



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

**ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PROTECCION DE DISTANCIA
DE LA LINEA DE 400 KV, SANTA CRUZ-TEXCOCO Y SANTA CRUZ-
TOPILEJO, DEBIDO A LA COMPENSACION DE LAS LINEAS PUEBLA
II - TEMASCAL Y TEMASCAL - TOPILEJO**

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

EDUARDO RUEDA DE LA GARZA

México, D. F.

1985



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 está 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.

I N D I C E

INTRODUCCION

- CAPITULO I.- DESCRIPCION DEL SISTEMA ELECTRICO NACIONAL.
- a).- Sistema Eléctrico Nacional.
 - b).- Interconexión del Sistema Eléctrico Central de Transmisión.
 - c).- Diagrama Unifilar de la Red de 400 KV.
- CAPITULO II.- CONFIGURACION DEL SISTEMA ELECTRICO CORRESPONDIENTE AL ESTUDIO.
- a).- Diagrama del Estudio
 - b).- Característica Fundamental del Estudio.
- CAPITULO III.- CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LA PROTECCION DE LAS LINEAS.
- a).- Protección de líneas de transmisión por medio de relevadores de distancia.
 - b).- Area de Operación de los relevadores de distancia.
- CAPITULO IV.- CONEXIONES PRINCIPALES DE LOS RELEVADORES DE DISTANCIA.
- a).- Características principales de los relevadores
 - b).- Conexiones principales de los relevadores.

CAPITULO V.- CORTO CIRCUITO

- a) Teoría de corto circuito
 - a.1) Cálculo de fallas en Redes Eléctricas
- b) Falla trifásica
- c) Falla monofásica

CAPITULO VI.- COMPORTAMIENTO DE LA PROTECCION PARA DIFERENTES CONDICIONES DE LA FALLA EN LA LINEA.

- a) Respuesta de los Relevadores
 - Santa Cruz - Topilejo
 - Santa Cruz - Texcoco

- b) Análisis del Funcionamiento de la Protección de Distancia en la línea de 400 KV, Santa Cruz - Texcoco y Santa Cruz-Topilejo, debido a la compensación de la línea Puebla II-Tamazcal.

CAPITULO VII.- CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION

El desarrollo tan notable que ha tenido y sigue experimentando nuestro país tanto en el aspecto económico, social como político, se refleja principalmente en las grandes ciudades como en la Ciudad de México, que cuenta aproximadamente con 17 millones de habitantes y que crece en grandes extensiones territoriales, zonas industriales, zonas comerciales, vías de comunicación etc.

Para satisfacer este crecimiento tan notable que existe en la zona metropolitana se requiere de servicios públicos eficientes y confiables, en este servicio se encuentra la energía eléctrica que es de vital importancia . Sino se contara con dicha energía eléctrica no existiría tal desarrollo.

Es por lo tanto un compromiso de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A., como empresa de servicios públicos el hacer llegar en la forma mas eficiente y confiable el servicio de la energía eléctrica a toda la zona metropolitana. Para ofrecer dicho servicio, se debe contar con un mantenimiento adecuado a las subestaciones, redes de transmisión, redes aéreas, redes subterráneas, etc.

Entre las líneas de transmisión que alimentan a la metrópoli, se encuentra las de 400 KV y 230 KV, que son de relevante importancia, por lo que se presenta este estudio con la fina-

lidad de lograr un mejor funcionamiento y servicio, mediante la protección por medio de relevadores de distancia a la línea de-
400 KV.

CAPITULO I

DESCRIPCION DEL SISTEMA ELECTRICÓ NACIONAL.

a) El Sistema Eléctrico Nacional (S.E.N.)

El Sistema Eléctrico Nacional está formado por el Sistema interconectado Nacional que abarca los sistemas:

Baja California Norte	(B.C.N.)
Baja California Sur	(B.C.S.)
Sistema Occidental	(O.S.)
Sistema Central	(P.C.)
Sistema Oriental	(S.O.)
Península de Yucatán	(S.P.Y.)

El sistema Eléctrico Nacional se ha organizado para un mayor control y eficiencia de su servicio en 8 áreas de control (A.D.C.). Las fronteras geográficas de las áreas de control se muestran con los líneas punteadas en la Fig. No. 1.

El Sistema Interconectado Nacional queda configurado en la topografía representada por la figura N1, hace 3 años (en enero 1980). Previamente constaba de un conjunto de sistemas separados eléctricamente, inclusive se tuvieron dos frecuencias de operación, 50 y 60 Hz. El cambio de frecuencia en el Valle de México de 50 a 60 Hz. se terminó en 1976.

b) Interconexión del Sistema Eléctrico Central de Transmisión.

RED TRONCAL DEL SISTEMA
ELECTRICO NACIONAL
1983

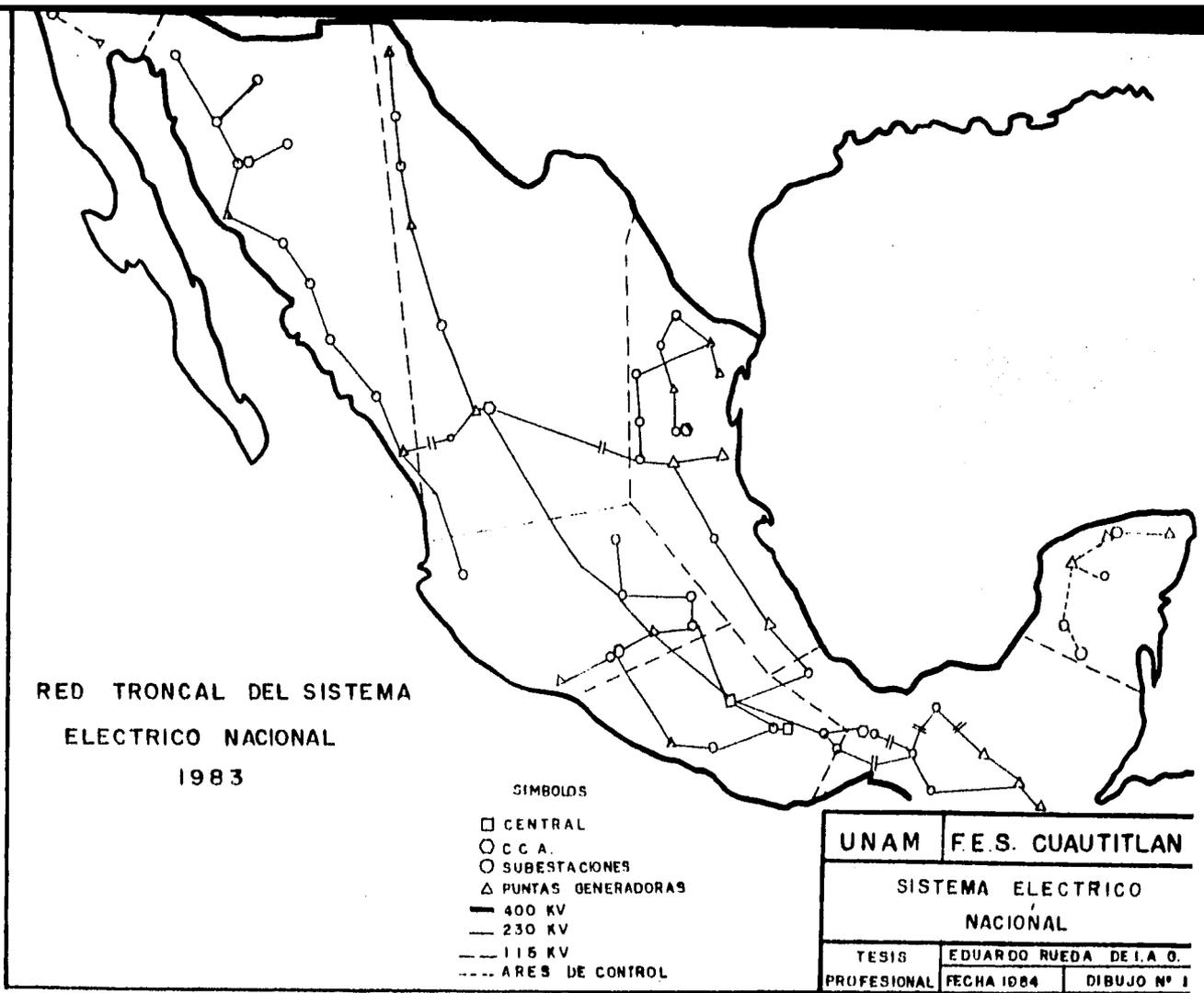
SIMBOLS

- CENTRAL
- C.C.A.
- SUBESTACIONES
- △ PUNTAS GENERADORAS
- 400 KV
- - - 230 KV
- 115 KV
- ARES DE CONTROL

UNAM F.E.S. CUAUTITLAN

SISTEMA ELECTRICO
NACIONAL

TESIS	EDUARDO RUEDA DE I.A.O.	
PROFESIONAL	FECHA 1984	DIBUJO N° 1



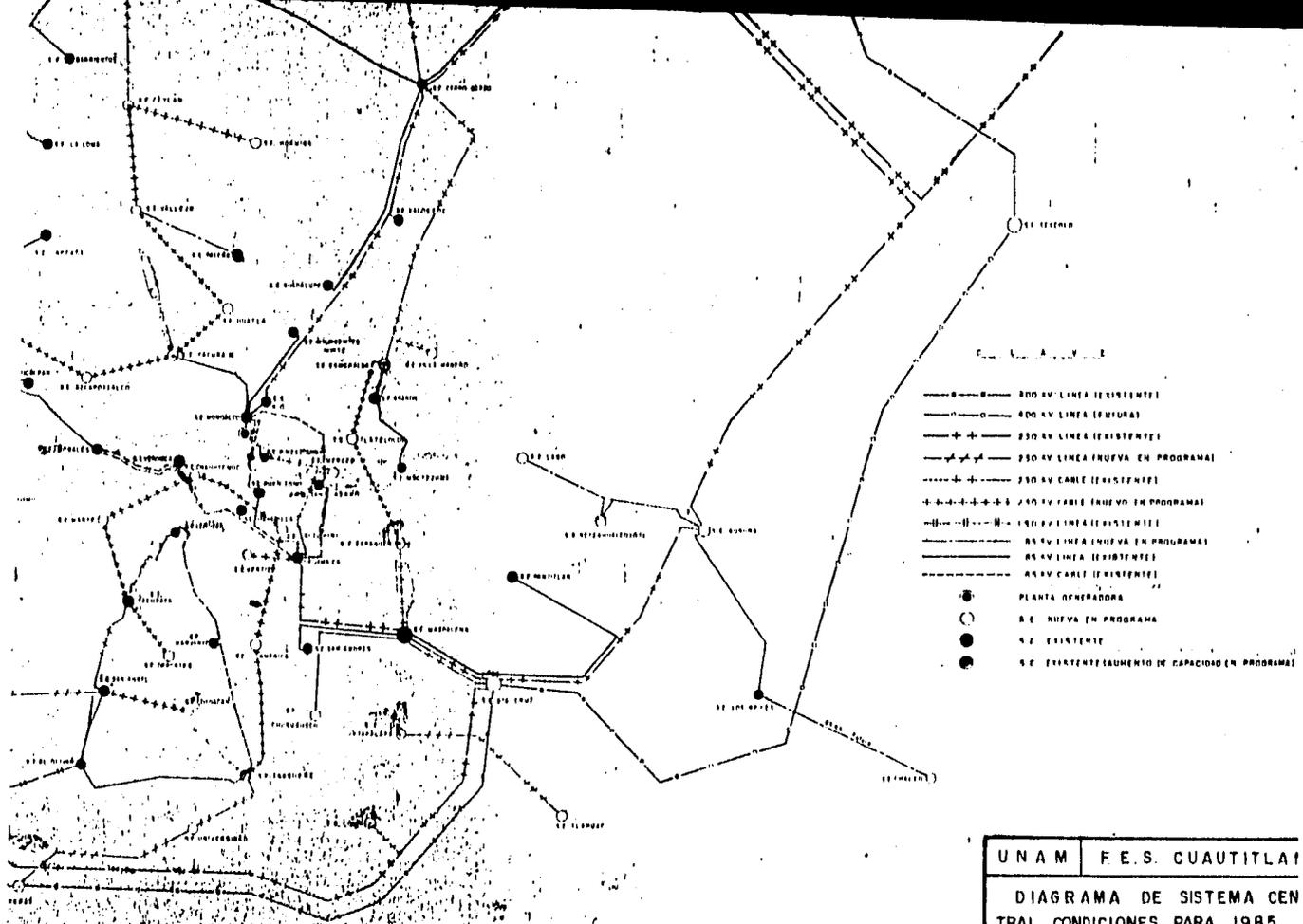
La nacionalización del servicio público de energía eléctrica fue sin duda una de las medidas trascendentales para el impulso de la interconexión del sistema eléctrico en México, así como para la elaboración de técnicas modernas de planeación, diseño, construcción y operación con raíces nacionales.

Las extensiones sirvieron para un mejor funcionamiento y normalizar, también los servicios de los Sistemas Orientales y occidentales, imponiendo procedimientos especiales con mayor atención a los detalles para la supervisión de la seguridad y calidad del servicio eléctrico para la población.

Como consecuencia de la interconexión del sistema eléctrico se han logrado tres ventajas fundamentales que son:

- I.- Apoyo mutuo de energía.
- II.- Diversidad de la demanda máxima total, pues es menor que la suma de las demandas máximas individuales.
- III.- Operación más económica. El costo de producción se reduce al aprovechar los recursos de generación más eficientes en función de su disponibilidad, independientemente de su localización.

La estructura resultante para el Sistema Eléctrico Nacional queda identificado como se muestra en el dibujo No. 2, al que se le llamó Sistema Eléctrico Longitudinal es únicamente para su localización para estudiarlo.



UNAM	F.E.S. CUAUTITLAN
DIAGRAMA DE SISTEMA CENTRAL, CONDICIONES PARA 1985	
TESIS PROFESIONAL	EDUARDO RUEDA DE LA O FECHA 1984 DIBUJO N° 2

c) Diagrama Unifilar de la Red de 400 KV.

La red troncal de 400 KV del Sistema Interconectado Nacional que se muestra en la Fig. 3 indica longitudes en Km. y el número de líneas en paralelo.

La red troncal de 400 KV consta de 6,280 Km.

Los centros de generación hidroeléctrica mas importantes del S.E.M. se localizan en las Cuencas de los Rfos Grijalva y -- Balsas, según datos de 1983, su capacidad en conjunto el 40% de la demanda máxima del Sistema Interconectado Nacional. Los centros de generación termoeléctrica tienden a alejarse de los gran des núcleos de población, debido a problemas y costos para el su ministro de combustible, necesidades de agua y contaminación ambiental. La capacidad instalada en el Sistema Eléctrico Nacional asciende a fines de 1983 a 19,121 KW o sea un 54%.

Por lo extenso del territorio, la gran separación entre - los distintos centros de producción de energía eléctrica y el con sumo de la misma, existe una baja densidad de potencia instalada (KW/KW) y de consumo por KWH/habitante. Lo anterior ha dado lugar a un sistema eléctrico débilmente interconectado.

CAPITULO 11

CONFIGURACION DEL SISTEMA ELECTRICO CORRESPONDIENTE AL ESTUDIO

a) Diagrama del estudio.

Se muestra a continuación el diagrama con el dibujo No. 4.

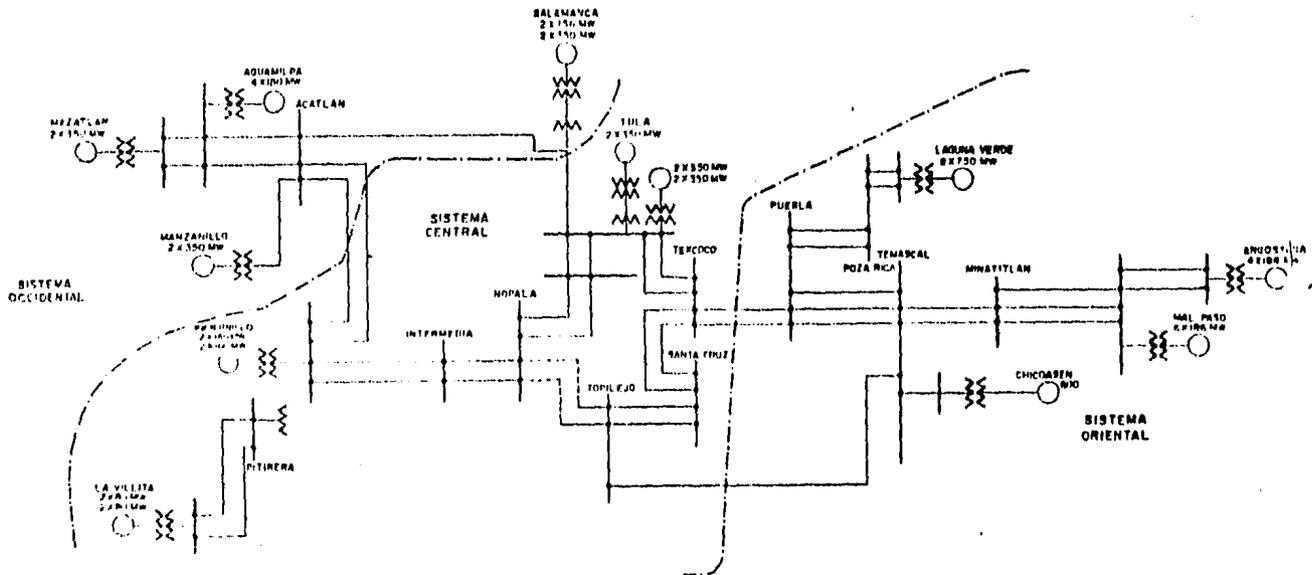
b) Característica fundamental del estudio .

El objetivo fundamental del estudio es determinar el comportamiento de la protección de respaldo de la línea de 400 KV, SANTA CRUZ-TEXCOCO Y SANTA CRUZ-TOPILEJO, debido a la conexión de capacitores serie para la compensación de los circuitos de 400 KV.

PUEBLA II - TEMAICAL

TEMAICAL - TOPILEJO

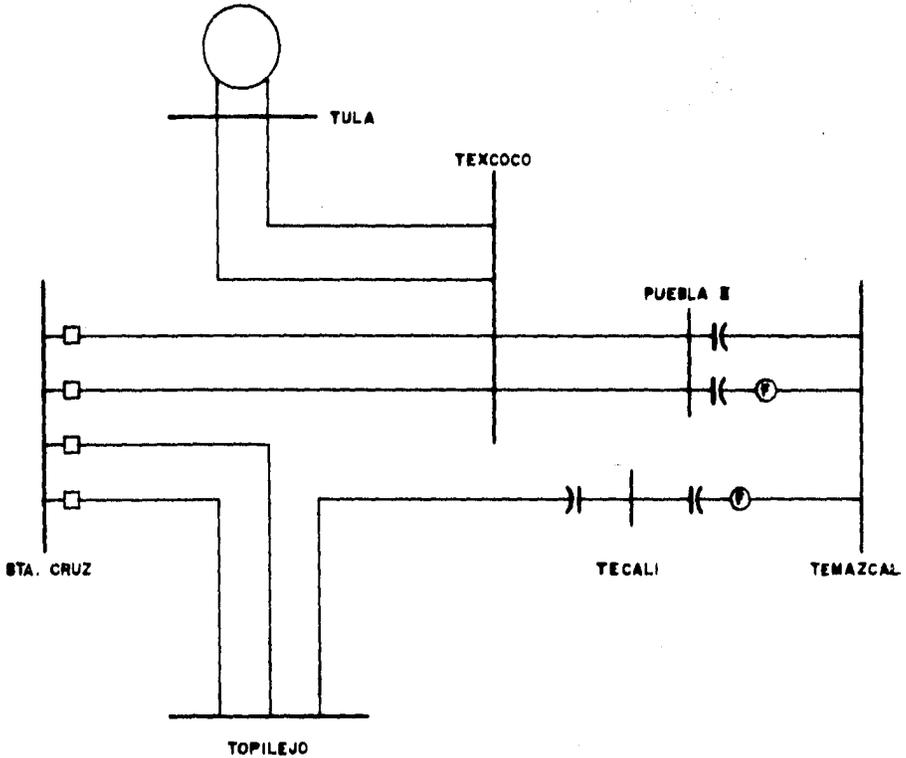
Este estudio se requiere debido a que la protección de respaldo de las líneas antes mencionadas, formada por relevadores de distancia más los capacitores serie, modifican la impedancia del sistema de protección. El estudio comprenderá el análisis de diferentes tipos de fallas, en diferentes puntos de la red de 400 KV.



EN EN PARALELO DE 400 KV
TOTAL

UNAM.	F. E. S. CUAUTILAN	
SISTEMA INTERCONECTADO DE 400 KV		
19510	EDUARDO RUEDA DE LA BARZA	
PROFESIONAL	FECHA 1968	DIBUJO N° 8

G).- ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PROTECCION DE DISTANCIA DE LA LINEA DE 400 KV.



ESC. SIN ESCALA

UNAM		F.E.S. CUAUTILAN	
LINEA DE 400 KV			
T E S I S		EDUARDO RUEDA DE LA G.	
PROFESIONAL		FEB. 1988	DIBUJO No. 4

CAPITULO III

CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LA PROTECCION DE LAS LINEAS.

- a).- Protección de Líneas de Transmisión por Medio de Relevadores de Distancia.

La protección de una línea de transmisión de energía eléctrica en alta tensión tiene la función de detectar las fallas que ocurran en la propia línea en un tiempo corto (entre 4 y 48 m.s) y originar un comando de liberamiento de la falla para evitar daños físicos a equipo asociado a la línea o la propia línea.

Las líneas de alta tensión, de 230 y 400 KV del Sistema Central están dotadas de una doble protección primaria y una protección de respaldo.

La mayoría de los circuitos de alta tensión del sistema central forman anillos y a la vez estos anillos se enlazan con otros sistemas de potencia, este hecho plantea un problema complejo para la selección de la protección de dichas líneas.

Para la selección de la protección de una línea, se debe de contar con la siguiente información:

- Características de la línea como son: longitud, si es una sola línea, líneas paralelas, o es una red completa; los datos de las impedancias de frecuencia positiva la de secuencia cero, separación entre conductores y su localización dentro del sistema de potencia.
- Datos de todo el sistema de potencia con la línea o líneas bajo estudio incluidas en la red de:
 - Flujo de energía para mínima y máxima generación.

- Corto circuito (monofásico y trifásico) para las condiciones de mínima y máxima generación.
- Estudio de Estabilidad del sistema de potencia. (Estos estudios los realiza el Departamento de Planeación).

Con esta información se obtienen los datos de la manera de como van a variar y los límites mínimos y máximos de los parámetros eléctricos en la línea sujeto a estudio.

Con los datos de la propia línea y los rangos de variación de los parámetros para las condiciones normales y bajo diferentes tipos de fallas en la línea o en el sistema de potencia - se establecen los criterios del tipo de detectores de falla (de sobre corriente de secuencia positiva, negativa, cero; la combinación de las tres corrientes o la combinación de solamente dos; de bajo o sobre voltaje; la combinación de corriente y voltaje ; comparación de magnitudes, fase, etc.) que se van a utilizar para proteger la línea.

El detector de falla a veces lo constituye un solo relevador o un conjunto de relevadores para integrar un esquema de - protección . Existen básicamente dos familias de relevadores: los electromecánicos y los de estado sólido.

Para poder decidir qué tipo de relevadores, electromecánico o de estado sólido que se deben de emplear como esquema de protección de una línea de transmisión es necesario dar algunas ventajas y desventajas de cada uno de los dos tipos de relevadores.

Relevadores Electromecánicos.

Los relevadores electromecánicos funcionan en respuesta en una o más magnitudes eléctricas, sus componentes son circuitos magnéticos y eléctricos que se interaccionan para producir el movimiento de cierre y apertura de sus contactos.

Los relevadores electromecánicos detectan fallas eléctricas entre 12-48m.s. dependiendo de la magnitud de la cantidad eléctrica que se suministra para su operación, su construcción es sencilla con relación a los relevadores de estado sólido, consumen mucha potencia (carga para los transformadores de corriente y de potencial), ocupan mucho espacio en los tableros, son sensibles a vibraciones, no les afectan mayormente los fenómenos electromagnéticos externos, soportan mayores sobretensiones en su circuito de control, no les afectan las variaciones bruscas de las condiciones ambientales.

Relevadores estáticos (Electrónicos).

Un relevador estático es aquel en el que la medición o comparación de magnitudes eléctricas se hace en una red transistorizada la cual está diseñada para dar una señal de salida en la dirección de disparo cuando se rebasa la condición de operación del relevador.

Los circuitos de los relevadores estáticos son mucho más complicados que los de su equivalente electromecánico.

Los relevadores estáticos son de muy alta velocidad en

la detección de fallas (4-8 m.s) consumen poca potencia; son de construcción compacta; son insensibles a vibraciones mecánicas o debidas a sismos; les afecta el ruido eléctrico, los campos magnéticos, sobretensiones en los circuitos de control y temperatura de ambiente.

Si los relevadores estáticos se conectan a transformadores de corriente del tipo convencional pueden operar falsamente debido a que la constante de tiempo ($T_2 = 4 \text{ a } 5 \text{ seg}$) secundario es muy largo y por lo tanto el decaimiento de la componente de corriente directa también dura este tiempo haciendo que la corriente que reciben sean bastante distorcionada.

La alta velocidad de los relevadores estáticos para detectar una falla no se puede aprovechar ya que se debe de tener un mayor tiempo para eliminar la posibilidad de estar detectando un transitorio y no una falla, por lo tanto hay que retrasar el tiempo de la señal de disparo.

En términos muy generales estas son algunas características de los relevadores electromecánicos y de estado sólido, también se han mencionado algunas ventajas y desventajas relevantes y con estos datos se puede afirmar que ninguna de las dos familias de relevadores tienen ventajas relevantes una sobre la otra y que más bien las desventajas de los relevadores estáticos las suplen los relevadores electromecánicos y viceversa. Esta situación conduce que para la detección de fallas de la protección de las líneas, unasea a base de relevadores de estado -

sólido y otra a base de relevadores electromecánicos.

Otro aspecto importante que hay que analizar con relación a la detección de fallas es que un relevador o esquema completo puede ser que no sea capaz de detectar absolutamente todas las fallas que ocurran en el circuito que está protegiendo, ya que debido a la cantidad de tipos de fallas y las condiciones de generación de energía en el sistema de potencia, en el momento en el que ocurre la falla, definen también las magnitudes de las señales eléctricas que recibirán los relevadores. Este hecho sugiere que la doble protección de los circuitos de alta tensión no deban de tener los mismo tipos de detectores de falla (doble hilo piloto ó doble comparación de fases a través de onda portadora, esta práctica se tenía en el pasado para circuitos de 250 KV y se ha abandonado).

Por lo tanto la doble protección de las líneas de transmisión se lleva a cabo mediante dos esquemas con detectores de falla diferentes.

La protección primaria que es a base de relevadores de estado sólido tienen detectores de fallas diferentes a los de la protección de respaldo a base de relevadores electromecánicos.

Estrictamente la protección primaria de un circuito es aquella que origina una orden de disparo para librar una falla sin ninguna demora de tiempo predispuesto; una protección de respaldo es la que retarda intencionalmente la orden de disparo para el libramiento de una falla. En el caso de las protecciones

de los circuitos del sistema central, tanto la primaria como la de respaldo, dan la orden de disparo para el libramiento de la falla sin ninguna demora intencional. Se ha procurado que una o las dos protecciones funcionen como protección de respaldo remoto a circuitos adyacentes y a barras colectoras y los bancos de potencia.

Finalmente los atributos característicos funcionales de los relevadores o esquemas tanto electromecánicos como de estado sólido establecen ciertas bases para la selección de los mismos.

Las características funcionales de los relevadores son: confiabilidad, velocidad, selectividad, seguridad y sensibilidad; estas características no pueden ser cumplidas simultáneamente ya que un relevador seguro no puede ser de muy alta velocidad y viceversa, sin embargo, el circuito que se va a proteger da otros elementos para seleccionar las características funcionales de los esquemas. Por ejemplo si se va a proteger una línea que enlaza dos sistemas, entonces su esquema debe de ser altamente seguro y selectivo o sea sin duda que cuando ocurre una falla que se localiza en la línea, sin embargo para lograr lo anterior se sacrifica la velocidad. Si por otro lado, se van a proteger dos circuitos que enlazan a una subestación o sistemas y un solo circuito, tiene la capacidad para conducir la carga de los circuitos cuando uno de éstos se encuentre fuera de operación entonces se puede emplear un esquema confiable y de muy alta velocidad.

Hasta aquí se ha pretendido dar los aspectos, aunque en términos muy generales, que involucra la selección de una protección.

Tomando como base todo lo descrito se ha concluido que una de las protecciones de las líneas de transmisión de 230 KV y 400 KV, es a base de relevadores de distancia; cuyo comportamiento y respuesta para diferentes condiciones del sistema de potencia se analizarán a continuación con más detalle.

b).- Area de operación de los relevadores de distancia

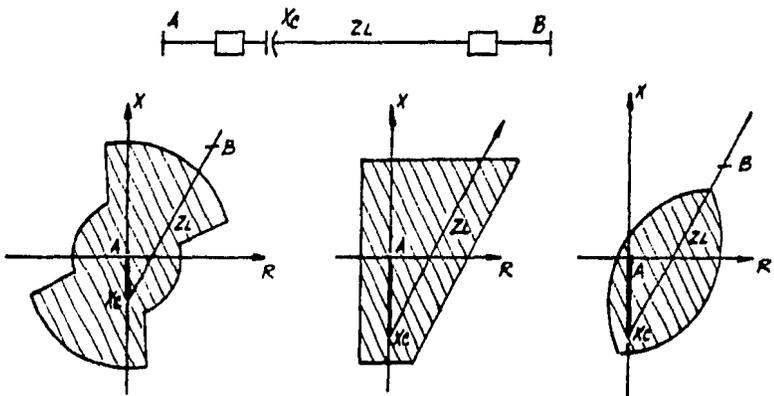
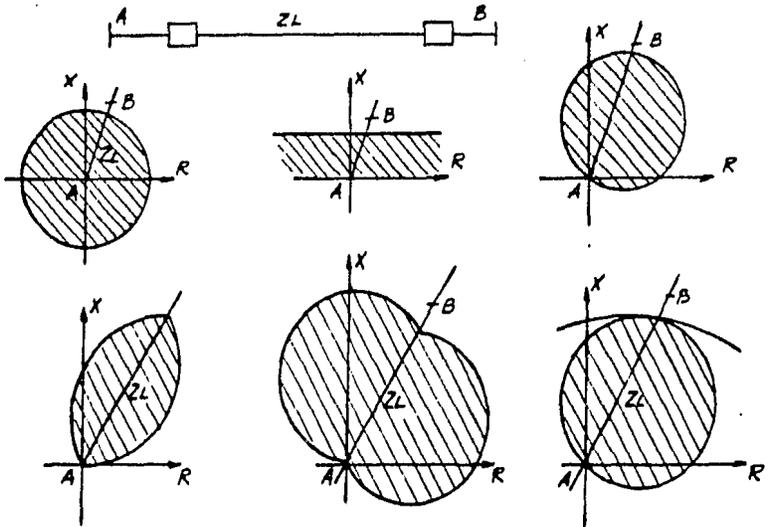
Un relevador de distancia es direccional, y mide la impedancia del circuito que protege. En el dibujo No. 5 la zona que está sombreada es en donde existe la protección de estos relevadores.

También existen relevadores de distancia para la protección de fallas entre fases y fallas de fase a tierra.

Hay una infinidad de relevadores de distancia cuya característica de operación se muestra también en el dibujo No. 5.

Como anteriormente se mencionó la zona que está sombreada es la de operación; si le falla el cierto circuito no se localiza en dicha zona los relevadores de distancia no operan.

AREAS DE OPERACION DE LOS RELEVADORES DE DISTANCIA



U.N.A.M.	F. E. S. CUAUTITLAN
CARACTERISTICAS DE AREA DE OPERACION	
TESIS	EDUARDO RUEDA DE LA G.
PROFESIONAL	FECHA 1984 DIBUJO N° 5

CAPITULO IV

CONEXIONES PRINCIPALES DE LOS RELEVADORES DE DISTANCIA

a) Características principales de los relevadores

En un sistema eléctrico de potencia sus partes más importantes son los transformadores, las líneas de transmisión, etc. Estos son algunos de los elementos importantes básicos.

La importancia de la protección por relevadores en el diseño y funcionamiento de un sistema eléctrico de potencia consiste en lo siguiente:

Hay tres aspectos de un sistema de potencia:

- A.- FUNCIONAMIENTO NORMAL.
- B.- PREVISION DE UNA FALLA ELECTRICA.
- C.- REDUCCION DE LOS EFECTOS DE LA FALLA ELECTRICA.

A.- El término funcionamiento normal.

No hay falla de equipo ni errores de personas, incluye el requisito mínimo para la alimentación de la carga existente y una cierta cantidad de carga extra para sobredemanda

Algunas condiciones son:

- 1.- Localización de las estaciones generadoras
- 2.- Transmisión de la potencia a la carga.
- 3.- Estudio de las características de la carga y consideración para el crecimiento futuro.
- 4.- Medición
- 5.- Regulación de la tensión y la frecuencia

6.- Funcionamiento del sistema.

7.- Mantenimiento normal.

Las fallas eléctricas son originadas por un máximo efecto que es el corto circuito o falla, pero hay otras condiciones de funcionamiento anormales, propios de ciertos elementos del sistema que también requieren de atención.

Algunas de las características del diseño y funcionamiento con el fin de prevenir la falla eléctrica son:

- 1.- Provisión del aislamiento adecuado.
- 2.- Coordinación de la resistencia de aislamiento con las capacidades de los pararrayos.
- 3.- Uso de hilos de guarda y baja resistencia de tierra a las torres.
- 4.- Resistencia mecánica de diseño para reducir la exposición y para disminuir la probabilidad de fallas originadas por animales, pájaros, insectos, polvo, granizo, etc.
- 5.- Funcionamiento y prácticas de mantenimiento apropiado.

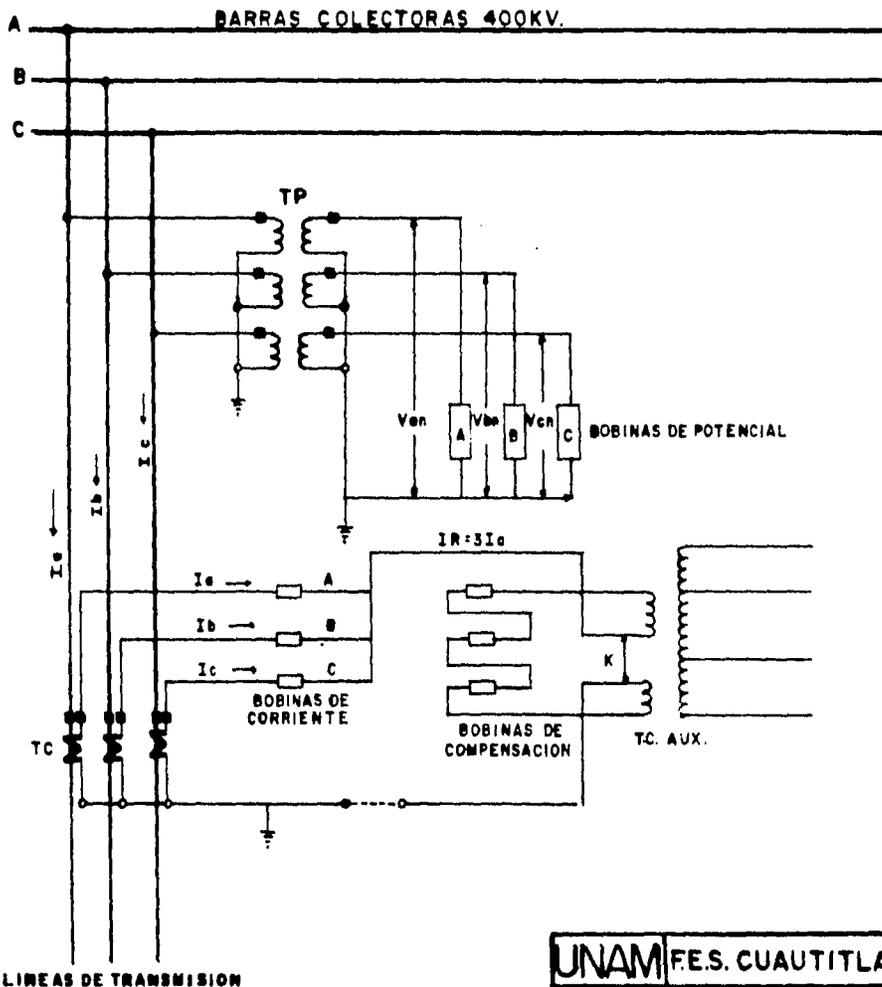
Las características para reducir los efectos de falla son las siguientes:

- A- Diseño para limitar la magnitud de corriente de corto circuito.
- A1- Evitando concentración muy grande de capacidad de generación.
- b) Conexiones principales de los relevadores.

Estas conexiones se muestran en las figuras No. 6 y

7.

CONEXION DE LOS RELEVADORES DE DISTANCIA PARA LA PROTECCION DE FALLAS DE FASE A TIERRA

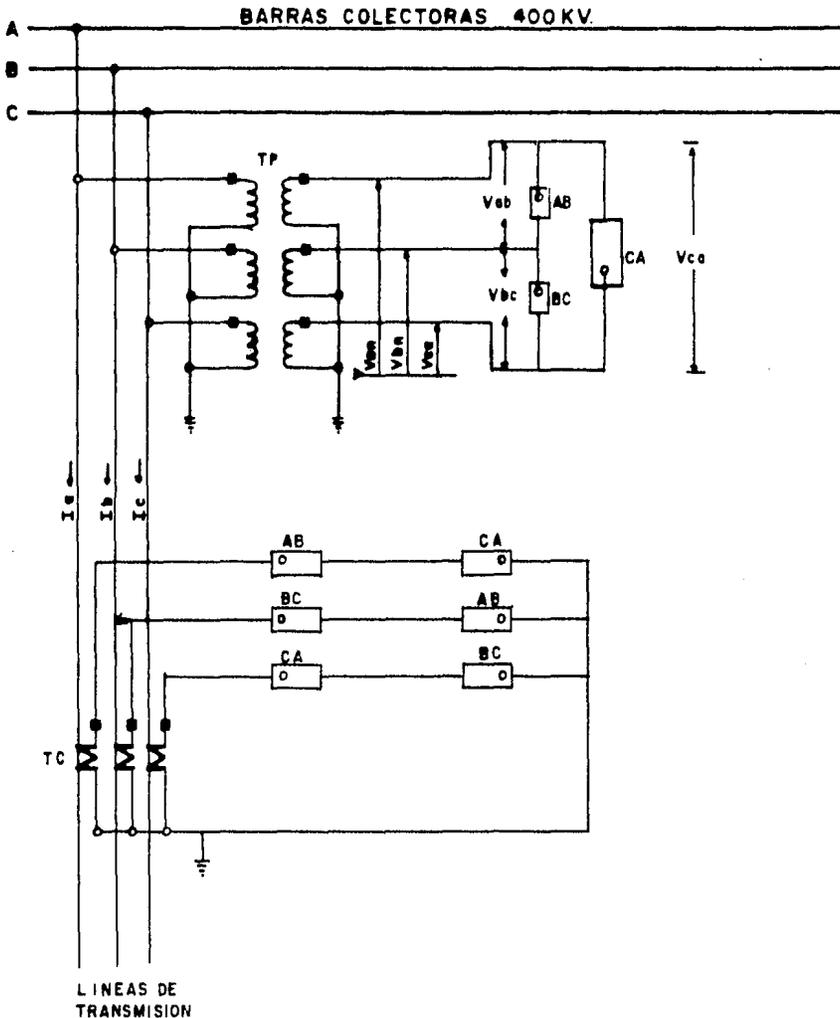


UNAM F.E.S. CUAUTITLAN

CONEXION DE RELEVADORES DE DISTANCIA FASE A TIERRA.

TE S I S EDUARDO RUEDA DE LA G.
 PROFESIONAL FECHA 1984 DIBUJO. N° 6

CONEXIONES RELEVADORES DE DISTANCIA PARA PROTECCION DE FALLAS ENTRE FASES



UNAM	FES. CUAUTITLAN	
CONEXION DE RELEVADORES DE DISTANCIA DE FALLAS ENTRE FASES		
TESIS	EDUARDO RUEDA DE LA G.	
PROFESIONAL	FECHA 1984	DIBUJO N° 7

CAPITULO V

CORTO CIRCUITO

a) Teoría de Corto Circuito.

a.1) Cálculos de fallas en redes eléctricas.

El vector voltaje de cada fase será la suma de tres componentes, llamadas cada una secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero.

$$V_a = V_{a_1} + V_{a_2} + V_{a_0}$$

$$V_b = V_{b_1} + V_{b_2} + V_{b_0}$$

$$V_c = V_{c_1} + V_{c_2} + V_{c_0}$$

Las componentes de secuencia positiva acompañadas con un índice 1, son tres vectores de igual magnitud y separadas angularmente 120° , con secuencia normal a,b,c, (mismo sentido que el sistema principal).

Las componentes de secuencia negativa acompañadas con un índice 2, son tres vectores de igual magnitud y separación angular de 120° , entre ellas, con secuencia a, c, b,

Las componentes de secuencia cero acompañadas con un índice 0, son tres vectores de la misma magnitud y con la misma dirección y sentido.

En el caso de un sistema trifásico resulta conveniente definir el operador " a " como un vector de magnitud unitaria y dirección 120° , con el sentido contrario del movimiento de las manecillas del reloj, con referencia a un vector sin modificar su magnitud.

Se tiene entonces:

$a = 1 \angle 120^\circ$; expresado en forma polar

$a = 1 (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ)$; en forma cartesiana

$$a = \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a = 0.5 + j0.866$$

y también $a^2 = -0.5 - j0.866$

$$a = -0.5 + j0.866$$

$$a^2 = 0.5 + j0.866$$

$$a + a^2 = -1$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

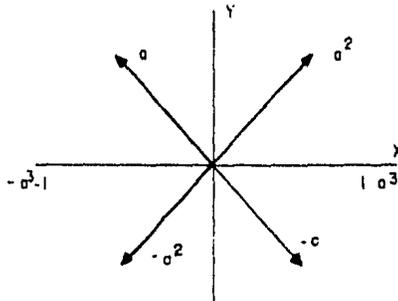
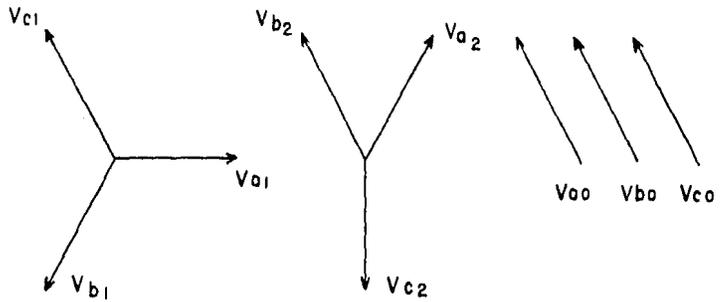


Fig N° 1

Con la ayuda del operador "a" se pueden llegar a obtener las siguientes simplificaciones.



$$V_{b1} = a^2 V_{a1}$$

$$V_{b2} = a V_{a2}$$

$$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0}$$

$$V_{c1} = a V_{a1}$$

$$V_{c2} = a^2 V_{a2}$$

Fig. N°2

por la relaciones iniciales tenemos:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}$$

se modifican para quedar

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$

$$V_b = V_{a0} + aV_{a1} + a^2V_{a2}$$

$$V_c = V_{a0} + aV_{a1} + a^2V_{a2}$$

lo expresamos en forma matricial

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

Haciendo

$$\Delta = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} ; \quad \Delta^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} ; \quad \Delta \Delta^{-1} = \mathbf{I}$$

\mathbf{I} = MATRIZ UNITARIA

$V\phi = A V_s$

$V\phi$ = Voltaje de fase

V_s = Voltaje de secuencias.

$$\begin{bmatrix} V_{a_0} \\ V_{a_1} \\ V_{a_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$$3 \begin{bmatrix} V_{a_0} \\ V_{a_1} \\ V_{a_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a & V_b & V_c \\ V_a & aV_b & a^2V_c \\ V_a & a^2V_b & aV_c \end{bmatrix}$$

$$3 V_{a_0} = V_a + V_b + V_c$$

$$3 V_{a_1} = V_a + aV_b - a^2V_c$$

$$3 V_{a_2} = V_a + a^2V_b - aV_c$$

Por tanto se puede :

- Calcular las cantidades de fase conociendo las componentes simétricas.
- Calcular las componentes simétricas conociendo las cantidades de fase.

Las reglas que limitan el uso de las componentes simé--

tricas son:

- 1).- Voltajes de secuencia positiva, negativa y cero -- que inducen únicamente corrientes de secuencia positiva, negativa o cero, respectivamente.
 - 2).- Corrientes de determinada secuencia, sólo podrán producir voltajes de esa misma secuencia.
 - 3).- Los elementos activos de la red solo generan voltaje de secuencia positiva.
 - 4).- Los voltajes de secuencia positiva y cero se consideraran generadoras en el punto de falla disminuyen en magnitud a medida que se van alejando de su punto.
 - 5).- El voltaje de secuencia positiva es mínimo en el punto de falla y máximo en el punto de generación.
 - 6).- Como las corrientes de secuencia cero están en fase y son de igual magnitud, necesitan el neutro, cuarto conductor con conexión a tierra, para poder circular.
- Inteconexión de mallas de secuencias para distintos tipos de falla.

b) FALLA TRIFASICA 3 ϕ

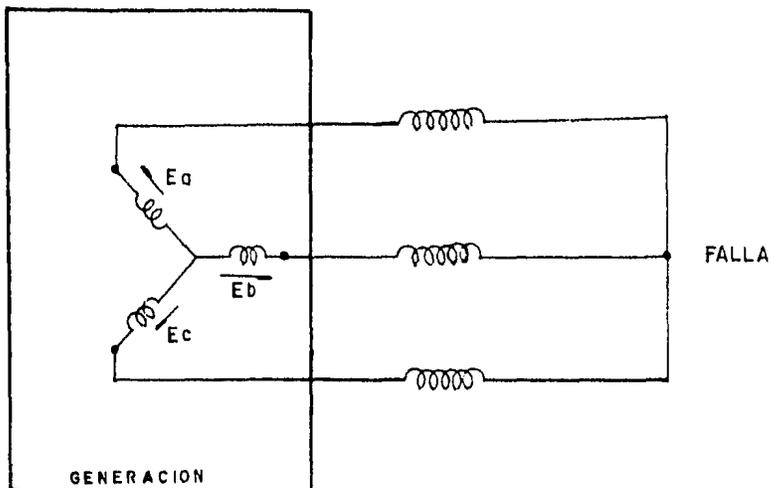


Fig N° 3

Para la secuencia positivo
tomamos como I_a en referen-
cia

$$3I_{a1} = I_{a1} + aI_{b2} + a^2I_{c3}$$

se sustituye

$$3I_{a1} = I_{a1} + aI_{b2} + a^2I_{c3}$$

$$3I_{a1} = I_{a1} + a(a^2I_{a1}) + a^2(aI_{a1})$$

$$3I_{a1} = I_{a1} + a^3I_{a1} + a^3I_{a1}$$

$$3I_{a1} = 3I_{a1}$$

$$I_{a1} = I_{a1}$$

E_{a1}

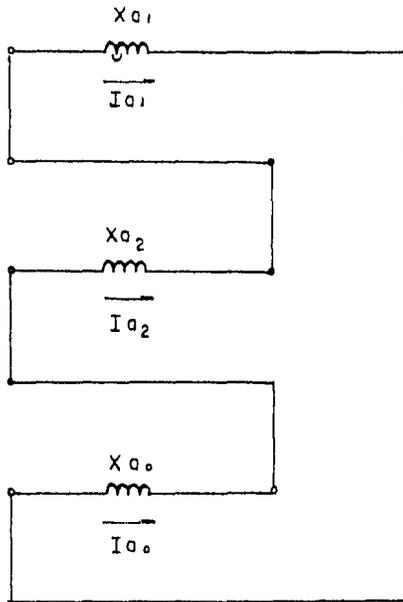


Fig N° 4

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$$

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{X_{a1} + X_{a2} + X_{a0}}$$

$$I_F = I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_F = I_{a1} + I_{a1} + I_{a1}$$

$$I_F = 3I_{a1}$$

$$I_F = \frac{3E_{a1}}{X_{a1} + X_{a2} + X_{a0}}$$

Valor por Unidad.

El valor numérico por unidad (P.U.) de una cantidad, es la relación de esta cantidad entre una escogida como base, por supuesto, ambas con iguales dimensiones.

Si elegimos una base de 60 KV, entonces 57 KV y 66 KV serán 0.95 KV y 1.10 respectivamente cuando se expresa por undad con respecto a la base ya mencionada.

Consideremos que la información de los parámetros de un sistema puede ser conocido en Ohms, en porciento, esto hace reconocer la dificultad de aplicar factores, por lo que se prefiere trabajar en "por unidad".

Para la secuencia negativa

$$3Ia_2 = Ia + a^2 Ia + aIc$$

$$3Ia_2 = Ia + aIa + a^2 Ia$$

$$3Ia_2 = Ia (1 + a + a^2) \quad 1 + a + a^2 = 0$$

$$3Ia_2 = 0$$

Para la secuencia cero

$$Ia = 0$$

En condiciones trifásicas balanceada solo existe secuencia positiva y la red de conexión en la siguiente:

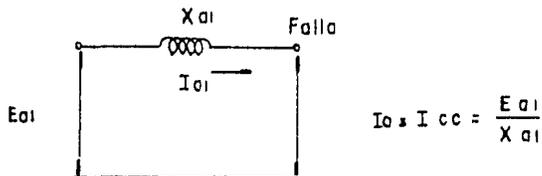


Fig N° 5

Falla de fase a tierra.

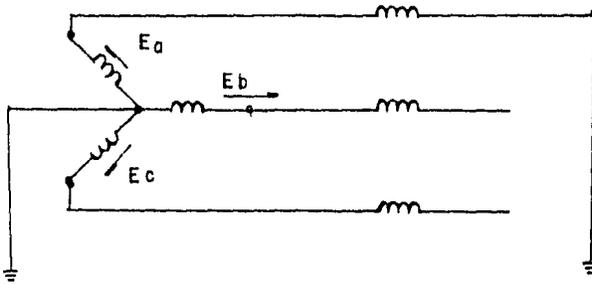


Fig N° 6

$$V_a = 0$$

$$I_b = 0$$

$$I_c = 0$$

$$\text{como } I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} = 0$$

$$I_c = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} = 0$$

$$I_b - I_c = (a^2 - a) I_{a1} + (a - a^2) I_{a2} = I_{a1} = I_{a2}$$

$$\text{Tambi3n } I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a1} + (I_{a1} - I_{a1}) + I_{a0} = 0$$

$$I_b = (a^2 + a + 1) I_{a1} - I_{a1} + I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = I_{a0} \text{ 3 sea } I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$$

Las fases deber3n conectarse en serie para satisfacer con estos resultados.

VI.-COMPORTAMIENTO DE LA PROTECCION PARA DIFERENTES CONDICIONES DE LA FALLA EN LA LINEA.

a).- Respuesta de los Relevadores de Distancia para diferentes tipos de fallas.

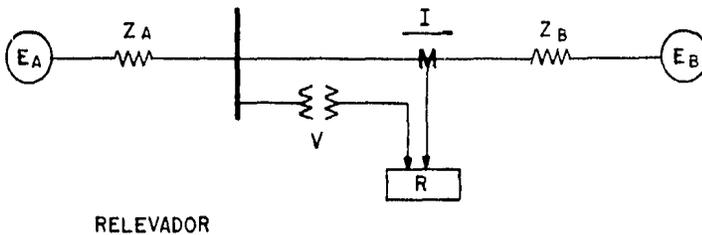


Fig N° 7

La impedancia (Z) vista por el relevador se define como

$$Z = \frac{V}{I}$$

$$I = \frac{E_a - E_b}{Z_a + Z_b}, \quad V = E_a - I Z_a \quad \text{sustituyendo}$$

$$Z = \frac{E_a - Z_a \left(\frac{E_a - E_b}{Z_a + Z_b} \right)}{\frac{E_a - E_b}{Z_a + Z_b}}$$

$$Z = \frac{E_a(Z_a + Z_b) - Z_a(E_a - E_b)}{E_a - E_b}$$

$$Z = \frac{E_a + E_a Z_b - Z_a E_a + E_b Z_a}{E_a - E_b}$$

$$Z = \frac{E_a Z_b + E_b Z_a}{E_a - E_b}$$

Esta es la formula de impedancia que ve un relevador -
 en condiciones normales de operación del sistema.

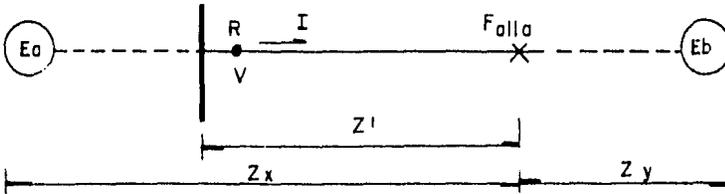


Fig N°8

$$Z \Rightarrow \frac{Z_x Z_y}{Z_x + Z_y} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{impedancia del sistema vista} \\ \text{en ambos lados de la falla.} \end{array} \right.$$

$Z_x =$ impedancia total que queda del lado izquierdo de la falla

$Z_y =$ impedancia total que queda del lado derecho de la falla.

$$C = \frac{Z_y}{Z_x + Z_y} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{relación de la corriente que recibe el rele-} \\ \text{vador con relación a la corriente de falla.} \end{array} \right.$$

$Z' =$ Impedancia desde el relevador hasta el punto de falla.

FALLA TRIFASICA

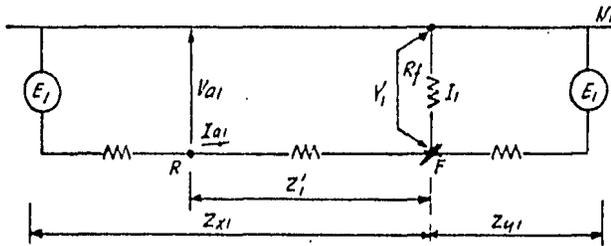


Fig N° 9

Corriente de falla: $I = \frac{E_1}{Z_i + R_f}$

Corriente en el relevador $I_{a1} = \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} I_i = C_1 I_i$

$$I_{a1} = C_1 I_i = \frac{C_1 E_1}{Z_i + R_f}$$

Voltaje en la falla: $V_f = I R_f = \frac{E_1}{Z_i + R_f} R_f$

Voltaje en el relevador $V_{a1} = V_f + I_{a1} Z_i = \frac{E_1 R_f}{Z_i + R_f} + \frac{C_1 E_1 Z_i}{Z_i + R_f}$

definimos: $\frac{E_1}{Z_i + R_f} = \frac{1}{K}$

$$V_{a1} = \frac{E_1 R_f}{Z_i + R_f} + \frac{C_1 E_1 Z_i}{Z_i + R_f} = \frac{R_f}{K} + \frac{C_1 Z_i}{K}$$

$\therefore K V_{a1} = R_f + C_1 Z_i$

$I = \frac{E_1}{Z_i + R_f} \quad C_1 = \frac{1}{K} \quad \therefore K I_{a1} = C_1$

En una falla trifásica se tiene que:

$$K I a_2 = 0, \quad K I a_0 = 0$$

$$K V a_2 = 0, \quad K V a_0 = 0$$

Por lo tanto las corrientes de fase en los relevadores son:

$$K I a = K I a_1 + K I a_2 + K I a_0 = R_f + C_1 Z'_i$$

$$K I b = a^2 K I a_1 + a K I a_2 + K I a_0 = a^2 (R_f + C_1 Z'_i)$$

$$K I c = a K I a_1 + a^2 K I a_2 + K V a_0 = a C_1$$

Las corrientes suministradas a los relevadores de fase son:

$$K(I a - I b) = C_1 - a^2 C_1 = (1 - a^2) C_1$$

$$K(I b - I c) = a^2 C_1 - a C_1 = (a^2 - a) C_1$$

$$K(I c - I a) = a C_1 - C_1 = (a - 1) C_1$$

Los voltajes de fase tierra en los relevadores son:

$$K V a = K V a_1 + K V a_2 + K V a_0 = R_f + C_1 Z'_i$$

$$K V b = a^2 K V a_1 + a K V a_2 + K V a_0 = a^2 (R_f + C_1 Z'_i)$$

$$K V c = a K V a_1 + a^2 K V a_2 + K V a_0 = a (R_f + C_1 Z'_i)$$

Los voltajes entre fases suministrados a los relevadores de fase son:

$$KV_{ab} = K(V_a - V_b) = (1 - a^2)(R_f + C_1 Z_i')$$

$$KV_{bc} = K(V_b - V_c) = (a^2 - a)(R_f + C_1 Z_i')$$

$$KV_{ca} = K(V_c - V_a) = (a - 1)(R_f + C_1 Z_i')$$

Impedancia vista por los relevadores de distancia de fase:

$$Z'_{ab} = \frac{K(V_a - V_b)}{K(I_a - I_b)} = \frac{(1 - a^2)(R_f + C_1 Z_i')}{(1 - a)C_1} = \frac{R_f + C_1 Z_i'}{C_1} = Z_i' + \frac{R_f}{C_1}$$

$$Z'_{bc} = \frac{K(V_b - V_c)}{K(I_b - I_c)} = \frac{(a^2 - a)(R_f + C_1 Z_i')}{(a^2 - a)C_1} = \frac{R_f + C_1 Z_i'}{C_1} = Z_i' + \frac{R_f}{C_1}$$

$$Z'_{ca} = \frac{K(V_c - V_a)}{K(I_c - I_a)} = \frac{(a - 1)(R_f + C_1 Z_i')}{(a - 1)C_1} = \frac{R_f + C_1 Z_i'}{C_1} = Z_i' + \frac{R_f}{C_1}$$

La impedancia que ven los tres relevadores de distancia para protección de fallas entre fases es la misma.

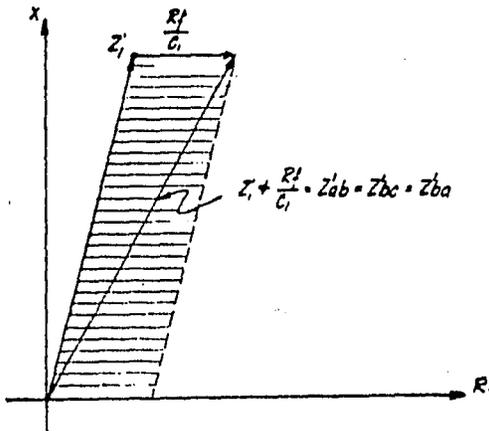


Fig N° 10

Impedancia que se le presentan a los relevadores de distancia para una falla trifásica .

Todas las fallas que ocurran entre el relevador y Z_i presentará a los relevadores una impedancia dentro del área sombreada, para $R_f = \text{max}$.

Falla entre dos fases (B y C)

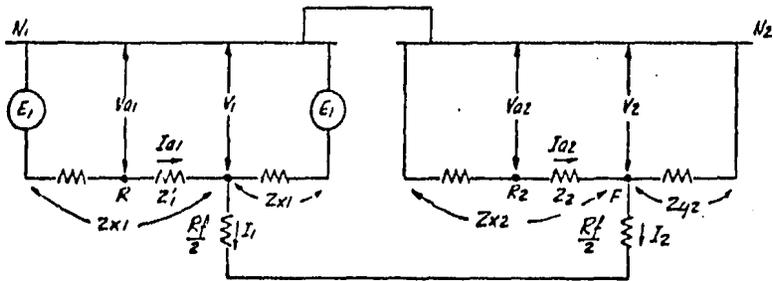


Fig N° 11

Corriente de falla de Sec. (+)

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + Z + R_f} = \frac{E_1}{2Z_1 + R_f} \quad (Z_1 = Z) = \frac{E_1}{2Z_1 + R_f} = \frac{1}{K}$$

Corriente de Sec. (-) $I_2 = - I_1$

Voltaje en la falla de Sec. (+)

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

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

$$V_1 = R I + I_1 Z_i = I_1 (Z_i + R_f)$$

Voltaje de Sec. (+) en los relevadores.

$$V_{a1} = V_1 + I_{a1} Z'_1, \quad I_{a1} = C_1 I_1$$

$$V_{a1} = I_1 (Z_1 + R_f) + C_1 I_1 Z'_1$$

$$V_{a1} = I_1 (Z_1 + R_f + C_1 Z'_1)$$

$$\text{pero } I_1 = \frac{E}{2Z_1 + R_f} = \frac{1}{K}$$

$$= \frac{1}{K} (Z_1 + R_f + C_1 Z'_1) = K V_{a1} = Z_1 + R_f + C_1 Z'_1$$

Voltaje de sec. (-) en los relevadores:

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

$$C_2 I_2 = -C_1 I_1$$

$$V_{a2} = V_2 + I_{a2} Z'_2$$

$$= I_1 Z_1 + I_{a2} Z'_2; \quad I_{a2} = C_2 I_2; \quad \text{y } Z'_1 = Z'_2$$

$$= I_1 Z_1 + C_2 I_2 Z'_2$$

$$V_{a2} = I_1 Z_1 - C_1 I_1 Z'_1$$

$$= I_1 (Z_1 - C_1 Z'_1)$$

$$= \frac{1}{K} (Z_1 - C_1 Z'_1) \quad \underline{K V_{a2} = Z_1 - C_1 Z'_1}$$

Para una falla entre dos fases se tiene que:

$$I_{a1} = C_1 I_1 = \frac{C_1}{K}$$

$$\underline{K I_{a1} = C_1}$$

$$\underline{K I_{a2} = -C_1}$$

Corrientes en el relevador de fase en los relevadores:

$$K I_0 = K I_{a1} + K I_{a2} + K I_{a0}$$

$$= C_1 - C_1 + 0$$

$$= 0$$

$$\begin{aligned}
 KI_b &= a^2 KI_{a1} + a KI_{a2} + KI_{a0} \\
 &= a^2 C_1 + a(-C_1) + 0 \\
 &= (a^2 - a) C_1 \\
 KI_c &= a KI_{a1} + a^2 KI_{a2} + KI_{a0} \\
 &= (a^2 - a) C_1
 \end{aligned}$$

Corrientes que se le suministran a los relevadores de fase:

$$\begin{aligned}
 K(I_a - I_b) &= a - (a^2 - a) C_1 = -(a^2 - a) C_1 \\
 K(I_b - I_c) &= (a^2 - a) C_1 - (- (a^2 - a) C_1) - (a^2 - a) C_1 + (a^2 - a) C_1 = 2(a^2 - a) C_1 \\
 K(I_c - I_b) &= - (a^2 - a) C_1 - 0 = - (a^2 - a) C_1
 \end{aligned}$$

Voltajes de fase a tierra en el relevador.

$$\begin{aligned}
 KV_a &= KV_{a1} + KV_{a2} + KV_{a0} \\
 &= (Z_1 + R_f + C_1 Z_1') + (Z_1 - C_1 Z_1') + 0 \\
 &= 2Z_1 + R_f \\
 KV_b &= a^2 KV_{a1} + a KV_{a2} + KV_{a0} \\
 &= a^2 (Z_1 + R_f + C_1 Z_1') + a (Z_1 - C_1 Z_1') + 0 \\
 &= a^2 Z_1 + a^2 R_f + a^2 C_1 Z_1' + a Z_1 - a C_1 Z_1' \\
 &= a^2 R_f - Z_1 + (a^2 - a) C_1 Z_1' \\
 KV_c &= a KV_{a1} + a^2 KV_{a2} + KV_{a0} \\
 &= a (Z_1 + R_f + C_1 Z_1') + a^2 (Z_1 - C_1 Z_1') \\
 &= a Z_1 + a R_f + a C_1 Z_1' + a^2 Z_1 - a^2 C_1 Z_1' \\
 &= (a + a^2) Z_1 + a R_f + (a - a^2) C_1 Z_1' \\
 &= a R_f - Z_1 + (a - a^2) C_1 Z_1'
 \end{aligned}$$

Voltajes que se le suministran a los relevadores de fase.

$$\begin{aligned}
 K(V_a - V_b) &= (2Z_1 + R_f) - (a^2 R_f + Z_1 + (a^2 - a) C_1 Z_1') \\
 &= 2Z_1 + R_f - a^2 R_f - Z_1 - (a^2 - a) C_1 Z_1' \\
 &= 3Z_1 + (1 - a^2) R_f - (a^2 - a) C_1 Z_1' \\
 &= 3Z_1 + (1 - a^2) R_f + (a - a^2) C_1 Z_1'
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K(V_b - V_c) &= (a^2 R_f - Z_1 + (a^2 - a) C_1 Z_1') - (a R_f - Z_1 + (a - a^2) C_1 Z_1') \\
 &= a^2 R_f - Z_1 + (a^2 - a) C_1 Z_1' - a R_f + Z_1 - (a - a^2) C_1 Z_1' \\
 &= (a^2 - a) R_f + 2(a^2 - a) C_1 Z_1'
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K(V_c - V_a) &= (a R_f - Z_1 + (a - a^2) C_1 Z_1') - (2Z_1 + R_f) \\
 &= a R_f - Z_1 + (a - a^2) C_1 Z_1' - 2Z_1 - R_f \\
 &= (a - 1) R_f - 3Z_1 + (a - a^2) C_1 Z_1'
 \end{aligned}$$

Impedancia que se le presentan a los relevadores de distancia para una falla entre la fase "B" y la fase "C".

$$\begin{aligned}
 Z'_{ab} &= \frac{K(V_a - V_b)}{K(I_a - I_b)} = \frac{3Z_1 + (1-a^2)R_f + (a-a^2)C_1 Z_1'}{-(a^2-a)C_1} \\
 &= \frac{3Z_1}{-(a^2-a)C_1} + \frac{(1-a^2)R_f}{-(a^2-a)C_1} + \frac{(a-a^2)C_1 Z_1'}{-(a^2-a)C_1} \\
 &= \frac{3 \left(\frac{Z_{X1} Z_{Y1}}{Z_{X1} + Z_{Y1}} \right)}{(a-a^2) \left(\frac{Z_{Y1}}{Z_{X1} + Z_{Y1}} \right)} + \frac{\sqrt{3} \angle 30^\circ}{\sqrt{3} \angle -270^\circ} \frac{R_f}{C_1} + \frac{(a-a^2)}{(a-a^2)} Z_1' \\
 &= \frac{3 Z_{X1}}{\sqrt{3} \angle 90^\circ} + \frac{1 \angle 300^\circ}{C_1} R_f + Z_1'
 \end{aligned}$$

$$Z'_{ab} = Z_1' - j\sqrt{3} Z_{X1} - a \frac{R_f}{C_1}$$

$$\begin{aligned}
 Z'_{bc} &= \frac{K(V_b - V_c)}{K(V_b - V_c)} = \frac{2(a^2-a)C_1 Z_1' + (a^2-a)R_f}{2(a^2-a)C_1} \\
 &= \frac{2(a^2-a)C_1 Z_1'}{2(a^2-a)C_1} + \frac{(a^2-a)R_f}{2(a^2-a)C_1}
 \end{aligned}$$

$$Z'_{bc} = Z_1' + \frac{R_f}{2C_1}$$

$$\begin{aligned}
 Z'_{ca} &= \frac{K(V_c - V_a)}{K(I_c - I_a)} = \frac{(a-a^2)C_1 Z_1' - 3Z_1 + (a+1)R_f}{-(a^2-a)C_1} \\
 &= \frac{(a-a^2)C_1 Z_1'}{(a-a^2)C_1} - \frac{3Z_1}{-(a^2-a)C_1} + \frac{(a+1)R_f}{-(a^2-a)C_1} \\
 &= Z_1' - \frac{3 \left(\frac{Z_{X1} Z_{Y1}}{Z_{X1} + Z_{Y1}} \right)}{\sqrt{3} \angle -270^\circ} + \frac{\sqrt{3} \angle 150^\circ R_f}{\sqrt{3} \angle -270^\circ C_1} \\
 &= Z_1' - \sqrt{3} \angle 270^\circ Z_{X1} + 1 \angle 420^\circ \frac{R_f}{C_1}
 \end{aligned}$$

$$Z'_{ca} = Z_1' + j\sqrt{3} Z_{X1} - a^2 \frac{R_f}{C_1}$$

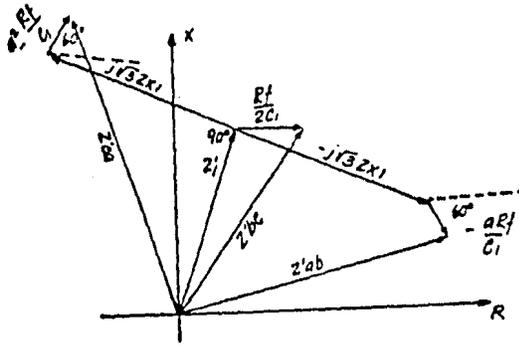


Fig N° 12

Impedancias que se les presentan a los relevados de fase para una falla entre la fase "B" y la fase "C".

Falla monofásica (fase "a" a tierra)

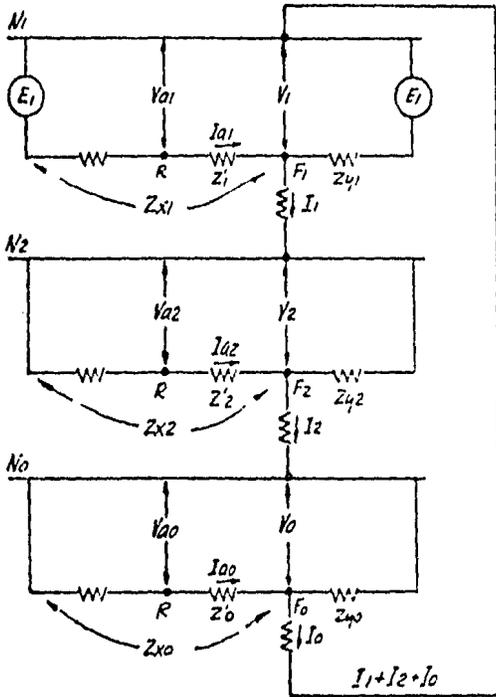


Fig N° 13

Corriente de sec. (+) en la falla.

$$I = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f} ; Z_1 = Z_2$$

$$I = \frac{E_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_f} = \frac{I}{K}$$

En una falla de fase a tierra:

$$I_1 = I_2 = I_0$$

Voltaje de sec. (+) en la falla

$$V_1 = I_1 R_f + (Z_2 + R_f) I_2 + (Z_0 + R_f) I_0 ;$$

$$V_1 = I_1 R_f + I_1 Z_2 + I_1 R_f + I_1 Z_0 + I_1 R_f .$$

$$V_1 = I_1 (Z_2 + Z_0 + 3R_f)$$

Voltaje de sec. (+) en los relevadores.

$$V = V_1 + I_{a1} Z'_1 ; I_{a1} = C_1 I_1$$

$$V = I_1 (Z_2 + Z_0 + 3R_f) + C_1 I_1 Z'_1$$

$$V = I_1 (C_1 Z'_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f)$$

$$KV_{a1} = C_1 Z'_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f$$

Voltaje de sec. (-) en los relevadores

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

$$V_{a2} = V_2 + I_{a2} Z'_2 ; \text{ pero } I_{a2} = I_2 C_2 = I_1 C_1$$

$$V_{a2} = -I_1 Z_1 + I_1 C_1 Z'_2$$

$$KV_{a2} = C_1 Z'_2 - Z_1$$

Corriente de sec. (-) en los relevadores.

$$K I a_2 = C_1$$

Voltaje de Sec. (e) en la falla

$$V_o = - I_o Z_o$$

Voltaje de sec. (e) en el relevador

$$V_{ao} = V_o + I_{ao} Z'_o, I_{ao} = C_o I_o = C_o I_o$$

$$V_{ao} = -I_o Z_c + C_o I_o Z'_o.$$

$$V_{ao} = I_o (C_o Z'_o - Z_o)$$

$$K V_{ao} = C_c Z_b - Z_o$$

Corriente de sec. (e) en los relevadores

$$K I_{ao} = C_c$$

Corrientes de fases en los relevadores

$$K I_a = K I a_1 + I a_2 + I a_0$$

$$= C_1 - C_1 + C_0$$

$$K I_a = C_0$$

$$\begin{aligned}
 KIb &= a^2 I_a + a KI_{a_2} + I_a a \\
 &= a^2 C_1 + a C_1 + C_0 \\
 &= (a + a) C_1 + C_0
 \end{aligned}$$

$$KIb = C_0 - C_1$$

$$\begin{aligned}
 KIc &= a KI_{a_1} + a_2 KI_{a_2} + KI_{a_0} \\
 &= a C_1 + a^2 C_1 + C_0 \\
 &= (a + a^2) C_1 + C_0
 \end{aligned}$$

$$KIc = C_0 - C_1$$

Corrientes que se le suministran a los relevadores de fase

$$KIa - KIb = 2 C_1 + C_0 - (C_0 - C_1)$$

$$KIa - KIb = 3 C_1$$

$$\begin{aligned}
 KIb - KIc &= C_0 - C_1 - (C_0 - C_1) \\
 &= C_0 - C_1 - C_0 + C_1
 \end{aligned}$$

$$KIb - KIc = 0$$

$$\begin{aligned}
 KIc - KIb &= C_0 - C_1 - (2 C_1 + C_0) \\
 &= C_0 - C_1 - 2 C_1 - C_0
 \end{aligned}$$

$$KIc - KIa = -3 C_1$$

Voltajes de fase a tierra en los relevadores.

$$\begin{aligned} KV_a &= KV_{a1} + KV_{a2} + KV_{a0} \\ &= C_1 Z_1' + Z_1 + Z_0 + 3R_f + C_1 Z_1' - Z_1 + C_0 Z_0' - Z_0 \\ KV_a &= 2C_1 Z_1' + C_0 Z_0' + 3R_f. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} KV_b &= a^2 KV_a + a KV_{a2} + KV_{a0} \\ &= a^2 (C_1 Z_1' + Z_1 + Z_0 + 3R_f) + a (C_1 Z_1' - Z_1) - C_0 Z_0' - Z_0 \\ &= a^2 C_1 Z_1' + a^2 Z_1 + a^2 Z_0 + 3a^2 R_f + a C_1 Z_1' - a Z_1 + C_0 Z_0' - Z_0 \\ &= (a^2 - a) C_1 Z_1' + (a^2 - a) Z_1 + (a^2 - 1) Z_0 + C_0 Z_0' + 3a^2 R_f \\ KV_b &= -C_1 Z_1' + (a^2 - a) Z_1 + (a^2 - 1) Z_0 + C_0 Z_0' + 3a^2 R_f. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} KV_c &= a KV_{a1} + a^2 KV_{a2} + KV_{a0} \\ &= a (C_1 Z_1' + Z_1 + Z_0 + 3R_f) - a^2 (C_1 Z_1' - Z_1) + C_0 Z_0' - Z_0 \\ &= a C_1 Z_1' + a Z_1 + a Z_0 + 3a R_f + a^2 C_1 Z_1' - a^2 Z_1 + C_0 Z_0' - Z_0 \\ &= (a + a^2) C_1 Z_1' + (a - a^2) Z_1 + (a - 1) Z_0 + C_0 Z_0' + 3a R_f \\ KV_c &= -C_1 Z_1' + (a - a^2) Z_1 + (a - 1) Z_0 + C_0 Z_0' + 3a R_f. \end{aligned}$$

Voltajes que se le suministran a los relevadores de fase.

$$\begin{aligned} KV_a - KV_b &= 2C_1 Z_1' + C_0 Z_0' + 3R_f + C_1 Z_1' - (a^2 - a) Z_1 - (a^2 - 1) Z_0 - C_0 Z_0' - 3a^2 R_f \\ KV_a - KV_b &= 3C_1 Z_1' - (a^2 - a) Z_1 - (a^2 - 1) Z_0 + 3R_f \end{aligned}$$

$$KVb - KVc = C_1 Z_1' + (a^2 - a) Z_1 + (a^2 - 1) Z_0 + C_0 Z_0' + 3a^2 R_f + C_1 Z_1 - (a - a^3) Z_1 - (a - 1) Z_0 - C_0 Z_0' - 3a R_f.$$

$$KVb - KVc = 2(a^2 - a) Z_1 - (a^2 - a)(Z_0 + 3R_f)$$

$$KVc - KVa = -C_1 Z_1' + (a - a^2) Z_1 + (a - 1) Z_0 + C_0 Z_0' + 3a R_f - 2C_1 Z_1' - C_0 Z_0' - 3R_f.$$

$$KVc - KVa = -3C_1 Z_1' + (a - a^2) Z_1 + (a - 1)(Z_0 + 3R_f)$$

Impedancia vista por los relevadores de fase para una falla de fase a tierra.

$$\begin{aligned} Z'_{ab} &= \frac{K(Va - Vb)}{K(Ia - Ib)} = \frac{3C_1 Z_1' - (a^2 - a) Z_1 - (a^2 - 1)(Z_0 + 3R_f)}{3C_1} \\ &= \frac{3C_1 Z_1'}{3C_1} - \frac{(a^2 - a)(Z_{x1} + Z_{y1})}{3 \left(\frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \right)} - \frac{(a^2 - 1)(Z_0 + 3R_f)}{3C_1} \\ Z'_{ab} &= Z_1' + \frac{j\sqrt{3} Z_{x1}}{3} - \frac{(a^2 - 1)(Z_0 + 3R_f)}{3C_1} \end{aligned}$$

$$Z'_{bc} = \frac{K(Vb - Vc)}{K(Ib - Ic)} = \frac{2(a^2 - a) Z_1 - (a^2 - a)(Z_0 + 3R_f)}{0} = \infty$$

$$Z'_{bc} = \infty$$

$$\begin{aligned} Z'_{ca} &= \frac{-3C_1 Z_1' + (a - a^2) Z_1 + (a - 1)(Z_0 + 3R_f)}{-3C_1} \\ &= \frac{-3C_1 Z_1'}{-3C_1} + \frac{(a - a^2) Z_1}{-3C_1} + \frac{(a - 1)(Z_0 + 3R_f)}{-3C_1} \\ &= Z_1' + \frac{(a - a^2)(Z_{x1} + Z_{y1})}{-3 \left(\frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \right)} - \frac{(a - 1)(Z_0 + 3R_f)}{-3C_1} \\ &= Z_1' + \frac{(a - a^2) Z_{x1}}{-3} - \frac{(a - 1)(Z_0 + 3R_f)}{3C_1} \\ Z'_{ca} &= Z_1' - \frac{j\sqrt{3} Z_{x1}}{3} - \frac{(a - 1)(Z_0 + 3R_f)}{3C_1} \end{aligned}$$

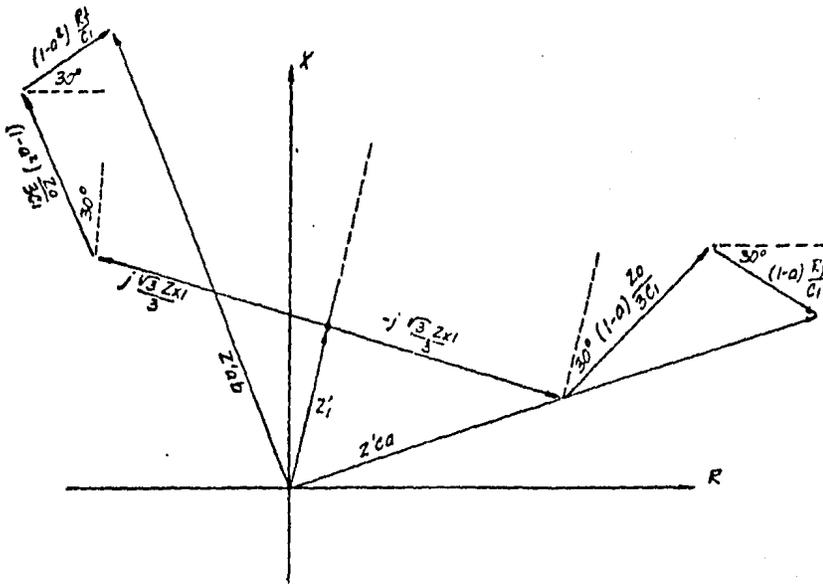


Fig. N° 14

$$Z'_{ab} = Z'_i + j \frac{\sqrt{3} Z_{x1}}{3} - \frac{(a^2-1)(Z_0+3R_f)}{3C_1}$$

$$Z'_{bc} = \infty$$

$$Z'_{ca} = Z'_i - j \frac{\sqrt{3} Z_{x1}}{3} - \frac{(a-1)(Z_0+3R_f)}{3C_1}$$

Gráfica de las impedancias vista por los relevadores de fase para una falla de fase a tierra.

Impedancia vista por los relevadores de tierra para una falla trifásica.

$$Z'_a = \frac{V_a}{I_a + I_0 \left(\frac{Z_0 - j}{Z'_i} \right)} = \frac{C_1 Z'_i + R_f}{C_1} = Z'_i + \frac{R_f}{C_1}$$

$$Z'_b = \frac{I_c}{I_b + I_0 \left(\frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \right)} = \frac{a^2 (R_f + C_1 Z_1)}{a^2 C_1} = Z_1 + \frac{R_f}{C_1}$$

$$Z'_c = \frac{I_c}{I_c + I_0 \left(\frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \right)} = \frac{a (R_f + C_1 Z_1)}{a C_1} = Z_1 + \frac{R_f}{C_1}$$

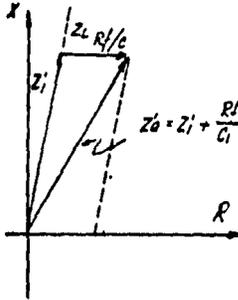


Fig N° 15

$$Z'_a = Z_1 + \frac{R_f}{C_1}$$

$$Z'_b = Z_1 + \frac{R_f}{C_1}$$

$$Z'_c = Z_1 + \frac{R_f}{C_1}$$

Gráfica de las impedancias vista por los relevadores de tierra para una falla trifásica.

Impedancia vista por los relevadores de distancia de tierra para una falla entre la fase "B" y la fase "C".

$$Z'_a = \frac{V_a}{I_a + I_0 \left(\frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \right)} = \frac{Z Z_1 + R_f}{0 + 0} = \infty$$

$$\begin{aligned}
 Z'_b &= \frac{I_b}{I_b + I_0 \left(\frac{Z'_0 - Z'_i}{Z'_i} \right)} = \frac{a^2 R_f - Z_1 + (a^2 - a) C_1 Z'_i}{(a^2 - a) C_1 + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0} I_0} \\
 &= \frac{a^2 R_f}{(a^2 - a) C_1} - \frac{Z_1}{(a^2 - a) C_1} + \frac{(a^2 - a) C_1 Z'_i}{(a^2 - a) C_1} \\
 &= \frac{a^2 R_f}{\sqrt{3} (-j) C_1} - \frac{\left(\frac{Z_{x1} Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \right)}{\sqrt{3} (-j) \left(\frac{Z_{x1} Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \right)} + Z'_i \\
 &= \frac{j a^2 R_f}{\sqrt{3} C_1} - \frac{j Z_{x1}}{\sqrt{3}} + Z'_i
 \end{aligned}$$

$$Z'_b = Z'_i - \frac{j}{\sqrt{3}} \left(Z_{x1} - \frac{a^2 R_f}{C_1} \right)$$

$$\begin{aligned}
 Z'_c &= \frac{I_c}{I_c + I_0 \left(\frac{Z'_0 - Z'_i}{Z'_i} \right)} = \frac{a R_f + Z_1 + (a - a^2) C_1 Z'_i}{-(a^2 - a) C_1} \\
 &= \frac{a R_f}{-(a^2 - a) C_1} - \frac{Z_1}{-(a^2 - a) C_1} + \frac{(a - a^2) C_1 Z'_i}{-(a^2 - a) C_1} \\
 &= \frac{a R_f}{\sqrt{3} j C_1} - \frac{\left(\frac{Z_{x1} Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \right)}{\sqrt{3} j \left(\frac{Z_{x1} Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} \right)} + Z'_i
 \end{aligned}$$

$$Z'_c = Z'_i + \frac{j}{\sqrt{3}} \left(Z_{x1} - a \frac{R_f}{C_1} \right)$$

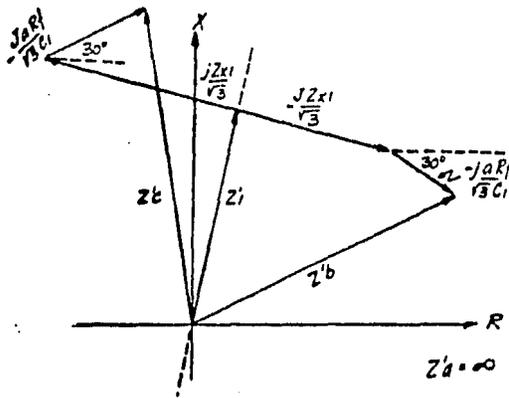


Fig. N° 16

$$\begin{aligned}
 Z'_a &= \infty \\
 Z'_b &= Z'_i - \frac{j}{\sqrt{3}} \left(Z_{x1} - \frac{a^2 R_f}{C_1} \right) \\
 Z'_c &= Z'_i + \frac{j}{\sqrt{3}} \left(Z_{x1} - \frac{a R_f}{C_1} \right)
 \end{aligned}$$

Gráfica de las impedancias vistas por los relevadores de distancia de tierra para una falla entre la fase "B" y la fase "C".

Impedancia vista por los relevadores de distancia de tierra para una falla de fase a tierra.

$$Z_a = \frac{V_a}{I_a + I_0 \left(\frac{Z_0 - Z_i}{Z_i} \right)} = \frac{2C_1 Z_i + C_0 Z_0 + 3R_f}{2C_1 + C_0 + C_0 \left(\frac{Z_0 - Z_i}{Z_i} \right)}$$

$$= \frac{(2C_1 Z_i + C_0 Z_0 + 3R_f)}{\frac{2C_1 Z_i + C_0 Z_i + C_0 Z_0 - C_0 Z_i}{Z_i}} = \frac{Z_i (2C_1 Z_i + C_0 Z_0 + 3R_f)}{2C_1 Z_i + C_0 Z_0}$$

$$= \frac{Z_i (2C_1 Z_i + C_0 Z_0)}{(2C_1 Z_i + C_0 Z_0)} + \frac{3R_f Z_i}{2C_1 Z_i + C_0 Z_0}$$

$$Z_a = Z_i + \frac{3R_f}{2C_1 + \frac{C_0 Z_0}{Z_i}}$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b + I_0 \left(\frac{Z_0 - Z_i}{Z_i} \right)} = \frac{-C_1 Z_i + (a^2 a) Z_i + (a^2 - 1) Z_0 + C_0 Z_0 + 3a^2 R_f}{C_0 - C_1 + C_0 \left(\frac{Z_0 - Z_i}{Z_i} \right)}$$

$$= \frac{Z_i (-C_1 Z_i + (a^2 a) Z_i + (a^2 - 1) Z_0 + C_0 Z_0 + 3a^2 R_f)}{C_0 Z_i - C_1 Z_i + C_0 Z_i - C_0 Z_i}$$

$$= \frac{Z_i (-C_1 Z_i + C_0 Z_0)}{(-C_1 Z_i + C_0 Z_0)} + \frac{(a^2 - a) Z_i Z_i + (a^2 - 1) Z_0 Z_i + 3a^2 R_f Z_i}{-C_1 Z_i + C_0 Z_0}$$

$$= Z_i + \frac{(a^2 - a) Z_i + (a^2 - 1) Z_0 + 3a^2 R_f}{-C_1 + C_0 \left(\frac{Z_0}{Z_i} \right)}$$

$$= Z_i + \frac{(-\sqrt{3}j) Z_i + (\sqrt{3} \angle 210^\circ Z_0 + 3a^2 R_f)}{-C_1 + C_0 \left(\frac{Z_0}{Z_i} \right)}$$

$$Z_b = Z_i + \frac{\sqrt{3} (j Z_i + Z_0 \angle 30^\circ - \sqrt{3} a^2 R_f)}{C_1 - C_0 \left(\frac{Z_0}{Z_i} \right)}$$

$$Z_c = \frac{V_c}{I_c + I_0 \left(\frac{Z_0 - Z_i}{Z_i} \right)} = \frac{-C_1 Z_i + (a - a^2) Z_i + (a - 1) Z_0 + C_0 Z_0 + 3a R_f}{C_0 - C_1 + C_0 \left(\frac{Z_0 - Z_i}{Z_i} \right)}$$

$$= \frac{Z_i (-C_1 Z_i + (a - a^2) Z_i + (a - 1) Z_0 + C_0 Z_0 + 3a R_f)}{Z_i C_0 - C_1 Z_i + C_0 Z_0 - C_0 Z_i}$$

$$= \frac{Z_i (-C_1 Z_i + C_0 Z_0)}{(-C_1 Z_i + C_0 Z_0)} + \frac{(a - a^2) Z_i + (a - 1) Z_0 + 3a R_f}{-C_1 + C_0 \left(\frac{Z_0}{Z_i} \right)}$$

$$= Z_i + \frac{j\sqrt{3} Z_i + \sqrt{3} \angle 150^\circ Z_0 + 3a R_f}{-C_1 + C_0 \left(\frac{Z_0}{Z_i} \right)}$$

$$Z_c = Z_i + \frac{\sqrt{3} (-j Z_i + \sqrt{3} \angle 30^\circ Z_0 - \sqrt{3} a R_f)}{C_1 + C_0 \left(\frac{Z_0}{Z_i} \right)}$$

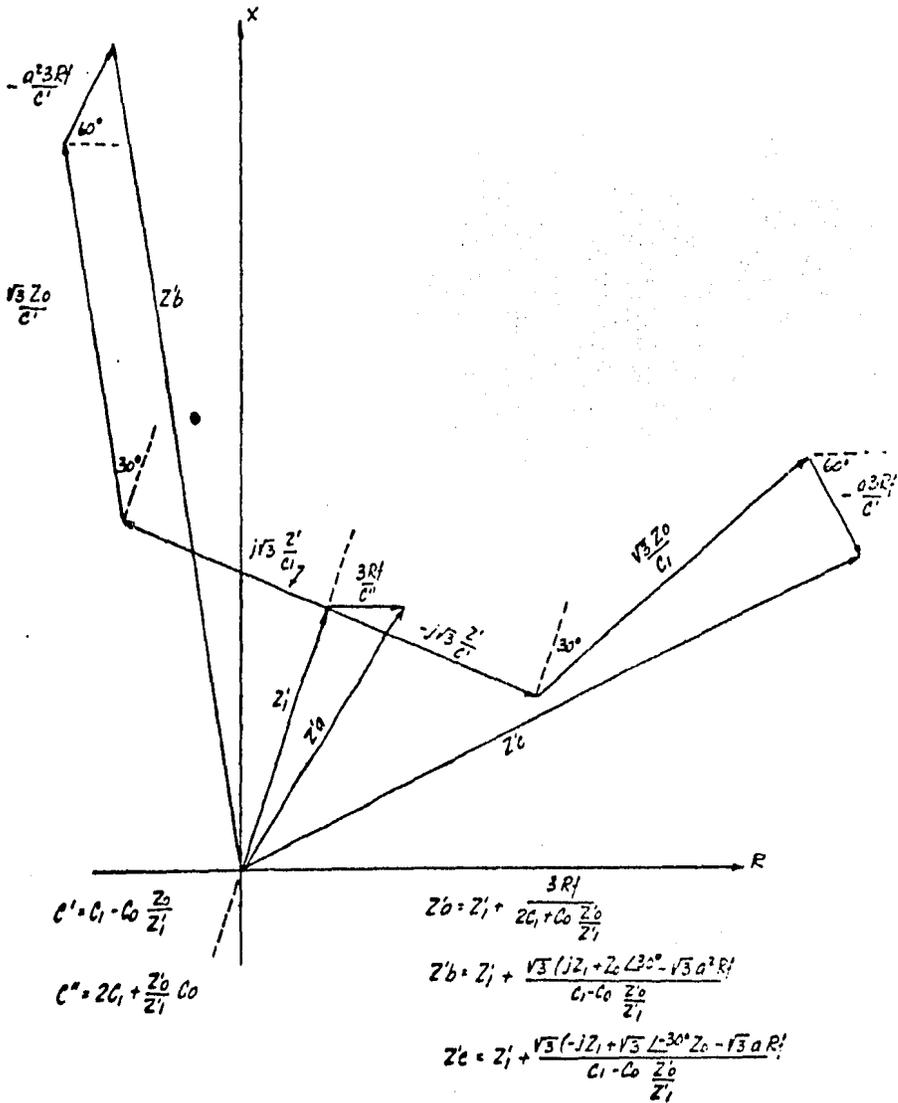


Fig N° 17

Gráfica de la impedancia vistas por los relevadores de distancia de tierra para una falla de fase a tierra.

(3) (p.270-272); (5) (P-158-171); (a) (P-205-207)

b) ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PROTECCION DE --
DISTANCIA EN LA LINEA DE 400 KV STA. CRUZ-TEXCOCO Y STA. CRUZ-
TOPILEJO, DEBIDO A LA COMPENSACION DE LA LINEA PUEBLA II- TEMA^Z
CAL Y TEMA^ZCAL-TOPILEJO.

El estudio principal es determinar la impedancia que
verán los relevadores de distancia de la protección del respaldo
de las líneas de 400 MVA que están entre las subestaciones Sta.
Cruz-Texcoco y Sta. Cruz-Topilejo, al ocasionarse una falla --
eléctrica inmediatamente después de los capacitores que se ins-
talaron en la Subestación Puebla II y en Tecali para compensar
las líneas de transmisión que enlazarán estas subestaciones.

En la línea de 400 KV Puebla II-Tamazcal se instaló
en la subestación Puebla II un banco de capacitores paralelo pa-
ra su compensación cuya reactancia capacitiva total es de $X_c =$
41.20 Ohms.

En la línea de 400 KV, Tamazcal-Topilejo, se instala-
ron dos bancos de capacitores en serie, en la subestación deno-
minada Tecali-Topilejo. Se instaló un banco de capacitores en -
Tecali de 18.6 Ohms. y entre Tecali - Tamazcal se instaló otro
de 39.8 Ohms.

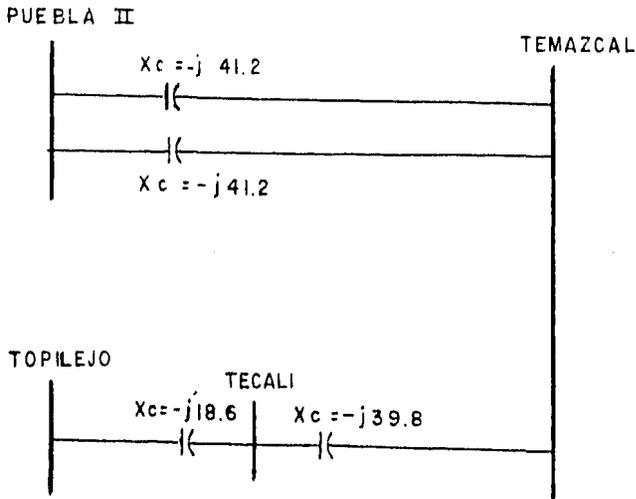


Fig N° 18

En el estudio de la respuesta de los relevadores de distancia, se muestran las características de las líneas y la localización de los mismos, cuyo comportamiento se va a analizar. Este análisis es debido a la variación de la impedancia del sistema por la introducción de los bancos de capacitores

Una gráfica en un sistema de coordenadas R - X de la impedancia que tendría en el sentido de disparo en los relevadores de la línea de 400 KV en Santa Cruz se muestran las configuraciones del dibujo No. 8.

En este mismo dibujo (No. 8) se ha superpuesto la -- característica de operación de las tres zonas del relevador. Se observa que la impedancia de la línea y los capacitores caen - dentro de la zona de operación del relevador y que para una falla después de uno de los bancos de capacitores y con una línea entre Puebla II y Temascal fuera de servicio del relevador. Esta función no es determinante, pues con una falla inmediatamente después , o hasta un 50% de la longitud de la línea, pudieran operar falsamente los relevadores de la protección .

La impedancia que miden los relevadores de distancia es función del voltaje y la corriente que se le aplica.

CONCLUSIONES

Como se puede observar en el ejemplo anexo, los cálculos efectuados corresponden a diversos casos de fallas de corto circuito en base a datos proporcionados por el Departamento de Planeación de Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A. comparando resultados con la teoría desarrollada, en todos ellos se ha encontrado que la impedancia vista por los relevadores, en todos los casos, cae fuera de la característica de disparo de los relevadores de distancia en el diagrama R-X, siendo dicha impedancia inclusive muy grande en comparación con la impedancia total de las líneas afectadas (Santa Cruz-Topilejo) por lo que el ajuste de los relevadores no varía esa falla. En otros casos, la impedancia vista por los relevadores da un resultado similar al de la teoría, sin embargo, dicha impedancia es mayor que la de la línea afectada y el relevador no ve la falla, dado que sus rangos de ajuste de las 3 zonas de protección no caen dentro de ese valor de impedancia.

Por lo resultados anteriores se puede decir que de acuerdo al análisis efectuado no es factible que los relevadores de distancia operen falsamente en la Subestación Santa Cruz, con una falla monofásica o trifásica después de los capacitores en las líneas Puebla II-Tamazcal & Topilejo-Tamazcal, por lo que la protección de respaldo con que cuentan actualmente las líneas Santa Cruz-Texcoco y Santa Cruz-Topilejo es la adecuada.

CONTRIBUCIONES DE CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO PARA UNA FALLA -
 EN LOS CAPACITORES SERIE INSTALADOS ENTRE LA S.E. PUEBLA Y S.E.
 TEMAZCAL.

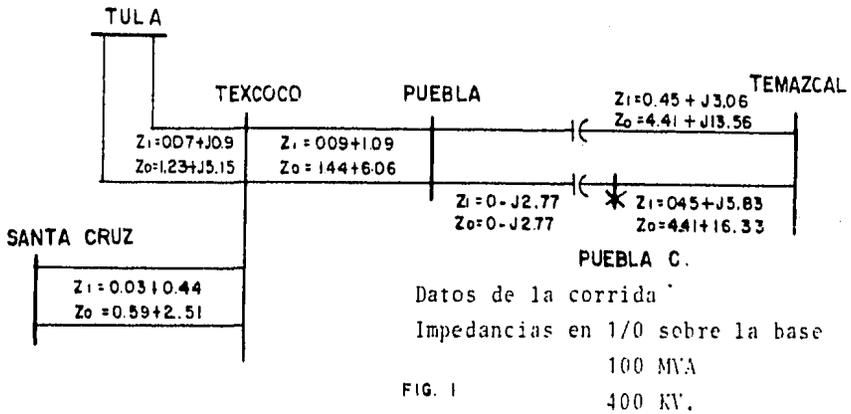


FIG. 1

CORTO CIRCUITO DE FASE A TIERRA EN BARRAS PUEBLA C.
 CONTRIBUCIONES EN MVAS. Corrientes P.u.

CON DOS LINEAS (PUEBLA-TEMAZCAL).

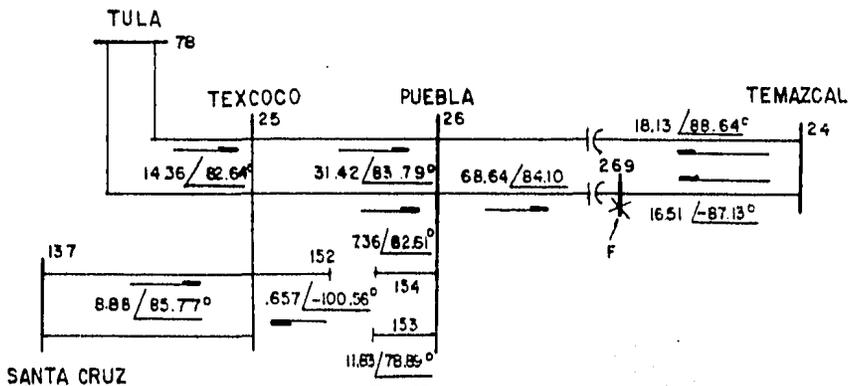


FIG. 2

CONTRIBUCIONES DE $I_a = 2I_1 + I_0$ A LA FALLA

$$I.P.U. = \frac{\frac{MVA_{cc} \times 1000}{\sqrt{3} \times 400}}{\frac{100 \times 1000}{\sqrt{3} \times 400}} = \frac{MVA_{cc} \times 1000 \times \sqrt{3} \times 400}{\sqrt{3} \times 400 \times 100 \times 1000} = \frac{MVA_{cc}}{100}$$

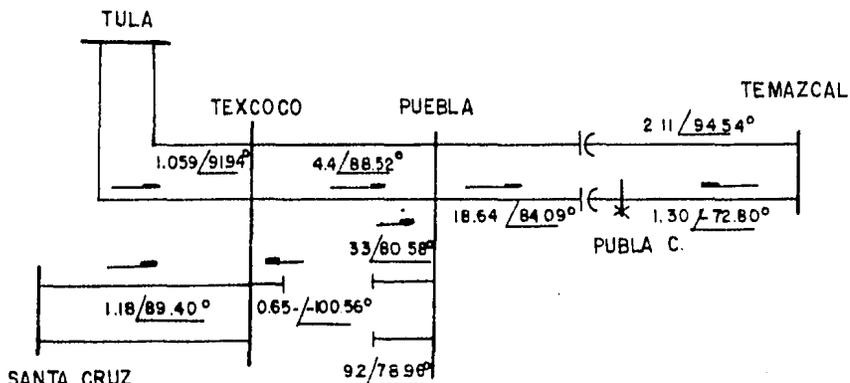


Fig N° 3

Contribuciones de I (en P.U.) a la Falla

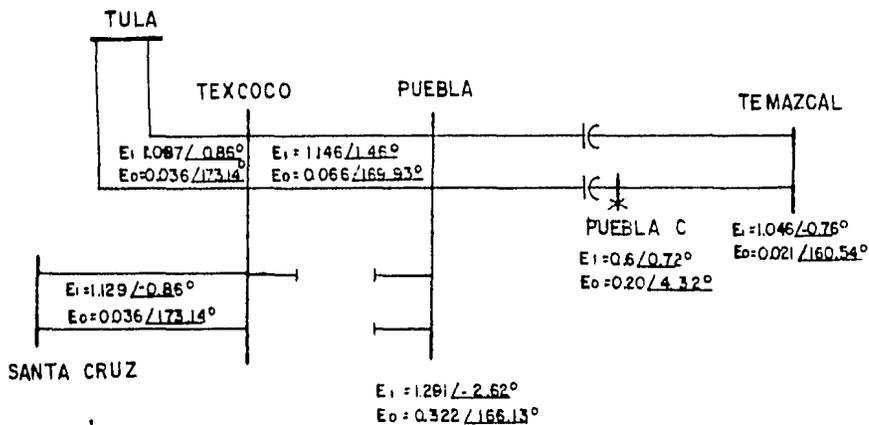


Fig. N° 4

Voltajes de secuencia (+) y (0).

$$E_1 = 1 - I_1 Z_1 \quad 1$$

$$E_1 = -I_0 Z_0 \quad 2$$

$$E_2 = I_2 Z_2 \quad 3$$

$$S_1 I_1 = I_2$$

$$Z_1 = Z_2$$

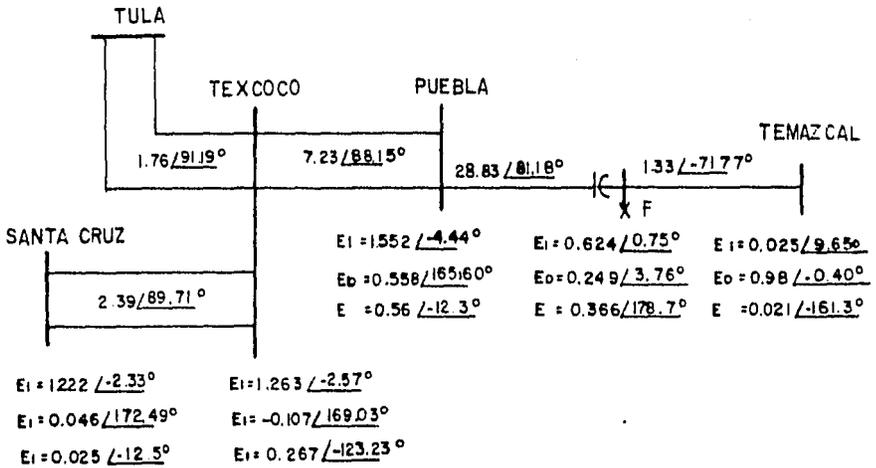
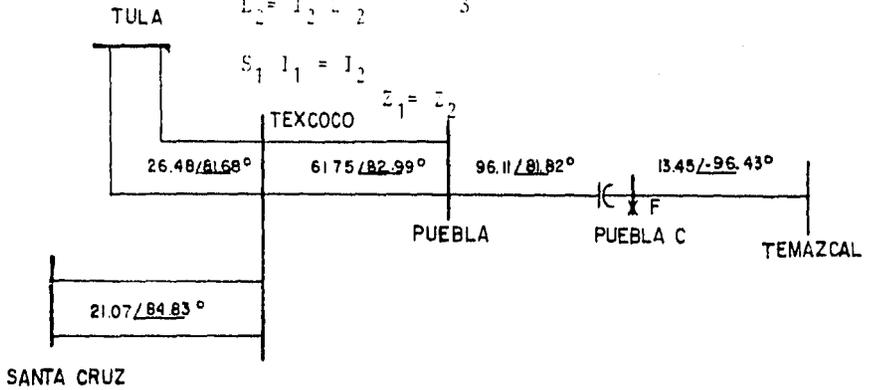


Fig. N° 5

Cálculos de Voltajes y corrientes en S.E. Sta. Cruz.

$$E_2 = E_1 - 1 \quad ; \quad E_2 = 1.129 \angle -1.56 - 1$$

$$E_2 = 1.128 - j 0.0268 - 1 = 0.128 - j 0.0268 = 0.15 \angle -11.82$$

$$V_a = E_1 + E_2 + E_0$$

$$V_a = 1.129 \angle -1.56 + 0.15 \angle -11.82 - 0.056 \angle 173.14$$

$$V_a = 1.128 - j 0.0267 + 0.108 - j 0.026 + 0.036 - j 0.0045$$

$$V_a = 1.292 - j 0.057 = 1.283 \angle -2.52$$

$$V_b = a^2 E_1 + a E_2 + E_0$$

$$V_b = 1.129 \angle 238.64 + 0.15 \angle 108.52 - 0.056 \angle 173.14$$

$$V_b = 0.587 - j 0.964 - 0.041 + j 0.1232 + 0.036 - j 0.0045$$

$$= 0.592 - j 0.845 = 1.031 \angle -125$$

$$V_c = a E_1 + a^2 E_2 + E_0$$

$$V_c = 1.129 \angle 118.64 + 0.15 \angle 228.52 - 0.056 \angle 173.14$$

$$= 0.541 + j 0.99 - 0.086 - j 0.097 + 0.036 - j 0.0045$$

$$= 0.591 + j 0.8882 = 1.06 \angle 123.62$$

$$I_a = 8.88 \angle 85.77 \text{ para dos líneas}$$

$$I_a = 4.44 \angle 85.77 \text{ para una línea}$$

$$I_a = 2I_1 + I_0 = 4.44 \angle 85.77; \quad I_0 = 0.59 \angle 89.4$$

$$I_1 = \frac{I_a - I_0}{2} = \frac{4.44 \angle 85.77 - 0.59 \angle 89.4}{2}$$

$$I_1 = \frac{0.377 + j 4.428 - 0.0061 + j 0.54}{2} = \frac{0.521 + j 3.838}{2}$$

$$I_1 = 1.925 \angle 85.21 \text{ p.u.}$$

$$I_2 = I_1 = 1.925 \angle 85.21 \text{ p.u.}$$

Cálculos de voltajes y corrientes de fase en S.E. Sta. Cruz.

$$E_2 = E_1 - 1 = 1.22 - j 0.049 - 1 = 0.225 \angle -12.5$$

$$V_a = E_1 + E_2 + E_0$$

$$V_a = 1.22 \angle -2.53 + 0.225 \angle -12.5 - 0.046 \angle 172.49$$

$$V_a = 1.48 \angle -4.016$$

$$V_b = 1.065 \angle -129.56$$

$$V_c = 1.08 \angle 109.67$$

$$V_{ab} = V_a - V_b = 1.484 - j 0.1042 + 0.676 + j 0.824 = 2.16 - j 0.1042$$

$$V_{ab} = 2.27 \angle 18.45 \text{ p.u.}$$

$$V_{ca} = 1.8476 + j 1.1215 = 2.16 \angle 148.74 \text{ p.u.}$$

$$I_a = \frac{21.07}{2} \angle 84.83 = 10.53 \angle 84.83 \text{ p.u.}, I_o = 1.19 \angle 89.71 \text{ p.u.}$$

$$I_1 = 4.67 \angle 84.48; I_2 = I_1 = 4.67 \angle 84.48$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_o = 1 \angle 240 + 4.67 \angle 84.48 + 1 \angle 120 + 4.67 \angle 84.48 + 1.19 \angle 89.71$$

$$I_b = 5.48 \angle -97.55 \text{ p.u.}$$

$$I_c = I_b = 5.48 \angle -97.55 \text{ p.u.}$$

Impedancia vista por los relevadores de distancia de fase

$$Z_{ab} = \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} = \frac{2.27 \angle 18.45}{10.53 \angle 84.83 - 5.48 \angle -97.55} = \frac{2.27 \angle 18.45}{14.0 \angle 83.91}$$

$$Z_{ab} = 0.162 \angle -165.48 \text{ p.u.} \quad Z_{base} = \frac{400^2}{100} = 1600$$

$$Z_{ab} = 0.162 \times 1600 \angle -65.48 = 259.2 \angle -65.48 \text{ prim TP's } \frac{3530}{1}$$

$$Z_{ab} = 259.2 \times 0.12 \angle -65.48 = 31.1 \angle -65.48 \text{ Sec. TC's } \frac{2000}{5}$$

$$Z_{bc} = \frac{V_b - V_c}{I_b - I_c} = \frac{V_b - V_c}{0} = 00$$

$$Z_{ca} = \frac{V_c - V_a}{I_c - I_a}$$

$$Z_{ca} = \frac{2.16 \angle 148.74}{14.0 \angle -96.08} = 0.1542 \angle 244.82 \text{ p. u.}$$

$$Z_{ca} = 0.1542 \times 1600 \angle 244.82 = 246.72 \angle 244.82 \ \Omega \text{ prim.}$$

$$Z_{ca} = 246.72 \times 0.12 \angle 244.82 = 29.6 \angle 244.82 \ \Omega \text{ sec.}$$

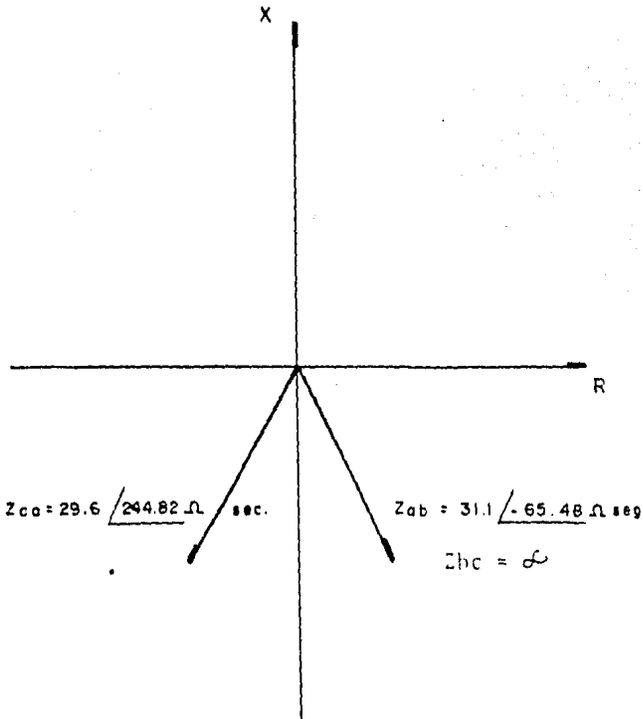


Fig. N6

CONTRIBUCIONES DE CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO PARA UNA FALLA EN LOS CAPACITORES SERIE INSTALADOS ENTRE LA S.E. TECALLI Y S.E. TEMASCAL.

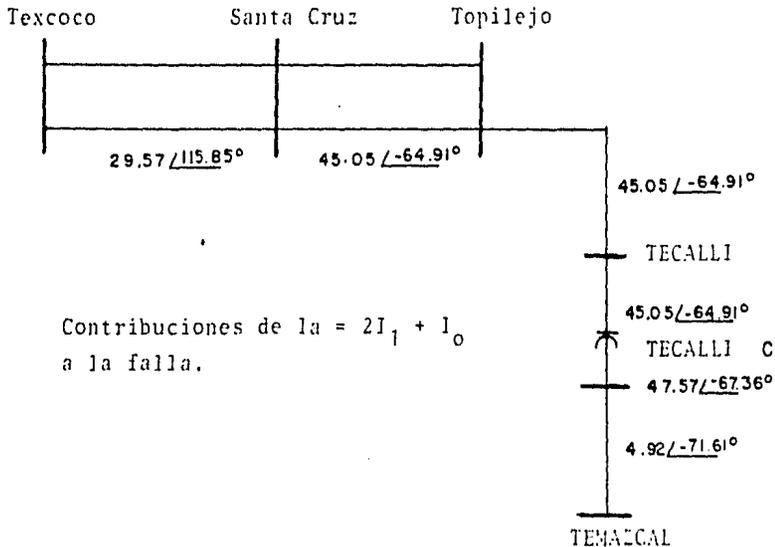
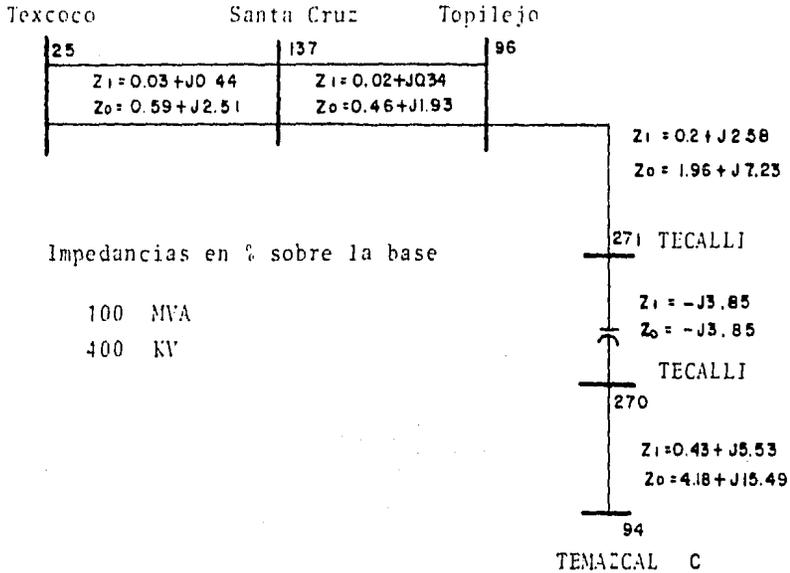


Fig N7

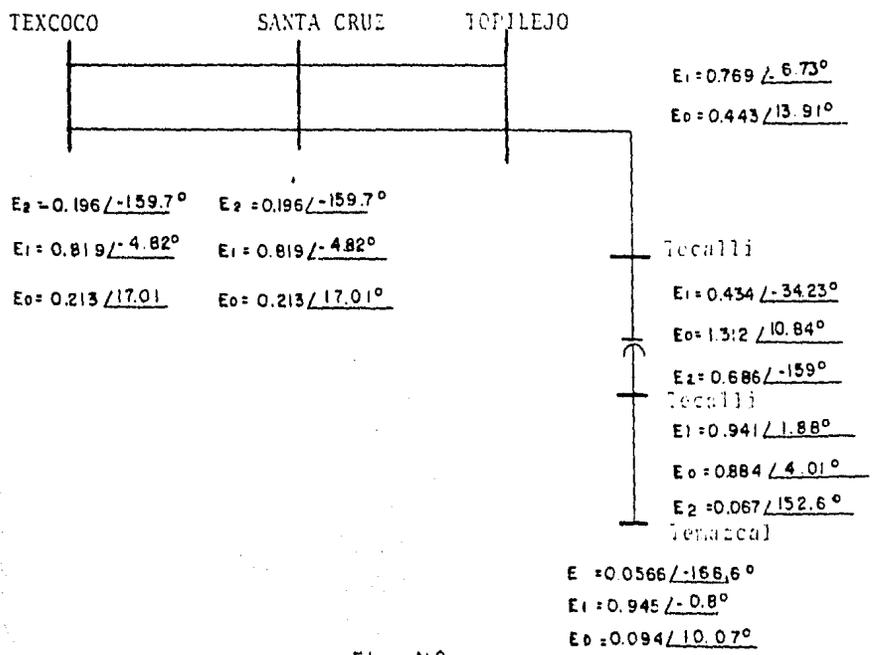
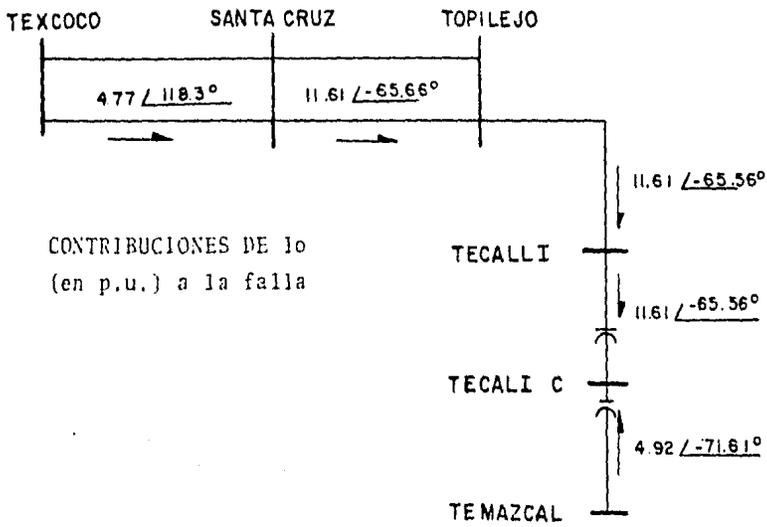


Fig. N8
66

En S.E. Santa Cruz.

$$E_1 = 0.819 \angle -4.82, E_0 = 0.213 \angle 17.01$$

$$E_2 = E_1 - 1 = 0.819 \angle -4.82 - 1 = 0.196 \angle -159.7$$

$$V_a = 0.819 \angle -4.82 + 0.196 \angle -159.7 - 0.213 \angle 17.01$$

$$V_a = 0.816 - j 0.0688 - 0.1838 - j 0.0679 - 0.0203 - j 0.0062$$

$$V_a = 0.6092 - j 0.1429 = 0.619 \angle -13.13$$

$$V_b = 1 \angle 240 \times 0.819 \angle -4.82 + 1 \angle 120 \times 0.196 \angle -159.7 - 0.213 \angle 17.01$$

$$V_b = 0.467 - j 0.672 + 0.1508 - j 0.125 - 0.0203 - j 0.0062$$

$$V_b = -0.3365 - j 0.8032 = 0.8708 \angle -112.73$$

$$V_c = 1 \angle 120 \times 0.819 \angle -4.82 + 1 \angle 240 \times 0.196 \angle -159.7 - 0.213 \angle 17.01$$

$$V_c = 0.348 + j 0.741 + 0.033 + j 0.193 - 0.0203 - j 0.0062$$

$$V_c = -0.338 + j 0.7272 = 0.9874 \angle 110$$

$$V_{ab} = V_a - V_b = 0.6092 - j 0.1429 + 0.3365 + j 0.8032 = 0.9457 + j 0.6603$$

$$V_{ab} = 1.153 \angle 64.92$$

$$V_{ca} = V_c - V_a = -0.338 + j 0.9278 - 0.6092 + j 0.1429 = -0.9472 + j 1.0707$$

$$V_{ca} = 1.429 \angle 131.49$$

$$I_a = \frac{45.05}{2} \angle -64.91 = 22.72 \angle -64.91 \text{ p.u.}, I_o = 5.8 \angle -65.66$$

$$I_1 = \frac{I_a - I_o}{2} = \frac{22.72 \angle -64.91 - 5.8 \angle -65.66}{2} = 5.6232 - j 7.645$$

$$I_1 = 8.46 \angle -64.63 \text{ p.u.}$$

$$I_2 = I_1 = 8.46 \angle -64.63 \text{ p.u.}$$

$$I_b = 1 \angle 240 \times 8.46 \angle -64.63 + 1 \angle 120 \times 8.46 \angle -64.63 + 5.8 \angle -65.66$$

$$I_b = 3.6247 + j 7.6441 + 2.3904 - j 5.2844 = -1.2343 + j 2.3597$$

$$I_b = 2.663 \angle 117.61 \text{ p.u.}$$

$$I_c = I_b = 2.663 \angle 117.61 \text{ p.u.}$$

Impedancia vista por los relevadores.

$$Z_{ab} = \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} = \frac{1.153 \angle 34.92}{24862 \angle -64.00} = 0.0463 \angle 98.98 \text{ p.u.}$$

$$Z_{ab} = 0.0463 \times 1600 \angle 98.98 = 74.2 \angle 98.98 \ \Omega \text{ prim.}$$

$$Z_{ab} = 74.2 \times 0.12 \angle 98.98 = 8.9 \angle 98.98 \ \Omega \text{ sec.}$$

$$Z_{bc} = \frac{V_b - V_c}{I_b - I_c} = \frac{V_b - V_c}{0} = \infty$$

$$Z_{ca} = \frac{1.429 \angle 121.32}{25.38 \angle 115.50} = 0.0563 \angle 16.13 \text{ p.u.}$$

$$Z_{ca} = 0.0563 \times 1600 \angle 16.13 = 90.08 \angle 16.13 \ \Omega \text{ prim.}$$

$$Z_{ca} = 90.08 \times 0.12 \angle 16.13 = 10.8 \angle 16.13 \ \Omega \text{ sec.}$$

VOLTAJES Y CORRIENTES PARA UNA FALLA 3Ø EN PUEBLA CAPACITORES
SIN LINEAS FUERA: (a)

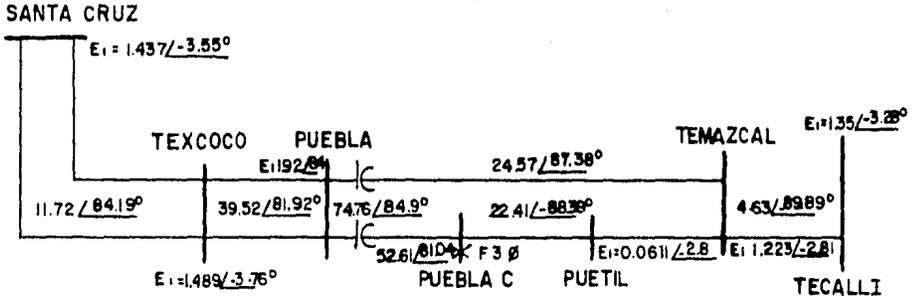


Fig. N 9

VOLTAJES Y CORRIENTES CON LINEAS FUERA : (b)

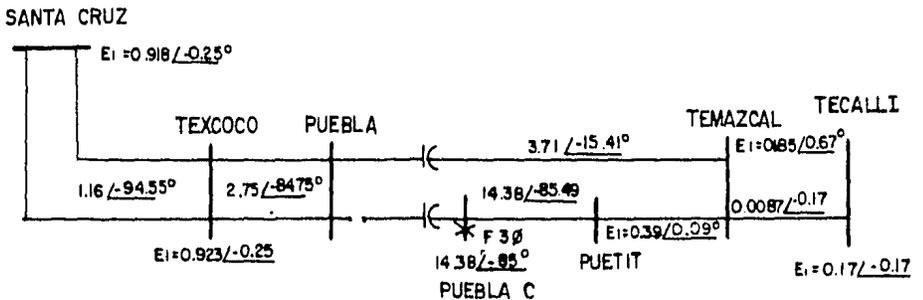


Fig. N 10

VOLTAJES Y CORRIENTES CON LINEA PUEBLA-PUETIT ABIERTA (c)

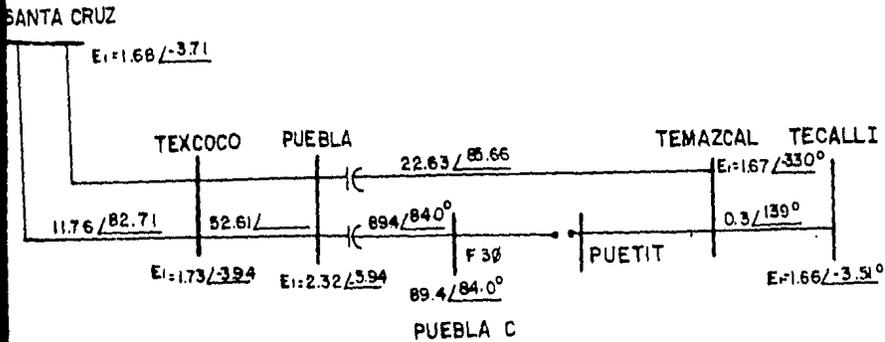


Fig. N° 11

Nota.-La Barra Puetit es ficticia. Se localiza a la mitad de una de las líneas Puebla - Temazcal.

VOLTAJES Y CORRIENTES PARA UNA FALLA 3φ CON UNA LINEA ABIERTA (PUEBLA-PUEBLA C ABIERTA) (d)

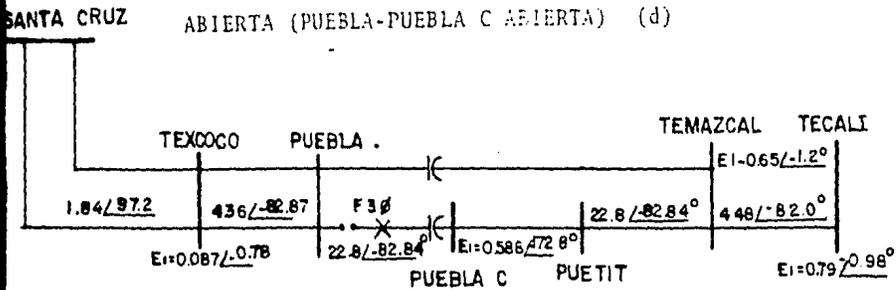


Fig. N° 12

SANTA CRUZ
PUEBLA C - PUETIT ABIERTA (e)

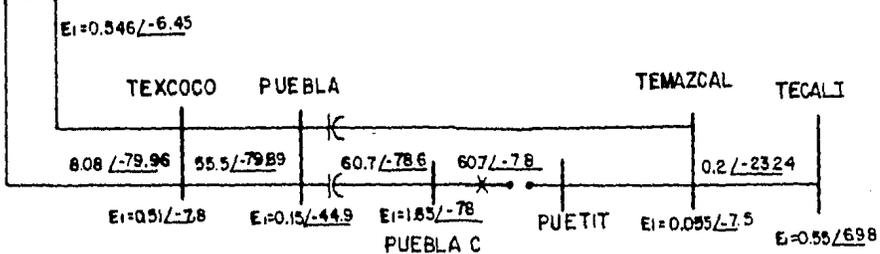


Fig. N° 13

Impedancia que ven los relevadores localizados en la S.E. Santa Cruz para una falla trifásica en diferentes posiciones.

Se calculará sólo el caso en que se tiene una contribución de Santa Cruz-Tezcoco de máxima corriente y mínimo voltaje, y es el que se registra con un corto circuito en la línea Puebla C-Puetit abierta al final de la línea (inciso e) .

$$I_a = I_1 = \frac{8.08}{2} \angle -79.96 \text{ p.u. por línea}$$

$$I_b = 4.04 \angle -79.96 - 120 = 4.04 \angle -199.96 \text{ p.u.}$$

$$V_1 = V_a = 1.68 \angle -3.71 \text{ p.u.}$$

$$V_b = 1.68 \angle -3.71 - 120 = 1.68 \angle -123.71 \text{ p.u.}$$

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} = \frac{1.68 \angle -3.71 - 1.68 \angle -123.71}{4.04 \angle -79.96 - 4.04 \angle -199.96}$$

$$V_a - V_b = 0.8701 + j 0.37 = 0.9455 \angle 23.03$$

$$I_a - I_b = 4.5007 - j 5.3572 = 6.996 \angle -49.96$$

$$Z_{ab} = \frac{0.9455 \angle 23.03}{6.996 \angle -49.96} = 0.135 \angle 72.99 \text{ p.u.}$$

$$TP's = \frac{3330}{1}$$

$$\frac{TP's}{TC's} = \frac{2000}{3330} = 0.12$$

$$TC's = \frac{2000}{5}$$

$$Z_{Base} = \frac{KV^2}{MVA} = \frac{(400)^2}{100} = 1600$$

$$Z_{ab} = 0.135 \times 1600 \angle 72.99 = 216 \angle 72.99 \text{ prim.}$$

$$Z_{ab} = 216 \angle 72.99 \times 0.12 = 25.92 \angle 72.99 \text{ Sec.}$$

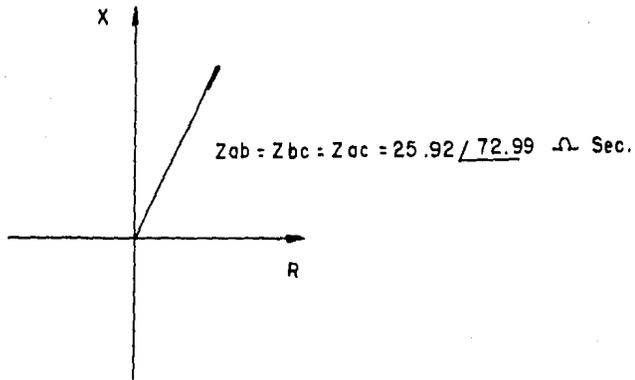
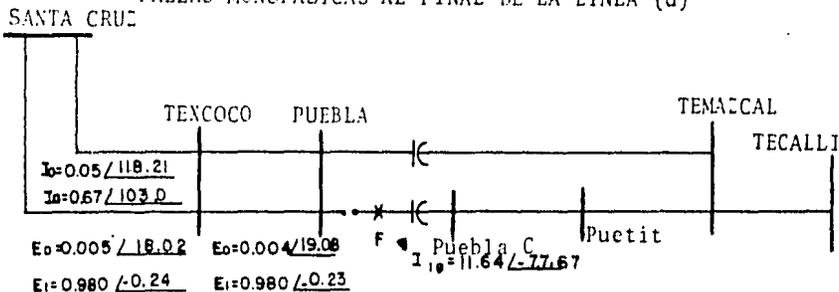


Fig N° 14

- f) Con línea Puebla - Puebla c fuera, la dirección de la corriente en Santa Cruz es inversa a la que debería ver el relevador.
- g) Con falla al final de la línea (abierto) Puebla-Puebla C, la dirección de la corriente en Santa Cruz es inversa a la que debería ver el relevador.

FALLAS MONOFASICAS AL FINAL DE LA LINEA (d)



(e) FALLA MONOFASICA AL FINAL DE LA LINEA PUEBLA C-PUETIT

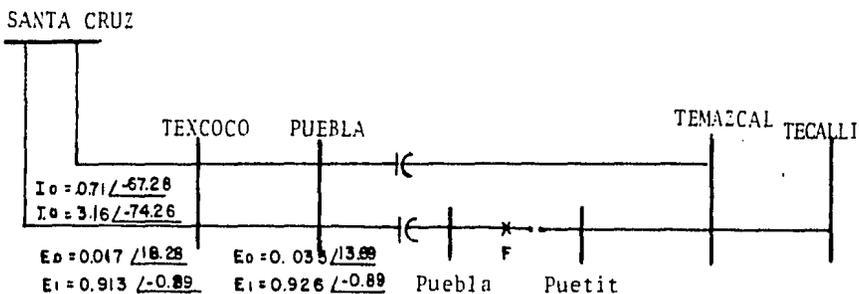


Fig. N°15

CONTRIBUCIONES DE I_0 e $I_a = 2I_a + I_0$ A LA FALLA DE ϕT EN PUEBLA CAPACITORES del inciso (a)

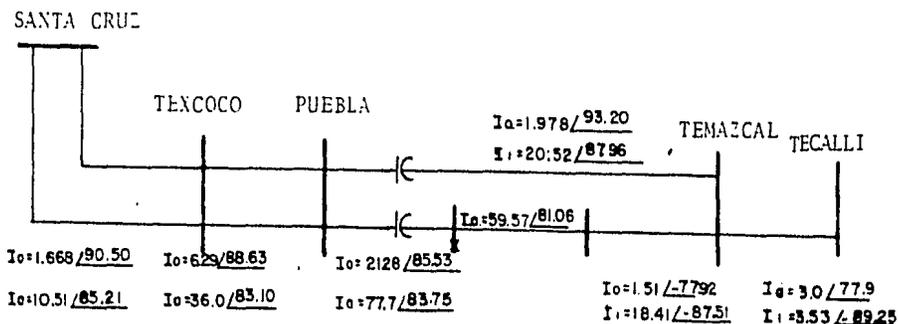
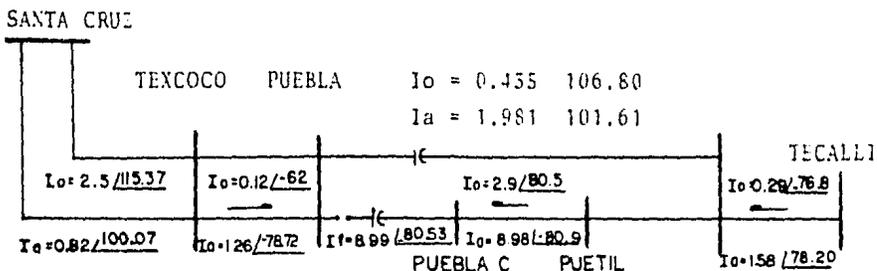


Fig. N°16

Con línea Puebla - Puebla C fuera del inciso (b)



Con línea Puebla C - Puetit fuera del inciso (a)

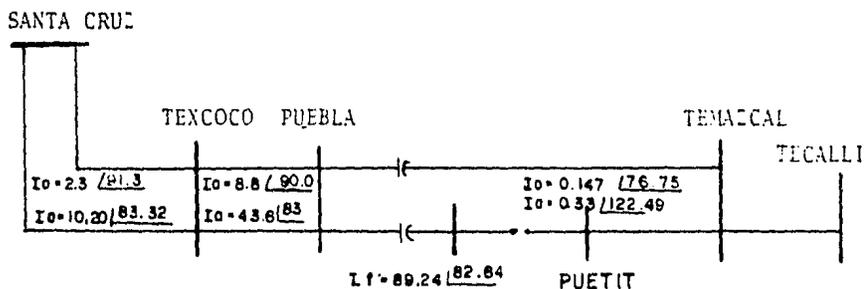


Fig. N° 17

Se tomará únicamente la falla en Puebla C que produzca en Santa Cruz voltaje mínimo y corriente máxima, que es el caso del corto circuito monofásico en Puebla C con contribuciones de máxima corriente y mínimo voltaje en Santa Cruz. inciso (a)

$$E_1 = 1.165 \angle -1.65$$

$$R_{22} = 0.167 \angle 11.32$$

$$E_{bc} = -0.037 \angle -4.63$$

$$I_{cc} = \frac{10.51}{2} \angle 85.20 \text{ por línea}$$

$$I_a = 2I_1 + I_0 = I_f = \frac{I_a - I_0}{2} = \frac{0.877 + 10.47 - (-0.014 + j1.66)}{2}$$

$$I_a + 0.222 + j 2.2 = 2.2 \angle 84.22 \text{ p.u.}$$

$$I_{ba} = C_1^2 R_1 + aI_1 + I_0 = \frac{0.445 - j4.4 - 0.014 + j 1.66}{2}$$

$$= \frac{-0.459 + j 2.74}{2}$$

$$I_{ba} = 1.385 \angle -99.5 \text{ p.u.}$$

$$I_c = a_1 I_f + aI_2 + R_{ac} = I_b = 1.385 \angle -99.5$$

$$V_a = E_1 + E_2 + E_0 = 1.16 - j0.033 + 0.163 + j 0.33 + 0.037 - j0.0035$$

$$V_a = 1.36 + j 0.2935 = 1.39 \angle 12.17 \text{ p.u.}$$

$$V_b = a^2 E_1 + a E_2 + E_0 = 1.165 \angle 238.55 + 0.167 \angle 151.37 - 0.037 \angle 174.63$$

$$V_b = 0.64 - j0.99 - 0.11 + j0.12 + 0.037 - j 0.0035 = -0.614 - j0.8$$

$$V_b = 1.11 \angle -128.06 \text{ p.u.}$$

$$V_c = a E_1 + a^2 E_2 + E_0 = 1.165 \angle 118.55 + 0.167 \angle 251.37 - 0.37 \angle 174.63$$

$$V_c = 0.55 + j.1025 - 0.053 - j0.158 + 0.037 - j 0.0035$$

$$V_c = -0.566 + j 0.8635 = 1.05 \angle 122.64$$

Impedancia vista por los relevadores de fase

$$Z_{ab} = \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} = \frac{1.36 + j 0.2935 + 0.684 + j0.873}{0.222 + j2.2 + 0.229 + j1.37}$$

$$Z_{ab} = \frac{2.044 + j1.1665}{0.451 + j 3.57} = \frac{2.353 \angle 29.71}{3.598 \angle 82.79} = 0.6539 \angle -53.08 \text{ p.u.}$$

$$Z_{Base} = \frac{KV^2}{MVA} = \frac{400^2}{100} = 1600$$

$$Tc's / TP's = 2000/5 / 3530/1 = 0.12$$

$$Z_{ab} = 0.6539 \times 1600 \angle -53.08 = 1046.24 \angle -53.08 \text{ prim}$$

$$Z_{ab} = 1046.29 \times 0.12 \angle -53.08 = 125.54 \angle -53.08 \text{ sec.}$$

$$Z_{bc} = \frac{V_b - V_c}{I_b - I_c} = \frac{V_b - V_c}{0} = 00$$

$$Z_{ca} = \frac{V_c - V_a}{I_c - I_a} = \frac{-0.566 + j 0.8635 - 1.36 - j 0.2935}{0.229 - j1.37 - 0.222 - j 2.2} = \frac{-1.926 + j0.57}{-0.451 - j 3.57}$$

$$Z_{ca} = \frac{2.008 \angle 163.51}{3.598 \angle -97.2} = 0.558 \angle 260.71 \text{ p.u.}$$

$$Z_{ca} = 0.558 \times 1600 \angle 260.71 = 892.8 \angle 260.71 \ \Omega \text{ prim.}$$

$$Z_{ca} = 892.8 \times 0.12 \angle 260.71 = 107.13 \angle 260.71 \ \Omega \text{ sec.}$$

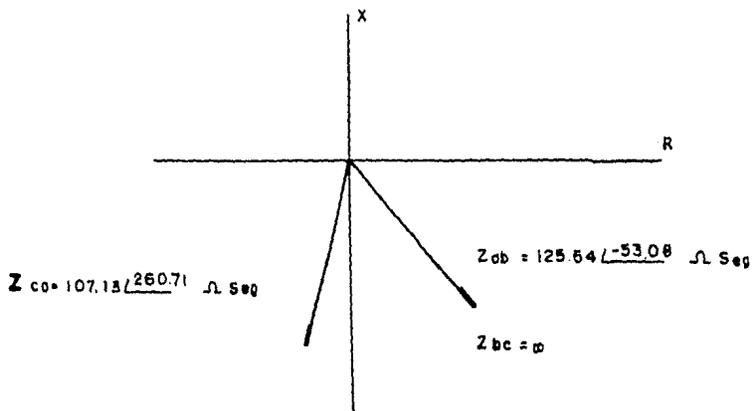


Fig N° 18

Diagrama del inciso a

f) Falla monofásica al final de la línea abierta Puebla-Puebla C.

La corriente en la S.E. Santa Cruz se invierte con respecto al sentido de los relevadores.

g) Falla monofásica al final de la línea abierta Puebla C - Puetit.

Datos de la corrida 03/02/83 donde se corrigieron valores de -
capacitores.

En S.E. Santa Cruz:

$$I_1 = I_a = 14.37 \quad 82.03 \text{ p.u. por línea}$$

$$I_b = 14.37 \quad 82.05 \quad -120 = 14.37 \quad -37.97 \text{ p.u.}$$

$$V_1 = V_a = 1.799 \quad -6.23 \text{ p.u.}$$

$$V_b = 1.799 \quad -6.23 \quad -120 = 1.799 \quad -126.23 \text{ p.u.}$$

Impedancia vista por los relevadores

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} = \frac{1.799 \quad -6.23 - 1.799 \quad -126.23}{14.37 \quad 82.03 - 14.37 \quad -37.97}$$

$$Z_{ab} = \frac{1.788 - j 0.195 + 1.063 + j 1.451}{1.992 - j 14.231 - 11.328 + j 8.641} = \frac{2.851 + j 1.256}{-9.336 - j 5.39}$$

$$Z_{ab} = \frac{3.115 \quad 23.77}{10.78 \quad -150.0} = 0.2889 \quad 173.77 \text{ p.u.}$$

$$TC's = \frac{2000}{5} = 0.12$$

$$TP's = \frac{3330}{1}$$

$$Z_{Base} = \frac{KV^2}{MVA} = \frac{400^2}{100} = 1600$$

$$Z_{ab} = 0.2889 \times 1600 \quad 173.77 = 462.24 \quad 173.77 \text{ prim}$$

$$Z_{ab} = 462.24 \times 0.12 \quad 173.77 = 55.46 \quad 173.77 \text{ sec.}$$

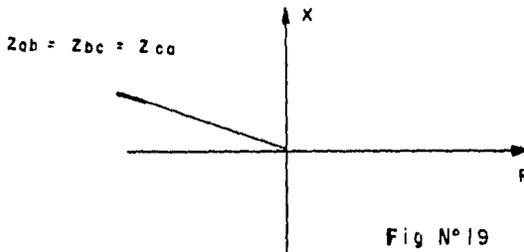


Fig N°19

Datos de la corrida 03/02/83 donde se corrigieron valores de ca
pacitores.

Falla monofásica en Puebla capacitores.

En S.E. Santa Cruz

$$E_1 = 1.262 \quad -2.7 \quad \text{p.u.}$$

$$E_0 = 0.059 \quad 173.29 \quad \text{p.u.}$$

$$I_a = \frac{21.76}{2} \quad 84.0 = 10.88 \quad 84.0 \quad \text{p.u.}$$

$$I_o = \frac{2.86}{2} \quad 90.15 = 1.43 \quad 90.15 \quad \text{p.u.}$$

$$E_2 = E_1 - 1 = 1.262 \quad -2.7 \quad -1 = 1.26 - j 0.059 - 1 = 0.26 - j 0.059$$

$$E_2 = 0.266 \quad -12.78$$

$$V_a = E_1 + E_2 + E_0 = 1.262 \quad -2.7 + 0.266 \quad -12.78 - 0.059 \quad 173.29$$

$$V_a = 1.26 - j 0.059 + 0.26 - j 0.059 + 0.058 - j 0.0068$$

$$V_a = 1.578 - j 0.1248 = 1.58 \quad -4.52 \quad \text{p.u.}$$

$$V_b = 1.262 \quad 273.3 + 0.266 \quad 107.22 - 0.059 \quad 173.29$$

$$V_b = -0.6817 - j 1.0619 - 0.078 + j 0.254 + 0.058 - j 0.0068$$

$$V_b = 0.7017 - j 0.8147 = 1.075 \quad -130.73 \quad \text{p.u.}$$

$$V_c = 1.262 \quad 117.3 + 0.266 \quad 227.22 - 0.059 \quad 173.29$$

$$V_c = 0.5798 + j 1.1214 - 0.1806 - j 0.1952 + 0.058 - j 0.0068$$

$$V_c = -0.7014 + j 0.9194 = 1.156 \quad 127.33 \quad \text{p.u.}$$

$$I_1 = \frac{I_a - I_o}{2} = \frac{10.88 \quad 84.0 - 1.43 \quad 90.15}{2} = 4.729 \quad 83.07$$

$$I_1 = I_2$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_o$$

$$I_b = -I_1 + I_o = -0.5704 - j 4.6952 - 0.0037 + j 1.4299 = -0.5741$$

$$- j 3.2652.$$

CORRIENTE Y VOLTAJES PARA UNA FALLA 10 EN TECALI C -
 TEMAZCAL (BUS 750). EN S.E. SANTA CRUZ.

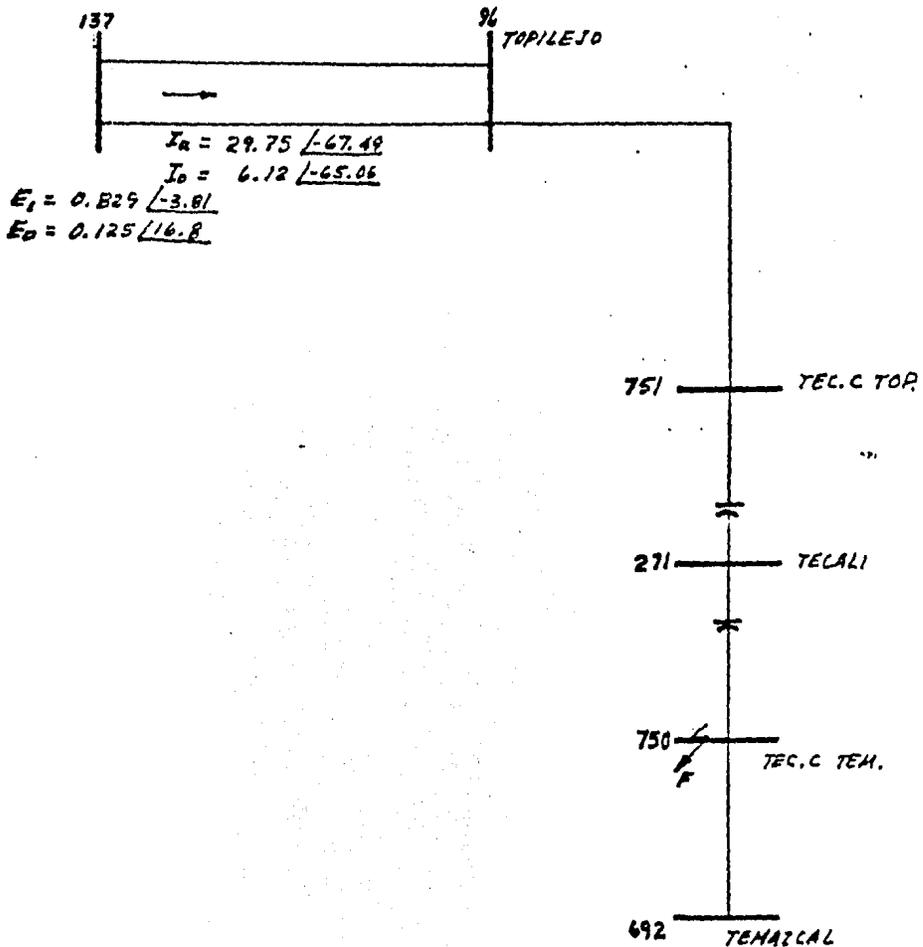


Fig N° 20

En S. E. SANTA CRUZ

$$E_1 = 0.829 / \underline{3.81}$$

$$E_2 = E_1 = 0.827 - J0.055 - I$$

$$E_2 = 0.173 - J0.055 = 0.8115 / \underline{16.8}$$

$$V_a = E_1 + E_2 + E_0$$

$$V_a = 0.829 / \underline{-3.81} + 0.1815 / \underline{-162.36} - 0.125 / \underline{16.8}$$

$$V_a = 0.827 - J0.055 - 0.173 - J0.055 - 0.119 - J0.036$$

$$V_a = 0.535 - J0.146 = 0.554 / \underline{-15.26} \text{ p.u.}$$

$$V_b = a E_1 + a E_2 + E_0$$

$$V_b = 0.829 / \underline{236.7} + 0.1815 / \underline{-42.36} - 0.125 / \underline{16.8}$$

$$V_b = -0.461 / -J0.688 + 0.134 - J0.122 - 0.119 - J0.036$$

$$V_b = 0.446 - J0.846 = 0.956 / \underline{-117.79} \text{ p.u.}$$

$$V_c = a E_1 + a E_2 + E_0$$

$$V_c = 0.829 / \underline{116.19} + 0.1518 / \underline{77.64} - 0.125 / \underline{16.8}$$

$$V_c = -0.365 + J0.744 + 0.03 + J0.177 - 0.119 - J0.036$$

$$V_c = -0.446 + J0.885 = 0.991 / \underline{116.74} \text{ p.u.}$$

$$I_a = \frac{29.75 \angle -67.49}{2} = 14.87 \angle -67.49$$

$$I_o = 3.06 \angle -65.06 \text{ p.u.}$$

$$I_1 = I_a - I_o = \frac{14.87 \angle -67.49}{2} - \frac{3.06 \angle 65.06}{2}$$

$$I_1 = \frac{5.692 - j 13.737 - 1.29 + j 2.774}{2} = \frac{2.201 - j 5.481}{2} = 5.9 \angle -68.12$$

$$I_b = -a I_1 + a^2 I_1 + I_o =$$

$$(a + a^2) 5.9 \angle -68.12 + 3.06 \angle -56.06$$

$$I_b = -2.201 + j 5.482 + 1.29 - j 2.774 = -0.911 + j 2.707$$

$$I_b = 2.856 \angle 108.59 \text{ P.U. } I_b = I_c$$

Impedancia vista por los relevadores

$$Z_{ab} = \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} = \frac{0.535 - j 0.146 + 0.446 + j 0.846}{5.692 - j 13.737 + 0.911 - j 2.707}$$

$$Z_{ab} = \frac{0.981 + j 0.7}{6.603 - j 16.44} = \frac{1.204 \angle 35.5}{17.72 \angle -68.12} = 0.068 \angle 103.62 \text{ P.U.}$$

$$Z_{ab} = 0.068 \times 1600 \angle 103.62 = 108 \angle 103.62 \text{ prim.}$$

$$Z_{ab} = 108.8 \times 0.12 \angle 103.62 = 13.05 \angle 103.62 \text{ sec.}$$

$$Z_{bc} = \frac{V_b - V_c}{I_b - I_c} = - \frac{V_b - V_c}{0} = 00$$

$$\frac{V_c - V_a}{I_c - I_a} = \frac{-0.446 + j 0.885 - 0.535 + j 0.146}{-0.911 + j 2.707 - 5.692 + j 13.737}$$

$$Z_{ca} = \frac{0.981 + j 1.031}{6.603 + j 16.44} = \frac{1.423 \angle 133.57}{17.72 \angle 111.87} = 0.0803 \angle 21.7$$

$$Z_{ca} = 0.0803 \times 1600 \angle 21.7 = 128.48 \angle 21.7 \text{ prim.}$$

$$Z_{ca} = 128.48 \times 0.12 \angle 21.7 = 15.51 \angle 21.7 \text{ sec.}$$

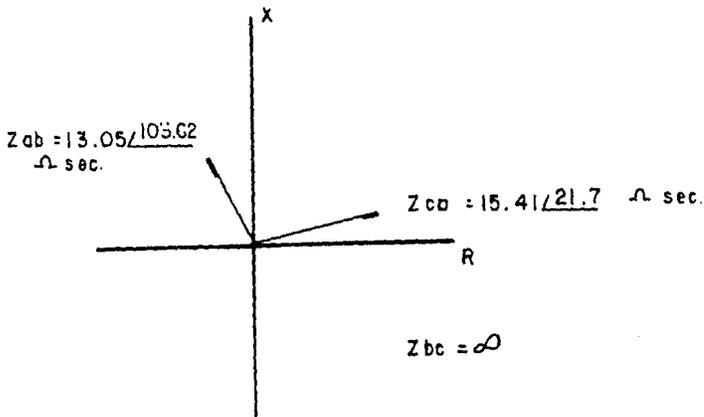


Fig N°21

Corto circuito trifasico en Tecali C - Temazcal .

En Santo Cruz.

$$I_a = I_1 = \frac{86.82}{2} \angle 114.12 = 43.41 \angle 114.12 \text{ p.u.}$$

$$I_b = 43.41 \angle 114.12 - 120 = 43.41 \angle -5.88 \text{ p.u.}$$

$$V_1 = V_a = 0.764 \angle -132.93$$

$$V_b = 0.764 \angle -132.93 - 120 = 0.764 \angle -252.93$$

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} = \frac{0.764 \angle -132.93 - 0.764 \angle -252.93}{43.41 \angle 114.12 - 43.41 \angle -5.88}$$

$$Z_{ab} = \frac{-0.2961 - j 1.5896}{-60.9210 + j 40.067} = \frac{-1.6169 \angle -100.55}{72.9159 \angle 146.66} = 0.0221 \angle -257.21 \text{ p.u.}$$

$$Z_{ab} = 0.0221 \times 1600 \angle -247.21 = 35.36 \angle -247.21 \text{ p.u.}$$

$$Z_{ab} = 35.36 \times 0.12 \angle -247.21 = 4.24 \angle -247.21 \text{ sec.}$$

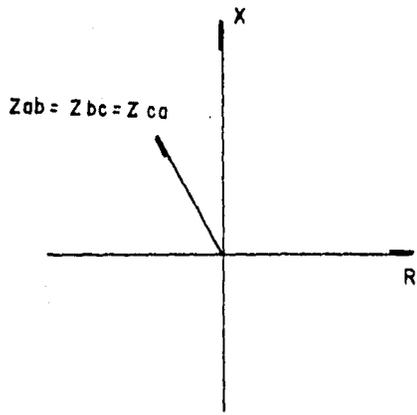


Fig. N° 22

BIBLIOGRAFIA

EL ARTE Y LA CIENCIA DE LA PROTECCION POR RELEVADORES
POR: C. RUSSELL MASOU
CIA. EDITORIAL CONTINENTAL, 1972.

REDES ELECTRICAS.
POR: JACINTO VIQUERA LANDA TOMO I Y II
EDITADO. REPRESENTACIONES Y SERVICIOS DE INGENIERIA S.A.
MEXICO, D.F. 1973.

MANUAL DE DISEÑO DE SUBESTACIONES
POR: COMPAÑIA DE LUZ Y FUEREA DEL CENTRO.
GERENCIA DE PLANEACION E INGENIERIA.
EDITADO POR RELACIONES INDUSTRIALES.