del punto M ($EA/EB=1.0$) a una relativa baja velocidad. Entonces podremos ajustar el elemento de bloqueo (mostrado con línea gruesa en la figura 5f) en tal forma que cubra la primera y segunda zonas del relé mho si el tiempo necesario para que cambie la impedancia de la parte externa de la característica de bloqueo a un punto interior en el área sombreada, excede de un tiempo mínimo predeterminado. En otras palabras el bloqueo podrá ser realizado si el elemento opera antes de que se mande el disparo, y con tiempo suficiente entre los dos, para que algunos relés auxiliares tengan tiempo de operar. El bloqueo no se podrá realizar si ambos elementos operan simultáneamente.

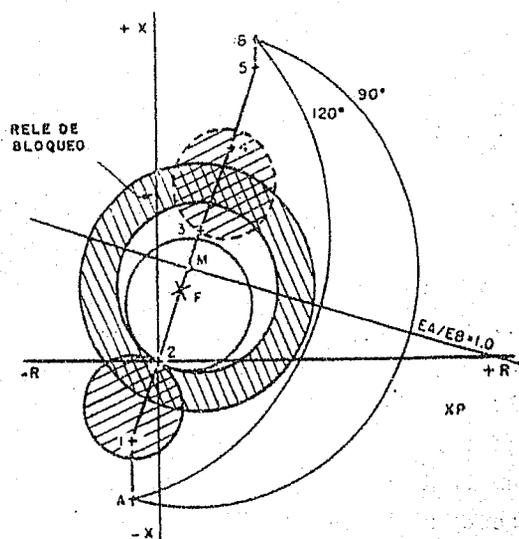


Figura 5 f

Las características del elemento de bloqueo deben rodear la característica mayor de los elementos de disparo con suficiente margen para permitir el bloqueo de las oscilaciones más violentas que se esperen. Al mismo tiempo debe ser tan pequeño como sea posible para evitar operaciones indeseables, por otro lado la selección de elementos de bloqueo se afecta por las mismas consideraciones que influyen en la selección de elementos de disparo para la línea en consideración.

Disparo para condiciones Fuera de Sincronismo.

Por experiencia sabemos que los sistemas eléctricos pueden y ocasionalmente se encuentran en condiciones fuera de sincronismo aún en contra de los esfuerzos de los diseñadores de sistemas, estamos obligados a disminuir los efectos de este problema tanto como sea posible. Es altamente deseable evitar las salidas pero, el sistema debe dividirse, para poderse corregir las causas iniciales de la inestabilidad en el sistema, uno de los mejores métodos es dividir el sistema en áreas autosuficientes. Para esto necesitamos seleccionar con anticipación los puntos en los cuales se efectúen los disparos. Si esta obligación recae en los relés de línea tal como ahora lo conocemos, el punto inicial de la inestabilidad está sujeto a factores que varían hora con hora (por ejemplo: los vars en el sistema al variar alteran la relación EA/EB; la carga en el sistema nos variará la impedancia total en el sistema y las proporciones de las impedancias sobre un relé dado). Estos cambios suponen una gran importancia cuando el centro "normal" de impedancia pasa por un bus importante o en sus cercanías. Entonces es necesario usar relés de protección confiables que disparen para aquellas condiciones fuera de sincronismo que afecten los circuitos que-

que protejan y que no disparen para otras condiciones anormales.

Examinemos las características en condiciones fuera de sincronismo para poder determinar los requerimientos de los relés. La distinción básica para condición fuera de sincronismo se puede mostrar por el hecho de que la impedancia aparente vista desde cualquier punto del sistema varía en la siguiente forma:

- 1.-A un punto a la derecha de la línea de impedancia del sistema.
- 2.-A un punto sobre la línea de impedancia del sistema.
- 3.-A un punto a la izquierda de esta línea.

Esta secuencia se aplica en un caso en que la máquina A avance sobre la máquina B, y la impedancia se ve hacia la máquina B. Si cualquiera de estas últimas condiciones se cambia, la secuencia de los cambios de impedancia variará también. Si ambas condiciones se invierten la impedancia aparente seguirá la misma secuencia descrita anteriormente.

Otra característica para condiciones fuera de sincronismo es que los cambios de impedancia ocurren en un período de tiempo finito al cual es largo (al menos para los primeros ciclos) comparado directamente con el cambio de impedancia en una falla.

Nuestra tarea ahora es diseñar un relé óhmico que pueda reconocer estas características.

Una solución será usar 2 características óhmicas para dividir el diagrama R-X en 3 áreas, y usar relés --

auxiliares de tiempo para analizar la oscilación de la impedancia en estas áreas.

Regresemos a la figura 4k en la cual si tendríamos 2 elementos mho, con offset y un ajuste adecuado, nos darían círculos que serían equivalentes, por ejemplo al 165° - 345° para un elemento y 195° - 15° para el otro. La parte útil de estos círculos caería entre los puntos A y B de nuestro diagrama R-X (el arco de 165° y el de 195°). Vemos que para todos los valores prácticos de EA/EB estos arcos pueden considerarse aproximadamente como líneas rectas. Es decir podemos usar dos elementos de reactancia, cada uno de ellos tendría su ángulo de par máximo perpendicular a la línea de impedancia del sistema. Es decir las características de operación serían líneas rectas y los elementos deben ser capaces de ser ajustados para que esas líneas sean paralelas a la línea de impedancia del sistema. El Pick-Up determinará la distancia entre esta característica y la línea de impedancia del sistema, es decir la cantidad de offset.

Se han trazado las características de dos elementos como los anteriores en la figura 5g. Se han exagerado los ajustes para mayor claridad. Designaremos a los elementos con dos contactos que se denominarán 1 y 2. El contacto #1 cerrará cuando la impedancia aparente se vaya hacia la izquierda de la característica del elemento, mientras que el contacto #2 cerrará cuando la impedancia aparente se vaya a la derecha. Para propósitos de discusión llamaremos al elemento de la izquierda "A" y al de la derecha "B" y sombrearemos aquellas áreas en donde el contacto #1 cierra.

Esto puede verse en la figura 5g en la cual se muestran 3 áreas definidas.

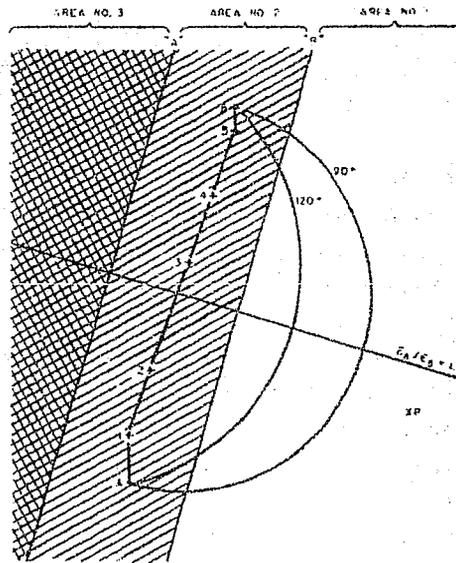
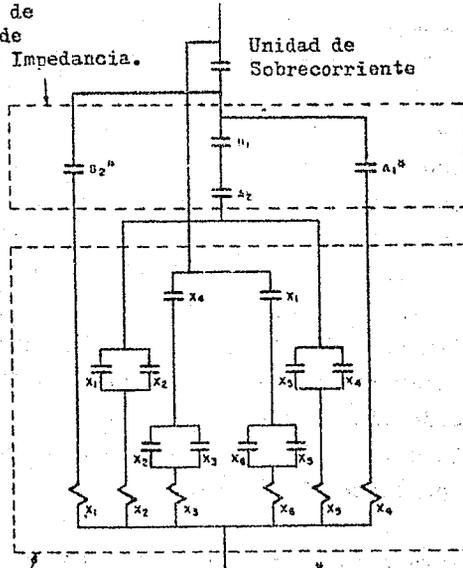


Fig.5g-Relé para Fuera de Sincronismo.

Contactos de Unidades de Anrulo de Impedancia.

Unidad de Sobrecorriente



Relés Auxiliares

Cerrado si el relé está desenergizado.

Fig.5h-Conexiones de Relés Auxiliares.

Area #1-cerrados los contactos A_2 y B_2 .
 Area #2-cerrados los contactos A_2 y B_1 .
 Area #3-cerrados los contactos A_1 y B_1 .

Antes de investigar los requerimientos de los relés auxiliares recordemos que nuestro sistema está -- más allá de la intersección de las curvas para C^0 de -- separación entre las máquinas A y B y los puntos A y B. Sería el caso en que una máquina esté flotando sobre -- la línea, es decir con muy pequeña o sin potencia. Las características del sistema y del gobernador de las -- turbinas son tales que al flujo de potencia puede -- fluir en dirección errónea solamente si es de pequeña -- magnitud pero nunca estas oscilaciones pueden causar -- operación de los elementos de reactancia.

Disparo por fuera de sincronismo puede ocurrir en estos casos, por lo que usaremos un relé de sobrecorriente para supervisar la operación de los relés auxiliares. Este relé de sobrecorriente sólo asegura que -- el disparo ocurrirá cuando las corrientes de oscilación sean al menos de la misma magnitud que las corrientes de carga.

Una cadena de relés auxiliares con supervisión de sobrecorriente, se muestra en la figura 5h. Cada -- uno de los relés auxiliares tiene un tiempo de pick-up de 0.005 segundos y un tiempo de restablecimiento de -- aproximadamente 0.1 segundos, con excepción de X_3 y X_6 que tienen ajustes de un gran retardo de tiempo para -- restablecerse. Examinemos ahora el diseño completo del circuito.

Supongamos que ocurre un penduleo que empieza desde un punto de carga, a la derecha de la línea --

$E_A/E_B=1.0$ y aumenta con la máquina A adelante de B. ---
 A_2 y B_2 inicialmente están cerrados, X_1 opera a través
de B_2 tan pronto como la unidad de sobrecorriente cierra sus contactos. Cuando el penduleo aumenta a través del elemento característico "B", B_2 abre y B_1 cierra. Como X_1 , tiene un tiempo ligero de retardo para restablecerse, X_2 estará energizado y permanece así a través de un contacto propio tan pronto como B_1 cierra. ---
Cuando el penduleo aumenta a través del elemento característico "A", A_2 abre y A_1 cierra. El contacto A_1 energiza X_4 el cual causa que X_3 se energice y se selle con un contacto propio y a través de X_2 . X_3 permanecerá energizado por el resto del ciclo de deslizamiento hasta que el relé de sobrecorriente se restablezca o ---
que la característica "A" sea cruzada otra vez. Si X_3 es usado para disparo el relé estará listo para usarse; sin embargo, para otras aplicaciones es deseable que ---
 X_3 sea ajustado con el mayor tiempo de restablecimiento.

Un examen similar mostrará que X_6 estará energizado para un ciclo de deslizamiento en la dirección contraria. En ambos casos es necesario que las características de ambos elementos sean cruzadas antes que ---
 X_3 ó X_6 puedan ser desenergizados. Es decir la ocurrencia y libramiento de cualquier falla en el sistema no pueden causar operación del relé sin que el sistema ---
sea sacudido tal que las máquinas continúan su separación más allá de 180° . (X_3 y X_6 tienen tiempos de restablecimiento ajustables entre 0.5 y 3.0 segundos. Esto asegura que X_3 permanecerá operado excepto para los ciclos más largos de deslizamiento y es útil en donde la característica "direccionalidad de deslizamiento" ---
de todo el relé sea usado para cambiar la entrada de un primo motor).

Cuando la figura 5g fue revisada los ajustes óhmicos de estos elementos de reactancia se creyeron exagerados. Investiguemos las necesidades para estos ajustes y tracemos los resultados en nuestro ejemplo.

El primer requerimiento es que el relé opera para el ciclo de deslizamiento más rápido esperado en el primer penduleo. La operación más crítica será -- cuando se cierran los contactos de X_2 durante el período cuando el penduleo se encuentra atravesando el área entre las características "A" y "B". Como X_2 tiene un retardo de tiempo de 0.005 segundos para cerrar sus contactos el penduleo debe permanecer en esta área al menos este tiempo. El ángulo a través del cual se mueve el sistema para atravesar el área entre las características del relé será llamado $\Delta \delta$. Como el penduleo tomará al menos 0.005 segundos para pasar a través de este ángulo, el máximo deslizamiento que permitirá la operación del relé está dado por la ecuación:

$$S_{\max} = \frac{1}{360} \times \frac{\Delta \delta}{0.005} \quad \text{ó}$$

$$S_{\max} = \frac{\Delta \delta}{1.8} \quad \text{ciclos de deslizamiento por segundo.}$$

Hay que recordar expresar $\Delta \delta$ en términos -- del ajuste del relé.

Si suponemos que el relé está localizado en una estación que cae en la línea de impedancia del sistema y que las características del relé son paralelas, podemos mostrar las relaciones que existen entre los ajustes del relé, la impedancia del sistema y el ángulo de separación mostrado en el diagrama de la fi

Mx' - AJUSTE DEL RELE
 Z - IMPEDANCIA DEL SISTEMA
 A - B - RELES LINEALES
 $\Delta\delta$ - MOVIMIENTO ANGULAR ENTRE A Y B CUANDO SE HUEVE DE X , M , Y X'

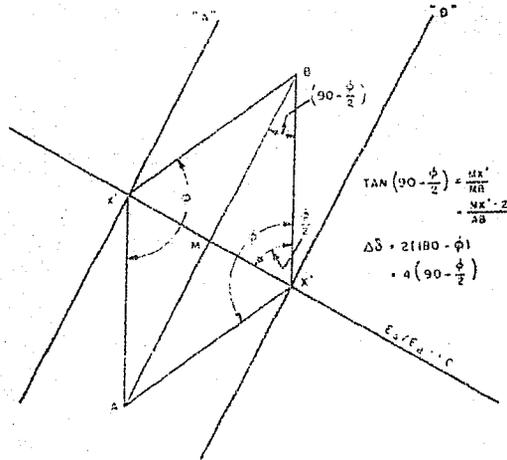


Fig. 5i-1-Relación geométrica de un rele fuera de sincronismo.

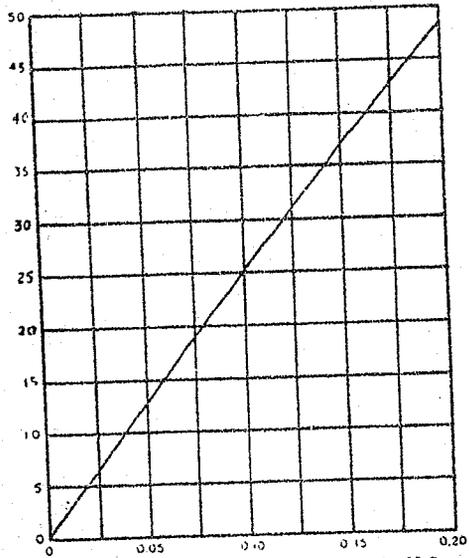


Fig. 5i-2-Ajuste mínimo permisible de Relé fuera de sincronismo Vs. máximo deslizamiento.

gura 5i. El ángulo de ϕ , es la separación entre la máquina A y la B determinado por la intersección de las características del relé con la "línea de penduleo de igual excitación".

En la figura 5ii, AB es la impedancia del sistema, MK' es el ajuste del relé (igual offset para cada característica) y M es el punto medio de AB. Para viajar de "B" a "A" se debe mover desde el punto del sistema para un ángulo ϕ de 180° (punto I) a un ángulo igual el otro lado de 180° . Nuestro ángulo total de viaje, $\Delta\delta$ será igual a $2 \times (180 - \phi)$, ó

$$\Delta\delta = 4 \times \left(90 - \frac{\phi}{2}\right).$$

De la geometría en la figura 5ii vemos que:

$$\tan\left(90 - \frac{\phi}{2}\right) = \frac{MK'}{MB} = \frac{MK' \times 2}{AB} = \delta$$

$$\left(90 - \frac{\phi}{2}\right) = \tan^{-1} \left(\frac{2 \times \text{ajuste del relé}}{\text{ohms del sistema}} \right)$$

Substituyendo estos valores en las ecuaciones anteriores podemos escribir:

$$S_{\max} = \frac{4}{1.8} \tan^{-1} \left(\frac{2 \times \text{ajuste del relé}}{\text{ohms del sistema}} \right)$$

De esta última ecuación podemos trazar una curva para mostrar la relación entre el ajuste del relé, expresado en p.u. de los ohms del sistema, el máximo deslizamiento esperado en una operación correcta de protección. Esto se muestra en la figura 5j.

Refiriéndonos a la figura 4k en la que se -- muestra que las características del relé cubren el menor rango de separación angular en la intersección con la "línea de penduleo de igual excitación" esto indica que si todo está igual, a una velocidad constante de deslizamiento la impedancia aparente cruzará las características del relé más rápido para la condición -- $E_A/E_P=1.0$ que para cualquier otra relación de excitación.

La curva de la figura 5j puede ser usada con -- ligeros errores teóricos para iguales casos en donde -- la estación no caiga en la línea de impedancia del sistema aún para valores de p.u. más allá de 0.20 en ajustes de relés. Esto es cierto por las relaciones lineales de la función tangente para ángulos pequeños (menores de 20°).

La pregunta obligada es, cual debe ser el máximo deslizamiento que se espera en el primer ciclo de penduleo. Cualquier respuesta a esta pregunta involucrará varios parámetros del sistema y debe estar basada en estudios de estabilidad transitoria del sistema -- bajo consideración. Como no tenemos un estudio para el sistema usado en nuestros ejemplos, supondremos una -- respuesta basada en experiencias con otros sistemas y con una aproximación muy ruda.

La investigación de algunos estudios de estabilidad transitoria hechos en el analizador de redes de Schenectady muestra una velocidad promedio del rotor -- de 1.5 ciclos de deslizamiento por segundo. Esto es en la región de separación de 180° entre la máquina con -- mayor velocidad y el resto del sistema.

Uno de los casos más severos en estudios de estabilidad transitoria se encuentra en la condición de una falla directa trifásica sobre ambas terminales de una máquina que ha sido llevada a su carga máxima precisamente en el instante de la falla, en este caso el par del primo motor se puede obtener por aceleración del rotor excepto en una pequeña porción que aparece como $I^2 R$, es decir perdidos en los devanados de la armadura. (Lo anterior es cierto dentro de los límites usuales de un estudio de estabilidad transitoria). Como un ejemplo en este caso investigaremos una máquina - standard de 60 megawatts cargada al 110% de la capacidad de la turbina a voltaje y factor de potencia nominales. Los valores promedio de las constantes p.u. de esta máquina son:

$$x'd = 0.13 \quad a = 0.00111 \quad H = 3.6$$

La carga de la máquina es: $0.935 + j0.58$

$$V' = 1.0 + (0.935 - j0.58)(j0.13) = 1.083$$

$$I' = \frac{1.083}{0.13} = 8.33$$

$$(I')^2 R_a = 0.077$$

Potencia entregada por la turbina = 0.935

$$\text{Par de aceleración} = 0.935 - 0.077 = 0.858$$

$$\text{Aceleración constante} = \frac{180 \times 60}{3.6} = 2840^\circ/\text{seg}^2$$

$$\text{Aceleración} = 0.858 \times 2840 = 2440^\circ/\text{seg}^2$$

Bajo constante de aceleración, el tiempo necesario para que la máquina avance 180° será de 0.384 segundos y la velocidad en este tiempo deberá ser de 938° por segundo ó 2.6 ciclos de deslizamiento por segundo. Estas condiciones no son aplicables directamente a nuestro problema; sin embargo nos sirve para tener un punto de apoyo en la selección de los ajustes de nuestros relés.

El segundo punto para los ajustes del relé es que la característica del relé abarque al sistema trazado en el diagrama R-X. Es decir que una falla en cualquier lugar del sistema debe caer dentro de las características del relé. Como una ilustración refirámonos a la figura 5g y consideremos la aplicación de este relé en la estación 2, como las características del relé estarán trasladadas una cantidad igual en cada lado de la estación 2 y serán paralelas a la línea de impedancia del sistema (que cae a la derecha de la estación 2), la característica del lado derecho mostrada en la figura 5g estará más cerca del diagrama R-X del sistema. Un examen de la figura 5g nos lleva a seleccionar un ajuste de 1.25 ohms. Notamos que las características del relé en la figura 5j tienen un margen definido para liberar todas las fallas del sistema y además nos aseguran un margen extra de operación muy apartado del área estable de operación en el sistema.

Si investigamos estos ajustes en términos de su intersección con la línea de penduleo de igual excitación como se ha discutido anteriormente encontraremos que "B" cruza a 168.5° y "A" cruza a 204° , el ángulo en cerrado será de 35.5° . El penduleo más rápido que cruzaría esta carga en 0.005 segundos será el que se mueve a

19.7 ciclos de deslizamiento por segundo. Es decir que este ajuste ofrece un margen adecuado para los penduleos más rápidos. (Es interesante ver que en la figura 5i2 tenemos una respuesta muy cercana a lo que se calculó. Nuestro ajuste de 1.25 ohms en el relé, y expresado en p.u. de los ohms del sistema (15.92) será de 0.0785. La S máxima de la figura 5i2 para este deslizamiento es de 19.5 a 20.0 ciclos de deslizamiento por segundo).

Este relé opera sólo para condiciones fuera de sincronismo y nos ofrece además un punto preseleccionado de separación del sistema. El relé operará en el primer ciclo de penduleo para velocidades arriba de 19.7 ciclos de separación por segundo para todos los valores prácticos de excitación.

Se puede especular sobre la operación de este relé a valores anormalmente pequeños de excitación. Reafirmonos a la figura 4j en la cual es matemáticamente posible, bajo las suposiciones tomadas al construir este diagrama para que E_A/E_B sea reducido a un punto en donde la característica fuera de sincronismo caiga dentro de la zona característica del relé. En la práctica esto puede o no ocurrir. Como quiera que ocurra o no es una función del deslizamiento si la máquina entra a esta área de excitación anormalmente baja. Si el deslizamiento es alto como es de esperarse si el generador tiene una carga alta, la impedancia aparente variará en una área pequeña que puede muy bien estar dentro de la característica "fuera de sincronismo".

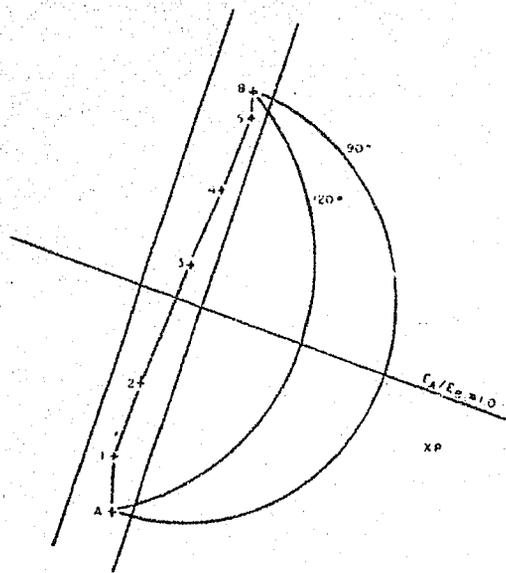


Figura 5 j

CARACTERISTICAS DE "PERDIDA DE EXCITACION"

Una falla en el sistema de excitación de una máquina es consecuencia de una variedad de condiciones anormales en el circuito del campo, y varían desde un corto-circuito en el devanado hasta que el devanado de campo se abra en algún lugar. El comportamiento de la máquina entre el tiempo en que la excitación es afectada y el tiempo en que la máquina alcanza una posición cercana a los 180° fuera de fase con las máquinas conectadas al Sistema, varía no solo para cada tipo de falla sino que también para la condición inicial de carga en la máquina. Un diagrama δ -X de esta característica de pérdida de excitación será semejante a la combinación de las dos familias de curvas que se han estudiado. Figs. 4j y 4k. Analicemos primero la figura 4k. Estas curvas son trazadas para un desplazamiento angular constante entre las máquinas variando la excitación. Suponemos que la carga inicial fué tal que la máquina A adelantaba a la B con 60° , seguiremos el arco de 60° desde un punto (correspondiente a la excitación inicial) cercano al punto medio del arco de 60° en el sentido de las manecillas del reloj hacia el punto A y E_A disminuyendo tal que E_A/E_B tienda a cero. En la práctica nunca alcanzaremos el punto A sobre el diagrama ya que la excitación efectiva no alcanzará el punto cero por la inducción. Mientras alcanzamos el punto A nuestra trayectoria debe girar hacia una trayectoria de excitación constante como se muestra en la figura 4e. Cuando la máquina avanza en ángulo de fase con respecto a la máquina B empezaremos a trazar un círculo de excitación constante sobre el punto A en dirección contraria a las manecillas del reloj.

Las descripciones especulativas anteriores son únicamente como una introducción a este fenómeno. No son totalmente reales ya que las máquinas no manten---

drán una relación angular exacta durante el período inicial de la curva ni seguirán la característica de excitación constante en la última porción de la curva. -- La razón básica de esto es que nos hemos excedido en -- las suposiciones usadas para trazar las Figs. 4c y 4d. Durante la parte inicial de la curva los cambios son -- relativamente ligeros y actúan a través de la reactancia equivalente de las máquinas y no de la transitoria que está en función de la excitación. Más aún, la máquina tiende a mantener una potencia de salida constante en lugar de un ángulo constante durante la curva. -- Durante la última porción de la curva, los cambios actúan a través de una reactancia que estaría cambiando desde la reactancia directa a la de eje en cuadratura. Estas reactancias son en si mismas una función del deslizamiento de la máquina. Durante toda la -- transición de la reactancia equivalente (carga en estado estable) a la reactancia transitoria es una función de la velocidad a que tengan lugar los cambios. Esto a su vez depende grandemente del tipo de falla en la excitación y/o de la forma en que se haya cargado la unidad. Cuando tratamos de incluir todos estos factores en nuestro problema, encontramos que el único método práctico para obtener una solución analítica es usar un analizador diferencial.

Del analizador diferencial podemos obtener 4 -- curvas típicas y datos suficientes que nos capacitan para proceder con el diseño de nuestros relevadores. Estas curvas se muestran en la figura 6-1 en la que se -- muestran estas 4 características trazadas en un diagrama R-X sobre una impedancia base (verbigracia, la curva para la corriente normal de armadura a voltaje normal, -- será un círculo con centro en el origen y con radio -- $1.0/1.0 = 1.0$ impedancia p.u. (Los siguientes diagramas R-X serán dibujados bajo esta base) Cada curva es marca

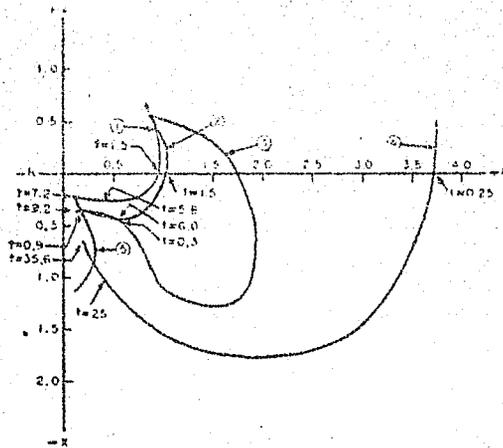


Figura 6-1

CURVAS TÍPICAS DE PERDIDA DE EXCITACION

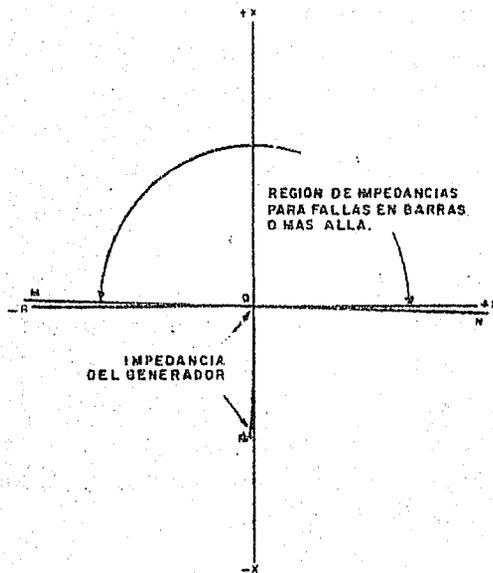


Figura 6-2

FALLAS EXTERNAS AL GENERADOR

da a varios puntos con números de referencia mostrando el tiempo en segundos para que la característica alcance el punto de carga inicial, al punto en la falla de excitación en el sistema ocurrida cuando el tiempo es igual a cero. Cada curva ha sido terminada exactamente antes que la máquina alcance la posición 180° con respecto a la máquina atrás de la impedancia equivalente del sistema. Esto ha sido hecho sólo como vía de claridad, ya que las curvas no terminan en estos puntos pero los cambios en la impedancia de aquí en adelante son tan erráticos que la continuación de la curva no es útil para nuestro propósito.

Con poca imaginación no es difícil ver que estas curvas estén en general, de acuerdo con la discusión especulativa anterior. Y lo que es más importante en nuestro problema, es que hemos establecido unos lugares definidos de los "puntos de terminación" de estas curvas. Estos lugares geométricos son mostrados por las curvas gruesas de la figura 6-1, que representan el promedio de las impedancias de eje directo y en cuadratura sobre las cuales la terminación de la característica de pérdida de excitación varía. Este promedio de impedancia es bajo con un alto deslizamiento, acercándose a las impedancias subtransitorias de eje directo y en cuadratura del generador. A muy bajos valores de deslizamiento, la característica se acerca al promedio de impedancia síncrona de eje directo y en cuadratura. Sin embargo, estos extremos nunca se alcanzan en la realidad.

Hemos establecido una curva en la cual la característica de pérdida de excitación debe cruzar exactamente antes que la máquina afectada pase a 180°

de desbalance de fase con el sistema. Antes que utilizemos esta curva para diseñar nuestro relé de pérdida de excitación debemos investigar otras características de operación normales y anormales que pueden ocurrir en este lugar geométrico y que por lo tanto no sea deseable que el relé de pérdida de excitación opere.

1.- La primera condición que nos viene a la mente es el caso de una falla externa en la cual es indeseable una operación de este relé. Esta falla puede ser una muy cercana al generador. Si consideramos nuestro relé de pérdida de excitación como un relé electromecánico (alimentado por voltaje entre líneas y la corriente sea el vector diferencia de corriente de líneas), la impedancia existente vista por el relé para todo tipo de fallas, sea en la región sobre la línea MN mostrada en la Fig. 6-2. La línea MN es perpendicular a la impedancia del generador AC. La resistencia del arco puede causar una caída aparente de impedancia, abajo de la línea MN pero esta desviación es pequeña y sin importancia cuando consideremos la siguiente condición.

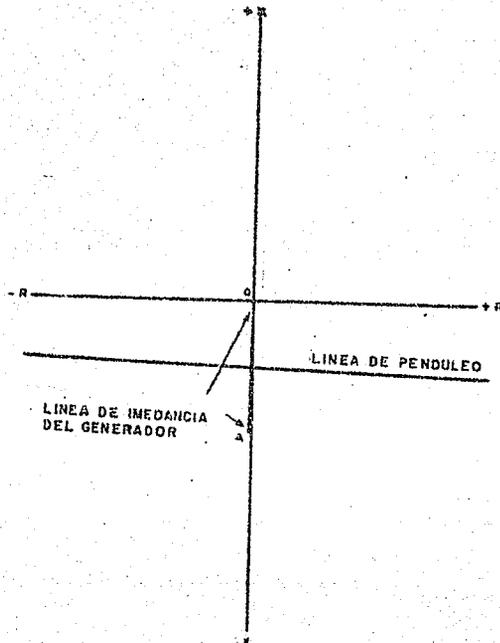
2.- La segunda condición sería que se tuviera fuera de sincronismo el generador y el sistema. El peor caso para nuestro propósito, es aquel en donde el generador en cuestión es amarrado directamente a un sistema que es infinitamente grande comparado con la capacidad del generador. Como la $E_A/E_B = 1.0$ la línea de penduleo es un bisector perpendicular de la línea de impedancia total del sistema, (que está ahora reducida a la impedancia del generador porque la impedancia del sistema es infinitamente pequeña); la línea de penduleo de igual excitación, seguirá la línea mostrada en la Fig. 6-3. Como esta es una condición razonable

de excitación podemos concluir que la característica del relé de pérdida de excitación debe aproximarse al origen, pero no menos de la mitad de la impedancia del generador protegido, es decir de la impedancia transitoria del generador.

3.- La tercera condición es que se reduzca a propósito la excitación de la máquina, de acuerdo con las necesidades de operación del sistema. Como los sistemas modernos tienen esta política durante períodos de carga baja, es necesario revisar este caso. Por simplicidad hemos supuesto en la siguiente discusión que el voltaje de placa sea mantenido en la máquina. Esta suposición es de importancia para pasar de la curva de capacidad KW-KVAR al diagrama R-X y poder evaluar lo que se establezca en esta discusión. La condición de mantener el voltaje en las terminales puede realizarse para condiciones estables usando un regulador de voltaje de acción continua.

La información pertinente que podemos tener del papel anterior puede mostrarse como la curva límite de operación del generador en términos de KVAR y KW con valores sobrepuestos de corriente de campo. Esto se muestra en la Fig. 6-4 para un generador con la capacidad como base para la consideración por unidad de KW y KVAR, sin carga y corriente de campo como la base de anotación p.u. de la corriente de campo. Esta curva es aplicable a una máquina de 0.8 f.p., 0.9 S.C.R. Las partes de la curva pueden ser fácilmente identificables como sigue: El arco BC es el límite de la corriente de armadura, el arco IB es el límite de la corriente de campo y la línea GC representa los límites de capacidad bajo excitados de turbogeneradores modernos (de un solo fabricante) influenciado por la tendencia

de calentamiento en las estructuras finales de la armadura. Tres curvas límites de estabilidad en estado estable son mostradas para posterior referencia. Estas curvas son: F-P' para la máquina conectada a un sistema infinito, F-D para la máquina conectada a un sistema cinco veces mayor que la máquina y F-J para la máquina conectada a un sistema $2\frac{1}{2}$ veces mayor que la máquina.



Basado en las deducciones de este diagrama, el señor Adams-McClure sugiere un ajuste para el límite inferior de reactivos para el regulador de voltaje como se muestra en el área sombreada de la Fig. 6-4. Es decir este límite inferior de reactivos es tal que el regulador limita la excitación a un valor tal que la máquina no debe operar aquellas áreas abajo de los límites inferiores.

Nuestro siguiente paso es mostrar este límite inferior que se sugiere en diagrama R-X. Esto se ha hecho en la Fig. 6-5 en donde las líneas 1, 5 y 6 representan los límites inferiores de la Fig. 6-4. Para enfatizar la relación recíproca que existe en la Fig. 6-4 y la Fig. 6-5, algunas otras curvas de la Fig. 6-4 han sido dibujadas sobre la Fig. 6-5. Estas curvas se identifican como sigue:

- 1.- Corriente de armadura de placa,
- 2.- La $P=1.0$ de línea,
- 3.- La $P=0.5$ de línea,
- 4.- La curva en que la corriente constante de campo = 0.5,
- 5.- La línea formando el límite inferior,
- 6.- La línea formando el límite superior del área sugerido como el límite inferior de operación.

La mayoría de estas curvas son dibujadas sólo para ayudarnos a interpolar de un dibujo a otro y para enfatizar la relación que existe con el diagrama R-X.

Procederemos ahora a dibujar sólo aquellas curvas que afecten las características de operación de un

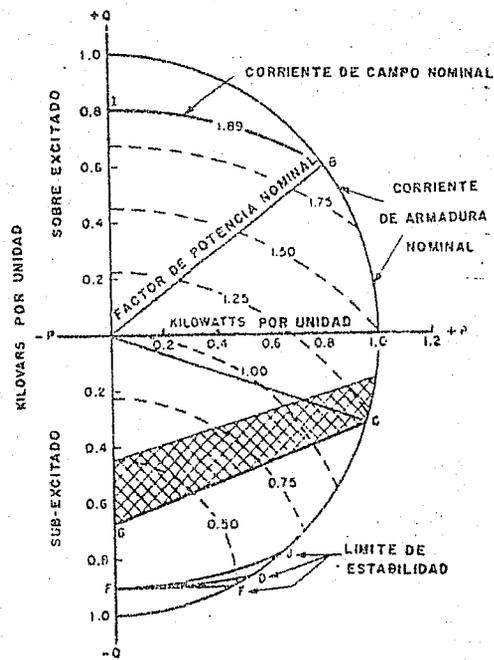


Figura 6-4

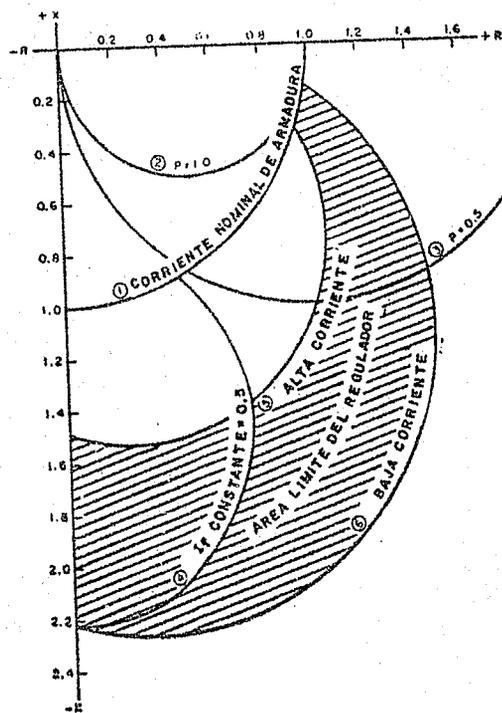


Figura 6-5

relé de pérdida de excitación sobre un diagrama R-X y que nos ayude a definir esta característica y a aplicar un elemento conocido de relé. La Fig.6-6 muestra:

- 1.- El lugar geométrico de los puntos finales de las características de pérdida de excitación.
- 2.- Una línea de penduleo para igual voltaje para el caso de un generador conectado a un sistema infinito.
- 3.- Línea límite de "Alta corriente" para el ajuste sugerido del límite inferior de reactivos de un regulador.

Nuestro trabajo es ajustar la característica del relé de pérdida de excitación sobre la curva 1 en forma tal que funcione para todos los tipos de falla de excitación y mantenga su característica para que no traspase los límites de las áreas sugeridas en las otras curvas. Es posible visualizar alguna combinación de relés óhmicos que puedan hacer este trabajo; sin embargo, sólo hay un relé óhmico de elemento sencillo que puede reunir todas estas características. Este es un elemento mho offset que tenga un ángulo de par máximo de -90° y un offset en la misma dirección. Esta característica se muestra con líneas discontinuas en la Fig.6-6. Nótese que el offset se ha hecho igual a la mitad de la impedancia transitoria del generador, (de acuerdo con la curva 2 de la Fig.6-6) y que el diámetro del círculo es igual a la impedancia síncrona del generador menos la cantidad de offset (tal que el alcance total del relé sea igual a la impedancia síncrona del generador). Este ajuste capacita al relé para que tenga una característica tan pequeña como sea posi-

ble y encerrar con toda seguridad un área en la cual - la característica de pérdida de excitación debe cruzar se antes de que la máquina pase el punto de 180° .

El área que exista entre la curva 3 (límite inferior de reactivos del regulador) y las características del relé mostradas en la Fig. 6-6 nos sugiere que este relé no puede funcionar para ciertos casos de pérdida parcial de excitación. Un estudio más completo de las Figs. 6-5 y 6-6 indicará que hay una región en donde esta pérdida parcial de excitación puede ser severa, suficiente para exceder los límites de estabilidad y la capacidad de operación continua de la máquina, sin causar operación del relevador. Esto es cierto en primer lugar porque el ajuste del relé fué seleccionado para ofrecer una característica tan pequeña como fuera posible y congruente con una operación positiva. Esto fué hecho en virtud de que el relé es diseñado para disparos de alta velocidad y para esta condición se deben tomar todas las precauciones a fin de evitar operaciones incorrectas o indeseadas. En caso de una pérdida parcial de excitación (que cause una reducción de la excitación más allá de lo recomendado para la operación de la máquina pero que no sea tan severo para operar el relé), es admisible que un disparo inmediato de la máquina no sea deseable. Por ejemplo el operador tendrá más tiempo para actuar y posiblemente evite la necesidad de disparar la máquina bajo esta condición. Sería deseable tener por separado un ajuste más sensible para una alarma audible y posiblemente disparar después de un retardo de tiempo en este caso, particularmente cuando existe un medio confiable para disparar en el caso de que se presente una falla progresiva en el circuito de excitación.

La discusión anterior no tiene significado si el caso de pérdida de excitación es causado por cortos circuitos de parte de los polos del generador, lo cual requiere acción inmediata ya que puede causar vibraciones serias. La protección contra este tipo de fallas debe dejarse a medios detectores de vibración o detectores de fallas a tierra en el rotor.

Estudiando la Fig. 6-6 podemos observar que el relé de pérdida de excitación puede operar para una falla dentro del generador que protege. Esto no es muy importante ya que de todas maneras se debe desconectar el generador en cualquier forma.

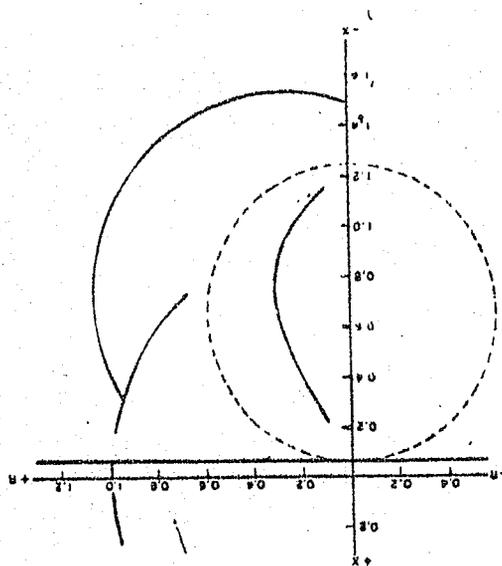


Figura 6-6

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Theuse of the Diagram in Relay Work. Folleto de General Electric .
- 2.- Relay Operation During System Oscillation, C. R. Mason A I E E. Transactions, vol. 56, 1937.
- 3.- Acomprehensive Method of Determining the Performance of Distance -- Relay, J. H. Noher. A I E E Transactions, Vol. 56, 1937.
- 4.- Graphical Method for Estimating the Performance of Distance Relays during Facults and Power Swings. A. R. Van C. Warrington.
- 5.- Electrical Circuits, (libro) Skilling.
- 6.- Elements of Power Systems Analysis (libro) Stevenson.
- 7.- The Art. and Science of Protective Relaying (libro) C. R. Mason.
- 8.- Power System Stability (libro) Kimbark.