

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de ingeniería Electricidad y Electrónica



**Puesta a Tierra del Neutro en Diseños
Industriales en Baja y Media Tensión**

T E S I S

Para Optar el Título Profesional de

INGENIERO ELECTRICISTA

Filiberto Andrés Goyoneche Gonzales

Promoción 1982-

Lima - Perú

1985

I N D I C E

	Pág. <u>No:</u>
SECCION I	
I. GENERALIDADES SOBRE LA PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO EN DISEÑOS INDUSTRIALES EN BAJA Y MEDIA TENSION	6
1.1. Introducción	6
1.2. Conceptos y definiciones	9
1.3. Función y característica de la puesta a tierra del neutro	12
1.4. Selección y sugerencias para la elección del tipo de puesta a tierra.	14
SECCION II	
II. DESCRIPCION DE LA PUESTA A TIERRA PARA SISTEMAS TRIFA- SICOS CON NEUTRO A TIERRA.	17
2.1. Comportamiento del sistema si el neutro está sól idamen te puesto a tierra.	17
2.1.1. Función de una puesta a tierra franca.	18
2.1.2. Desventajas en utilizar la puesta a tierra franca.	22
2.1.3. Perturbación transitoria	23
2.1.4. Curvas de corriente y tensión, bases de compara- ción de las mismas, y sistemas máximos y míni- mos.	23
2.1.5. Métodos de conexión en los sistemas trifásicos.	34

2.2. Comportamiento del sistema si el neutro esta puesto a tierra a través de una resistencia de bajo valor ohmico.	36
2.2.1. Función de una puesta a tierra por medio de una baja resistencia.	36
2.2.2. Elcción de la resistencia de bajo valor ohmico.	39
2.2.3. Perturbación transitoria.	43
2.2.4. Estudio de las tensiones en las fases sanas.	45
2.2.5. Métodos de conexión en el sistema trifásico	48
2.3. Comportamiento del sistema si el neutro está puesto a tierra a través de una resistencia de alto valor ohmico.	49
2.3.1. Función de una puesta a tierra a través de una resistencia de alto valor ohmico.	50
2.3.2. Elcción y operación de la resistencia de puesta a tierra de alto valor ohmico.	51
2.4. Comportamiento del sistema si el neutro está puesto a tierra a través de una reactancia inductiva.	55
2.4.1. Función de una puesta a tierra a través de una reactancia inductiva.	58
2.4.2. Elcción de la reactancia de puesta a tierra de un <u>generador</u> .	60
2.5. Comportamiento del sistema si el neutro está puesto a tierra a través de una reactancia de compensación inductiva o "Por neutralización".	62

2.5.1. Función de la puesta a tierra por compensación o neutralización	62
2.5.2. Descripción del sistema de puesta a tierra por compensación o "neutralización".	63
2.5.3. Dispositivos de protección por compensación o "neutralización" (Bobina de Peterson).	66
2.5.4. Desventajas en utilizar la compensación inductiva.	68

SECCION III

III. DESCRIPCION DE LA PUESTA A TIERRA PARA SISTEMAS TRIFASICOS CON NEUTRO AISLADO, O SIN NEUTRO FISICO.	72
3.1. Consecuencias de tener el neutro aislado	76
3.2. Perturbación transitoria	78
3.3. Cálculo y medida de la corriente de fuga.	81
3.4. Creación del neutro artificial en sistemas delta.	86
3.5. Transformadores de puesta a tierra en conexión Zig.-Zag.	89
3.5.1. Características	89
3.5.2. Funcionamiento	92
3.5.3. Elección	97
3.5.4. Conexión en el sistema	93
3.6. Transformadores de puesta a tierra en conexión Estrella-Delta, y Estrella-Delta Abierto.	99
3.7 Detección de las puestas a tierra en sistemas con neutro aislado por comparación de la tensión y corriente homopolar.	106

3.7.1. Descripción de la detección.	107
-------------------------------------	-----

SECCION IV

IV. CALCULO DE LA CORRIENTE MAXIMA DE CORTO CIRCUITO A TIERRA	115
4.1. Consideraciones generales	115
4.2. Análisis teórico preliminar	116
4.2.1. Cálculo de la corriente monofásica a tierra, para un sistema con neutro puesto a tierra a través de resistencias o inductancias.	117
4.2.2. Cálculo de la corriente monofásica a tierra - para un sistema con neutro aislado o sin neutro físico.	120
4.3. Relación entre la corriente de falla trifásica, y la corriente monofásica a tierra.	124
4.4. Cálculo de la corriente de falla a tierra en cargas resistivas e inductivas desbalanceadas, producida por la apertura unipolar de la protección.	127
4.5. Cálculo de la corriente de falla en equipos.	141

SECCION V

V. CALCULO DE LAS CAPACIDADES PARASITAS SEGUN LA TEORÍA DE "MAXWELL "	146
5.1. Cálculo de las capacidades parásitas según la teoría de " Maxwell ".	146

5.2. Modelos equivalentes de sistemas con neutro aislado, cuando se tiene transformadores de puesta a tierra.	152
--	-----

SECCION VI

VI. COMPORTAMIENTO DEL ARCO ELECTRICO EN FAL LAS A TIERRA.	159
6.1. Formación del arco.	160
6.2. Arco debido a una falla a tierra en barras o terminal es de salida de un transformador de potencia.	161
6.3. Arco debido a una falla a tierra en barra s o termina - les de salida de un generador trifásico.	167

SECCION VII

VII. SISTEMAS DE PROTECCION PARA FAL LAS A TIERRA	171
7.1. Transformadores de corriente	172
7.1.1. Formas constructivas de los transformadores de corriente.	173
7.1.2. Transformador de corriente de hilo pasante o de barra.	174
7.1.3. Transformadores de corriente de devanados, múltiples.	174
7.1.4. Índice de sobreintensidad nominal	175
7.1.5. Error de intensidad.	177

7.1.6. Potencia nominal	177
7.1.7. Carga nominal	178
7.2. Filtros de corriente y de tensión para sistemas de tres y cuatro hilos.	180
7.2.1. Filtros de corriente (Acoplamiento Holmgreen)	180
7.2.2. Filtros de corriente en conexión Delta-Abierto	183
7.2.3. Filtros de tensión en conexión estrella-Serie	185
7.3. Dispositivos de protección para fallas monofásicas a tierra.	186
7.3.1. Relés de sobrecorriente a tierra de acción diferida (SSR)	189
7.3.2. Relés estáticos (PSG)	192
7.3.3. Relés direccionales de sobrecorriente a tierra.	196
7.3.4. Polarización de los relés de sobrecorriente a tierra.	198
7.4. Interruptores de protección con disparadores de sobreintensidad para baja tensión.	202
7.4.1. Tipos de interruptores de protección.	203
7.4.2. Disparadores de sobre intensidad.	203
7.4.3. Funcionamiento de los interruptores de protección	204
7.5. Interruptores automáticos diferenciales (SFJ) para baja tensión.	207
7.5.1. Constitución y funcionamiento de los interruptores diferenciales (SFJ).	208

7.5.2. Aplicación de los interruptores diferenciales (SFJ) en instalaciones eléctricas.	208
7.5.3. Elección del interruptor diferencial (SFJ)	211
7.6. Interruptores automáticos con dispositivo de corte por tensión de defecto (SFU) para baja tensión.	212
7.7. Interruptores automáticos de potencia para media tensión.	217
7.7.1. Disparadores de sobreintensidad.	220
7.7.2. Características de la capacidad de ruptura de los interruptores automáticos de potencia.	221
7.8. Ajuste de los interruptores y dispositivos de protección con disparadores de sobreintensidad.	
7.8.1. Ajuste de los dispositivos e interruptores de protección por corriente de falla.	224
7.8.2. Ajuste de los dispositivos e interruptores de protección por tiempo de escalonamiento.	226
7.9. Selectividad entre los diferentes interruptores y dispositivos de protección de puestas a tierra.	228
7.9.1. Selectividad entre interruptores de protección y reles de puestas a tierra.	229
7.9.2. Selectividad entre los interruptores o dispositivos de protección de baja y media tensión.	231
7.9.3. Selectividad entre los interruptores o dispositivos de protección, cuando se tiene en el sistema transformadores de puesta a tierra.	235

<u>SECCION VIII</u>		<u>Pág.</u> <u>No:</u>
CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA FUNCIONAL Y DE PROTECCION PERSONAL		240
8.1.	Resistencia de la toma a tierra o de una instalación de puesta a tierra	240
8.2.	Cálculo analítico de la resistencia a tierra de una jabalina	241
8.3.	Cálculo analítico de la resistencia a tierra de dos o más jabalinas (Solución "Tagg")	244
8.4.	Cálculo analítico de la resistencia a tierra cuando se tiene jabalinas y mallas (solución "Schwarz")	250
8.5.	Cálculo de la resistencia de puesta a tierra de protección personal	258
8.5.1.	Conexión directa a tierra de las masas en sistemas con neutro a tierra	260
8.5.2.	Conexión de las masas al neutro en sistemas con neutro a tierra	269
8.5.3.	Conexión directa de las masas en sistemas con neutro aislado y cargados	277
8.5.4	Conexión directa de las masas en sistemas con neutro aislado y no cargados	281
8.5.4.1.	Conexión directa a tierra de un equipo conectado en estrella en un sistema trifásico no cargado, con un neutro aislado, o no físico	282

SECCION VIII

Pág.
No:

CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA	240
FUNCIONAL Y DE PROTECCION PERSONAL	
8.1. Resistencia de la toma a tierra o de una instalación de puesta a tierra	240
8.2. Cálculo analítico de la resistencia a tierra de una jabalina	241
8.3. Cálculo analítico de la resistencia a tierra de dos o más jabalinas (Solución "Tagg")	244
8.4. Cálculo analítico de la resistencia a tierra cuando se tiene jabalinas y mallas (solución "Schwarz")	250
8.5. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra de protección personal	258
8.5.1. Conexión directa a tierra de las masas en sistemas con neutro a tierra	260
8.5.2. Conexión de las masas al neutro en sistemas con neutro a tierra	269
8.5.3. Conexión directa de las masas en sistemas con neutro aislado y cargados	277
8.5.4 Conexión directa de las masas en sistemas con neutro aislado y no cargados	281
8.5.4.1. Conexión directa a tierra de un equipo conectado en estrella en un sistema trifásico no cargado, con un neutro aislado, o no físico	282

8.5.4.2. Conexión directa a tierra de un equipo conectado en delta, en un sistema trifásico no cargado, con su neutro aislado o no físico	285
8.5.4.3. Conexión directa a tierra de un equipo en un sistema monofásico no cargado con su neutro aislado, o no físico	288
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	291
ANEXO 2.1.4. Interpretación de las curvas de voltaje y corriente con ejemplo explicativo	296
ANEXO 2.4.2. Cálculo de la reactancia de puesta a tierra en función de los parámetros de secuencia	301
ANEXO 7.7.9, y 7.7.10 Aplicaciones y Especificaciones Básicas de Relés de puesta a tierra usados en sistemas Industriales	306
BIBLIOGRAFIA	310

* * * *

A mis padres, como un homenaje
de reconocimiento a todos sus
desvelos.

A mis hermanos, con afecto.

* * *

" El que comienza una cosa ya tiene hecha la mitad de ella.
Cuando la situación es adversa y la esperanza poca, las
determinaciones fuertes son las más seguras. "

Tito Livio

PROLOGO

La creciente utilización de la energía eléctrica, en todas sus formas, obligan a los Ingenieros, y en especial al Ingeniero Electricista a proporcionar buenos diseños industriales, para mantener un buen servicio confiable y continuo de la energía eléctrica. Por ello el presente trabajo, tiene la finalidad de proporcionar, todas las técnicas actuales de puestas a tierra utilizadas en la industria,

Del trabajo se desprenden 3 partes sustanciales :

La primera parte consiste en hacer un estudio o análisis de los sistemas industriales con neutro a tierra, en sus diferentes modalidades.

La segunda parte, consiste en el estudio de los sistemas industriales con neutro aislado a sin neutro físico.

Finalmente la tercera parte, está relacionada a todos los sistemas de protección utilizados en fallas a tierra.

Cabe mencionar que de las 2 primeras partes se puede elegir ó descartar el tipo de puesta a tierra óptima más conveniente usada en la industria.

Quiero hacer expresivo mi agradecimiento al Ingeniero Justo Yanque Montufar por su desinteresada colaboración de ofrecerme gran parte de su información, utilizada en el presente trabajo, como también sugerencias en la mejora del mismo.

El Autor.

SECCION II

I. GENERALIDADES SOBRE LA PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO EN DISEÑOS INDUSTRIALES EN BAJA Y MEDIA TENSION

1.1. Introducción

La puesta a tierra del neutro en Instalaciones Eléctricas Industriales, ya sea para sistemas de baja y media tensión - juega un papel importante durante el funcionamiento de la red, y brinda protección personal cuando existen fallas a tierra.

En estos últimos ochenta años, la tendencia en el diseño y operación de un gran número de sistemas eléctricos, han sido desarrollados en forma idéntica, ya sea en América como en Europa, basado quizás a que las leyes de la naturaleza son las mismas en cualquier parte. El problema particular sin embargo, ha sido visto desde diferentes puntos de vista, y es la que se refiere a las interrupciones ocasionales en los Sistemas Eléctricos causadas ya sea por fenómenos imprevisibles, como los rayos, o por fallas accidentales a

consecuencia del comportamiento fortuito del aislamiento eléctrico.

En el presente trabajo tocaremos los diferentes tipos y sistemas de protección de puestas a tierra usados en baja y media tensión, y es más, el cálculo analítico de la resistencia de la puesta a tierra para sistemas funcionales, y como complementación haremos, el cálculo de la resistencia de puesta a tierra para protección personal.

Los tipos y sistemas de protección de puestas a tierra han sido analizados sustancialmente, a través de los sistemas con neutro a tierra y neutro aislado respectivamente, donde se distingue la puesta a tierra del neutro de generadores y transformadores, y los diferentes aspectos en el diseño y selección de la puesta a tierra. Por otro lado se presentará anexos en lo referente a la interpretación y cálculos de algunos parámetros involucrados en el sistema y tipo de puesta a tierra.

El objetivo primordial del presente trabajo, es presentar la información necesaria para elegir el tipo de puesta a tierra funcional óptima en Sistemas Eléctricos Industriales, ya sea para redes de tres y cuatro hilos respectivamente; y dar una información cabal sobre los sistemas de protección contra fallas a tierra.

Cabe mencionar que para la realización de este trabajo no he tratado de inventar o crear técnicas, sino más bien ha consistido en una paciente labor de recopilación y evaluación de la información existente según experiencias de otros países, donde el crecimiento cabal de los fenómenos asociados a las puestas a tierra es sumamente bien analizada, es por esto que esos países nos proporcionan una gran herramienta de trabajo para poder realizar buenos diseños industriales en lo referente a las puestas a tierra.

1.2. CONCEPTO Y DEFINICIONES

- a) Puesta a tierra funcional ó sistema de puestas a tierra (System Grounding).-
- Son aquellos sistemas destinados a la puesta a tierra del neutro de generadores, transformadores, conectados en estrella; y a través del neutro artificial formado por transformadores de puesta a tierra.
- Esta puesta a tierra puede hacerse a través de resistencias y reactancias de bajo o el elevado valor ohmico.
- b) Puesta a tierra de equipos (Equipment ground).-
- Puesta a tierra que se realiza mediante la conexión directa a tierra de las masas o partes metálicas de los equipos que en condiciones normales están aisladas de las partes activas de la instalación, a fin de proteger a las personas y animales contra tensiones de contacto o de paso demasiado elevadas.
- c) Sistemas con neutro aislado (Ungrounded).-
- Aquellos sistemas que tienen un potencial elevado en las fases sanas con respecto de tierra, debido a una falla a tierra.
- d) Tensión de paso (step voltage).-
- Viene a ser la diferencia de potencial entre dos pun

tos sobre la superficie del terreno separadas por una distancia de un paso, aproximadamente un metro, en la dirección del máximo gradiente de potencial.

e) Tensión de toque (touch voltaje). -

Diferencia de potencial que durante un defecto puede resultar aplicada entre la mano y el pié de una persona que toque con aquella una masa o elemento metálico, normalmente sin tensión.

f) Punto neutro. -

Es el punto de un sistema polifásico que en las condiciones de funcionamiento previstas presenta la misma diferencia de potencial con relación a cada una de las fases del sistema.

g) Puntoa potencial cero. -

Punto del terreno a una distancia tal de la instalación de toma de tierra que el gradiente de tensión resulta despreciable cuando pasa por dicha instalación una corriente de defecto.

h) Suelo no conductor. -

Suelo o pared no susceptibles de propagar potenciales, se considera así el suelo (o la pared) que presenta una resistencia igual a 50,000 ohmios como mí

nimo .

i) Tierra de referencia.-

Es una zona de la tierra, en particular de su superficie, tan apartado del electrodo de tierra considerado que no se presentan tensiones apreciables entre dos puntos cualquiera de dicha zona. Su valor aproximado es de 0.05 ohm/km.

1.3. FUNCION Y CARACTERISTICA DE LA PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO

- a) Como principales funciones de una puesta a tierra podemos citar las siguientes :

Protección del Personal de Mantenimiento.-

Limita los gradientes de potencial peligrosos en las cercanías de la instalación durante fallas o en condiciones normales de operación del sistema, por consiguiente estaríamos garantizando, que las tensiones de paso y de toque quedan limitadas por lo expuesto.

Protección de las Instalaciones Eléctricas del Sistema.-

Proporciona una vía de baja impedancia para la corriente de falla, permitiendo la apertura rápida de los sistemas de protección (reles de Puestas a tierra).

Mejora la calidad del Servicio

Una puesta a tierra por compensación inductiva de la derivación a tierra, mejora la calidad del servicio porque resulta posible la continuación del servicio durante una derivación a tierra permanente, de forma que la reparación de una avería de este tipo puede realizarse en el momento que se crea más oportuno,.

Ya veremos con más detalle en las secciones posteriores sobre el estudio más preciso de este método - de puesta a tierra (por neutralización).

b) Dentro de las características más saltantes, podemos citar las siguientes :

- Suprime los transitorios debido a las sobre tensiones originadas por fallas a tierra.
- Asegura la confiabilidad del servicio en casos de fallas a tierra.
Disminuye la magnitud de la corriente de falla.
- Impide la propagación del arco en caso de fallas a tierra (Mayormente en baja tensión)
- Restringe el reencabamiento del arco eléctrico, evitando daño alguno.
- Brinda buena protección en los sistemas de iluminación en casos de fallas a tierra.
- Mejora la selectividad de los sistemas de protección de fallas a tierra.
- Facilita la localización de la avería
- Brinda seguridad al paso de la media tensión a la baja tensión.
- Se puede utilizar como retorno.

1.4. SELECCION Y SUGERENCIAS PARA LA ELECCION DEL TIPO DE PUESTA A TIERRA

Para la selección del tipo de puesta a tierra debemos de considerar los siguientes procedimientos prácticos, que en la actualidad han dado buenos resultados en plantas industriales, tales como :

a) Para sistemas con niveles de tensión menores o iguales a 600 V se recomienda una puesta a tierra franca o sólida.

b) Para sistemas con niveles de tensión que están entre 2.3 a 13.8 Kv. se recomienda la puesta a tierra por medio de una resistencia de bajo valor ohmico. Son pocos los casos que para estos niveles de tensión se usen la puesta a tierra franca, excepto que el sistema tenga una corriente de falla relativamente baja.

Si en el sistema existe elevada corriente, de arco - debido a que el sistema es extenso, se recurrirá al uso de la reactancia como medio de puesta a tierra, para poder contrarrestar la corriente capacitiva.

c) Para sistemas mayores de 22 Kv es conveniente poner una puesta a tierra franca, a través de reactancias.- En América la puesta a tierra franca es la que tiene-

mayor incidencia.

Vemos que en estos procedimientos la puesta a tierra ha sido elegida según la tensión nominal del sistema. Pero también se puede hacer una elección aproximada, en función de la corriente de falla, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones :

- (1). Cuando la corriente de falla $1\ \varnothing$ es mayor que la corriente de falla $3\ \varnothing$.
- (2). Cuando la corriente de falla $1\ \varnothing$ es igual a la corriente de falla $3\ \varnothing$.
- (3). Cuando la corriente de falla $1\ \varnothing$ es menor que la corriente de falla $3\ \varnothing$.

De estas consideraciones mencionadas, podemos afirmar lo siguiente :

Que para el diseño de una puesta a tierra franca del neutro de un transformador, podemos tomar como referencia la consideración (2).

Si se quiere poner el neutro de un generador a tierra ya sea francamente o por resistencias, reactancias, podemos tomar como referencia la consideración (1), pero podemos citar una salvedad, que cuando se usa una reactancia como medio de puesta a tierra en un generador podemos

tomar como referencia el caso (2), ya que en este caso es limitada la corriente de falla a un valor considerable.

En la mayoría de los casos mencionados podemos decir que para el diseño se llega a la conclusión de que la corriente de falla a tierra es menor que la trifásica cuando dicha falla es lejana con respecto a la generación. Pero en razón al diseño se toman las consideraciones arriba mencionadas (1) y (2).

La consideración (3) es aplicada cuando el neutro del transformador se va a poner a tierra francamente, o cuando el generador se va a poner a tierra a través de una reactancia.

SECCION II

II. DESCRIPCION DE LA PUESTA A TIERRA PARA SISTEMAS TRIFASICOS CON NEUTRO A TIERRA

2.1. Comportamiento del Sistema si el Neutro está francamente puesto a Tierra

Consiste en conectar a tierra directamente el neutro de los transformadores, generadores. De esta forma cualquier derivación a tierra se traduce en un corto circuito a tierra que deban detectar los dispositivos de protección de sobre intensidades de la red, los cuales provocan la desconexión rápida de los interruptores correspondientes. (Véase la figura 1 pta.)

Este tipo de conexión a tierra está limitado en Europa, a las redes de baja tensión aunque, modernamente la tendencia es aplicarlo para redes de alta tensión (220 Kv y 380 Kv).

En América sin embargo, es el procedimiento más utilizado para la protección contra derivaciones a tierra, ya sea ba-

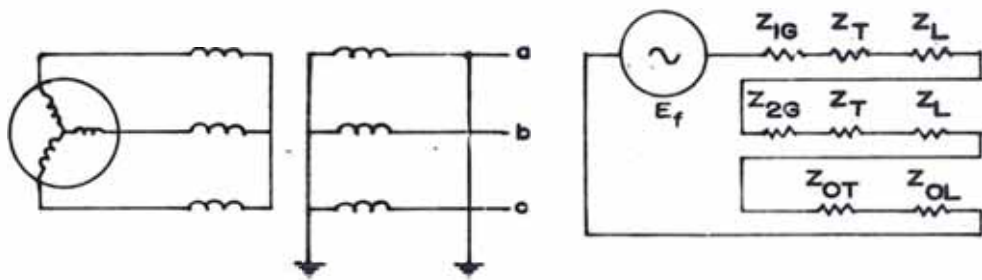


Fig.1pt.a.- SISTEMA CON NEUTRO PUESTO SOLIDAMENTE A TIERRA Y SU DIAGRAMA EQUIVALENTE.

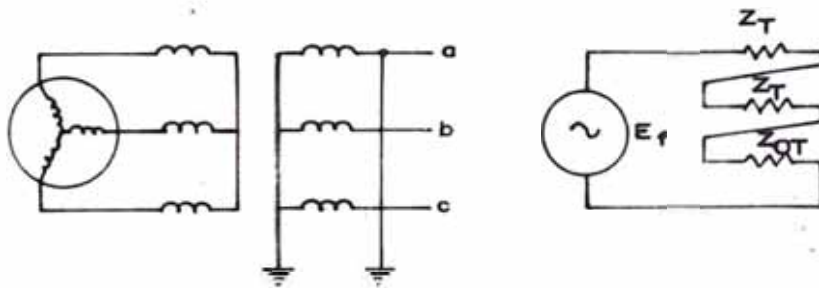


Fig.1pt.b.- SISTEMA DE GENERADOR - TRANSFORMADOR CON EL NEUTRO DE ESTE PUESTO SOLIDAMENTE A TIERRA Y EL DIAGRAMA EQUIVALENTE.

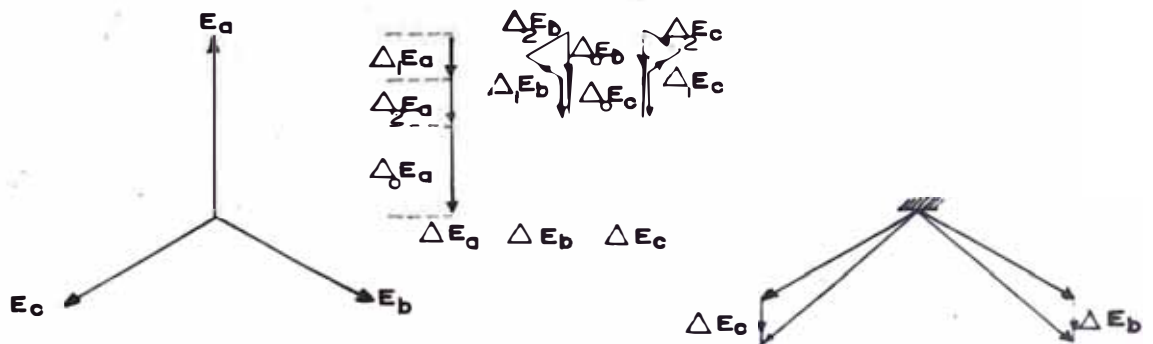


Fig.1pt.c.- TENSIONES DE LINEA A TIERRA PARA LAS CONDICIONES ANTERIORES. (Fig. 1pt. b)

ja tensión o media tensión.

En los sistemas con el neutro francamente puesto a tierra, cada derivación a tierra provoca una desconexión, - pero como la tensión respecto de tierra de las fases sanas "permanece constante", no se producen otros encebamientos y la perturbación queda limitada a la porción de línea afectada por la avería.

Si la red contiene varias mallas, la pasajera eliminación de un trozo de línea no tiene consecuencias graves.'

2.1.1. Función de una puesta a tierra Franca

Como ya se mencionó todas las funciones en el acápite 1.3 podemos recalcar con cierta ampliación lo siguiente :

Proporciona una vía de baja impedancia para la corriente de falla; y permitiendo la operación rápida de los elementos de protección.

Los transitorios no son tan excesivos, de tal manera que las tensiones de las fases sanas se estabilizan.

Un examen superficial del problema nos hará ver que la tensión con respecto de tierra de las fases sanas, será igual a la tensión normal de fase al neutro. Por esto, no

siempre será el caso, ya que puede ocurrir que esta tensión normal de fase a neutro sea considerablemente excedida por las fases sanas, aún con el neutro puesto directamente a tierra. Este fenómeno lo estudiaremos a continuación, y se demostrará que conectando el neutro de un transformador directamente a tierra no quedará rígidamente ligado el neutro del sistema al potencial de tierra.

Consideramos un sistema simple mostrado en la Figura 1 pt. b., asumiendo que el generador tiene $Z_1 = Z_2 = 0$, y que la falla ocurre en la fase "a" del transformador, y además las impedancias de la línea (Z_L y Z_{0L}) no entran en la consideración.

Una tercera parte de la corriente de falla pasará a través de las impedancias en serie causando una caída de tensión ΔE_a , en la fase fallada sobreponiéndose a plena tensión de fase a neutro. Determinaremos ahora las tensiones de las fases "b" y "c" que son las sanas.

El método adoptado, consiste en la superposición de las caídas de tensión ΔE_a , ΔE_b , ΔE_c sobre las tensiones originales y balanceadas mostradas en la Fig. 1 pt.c.

En la fase "a" las tres componentes de caída de tensión estarán en fase (si asumen porcentajes iguales de las componentes resistivas), pero en las sanas, las componentes

de secuencia positiva y negativa están desfasadas 120° dando origen a los polígonos de tensión; de la figura tenemos

$$\Delta E_a = \Delta_1 E_a + \Delta_2 E_a + \Delta_0 E_a$$

pero si $\Delta_1 E_a = \Delta_2 E_a$

$$\Delta E_b = \Delta E_c = \Delta_0 E_a - \Delta_1 E_a,$$

Llevando adelante la superposición tendremos

$$E_a + \Delta E_a = 0 \quad y \quad ; \quad \Delta E_a = -\frac{I_a}{3} (2Z_1 + Z_0)$$

$$\Delta E_b = \Delta E_c = -\frac{I_a}{3} (Z_0 - Z_1)$$

$$y \quad \frac{I_a}{3} = \frac{E_f}{2Z_1 + Z_0}$$

Puede verse ahora que la tensión a tierra de las 2 fases sanas no será igual a la tensión normal de línea al neutro, sino que podría alcanzar valores considerablemente mayores. Este será el caso para valores de Z_0 predominantes sobre Z_1 y Z_2

$$\text{o sea } \Delta E_b = \Delta E_c = -E_f \left(\frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0} \right)$$

$$\text{si, } K = \frac{Z_0}{Z_1}, \Delta E_b = \Delta E_c = -E_f \left(\frac{K - 1}{K + 2} \right)$$

Que nos dice el aumento ó decremento de las tensiones - de las fases sanas.

- Proporciona una buena protección al sistema de iluminación para sistemas de 4 hilos, siempre y cuando se tenga una puesta a tierra efectiva, y además que cumplan las siguientes relaciones:

$$X_0/X_1 \leq 3 \quad \text{y} \quad R_0/R_1 \leq 1, \text{ donde } X_0 ;$$

R_0 son las reactancias, resistencia de secuencia cero del sistema, y X_1 , R_1 son las reactancias, resistencias de secuencia positiva del mismo, obviamente hasta el punto de falla.

- Con una puesta a tierra franca, hallamos la máxima corriente a tierra.

Teniendo esta corriente, podemos compararla con la corriente de falla 3 \emptyset , para luego aplicar los criterios del acápite 1.4.

Brinda buena selectividad de los órganos de protección en casos de fallas a tierra 1ϕ .

Sistema usado generalmente para tensiones de 600 V en redes de baja tensión y hasta 15 Kv en redes de media tensión

2.1.2. Desventajas en utilizar la puesta a tierra franca

Hemos dicho que con este tipo de puesta a tierra, cada derivación a tierra provoca una desconexión, lo que constituye un inconveniente, ya que con otros sistemas que estudiaremos más adelante si permite que el defecto pueda mantenerse, y el servicio se mantenga con la fase a tierra mientras se busca la causa de la perturbación y se prepara el trabajo para una rápida reparación de la avería. Este inconveniente queda limitado con los modernos disyuntores o interruptores de reenganche rápido, cuando se trata de derivaciones a tierra por arcos accidentales, que son las más-numerosas, el empleo de estos dispositivos de apertura permite el reenganche inmediato si la avería no tiene carácter permanente, y por la rapidez de la misma reconexión, no se resiente la estabilidad de las máquinas del sistema, - por lo tanto los usuarios no llegarán a advertir esta momentánea interrupción del servicio.

2.1.3. Perturbación Transitoria

Para este tipo de puesta a tierra debemos tener presente que un transitorio debido a una sobretensión, es originado cuando las reactancias transitoria de los generadores, y las reatancias de corto circuito de los transformadores superan la reactancia total del sistema segregando a los mencionados, Algo análogo ocurriría si el neutro no estuviese a tierra.

Más adelante veremos cómo es la creación o el proceso de la sobre tensión, en caso de fallas a tierra.

2.1.4. Curvas de corriente y tensión, bases de comparación de las mismas y sistemas máximos y mínimos

En este acápite veremos el comportamiento de las corrientes y voltajes de las fases sanas, como una función del tipo de falla, y de la relación de las impedancias de secuencia . Por el efecto de estas dos razones se realizan las curvas mostradas de inmediata (Véase figura 2.p.t., 3 p.t.) .

Las principales impedancias que se usan en condiciones de falla son las de secuencia positiva, negativa y cero (Z_1, Z_2, Z_0). Cada impedancia consiste en una resistencia, y una reactancia.

En general la resistencia de secuencia positiva y nega-

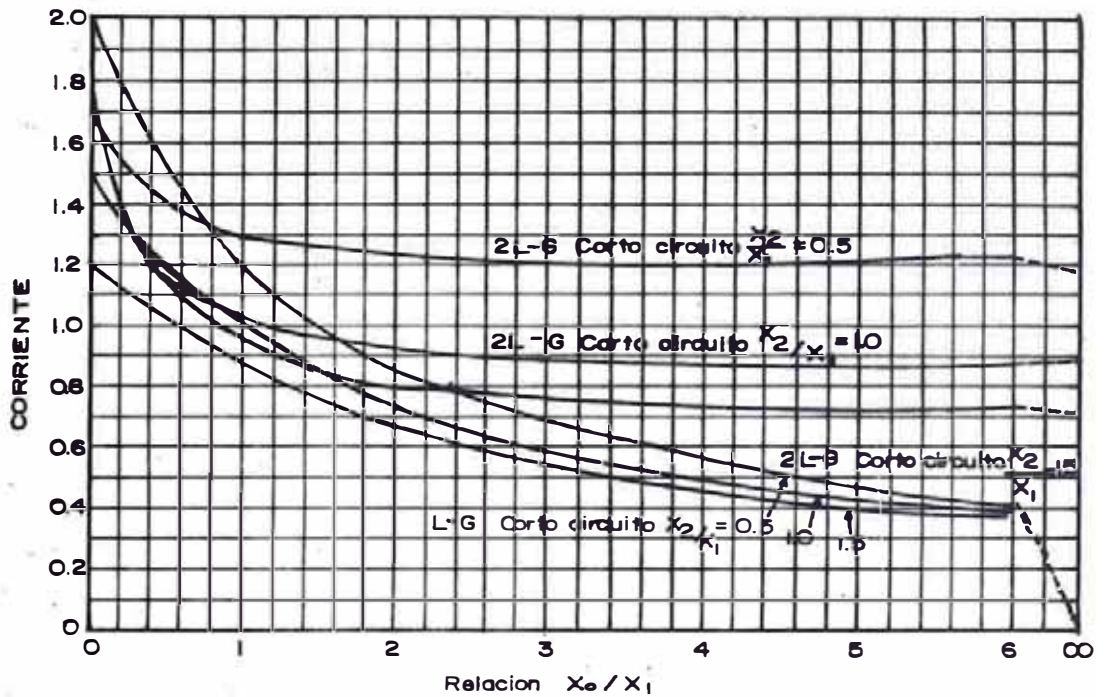


Fig.2pt.a.- CURVAS DE CORRIENTE DE FALLA VS. LA RELACION X_0/X_1 CON RESPECTO A X_2/X_1 PARA LAS FALLAS INDICADAS; ASUMIENDO QUE LAS PARTES RESISTIVAS SON NULAS Y ADEMAS LAS CORRIENTES ESTAN COMPARADAS CON RESPECTO A UNA FALLA 3 ϕ .

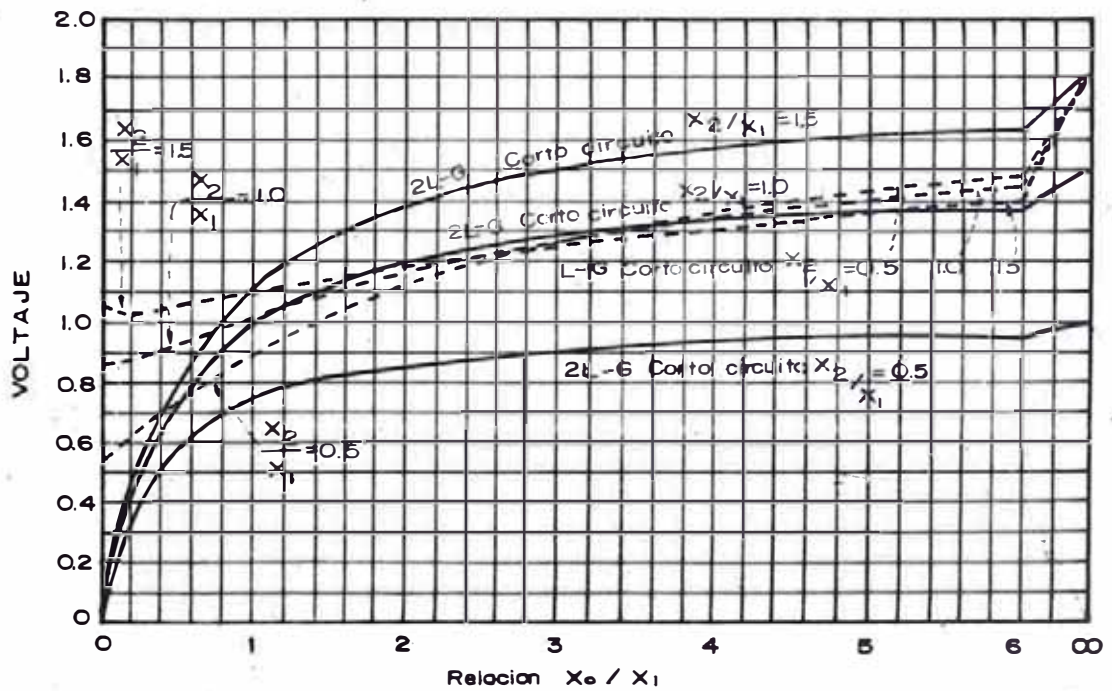
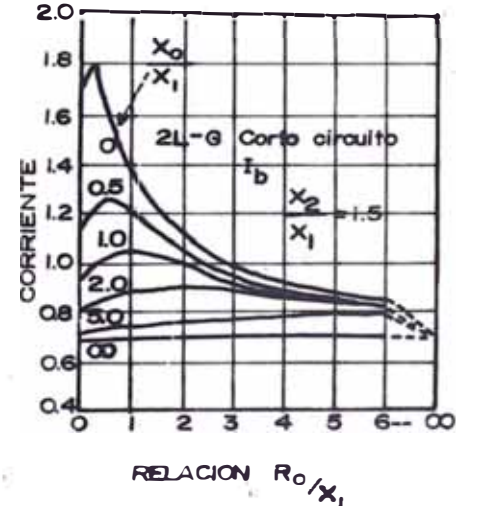
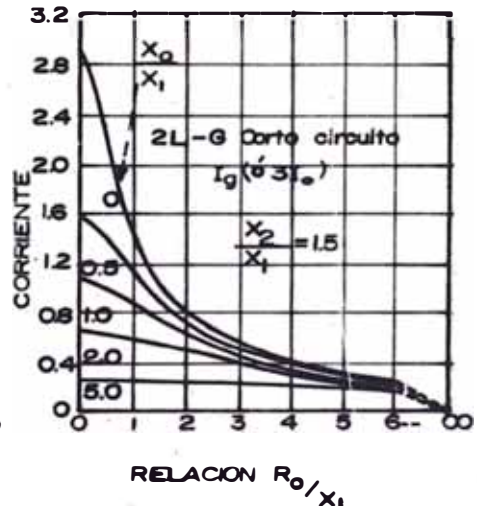
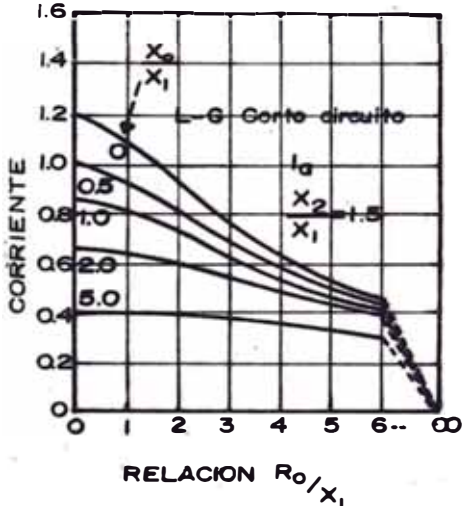
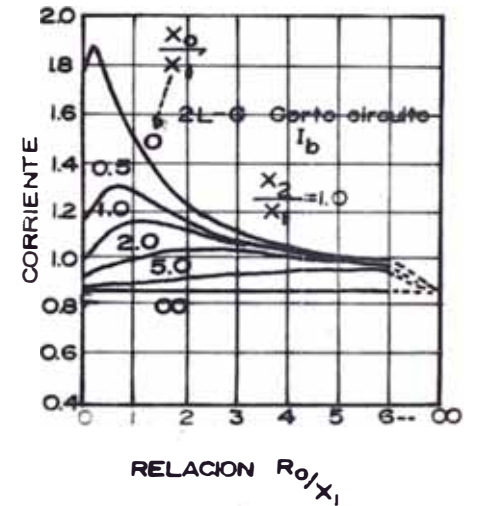
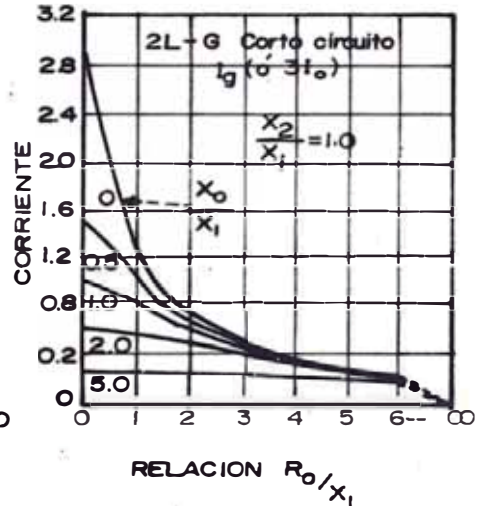
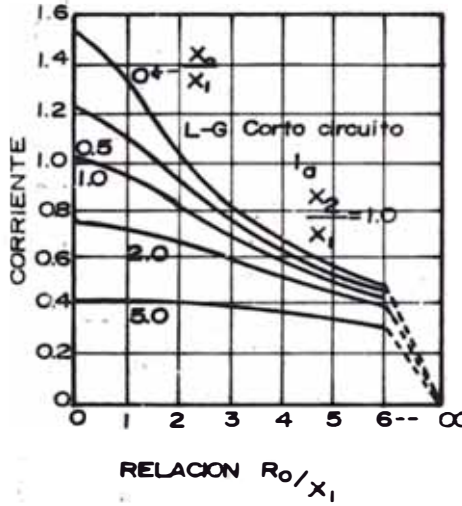
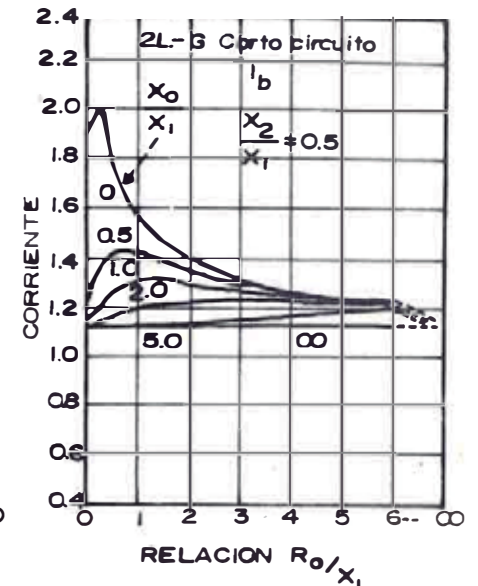
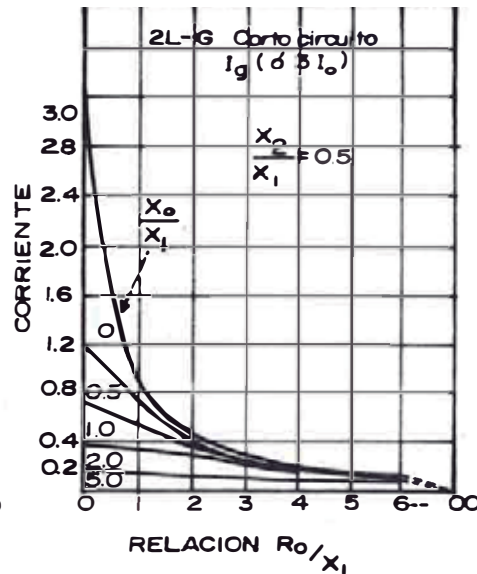
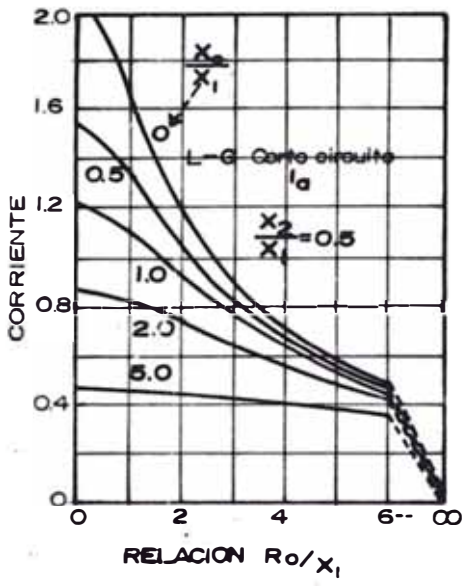


Fig.2pt.b.- CURVAS DE VOLTAJE VS. LA RELACION X_0/X_1 CON RESPECTO A X_2/X_1 , PARA LAS FALLAS INDICADAS ASUMIENDO QUE LAS PARTES RESISTIVAS SON NULAS, Y ADEMAS LOS VOLTAJES DE FALLA ESTAN CON RESPECTO AL VOLTAJE DE TIERRA.

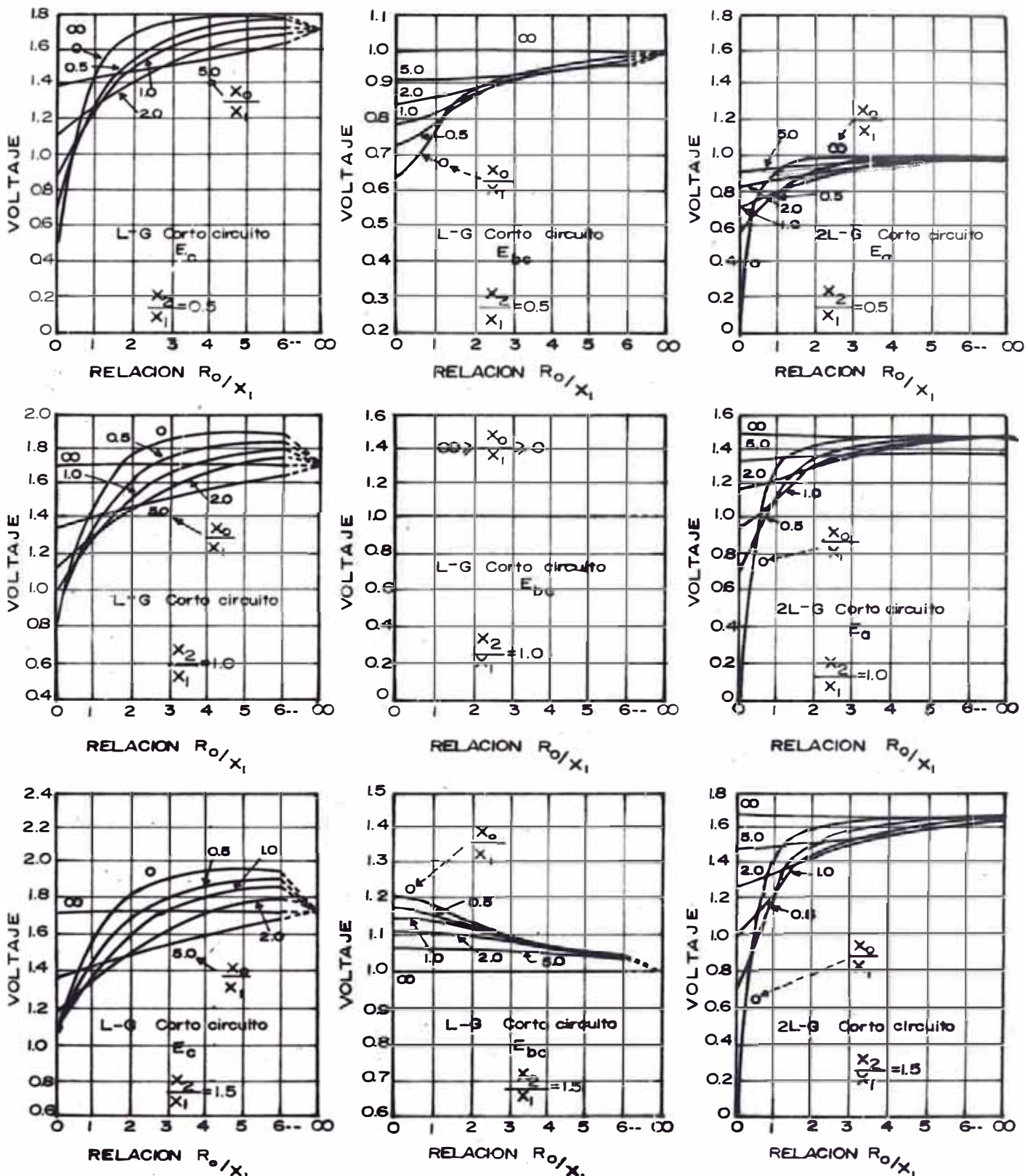


(a) CORRIENTE DE LINEA FALLA IG A TIERRA

(b) CORRIENTE DE TIERRA DOBLE FALLA A TIERRA

(c) CORRIENTE DE LINEA DOBLE FALLA A TIERRA

Fig. 3pt.a.- CURVAS DE CORRIENTE DE FALLA VS. LAS IMPEDANCIAS DE SECUENCIA, TENIENDO PRESENTE QUE LAS CORRIENTE DE FALLA A TIERRA ESTAN EN FUNCION DE LA CORRIENTE 3I0. (Se asume que Ro es la resistencia de secuencia cero hasta el punto de falla, y las restantes son nulas)



(a) VOLTAJE DE LINEA A TIERRA FALLA 1 ϕ A TIERRA (b) VOLTAJE DE LINEA A TIERRA FALLA 1 ϕ A TIERRA (c) VOLTAJE DE LINEA A TIERRA DOBLE FALLA A TIERRA

Fig.3pt.b.- CURVAS DE VOLTAJE DE FALLA VS. LAS IMPEDANCIAS. SECUENCIA TENIENDO PRESENTE QUE LOS VOLTAJE DE FALLA ESTAN EN FUNCION DEL VOLTAJE DE LINEA. (Se asume que R_0 es la resistencia de secuencia cero hasta el punto de falla, y las restantes son nulas).

tiva son pequeños en comparación con las reactancias de las mismas.

La reactancia de secuencia positiva es igual a la subtransitoria en algunas máquinas. La relación X_2/X_1 , para máquinas giratorias varía entre 0.5 y 1.5

Las curvas son preparadas en función a una falla trifásica, monofásica y bifásica.

Las figuras 2 pt., 3 pt., han sido ploteadas teniendo como condición que todas las resistencias ohmicas del sistema son nulas.

De las figuras vemos que las corrientes son de línea, y los voltajes de línea a tierra respectivamente, y además los valores de $\frac{X_0}{X_1}$ varían de 0 a 6. Los rangos de corriente de falla y de voltajes son calculados para relaciones X_2/X_1 (0.5 y 1.5). Los rangos de corriente de falla para la relación R_0/X_1 varía entre 0 y 6, así se muestra en la figura 3 pt.

En esta figura la relación X_2/X_1 cubre el rango de 0.5 a 1.5 y la relación X_0/X_1 cubre el rango de 0 a 5.

Los rangos de voltaje de falla, relaciones de R_0/R_1 varían entre 0 y 6, como se muestra en la figura 3 pt.

Por otro lado veremos también los casos, cuando se considera una resistencia de falla a tierra, para sistemas

de 3 hilos y 4 hilos respectivamente (Véase figuras 4 pt, 5 pt.).

Finalmente mostraremos un resumen de todos los tipos de fallas consideradas para el análisis de las curvas mencionadas. (Véase Figuras 6 p.t. y Cuadros 1 p.t y 2 p.t.)

Bases de Comparación

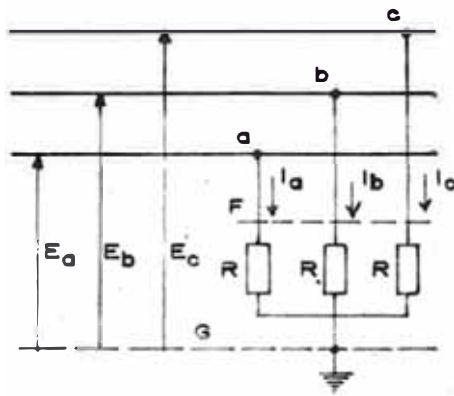
Una consideración final en la confección de las curvas es referir los valores de falla a otros valores dentro del sistema. Con este propósito se considerarán las siguientes referencias :

- a) Para tensiones de falla: tensión normal de línea-neutro
- b) Para corriente de falla : corrientes de corto circuito trifásico.
- c) Para impedancias : reactancia de secuencia positiva.

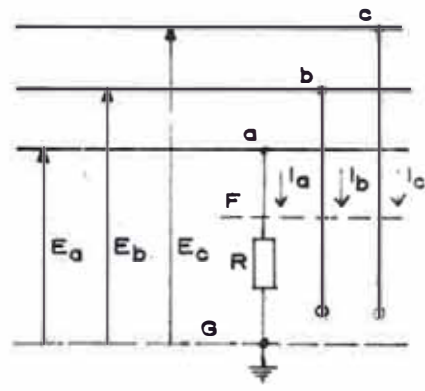
Todos estos valores se consideran no en unidades eléctricas sino como simples relaciones o valores por unidad.

Sistemas máximos de tensiones y corriente

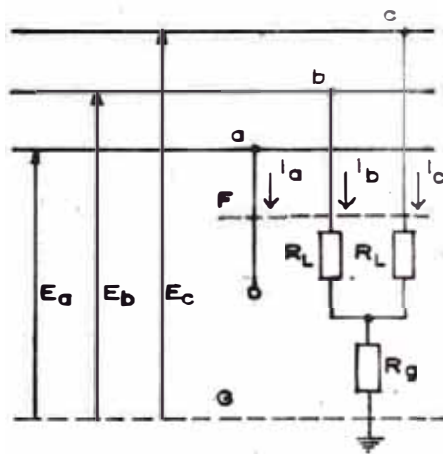
Se puede deducir aproximadamente por las relaciones de las impedancias de secuencia usadas en las curvas, a los sistemas que dan valores máximos de tensiones y corriente.



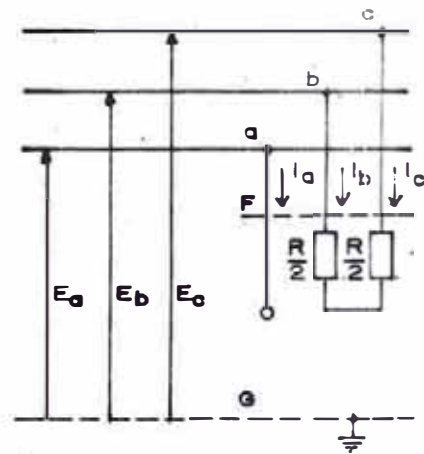
FALLA 3Ø A TIERRA
(L-L-L ó 3L-G)



FALLA 1Ø A TIERRA
FALLA (L-G)



DOBLE FALLA A TIERRA
FALLA (2L-G)



FALLA LINEA-LINEA
(L-L)

Fig. 6 pt.- TIPOS DE FALLAS, EN SISTEMAS 3Ø

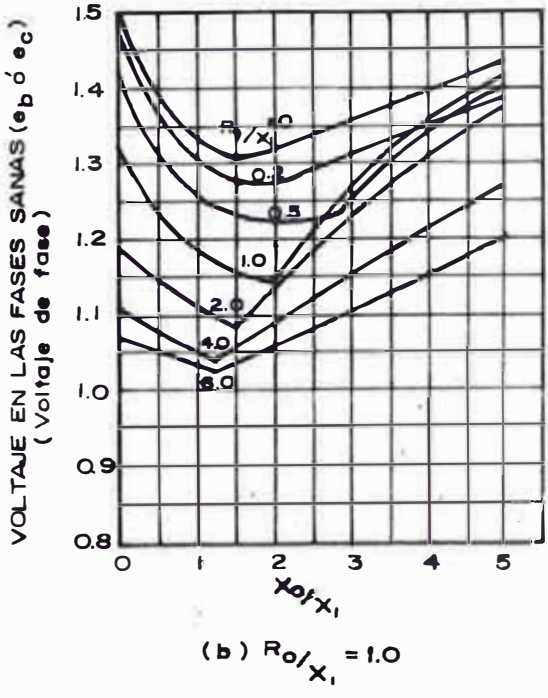
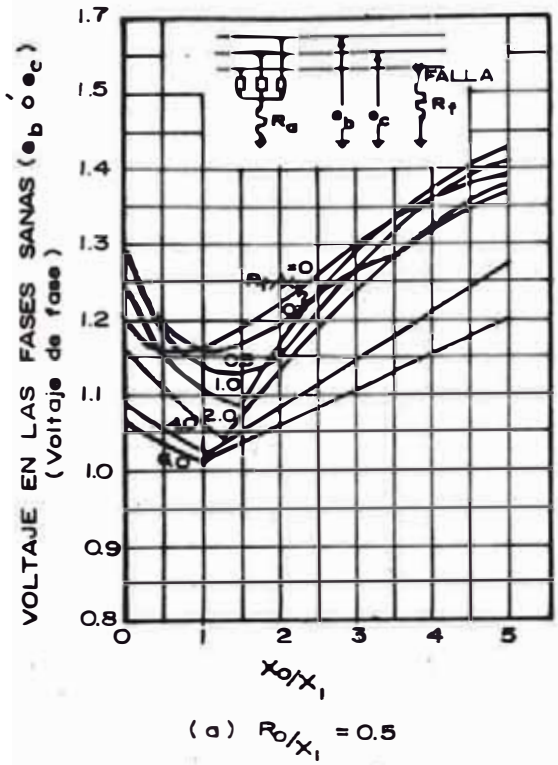


Fig.4pt.-CURVAS DE VOLTAJE A TIERRA VS. LAS IMPEDANCIAS DE SECUENCIA PARA UNA FALLA 1Ø A TIERRA, A TRAVES DE UNA RESISTENCIA DE FALLA (R_f). ADEMAS ASUMIMOS QUE $X_0/X_1 = 1$ PARA LAS CONDICIONES ASUMIDAS DE R_0/X_1 .

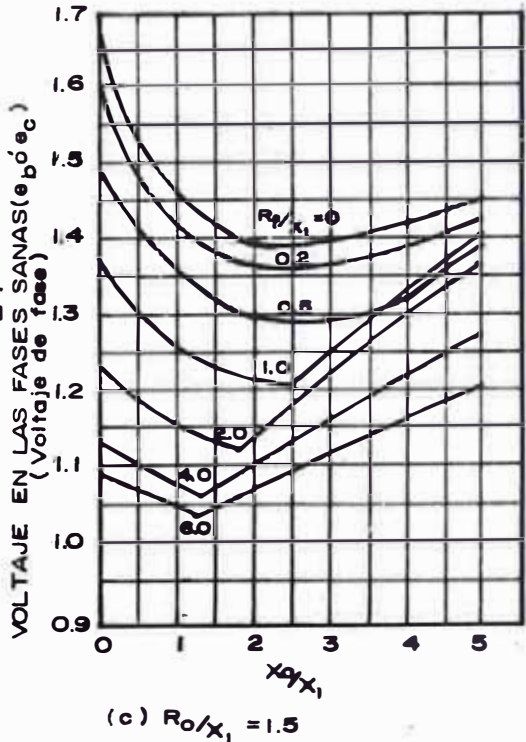
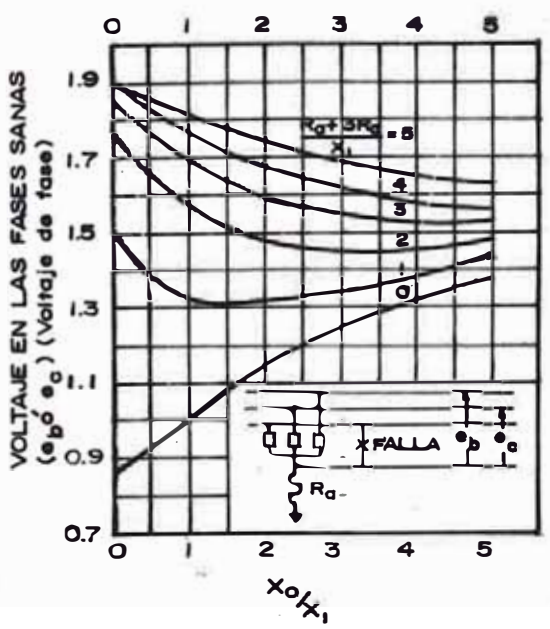


Fig. 5pt.- CURVAS DE VOLTAJE VS. LAS IMPEDANCIAS DE SECUENCIA, PARA SISTEMAS DE 4 HILOS (iluminación). SE ASUME QUE $X_1/X_2 = 1$ Y R_0 ES LA RESISTENCIA DE SECUENCIA CERO HASTA EL PUNTO DE FALLA, POR OTRO LADO R_a ES LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA FUNCIONAL.



CUADRO 1 pt.- EXPRESIONES DE CORRIENTES DE FASES Y DE FALLA

TIPOS DE FALLAS	EXPRESION VECTORIAL INCLUYENDO LAS RESISTENCIAS	VALOR DE LAS CORRIENTES CUANDO: $R_0 = R_1 = R_2 = R_3 = R_g = 0$
FALLA 3Ø	$I_a = \frac{E_g}{Z_1 + R}$	$I_a = I_b = I_c = \frac{E_g}{X_1}$
FALLA DE LINEA A LINEA	$I_b = \frac{-j\sqrt{3} E_g}{Z_1 + Z_2 + R}$ $I_c = -I_b$	$I_b = I_c = \frac{\sqrt{3} E_g}{X_1 + X_2}$
FALLA 1Ø A TIERRA	$I_a = \frac{3E_g}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R}$	$I_a = \frac{3E_g}{X_0 + X_1 + X_2}$
DOBLE FALLA A TIERRA	$I_b = \frac{-\sqrt{3} E_g}{2 \Delta V} [\sqrt{3}(Z_2 + R_L) + j(2Z_0 + Z_2 + 3R_L + 6R_g)]$ $I_c = \frac{-\sqrt{3} E_g}{2 \Delta V} [\sqrt{3}(Z_2 + R_L) - j(2Z_0 + Z_2 + 3R_L + 6R_g)]$ $I_g = I_b + I_c = 3 I_0$ $= \frac{-3 E_g}{\Delta V} (Z_2 + R_L)$ $\Delta V = (Z_1 + R_L)(Z_2 + R_L) + (Z_1 + Z_2 + 2R_L)(Z_0 + R_L + 3R_g)$	$I_b = I_c = \frac{-\sqrt{3} E_g}{\Delta_M} [X_2(\sqrt{3} j + 1) + 2X_0]$ $I_g = \frac{3 E_g}{\Delta_M} X_2$ $\Delta_M = X_1 X_2 + X_0(X_1 + X_2)$

CUADRO 2 pt.- EXPRESIONES DE VOLTAJES DE FASES Y DE FALLA

TIPOS DE FALLAS	EXPRESION VECTORIAL INCLUYENDO RESISTENCIAS	VALOR DE VOLTAJE CUANDO : $R_0=R_1=R_2=0$
FALLA 3Ø	$E_a = E_g \frac{R}{Z+R}$	$E_a = 0$
FALLA DE LINEA A LINEA	$E_a = E_g \frac{2Z_2 + R}{Z_1 + Z_2 + R}$ $E_b = -E_g \frac{\frac{R}{2} + j\frac{\sqrt{3}R}{2} + Z_2}{Z_1 + Z_2 + R}$ $E_c = -E_g \frac{\frac{R}{2} + j\frac{\sqrt{3}R}{2} + Z_2}{Z_1 + Z_2 + R}$	$E_a = E_g \frac{2 X_2}{X_1 + X_2}$ $E_b = E_c = E_g \frac{X_2}{X_1 + X_2}$ $E_{ab} = E_{ac} = E_g \frac{3 X_2}{X_1 + X_2}$
FALLA 1Ø A TIERRA	$E_a = E_g \frac{3R}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R}$ $E_b = -\frac{\sqrt{3} E_g}{2 V} \left[\frac{\sqrt{3} (Z_0 R)}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R} + j (Z_0 + 2Z_2 + 3R) \right]$ $E_c = -\frac{\sqrt{3} E_g}{2} \left[\frac{3 (Z_0 + R) - (Z_0 + 2Z_2 + 3R)}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R} \right]$	$E_a = 0$ $E_b = E_c = \sqrt{3} E_g \frac{X_0^2 + X_0 X_2 + X_2^2}{X_0 + X_1 + X_2}$ $E_{bc} = \sqrt{3} E_g \frac{X_0 + 2 X_2}{X_0 + X_1 + X_2}$
DOBLE FALLA A TIERRA	$E_a = \frac{3 E_g}{\Delta V} (Z_2 + R_L)(Z_0 + R_L + 2R_g)$ $E_b = -\frac{\sqrt{3} E_g}{2 \Delta V} \left[\sqrt{3} (Z_2 + R_L)(R_L + 2R_g) + j R_L (2Z_0 + Z_2 + 3R_L + 6R_g) \right]$ $E_c = -\frac{\sqrt{3} E_g}{2 \Delta V} \left[\sqrt{3} (Z_2 + R_L)(R_L + 2R_g) - j R_L (2Z_0 + Z_2 + 3R_L + 6R_g) \right]$ $\Delta V = (Z_1 + R_L)(Z_2 + R_L) + (Z_1 + Z_2 + 2R_L)(Z_0 + R_L + 3R_g)$	$E_a = \frac{3 E_g}{\Delta M} X_0 X_2$ $E_b = E_c = 0$ $E_{ab} = E_{ac} = E_a$ $\Delta M = X_1 X_2 + X_0 (X_1 + X_2)$

Anal icemos un caso simple que trata varios generadores conectados en una misma barra, una baja relación de $\frac{X_0}{X_1}$ se obtendrá para una o varias máquinas en paralelo con neutro accesible y puesto a tierra francamente, obteniéndose valores de la reactancia de frecuencia cero cercanos al 1% y para la relación $\frac{X_0}{X_1}$ valores menores a 0.2. Relaciones altas de $\frac{X_0}{X_1}$ se obtienen introduciendo un reactor, como veremos en las siguientes secciones. Otra forma es poniendo a tierra solo el neutro de una de las máquinas, que para el caso de una falla en las barras el valor efectivo de la reactancia de secuencia positiva es $\frac{X_1}{n}$ en donde X_1 es la reactancia de las máquinas (todas idénticas) y "n" el número de máquinas, similarmente para la reactancia de secuencia negativa el valor resultante será $\frac{X_2}{n}$ y finalmente el valor de la reactancia de secuencia cero será únicamente X_0 desde que sólo una máquina tiene el neutro puesto a tierra.

Bajo estas condiciones, una falla a tierra de una fase puede alcanzar valores de corrientes de fallas más elevadas que la corriente de falla trifásica (simétrica) de una sola máquina, lo cual puede producir fuertes sollicitaciones mecánicas en la máquina puesta a tierra.

Otra ilustración de un caso en donde se tenga una baja relación de $\frac{X_0}{X_1}$ se presenta en instalaciones de gene-

radores impulsados por turbinas hidráulicas y alimentan a través de transformadores elevadores conectados en delta-estrella con el lado de alta tensión puesto a tierra.

La reactancia de secuencia cero es únicamente la de los transformadores, mientras que la reactancia de secuencia positiva está compuesta por la suma de la de los transformadores y generadores, los que a su vez tienen valores altos respecto a los transformadores.

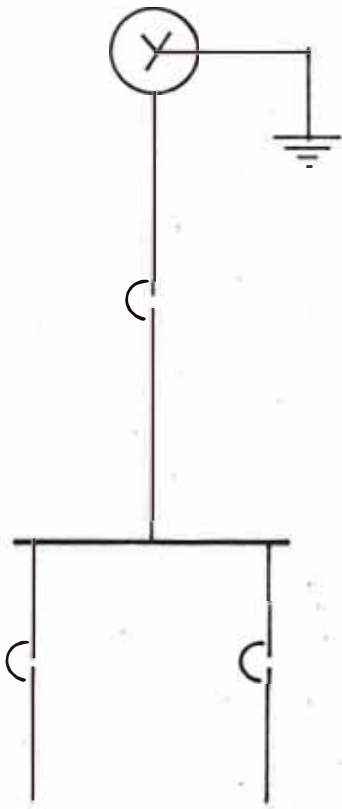
Para fallas lejanas a la generación, la reactancia de secuencia puede ser relativamente alta y la relación $\frac{X_0}{X_1}$ puede ser mayor que 1 (Véase anexo 2.1.4).

Valores altos de la relación $\frac{X_2}{X_1}$ ocurre en máquinas sincronas sin arrollamiento amortiguador y viceversa.

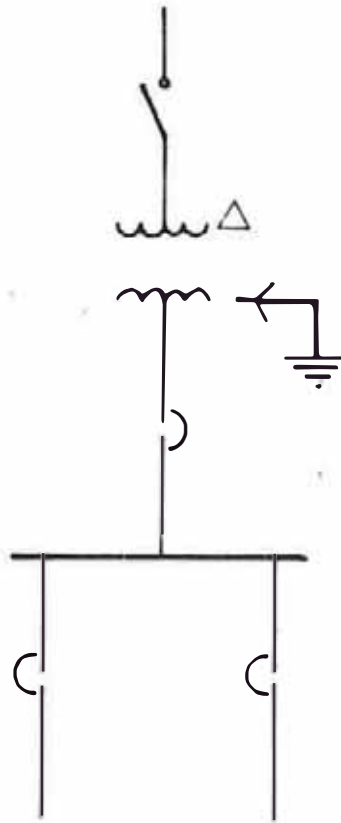
2.1.5. Métodos de conexión en los sistemas trifásicos

Son considerados los siguientes métodos :

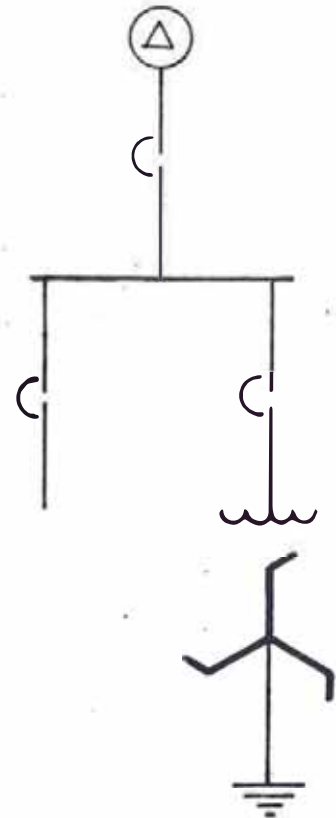
- a) Puesta a tierra franca de un generador conectado en estrella.
- b) Puesta a tierra franca de un transformador conectado en estrella.
- c) Puesta a tierra franca por medio de un transformador de puesta a tierra para sistemas trifásicos en conexión delta. (Véase Figura 7.p.t.)



GENERADOR PUESTO A TIERRA SOLIDAMENTE



TRANSFORMADOR PUESTO A TIERRA SOLIDAMENTE



TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA, PUESTO SOLIDAMENTE

Fig.7pt.- DIFERENTES METODOS DE UNA CONEXION SOLIDA O FRANCA DEL NEUTRO EN SISTEMAS TRIFASICOS.

2.2. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA SI EL NEUTRO ESTA PUESTO A TIERRA A TRAVES DE UNA RESISTENCIA DE BAJO VALOR OHMICO

Consiste en poner a tierra el neutro de los generadores, - transformadores a través de una resistencia de bajo valor ohmico.

En sistemas menores o iguales a 15 K_v, la resistencia de puesta a tierra no debe exceder de las siguientes relaciones

$R_o \leq \frac{X_{CO}}{3}$, $\frac{R_o}{X_o} \geq 2$, donde X_{CO} es la reactancia capacitiva homopolar a tierra y X_o es la reactancia homopolar del sistema, y además

$$R_o = 3 R$$

R = Resistencia de puesta a tierra

Esta resistencia normalmente varía entre 5 a 400 Amperios, para los sistemas establecidos arriba (Véase figura 8 pt. a.b.)

2.2.1. Función de una puesta a tierra a través de una resistencia de bajo valor ohmico.

- Reduce la corriente de falla a un valor considerablemente bajo en comparación con la corriente de una

falla trifásica (simétrica), esta disminución está en el orden del 25 a 100%.

Por ejemplo :

$$\text{se sabe que : } \frac{X_0}{X_1} \leq 3 \quad \text{o} \quad \frac{R_0}{X_0} \geq 2$$

$$\text{y además} \quad R_0 = 3 R$$

$$\text{Asumiendo que} \quad X_0 = 3X_1 \quad \text{y} \quad R_0 = 2X_0$$

$$\therefore \quad X_0 = 3X_1, \quad R_0 = 6X_1$$

$$Z_0 = (6 - j3) X_1$$

Para una falla monofásica a tierra tenemos :

$$\begin{aligned} I_g = 3 I_0 &= \frac{3V}{X_1 + X_2 + Z_0} = \frac{3 \times 1 \text{ p.u.}}{(j1 + j1 + 6 - j3) X_1} \\ &= \frac{3.0}{(6 - j1)} = \frac{3.0}{(6.08 \angle -9.5^\circ) X_1} \\ &= \frac{3.0}{6.08 X_1} \angle 9.5^\circ = \frac{0.49 \angle 9.5^\circ}{X_1} \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Para una falla trifásica (simétrica) ;

$$I_{3\phi} = \frac{1.0}{X_1} \text{ p.u.}$$

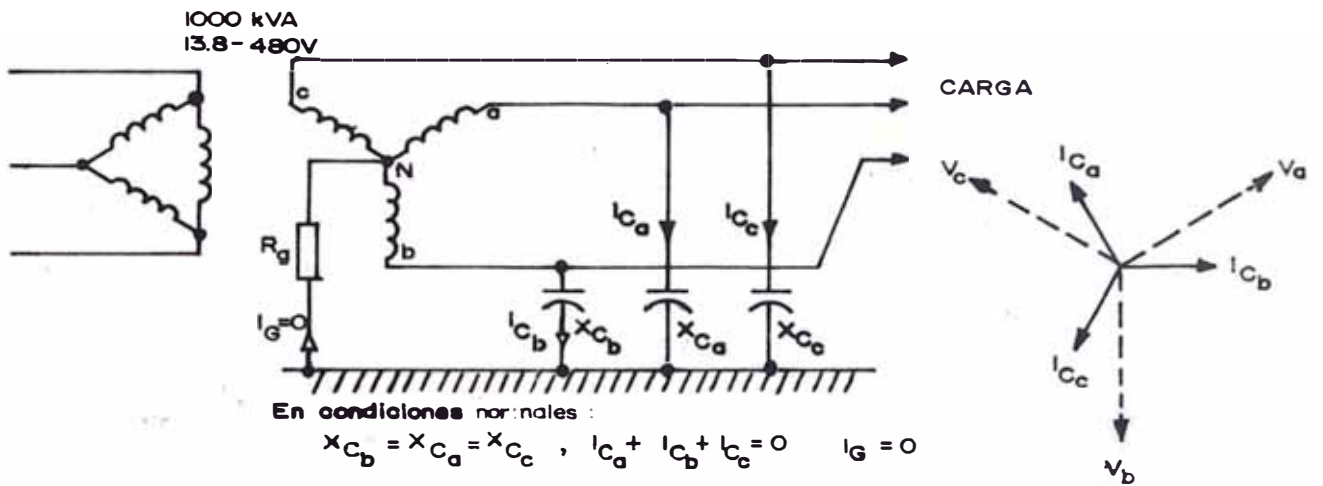


Fig. 8pt. a.- PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO A TRAVES DE UNA RESISTENCIA DE BAJO VALOR OHMICO EN CONDICIONES NORMALES .

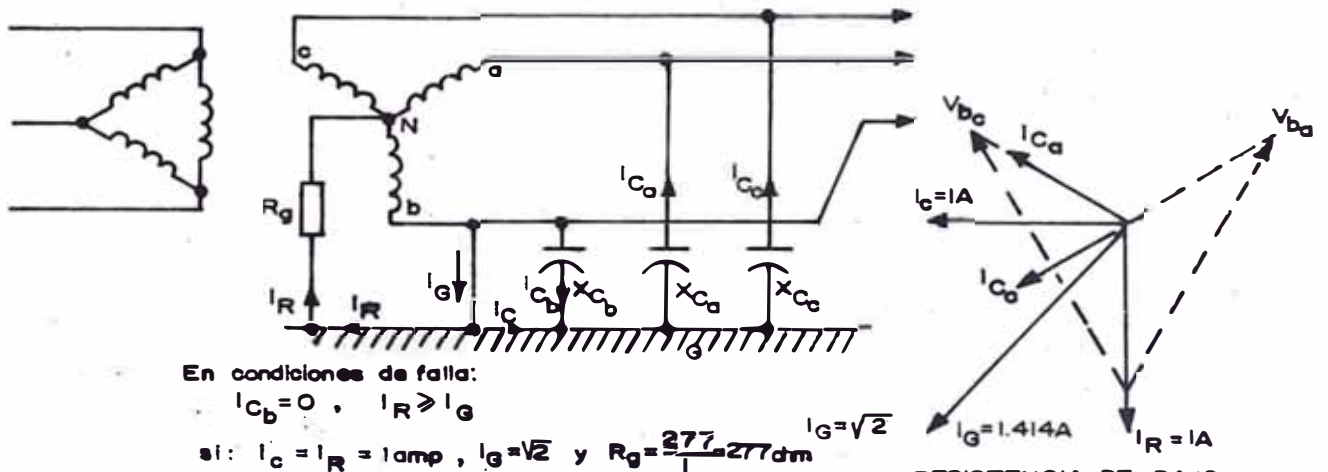


Fig. 8pt. b.- PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO A TRAVES DE UNA RESISTENCIA DE BAJO VALOR OHMICO EN CONDICIONES DE FALLA.

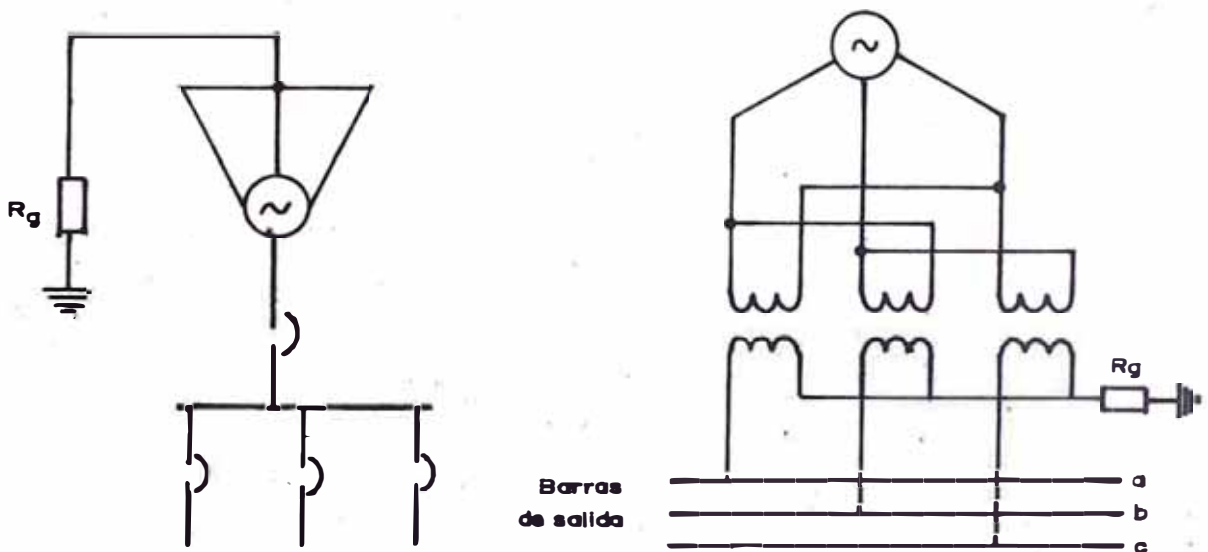


Fig. 8pt. c.- PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO, A TRAVES DE UNA RESISTENCIA DE BAJO VALOR EN GENERADOR Y GRUPOS GENERADORES - TRANSFORMADORES.

Relacionando módulos

$$\frac{I_g}{I_{3\phi}} = \frac{\frac{0.49}{X_1}}{\frac{1.0}{X_1}} = 0.49$$

o sea $I_g = 49\% I_{3\phi}$

Por consiguiente, colocando una resistencia de bajo valor ohmico, y para condiciones establecidas; tenemos que la corriente a tierra es el 49% de la trifásica.

Reduce la tensión del neutro con respecto a tierra, ya que sin puesta a tierra esta tensión crece considerablemente - debido a la resonancia (veáse figura 9 p.t.)

Los transitorios no son tan excesivas, obligando a que las tensiones de las fases sanas se estabilicen.

Brinda buena selectividad a los órganos de protección en casos de fallas a tierra monofásicas.

Sistema usado generalmente para tensiones de 600 voltios, y en redes de media tensión. (5KV)

Brinda buena protección al personal de mantenimiento debido a que la tensión de toque es disminuida.

2.2.2. Elección de la resistencia de bajo valor ohmico

Cuando ocurre una falla monofásica a tierra en el sistema

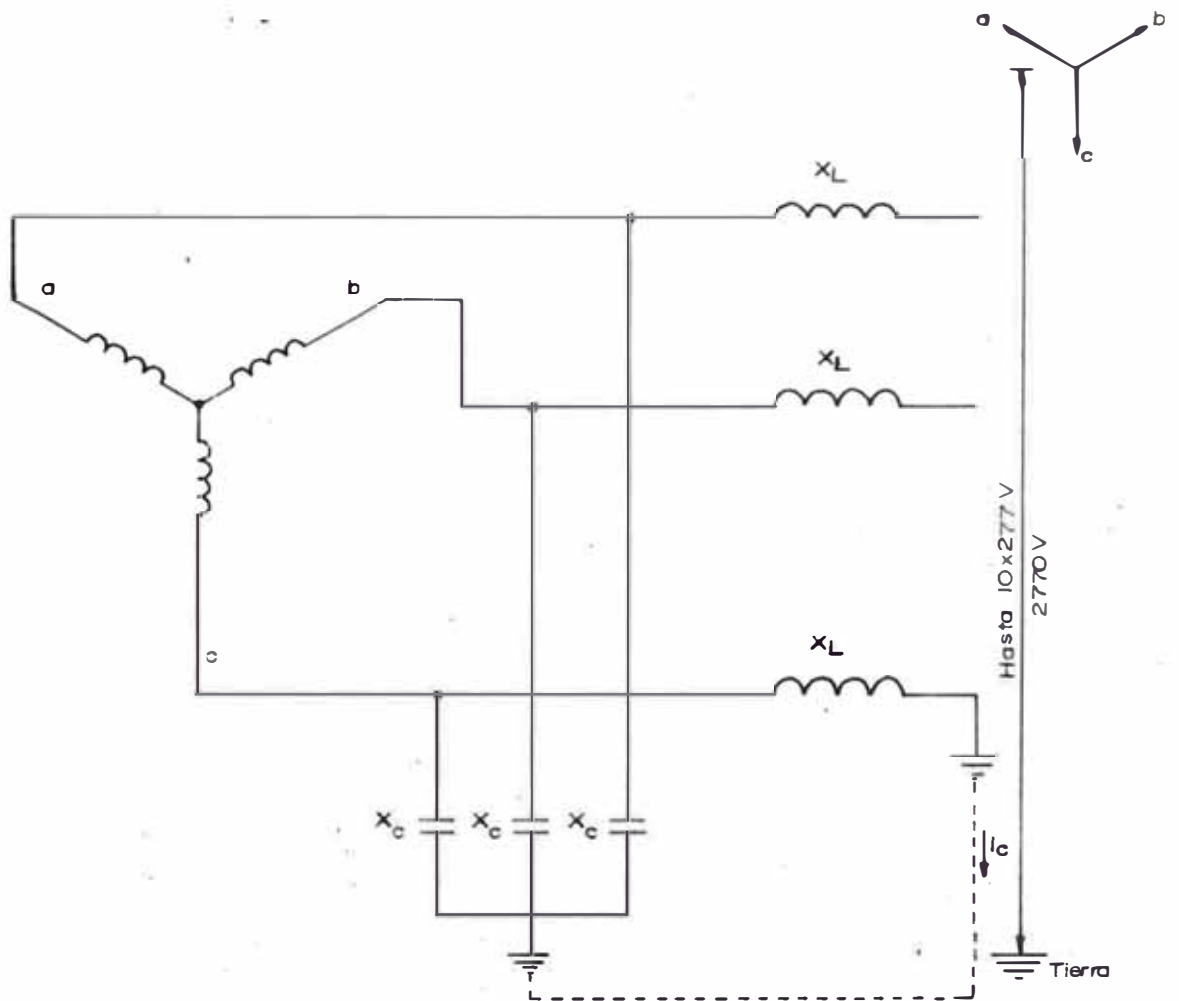


Fig. 9 pt. - SISTEMA DE BAJA TENSION CON NEUTRO AISLADO, DONDE VEMOS QUE X_C Y X_L ENTRAN EN RESONANCIA, MOTIVANDO UN AUMENTO DE LA TENSION DEL NEUTRO CON RESPECTO DE TIERRA. (SISTEMA DE 480 V).

La corriente de falla circula a través de la resistencia de puesta a tierra; si es la puesta a tierra de un generador se origina un sorpresivo cambio de carga en este; o sea la resistencia comienza a consumir potencia, de este modo debemos tener presente que la potencia consumida por la resistencia más la potencia de carga del sistema no sobrepase la potencia nominal del generador. Es así que tenemos que elegir adecuadamente la resistencia, para evitar este inconveniente.

Como hemos dicho anteriormente una resistencia de puesta a tierra varía entre 5 a 400 amperios para este acápite.

En la gráfica de la Figura 10 p.t., mostramos la pérdida de potencia como un porcentaje de la potencia de carga del generador, y además como una función del valor de la resistencia de puesta a tierra. La curva ha sido elaborada teniendo en cuenta, un generador con reactancia típica de 16%, y un transformador con reactancia del 8% usados en distribución.

Además la caída de tensión en la resistencia de puesta a tierra vale $I_g R$, donde

$$I_g = \frac{3 E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

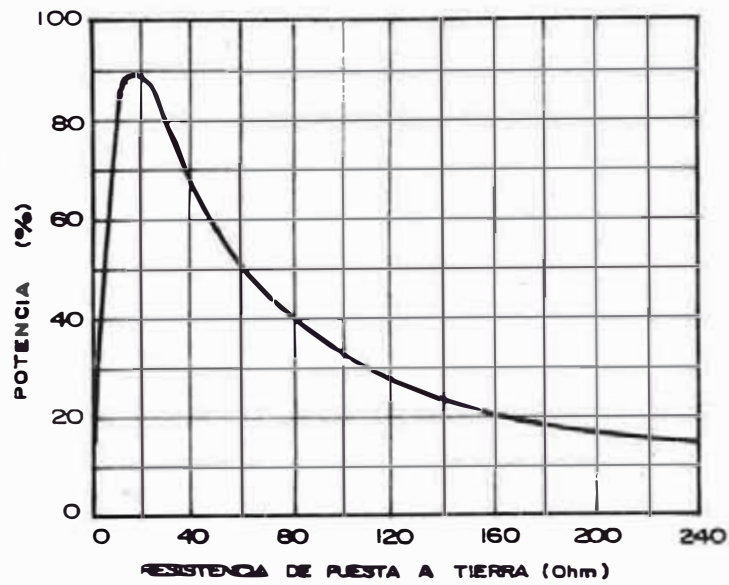


Fig. 10 pt.- PERDIDA DE POTENCIA COMO UN % DE LA POTENCIA DE CARGA DEL GENERADOR CON RESPECTO A LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.

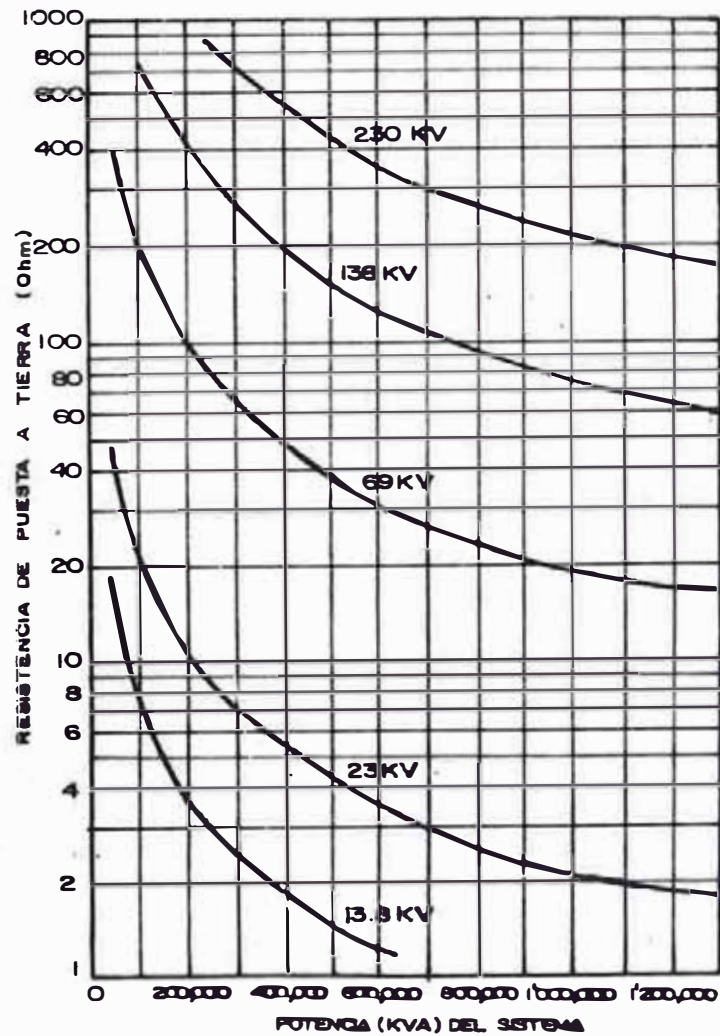


Fig. 11 pt.- COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA CON RESPECTO A LA POTENCIA DEL SISTEMA. (El valor de la resistencia es elegido de tal manera que limite hasta 1/4 de la corriente del sistema.).

y la pérdida de potencia en la resistencia de puesta a tierra vale $I_g E_R$ o $I_g^2 R$, donde I_g , E_R son valores de fase, por consiguiente la pérdida de potencia está en términos de valores de fase.

En general podemos decir que frecuentemente la corriente de tierra en sistemas de media tensión, compuesta a tierra a través de una resistencia de bajo valor ohmico, varía entre :

$$5 \ll I_g \ll 400$$

Cabe destacar que con este margen se garantiza la no aparición de sobretensiones, ya que $I_g \ll I_C$, (I_C = corriente nominal del sistema).

Como algo adicional mostraremos la figura 11 p.t. donde nos explica el comportamiento de la resistencia con respecto a la potencia del sistema. En este gráfico la resistencia reduce la corriente de falla a 1/4 de la corriente nominal del sistema, para diferentes tensiones de servicio.

2.2.3. Perturbación Transitoria

Pocos problemas en la industria pueden ser resueltos - más fácil y económicamente que el de las sobretensiones transitorias.

En este caso lo único que se necesita es purgar la carga de la capacitancia del sistema lo más rápidamente que sea posible a medida que se va acumulando; hay diversas formas de lograr esto y las mejores cuestan menos de 500 dólares para la mayoría de los sistemas de baja tensión el costo sigue siendo todavía muy bajo.

Si el sistema sin puesta a tierra está conectado en estrella es necesario poner a tierra por medio de una resistencia el neutro, de modo que la corriente a tierra sea igual o ligeramente mayor que la corriente nominal del sistema (véase Figura 12 p.t.).

En condiciones operativas normales el punto neutro está al potencial de tierra y no fluirá corriente a través del resistor de puesta a tierra.

Cuando una fase está puesta a tierra el punto neutro se eleva sobre el potencial de tierra por la tensión de fase dividida por la raíz cuadrada de 3 y fluirá corriente a través del resistor de puesta a tierra hacia la falla a tierra.

Cuando desaparezca la falla, la carga remanente en la capacitancia del sistema será purgada o descargada a través de la resistencia de puesta a tierra.

En general habíamos dicho que para evitar sobre tensiones, debe establecerse la siguiente condición :

$$I_g \leq I_c$$

donde

I_g = corriente de falla a tierra

I_c = corriente nominal del sistema

$$\text{Además, } I_g = \frac{E_n - g}{R_g}, \quad E_{ng} = \frac{E_L - L}{\sqrt{3}}$$

2.2.4. Estudio de las tensiones a las fases sanas

$$\text{Se sabe que : } E_f = \frac{I_f}{3} (2 jX_1 + 3 R_n)$$

expresión que será demostrada en la sección 4 con más claridad, por ahora la mencionaremos con el fin del estudio de este acápite.

En donde se ha considerado a R_1 y R_2 despreciables y R_n es la resistencia de puesta a tierra.

Las caídas de tensión en las 2 fases sanas, se obtendrán por la composición vectorial de "

$$\frac{3R_n I_f}{3} \quad \text{con} \quad \frac{jX_1 I_f}{3} \quad \text{y} \quad \frac{jX_2 I_f}{3}$$

después que estas dos componentes han sido rotadas por

$\pm 120^\circ$ y $\mp 120^\circ$ respectivamente, En cada caso las componentes reactivas para $X_1 = X_2$ se combinan a, $-\frac{JX_1}{3} I_f$, siendo la caída de tensión de las dos fases sanas,

$$\Delta = -\frac{I_f}{3} (3R_n - JX_2)$$

por otro lado:

$$\Delta = -E_f \left(\frac{3R_n - JX_1}{3R_n + 2JX_1} \right)$$

En la figura 13 p.t., el vértice "P" del triángulo mostrado como ORP que comprende a E_f , $\frac{2JX_1}{3} I_f$ y $\frac{3R_n}{3} I_f$, tendrá como lugar geométrico a un círculo confeccionado sobre E_f .

Para encontrar el lugar geométrico de Δ el vector OP debe prolongarse hasta un punto Q, tal que $QP = OSOP$. Esto nos conduce a obtener un círculo con diámetro igual a $1.5 E_f$ en el cual RQ representa la caída Δ . Desplazando el círculo con la misma posición relativa a las fases "b" y "c" respectivamente, se determinan los lugares geométricos $E_{fb} + \Delta + E_{fc} + \Delta$ como se muestra en la figura últimamente mencionada.

Así como para una puesta a tierra franca, la relación

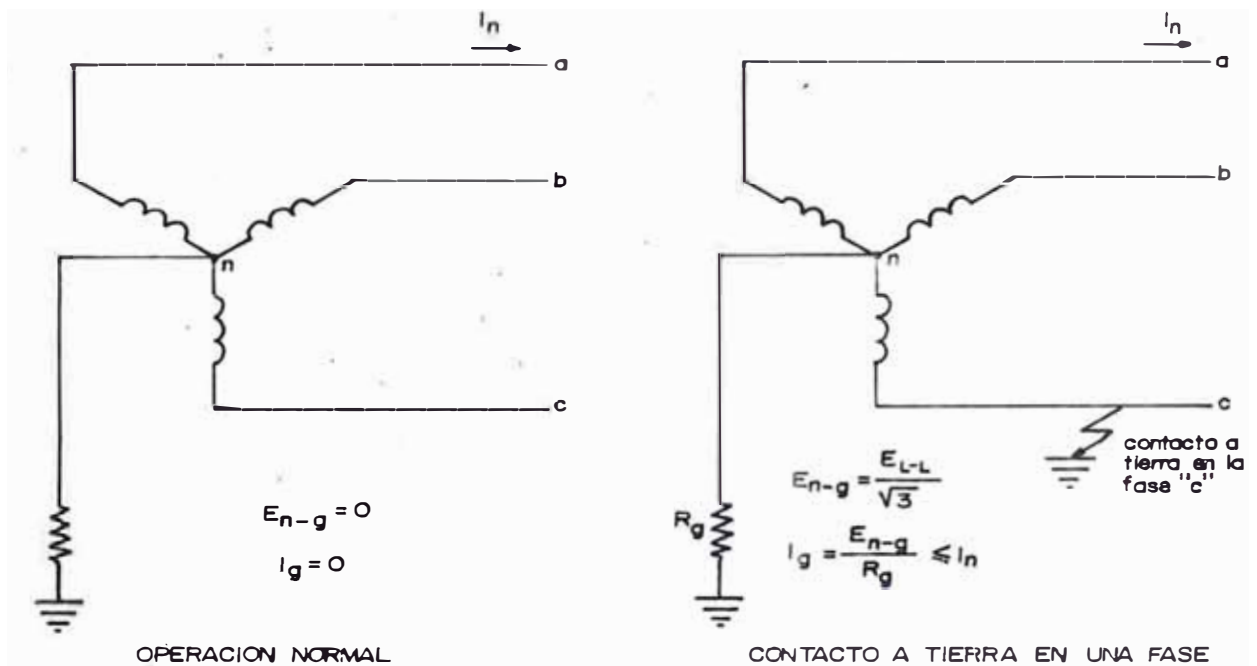


Fig. 12pt.- RESISTOR DE PUESTA A TIERRA EN UN SISTEMA ESTRELLA.

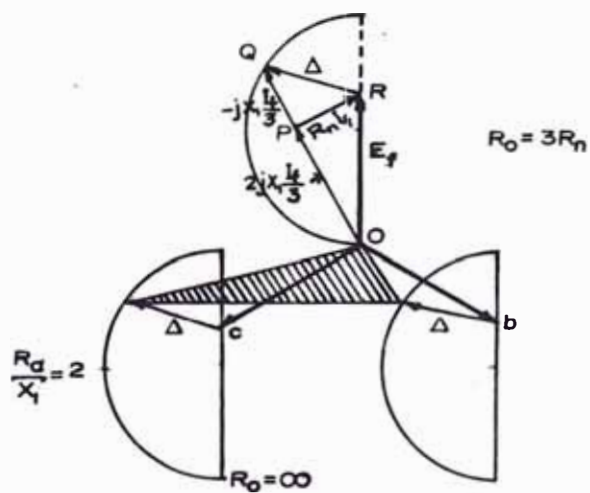


Fig. 13pt.- LUGAR GEOMETRICO DE LAS TENSIONES DE LINEA A TIERRA DE LAS FASES b y c PARA RELACIONES VARIABLES DE R_0/X_1 EN SISTEMAS CON RESISTENCIA.

X_0 determina la posición del punto de trabajo, ahora X_1 para este mismo punto se determina por la relación $\frac{3R_n}{3}$ $\frac{X_1}{3}$ $\frac{R_0}{3}$ para el caso del punto medio a lo largo del círculo o sea para $\frac{3R_n I_f}{3} = \frac{2X_1 I_f}{3}$, corresponde a $R_0 = 2X_1$ ó $R_n = \frac{2}{3} X_1$, se notará que aún para este bajo valor de la resistencia de puesta a tierra, la fase "c" experimentaría un considerable aumento de tensión aproximadamente $1.73 E_f$, además de ser notablemente distorsionado el triángulo de tensiones. Otros dos puntos de interés son: Uno para $R_n = \infty$ que coincide con $Z_0 = \infty$ y $R_n = 0$ que coincide con los puntos de $Z_0 = X_0$, o sea desplazándose a lo largo de una línea vertical.

2.2.5. Métodos de conexión en los Sistemas Tri fásicos

Son considerados los siguientes métodos:

- a) Puesta a tierra a través de una resistencia de un generador conectado en estrella.
- b) Puesta a tierra a través de una resistencia de un transformador conectado en estrella.
- c) Puesta a tierra a través de una resistencia, utilizando un transformador de puesta a tierra para sistemas trifásicos en conexión delta (Véase Fig. 13 p.t.b.) .

2.3. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA SI EL NEUTRO ESTA PUESTO A TIERRA A TRAVES DE UNA RESISTENCIA DE ALTO VALOR OHMICO

Consiste en poner a tierra el neutro de los generadores, o de los grupos generadores-transformadores a través de una resistencia de elevado valor ohmico.

Su uso está limitado en sistemas de baja tensión, debido a que la tensión del neutro con respecto de tierra, podría aumentar, siempre y cuando entre en resonancia las partes reactivas del sistema, es por eso que no es recomendable su uso en redes de 4 hilos bien utilizado en baja tensión.

Pero sí se recomienda para sistemas de media tensión - de 3 hilos.

Para niveles de tensión menores o iguales a 15 K_V su elección está basada a la siguiente relación:

$R_0 \ll X_{CO}$; donde R_0 y X_{CO} vienen a ser la resistencia y reactancia homopolar del sistema.

En la mayoría de las veces son usadas para sistema con neutro aislado en especial en conexión delta, donde su comportamiento es óptimo, ya que suprime eficazmente el fenómeno de resonancia. En la Sección 3 veremos con más detalle su comportamiento y diseño,

cuando se emplean transformadores de puesta a tierra. Particularmente podemos añadir que su uso origina un considerable desembolso económico, ya sea para su compra, mantenimiento y montaje, pero evidentemente desde el punto de vista técnico es aceptable.

2.3.1. Función de una puesta a tierra a través de una resistencia de alto valor ohmico

Reduce la corriente de falla a un mínimo valor, en comparación con la corriente de una falla trifásica sintética, pudiendo llegar hasta el 1%, de tal manera que si

$$\frac{X}{X_1} \ll 20 \text{ ó } \frac{R_0}{X_0} \gg 2 ; y$$

para una resistencia de puesta a tierra R tenemos :

$$R_0 = 3R$$

Asumiendo que $X_0 = 20X_1$, y $R_0 = 2X_0$

$$\therefore Z_0 = (40 - j20) X_1$$

Para una falla monofásica a tierra se tiene :

$$\begin{aligned} I_g = 3 I_0 &= \frac{3V}{X_1 + X_2 + Z_0} = \frac{3 X_1}{(j1 + j1 + 40 - j20) X_1} \\ &= \frac{3.0}{(40 - j22) X_1} = \frac{3.0}{45.65 X_1} \angle 28.8^\circ = \\ &= \frac{0.066}{X_1} \angle 28.8^\circ \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Para una falla trifásica simétrica tenemos:

$$I_{3\phi} = \frac{1.0}{X_1} \text{ p.u}$$

Relacionando módulos $\frac{I_g}{I_{3\phi}} = \frac{\frac{0.066}{X_1}}{\frac{1.0}{X_1}} = 0.066$

$$I_g = 0.066 I_{3\phi} \quad \text{o} \quad I_g = 6.6\% I_{3\phi}$$

Comparando resultados en relación con la de bajo valor, se llega a un valor más reducido, teniendo como patrón la corriente trifásica simétrica.

- La resistencia de alto valor ohmico, limita los transitorios debido a las sobretensiones originadas por una falla monofásica a tierra, ya que la capacitancia parásita a tierra se descarga totalmente a través de la misma, evitando reencebamientos de sobretensiones en las fases sanas.

2.3.2. Elección y operación de la Resistencia de puesta a tierra de alto valor ohmico,

La condición primordial para poner a tierra el neutro a través de una resistencia de alto valor ohmico es la siguiente :

$$X_{co} \gg R_o \quad \text{ó} \quad R_o \ll X_{co}$$

Además hay una relación muy importante que relaciona la potencia en la resistencia, con la potencia nominal del sistema, que a continuación veremos.

Basándonos a los esquemas de las figuras 14 pt.a.b.haremos un análisis orientativo de la operación de la resistencia de elevado valor ohmico; teniendo presente la red de secuencia cero del sistema en cuestión. (Figura 14 pt.b)

De la red de secuencia tenemos :

X_0 = reactancia homopolar del generador y barras.

X_{CO} = reactancia capacitiva homopolar a tierra

I_0 = corriente homopolar del sistema

I_g = corriente de falla a tierra.

I_C = corriente nominal del sistema

$$I_0 = I_{R0} + I_{CO} ; I_g = 3 I_0$$

donde : $\frac{I_g}{I_C} \gg 1$, condición de sobretensión

$$\text{y/o } \frac{KW_R}{KVA_C} = \frac{\text{potencia disipada por la resistencia}}{\text{potencia nominal del sistema}} \gg 1$$

por otro lado :

$$KW_R = \frac{I_{R0} R}{1000} = KVA_{CO} = 3 I_{CO} X_{CO}$$

KVA_{CO} = Potencia almacenada en la reactancia capacitiva a tierra.

por consiguiente la potencia del transformador de tensión del esquema de la figura 14 p.t.b. viene dada por la siguiente expresión :

$$P = \sqrt{3} KW_R \text{ (KVA)}$$

Normalmente estos transformadores de tensión se diseñan para un voltaje de salida (secundario) de 120 o 240 voltios, dependiendo del nivel de voltaje del sistema, por otro lado estos transformadores alimentan a las reles de tensión de los tipos 51 G ó CV-8 (59); obligando a éstos a enviar órdenes o señales a las sirenas, o a los interruptores de protección, por medio de los trips.

Fig. 14 pt. a.- PUESTA A TIERRA SIMPLE A TRAVES DE UNA ALTA RESISTENCIA PARA UN SISTEMA 3 ϕ CONECTADO EN ESTRELLA (GENERADOR O TRANSFORMADOR)

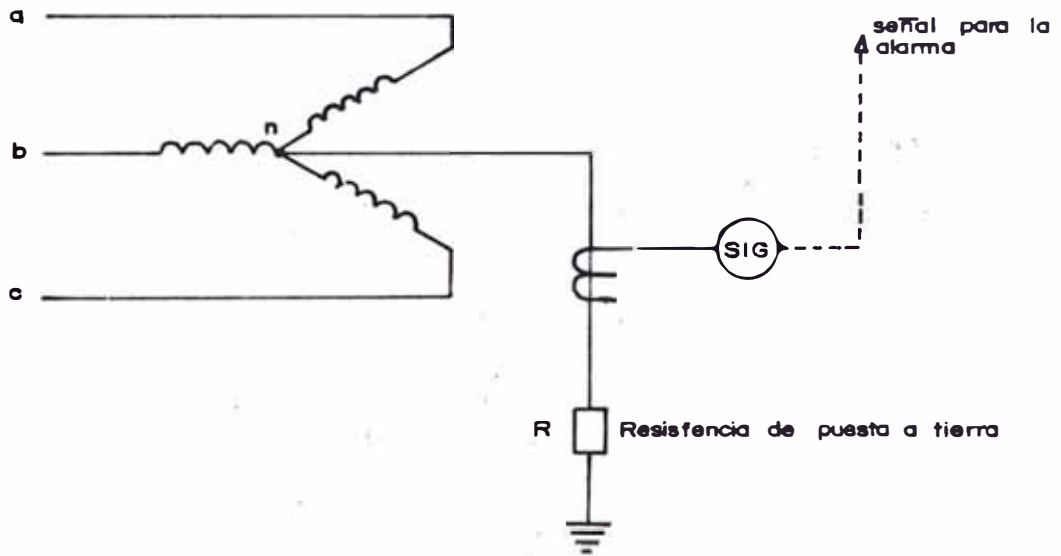
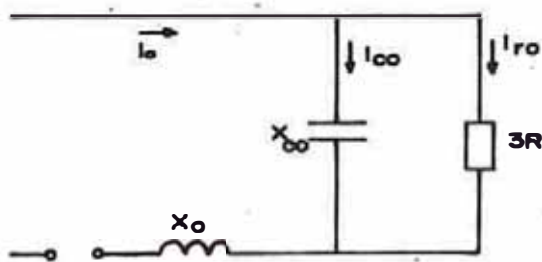
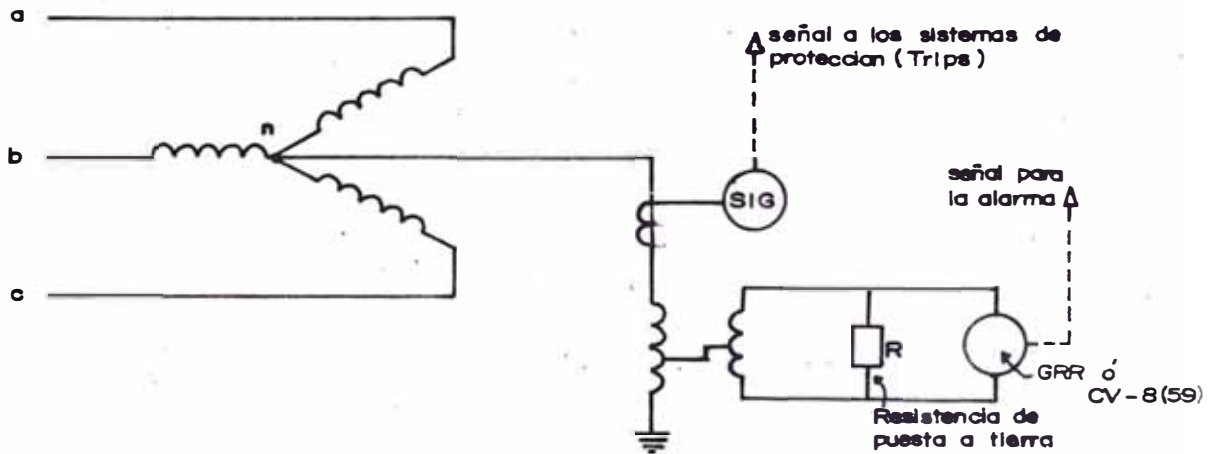


Fig. 14 pt. b.- PUESTA A TIERRA A TRAVES DE UN TRANSFORMADOR 1 ϕ



RED DE SECUENCIA CERO

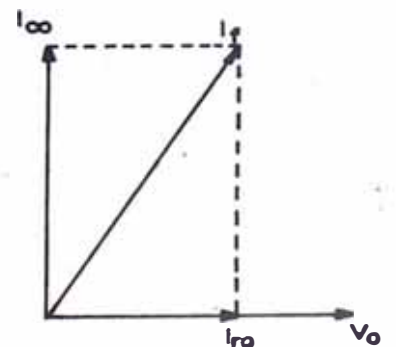


DIAGRAMA FASORIAL

2.4. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA SI EL NEUTRO ESTA PUESTO A TIERRA A TRAVES DE UNA REACTANCIA INDUCTIVA

Este sistema de puesta a tierra consiste, tal como expresa en la figura 15 pt.a., en conectar el neutro de la instalación a tierra, a través de una reactancia inductiva de bajo o alto valor ohmico.

Con esta disposición se consigue una disminución de la intensidad de corriente de tierra, respecto a la puesta a tierra directa o franca del neutro.

La corriente predominantemente inductiva producida en la impedancia está casi en oposición con la corriente de tierra que, como sabemos, tiene carácter capacitivo, lo que dificulta el reencebamiento del arco eléctrico de falla a tierra e impide que, al romperse la línea aparezcan sobre tensiones de inversión en los transformadores.

Este sistema de protección no es muy empleado en Europa pero sí en América, ya que actualmente se prefiere los sistemas de protección por compensación inductiva de la derivación a tierra, de los que vamos a hablar en la siguiente sección.

Su uso es primordialmente para generadores en conexión - estrella.

Por otro lado al hacer variar el valor de K de la expresión $\Delta E_b = \Delta E_c = - E_f \left(\frac{K-1}{K+2} \right)$, (expresión demostrada en el acápite 2.1.1.) no solamente lo hacemos para sistemas con el neutro puesto a tierra francamente sino que también podemos incluir el caso de puestas a tierra a través de reactancias; según la figura 15 pt.b. podemos hacer variar " K " desde cero a infinito.

o sea si $\frac{X_0}{X_1} = 10$, entonces

$$= - E_f \left(\frac{10-1}{10+2} \right) = - E_f \left(\frac{9}{12} \right)$$

$$= - 0.75 E_f$$

o sea la tensión de las fases sanas quedan sometidas en un 75 % de la tensión de fase a neutro, cuando ocurre una falla a tierra monofásica.

Si el sistema no tuviese puesta a tierra esta tensión sería $1.73E_f$ o sea un 73 % de aumento de la tensión fase a neutro (E_f), o sea, vemos la ventaja de la puesta a tierra por reactancias. Según la figura 15 pt.b. que para casos extremos el sistema se comporta como una puesta a tierra

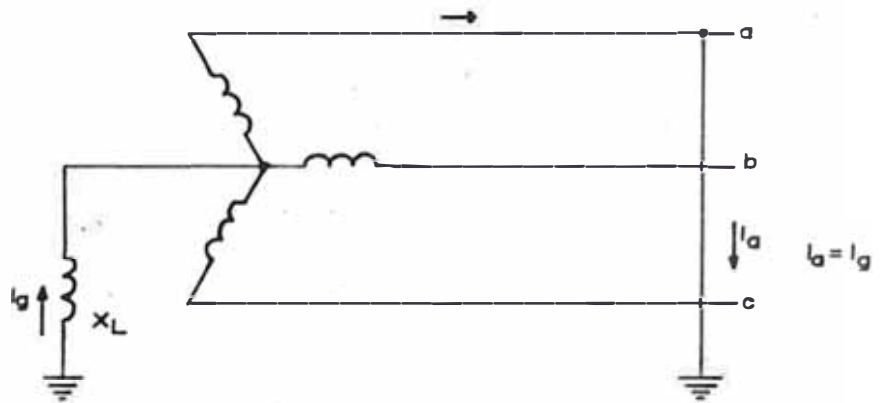


Fig. 15 pt. a.- PUESTA A TIERRA A TRAVES DE UNA REACTANCIA INDUCTIVA.

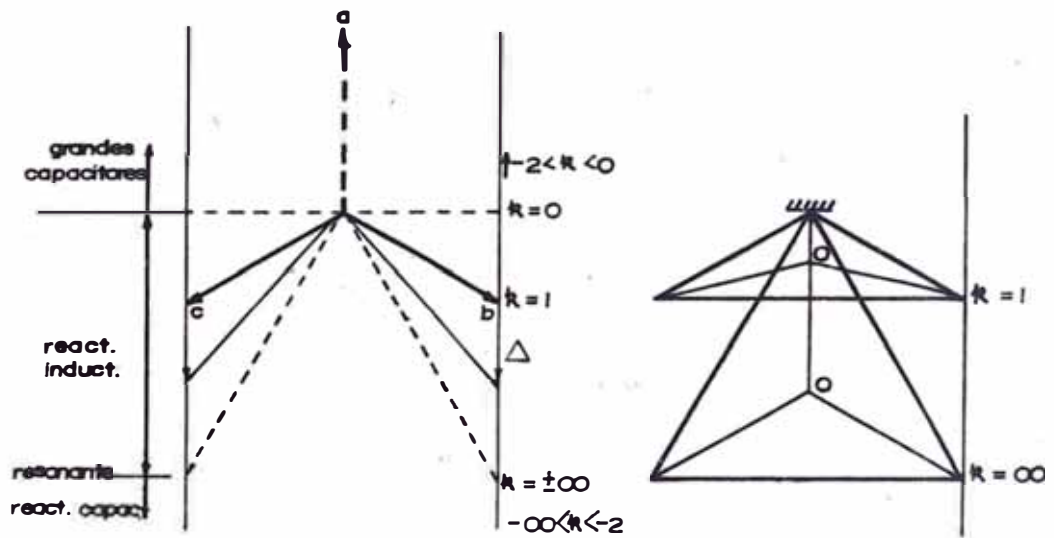


Fig. 15 pt. b.- LUGAR GEOMETRICO DE TENSIONES DE LINEA A TIERRA, PARA FALLAS A TIERRA EN SISTEMAS CON REACTANCIA.

Fig. 15 pt. c.- TRIANGULOS DE TENSION PARA $Z_0/Z_1 = 0$ Y PARA $Z_0/Z_1 = \infty$

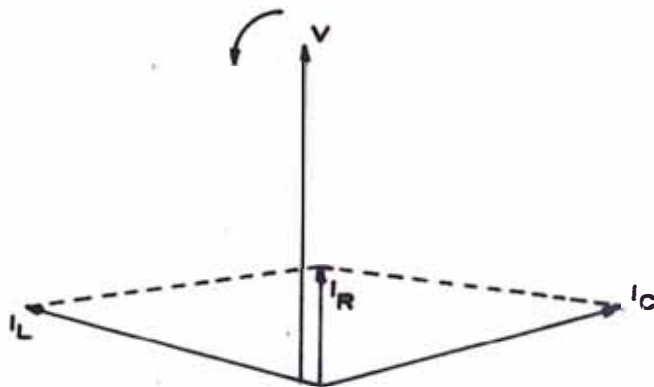


Fig. 16 pt.- DIAGRAMA VECTORIAL DE UN DISPOSITIVO DE PROTECCION POR COMPENSACION DE LA CORRIENTE DE DERIVACION A TIERRA.

por compensación, o como un sistema con neutro aislado.

2.4.1. Función de una puesta a tierra a través de una reactancia inductiva

Al margen de lo mencionado, se sabe también que se puede poner a tierra a través de una baja reactancia o de una elevada reactancia. Pero normalmente se usa la reactancia de bajo valor, ya que la de alto valor origina transitorios muy elevados.

Seguidamente veremos las funciones más comunes de una puesta a tierra por reactancia:

Disminuye la corriente monofásica a tierra, con respecto a la corriente de falla trifásica simétrica desde un 25 a 100% para reactancias de bajo valor, de un 5 a 25% para reactancias de alto valor.

De tal manera que si, $\frac{X_0}{X_1} \ll 10$ ó $\frac{R_0}{X_1} \ll 1$

podríamos calcular la relación $\frac{I_g}{I_{3\phi}}$ teniendo presente

que $X_0 = 3X_n$.

Donde :

X_n = Reactancia de puesta a tierra (ohm)

Asumiendo que $X_0 = 10X_1$ y $R_0 = X_1$

$$Z_0 = (1 - j10) X_1$$

para una falla monofásica a tierra se tiene :

$$\begin{aligned} I_g = 3I_0 &= \frac{3V}{X_1 + X_2 + Z_0} = \frac{3 \times 1}{(j1 + j1 + 1 - j10) X_1} \\ &= \frac{3}{(1 - j8)X_1} = \frac{3}{8.06 X_1} \angle 82.8^\circ \\ &= \frac{0.372}{X_1} \angle 82.8^\circ \end{aligned}$$

Para una falla trifásica simétrica se tiene :

$$I_{3\phi} = \frac{1.0}{X_1} \text{ p.u.}$$

$$\text{Relacionando módulos : } \frac{I_g}{I_{3\phi}} = \frac{\frac{0.372}{X_1}}{\frac{1.0}{X_1}} = 0.372$$

$$I_g = 0.372 I_{3\phi} \quad \text{ó} \quad I_g = 37.2\% I_{3\phi}$$

Por otro lado X_0 , es la reactancia homopolar total - del sistema incluyendo la del neutro, y X_1 es la reactancia de secuencia positiva del sistema.

- Limita los transitorios de las sobretensiones cuando sucede una falla a tierra. Aproximadamente las fases sanas quedan sometidas a 2.5 veces la tensión de fase del sistema.

- Proporciona la corriente apropiada para la operación selectiva de los relés de protección, bajo la premisa de que el valor $X_0 + 2X_1$ sea grande.
- Sistema usado para baja tensión hasta 600 voltios, y en media tensión hasta los 15 Kv.
- Puede usarse para poner a tierra los neutros de los Autotransformadores, siempre y cuando $\frac{X_0}{X_1} \ll 1$

2.4.2. Elección de la reactancia de puesta a tierra de un generador

Se sabe que para elegir una puesta a tierra por reactancia inductiva, debemos tener presente que: $\frac{X_0}{X_1} \ll 10$ (condición de sobre tensión)

Habíamos dicho que, X_0 es la reactancia homopolar del sistema incluyendo la reactancia del neutro (X_n), y X_1 la reactancia de secuencia positiva del sistema.

Por otro lado el valor de la reactancia del reactor de puesta a tierra; según el acápite 1.4. establecía que para un diseño óptimo de puestas a tierra a través de reactancias la corriente monofásica a tierra, deberá ser igual o cercana a la corriente de falla trifásica simétrica.

$$\text{O sea } I_g = \frac{3E}{X_1 + X_2 + X_0 + 3X_n} \dots\dots\dots (1)$$

$$I_{3\phi} = \frac{E}{X_1} \dots\dots\dots (2)$$

Estas expresiones serán demostradas en la sección 4 con más detalle, para la explicación de esta sección solamente la mencionaremos.

Igualando (1) y (2) tenemos

$$\frac{3 E}{X_1 + X_2 + X_0 + 3X_n} = \frac{E}{X_1}$$

$$3 X_1 = X_1 + X_2 + X_0 + 3X_n$$

$$\therefore X_n = \frac{2X_1 - X_2 - X_0}{3} \text{ (Ohm) } \dots\dots\dots (3)$$

De la expresión (3) tenemos que

X_1 = reactancia de secuencia positiva o subtransitoria del generador en ohmios/fase.

X_2 = reactancia de secuencia negativa del generador en ohmios/fase

X_0 = Reactancia de secuencia cero del generador en ohmios/fase.

X_n = Reactancia del reactor de puesta a tierra.

Cabe mencionar que para el cálculo de las corrientes de falla se consideran las reactancias de secuencia del sistema, obviamente hasta el punto de falla.

2.5. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA, SI EL NEUTRO ESTA PUESTO A TIERRA A TRAVES DE REACTANCIAS DE COMPENSACION INDUC TIVA O POR "NEUTRALIZACION"

Las protecciones por compensación inductiva de la falla a tierra están basadas en la idea fundamental de compensar la corriente capacitiva de falla a tierra por una corriente-inductiva de igual magnitud provocada artificialmente en el lugar del defecto a tierra.

Sistema usado para tensiones mayores o iguales a los 15Kv, en especial en líneas de transmisión muy cargadas (largas), estos sistemas son muy poco usados en América, pero muy-emplado en Europa. Puesto que constituye la solución - más completa de todo problema de la falla a tierra para redes de media y alta tensión, lo mismo si se trata de líneas aéreas o de cables subterráneos.

2.5.1. Función de la puesta a tierra por compensación o "neutra- lización"

Veremos las más fundamentales funciones

Quizas la ventaja más importante en el uso de este sistema de puesta a tierra, es que resulta posible la continuación del servicio durante una falla a tierra-permanente, de forma que la reparación de una avería

de este tipo puede realizarse en el momento que se crea más oportuno.

- Los transitorios debido a la falla a tierra son cancelados en su totalidad y el arco formado es extinguido y desionizado, evitando reencebamientos de tensiones.

La corriente de falla a tierra es minimizada hasta un valor cercano al de la corriente homopolar.

2.5.2. Descripción del sistema de puesta a tierra por compensación o "neutralización"

Las soluciones que se han estudiado para provocar artificialmente la corriente inductiva denominada también corriente de extinción son muy numerosas. Todas estas soluciones tienen las siguientes características comunes

- a) Aprovechamiento de la modificación en el valor de la tensión que se produce a causa de la falla a tierra, para provocar la corriente de extinción.
- b) Se consigue que esta corriente de extinción sea aproximadamente igual a la corriente de falla a tierra, haciendo que la reactancia inductiva del circuito de la corriente compensadora, sea igual a la reactancia capacitiva del circuito de la corriente de fa-

lla a tierra. Osea que, para líneas trifásicas tenemos :

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi f3C_T} \quad \text{es decir que } L = \frac{1}{(2\pi f)^2 3C_T}$$

donde L = Inductancia del dispositivo de compensación.

C_T = Capacidad de la línea por fase

En la figura 16 p.t. se ha representado el diagrama vectorial de un dispositivo de protección por compensación de la corriente de falla a tierra. Teóricamente, la corriente I_C debido a la capacidad de la línea respecto a tierra, habría de estar desfasada 90° en retraso respecto a la tensión de servicio V, en estas condiciones, el dispositivo de protección tendría que proporcionarle una corriente I_L desfasada 90° en adelanto respecto a la tensión de servicio, e igual en magnitud a la corriente I_C . De esta forma la corriente I_C quedaría compensada; y por línea no circularía ninguna corriente a tierra.

Pero estos supuestos teóricos no pueden cumplirse prácticamente ya que, por un lado la corriente del dispositivo protector pasa también por una resistencia ohmica, representada por la suma de las resis -

tencias de este dispositivo, de los conductores, de la línea y de las resistencias adicionales a tierra, lo que provoca que la corriente no esté en 90° sino algo menos, y, por otro lado, las relaciones de capacidad a tierra de la red, están variando constantemente, por lo que la magnitud de I_C no puede determinarse de forma exacta, además, también ahora existe una componente óhmica representada por la resistencia a tierra, lo que quiere decir que I_C tampoco estará desfasada exactamente en 90° .

Como consecuencia de todas las circunstancias, en la línea aparece una corriente residual I_r que es la suma fasorial de las corrientes I_L e I_C (Véase figura 16 p.t.). Esta corriente residual sigue circulando por el circuito de tierra y no debe exceder de un 10% de la corriente de falla a tierra franca, pues, de lo contrario el dispositivo protector no cumple la misión encomendada, ya que con una corriente de falla a tierra superior al límite indicado puede provocar el reencebamiento del arco producido por la descarga (Véase el acápite 2.5.4.b.), que además, queda justificado en este acápite.

2.5.3. Dispositivos de protección por compensación o "neutralización de la corriente de falla a tierra"

Los dispositivos por compensación de la corriente a tierra más comunes son los siguientes

- a) Bobina Peterson de A.E.G.
- b) Bobina Jonas de Brown Boveri
- c) Transformadores Bauch de SIEMENS.

Acotaremos que la bobina Peterson es la más utilizada de las 3 mencionadas, por consiguiente para el presente trabajo veremos su comportamiento.

Bobina Peterson

Este sistema ha sido adoptado por A.E.G. y se conoce también por los nombres de bobina P, Bobina E, bobina de derivación a tierra, bobina de resonancia, etc. En la figura 17 p.t.a. se representa esquemáticamente una bobina Peterson, y en la figura 17 p.t.b. el recorrido de la corriente de tierra I_T y de la corriente de extensión I_C en una red protegida con la bobina Peterson.

Como puede apreciarse en ambas figuras, entre el punto neutro de la red y tierra se intercala una bobina de auto inducción, de construcción parecida a la de un transfor-

mador, y que tiene una inductancia tal, que bajo la tensión entre fases admite una corriente próximamente igual a la corriente de falla a tierra de la red. La disposición normal de una bobina Peterson consiste en una reactancia monofásica, derivada del punto neutro de los transformadores o de los generadores.

La constitución de una bobina Peterson es, como hemos dicho, análoga a la de un transformador en aceite, pueden construirse con tomas de corriente conmutables en el estado sin tensión, o en forma de bobina con núcleo de inmersión en las que, por variación de la resistencia magnética del núcleo de hierro se puede efectuar un ajuste continuo sin abrir el circuito eléctrico.

- Funcionamiento de la Bobina Peterson

Para comprender cómo funciona una bobina Peterson vamos a partir de la red monofásica representada en la Figura 18 p.t.a.; en dicha figura, C_{11} y C_{22} son las capacidades parciales con relación a tierra de los dos conductores. Al comunicar con tierra el conductor 2 (Fig.18 p.t.b.) circula la corriente de falla a tierra I_T , que es la corriente de carga de la capacidad C_{11} , por el circuito cerrado constituido por el generador, la capacidad C_{11} por el circuito cerrado constituido por el generador, la

capacidad C_{11} del conductor intacto, tierra, punto de falla a tierra y generador.

Cuando se ha producido la falla a tierra el punto neutro se encuentra bajo la tensión de fase, que es $V_f = \frac{V_b}{\sqrt{3}}$ considerando una falla a tierra franca.

Bajo esta tensión, la reactancia inductiva $2 \pi f L$ de la bobina de puesta a tierra (véase Fig. 18 p.t.c.) admite una corriente :

$$I = \frac{V_f}{2 \pi f L}$$

que es aproximadamente igual a la corriente de falla a tierra I_T . Esta corriente se cierra a través del circuito constituido por el conductor 2, punto de falla a tierra, bobina y conductor 1, coincidiendo en el punto de contacto con tierra con la corriente de falla a tierra y siguiendo su circuito, (véase Fig. 18 p.t.c.). Como ambas corrientes tienen en cada instante sentidos opuestos, se compensan de forma que, tal como se indica en la figura 18 p.t.d; no pasa corriente alguna, por lo menos teóricamente. En realidad, y como hemos dicho anteriormente, por ese punto pasa la corriente residual.

2.5.4. Desventajas en utilizar la compensación inductiva .

Consideremos las siguientes desventajas :

a) Los transformadores de potencia conectados en el sis-

tema cargado, necesitan un aislamiento superior al normal. En general no solamente los transformadores necesitan un buen aislamiento, sino que todo el sistema debe tener un elevado aislamiento, debido a la pequeña corriente residual que siempre circulará, y a largo plazo puede ser perjudicial.

- b) Con este tipo de puesta a tierra se pierde selectividad de los dispositivos de protección, debido a que la corriente resistiva (residual) hará funcionar estos dispositivos involuntariamente, cuando dicha corriente empieza a crecer, obligando hacer un ajuste adecuado a los dispositivos de protección, o de lo contrario obliga a elegir otros dispositivos menos sensibles.

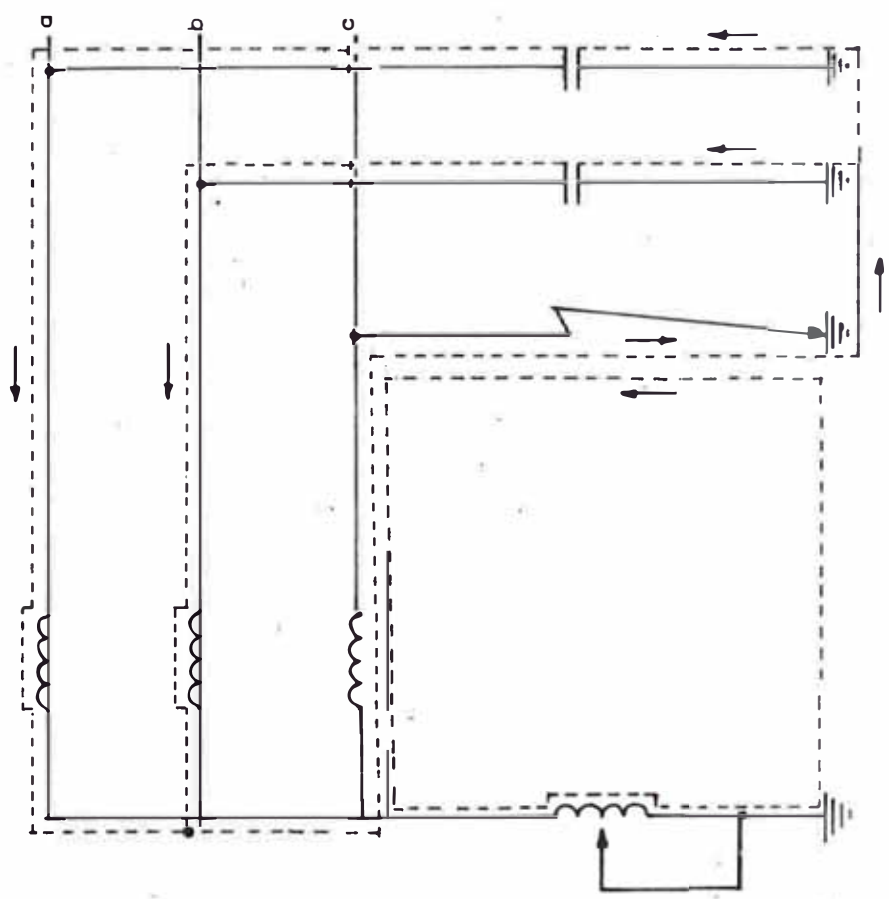


Fig.17 pt.b.-RECORRIDO DE LA CORRIENTE DE TIERRA I_0 (I_T) Y DE LA CORRIENTE DE EXTINCIÓN I_L EN UNA RED, PROTEGIDA POR UNA BOBINA PETERSON.

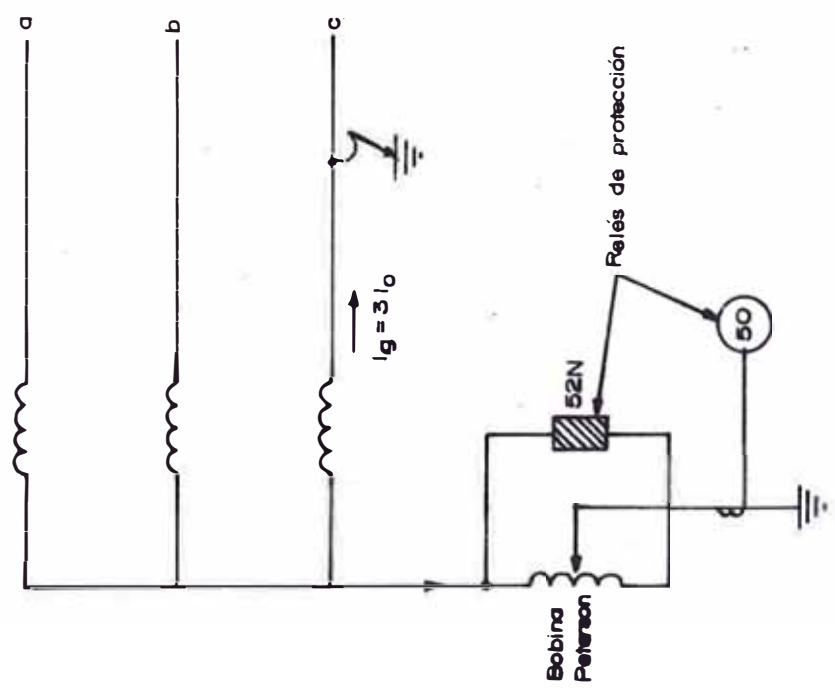


Fig.17 pt.a.-ESQUEMA DE UNA BOBINA PETERSON CONECTADA EN UN SISTEMA 3 ϕ .

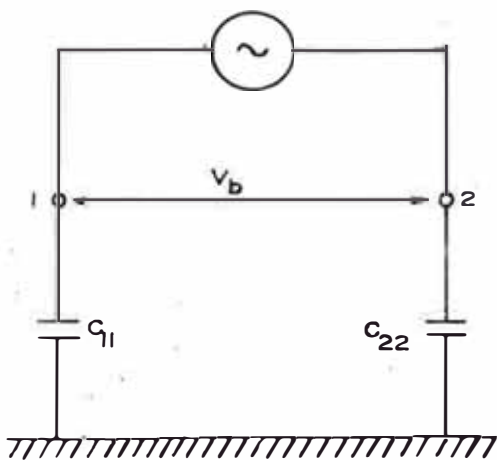


Fig. 18 pt. a. - ESQUEMA DE UNA INSTALACION IØ SIN DERIVACION A TIERRA.

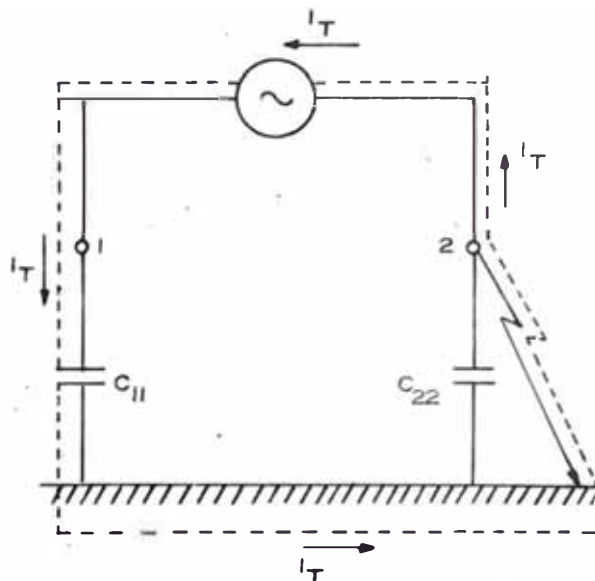


Fig. 18 pt. b. - ESQUEMA DE UNA INSTALACION IØ CON DERIVACION A TIERRA.

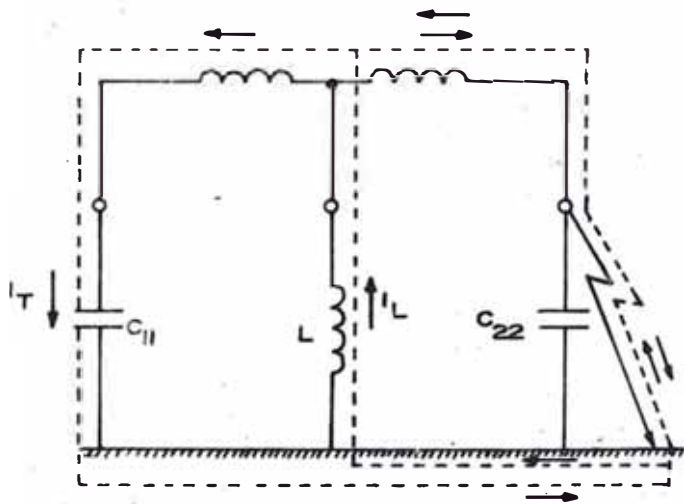


Fig. 18 pt. c. - ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA BOBINA PETERSON EN UN CIRCUITO MONOFASICO.

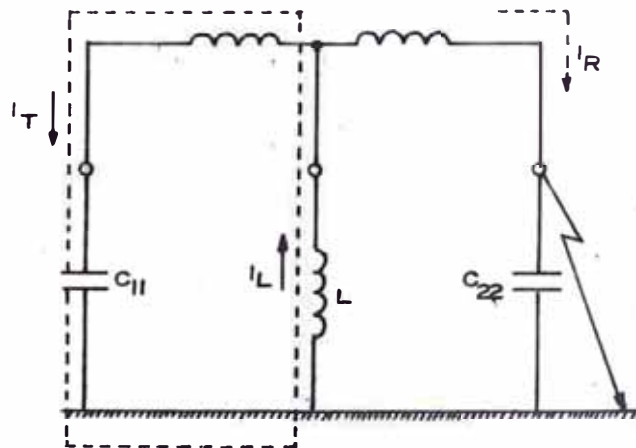


Fig. 18 pt. d. - ESQUEMA EQUIVALENTE DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA BOBINA PETERSON EN UN CIRCUITO MONOFASICO.

SECCION III

3. DESCRIPCION DE LA PUESTA A TIERRA PARA SISTEMAS TRIFASICOS CON NEUTRO AISLADO, O SIN NEUTRO FISICO

Los sistemas de distribución Triángulo o Estrella sin puesta a tierra brindan la máxima continuidad del servicio en uso industrial. Este sistema elimina por completo el problema de la tercera armónica en casos de fallas a tierra, y además no causará tensiones inducidas de considerable valor en circuitos vecinos de comunicación, debido al bajo valor de las corrientes de falla a tierra, pero las sobretensiones y quemaduras debidas a fallas a tierra limitan su empleo.

Modernas técnicas protectoras han hecho posible usufructuar las ventajas de estos sistemas, eliminando al mismo tiempo los problemas que los mismos plantean. Las nuevas instalaciones deben tener puesta a tierra de alta resistencia para simplificar la protección.

Además un sistema de protección sin puesta a tierra tiene la ventaja que puede operar indefinidamente con una puesta a tierra accidental en una fase, eliminando la necesidad de una interrupción inmediata. Una vez localizada la falla el circuito deficiente puede ser puesto fuera de servicio y la falla puede ser reparada, en el momento más conveniente (lo que acorta la salida del servicio) Esto tiene enorme valor en muchas industrias donde la interrupción de un proceso ocasionaría graves pérdidas de producción, materiales y equipo y posiblemente peligro al personal.

Un sistema simple con neutro aislado, y en el estado estable lo vemos en la figura 19 p.t.a., donde vemos que cada conductor presenta una capacidad parásita respecto a tierra que origina las correspondientes corrientes de capacidad a tierra, indicadas en la figura por I_a , I_b , I_c . En la figura 19 p.t.b. se ha representado el diagrama fasorial que comprenden las tensiones de fase y las corrientes de capacidades fasadas 90° en adelante respecto a aquellas; la suma vectorial de estas corrientes es nula, cada una de estas corrientes valen

$$I_a = I_b = I_c = 2 \pi f c E_f$$

o sea $2 \pi f c = m$ y $E_f = 1 \text{ p.u.}$

$$m \angle 120^\circ + m \angle 0^\circ + m \angle -120^\circ = 0$$

Siendo c , la capacidad parásita de cada conductor respecto a tierra y E_f la tensión de fase, cabe destacar que no tiene influencia sobre la puesta a tierra las capacidades parásitas entre fases.

Desde que el neutro de las capacitancias está al potencial de tierra, se deduce que el neutro del transformador o generador está también al potencial de tierra. Podría decirse para este caso, que el neutro está puesto a tierra a través de una "capacitancia de bajo valor".

Ahora supongamos que se produce una falla a tierra de la fase "a" véase figura 20 p.t. y 21 p.t., acompañadas ambas con su diagrama fasorial; ya no habrá ninguna corriente que fluya por ese ramal, debido a que ya no existe diferencia de potencial entre el conductor y tierra, pero en cambio las tensiones de las fases sanas con respecto a tierra se incrementan a un valor igual a la tensión de fases del sistema. Además como se observa en los diagramas fasoriales las tensiones de las fases sanas ya no están desfasadas 120° sino a 60° por lo que las sumas de las corrientes que fluye por las capacitancias ya no es cero.

En posición de fase la corriente I_a que fluye desde el conductor fallado hacia tierra según la convención usual adelanta a la tensión original de fase a tierra en 90° . Por consiguiente

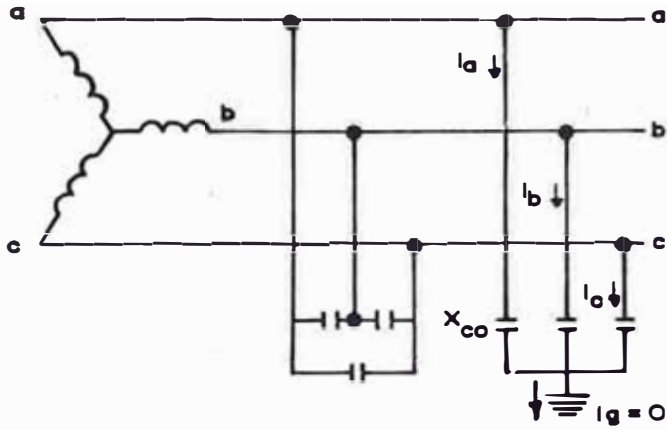


Fig. 19 pt. a.- SISTEMA CON NEUTRO AISLADO

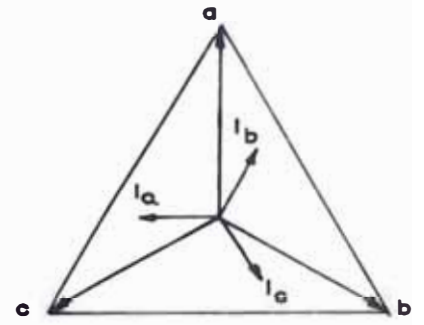


Fig. 19 pt. b.- DIAGRAMA FASORIAL DE UN SISTEMA 3 ϕ CON NEUTRO AISLADO.

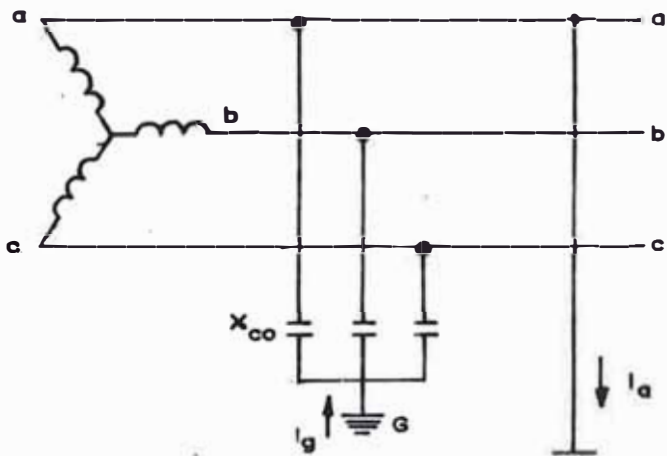


Fig. 20 pt.- FALLA A TIERRA DE UNA FASE, EN UN SISTEMA EN ESTRELLA.

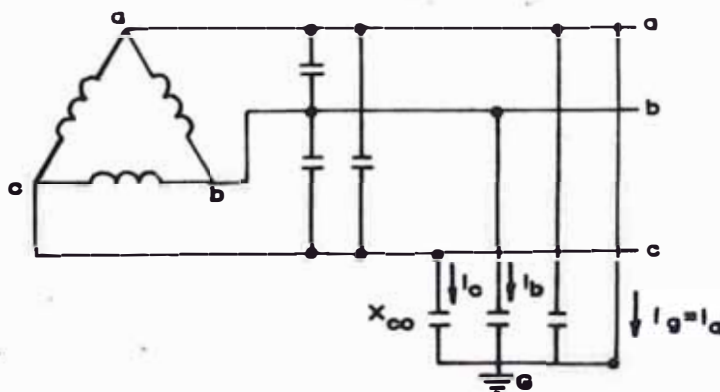
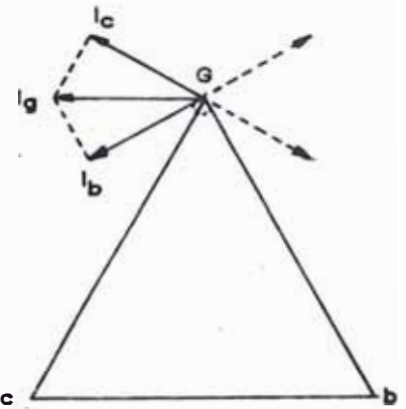


Fig. 21 pt.- FALLA A TIERRA DE UNA FASE, EN UN SISTEMA EN DELTA.

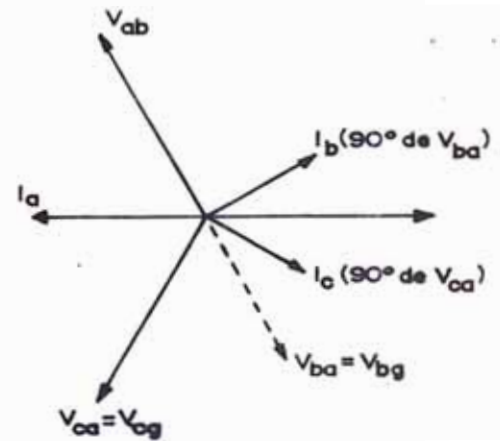
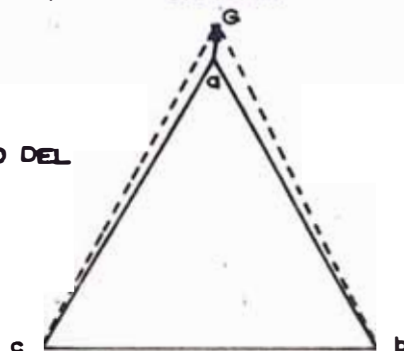


Fig. 22 pt.- DESPLAZAMIENTO DEL NEUTRO DEL TRIANGULO DE TENSIONES, EN SISTEMAS CARGADOS



el valor de la corriente en la fase fallada será

$$I_a = I_g = \frac{3 E_g}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \text{ (expresión demostrada en la siguiente sección)}$$

Para un sistema con neutro aislado será predominante la impedancia de secuencia cero, lo cual Z_1 y Z_2 son puramente inductivas lo cual hace que tiendan un tanto a neutralizarse.

$$I_g = \frac{3 E_g}{Z_0}$$

Otro efecto adicional que se nota en sistemas cargados, en que la corriente de secuencia cero o de carga del sistema está compensada con reactancias en serie, originando incrementos de tensión de secuencia cero hacia el punto alejado, llegando a desplazar el neutro o la tierra fuera del triángulo de tensiones como se muestra en la figura 22 p.t.

3.1. CONSECUENCIAS DE TENER EL NEUTRO AISLADO

Podemos citar las siguientes consecuencias.

- a) Elevación de la tensión respecto a tierra de las fases sanas que pasa del valor de fase (E_f) al valor de línea ($\sqrt{3} E_f$). Este no es grave inconveniente ya que el material de instalación está previsto para resistir una tensión del valor doble que la tensión nominal. Únicamente resultaría peligroso si, con una fase a tierra, se produjese

una sobretensión de origen atmosférico, porque posiblemente se sobrepasaría el límite de seguridad.

- b) El evación rápida de la tensión del punto neutro respecto a tierra.
- c) Distorsión del sistema formado por las corrientes capacitivas, que era simétrico y se convierte en asimétrico a causa de la falla a tierra. La consecuencia es un aumento de la carga capacitiva de la red que en casos (por ejemplo, con pequeña carga de la red y generadores debilmente excitados) puede ocasionar inconvenientes (sobre tensiones inadmisibles, inestabilidad en la excitación)
- d) Caídas de tensión peligrosas en el suelo en las proximidades de la falla a tierra. Estas caídas de tensión son tanto más peligrosas cuanto mayor es la corriente de tierra, o cuanto mayor es la resistencia de falla. Cuando la diferencia de potencial entre dos puntos del suelo sobrepasa un valor determinado puede poner en peligro la vida de personas y animales (tension de paso).
- e) Ruptura de líneas especialmente en las redes extensas que tienen una elevada corriente a tierra. La rotura de los conductores como consecuencia de su fusión por acción de la corriente de tierra, conduce a bruscas interrup

ciones de servicio con los consiguientes perjuicios - de la explotación.

- f) En instalaciones antiguas y en pobre estado de mantenimiento la falla de una fase a tierra, acompañada del pleno desplazamiento del neutro, motiva la falla de otra fase, trayendo como consecuencia corrientes de falla de dos fases a tierra tan grandes como un sistema con neutro sólido.
- g) También la formación de arcos por efectos de la corriente capacitiva producirán formas distorsionadas de onda, lanzando una considerable parte de energía a frecuencias altas, originando influencias mayores en radio comunicaciones.
- h) Obliga a diseñar los transformadores para esfuerzos electrodinámicos grandes, debido a que el neutro del transformador se desplaza, y por lo tanto aparecerán tensiones altas, originando lógicamente mayores costos.

3.2. PERTURBACION TRANSITORIA

En sistemas de baja tensión tiene mayor incidencia el fenómeno de la perturbación transitoria, ya que puede originar grandes destrozos en el sistema.

La elevación de la tensión del neutro con respecto a tierra es

el fenómeno más común en baja tensión; en redes de 480 voltios esta tensión puede llegar hasta 10 veces la tensión de fase (Véase figura 9 p.t.), considerando que la reactancia capacitiva entra en resonancia con la reactancia inductiva.

Este fenómeno provoca sobre tensiones, producidas por la carga brusca de las capacidades respecto de tierra, en las dos fases sanas.

Esta carga es de forma oscilatoria y el circuito oscilante correspondiente está constituido por las dos capacidades de las fases acopladas en paralelo, y las reactancias conjunta de corto circuito de la red (línea, transformadores, generadores, etc). Estas sobretensiones alcanzan su valor máximo cuando la falla a tierra se realiza en el instante en que la tensión de fase averiada pasa por su máximo cuando la falla a tierra se realiza en el instante en que la tensión de fase averiada pasa por su máximo.

Estas sobretensiones tampoco resultan peligrosas para el aislamiento de la red cuando esta es nueva, pero si tiene gran efecto cuando la red es antigua.

A continuación veremos el comportamiento analítico de la resonancia para los siguientes casos :

a) Cuando $X_L > R$

Donde X_L = Reactancia inductiva del sistema
(transformadores, líneas, etc.)

R = Resistencia total del circuito, incluyendo la resistencia de falla.

Sea el circuito resonante de la figura 23 p.t. para un sistema de baja tensión, donde X_C y X_L son las reactancias de las fases sanas y E_C es la tensión de la fase "c" (la fallada), - que es aproximadamente igual a la tensión entre el neutro y tierra y además E_a , E_b son las tensiones de las fases sanas con respecto a tierra.

Además en esta figura mostramos la variación de las tensiones con respecto a la relación $\frac{3X_L}{X_C}$ cuando ocurre una falla a tierra.

Del circuito resonante tenemos

$$Z_{eq} = \frac{1}{2} j \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C} \right)$$

$$E_n = I \sqrt{\left(\pi f L - \frac{1}{4\pi f C} \right)^2} \quad \text{(Tensión de fase previa a la resonancia)}$$

Por la condición de resonancia :

$$\pi f_0 L = \frac{1}{4\pi f_0 C}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \left(\sqrt{\frac{1}{LC}} \right) \text{ (frecuencia de resonancia)}$$

$$E_{a,b} = \frac{1}{2\pi f_0 C} \left(\frac{I}{2} \right); \quad E_{a,b} = \sqrt{\frac{L}{C}} \left(\frac{E_n}{X_L - 4/X_C} \right)$$

$$\therefore E_{a,b} = E_n \left(\frac{X_C \sqrt{X_C \cdot X_L}}{X_C X_L - 4} \right)$$

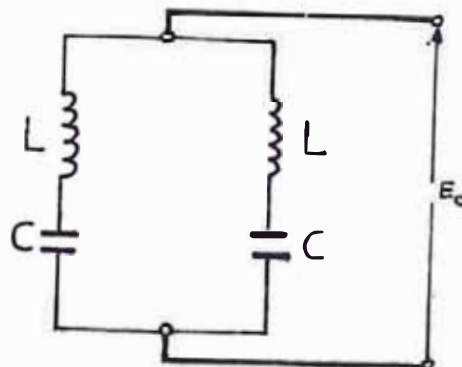
$$\text{pero, } X_L X_C > 4 \quad \therefore E_{a,b} = E_n \left(\frac{\sqrt{X_C X_L}}{X_L} \right)$$

podemos decir que :

$$E_c \approx 2E_{a,b}$$

finalmente el factor de sobretensión viene expresado de la siguiente manera :

$$\frac{\sqrt{X_C X_L}}{X_L}$$



b) Cuando $R \approx X_L$

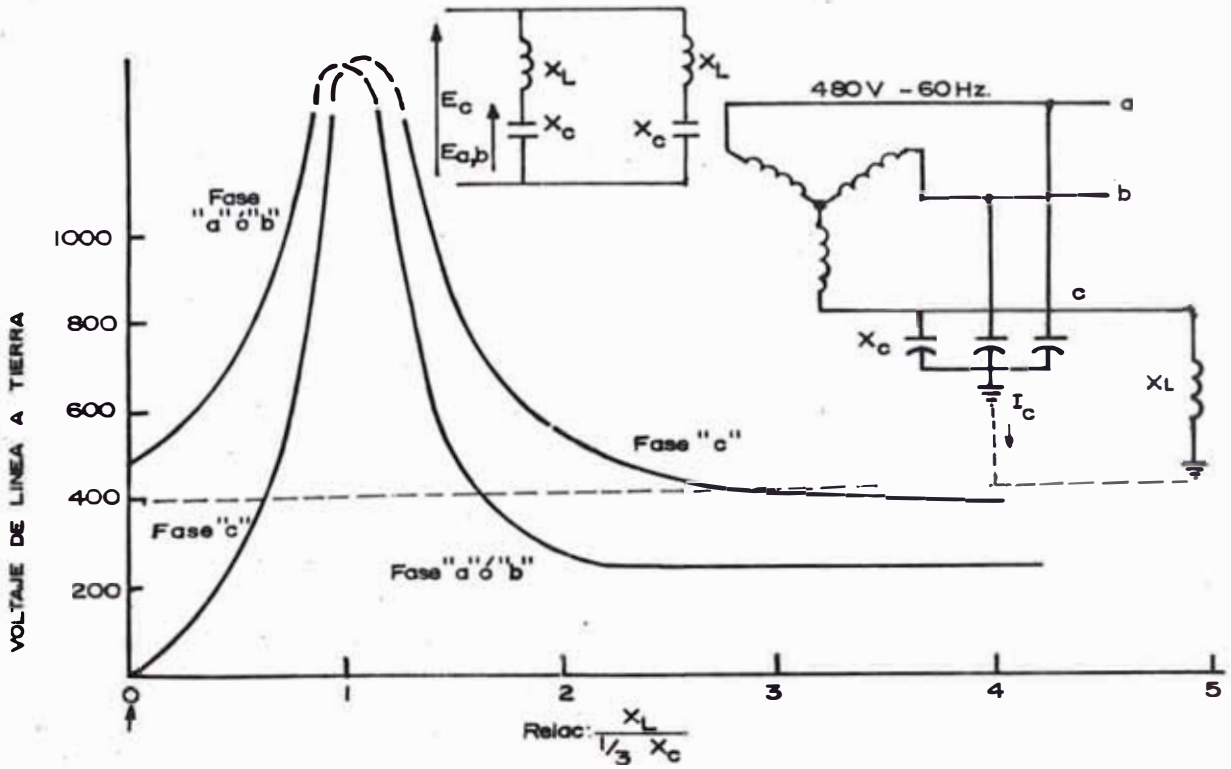
Donde X_L = Reactancia inductiva total del circuito
(Transformadores, líneas, etc.)

R = Resistencia total del circuito, incluyendo
la resistencia del arco.

De la figura 24 p.t., podemos afirmar lo siguiente :

La tensión en la fase "c" es baja debido a que la carga de la capacidad parásita de la fase fallada, se descarga a través de la resistencia R y además notamos que las tensiones en las fases "a" y "b", no son iguales, o sea no tiene el comportamiento del sistema oscilante anterior, cuando X_L predomina de R .

Podemos concluir que cuando una fase de un sistema sin puesta a tierra, se pone a tierra, las otras dos fases están por encima de la tensión de fase. Cuando se elimina la falla a tierra o se interrumpe el arco en corriente cero, la capacitancia del sistema retiene una carga y mantiene una tensión a tierra, como tensión de compensación (o de equilibrio) de corriente continua. Si la fase es vuelta a poner a tierra o vuelve a saltar el arco, puede sumarse una tensión de equilibrio adicional dependiendo de la tensión del sistema y del punto de la onda de tensión de corriente alternada en la que



$$I_c = \frac{e_{LN}}{\frac{1}{3} X_c} \rightarrow X_c = \frac{3 \times e_{LN}}{I_c} \text{ Típicamente } I_c = 1 \text{ Ampere, } X_c = \frac{3 \times 277}{1} = 830 \text{ ohm a } 60 \text{ Hz.}$$

Fig. 23 pt.- EFECTO DEL VALOR $\frac{X_L}{\frac{1}{3} X_c}$ EN LAS SOBRETENSIONES, AL OCURRIR UNA FALLA $\text{I}\emptyset$ A TIERRA.

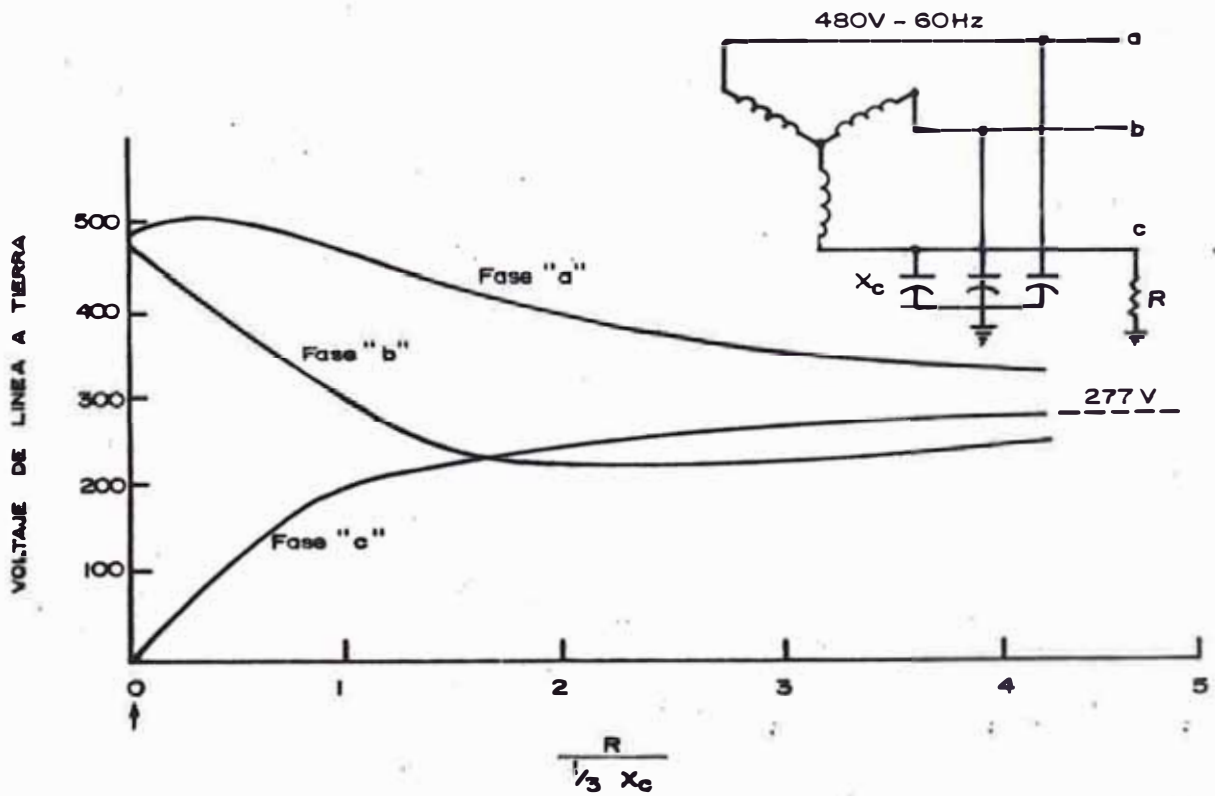


Fig. 24 pt.- EFECTO DE LA RELACION $\frac{R}{\frac{1}{3} X_c}$ EN LOS VOLTAJES DE LAS FASES SANAS AL OCURRIR UNA FALLA $\text{I}\emptyset$ A TIERRA.

se produce la nueva puesta a tierra. Si la falla es intermitente o si se trata de una falla de descarga intermitente, la tensión puede seguir aumentando hasta que falle alguna aislación.

Esta tensión a tierra puede alcanzar fácilmente de seis a ocho veces el valor de la tensión de fase. Observese que la sobre tensión es a tierra y que las tensiones fase a fase no son afectadas.

Esta elevada tensión a tierra incide sobre los conductores de fase en todo el sistema hasta que finalmente la aislación, en algún punto debil falla, por decir un empalme en el devanado de un motor eléctrico; fallas múltiples en lugares bien separados de un sistema, frecuentemente pueden producirse casi al mismo tiempo. Esto explica las misteriosas fallas múltiples de motores eléctricos, en las cuales varios o muchos motores de una planta fallan en un corto lapso a pesar de estar en diferentes sistemas y bastante distanciados. Esto no es teoría, ya que sucede frecuentemente.

3.3 CALCULO Y MEDIDA DE LA CORRIENTE DE FUGA

En las figuras 20 p.t., y 21 p.t. se muestran sistemas en estrella y delta sin puesta a tierra, en ellos ocurre una falla de una fase a tierra, y fluye una corriente debido a

que hay un circuito de capacitancias parásitas en estrella, éstas capacitancias a tierra son de los cables, devanados de motores y otros componentes. Cuando algún conductor pasa cerca de un metal puesto a tierra se produce una capacitancia entre ellos, que se incrementa a medida que disminuye la distancia entre ambos.

En sistemas de baja tensión, las dos fuentes principales a tierra son conductores que pasan dentro de conductos de aislación y devanados de motores, en ambos casos los conductores están muy cerca del metal conectado a tierra.

Otra fuente importante en sistemas de media tensión lo constituyen los capacitores de protección contra transitorios - que están deliberadamente conectados desde fase a tierra; Capacitores de reducción del factor de potencia son conectados fase a fase, y no a tierra; y no aumentan apreciablemente la capacidad a tierra.

La capacitancia a tierra es conocida como la capacitancia de fuga y la corriente que fluye a través de esta es la denominada corriente de fuga o corriente de carga del sistema. La capacitancia del sistema se distribuye por todo el sistema, pero se comporta eléctricamente como si se tratara de una sola capacitancia unitaria.

La corriente de carga o de fuga de sistemas típicos sin -

puesta a tierra es pequeña, puede ser calculada en base a los datos sobre cables, motores, etc., para el diseño de nuevos sistemas. En la realidad puede ser medida para sistemas existentes (veáse figura 25 pt.) en la práctica - podemos aproximar esta corriente de la siguiente manera

a) En Baja tensión

$$I_g = \frac{1 \text{ Amp.}}{2000 \text{ KVA}} \text{ o } \frac{1 \text{ Amp.}}{2500 \text{ KVA}}$$

donde

KVA = potencia de la sub-estación

En general la corriente de fuga no excede de 2 Amperios.

b) En media tensión :

$$I_g = \frac{1 \text{ Amp.}}{1000 \text{ KVA}}$$

- Con más detalle podemos ver estas aproximaciones en el cuadro 3 p.t.

3.4. CREACION DEL NEUTRO ARTIFICIAL

En sistemas industriales con neutro aislado o sin neutro físico presentan valores bajos de corriente ante fallas monofásicas a tierra, requiriendo de un sistema especial de protección para detectar este tipo de falla. Los dispositivos de protección instalados en el sistema en estudio no

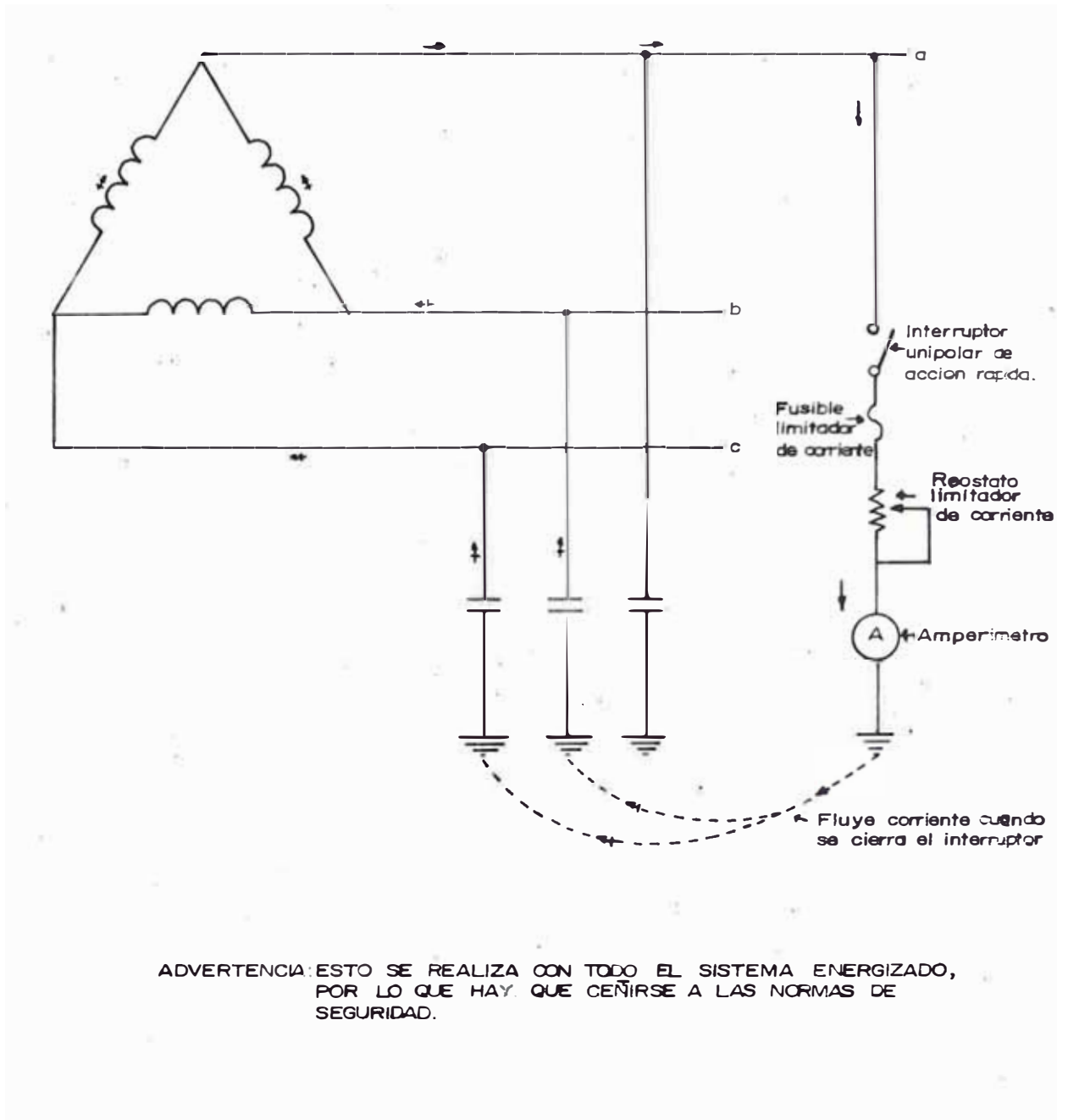


Fig. 25 pt.- MEDICION DE LA CORRIENTE DE CARGA O DE FUGA.

CUADRO 3pt.- CORRIENTE DE CARGA DE LOS DIFERENTES SISTEMAS

TENSION	EQUIPO	CORRIENTE DE CARGA (Amperes)
480 Volts	Capacitores c transitorio (poco usados)	0.33 por juego
	Cable 3 c en conducto. 350 a 500 MCM.	0.10 por 1000 ft.
	Cable 3 c en conducto. 2 O y 3 O.	0.05 por 1000ft.
	Cable 3 c en bandeja. 2 O y 3 O.	0.02 por 1000 ft.
	Cable 3 c N o con tierra en agua.	0.05 por 1000ft.
	Motores	0.01 por 1000hp
2.4 KV	Capacitores c transitorio	0.75 por juego
	Cable 3 c sin blindaje en conducto (est.)	0.05 por 1000 ft.
	Motores (est.)	0.03 por 1000hp.
	Motores mas cables (probado)	0.06 por 1000 hp.
4.16 KV	Capacitores c transitorios	1.30 por juego
	Cable blindado 3 c N21 a 350 MCM.	0.23 por 1000 ft.
	Cable no blindado 3 c en conducto.	0.10 por 1000 ft.
	Motores (est.)	0.05 por 1000 hp.
13.8 KV	Capacitores c transitorios	2.25 por juego
	Cable blindado 3 c. 1000 MCM	1.15 por 1000ft.
	Cable blindado 3 c. 750 MCM	0.93 por 1000 ft
	Cable blindado 3 c. 350 MCM	0.71 por 1000ft.
	Cable blindado 3 c. 4 O	0.65 por 1000ft.
	Cable blindado 3c. 2 O	0.55 por 1000ft.
	Motores	0.15 por 1000hp.
Nota: La corriente de carga de transformador es infima.		

operan bajo este tipo de falla, por ser la corriente pequeña, ya que esta sólo circula por las capacidades parásitas del sistema y no cierra el circuito a través del transformador de distribución, entonces es por eso de crear un neutro artificial para poder amplificar la corriente de falla y hacer funcionar la protección.

En un sistema de triángulo sin puesta a tierra, se evitan las sobretensiones exactamente de la misma manera, mediante la puesta a tierra del neutro con un sistema de alta resistencia. La diferencia radica en que en un sistema de triángulo el punto neutro no existe y debe ser creado. El punto neutro de un sistema sin puesta a tierra es definido como el punto creado en el empalme de tres resistencias no reactivas iguales, una conectada en cada fase (véase figura 26 p.t.a.). La desventaja de este método es que las tres resistencias consumen energía continuamente, incluso bajo operación normal no conectado a tierra.

Un mejor método es usar un transformador de puesta a tierra en conexión Zig-Zag sin secundario, en otras palabras un reactor trifásico, o usar transformadores de distribución en conexión estrella-delta, y es más, ambos ofrecen buena selectividad en los sistemas de protección.

3.5 TRANSFORMADORES DE PUESTA A TIERRA EN CONEXION ZIG-ZAG.

Son aquellos transformadores utilizados para detectar la corriente de fuga en sistemas sin neutro puesto a tierra, para luego amplificar esta corriente y convertirla en señal detectable.

Este tipo transformador o reactor trifásico tiene dos bobinas por columna en sentidos contrarios o devanadas opuestamente. (ver Fig.26 p.t.b.c.) donde veremos el sentido del flujo para condiciones de falla, y en condiciones normales.

3.5.1 Características del Transformador de Puesta a Tierra en Conexión Zig-Zag

- 1.- Ofrece baja impedancia al paso de la corriente de falla, y alta impedancia en condiciones normales, en otras palabras tiene una impedancia muy alta entre fase y fase, y una impedancia muy baja entre cada fase y neutro.
- 2.- Su corriente magnetizante en condiciones normales es muy pequeña comparándola con la corriente de falla a tierra.
- 3.- No consume energía en estado normal.
- 4.- Su tamaño es bien reducido por consiguiente, ocuparía poco espacio.

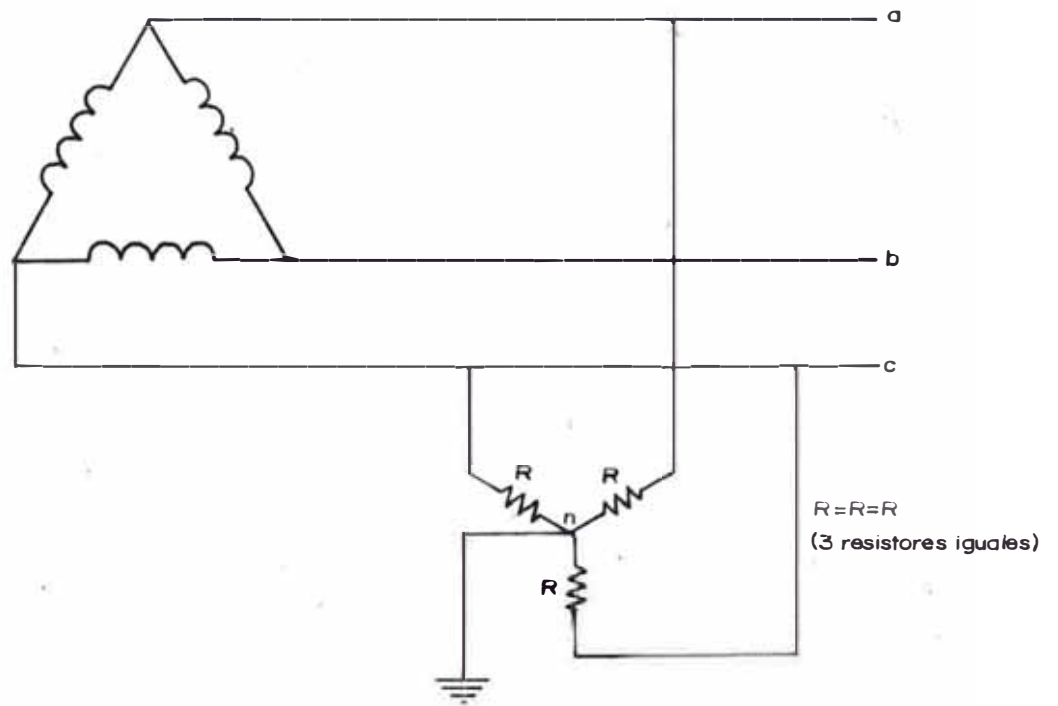


Fig.26 pt.a.- CREACION DEL PUNTO NEUTRO CON RESISTORES .

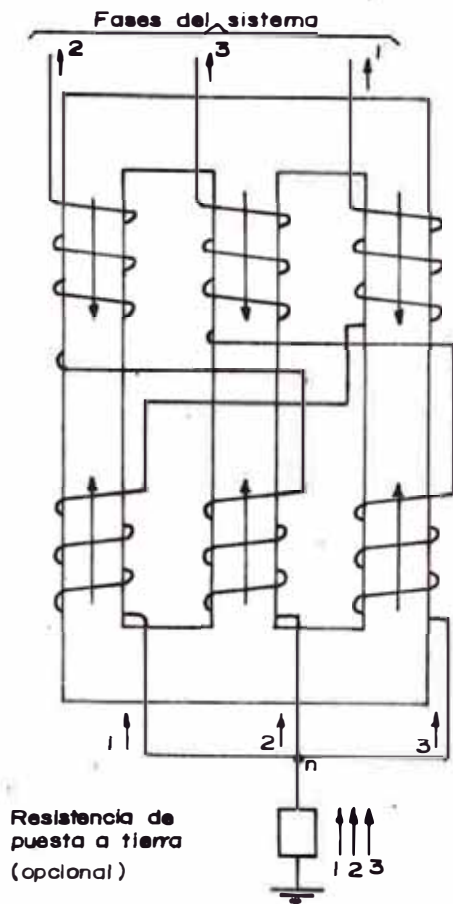


Fig.26 pt.b.- CREACION DEL PUNTO NEUTRO A TRAVES DE UNA TRANSFORMADOR EN CONEXION ZIG-ZAG (condicion de falla).

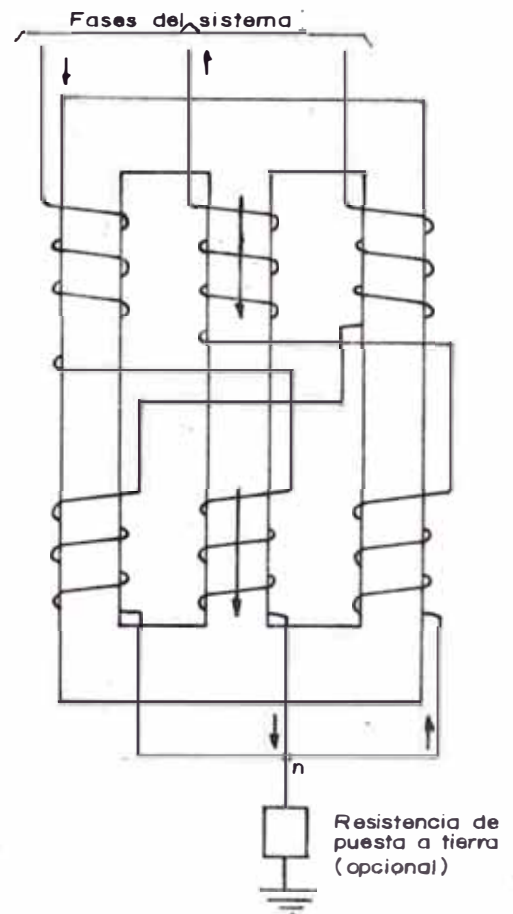


Fig.26 pt.c.- CREACION DEL PUNTO NEUTRO A TRAVES DE UN TRANSFORMADOR EN CONEXION ZIG-ZAG (condiciones normales)

5.- Su costo es relativamente bajo porque su diseño es parecido al de un simple reactor trifásico.

3.5.2 Funcionamiento del Transformador de Puesta a Tierra en Conexión Zig-Zag

El neutro del transformador en Zig-Zag se transformará en el neutro del sistema triángulo, y es puesto a tierra a través de la resistencia para evitar sobretensiones en las fases sanas, y la corriente fluye a través de la baja impedancia de las otras dos fases al neutro del transformador, luego a través de la resistencia de puesta a tierra (que es opcional si el sistema no está cargado) se cierra el circuito en el punto de falla (véase figura 27 p.t.a.b.c.), donde veremos que la corriente de falla ya circulará por los devanados de los transformadores, interruptores y es además detectable por los relés de protección del sistema.

Este tipo de protección contra puestas a tierra son bien usadas en redes antiguas; donde no se hizo un buen diseño de puestas a tierra ya sea para baja tensión y media tensión.

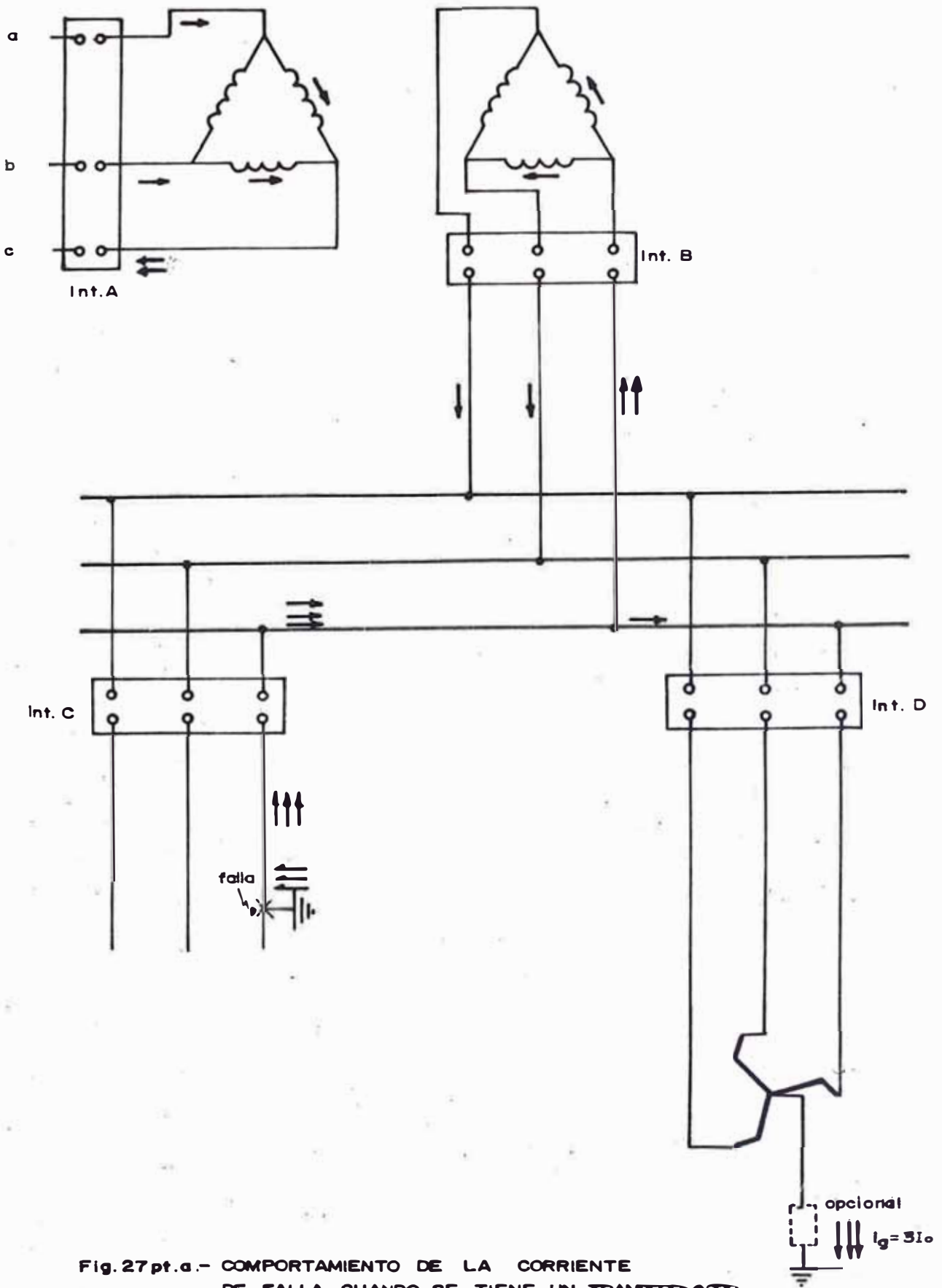


Fig. 27 pt. a.- COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE DE FALLA, CUANDO SE TIENE UN TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA EN CONEXION ZIG-ZAG

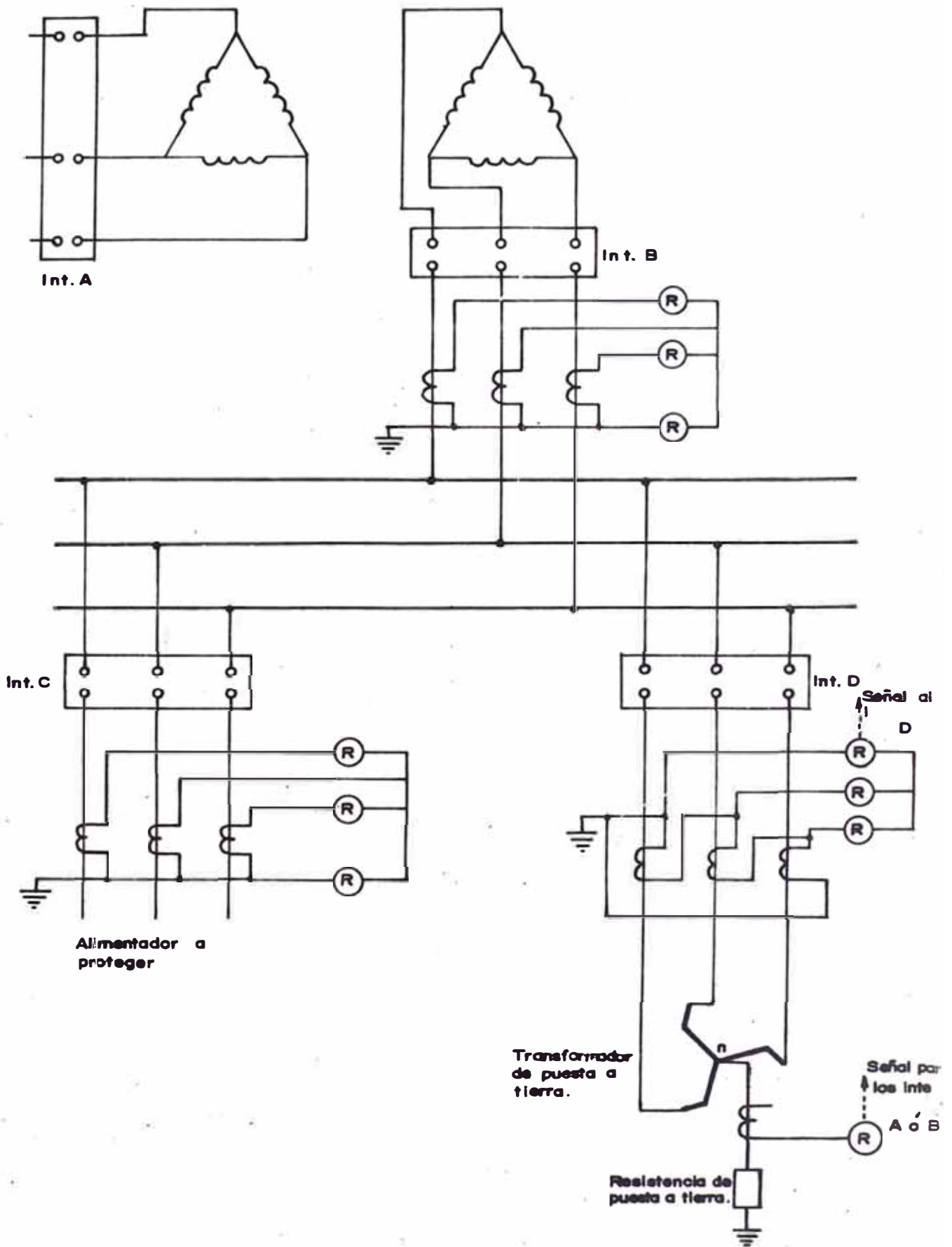


Fig.27 pt.b.- CONEXIONADO TÍPICO DEL TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA, EN SISTEMAS DE MEDIA TENSION.

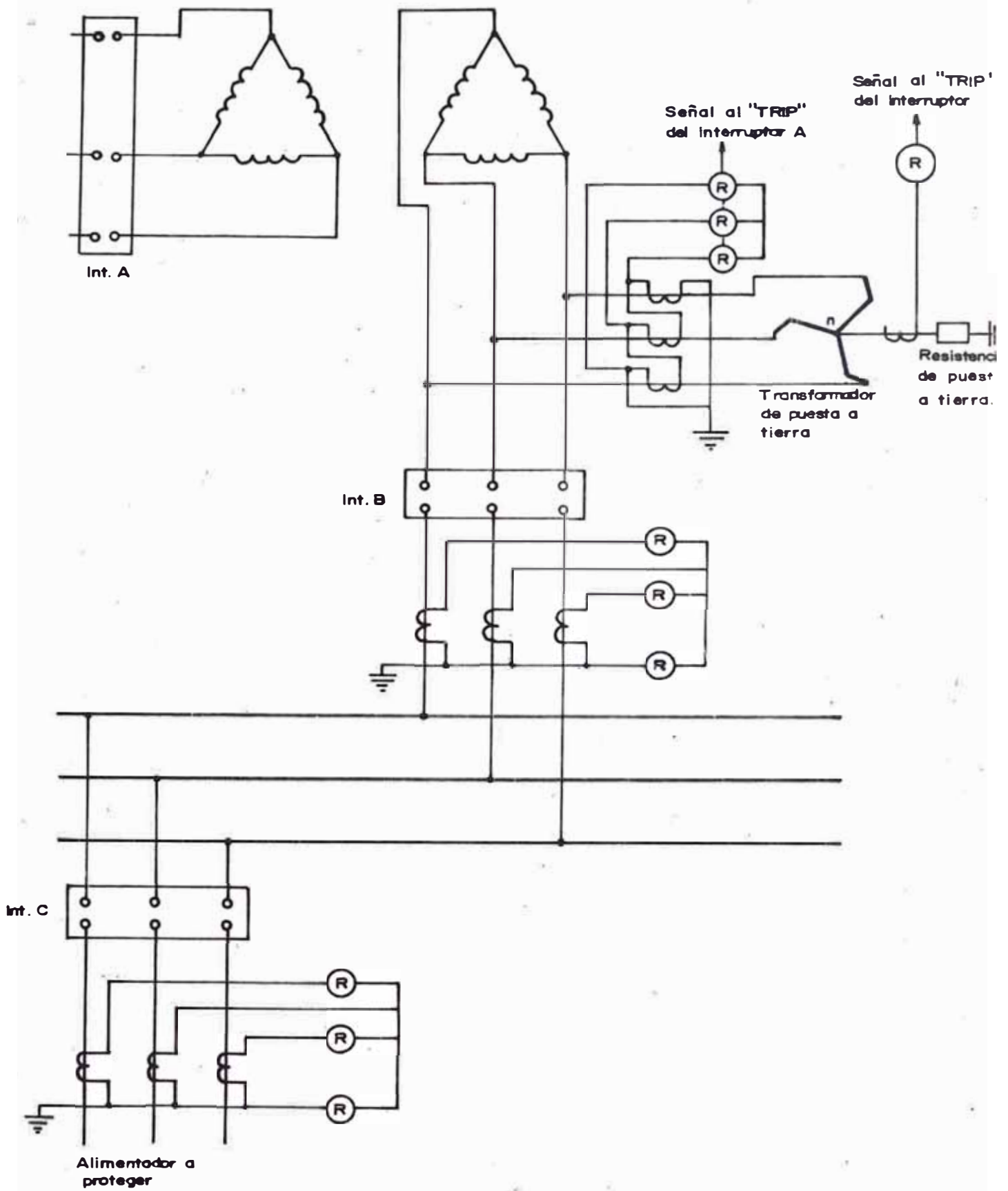


Fig. 27 pt.b'.- ALTERNATIVA CON RESPECTO A LA FIGURA 27 pt.b

SISTEMA EXISTENTE EN CONEXION DEL T_g (transformadores o generadores)

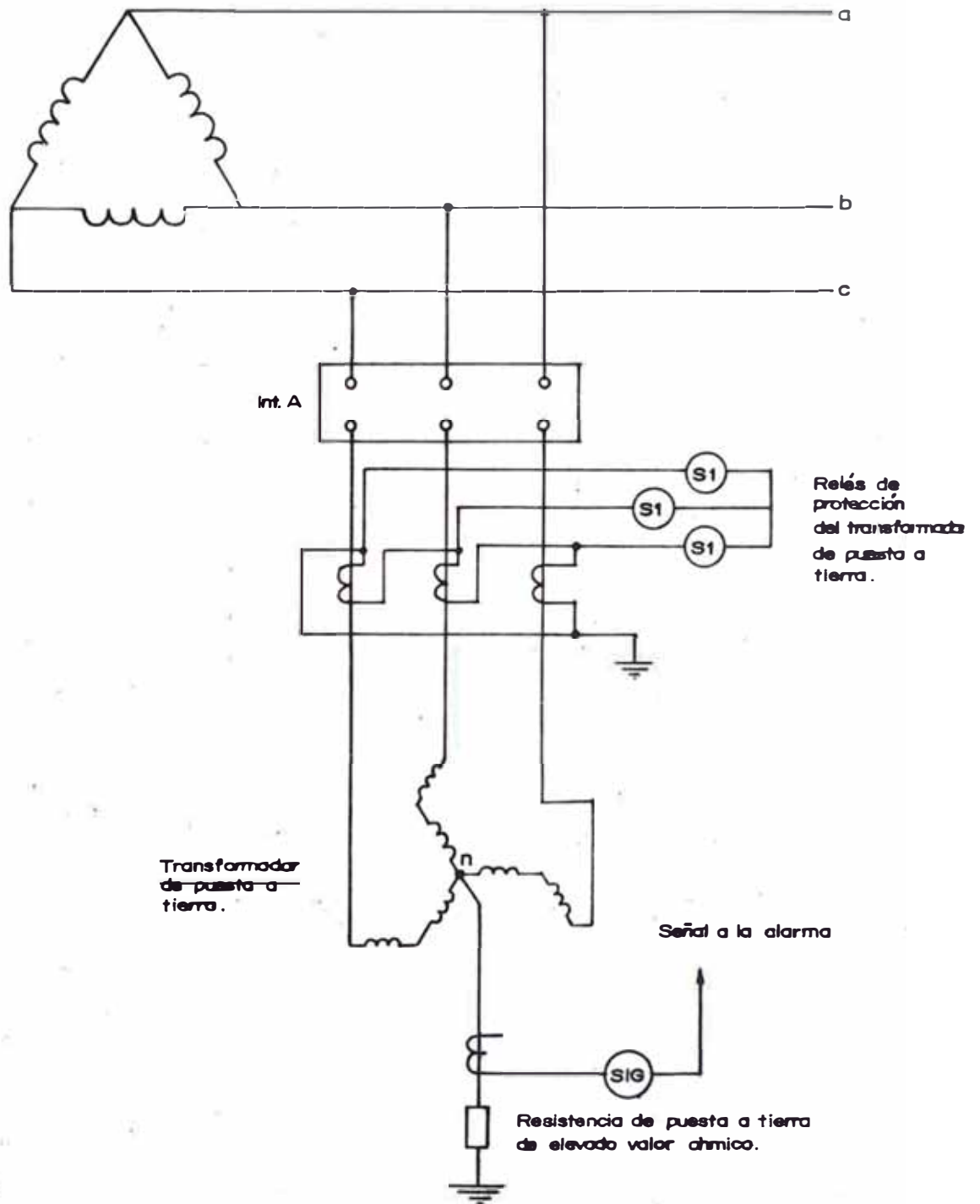


Fig.27 pt.c.- PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO DEL TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA A TRAVES DE UNA RESISTENCIA DE ELEVADO VALOR OHMICO.

3.5.3 Elección del Transformador Puesta a Tierra en Conexión

Zig-Zag

.- Cálculo de la Potencia

El dimensionamiento de la potencia del transformador en Zig-Zag se halla multiplicando la tensión de línea a neutro (E_n) por la tercera parte de la corriente de fuga (I_g), o sea:

$$P = \frac{E}{\sqrt{3}} \times \frac{I_g}{3}$$

$$I_g = 3 I_0$$

E = Tensión de línea en KV

P = Potencia en KVA

I_0 = Corriente homopolar en Amp.

.- Cálculo de la Reactancia de los Transformadores de Puesta a Tierra.

El valor de la reactancia del transformador de puesta a tierra dependerá del valor deseado de reactancia de secuencia cero del circuito en el cual está incluido. Y además depende de la potencia de corto circuito simétrico del sistema.

La reactancia se elige teniendo en cuenta el fenómeno de sobretensión, o sea debemos tener presente las siguientes relaciones

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 10$$

Relación que nos dá el margen de sobre tensiones en las fases sanas en sistemas con neutro aislado, por otro lado si en el sistema se tiene cargas de - al umbrado, se debe cumplir la relación siguiente:

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 3$$

Con seguridad si estas dos relaciones cumplen y en especial la última, estaremos, afirmando que - no habrá sobretensiones excesivas.

Por otro lado, el cálculo de la reactancia del transformador (X_R) será:

$$X_R = \frac{(X_0/X_1) K_V^2 1000}{KVA}$$

Donde:

KVA = Potencia de corto circuito simétrico del sistema.

X_1, X_0 = Reactancias de secuencias en ohm/fase.

Finalmente una vez elegida la reactancia del transformador de puesta a tierra, podemos asegurar que sus devanados soportarán la corriente de falla du

rante un tiempo que va desde los diez segundos hasta el minuto, tiempo suficiente para que operen los equipos de protección. (véase figura 28 p.t. y el cuadro 4 p.t.).

3.6 TRANSFORMADORES DE PUESTA A TIERRA EN CONEXION ESTRELLA-DELTA Y ESTRELLA-DELTA ABIERTO

La puesta a tierra también puede ser lograda utilizando transformadores trifásicos, o tres transformadores monofásicos en estrella-triángulo. A veces se prefiere este método para sistemas de media tensión, no obstante, en este caso los transformadores deben ser dimensionados para la tensión de línea a línea, multiplicada por la corriente de puesta a tierra, y esto significa que para un sistema dado, el transformador en estrella-triángulo o estrella-delta abierto es 1.73 veces más grande que el transformador de puesta a tierra en conexión Zig-Zag en cuanto a régimen nominal en KVA; también tienen pérdida de corriente magnetizante algo más altas. Una vez que se ha derivado el neutro por cualquiera de los métodos mencionados, el mismo es puesto a tierra a través de una resistencia. (véase figura 29 p.t.).

La finalidad de esta resistencia es limitar los transitorios debido a sobretensiones; o sea purgando la carga de las capacitancias parásitas a tierra.

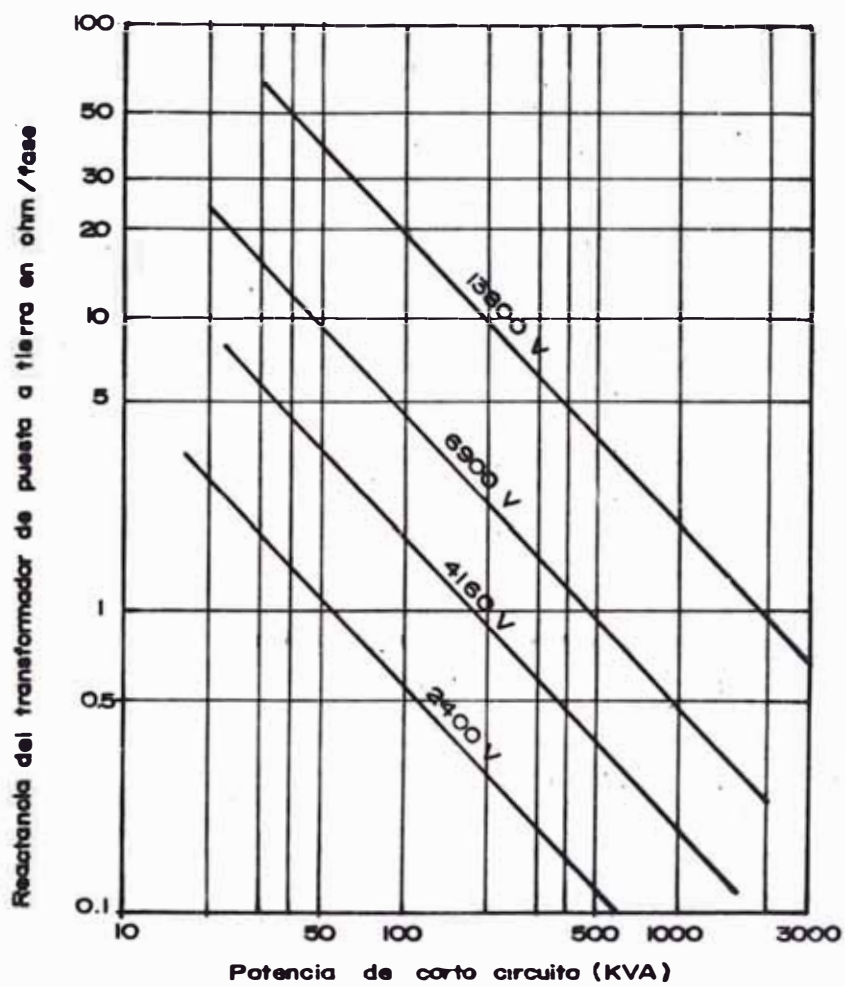


Fig.28pt.- VARIACION DE LA REACTANCIA DEL T.P.A. EN FUNCION A LA POTENCIA DE CORTO CIRCUITO.

Nota: T.P.A. = TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA.

CUADROS 4pt.

EQUIPO	CORRIENTE	VOLTAJE	REACTANCIA	TIEMPO
RESISTENCIA	INICIAL	LINEA-NEUTRO	—	10 SEG.
REACTOR	SIMETRICA (13φ)	LINEA-NEUTRO	Ohm.	10 SEG.
TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA.	SIMETRICA (13φ)	LINEA A LINEA	Ohm/fase	10 SEG.

TIPO DE PUESTA A TIERRA	Para limitar los transitorios debido a las sobretensiones		Para limitar los transitorios en sistemas de 4 hilos
	x_0 / x_1	R_1 / x_0	x_0 / x_1
PUESTA A TIERRA CON REACTANCIAS	10 Ó MENOS	—	3 Ó MENOS
PUESTA A TIERRA SOLIDA.	10 Ó MENOS	—	3 Ó MENOS
PUESTA A TIERRA A TRAVES DE RESISTENCIAS.	NO ESTA ESTABLECIDO	2 Ó MAS	NO ES POSIBLE

Los transformadores de puesta a tierra en conexión estrella-delta abierto son los más usados para la detección de la pu esta a tierra en sistemas aislados. Aquí un relé vigila la tensión homopolar de la red; cuando ésta alcanza un valor excedido inadmisiblemente, este relé provoca una señalización, (véase la figura 29 p.t.b.) que consiste en una sirena o por lámpara de señalización por fase.

El transformador de puesta a tierra en conexión estrella-delta abierto, ha de permitir el libre retorno de los campos magnéticos de las tres fases; este es el caso con tres transformadores monofásicos de tensión o un transformador 3ϕ de cinco columnas. El acoplamiento clásico en delta-abierto de dos transformadores de tensión no resulta apropiado. Generalmente además de su arrollamiento normal de medida en estrella, los transformadores llevan un arrollamiento terciario como arrollamiento en estrella, la medida de la tensión homopolar se realizará para defectos a tierra.

La resistencia de protección en paralelo con el relé (véase la figura 29 p.t.b.) sirve para el amortiguamiento de los fenómenos de resonancia de las capacidades de los cables con las inductancias de los transformadores de tensión y pu pueden ocasionar sobretensiones peligrosas en los primarios de estos transformadores. Para que su influencia sea ópti-

ma, la resistencia debe tener un valor ohmico tan débil como sea posible; el límite está determinado por la carga térmica en permanencia para los transformadores de tensión; y por la cantidad de calor liberado por la resistencia; no pudiendo elevarse la temperatura ambiente por encima de un valor soportable por la instalación.

A continuación daremos una explicación analítica del cálculo de la resistencia R y del transformador de puesta a tierra en conexión delta-abierto (véase figura 29 pt.b.c.).

$$R_1 = \frac{E_1}{\sqrt{3} I_g} \quad (\text{Resistencia equivalente vista del primario})$$

$$R_2 = R_1 \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \quad (\text{Resistencia equivalente vista del secundario})$$

$$E_o = \frac{E_1}{\sqrt{3}} \left(\frac{E_2}{E_1} \right)$$

$$I_o = \frac{I_g}{3} \left(\frac{E_1}{E_2} \right)$$

$$\text{o sea : } R = \frac{3 E_o}{I_o} \quad \text{ó, } R = 3R_2 \quad (\text{Resistencia de puesta a tierra})$$

$$E_3 = RI_o \quad (\text{caída de tensión en la resistencia "R" en estado de falla})$$

La potencia del transformador será :

$$P = \frac{E_1 \times I_g}{3 \times 1000} \text{ KVA}$$

De donde:

$$E_1 = \text{Voltaje de línea en el primario}$$

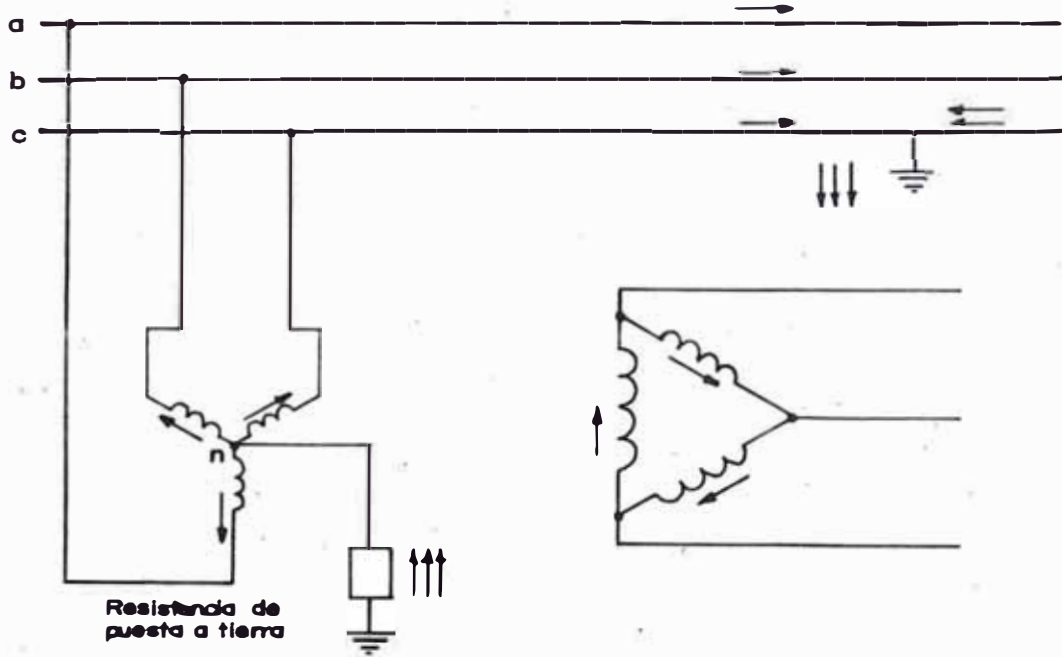


Fig. 29 pt. a.- COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE DE FALLA, CUANDO SE TIENE UN TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA EN CONEXION ESTRELLA-DELTA

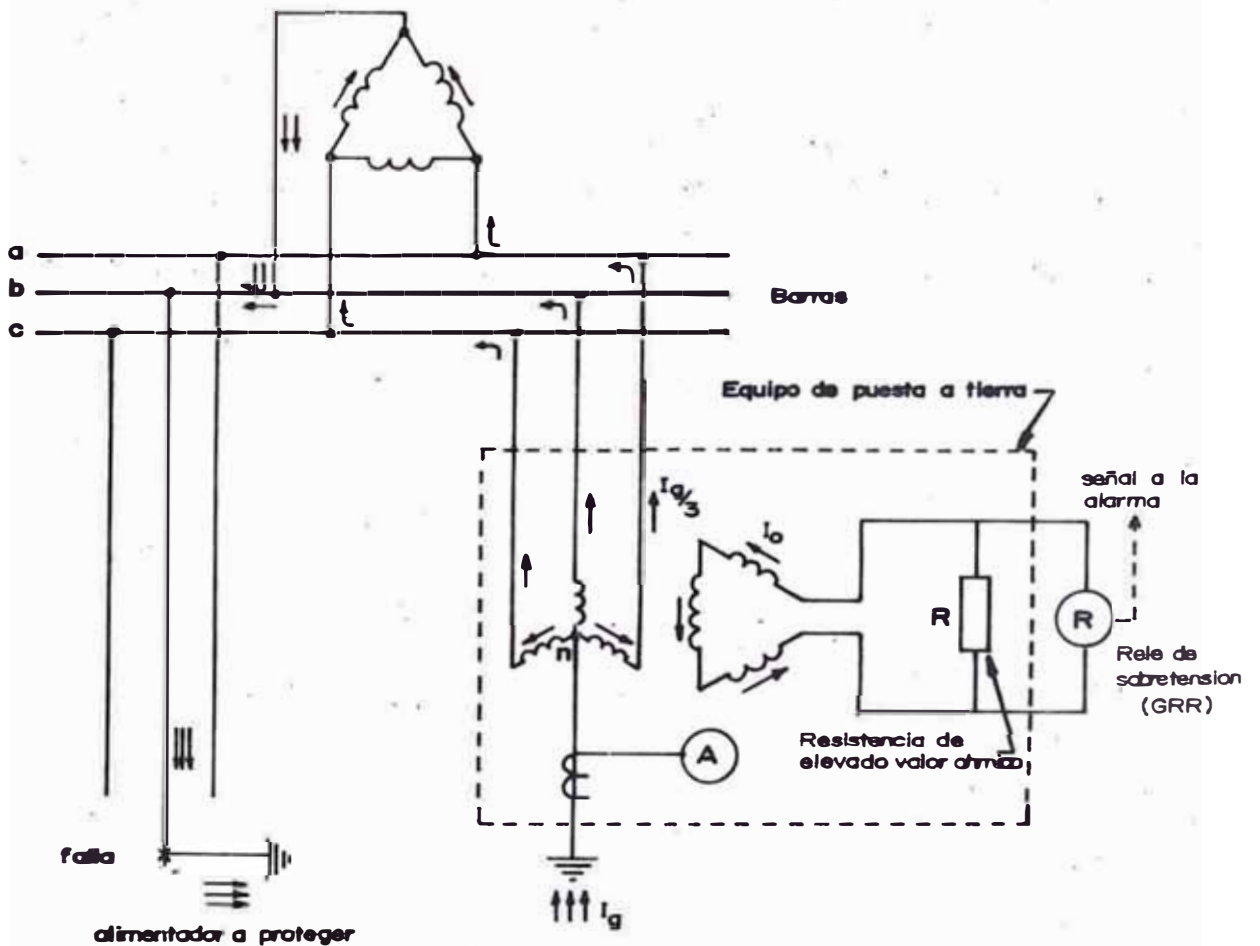
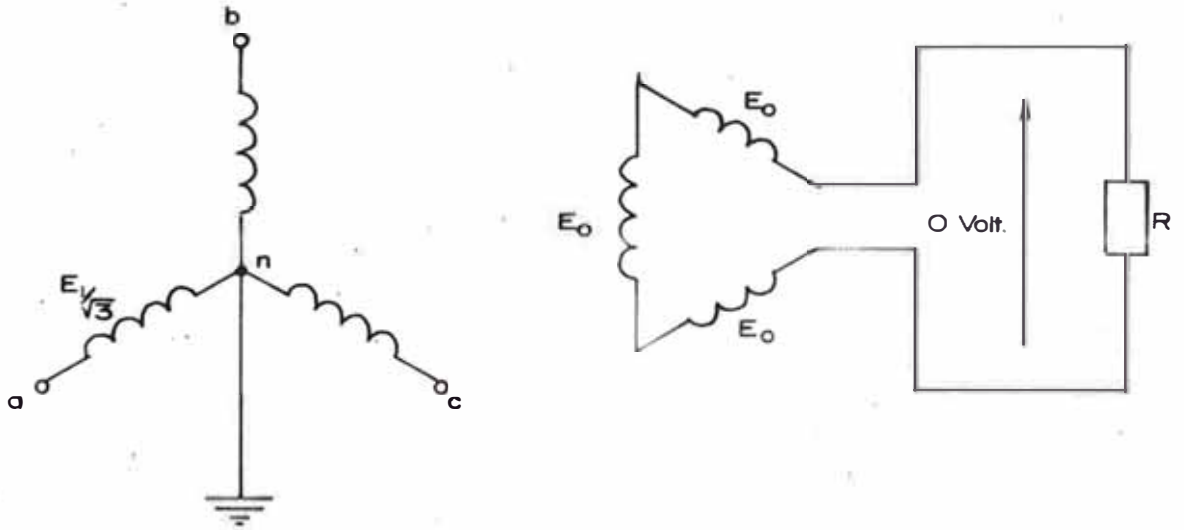


Fig. 29 pt. b.- COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE DE FALLA CUANDO SE TIENE UN TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA EN CONEXION ESTRELLA-DELTA ABIERTO.

EN ESTADO NORMAL



EN ESTADO DE FALLA

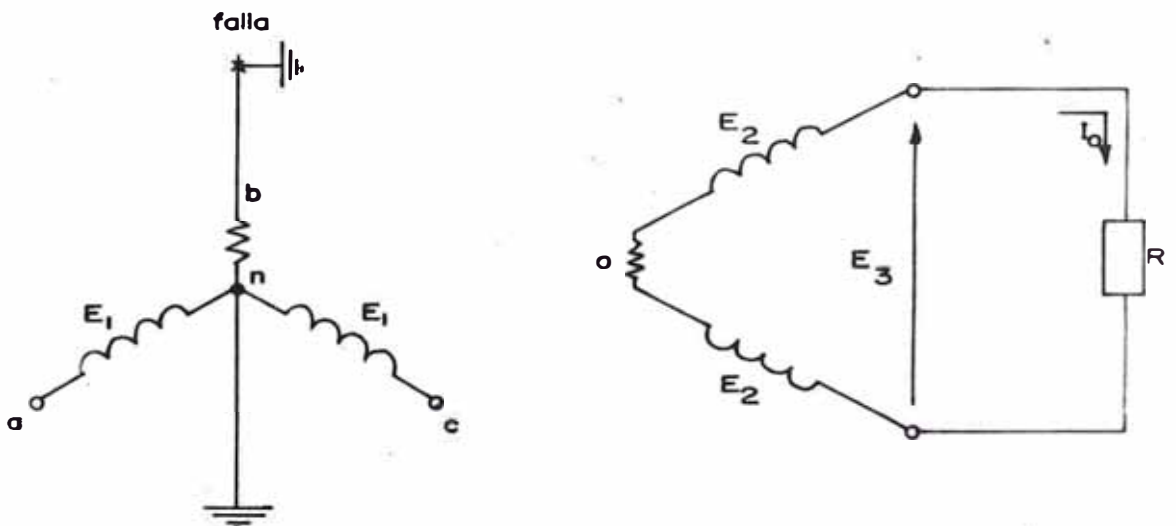


Fig. 29 pt. c.- COMPORTAMIENTO DE LAS TENSIONES EN EL TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA EN CONEXION ESTRELLA-DELTA ABIERTO.

E_2 = Voltaje en el secundario en vacio.

E_0 = Voltaje de cada fase en el secundario en estado normal.

I_g = Corriente de fuga

I_0 = Corriente en el secundario en condiciones de falla.

Estos transformadores se diseñan para una tensión de 120 voltios en el secundario, y la potencia varia entre 1 a 10 KVA, por otro lado la resistencia de puesta a tierra varia entre 1 a 4 ohmios, todos estos datos son para sistemas de protección en media tensión.

Finalmente la red de secuencia cero para este sistema es análogo al de la figura 14 p.t.b.

3.7 DETECCION DE LAS PUESTAS A TIERRA EN SISTEMAS CON NEUTRO AISLADO POR COMPARACION DE LA TENSION Y CORRIENTE HOMOPOLAR

De los métodos vistos anteriormente para detectar la corriente de fuga en sistemas con neutro aislado, este es el método más usado en baja y media tensión, debido que con este método las reactancias del sistema no se incrementan como sucede al usar transformadores de puesta a tierra, obligando estos a disminuir la corriente de fuga, y no permitiendo exactamente su medida, y además el sistema está obligado a tener relés supersensibles.

3.7.1 Descripción de la Detección

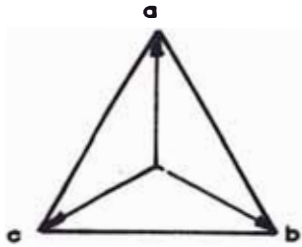
Por principio al ocurrir la falla de una fase a tierra - los voltajes de las fases sanas respecto de tierra se elevan de un valor igual a la tensión de fase a la de línea. Esto origina la aparición de una tensión residual E_0 , la cual será igual a la suma de las tensiones de las fases sanas respecto de tierra, en el caso que falle la fase "a".

En condiciones normales por las capacitancias fase-tierra del sistema a proteger, circularán corriente de carga del tipo capacitivo entre cada fase y tierra - (I_a, I_b, I_c). En caso de falla en la fase "a" aparecerá una corriente de falla I_g entre dicha fase y tierra, - la cual retornará a través de las capacitancias de las fases sanas y tierra del sistema fallado (I_{a0}, I_{c0}). véase figura 30 p.t.a. Además la corriente residual es tá dada por la suma fasorial de I_g, I_{a0}, I_{c0} y también debe tenerse en cuenta que el valor de la tensión residual bajo la ocurrencia de una falla monofásica franca a tierra será igual a tres veces la tensión de fase a tierra (véase figura 30 p.t.b.) antes de la falla o $\sqrt{3}$ veces la tensión de línea. Este será el máximo valor que podrá tener la tensión residual, ya que el ca-

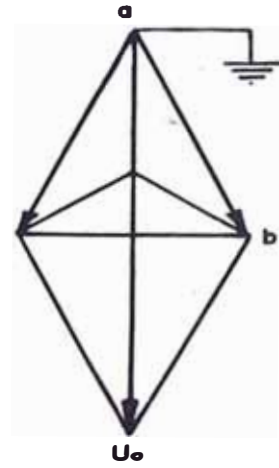
so de que la falla sea mediante una resistencia de -
 falla su valor disminuye. Es por esta razón es aconsejable cuando se empleen tres transformadores monofásicos para obtener la tensión residual, que los mismos tengan la relación de transformación siguiente:

$$\frac{E_n}{\sqrt{3}} / \frac{E_o}{3}$$

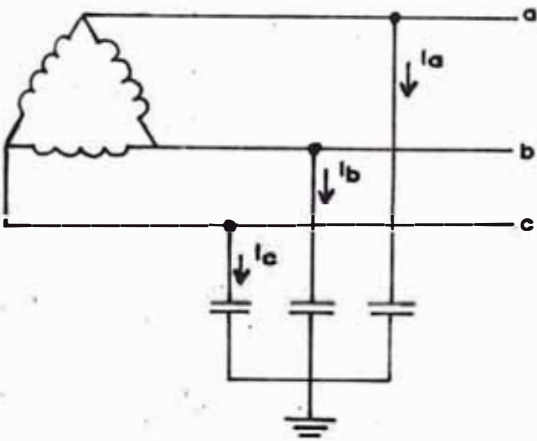
Donde E_n es la tensión del primario de los transformadores de tensión y E_o es la tensión residual. Cuando se produce una falla monofásica franca a tierra normalmente en el secundario aparecerá una tensión residual de 110V para sistemas de media tensión (2.3 a 10KV). En la figura 30p.t.c. se muestra el esquema de conexión de los transformadores de medida para la alimentación del relé. Este relé es sensible al desfase de la tensión y corriente homopolar, y además tiene un torque máximo cuando la tensión residual llega hasta E_o , y el desfase en ese instante es de 45° , ya veremos en la sección 5 con más detalle esta explicación.



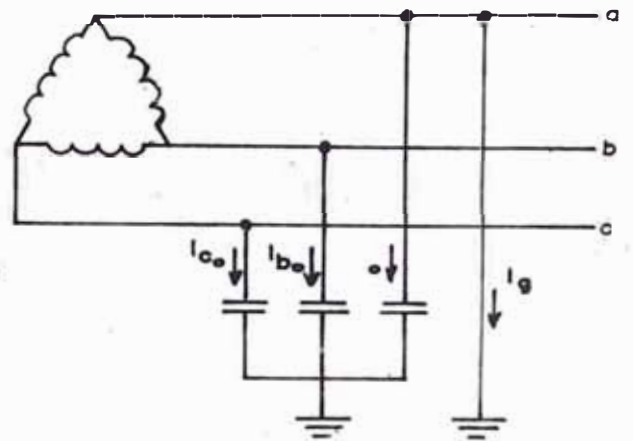
En servicio normal



Falla a tierra de la fase "a"



En servicio normal



Falla a tierra de la fase "a"

Fig. 30 pt. a.- CARACTERISTICAS DE UNA FALLA MONOFASICA A TIERRA EN UN SISTEMA CON NEUTRO AISLADO O SIN NEUTRO FISICO.

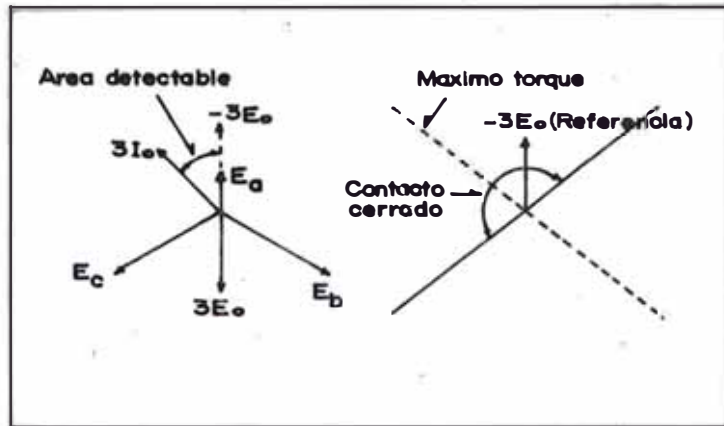


Fig. 30 pt.b.- DIAGRAMA FASORIAL DE LAS TENSIONES DE FASE Y DE SECUENCIA CERO.

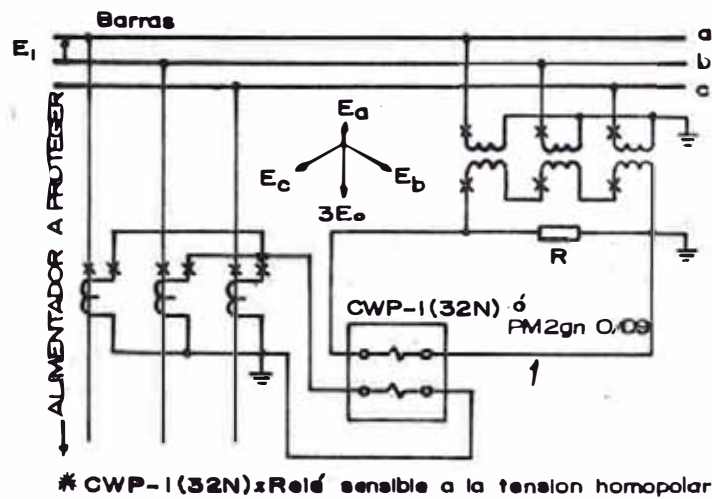


Fig. 30 pt.c.- DETECCIÓN DE LAS PUESTAS A TIERRA EN SISTEMAS CON NEUTRO AISLADO POR COMPARACION DE LA TENSION Y CORRIENTE HOMOPOLAR.

RESUMEN GENERICO DE LAS 3 PRIMERAS SECCIONES

En las hojas siguientes se muestran tablas resumidas de todos los métodos de puesta a tierra estudiadas, y además hechos característicos de cada método, que pueden determinar la elección o descarte de su uso para determinado sistema.

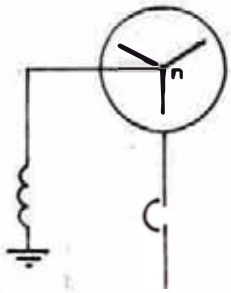
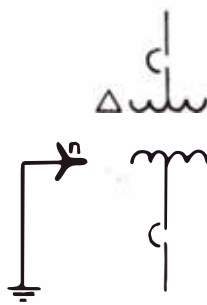
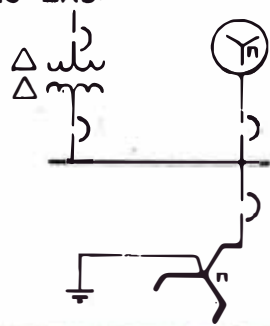
Estas tablas han sido elaboradas bajo la información de entidades expertas en la materia a nivel industrial. (véase tablas 1 p.t., 2 p.t.).

TABLA 1 pt.- SISTEMAS CARACTERISTICOS DE LOS DIFERENTES METODOS DE PUESTAS A TIERRA (COMPARACION CUALITATIVA)

	NEUTRO AISLADO	PUESTA A TIERRA FRANCA	PUESTA A TIERRA CON REACTANCIAS		PUESTA A TIERRA POR COMPENSACION	PUESTA A TIERRA CON RESISTENCIAS	
			BAJO VALOR	ELEVADO VALOR		BAJO VALOR	ELEVADO VALOR
CORRIENTE 10 A TIERRA COMO % DE UNA CORRIENTE DE FALLA 30	MENOS DEL 1%	PUEDE LLEGAR HASTA EL 100%	USUALMENTE VARIARIA DESDE 25% A 100%	5% o 25%	CERCANA A LA CORRIENTE DE SECUENCIA CERO	FOR ENCIMA DEL 20%	MEJOR QUE EL 1% PERO NO MENOR QUE LA CORRIENTE NOMINAL
TRANSITORIOS DEBIDO A SOBRETENSIONES	MUY ALTOS	NO ES TAN EXCESIVO	NO ES TAN EXCESIVO	MUY ALTO	NO ES TAN EXCESIVO	NO ES TAN EXCESIVO	NO ES TAN EXCESIVO
SELECTIVIDAD DE LOS SISTEMAS DE PROTECCION	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
PARA SISTEMAS DE HILOS (Iluminación)	DEPENDE SI EL SISTEMA CON NEUTRO AISLADO ESTA CARGADO Y AISLADO.	CUMPLE SI: $\frac{X_2}{X_1} \leq 3$ y $\frac{R_0}{X_1} \leq 1$	USADO CUANDO LA CORRIENTE DE FALLA LLEGA HASTA EL 60% O MAS.	DEPENDE SI EL SISTEMA SE COMPORTA COMO SI ESTUVIERA AISLADO.	DEPENDE SI EL SISTEMA SE COMPORTA COMO SI ESTUVIERA AISLADO.	DEPENDE SI EL SISTEMA SE COMPORTA COMO SI ESTUVIERA AISLADO.	DEPENDE SI EL SISTEMA SE COMPORTA COMO SI ESTUVIERA AISLADO.
RECOMENDACIONES	NO ES RECOMENDABLE DEBIDO A LAS ALTAS SOBRETENSIONES.	METODOS USADOS GENERALMENTE PARA SISTEMAS DE BAJA TENSION HASTA 600V Y EN MEDIA TENSION HASTA 15 KV.	NO ES USADO POR ORIGINAR ELEVADAS SOBRETENSIONES	NO ES USADO GENERALMENTE EN SISTEMAS INDUSTRIALES DE 2.4 a 15 KV.	SU COMPORTAMIENTO ES OPTIMO EN ALTA TENSION.	METODO USADO GENERALMENTE EN SISTEMAS INDUSTRIALES DE 2.4 a 15 KV.	USADO CUANDO LAS CARACTERISTICAS DE LOS METODOS DE PUESTA A TIERRA NO CUMPLEN PARA REALIZAR BUEN DISEÑO (Disminución de la corriente de falla)

TABLAS 2pt.- ELECCION DEL METODO DE PUESTA, A TIERRA TENIENDO EN CUENTA LA TENSION DE SERVICIO.

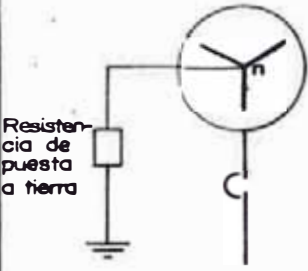
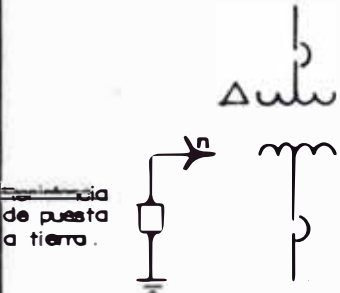
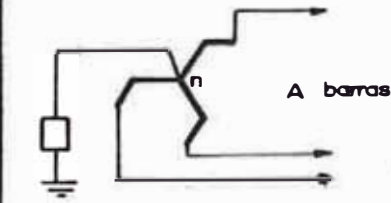
SISTEMAS DE BAJA TENSION HASTA 600V

	CONDICION	PUESTA A TIERRA	RECOMENDACIONES
A	SI EL GENERADOR ESTA CONECTADO EN ESTRELLA.	<p>EL GENERADOR SE PONE A TIERRA A TRAVES DE UNA REACTANCIA DE BAJO VALOR.</p> 	<p>1.- PARA QUE EL FUNCIONAMIENTO SEA OPTIMO SE DEBE TENER PRESENTE LA CAPACIDAD DE CORTOCIRCUITO DEL SISTEMA, PARA PODER ELEGIR LA CAPACIDAD DEL GENERADOR Y LA CORRIENTE DE FALLA.</p> <p>2.- CON ESTA PUESTA A TIERRA LA CORRIENTE DE FALLA LLEGA HASTA UN 25 % $I_{3\phi}$</p>
B	SI EL TRANSFORMADOR TIENE SU SECUNDARIO EN ESTRELLA.	<p>EL NEUTRO DEL TRANSFORMADOR DEBE SER PUESTO A TIERRA SOLIDAMENTE.</p> 	<p>1.- PARA QUE EL FUNCIONAMIENTO SEA OPTIMO SE DEBE TENER PRESENTE LA CAPACIDAD DE CORTOCIRCUITO DEL SISTEMA, PARA PODER ELEGIR LA CAPACIDAD MINIMA DEL TRANSFORMADOR, Y ES MAS LA CORRIENTE DE FALLA MAXIMA.</p>
C	CUANDO SE TIENE GENERADORES, TRANSFORMADORES CON NEUTRO AISLADO O SIN NEUTRO FISICO.	<p>SE CREA EL NEUTRO ARTIFICIAL A TRAVES DE UN TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA EN CONEXION ZIG-ZAG.</p> 	<p>1.- DEBEMOS TENER PRESENTE QUE LA CORRIENTE DE FALLA PARA ESTE TIPO DE PUESTA A TIERRA DEBE SER MAYOR O IGUAL AL 25 % $I_{3\phi}$; PARA PODER ACCIONAR LOS INTERRUPTORES DE PROTECCION.</p>

NOTA :

$$P_{cc} = \frac{P_n}{X\%} \times 100, \quad I_{3\phi} = \frac{I_n}{X\%} \times 100$$

SISTEMAS DE MEDIA TENSION DESDE 2.3KV a 13.8KV

	CONDICION	PUESTA A TIERRA	RECOMENDACIONES
D	SI EL NEUTRO DEL GENERADOR ES CONECTADO EN ESTRELLA.	<p>EL GENERADOR SE PONE A TIERRA A TRAVES DE UNA RESISTENCIA DE BAJO VALOR OHMICO.</p>  <p>Resistencia de puesta a tierra</p> <p>• No usar puesta a tierra solida.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.-COSTO MODERADO, EN SISTEMAS PEQUEÑOS. 2.-TENER PRESENTE LA RELACION X_0 / X_1 (Vease cuadro 4pt) 3.-AL ELEGIR LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA, SE DEBE TENER PRESENTE QUE LA POTENCIA DISIPADA SEA MENOR QUE LA POTENCIA NOMINAL DEL SISTEMA. 4.- CUANDO SE TIENE CARGAS DE ILUMINACION HAY QUE TENER PRESENTE LOS TRANSITORIOS.
E	SI EL TRANSFORMADOR O BANCO DE TRANSFORMADORES TIENEN SUS SECUNDARIOS CONECTADOS EN ESTRELLA.	<p>EL O LOS TRANSFORMADORES SE PONE A TIERRA A TRAVES DE UNA RESISTENCIA DE BAJO VALOR OHMICO.</p>  <p>Resistencia de puesta a tierra</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.-COSTO MODERADO EN SISTEMAS PEQUEÑOS. 2. TENER PRESENTE LA RELACION X_0 / X_1 (vease cuadro 4pt.)
F	CUANDO SE TIENE GENERADORES, TRANSFORMADORES CON NEUTRO AISLADO O SIN NEUTRO FISICO.	<p>SE CREA EL NEUTRO ARTIFICIAL A TRAVES DE TRANSFORMADORES DE PUESTA A TIERRA EN CONEXION ZIG-ZAG, Y LA PUESTA A TIERRA SE HACE A TRAVES DE UNA RESISTENCIA.</p>  <p>A barras</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.-COSTO MODERADO EN SISTEMAS PEQUEÑOS. 2.-TENER PRESENTE LA RELACION X_0 / X_1 (Vease cuadro 4pt).
G	PARA TODOS LOS SISTEMAS MAYORES DE 15KV SE RECOMIENDA UNA PUESTA A TIERRA FRANCA.		

SECCION IV

4. CALCULO DE LA MAXIMA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO A TIERRA

4.1. Consideraciones Generales

El cálculo de corrientes de falla en los sistemas industriales tiene importante aplicación práctica en el diseño de máquinas, en el diseño de aislamiento de equipos eléctricos, líneas y pararrayos. Una combinación de corriente y tensión de falla, se tiene en cuenta en el diseño y elección de los sistemas de protección.

Se agrupan bajo el nombre de corto circuitos todos los defectos provocados por un contacto, bien entre un conductor y tierra o cualquier pieza metálica unida a ella o bien entre conductores. En la casi totalidad de los casos este contacto tiene lugar por un intermedio de un arco, al

menos en lo que respecta a las instalaciones industriales de baja y media tensión.

En esta sección veremos los cortos circuitos asimétricos y su estudio lo haremos bajo la teoría de los componentes simétricos, ésta teoría nos hace calcular aproximadamente los valores de tensiones y corrientes de fallas asimétricas, a partir únicamente de las constantes del sistema. El cálculo de éstos valores bajo condiciones de desbalance requiere el conocimiento de las f.c.m. generadas, e impedancias de servicio para las tres secuencias. Como se trata de un sistema industrial, las impedancias de secuencia tiene un valor parecido debido a que estos sistemas no son tan extensos y no son interconectados es por eso que para el presente trabajo podemos asumir que las impedancias de secuencias son iguales; obteniendo una corriente y voltaje de falla aproximada.

4.2 ANÁLISIS TEÓRICO PRELIMINAR

El análisis teórico lo haremos en dos partes, la primera parte es considerado un sistema con neutro a tierra, ya sea a través de resistencias e inductancias; y la segunda parte considerando un sistema con neutro aislado o sin neutro físico; en ambas partes calcularemos su corriente de falla.

4.2.1 Cálculo de la Corriente Monofásica a Tierra Para Un Sistema con Neutro a Tierra a Través de Resistencias e Inductancias

Para el cálculo que a continuación se hace, nos referimos a las figuras 31 p.t.a.b. en donde Z_0 , Z_1 , Z_2 , son las impedancias de secuencia cero-positiva y negativa respectivamente del sistema a tratar, R es la resistencia entre neutro y tierra, y R_g viene a ser la resistencia a tierra o de retorno y R_f la resistencia de falla; finalmente E_g es la f.e.m. del sistema y se presenta sólo en la secuencia positiva.

Por otro lado si el neutro está puesto a tierra a través de una reactancia X_n , el sistema se comportaría según la figura 32 p.t.a.b.

De las redes de secuencia del diagrama de la fig. 31 p.t. calcularemos las corrientes de las 3 secuencias, o sea:

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E_g}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3(R + R_f + R_g)}$$

$$I_g = 3 I_1 = \frac{3E_g}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3(R + R_f + R_g)}$$

Además las impedancias de secuencia positiva y negativa de un sistema son del mismo orden de magnitud, como habíamos dicho anteriormente, mientras que la impedancia de secuencia cero puede variar dentro de un rango bastante amplio desde valores muy pequeños a valores muy grandes respecto a la de secuencia positiva.

También los valores de las resistencias de secuencia son muy pequeños en comparación con sus respectivas reactancias, por lo que el efecto de ellos sobre la magnitud de la falla es relativamente pequeña. La resistencia del arco puede ser pequeña particularmente después del salto de la chispa, y cero en caso de conexión metálica. En vista de esto y la complicación que resulta de la consideración de la resistencia del arco, se aconseja asumir la resistencia de falla igual a cero, en base a todo esto podemos deducir

$$I_g = \frac{3 E_g}{X_1 + X_2 + X_0 + 3 (R + R_g)}$$

Si la puesta a tierra es franca, tenemos : $R = 0$, $X_1 + X_2 + X_0 \gg R_g$

$$I_g = \frac{3 E_g}{X_1 + X_2 + X_0}$$

Del diagrama de la figura 32 p.t.b., donde tenemos una puesta a tierra a través de una reactancia, se obtiene

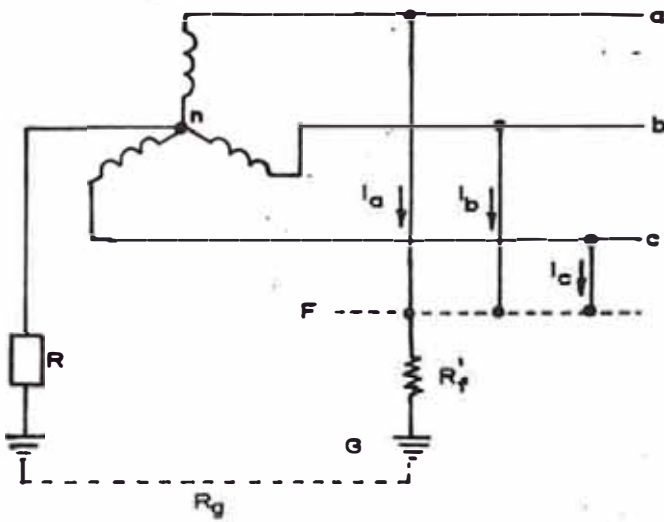


Fig. 31 pt.a.- SISTEMA CON NEUTRO A TIERRA A TRAVES DE UNA RESISTENCIA.

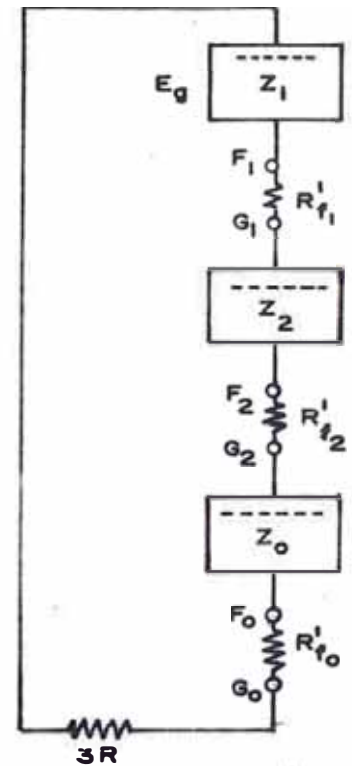


Fig. 31 pt.b.- RED DE SECUENCIA PARA UNA FALLA I_0 A TIERRA.

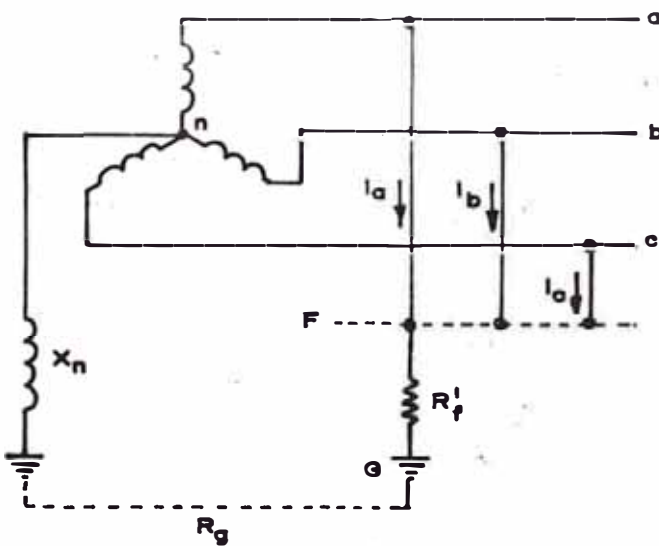


Fig. 32 pt.a.- SISTEMA CON NEUTRO A TIERRA A TRAVES DE UNA REACTANCIA INDUCTIVA.

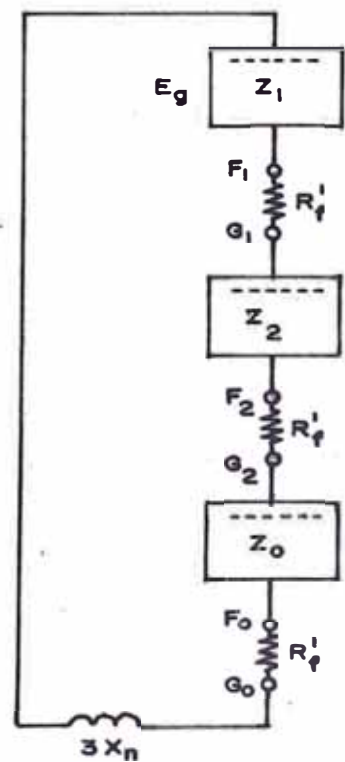


Fig. 32 pt.b.- RED DE SECUENCIA PARA UNA FALLA I_0 A TIERRA.

lo siguiente

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E_g}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3(X_n + R_f + R_g)}$$

$$I_g = 3 I_1 = \frac{3E_g}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3(X_n + R_f + R_g)}$$

Si $R_f = 0$, $X_1 + X_2 + X_0 > R_g$

$$\therefore I_g = \frac{3E_g}{X_1 + X_2 + X_0 + 3X_n}$$

En donde :

X_0 , X_1 , X_2 son reactancias de secuencia del sistema
(ohm/fase)

4.2.2. Cálculo de la corriente monofásica a tierra por un sistema con neutro aislado, o sin neutro físico

Para el cálculo que a continuación se hace nos vamos a referir al circuito de la figura 33 pt.a.b., ya más simplificada por los criterios tomados en la primera parte. - Aquí para este sistema R_g no existe, debido a que la corriente no tiene camino por donde retornar. Del circuito tenemos :

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E_g}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f}$$

$$I_g = 3 I_1 = \frac{3 E_g}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f}$$

pero : $X_1 > R_1$, $X_2 > R_2$, $X_0 > R_0$

$$I_g = 3 I_1 = \frac{3 E_g}{X_1 + X_2 + X_0 + 3 R_f}$$

donde : X_1 , X_2 , X_0 : son las reactancias de secuencia (ohm/fase)

R_f : es la resistencia de falla (ohm.)

E_g : tensión de fase del sistema (voltios)

Para una falla monofásica a tierra, la suma de las reactancias de secuencia X_1 , X_2 , X_0 del sistema será prácticamente la reactancia capacitiva de secuencia cero, por consiguiente la última excepción quedaría de la siguiente manera :

$$I_g = \frac{3 E_g}{3 R_f - j X_{C0}}$$

Despejando R_f tenemos :

$$R_f = \frac{1}{3} \sqrt{\left(\frac{3 E_g}{I_g}\right)^2 - X_{C0}^2}$$

donde : X_{C0} = Es la reactancia capacitiva de secuencia cero del sistema, en especial de alimentadores -
(véase fig. 33 p.t.)

Finalmente veremos las redes de secuencia para un sistema con neutro aislado, cuando se introduce al sistema un transformador de puesta a tierra de reactancia por fase X_R . Como habíamos dicho en las secciones anteriores que para crear un punto neutro artificial en un sistema aislado se recomendaba poner transformadores de puesta a tierra; es así que vamos a ver estos en las redes de secuencia. De la figura 34p.t., podemos sacar las siguientes relaciones :

$$Z_{eq_1} = \frac{X_{T1} X_{C1}}{X_{T1} - X_{C1}}, \quad Z_{eq_2} = \frac{X_{T2} X_{C2}}{X_{T2} - X_{C2}}, \quad Z_{eq_0} = \frac{X_R X_{co}}{X_R - X_{co}}$$

Además :

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{3 E_g}{Z_{eq_1} + Z_{eq_2} + Z_{eq_0} + 3R_f}$$

haciendo :

$$X_1 = \frac{X_{T1} X_{C1}}{X_{T1} - X_{C1}}, \quad X_2 = \frac{X_{T2} X_{C2}}{X_{T2} - X_{C2}}, \quad X_0 = \frac{X_R X_{co}}{X_R - X_{co}}$$

$$\text{entonces : } I_g = \frac{3 E_g}{X_1 + X_2 + X_0 + 3 R_f}$$

donde: X_1, X_2, X_0 ; son las reactancias de secuencia del sistema hasta el punto de falla; y X_R la reactancia del transformador de puesta a tierra. (su cálculo se hizo en el acápite 3.5.)

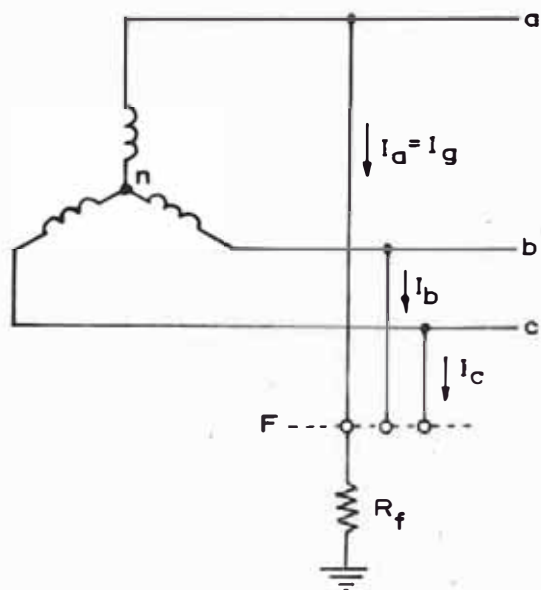


Fig. 33 pt.a.- SISTEMA CON NEUTRO AISLADO O SIN NEUTRO FISICO.

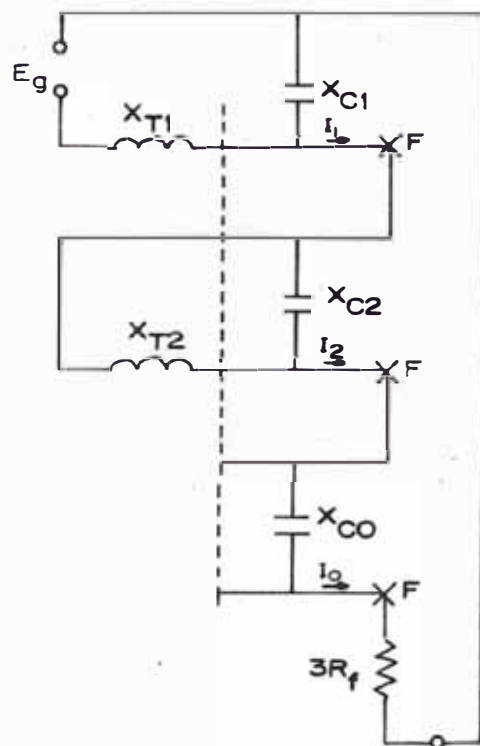


Fig. 33 pt.b.- RED DE SECUENCIA PARA UNA FALLA IØ A TIERRA.

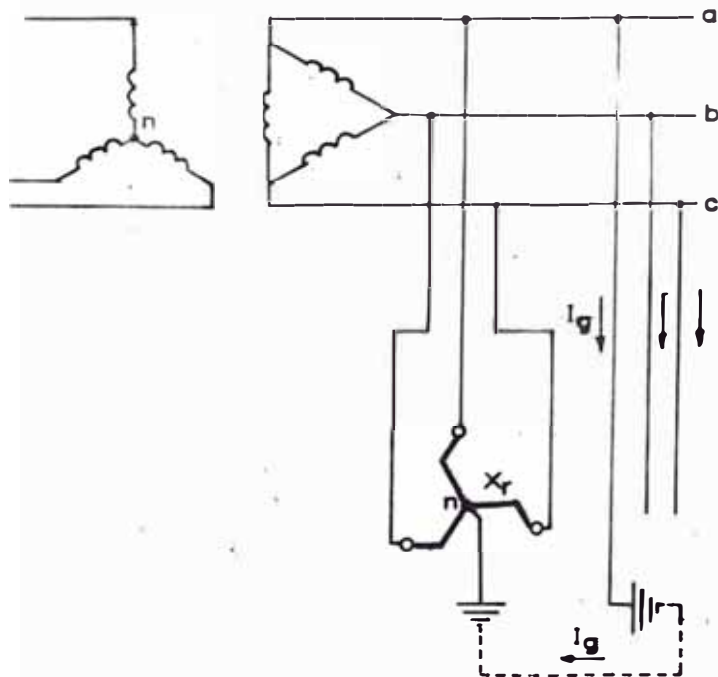


Fig. 34 pt.a.- SISTEMA CON NEUTRO ARTIFICIAL.

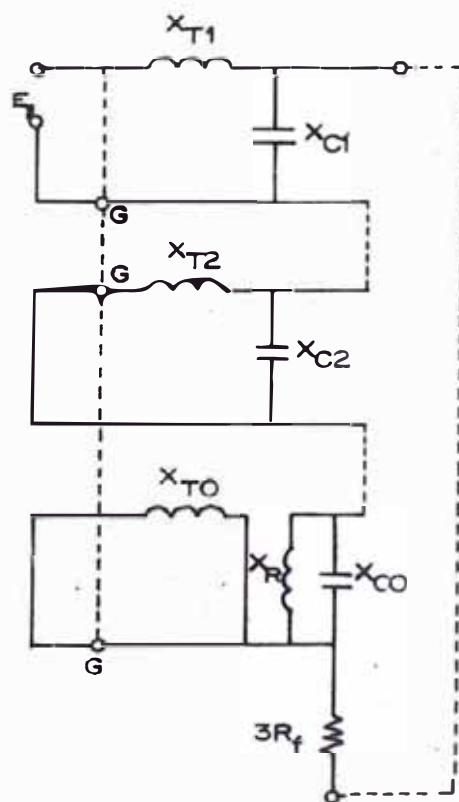


Fig. 34 pt.b.- RED DE SECUENCIA PARA UNA FALLA IØ A TIERRA.

4.3. RELACION ENTRE LA CORRIENTE DE FALTA TRIFASICA Y LA CORRIENTE MONOFASICA A TIERRA

Esta relación es muy importante porque nos da un porcentaje aproximado de la corriente de falla monofásica a tierra con respecto a la trifásica.

Sabiendo este porcentaje ya estamos aptos en elegir el tipo de puesta a tierra más conveniente, ya sea por resistencia o inductancias. Vamos a partir de una puesta a tierra franca, donde el sistema tiene una resistencia a tierra R_g , y una potencia nominal P a una tensión de servicio E (véase Fig. 35 p.t. a.b), por otro lado la reactancia efectiva ($X_1 = X_2 = X_0$) del transformador es X_T , entonces:

$$I_{3\phi} = \frac{E_n}{X_T} \quad (\text{p.u.})$$

$$I_{1\phi} = \frac{E_n}{X_T + R_g} \quad (\text{p.u.})$$

$$\frac{I_{1\phi}}{I_{3\phi}} = \frac{E_n}{X_T + R_g} \quad , \quad I_{1\phi} = I_{3\phi} \left(\frac{X_T}{X_T + R_g} \right)$$

$$\text{y :} \quad E_n = \frac{E}{\sqrt{3}} \quad ; \quad V_B = \frac{V}{\sqrt{3}} \quad (\text{Voltaje Base})$$

$$E_n = 1 \text{ p.u.}$$

$$I_B = \frac{P}{3V_B} \quad (\text{corriente base})$$

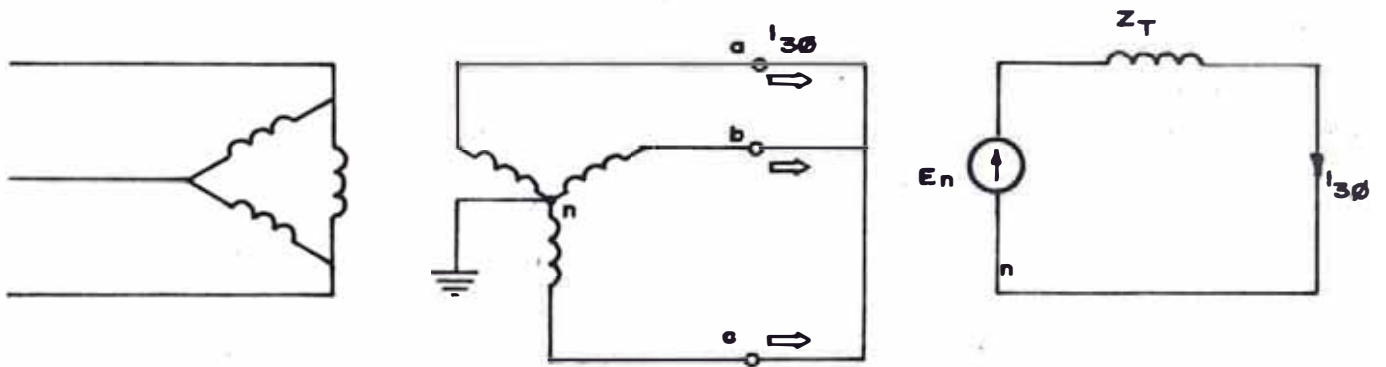


Fig. 35 pt. a.- MODELO 3Ø PARA EL CALCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA SIMETRICA EN BARRAS.

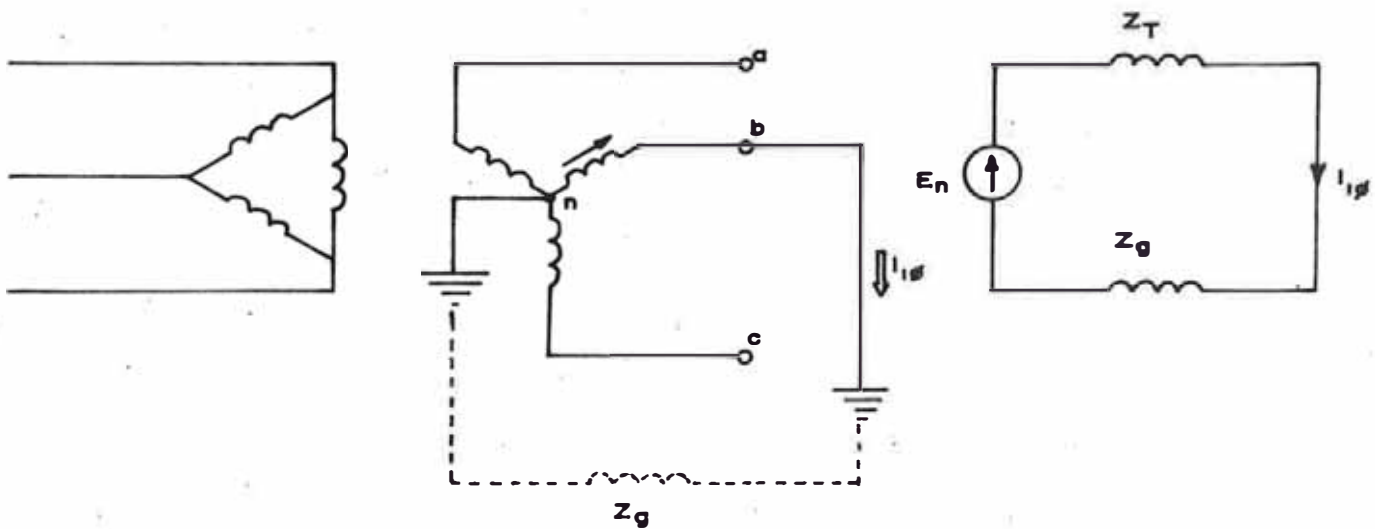


Fig. 35 pt. b.- MODELO 3Ø PARA EL CALCULO DE LA CORRIENTE MONOFASICA A TIERRA EN BARRAS.

TABLA 3pt.- CALCULO APROXIMADO DE LA CORRIENTE 3Ø EN BARRAS DE UN TRANSFORMADOR PUESTO A TIERRA FRANCAMENTE (Para $X_T = 7\%$)

VOLTAJE DEL SISTEMA (V)	TRANSFORMADOR (KVA)	CORRIENTE DE TIERRA APROXIMADA					
		Gd. Res. 1.0 Ohm.		Gd. Res. 0.1 Ohm.		Gd. Res. 0 Ohm.	
		AMPERIOS	PORCENTAJE	AMPERIOS	PORCENTAJE		
13,800	7,500	3,900	87	4,500	100	4,500	
	15,000	6,000	67	9,000	100	9,000	
	30,000	7,300	41	17,500	97	18,000	
6,900	3,750	3,000	67	4,500	100	4,500	
	7,500	3,650	41	8,800	98	9,000	
	15,000	3,900	22	16,400	91	11,000	
4,160	2,500	2,160	43	4,900	98	5,000	
	5,000	2,320	23	9,000	92	10,000	
	7,500	2,360	16	12,700	85	15,000	
2,400	1,500	1,330	26	4,900	94	5,700	
	3,000	1,370	13	8,300	81	10,300	
	6,000	1,380	7	11,500	56	20,600	
600	300	350	8	2,660	63	4,200	
	600	350	8	3,100	44	7,000	
	1,000	350	3	3,400	24	14,000	
480	2,000	350	1	3,500	12	28,000	
	300	280	5	2,450	47	5,200	
	500	280	3	2,680	31	6,700	
240	1,000	280	2	2,750	16	17,300	
	2,000	280	1	2,770	8	34,600	
	150	140	3	1,330	26	5,200	
240	300	140	1	1,370	13	10,300	
	600	140	1	1,380	8	17,300	
	1,000	140	0.5	1,380	4	34,600	

$$Z_B = \frac{3 V_B^2}{P_B} \quad (\text{Impedancia base})$$

Con todas estas expresiones podemos formar la tabla 3 p.t. para cualquier potencia y tensión

Por ejemplo, se tiene una subestación de 150 KVA, a una tensión nominal en el secundario de 240 voltios, y con una resistencia de puesta a tierra de 1 ohmio, calcularemos que porcentaje de la corriente trifásica, es la corriente monofásica a tierra, o sea :

Asumiendo $X_T = 7\%$

$$Z_B = \frac{3 \left(\frac{0.24}{\sqrt{3}} \right)^2}{0.15} = 0.384 \text{ ohm.}$$

$$R_g = \frac{1}{0.384} = 2.604 \text{ p.u.}$$

$$\frac{I_{1\phi}}{I_{3\phi}} = \frac{0.07}{0.07 + 2.604} = 0.026, \quad I_{1\phi} = 2.6\% I_{3\phi}$$

4.4. CALCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA, EN CARGAS RESISTIVAS E INDUCTIVAS DESBALANCEADAS, PRODUCIDAS POR LA APERTURA UNIPOLAR DE LA PROTECCION

Se presenta este tipo de corriente de falla a tierra ya sea para cargas estáticas (lámparas, hornos), y cargas dinámicas (motores), cuando existe un desbalance de la tensión

de alimentación en un sistema 3 ϕ debido a la apertura-unipolar de la fase fallada, esta apertura es hecha normalmente por cortacircuitos fusibles que protegen el sistema contra corto circuitos.

Este tipo de falla es muy compleja porque origina que el neutro de la carga se someta a una tensión elevada con respecto a tierra, además al abrir el fusible de la fase a tierra, las otras fases pasan desapercibidas a la nueva corriente a tierra, ya que esta corriente normalmente es menor que la nominal o a la de plena carga, esto hace a que la corriente a tierra circule a largo plazo sin que estos fusibles la detecten. Para evitar este tipo de problema debemos calibrar exactamente los fusibles o de lo contrario usar interruptores automáticos tripolares.

a) Cálculo de la corriente a tierra, cuando se tiene cargas estáticas.

Véase la figura 36 p.t. donde se muestra un sistema de puesta a tierra sólida ubicada en el transformador que alimenta a una carga estática que tiene una impedancia por fase R , y además la tensión de alimentación es E , y una protección unipolar por fusibles. En estado estable sucede lo siguiente

$$I_a = I_b = I_c = \frac{E}{\sqrt{3} R} \quad (\text{Véase figura 36 pt.a.})$$

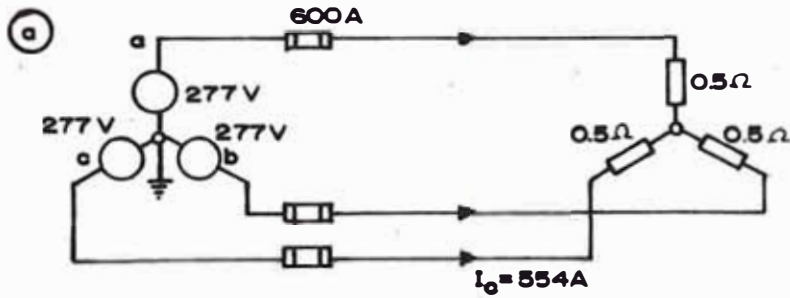
En estado de falla, circulará una corriente de falla I_G que va desde el punto de falla hacia la puesta a tierra y cerrará por la fase "a", y las corrientes de línea de las fases sanas serían

$$I'_b = -I'_c = \frac{E}{2R} \quad (\text{véase figura 36 p.t.b.})$$

Por otro lado I_G origina la apertura del fusible después de un tiempo de circulación (aproximadamente en medio ciclo), después de la apertura del fusible inmediatamente circulará una corriente de falla a tierra I_g , acompañadas con la corriente I'_b , I'_c respectivamente en las fases sanas, además la tensión con que queda sometido el neutro con respecto a tierra es del 50% aproximadamente, de la tensión de fase o sea $E_{am} \approx \frac{E}{2\sqrt{3}}$, este criterio para esta complejidad de falla es solamente para cargas estáticas, ya veremos más adelante cuando las cargas son dinámicas finalmente por las fases sanas circularán $I'_c + I_g$ y $I'_b + I_g$. De los circuitos equivalentes de la figura 36 pt.d, e, f y del diagrama fasorial tenemos :

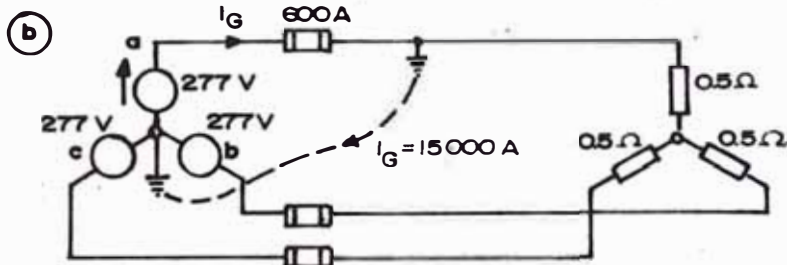
$$I_g = \frac{E}{3\sqrt{3}R} \quad (\text{nueva corriente de falla})$$

$$I'_c + I_g = \sqrt{I'^2_c + I_g^2}$$



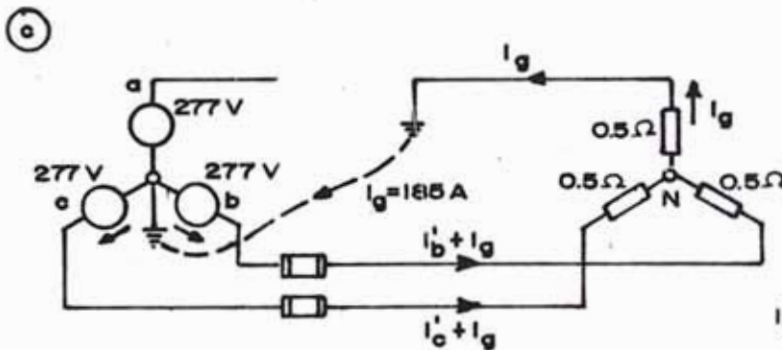
CARGA ESTÁTICA
BALANCEADA (EN
ESTADO NORMAL)

$$I_a = I_b = I_c = \frac{277}{0.5} = 554A$$

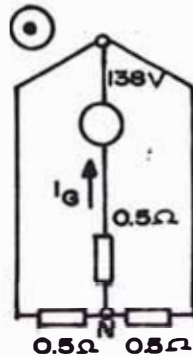
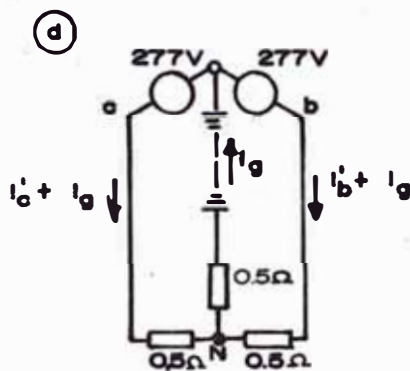
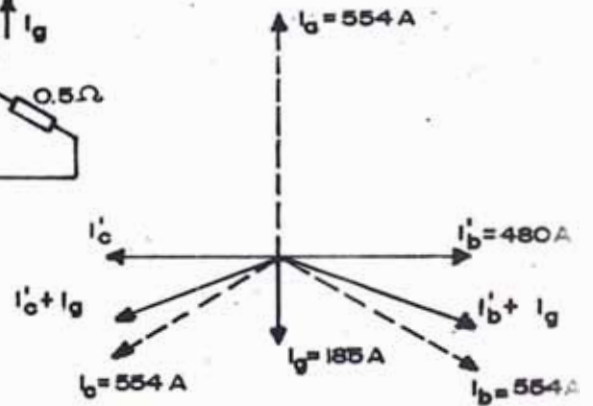


COMPORTAMIENTO
DURANTE LA FALLA

$I_g = 15,000A$ (ver fig. 35pt.a)
EL FUSIBLE DE LA FASE
"a" ABRE DESPUES DE UN
CICLO.



DESPUES DE LA
APERTURA DE LOS FUSIBLES



$$I_g = \frac{138}{0.5 + 0.25} = 185A$$

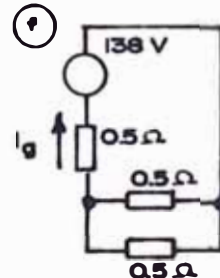


Fig. 36pt. SECUENCIA DE LOS EVENTOS OCURRIDOS POR LA APERTURA UNIPOLAR DE UN FUSIBLE.

Por ejemplo, supongamos que tenemos un sistema trifásico de baja tensión (480v) alimentado por un transformador de potencia con su neutro puesto a tierra sólidamente, y una reactancia efectiva de sus devanados de 0.5 ohm/fase. si ocurriese una falla a tierra (Fase "a") de 15,000 A, calcularemos aproximadamente la nueva corriente de tierra (I_g), cuando el fusible (600A) de la fase fallada opera.

$$I_a = I_b = I_c = \frac{277}{0.5} = 554 \text{ A.}$$

$I_G = 15,000 \text{ A}$, corriente suficiente para hacer operar el fusible de la fase "a"

$$I'_c = -I'_b = \frac{480}{1} = 480 \text{ A.}$$

Observamos que las corrientes de línea en las fases sanas han disminuído de 554A a 480A, o sea que la carga absorbe solo 480A debido a la falla de 15,000A. Si el fusible de la fase "a" ha operado, tenemos :

$$I_g = \frac{138}{0.5 + 0.25} = 185 \text{ A}$$

y las fases sanas absorberían la siguiente corriente :

$$\sqrt{480^2 + 185^2} = 514 \text{ A.}$$

Vemos que los 514A no son suficientes para hacer funcionar los fusibles de las fases sanas, ya que estos tienen una capacidad nominal de 600 A. ; por consiguiente los 185A circularán indefinidamente porque la falla persiste, obli-

gando a elegir otro tipo de protección.

b) Seguidamente examinaremos el desarrollo de la problemática mencionada cuando se tiene cargas dinámicas, en especial motores. Aquí la problemática se hace más compleja, debido a que el flujo generado por las corrientes de las fases "b" y "c" dan origen a un elevado voltaje inducido en la fase "a", llegando éste hasta un 80% del voltaje de fase del sistema.

Aquí la problemática surge cuando el fusible de la fase fallada opera debido a la corriente de falla a tierra, originando una tensión inducida elevada entre el neutro de la carga y la fase fallada (E_{bm}) véase la figura 37 p.t. y empieza a circular una nueva corriente de tierra- I_g entre el punto de falla y el neutro del transformador. De todo esto se origina un aumento de la corriente de línea de las fases sanas, así como nos muestra la figura 38 pt. a, b, c.

Si ocurre una falla a tierra en la fase "b", la corriente de sobrecarga en las fases sanas sería :

$$\text{Motor HP} = \text{Motor KVA} = E_a I_a + E_b I_b + E_c I_c$$

donde E_a, E_b, E_c son los voltajes de fase de las fases a, b, c, respectivamente y I_a, I_b, I_c son las corrientes de línea en las fases a, b, c, respectivamente.

En condiciones normales de funcionamiento se tiene:

$$HP_b = 3 E_a I_a = 3 E_n I_L \quad (\text{véase figura 38 p.t.a})$$

En condiciones de falla en la fase "b" se tiene

$$HP_a = 2 \left(\frac{1}{2} \times E_{ac} \right) I'_L = 2 \left(\frac{1}{2} E_a \sqrt{3} \right) I'_L$$

$$= E'_n I'_L \sqrt{3} \quad (\text{véase figura 38 pt.c})$$

La carga mecánica requiere una potencia en HP cuando se tenga la siguiente condición :

$$HP_b = HP_a$$

$$3 E_n I_L = E'_n I'_L \sqrt{3}$$

por otro lado el voltaje de la fase es el mismo antes o después de la falla

$$3 I_L = I'_L \sqrt{3}, \quad I'_L = \sqrt{3} I_L \quad (\text{véase figura 38 pt.b})$$

Del diagrama fasorial tenemos :

$$E_{bm} = \frac{1}{2} (E_{ac}) \quad \text{ó} \quad E_{bm} = \frac{1}{2} \sqrt{3} E_a$$

$$E_{ac} = \sqrt{3} E_a$$

Además la corriente I'_L se traduce a una corriente de sobrecarga y debe ser detectada por los relés térmicos éstos obviamente se despolarizarán por encima o igual a $\sqrt{3} I_L$. (I_L = corriente del motor a plena carga)

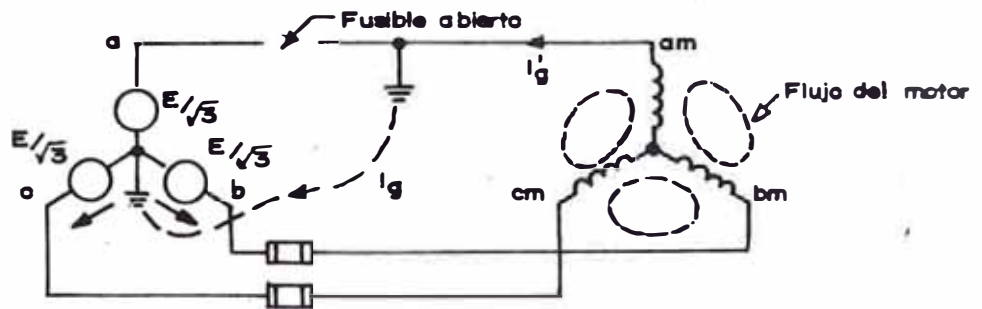


Fig. 37 pt.- EL DIAGRAMA NOS MUESTRA EL RECORRIDO DE LA CORRIENTE DE FALLA Y LAS DISPOSICIONES DEL FLUJO INDUCIDO EN EL ESTATOR.

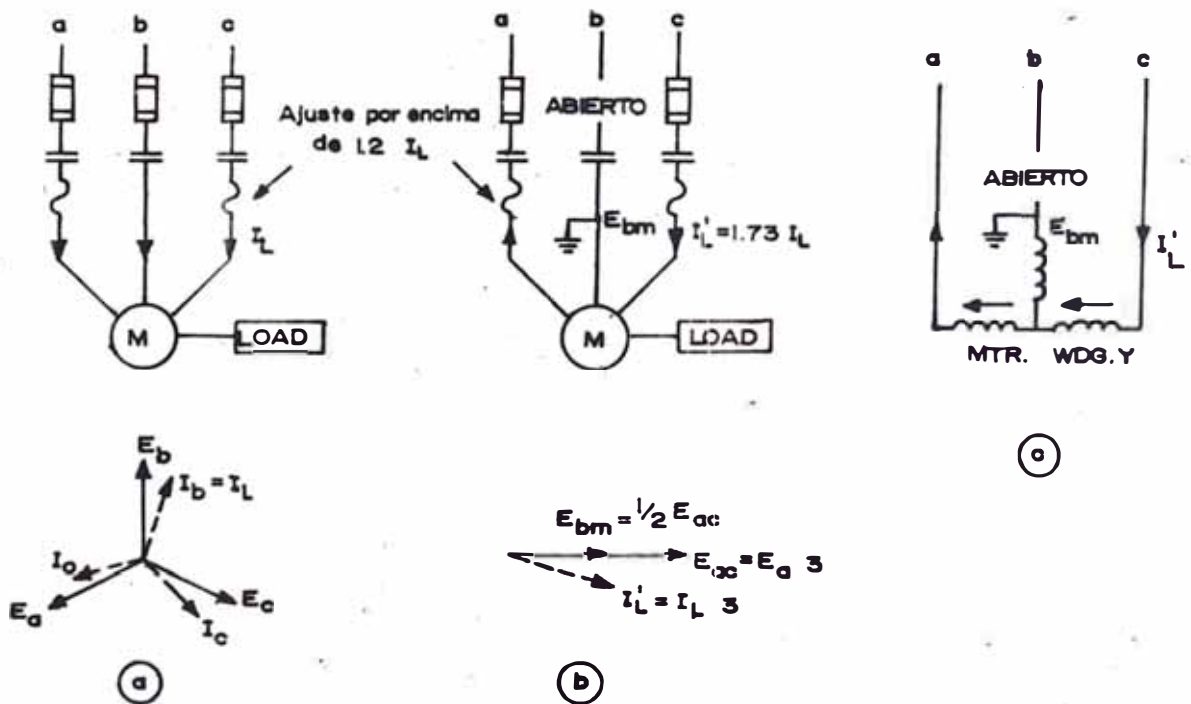


Fig. 38 pt. a,b,c.- COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA DINAMICO, CUANDO OPERA UN FUSIBLE.

Análogamente a cuando se tenía una carga estática, circulará una corriente de falla I_G que hace operar el fusible de la fase "b"; antes de quemarse el fusible el motor absorberá su corriente nominal I_M véase figura 39 pt.a.

Por consiguiente :

$$I_G = \frac{E_b}{Z_t + Z_g} \quad (\text{corriente con que opera el fusible})$$

Donde:

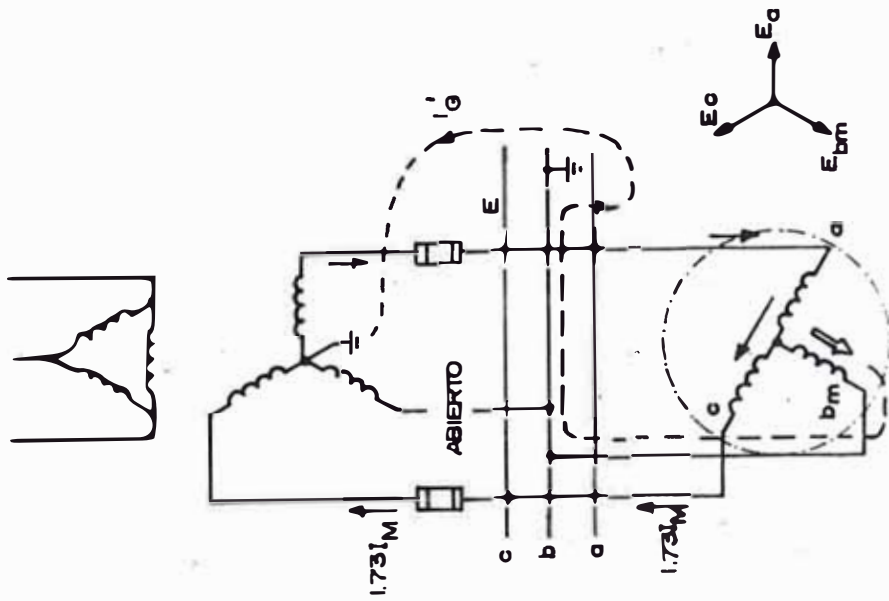
E_b = Voltaje de fase medido antes de operar el fusible.

Z_T = Impedancia del transformador por fase.

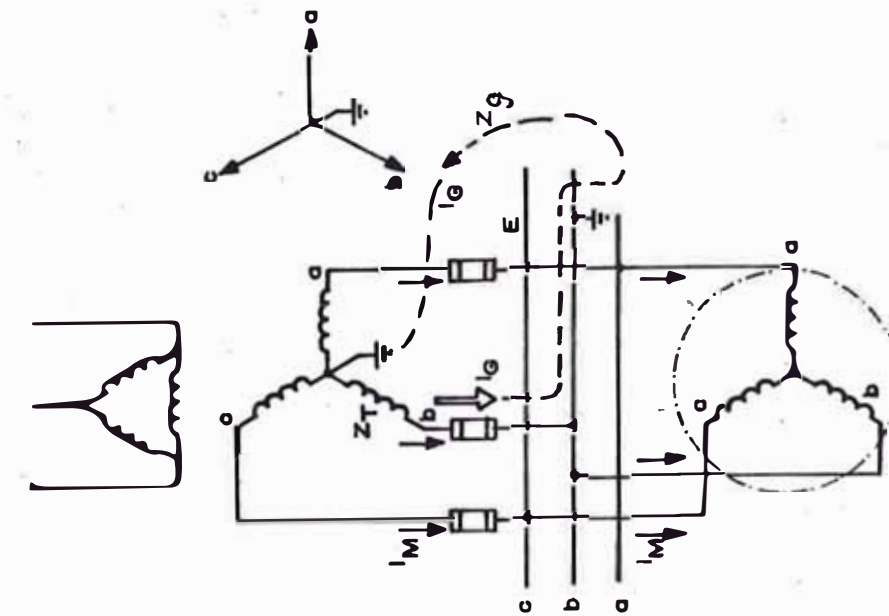
Z_g = Impedancia de puesta a tierra o de retorno.

Una vez que el fusible ha operado seguirá circulando una nueva corriente de tierra I'_G por los devanados del motor, en especial por la fase "b" y cerrando por los devanados del transformador, es así que se forma un voltaje inducido E_{bm} que llegará aproximadamente a un 80% de la tensión de fase; en sistemas de 480 voltios esta tensión llega a 200 voltios, y es más, las corrientes de las fases sanas como demostró llegan hasta $\sqrt{3} I_M$ (véase ^{se} figura 39 pt.b.)

$$I'_G = \frac{E_{bm}}{Z_t + Z_g + Z_{bm}}$$



(a) CONDICIONES NORMALES



(b) CUANDO OPERA EL FUSIBLE DE LA FASE "b"

Fig. 39pt.- LOS DIAGRAMAS NOS MUESTRAN EL COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE, ANTES Y DESPUES DE LA APERTURA DEL FUSIBLE.

donde

E_{bm} = Tensión inducida en la fase "b", entre el neutro del motor y tierra.

Z_{bm} = Impedancia equivalente del motor por fase.

o sea, cuando el motor es de gran potencia, Z_{bm} es pequeña, implicando que I'_G sea grande; de lo contrario si el motor es de poca potencia Z_{bm} es grande implicando que I'_G sea pequeña.

Finalmente como algo particular pondremos el caso de que el secundario del transformador no tenga protección, aunque es un caso muy remoto, pero para fines académicos debemos de mencionarlo, o de lo contrario que se haya perdido selectividad entre el secundario y el primario, podemos añadir que :

Supongamos que ocurre una falla a tierra en la fase "b"; de la figura 40 pt.a., originando una corriente de falla en secundario I_g . Antes de que el fusible correspondiente al primario opere el motor, absorberá de la red su corriente nominal I_L , y obteniéndose en el eje una potencia de :

$$HP_b = 3 E_n I_L$$

y en el primario se reflejará las siguientes corrientes:

$$\text{fase "a"} = 0.58 I_L \text{ ó } 58\% I_L$$

$$\text{fase "b"} = 0.58 I_g$$

$$\text{fase "c"} = 0.58 I_L$$

Después que el fusible de la fase "c" del primario ha operado aparece una nueva corriente a tierra I_g que circulará por el secundario, en forma constante hasta que se detecte y solucione la falla y es más, ya no aparecerá la elevada tensión inducida que aparecía en el caso anterior debido a que la apertura ahora es en el primario, de lo contrario aparecerá la tensión de fase E_n . Pero en la fase "a" del motor circulará una corriente que es el doble de la nominal, y por las otras fases circulará la corriente nominal I_L ; en otras palabras permanecerá siempre el desbalance, debido a la apertura del fusible de la fase "c" del primario, de la figura 40 pt.b., podemos decir:

$$HP_a = 2 I'_L E_n + 2 I'_L \left(\frac{E_n}{2} \right) = 3 I'_L (E_n)$$

La carga mecánica le pedirá potencia al motor, cuando:

$$HP_b = HP_a$$

$$3 E_n I_L = 3 I'_L E_n$$

$$I_L = I'_L$$

Podemos añadir lo siguiente

Cuando el motor trabaja en vacío y ocurre una falla, la corriente de falla sería

$$I'_G = 5\% I_G$$

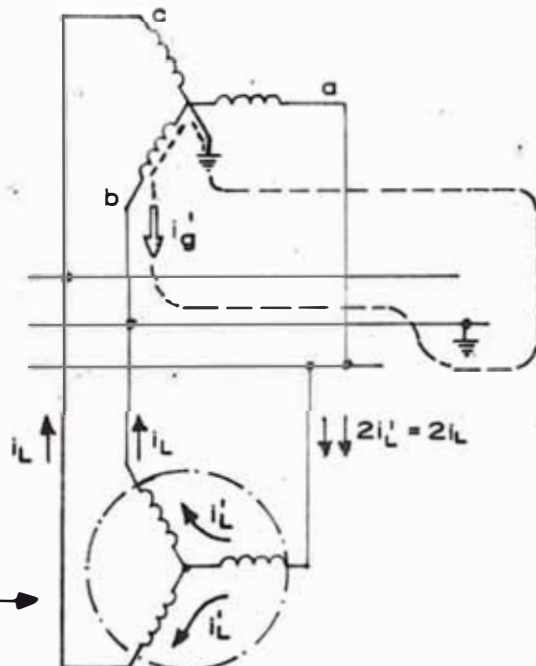
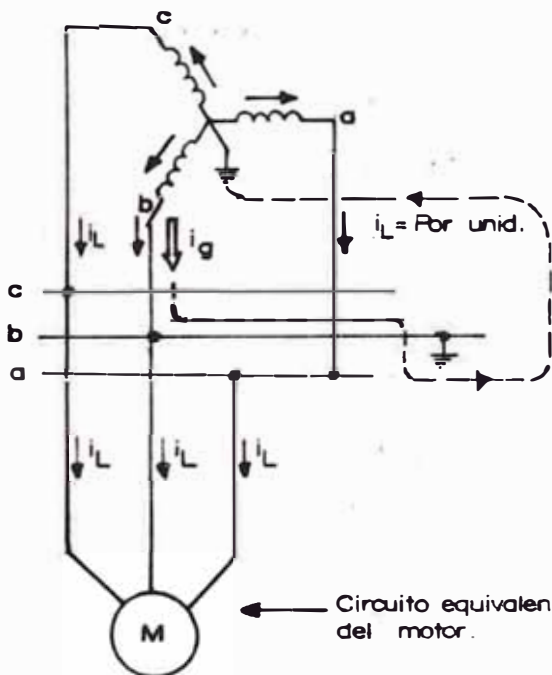
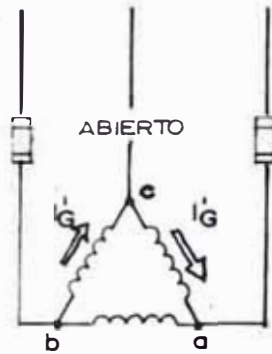
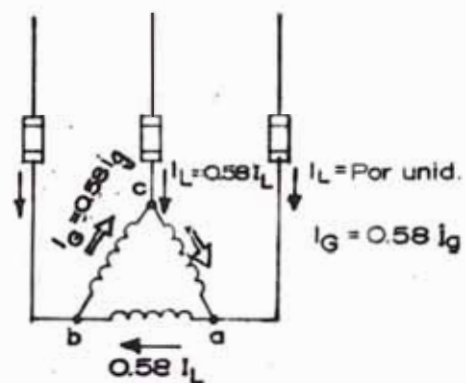
y si el motor trabaja a plena carga, tenemos : $I'_G = 75\% I_G$,

debido a que la impedancia de magnetización es reducida.

(Conclusiones sacadas por el Departamento de medidas de la General Electric).

En general de todos los casos se obtienen las siguientes - consecuencias :

1. La corriente de falla en el secundario permanecerá en tiempo ilimitado.
2. Los devanados quedan sometidos a corrientes de sobrecarga ($\sqrt{3} I_L$ ó $2 I_L$)
3. Se eleva la tensión del neutro (E_m)
4. En el rotor de jaula de ardilla aparecerán tensiones inducidas de secuencia cero, originando estas calentamiento al mismo.



(a)

(b)

Fig. 40 pt.- LOS DIAGRAMAS NOS ILUSTRAN EL COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE DE FALLA CUANDO SE TIENE SOLAMENTE PROTECCION (FUSIBLES) EN EL PRIMARIO.

4.5. CALCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA EN EQUIPOS

Cuando ocurre una falla monofásica a tierra en un sistema puesto a tierra a través de resistencias, aparecerá una caída de tensión en la resistencia de un valor cercano o igual al de fase del sistema.

En una puesta a tierra a través de una resistencia de bajo valor ohmico, la corriente en ésta es aproximadamente igual a la corriente de falla, esta corriente es prácticamente igual al voltaje de fase dividido entre la resistencia. Por ejemplo, si la corriente de falla llega a los 1000 A., debemos elegir una resistencia de 1000 A. Este es un método muy práctico y simple para elegir la corriente de falla, siempre y cuando que la corriente 1ϕ sea pequeña en comparación con la corriente 3ϕ .

Este método se aplica cuando la falla ocurre en líneas o barras y en los terminales de los equipos; pero si la falla es interna o sea en los equipos, ya sea en motores, hornos, etc., la corriente de falla sería menor. La reducción de esta corriente es debida básicamente al voltaje interno de los equipos o aparatos.

En caso de que el equipo esté conectado en estrella; el voltaje en los terminales es el de línea, y en el neutro es cero. Si el neutro del equipo se va a tierra no aparecerá

voltaje alguno en la resistencia conectada a tierra, por consiguiente la corriente de falla será cero. Ver figura 41 pt.a.

Si el punto de falla está entre el neutro y el terminal del equipo, la corriente de falla estará entre cero, y la monofásica de barras ($I_{1\phi}$). Si el punto de falla está en un 10% de longitud del neutro, la corriente de falla a tierra será el 10% $I_{1\phi}$. véase figura 41.pt.c., y si la falla ocurre a un 10% de longitud del terminal del equipo, la corriente de falla será un 90% $I_{1\phi}$ (véase figura 41 pt.c).

En caso de que el equipo esté conectado en delta y ocurriese una falla a tierra en uno de los terminales, en la resistencia aparecerá un voltaje del 100% V_n y 50% V_n cuando el punto de falla está a la mitad del devanado fallado (véase figura 41 pt.d.e.)

Si ocurriesen fallas simultáneas a tierra la corriente de falla aumentará en $1.5I_{1\phi}$, porque ya es un corto circuito entre fases.

Finalmente analizaremos cuando la falla ocurre en un devanado del transformador en el lado de baja tensión. Por ejemplo, supongamos que la falla ocurre a X% de longitud del neutro en la fase "c" de la figura 42 pt., por consiguiente la corriente de falla será :

$$I_{gs} = \frac{\left(\frac{X}{100}\right) \frac{E_2}{\sqrt{3}}}{R}$$

Por otro lado, para evitar sobretensiones R se diseña para

$$I_2 = I_{gs}$$

Entonces la resistencia de puesta a tierra sería

$$R = \frac{E_2}{\sqrt{3} I_2}$$

seguidamente las corrientes de falla que circulan por los de del transformador vienen expresados de la siguiente manera:

$$I_{gs} = \frac{X}{100} (I_2)$$

$$I_{gp} = I_{gs} \left(\frac{X}{100}\right) \frac{1}{a}$$

$$I_{gp} = \frac{X^2}{100^2} \left(\frac{I_1}{\sqrt{3}}\right)$$

Donde :

I_{gp} = Corriente de falla al primario

I_{gs} = Corriente de falla al secundario

I_1 = Corriente nominal al primario

I_2 = Corriente nominal al secundario

R = Resistencia de puesta a tierra

a = Relación de transformación

X = Porcentaje del devanado fallado con respecto al neutro.

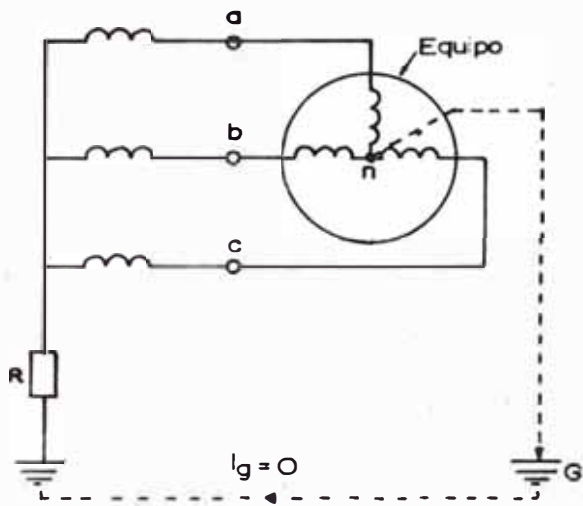


Fig. 41 pt. a

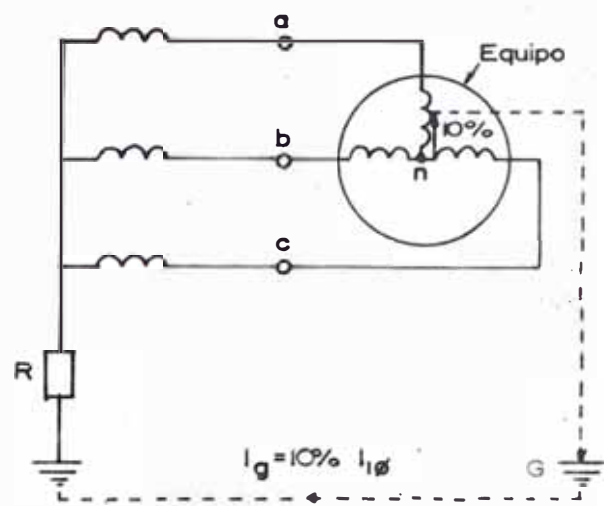


Fig. 41 pt. b

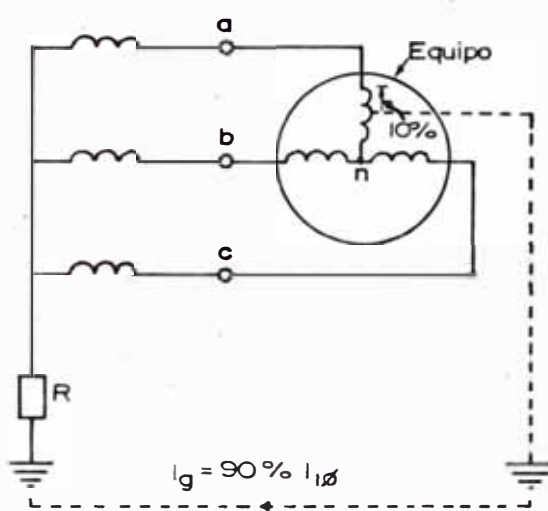


Fig. 41 pt. c

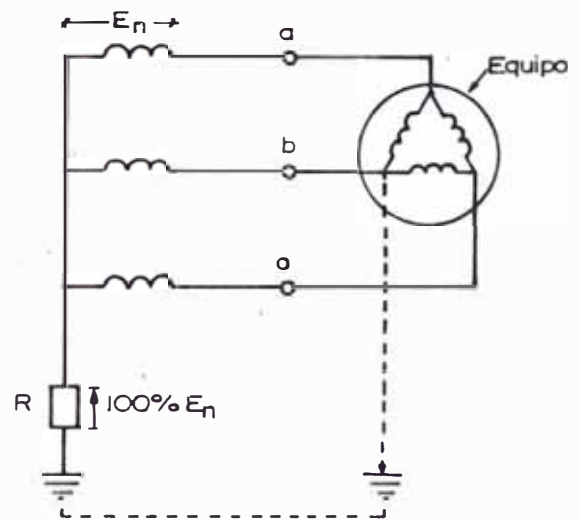


Fig. 41 pt. d

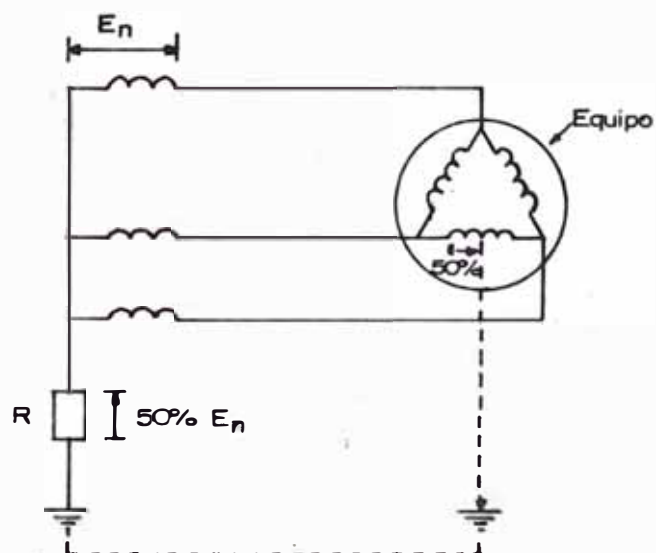


Fig. 41 pt. e

I : a

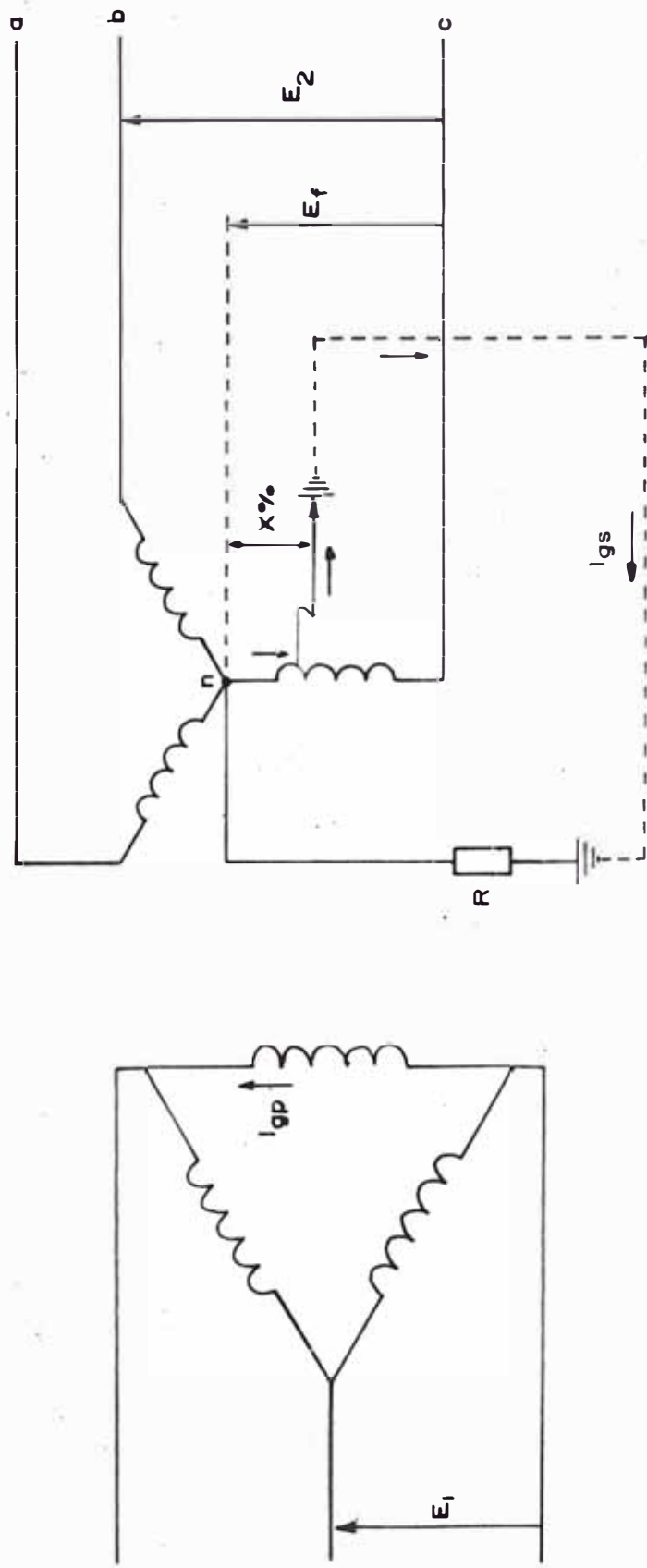


Fig. 42 pt.- CALCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA EN FUNCION DEL % DEL DEVANADO FALLADO DE UN TRANSFORMADOR.

SECCION V

5. CALCULO DE LAS CAPACIDADES PARASITAS A TIERRA DE CONDUCTORES

El cálculo de las capacidades parásitas es muy importante en sistemas con neutro aislado, ya que nos da un aproximado de la corriente de fuga en casos de fallas a tierra.

En esta sección veremos el cálculo aproximado de las capacidades de servicio, valiéndonos del método de MAXWELL, que es un método aproximado para calcular las capacitancias de conductores múltiples, ya sea para sistemas monofásicos, y trifásicos. Para dicho cálculo debemos tener presente las dimensiones de los cables y de la constante dieléctrica relativa ϵ_r y recomendaciones aproximadas de la V.D.E 0100.

5.1. Cálculo de las capacidades parásitas según la teoría de Maxwell

La ecuación de Maxwell se basa a una ecuación matri-

cial

$$\left| \begin{array}{ccc} \lambda & & \\ & b & \\ & & E \end{array} \right|$$

donde

λ = densidad lineal de carga

b = distancias entre conductores

E = diferencia de potencial entre conductores y tierra.

La solución de la matriz nos permite solucionar la repartición de las cargas en función de las capacitancias.

Las capacidades parciales dependen de la geometría y del medio que contiene el sistema de conductores y son independientes de las tensiones aplicadas, y las capacitancias totales equivalentes dependen de la fórmula de conexión de los potenciales y las cargas en los conductores del sistema.

A continuación calcularemos las capacitancias totales a un sistema de dos conductores (véase figura 43 p.t.a.)

Según Maxwell :

$$Q_1 = K_{10} E_{10} + K_{12} (E_1 - E_2) = K_0 E_1 + K(E_1 - E_2)$$

$$Q_2 = K_{20} E_{20} + K_{12} (E_{10} - E_{20}) = K_0 E_2 + K(E_1 - E_2)$$

pero

$$Q_1 = -Q_2; K_0 E_1 + K(E_1 - E_2) = K_0 E_2 + K(E_1 - E_2)$$

$$E_1 = -E_2 = E$$

Entonces:

$$Q_1 = K_0 E + 2EK; \quad \frac{Q_1}{E} = K_0 + 2K$$

haciendo:

$$\frac{Q_1}{E} = C; \quad K_0 = C_{10}; \quad K = C_{12}$$

$$C = C_{10} + 2C_{12} \quad \text{para 2 conductores}$$

$$C = C_{10} + 3C_{12} \quad \text{para 3 conductores}$$

a) En los cables de campo radial; la capacidad es igual a la de los conductores, y para cables fajados tenemos lo siguiente:

$$C = C_{10} + C_{12}$$

donde:

C_{10} = capacidad conductor/apantallamiento

C_{12} = capacidad conductor/conductor.

para este caso: $C = C_{10} = C_{20} = C_{30}$

y la capacidad de servicio sería:

$$C = \left(\frac{5.56 \text{ Er}}{\ln \frac{D}{d}} \right) 10^{-2} \quad (\text{Uf/km})$$

D = diámetro por debajo de la pantalla (envoltura metálica, capa conductora), en mm.

d = diámetro del conductor o de las capas conductoras.

toras por encima de éste, en mm. (ver fig.43 b.c)

Ahora supongamos que existe una falla monofásica a tierra de la fase "c". Como se muestra en la figura 43 p.t.d. que consiste en un sistema con neutro aislado conectado en estrella. Esta falla origina una corriente falla igual a :

$$I_g = \sqrt{3} EW C 10^{-3} \text{ A/km.}$$

pero $C = C_{10} = C_{20} = \frac{5.56Er}{\ln \frac{D}{d}} 10^{-2}$

tenemos :

$$I_g = \sqrt{3} EW \frac{5.56Er}{\ln \frac{D}{d}} 10^{-5}$$

En donde : E = tensión de línea

W = $2 \pi f$ (f = frecuencia del sistema)

E_r = Constante dieléctrica relativa

- b) Para cables de un solo conductor, cables de 3 envolturas y cables con revestimiento de plástico y apantallamiento de cada conductor, su capacidad de servicio es aproximadamente igual a :

$$C = C_{10} + 3 C_{12}$$

$$C = \frac{0.111 Er}{\ln \frac{a^2 (3R^2 - a^2)^3}{r^2 (27R^6 - a^5)}} \mu\text{f/km.}$$

y además $C_{10} \sim 0.57C$ (Recomendación de la V.D.E.)

donde

r = radio del conductor o de las capas conductoras, en mm.

a = Distancia entre ejes de los conductores, en mm.

R = Radio por debajo del apantallamiento (envoltura metálica, pantalla), en mm.

(Véase figura 44 p.t.a.b.)

Ahora supongamos que existe una falla monofásica a tierra de la fase "c" como se muestra en la figura 44 p.t.c., donde C_{13} , C_{12} , C_{23} son las capacidades parásitas entre fases que no afectan en nada al valor de la corriente de fuga tenemos las siguientes expresiones :

$$I_g = \sqrt{3} E W C_{10} 10^{-3} \text{ A/km.}$$

pero:

$$C_{10} \approx 0.57C$$

$$C_{10} \approx 0.57 \left[\frac{0.111 Er}{\ln \frac{a^2 (3R^2 - a^2)^3}{r^2 (27R^6 - a^5)}} \right]$$

entonces:

$$I_g = \sqrt{3} E 2 \pi f \left[\frac{0.57 \times 0.111 Er}{\ln \frac{a^2 (3R^2 - a^2)^3}{r^2 (27R^6 - a^5)}} \right] 10^{-3}$$

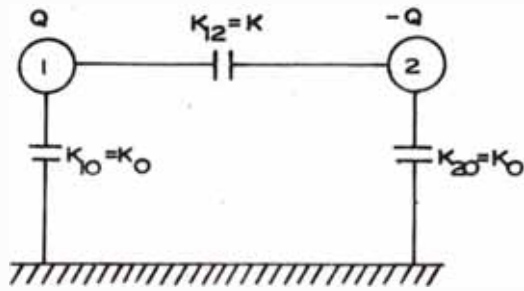


Fig. 43pt.a.

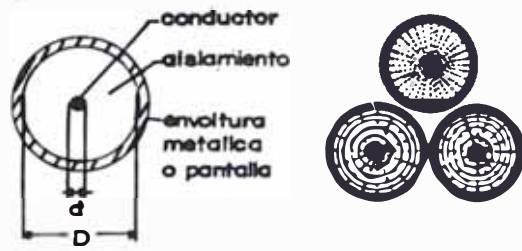


Fig. 43pt.b.- CONFIGURACION DE LOS CABLES DE CAMPO RADIAL.

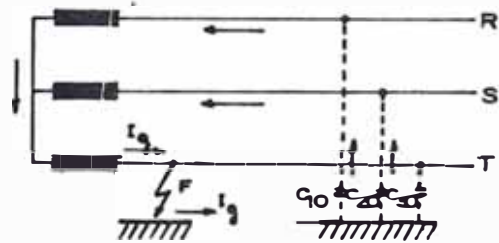
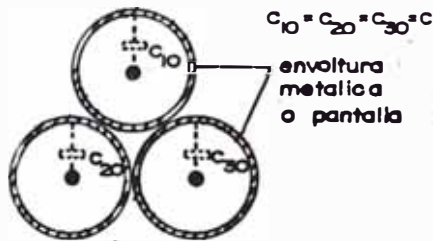


Fig. 43pt.c.- ESQUEMA DE LAS CAPACIDADES DE CABLES DE CAMPO RADIAL EN UN SISTEMA TRIFASICO.

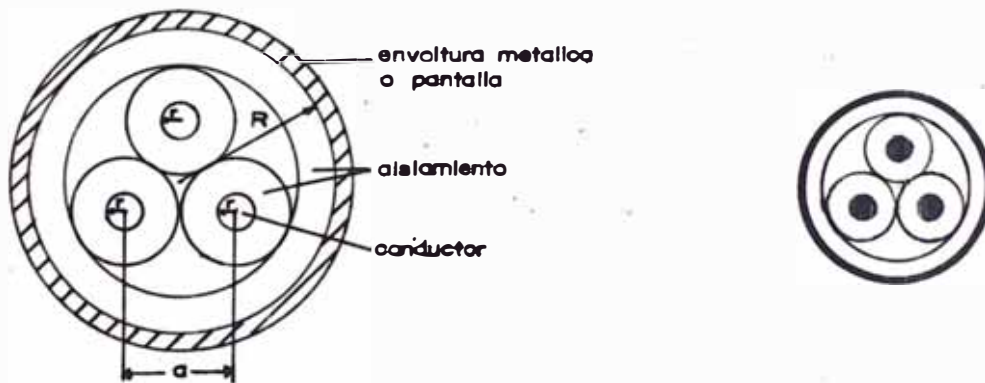


Fig. 44pt.a.- CONFIGURACION DE UN CABLE FAJADO DE UN SOLO CONDUCTOR.

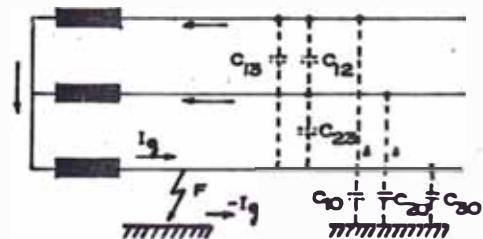
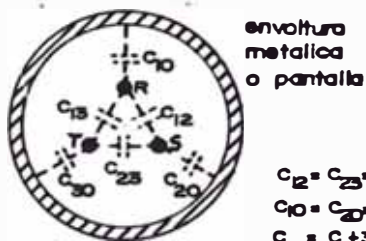


Fig. 44pt.b.- ESQUEMA DE LAS CAPACIDADES PARCIALES DE UN CABLE FAJADO EN SISTEMA TRIFASICO.

También existe el método de las imágenes para calcular las capacitancias parásitas, que no vamos a tocar en este trabajo por que su uso es para sistemas de alta tensión, o en sistemas donde influye notoriamente el efecto de las imágenes hacia el terreno.

5.2. MODEL OS EQUIVALENTES DE SISTEMAS CON NEUTRO AISLADO, CUANDO SE TIENE TRANSFORMADORES DE PUESTAS A TIERRA

En sistemas industriales se tiene en la mayoría de las veces alimentadores de diferentes secciones, que salen de la sub-estación, donde dificulta el cálculo de las capacitancias a tierra, es más, hay alimentadores que cambian de sección en su trayecto, por consiguiente no hay homogeneidad en la repartición de las capacitancias.

La Figura 45 pt.a.b nos muestra un circuito típico de un sistema con neutro aislado, donde aparece un transformador de puesta a tierra de reactancia por fase X_R conectado al circuito, y un alimentador con reactancia de secuencia-cero igual a X_{20} . Donde calcularemos la corriente de falla I_g .

No vamos a considerar las reactancias inductivas, debido a que no influyen en nada en el cálculo de la corriente -

monofásica a tierra.

Del circuito de la figura 34 pt. ., aplicamos el teorema de Thevenin :

$$I_g = \frac{3 E_n}{X_T + X_R - \left(\frac{X_B X_T}{X_{eq}} \right)}$$

Donde :

E_n = Tensión de fase en el transformador de puesta a tierra.

X_T = Reactancia efectiva del transformador de la subestación al secundario.

X_R = Reactancia del transformador de puesta a tierra.

$$\begin{aligned} X_{eq} &= \frac{1}{W \sum c_i} = \frac{1}{W} \left[\frac{1}{C_{10}} + \frac{1}{C_{10}} + \frac{1}{C_{20}} + \frac{1}{C_{20}} \right] \\ &= \frac{2}{W} \left[\frac{1}{C_{10}} + \frac{1}{C_{20}} \right] \end{aligned}$$

En general , si tenemos "n" alimentadores, la expresión sería :

$$X_{eq} = \frac{2}{W} \left[\frac{1}{C_{10}} + \frac{1}{C_{20}} + \frac{1}{C_{30}} \text{ -----} + \frac{1}{C_{no}} \right]$$

Finalmente daremos unos gráficos, que nos dan valores orientativos de las capacidades de servicio para diferentes tensiones nominales, y es más, presentamos un cuadro de las constantes dieléctricas de los materiales aislantes -

normalmente usados en cables. (Veáse figuras 45 pt., 46 pt.
47 pt., 48 pt.)

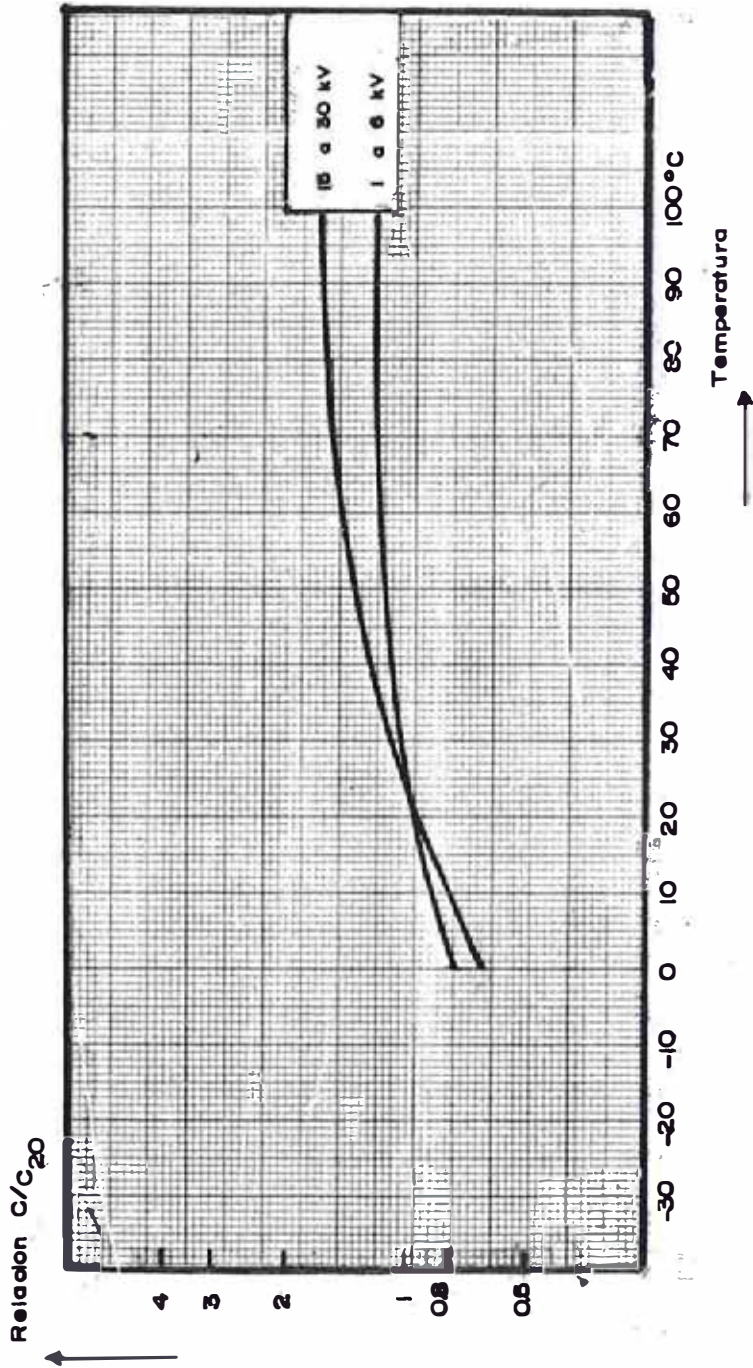
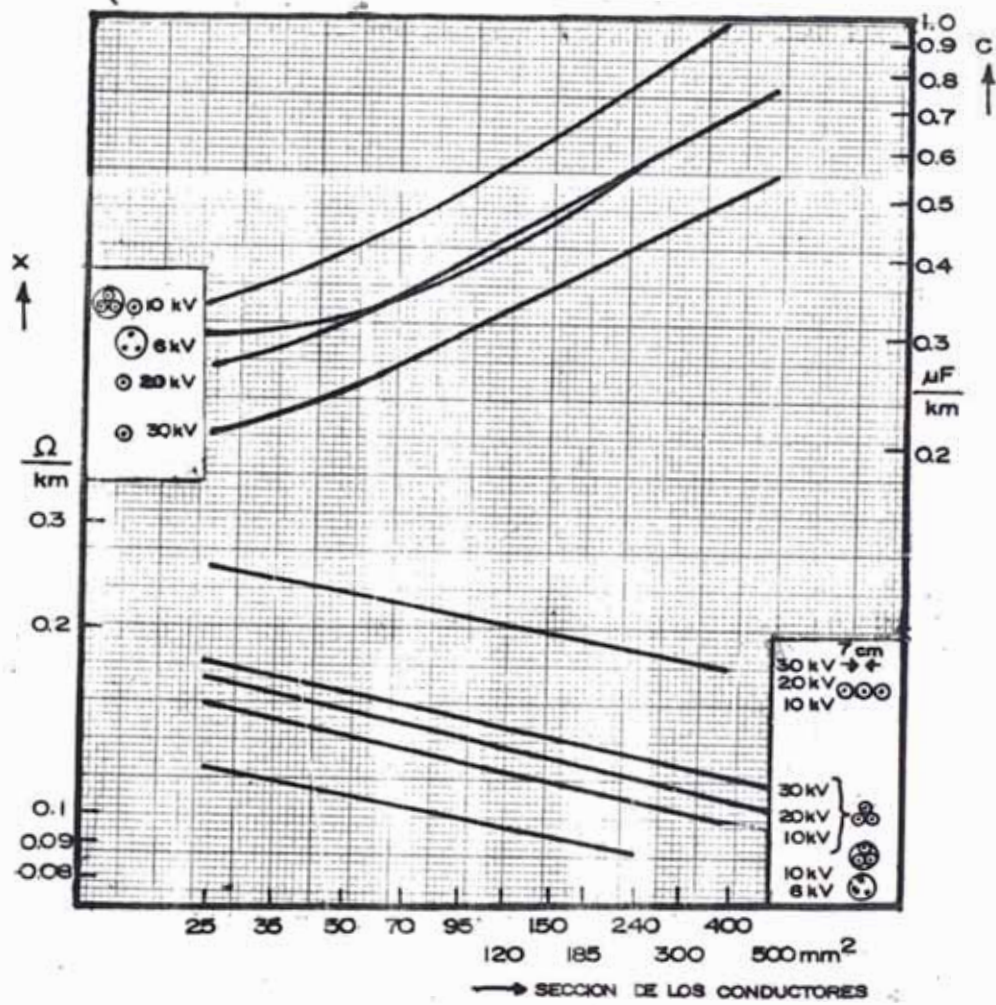


Fig. 45pt.- CONSTANTE DIELECTRICA RELATIVA ϵ_r DE MEZCLAS PROTODUR, EN FUNCION DE LA TEMPERATURA.



- ⊙ CABLES CON APANTALLAMIENTO COMUN
- ⊗ CABLES CON APANTALLAMIENTO EN CADA UNO DE LOS CONDUCTORES.
- ⊖ CABLES DE UN SOLO CONDUCTOR.

Fig. 46 pt.- CABLES PROTODUR (RESISTENCIAS INDUCTIVAS 'X' Y CAPACIDADES DE SERVICIO 'C').

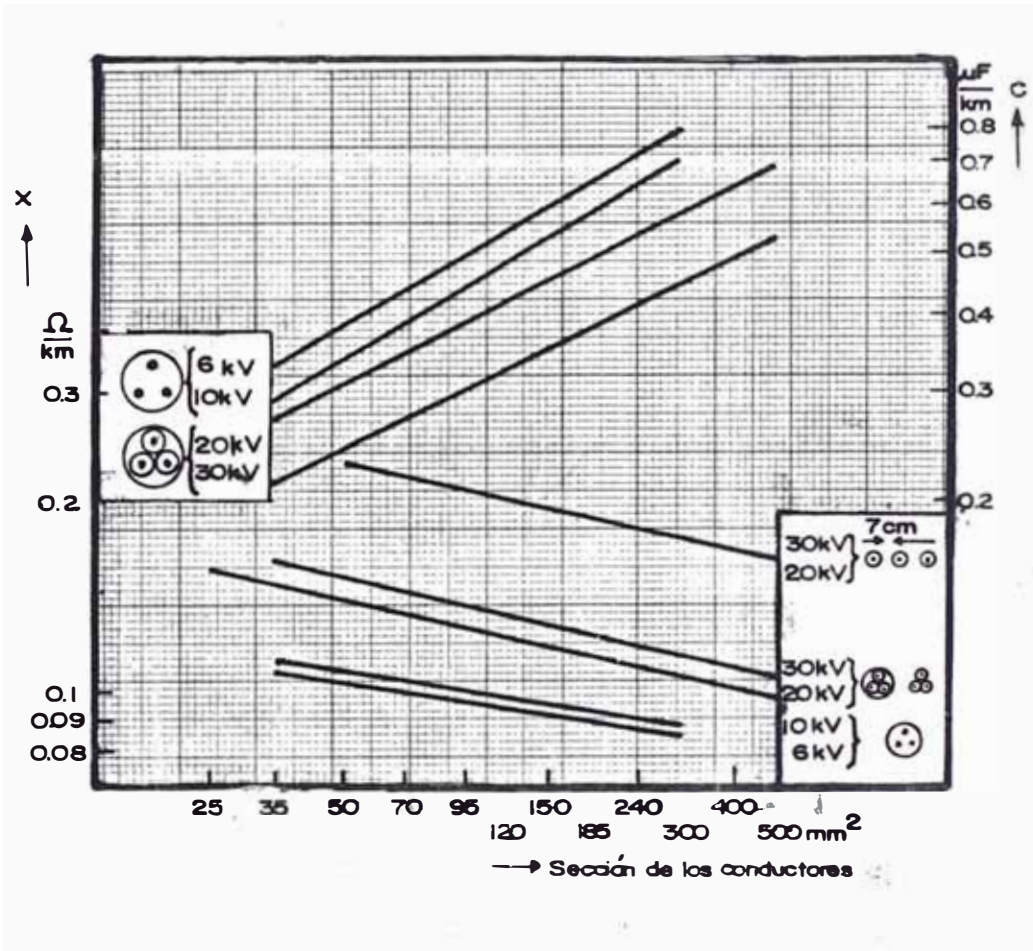


Fig.47 pt.- CABLES CON ENVOLTURA DE PLOMO Y AISLAMIENTO DE PAPEL (RESISTENCIAS INDUCTIVAS "X" Y CAPACIDADES DE SERVICIO "C".)

MATERIAL	CONSTANTE DIELECTRICA (ϵ_r)
AIRE	1.0
POLIETILENO CON RETICULADO MOLECULAR	3.0
POLIETILENO	2.1 - 2.5
POLICLOROPRENO	8.0 - 10.0
PVC	3.7 - 8.0
GOMA SILICONADA	3.2 - 3.5
GOMA VULCANIZADA	2.7 - 6.5
PAPEL IMPREGNADO	3.0 - 5.0
LIENZO BARNIZADO	4.0 - 6.0
OXIDO DE MAGNESIO	6.0 - 9.0

Fig. 48pt.- DATOS CARACTERISTICOS DE LA CONSTANTE DIELECTRICA (a 60°F)

SECCION VI

6. COMPORTAMIENTO DEL ARCO ELECTRICO EN FALLAS A TIERRA

El arco eléctrico producido por una falla a tierra tiene un comportamiento análogo al arco producido por apertura de interruptores con carga resistiva e inductiva, y se diferencian por las magnitudes de la corriente y tensión del arco. Más peligrosas son las derivaciones a tierra que se producen al desconectar un interruptor o seccionador bajo carga, si el arco formado llega a tierra, puede suceder que se extinga espontáneamente en el momento que la corriente pasa por cero, pero la experiencia demuestra que cuando la intensidad de derivación a tierra sobrepasa los 3 amperios, el arco no se apaga, sino que se enciende nuevamente en cada semiperíodo. La fase puesta a tierra debe descargar en un tiempo muy breve; y cuando la corriente ha quedado extinguida se interrumpe la comunicación de -

de esta fase con tierra, por consiguiente su potencial ya no es nulo, de forma que la tensión respecto de tierra varía con el período hasta alcanzar el valor que determina una nueva descarga. Es decir, que cada pulsación de la tensión equivale al cierre de un interruptor no precedido de una resistencia protectora. Como hay una descarga cada semiperíodo, esto quiere decir que para la frecuencia industrial de 60 HZ, se producen 100 ondas de tensión - cada segundo, las cuales avanzan por la red. Si persiste la derivación a tierra, aún se agravan más las cosas que la elevación de la temperatura en el punto donde se produjo el arco, provoca ionización del aire circundante, precisándose menor tensión para un nuevo encendido del arco.

6.1. Formación del arco

Todo arco se forma en las cercanías del punto de falla y teniendo gran influencia en la misma. Un arco es causado por el deterioro de los aislamientos, de los cables originando en ese instante un chisporroteo. Todo arco producido por una falla a tierra es muy móvil, puede alcanzar una gran longitud (L) alcanzando a las fases sanas y provocando cortocircuitos francos. Si como consecuencia de esta primera derivación, una segunda fase descarga

ra a tierra, que puede resultar excepcionalmente peligrosa, sobre todo en instalaciones industriales pocas cargadas con retorno por tierra.

Los fenómenos producidos quedarán tenuados por la presencia de las capacidades entre fases y por el amortiguamiento del circuito oscilante. Pero las sobretensiones producidas alcanzan valores que están comprendidos entre 3.5 y 4.5 veces la tensión nominal y son como consecuencia muy peligrosas para los aislamientos ya que sobrepasan los límites de seguridad de estas - que, como sabemos, está evaluado en el doble de la tensión de servicio.

6.2. ARCO DEBIDO A UNA FALLA A TIERRA EN BARRAS O TERMINALES DE SALIDA, DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA

A primera instancia veremos el comportamiento de la corriente de falla a tierra en las condiciones de pre-arco. La figura 49 pt.a.b. nos ilustra un sistema con el neutro puesto a tierra sólidamente y además la fase "b" es puesta a tierra francamente, por consiguiente obligará a circular una corriente de tierra I_g por el circuito equivalente es más, esta corriente es igual a la corriente de una falla $3I_0$ bajo la condición que no exista resistencia en el terreno.

o sea

$$I_g = I_{3\phi} = I_{\text{eficaz}} \quad \text{cuando } Z_g = 0$$

$$E_{\text{pico}} = \sqrt{2} E_n$$

Donde

E_n = tensión de fase en el secundario.

A continuación en la figura 49 pt.b., nos ilustra el comportamiento senoidal de la tensión y corriente de falla al pre-arco, donde vemos que una atraza a la otra en 90° eléctricos.

Supongamos que tenemos un sistema de baja tensión de 480 voltios y de una capacidad nominal de 1000 KVA, trataremos de mencionar sintéticamente las tensiones y corrientes senoidales.

De la tabla 3 pt. de la sección 4 obtenemos

$$I_g = I_{3\phi} = 20,000 \text{ Amperios para } Z_g = 0$$

entonces:

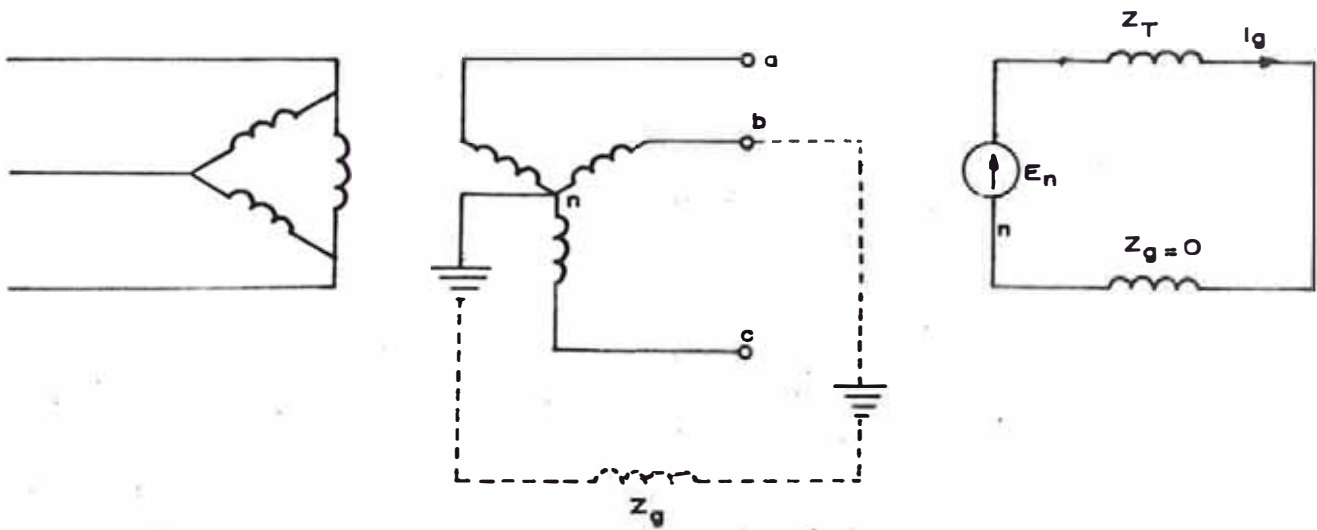
$$E_n = \frac{480}{\sqrt{3}} = 277 \text{ voltios}$$

$$E_{\text{eficaz}} = 277 \text{ voltios}$$

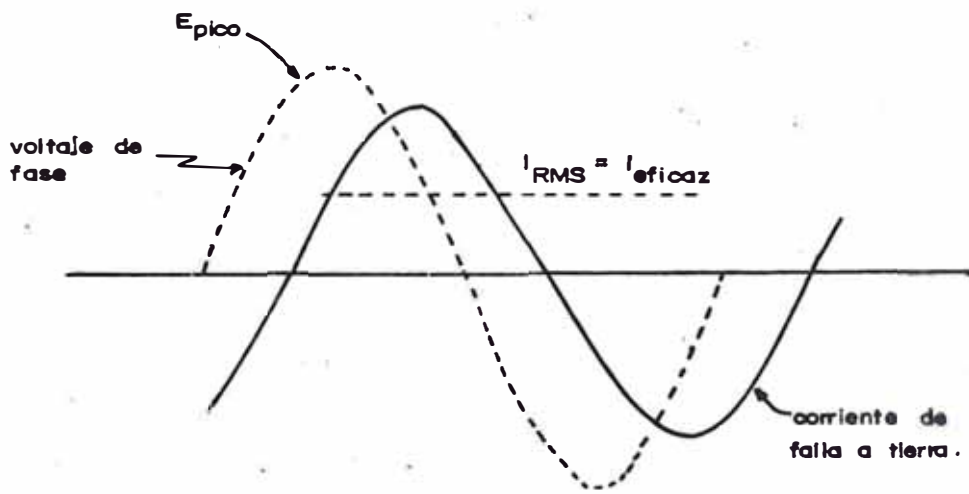
$$E_{\text{pico}} = \sqrt{2} \cdot 277 = 390 \text{ voltios}$$

$$I_{\text{eficaz}} = 20,000 \text{ amperios.}$$

Finalmente el arco puede ser simulado entre los termi -

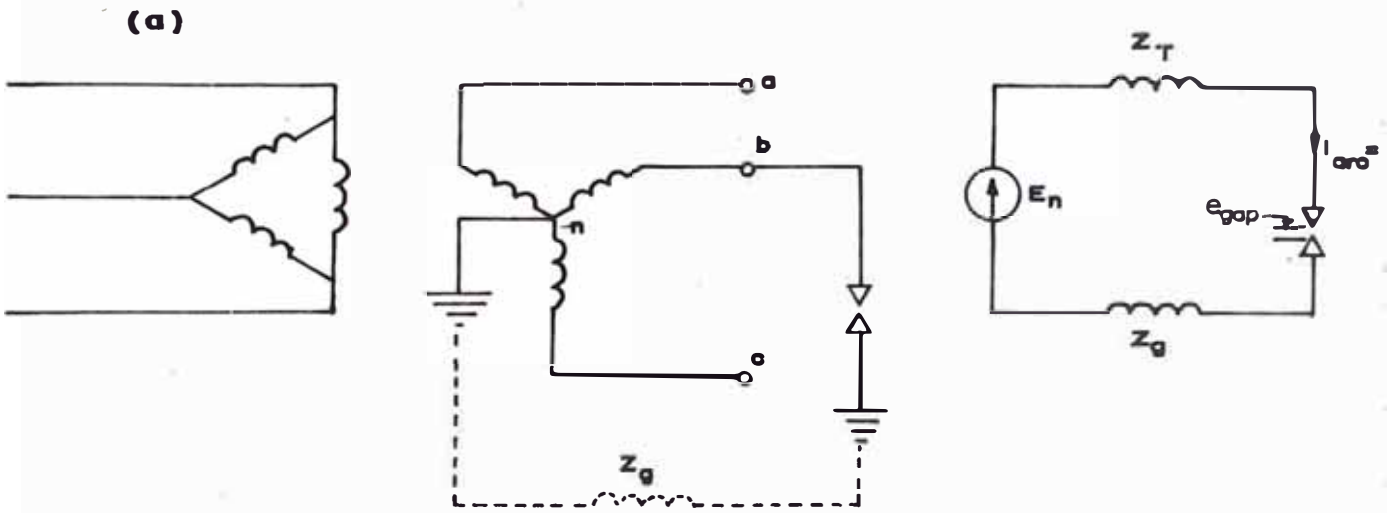


(a)



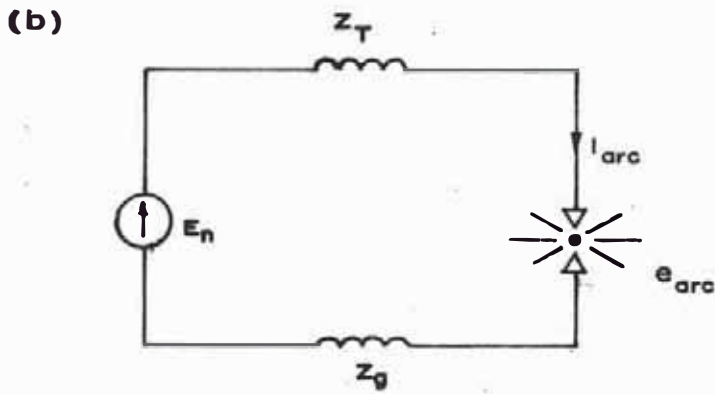
(b)

Fig. 49 pt.- COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA (PRE-ARCO)



circuito simulativo al ocurrir el arco.

e_{gap} = tensión que aparece en los terminales simulados antes del destello.



$$e_{gap} \approx 9.6 \% E_{pico}$$

e_{arc} = tensión de arco

$$I_{arc} \approx 38 \% I_{3\phi}$$

$$e_{arc} \approx 49 \% E_n$$

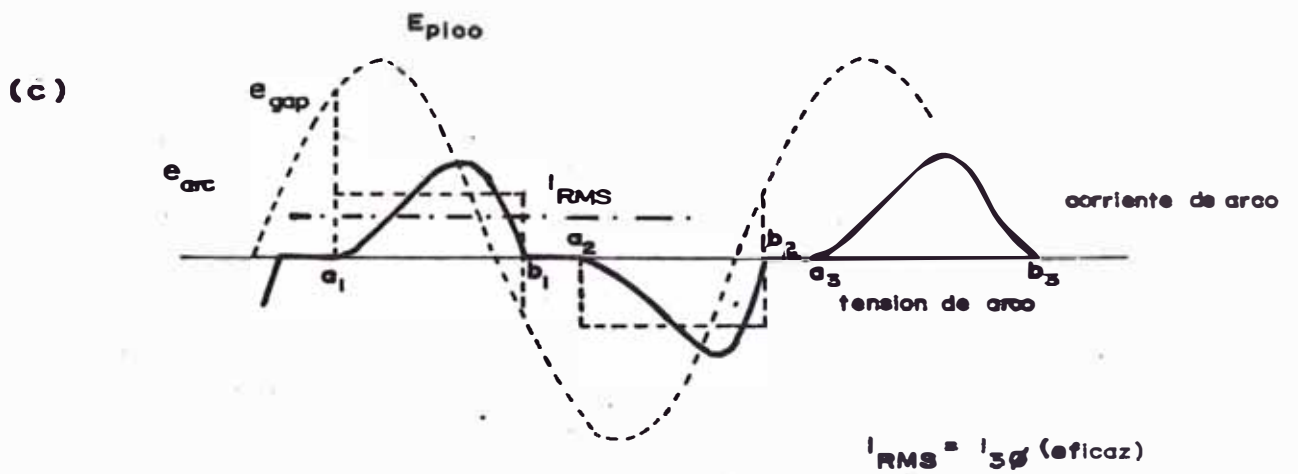


Fig. 50 pt.- COMPORTAMIENTO DEL PRE-ARCO, Y DE LA CORRIENTE NO SENOIDAL DEL ARCO ESTABLECIDO.

terminal es de fase y tierra, véase figura 50 pt.a. Antes de formarse el arco o antes del destello luminoso aparecerá una tensión entre fase a tierra que la llamaremos tensión en los terminal es (\mathcal{E}_{gap}), esta tensión es instantánea, y es más en ese instante no circulará corriente alguna ($I_{\text{gap}}=0$). La tensión en los terminal es de baja y media tensión puede llegar aproximadamente a 1.35 veces la tensión de fase, por otro lado una vez que aparece el destello en ese instante habrá una tensión de arco (\mathcal{E}_{arc}) véase figura 50 pt.b y es más, aparecerá la corriente de arco (I_{arc}) debido a que ya existe una resistencia de arco (R_{arc}) entre los terminal es simulados; esta resistencia puede ser calculada aproximadamente por la siguiente expresión :

$$R_{\text{arc}} = \frac{8,750 L}{I_{\text{arc}}^{1.4}} \quad (\text{ohm})$$

donde:

L = Longitud del arco en pies.

Debemos tener presente que para que aparezca el arco, \mathcal{E}_{arc} debe ser menor que \mathcal{E}_{gap} ó de lo contrario que existe una resistencia eléctrica debido al destello.

La tensión del arco en baja y media tensión puede llegar a un 49% de la tensión de fase, y una corriente de arco de aproximadamente del 38% de la corriente de falla 3 ϕ

TABLA 4pt.a.- CORRIENTE DEL ARCO EN BAJA TENSION, EN FUNCION DE LA CORRIENTE DE FALLA.

TIPO DE FALLA	VOLTAJE DEL SISTEMA	
	480/ ₂₇₇ V	208/ ₁₂₀ V
FALLA 3Ø ENTRE LINEAS	89 %	12 %
FALLA 2Ø ENTRE LINEAS	74 %	2 %
FALLA 1Ø A TIERRA	38 %	0 %

TABLA 4pt.b.- CORRIENTE DEL ARCO EN BAJA TENSION EN FUNCION DE LA CORRIENTE NOMINAL DEL SISTEMA. (SEGUN EL TIPO DE PROTECCION)

	AJUSTE IX 15 - 25X		
	480 V	208 V	
Fusibles {	Arcos debido a una falla 3Ø	13 - 23 X	2 - 3 X
	Arcos debido a una falla L-L	11 - 19 X	3 - 5 X
	Arcos debido a una falla 1Ø a tierra.	5½ - 9½ X	0
Relés {	Sugerencia del ajuste cuando se tiene trip rapidos (En casos de fallas entre fases)	7½ - 12½ X	1 - 2 X
Relés {	Sugerencia del ajuste cuando se tiene trip rapidos (En casos de tener una falla 1Ø a tierra)	3½ - 6 X	—

A continuación mostraremos dos tablas orientativas del porcentaje de la corriente del arco en función de la corriente de falla 3ϕ y de la corriente nominal del sistema. ~~esta~~ última tabla nos ayudará a elegir los interruptores de protección según la potencia de ruptura (véase tablas 4 pt.a,b). A continuación la figura 50 pt.c. nos muestra el comportamiento de la tensión y corriente de arco, donde vemos que las ondas no son senoidales como las anteriores, sino que son discontinuas, es decir uniforme, debido al fenómeno explicado, y estas se repiten cada ciclo, es más la corriente del arco se inicia cuando la tensión del arco es del 49% En.

6.3. ARCO DEBIDO A UNA FALTA A TIERRA, EN BARRAS O TERMINALES DE UN GENERADOR TRIFASICO

El circuito de la figura 51 pt.a. nos ilustra el fenómeno del inicio y duración del arco eléctrico, y además el circuito equivalente de un generador 3ϕ . El generador es puesto a tierra a través de un reactor de reactancia grande en comparación con la del generador y es más, se asume un arco debido a una falla a tierra en los terminales de dicho generador. Si para este propósito de discusión las fases sanas tienen poca alteración en el circuito, entonces

podemos reducir el circuito , al de la figura 51 pt.b; - en este circuito simplificado, la corriente de falla retrasa 90° eléctricos al voltaje generado.

Ahora si el arco es extinguido en el instante en que la corriente pasa por cero como se muestra en la figura 51 p t.c, el voltaje en el punto de falla no es ligeramente el mismo del estado normal , pero si oscila alrededor de él , y es más llega a una cresta de dos veces el voltaje de fase, en un semiperiodo en alta frecuencia de oscilación, y después el arco se extingue.

Durante la falla el voltaje en el reactor es aproximadamente el mismo que el generado, debido a que se ha asumido que la reactancia del reactor es mayor que la del generador, luego en el instante en que el arco empieza a extinguirse el voltaje a través del reactor es aproximadamente igual al voltaje de cresta del generador. Después que el arco es totalmente extinguido y el sistema vuelve a su estado estable, el voltaje a través del reactor es cero. Ahora si el arco en lugar de extinguirse se enceba, el voltaje a través del reactor es el 300% del voltaje generado, véase figura 51 pt.d.

Por último, si el neutro del generador está puesto a tierra, a través de una resistencia, el factor de potencia del

circuito de falla es aproximadamente la unidad, los voltajes en la resistencia y en el interruptor de protección si lo hubiera, sería el mismo en cada instante, véase figura 52 pt.a,b., es más la corriente y voltaje de extinción están en fase. Además en la resistencia no aparece voltaje alguno en el momento que el arco es apagado o cortado, a causa de no fluir corriente, en ese instante la oscilación del voltaje en la resistencia será cada vez de poca amplitud hasta perderse en el eje.

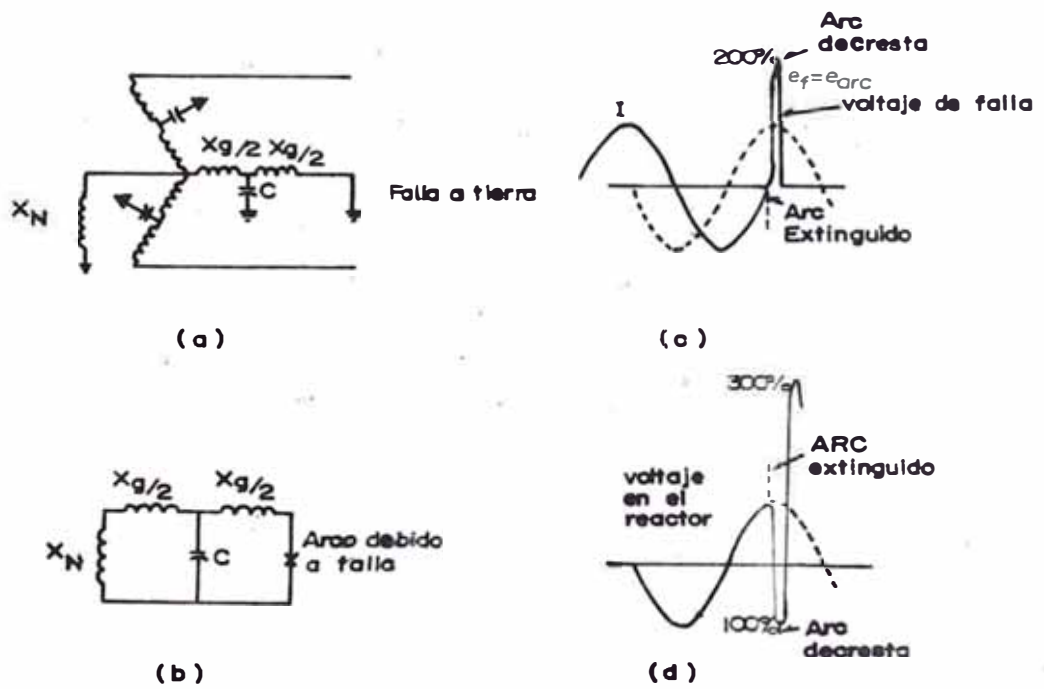


Fig. 51 pt.- PROCESO DE LA FORMACION DEL ARCO EN UN GENERADOR 3Ø PUESTO A TIERRA A TRAVES DE UN REACTOR.

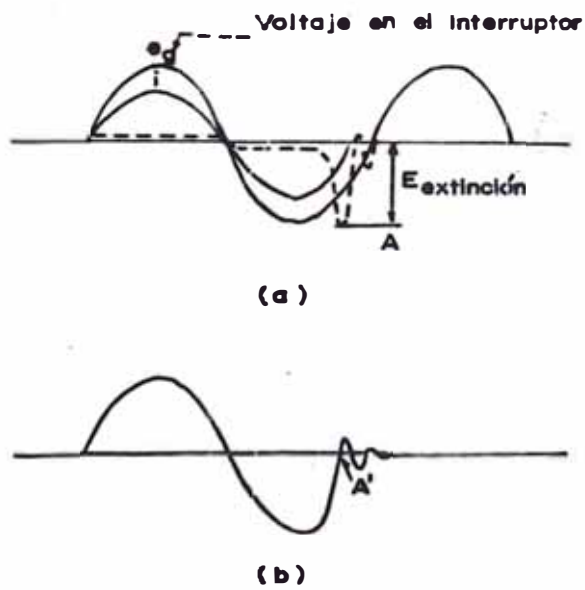


Fig. 52 pt.- TRANSITORIOS PRODUCIDOS CUANDO SE TIENE UNA PUESTA A TIERRA A TRAVES DE UNA RESISTENCIA.

SECCION VII

7 . SISTEMAS DE PROTECCION PARA FALLAS A TIERRA

Los dispositivos de protección contra fallas a tierra tienen por finalidad de registrar de forma selectiva las averías y separar las partes de la red defectuosas. Además, sirven para limitar las sobre intensidades y los efectos de los áreos.

Todo dispositivo de protección transmite la orden de disparo a los interruptores conectados al sistema. Por efecto de dicha orden se inicia la interrupción en el interruptor a través del disparador, los contactos se desplazan y se extingue el arco establecido, al separarse los contactos. ~~Además~~ de los dispositivos de protección propia - mente dichos, en los sistemas de protección para fallas a tierra, se utilizan otros dispositivos que cumplen funciones complementarias tales como la señalización de

la fase fallada por medio de una bocina , o avisos ópticos.

Hay dispositivos utilizados en instalaciones industriales que no están construidos para soportar altas tensiones ni elevadas intensidades (relés). Además estos aparatos deben estar aislados de las altas tensiones para prevenir desgraciados accidentes entre el personal encargado de su vigilancia. Por estas razones, los aparatos de medida, y en especial los de protección se conectan a través de los transformadores de medida. Para el presente trabajo tocaremos lo relacionado a los transformadores de corriente, que nos sirve para la alimentación de los relés de puestas a tierra.

7.1. TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

Estos son transformadores de baja potencia cuyos primarios están intercalados en la línea , mientras que los arrollamientos secundarios quedan en corto circuito a través de los aparatos de protección.

Los circuitos de protección quedan separados de la ten-

si3n del primario, protegi3ndose as3 los sistemas de protecci3n contra sobrecargas de acuerdo con el comportamiento de sobreintensidad de los transformadores. Por el peligro que altas tensiones implican para el personal de servicio, los transformadores de corriente nunca deben funcionar con el circuito secundario abierto, debido a que se origina una elevada tensi3n inducida en los terminales del secundario.

7.1.1. Formas Constructivas de Los Transformadores de corriente

Los transformadores de corriente destinados a conectar aparatos de protecci3n (GSR), s3lo deben presentar pequenos errores de transformaci3n en caso de sobreintensidad. Por este motivo, los n3cleos de protecci3n consisten de otros tipos de hierro diferentes a los usados en los n3cleos de medida, y poseen un alto 3ndice de sobreintensidad nominal.

Se distinguen dos formas constructivas de los transformadores de corriente para detectar fallas a tierra, aquellos cuyo arrollamiento primario esta formado por un so-

lo conductor (de hilo pasante), y aquellas con devanados en el primario.

7.1.2. Transformadores de Corriente de Hilo Pasante o de Barra

rra

En estos transformadores el conductor primario atraviesa el núcleo en línea recta, sin formar ningún bucle y, para efectos de relación de transformación se cuenta como una sola espira. Como para una potencia secundaria dada, el número de espiras del primario queda fijado forzosamente, si se supone constante la corriente secundaria, el número de espiras es grande para una pequeña corriente primaria, y disminuye al crecer ésta. Por lo tanto, el campo propio de aplicación del transformador de intensidad de barra es el de las elevadas corrientes. También puede emplearse para pequeñas corrientes, siempre que se admita una mayor inducción en el núcleo con lo que disminuye el aparato.

7.1.3. Transformadores de Corriente con devanado en el primario

rio

Si se desea un transformador de corriente para pequeñas-

corrientes, resistente al corto circuito, y con pequeños errores de medida, hay que elegir el tipo constructivo provisto de varias espiras en el primario : Un tipo muy utilizado, sobre todo para bajas tensiones, es el transformador de corriente de núcleo rectangular; sobre uno de los lados del núcleo de hierro está el arrollamiento secundario, hay un cilindro aislante cuyas dimensiones dependen de la tensión de servicio.

7.1.4. Índice de sobreintensidad nominal

El índice de sobreintensidad nominal de un transformador de corriente es el múltiplo de la intensidad nominal del primario (I_{1n}), con el cual el error de intensidad (F_1) es igual a -10%, en caso de carga nominal.

$$n = \frac{I_{2n}}{I_{1n}}, \quad \text{o} \quad n = \frac{V_{\text{sat}}}{V_{\text{trab}}}$$

En los transformadores destinados a la alimentación de relés de puesta a tierra, es preferible una cifra de sobreintensidad de :

$$n > 5 \text{ - - - - - } 10$$

Cabe notar que un transformador de corriente saturado, o-

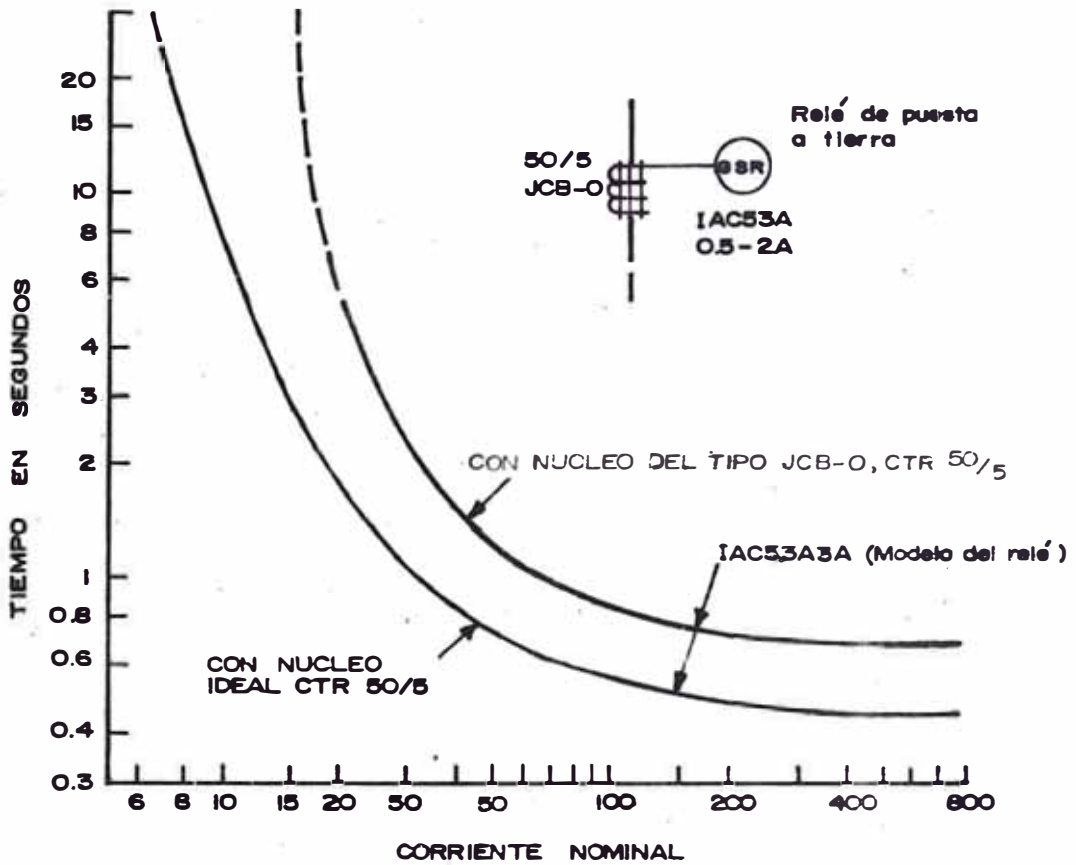


Fig. 53 pt.- EFECTO DE LA SATURACION DE UN C.T. EN LA OPERACION DE UN RELE DE PUESTA A TIERRA.

bliga a variar los tiempos de operación de los relés de puesta a tierra, debido a que en este se introduce una elevada corriente de excitación por el primario. A continuación mostraremos en la figura 53 esta problemática, donde existen dos transformadores de corriente uno saturado y el otro no lo está, que alimentan a un relé de puesta a tierra (GSR), y se ve la diferencias de tiempos de operación del mismo.

7.1.5. Error de Intensidad (Fi)

El error de intensidad se debe a la saturación del núcleo, y proporciona en los transformadores de núcleos de medida una protección de los aparatos de protección en caso de sobreintensidades.

$$F_i = \frac{I_2 K_n - I_1}{I_1} \times 100\%$$

donde:

I_1 , I_2 = corrientes del primario y secundario respectivamente.

K_n = relación de transformación nominal.

7.1.6. Potencia Nominal (S_n)

Se llama potencia nominal de un transformador de corriente a la potencia con la cual se pueden cargar sin que ésta

sobrepase el valor límite correspondiente a su clase - de precisión, esta potencia está expresada en VA.

$$S_n = Z_n I_{2n}^2$$

I_{2n} = corriente nominal en el secundario (amperios)

Z_n = carga nominal en el secundario (ohms)

7.1.7. Carga Nominal (Z_n)

La carga efectiva se compone del consumo de los reles conectados y del consumo de los conductores de conexión que une dichos reles con los transformadores de corriente (Véase Tabla 5 pt.b). A continuación pondremos un ejemplo ilustrativo de la utilización de los factores mencionados.

Se tiene un relé de sobre corriente a tierra de 5 amperios y 5 VA de consumo, alimentados por transformadores de corriente de 1000/5. Hállase la potencia nominal del transformador, la carga nominal, para una corriente de tierra de 450 amperios.

$$I_g = 450 \times \frac{5}{1000} = 2.25 \text{ amp.}$$

$$\frac{I_g}{I_{2n}} = \frac{2.25}{5} = 0.45$$

TABLA 5pt.a.- VALORES DE POTENCIA NOMINAL E INDICES DE SOBREINTENSIDAD DE LOS T.C. SEGUN VDE.

	CLASE	POTENCIA NOMINAL VA	INDICE DE SOBREINTENSIDAD NOMINAL
NUCLEOS DE COMPUTO Y DE MEDIDA.	0,2	5 10 15	n < 10 ó n < 5
	0,5	5 10 15 30	
	1 ¹⁾	5 10 15 30 60	
	0,2G	5 10	n < 20 ó n < 10
	0,5G	5 10 15	
	1G ¹⁾	5 10 15 30	
NUCLEOS DE PROTECCION	1 ó 3	5 10 15 30 60	n < 10 ó n < 5
	1G ó 3G	5 10 15 30	

1) No para fines de facturación

TABLA 5pt.b.- CONSUMOS DE ALGUNOS RELES DE PROTECCION.

APARATOS	(CONSUMO DE POTENCIA ¹⁾)		Indice de sobreintensidad necesario en los transformadores de intensidad
	por cada circuito amperimetrico VA	por cada circuito voltimetrico VA	
Reles de sobreint. y protec. contra sobreint. con reles de tiempo para corriente cont.	1		n > 5
Protec. sobreint.- tiempo, reles tiempo para corriente alt.	15		n > 5
	30		n > 10
Protec. sobreint.- tiempo en caso de disp. por corriente del transf.	60		n > 5
	30		n > 10
Proteccion contra sobrecargas y cortocircuitos.	60		n > 5
	8	10	n > 5
Reles direc. de potencia.			
Reles de protec. dif. con transf. inter. y sin linea de acometida.	15 a 30		n > 5
Protec. distanciad. con accion. por corriente alt.	30		n > 10
Reles bimetalicos	1 a 10		n > 10

1) Valores de orientacion; los valores exactos se tomara de los catalogos correspondientes de los fabricantes.

$$Z_n = \frac{\text{consumo del rele}}{I_g^2} = \frac{5}{(2.25)^2} = 0.982 \text{ ohm.}$$

$$P_n = Z_n I_{2n}^2 = 0.982 \times 5^2 \approx 25 \text{ VA.}$$

7.2. FILTROS DE CORRIENTE Y DE TENSION PARA SISTEMAS TRIFASICOS de 3 y 4 HILOS

Existen relés de puestas a tierra que son sensibles a determinadas corrientes y tensiones de secuencia, es así que existen relés que son sensibles a la corriente o tensión homopolar como también los hay a la corriente o tensión de secuencia positiva en caso de fallas entre líneas; por consiguiente se necesitan modelos de conexiones de transformadores de corriente o de tensión que sean capaces de proporcionar la corriente o tensión filtrada necesaria para la operación de los relés correspondientes.

7.2.1. Filtros de Corriente (Acoplamiento Holmgren)

En este acoplamiento se detecta la corriente homopolar debido a fallas monofásicas a tierra, por medio de transformadores de corriente, ya sea de hilo pasante o con primario devanado. En este acoplamiento se debe tener en cuenta que la carga secundaria en las tres fases (R), no deben sobrepasar la relación 1:3, para evitar una corrien-

te de error en el circuito homopolar (R_f), teniendo en cuenta además la impedancia del devanado del secundario de los transformadores de corriente. De la figura 54 pt.a, suponemos una falla a tierra en cualquiera de las fases en un sistema con neutro a tierra, y además la carga homopolar podría ser la bobina de un rel sensible a la corriente homopolar, y las otras cargas la bobina de un rel sensible a la corriente de secuencia positiva; por el concepto de componentes simétricos tenemos

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

$$I = I_a + I_b + I_c$$

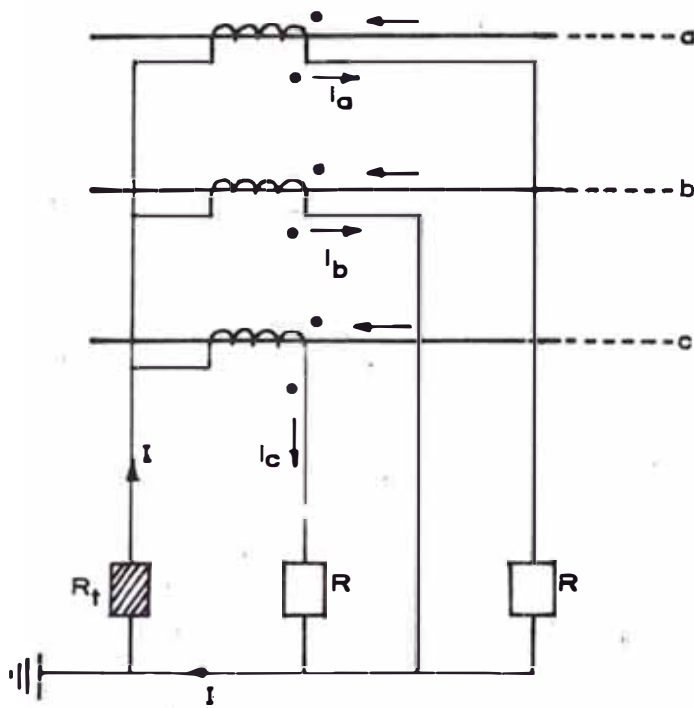
$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$$

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

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

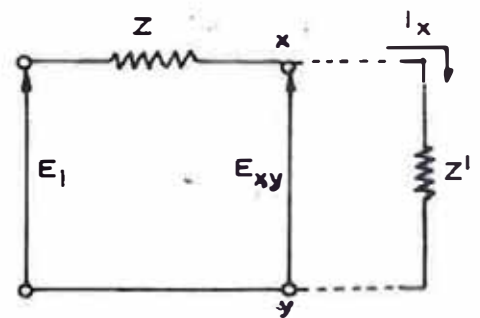
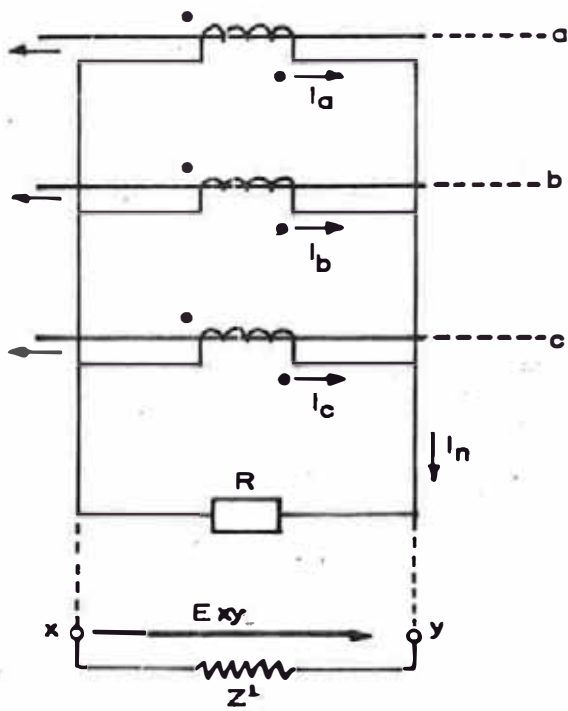
sumando:

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



R_t = Relé de sobrecorriente a tierra
 R = Relé de sobrecorriente entre líneas

Fig. 54 pt.a.- FILTRO DE CORRIENTE EN CONEXION HOLMGREEN



circuito equivalente

Fig. 54 pt.b.- FILTRO DE CORRIENTE EN CONEXION PARALELO

y

$$a = 1 \angle 120^\circ, \quad a^2 = 1 \angle -120^\circ$$

tenemos :

$$I = 3 I_{a0} = 3 I_{b0} = 3 I_{c0}$$

se concluye que con este tipo de filtro la corriente de secuencia cero circula a través de la carga homopolar.

7.2.2. Filtros de corriente en conexión Delta-Abierto

Esta conexión de los transformadores de corriente de hilo pasante es la más usada en la actualidad, porque se adecúan a su uso los reles estáticos de protección (PSG), - debido a que los transformadores de corriente de hilo pasante ofrecen menos contenidos de armónicas o componentes continuas en la alimentación del rele de estado sólido en caso de transitorios leves.

El diseño está basado en la medida de la corriente de tierra en cualquiera de las tres fases para un sistema 3 ϕ , motivando a la suma vectorial de las tensiones en el secundario y obteniéndose una tensión medible en el delta-abierto.

El sistema 3 ϕ de tres hilos de la figura 55 pt está balanceado, por consiguiente se origina una tensión en el delta-abierto (V_1) igual o aproximadamente igual a cero, debi-

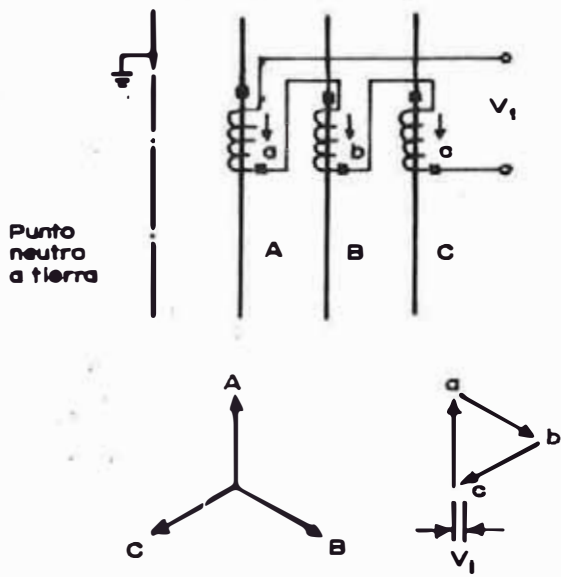


Fig. 55 pt. CARGA BALANCEADA 3 ϕ DE 3 HILOS EN ESTADO ESTABLE ($V_1 \neq 0$)

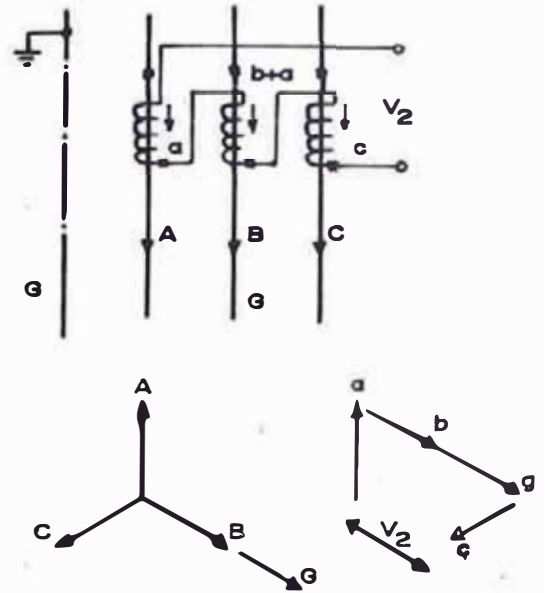


Fig. 56 pt. ESTADO INESTABLE DEBIDO A UNA FALLA A TIERRA EN UN SISTEMA 3 ϕ DE 3 HILOS ($V_2 \neq 0$)

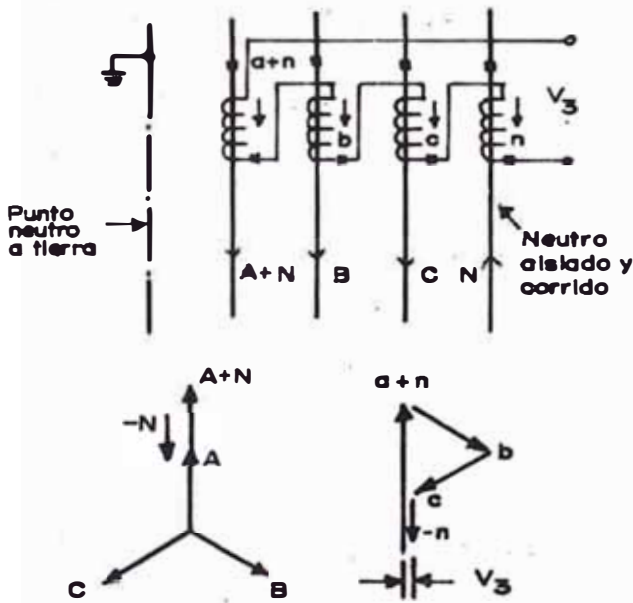


Fig. 57 pt. SISTEMA DESBALANCEADO (LINEA A NEUTRO) 3 ϕ DE 4 HILOS EN ESTADO ESTABLE ($V_3 \neq 0$)

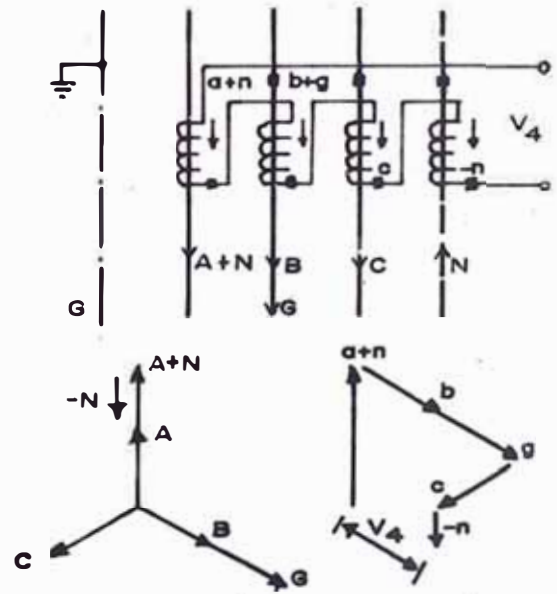


Fig. 58 pt. ESTADO INESTABLE DEBIDO A UNA FALLA A TIERRA EN UN SISTEMA 3 ϕ DE 4 HILOS ($V_4 \neq 0$)

do a que la suma vectorial de las corrientes en el secundario es aproximadamente cero, pero, si los voltajes en el secundario están desfasadas 120° ; es más el voltaje V_1 es medido entre el vector "a" y el vector "c".

Si ocurriese una falla en la fase "B", aparecerá en este una componente adicional de la corriente de tierra (véase la figura 56 pt.), y retornará a través del neutro puesto a tierra. Del diagrama vectorial vemos que la corriente aumenta en dicha fase afectada y la tensión en el delta-abierto aumentará, en comparación cuando el sistema estaba estable a un valor V_2 .

Por otro lado si el sistema es 3ϕ y de cuatro hilos ya no se comportaría como un sistema balanceado debido a que por el neutro circula una corriente diferente a las corrientes de línea como $(A + IN)$, pero en estado estable siempre aparecerá una tensión V_3 igual o cercana a cero, medida en el delta-abierto debido a que es compensada por la corriente $(-N)$, y en caso de falla, la tensión en el delta-abierto aumenta hasta un valor V_4 (Ver las figuras 57 pt. y 58 pt.)

7.2.3. Filtros de tensión en conexión Estrella-Serie

Existen relés de sobrecorrientes a tierra que son sensibles a la tensión homopolar, por consiguiente es ne-

cesario crear esta tensión valiéndonos de tres transformadores de tensión o utilizando transformadores trifásicos de cinco columnas, pero lo más común es utilizar tres transformadores de tensión en conexión estrella-serie, porque con esta conexión se obtiene un filtrado óptimo y económico, véase figuras 59 pt.a, b, c, de la primera figura obtenemos lo siguiente

$$E_o = \frac{E_a + E_b + E_c}{3}$$

$$I_x = \left(\frac{E_o}{N}\right) \frac{3}{Z'} \quad , \quad E_{xy} = Z' I_x = \frac{3}{N} E_o$$

$$E_i = \left(\frac{3}{N}\right) E_o$$

donde:

E_o = Tensión homopolar

$E_a ; E_b ; E_c$ = Tensiones de fase

Z' = Impedancia del relé de secuencia cero.

N = Relación de transformación del Banco de transformadores de tensión.

7.3. DISPOSITIVOS DE PROTECCION PARA FALLAS MONOFASICAS

A TIERRA

Los cortocircuitos constituyen uno de los defectos más importantes susceptibles de afectar a las instalaciones indus

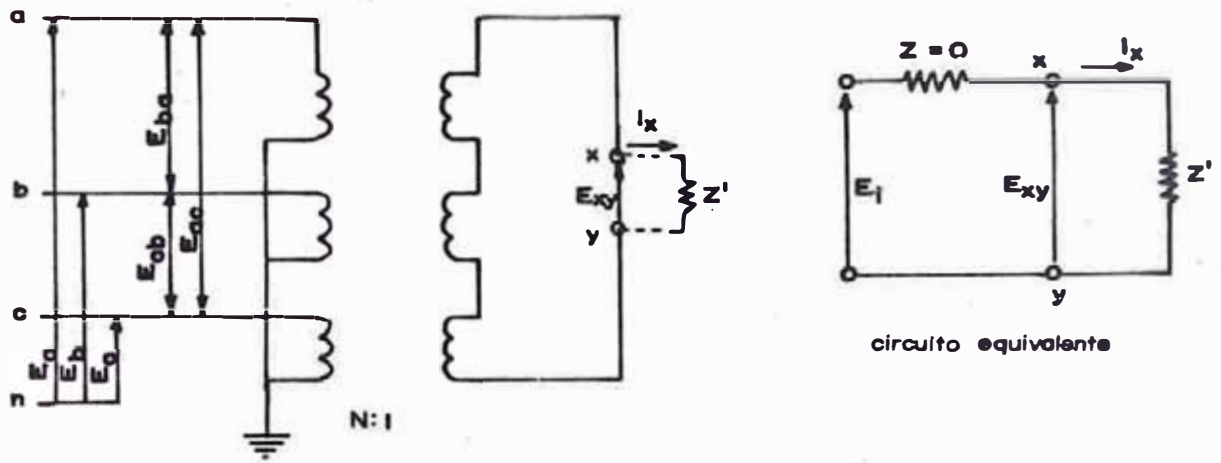


Fig. 59.pt.a.- FILTROS DE TENSION EN CONEXION ESTRELLA - SERIE (3 x 10)

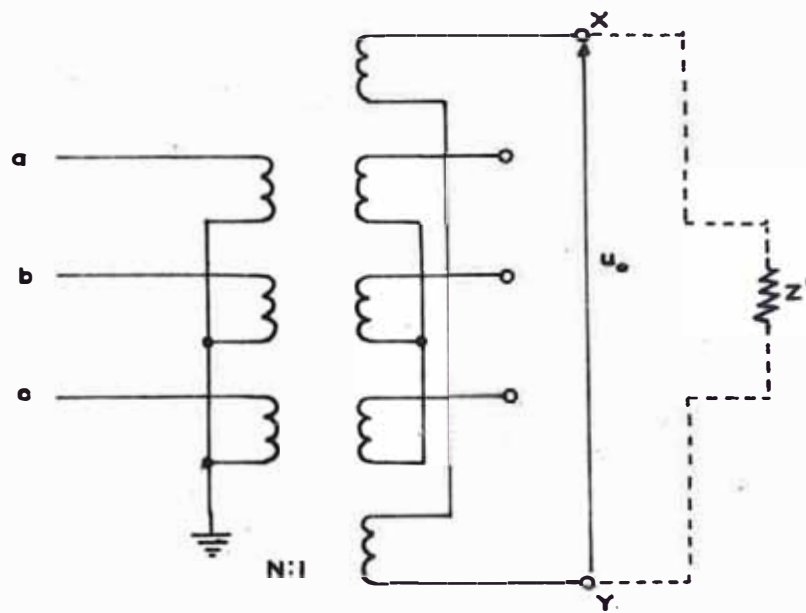


Fig. 59pt.b.- FILTROS DE TENSION A TRAVES DE UN TRANSFORMADOR 3Ø DE 5 COLUMNAS.

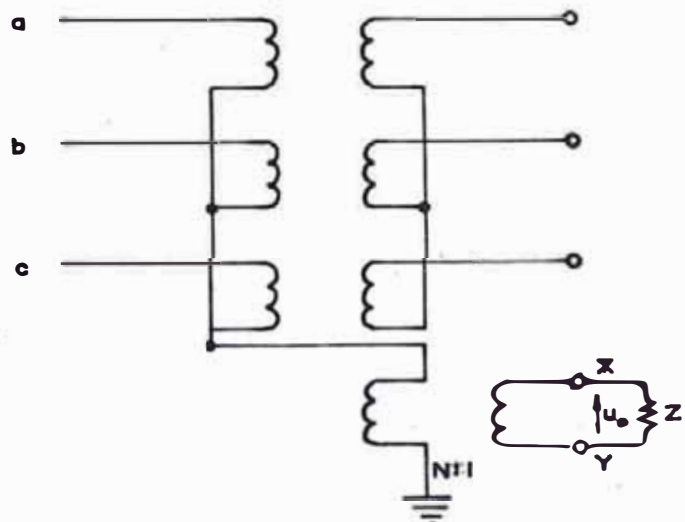


Fig. 59pt.c.- FILTROS DE TENSION EN CONEXION ESTRELLA - ESTRELLA (3 x 10 + 10)

trial es. En el curso de los años han aparecido un importante número de sistemas de protección desde los fusibles, hasta las protecciones con relé de estado sólido. Por causa de la configuración de los sistemas y de las sucesivas elevaciones de las tensiones de servicio y de las potencias de corto circuito, cada vez se exigen tiempos de desconexión más cortos para los dispositivos de protección.

En los sistemas cuyo neutro está puesto a tierra, directamente o a través de una pequeña resistencia; en caso de falla a tierra, aparece una corriente de defecto que representa todas las características de un cortocircuito; estos defectos denominados también cortocircuitos a tierra están detectados por dispositivos similares a los utilizados para cortocircuitos polifásicos. Por el contrario en caso de tener el sistema el neutro aislado, la corriente de defecto es muy débil, y para su detección se precisan otros dispositivos de protección.

En la ejecución trifásica del dispositivo de apertura, los relés destinados a detectar los cortocircuitos entre fases, detectan también los cortocircuitos por puestas a tierra, sin embargo, para ciertos casos especiales se precisa prever una disposición separada contra los -

corto circuitos por puestas a tierra. Por ejemplo, esto resulta indispensable cuando se desea aumentar la sensibilidad de detección de estos corto circuitos para protecciones por impedancia, o cuando debe determinarse exactamente el lugar de defecto.

El objeto de los dispositivos de protección contra los corto circuitos es el dejar fuera del servicio la red defectuosa. Es más, estos dispositivos de protección según su funcionamiento deben tener las principales exigencias

- Fiabilidad
- Sensibilidad
- Rapidez
- Selectividad.

7.3.1. Relé de sobrecorriente a tierra de acción diferida (GSR)

Se denomina también relés temporizados. Estos relés tienen un dispositivo de temporización de tal forma, que el relé entra en funcionamiento después de cierto tiempo de haber alcanzado la magnitud eléctrica controlada (corriente) de su valor de funcionamiento.

A su vez los relés de acción diferida pueden ser

- a) Rel es de retardo independiente (A tiempo fijo).

En estos rel es la temporización es siempre la misma, cualquiera que sea su valor de la magnitud a medir que provoca el funcionamiento del rel e. Por ejemplo veamos en la figura 60 pt.a, la característica de funcionamiento de un rel e de retardo independiente. La corriente nominal del rel e es I_r y su tiempo propio de funcionamiento es T_r , si existe una falla a tierra el rel e entra en funcionamiento después de transcurrido el tiempo $T_r + T_1$, siendo la temporización del rel e.

- b) Rel es de retardo dependiente (atiempo inverso).

Estos rel es no tienen temporización fija, sino que varía con el valor de la magnitud eléctrica que controla el rel e. Casi siempre son de tiempo inverso, es decir que la temporización es inversamente proporcional al valor de la magnitud controlada (corriente). En la figura 60 pt.b, se ha representado las características de funcionamiento de un rel e de retardo de -

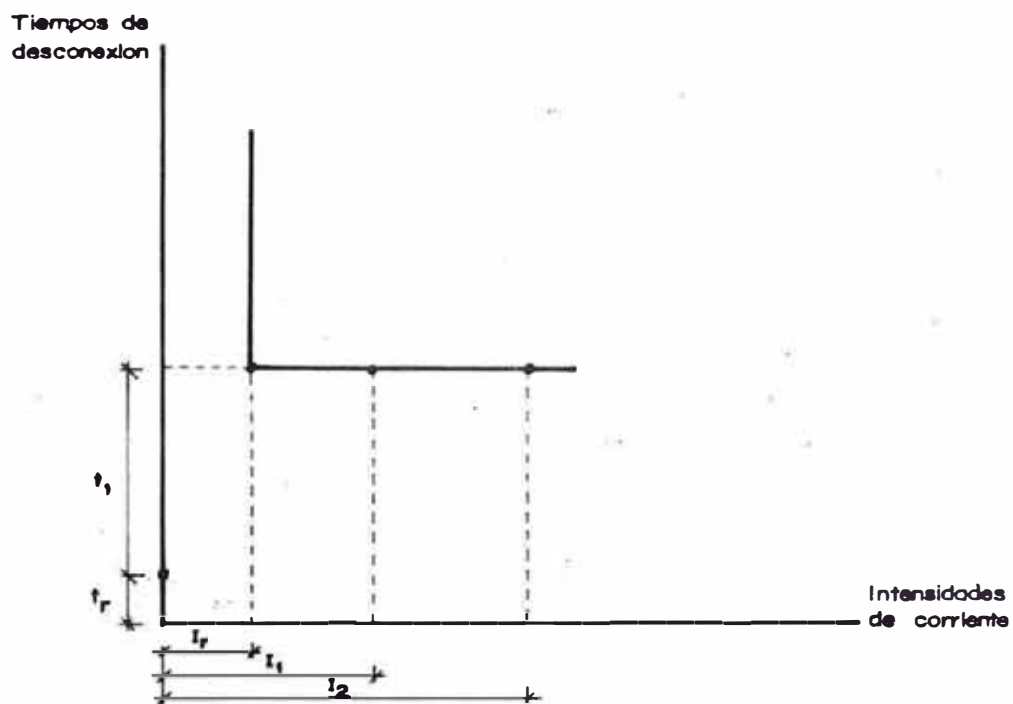


Fig. 60pta.- CARACTERISTICA DE FUNCIONAMIENTO DE UN RELE ELECTROMECHANICO DE RETARDO INDEPENDIENTE (FIJO)

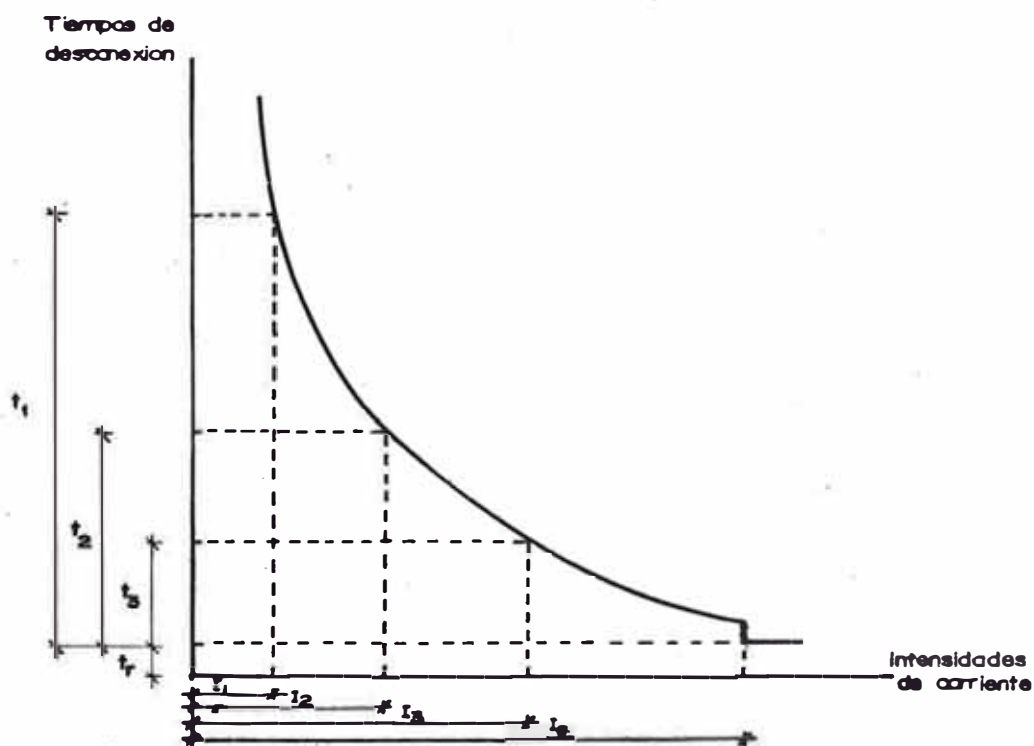


Fig. 60pt.b.- CARACTERISTICA DE FUNCIONAMIENTO DE UN RELE ELECTROMECHANICO DE RETARDO DEPENDIENTE (INVERSO)

pendiente de máxima corriente a tierra.

En los relés de retardo independiente como los dependientes son secundarios y sensibles en este caso a la corriente homopolar, y son muy usados en sistemas industriales de baja y media tensión ya sea para circuitos 3Ø de tres o cuatro hilos, su alimentación se hace a través de un filtro en conexión homgreen, véase figura 61 pt.- Finalmente daremos las conexiones típicas de estos relés en los sistemas trifásicos de tres y cuatro hilos respectivamente, teniendo presente una configuración de interconexión de dos circuitos a proteger contra puestas a tierra (ver figura 62 pt.)

7.3.2. Relés Estáticos (PSG)

También llamados relés estáticos de potencia, se diferencian de los anteriores porque no tienen elementos electromecánicos, sino que su elemento de medida está constituido por elementos inmóviles transitorizados o de estado sólido. Con este relé se puede obtener perfectamente tiempos de repuestos inferiores a medio período, aún para relés con varias magnitudes de influencia. Además, el reenganche de estos relés también es rápido. Como se expresa en el esquema de la figura 63 pt., cada relé de

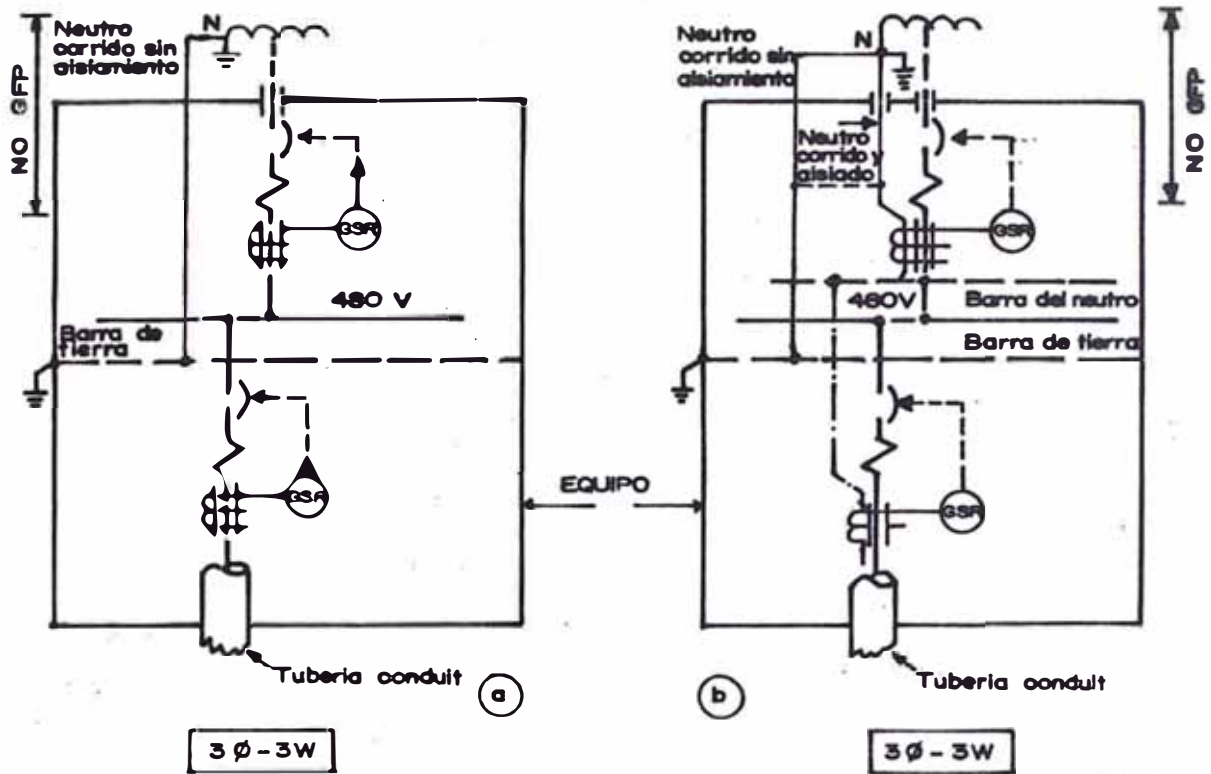


Fig. 61 pt. a.b.- IMPLEMENTACION DEL RELE DE PUESTA A TIERRA (GSP) CON ACCION DIRECTA A LOS TRIPS (SISTEMA 480V)

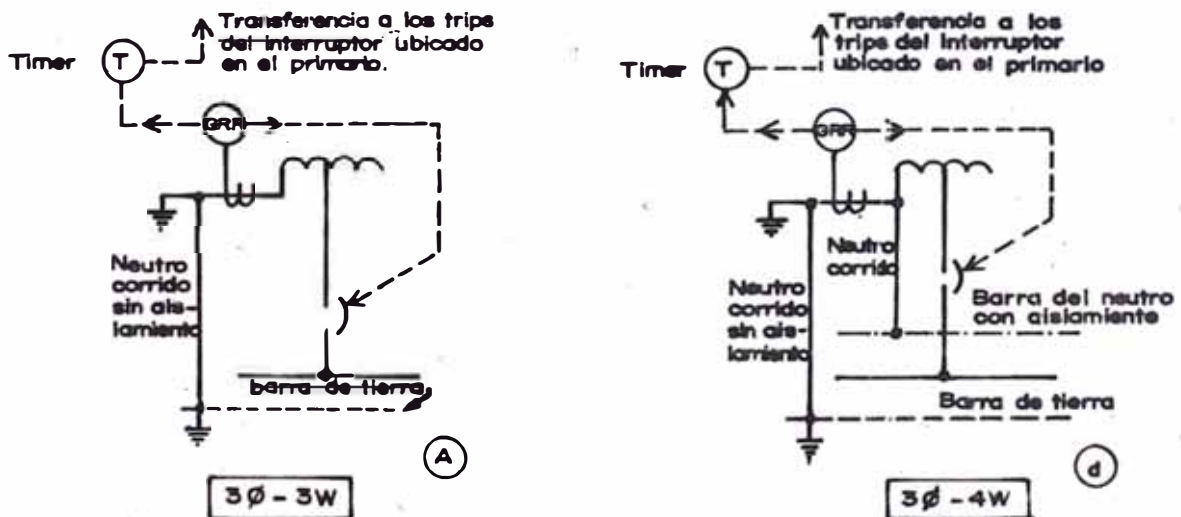


Fig. 61 pt. c.d.- IMPLEMENTACION DEL RELE DE PUESTA A TIERRA (GRR) CON ACCION DIRECTA AL INTERRUPTOR DEL SECUNDARIO, Y CON LOS TRIP DEL PRIMARIO (SISTEMA 480 V)

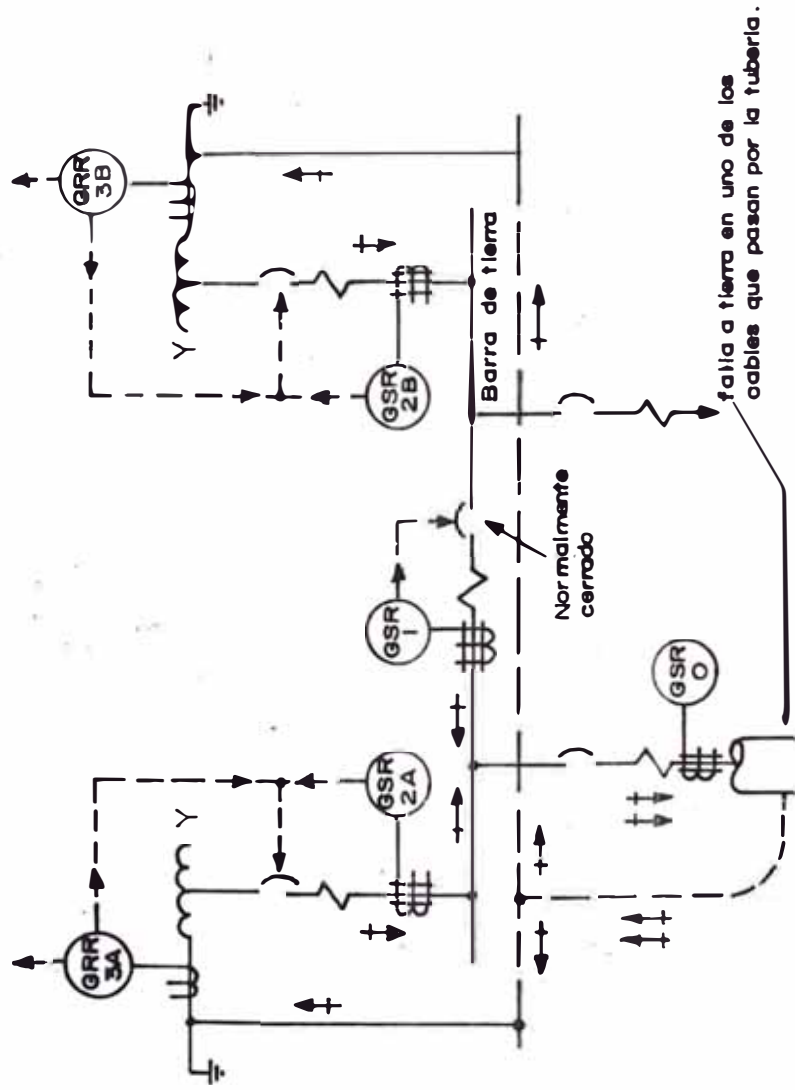


Fig. 62 pt.- COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE DE FALLA EN UN CIRCUITO 3Ø INTERCONECTADO DONDE LOS TRIPS ACTUAN DIRECTAMENTE EN LOS INTERRUPTORES UBICADOS EN EL SECUNDARIO.

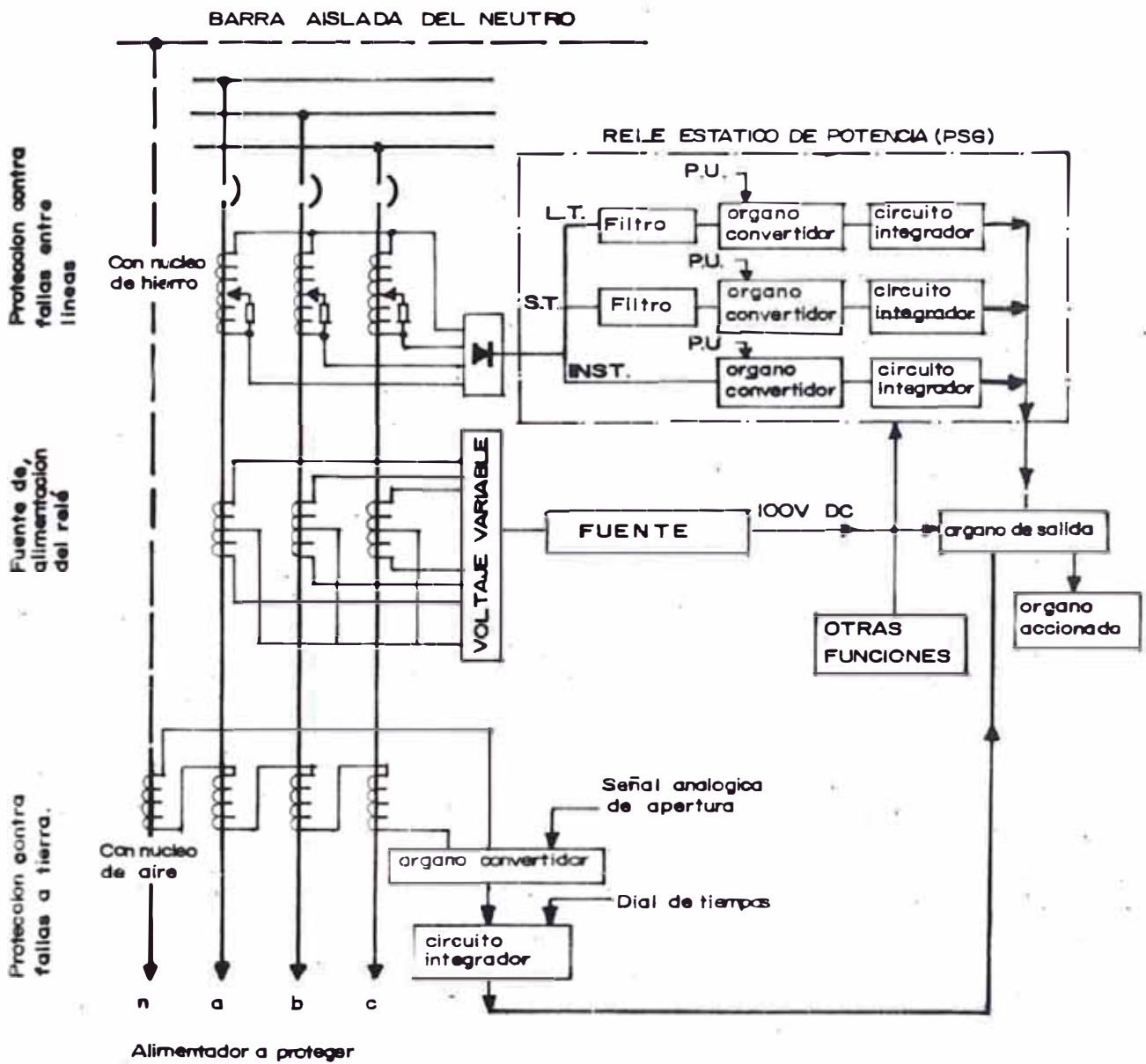


Fig. 63 pt.- DIAGRAMA FUNCIONAL EN BLOQUES DEL RELE DE POTENCIA

protección está constituido por organos individuales. - Las señales de forma analógica, es decir, progresivamente variables que proceden del circuito de medida (conexión de 3 transformadores de corriente en conexión - delta-abierta) entran en el órgano de conversión del rele de protección que las convierte de tal manera que pueden ser fácilmente transformados en el órgano de medida. Finalmente mostraremos los diferentes usos de este rele para detectar puestas a tierra en sistemas industriales. Ver figura 64 pt.

7.3.3. Relés direccionales de sobrecorriente a tierra.

Los relés direccionales de sobrecorriente a tierra son - también relés secundarios y de potencia, y tienen por - objeto, de constatar la dirección de la corriente ohmica en el lugar del defecto y es más, son sensibles al desfase de la corriente y tensión residual homopolar. Estos tipos de relés son bien usados en sistemas de media tensión ya sea con el neutro puesto a tierra o aislado. La tensión residual se obtiene por medio de un filtro de tensión constituido por tres transformadores monofásicos de tensión en conexión estrella-delta abierto, o por medio de transformadores trifásicos de tres a cinco columnas,

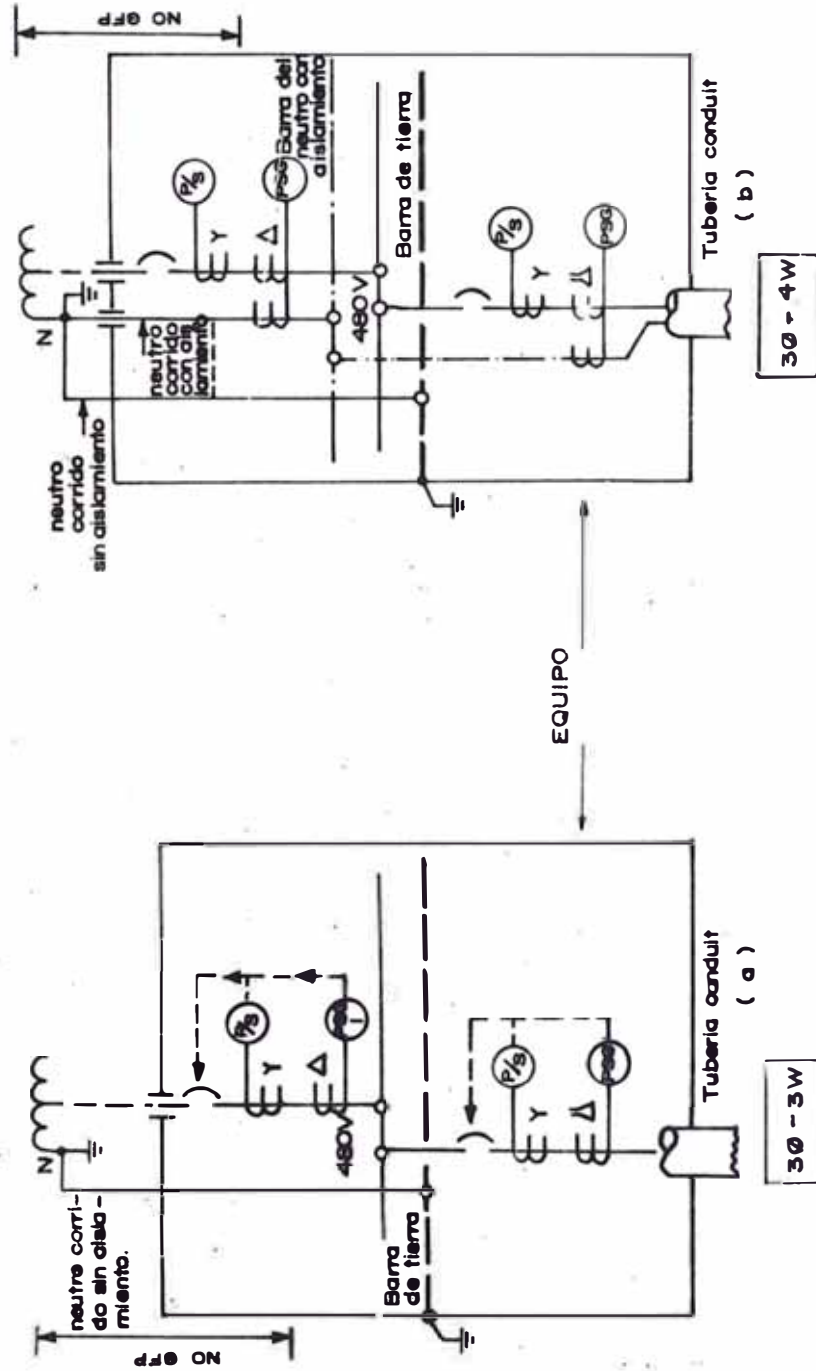


Fig. 64 pt.- IMPLEMENTACION DEL RELE POTENCIA (P30) EN LA PROTECCION DE PUESTAS A TIERRA EN SISTEMAS INDUSTRIALES DE BAJA TENSION (480 V)

(véanse acápite 7.2.3.), y la corriente homopolar se obtiene por medio de un filtro de corriente en conexión homgreen. El principio de funcionamiento de este sistema de protección es el mismo que el de los usados para la detección de los cortocircuitos entre fases; la única diferencia esta en la obtención de la posición de medida a través del desfasaje inductivo (45°). Véase las figuras 30pt. de la sección 3; es más la ecuación del torque de este relé viene dado por la siguiente expresión:

$$VI = 9E_0 I_0 \cos (45^\circ - \theta)$$

Se obtiene el máximo torque cuando : $\theta = 45^\circ$

donde: $VI = 9E_0 I_0$ (torque de operación)
 E_0 = Tensión homopolar detectable por el relé
 I_0 = Corriente homopolar detectable por el relé.

7.3.4. Polarización de los Relés de sobrecorrientes a Tierra

La polarización o ajuste de los relés secundarios de potencia, se realiza en función de la corriente y tensión nominal del mismo.

- A primera instancia veremos el ajuste por corriente para los del tipo (GSR), alimentados por un filtro de co -

nexión holm green, con relación K/I_t .

Supongamos que el sistema está puesto a tierra a través de una resistencia ohmica y ocurre una falla 1 \emptyset a tierra :

$$I_g = 0.066 I_{3\emptyset} \quad (\text{ver acápite 2.3.1.})$$

Al secundario :

$$I_{op} = \frac{I_t}{K} (0.066 I_{3\emptyset})$$

pero nominalmente por el relé circula la siguiente corriente :

$$I_r = I_n \left(\frac{I_t}{K} \right)$$

$$I_{op} = I_r \left(\frac{0.066 I_{3\emptyset}}{I_n} \right) \quad \text{corriente de disparo}$$

Donde I_n = corriente nominal del sistema

I_t = Corriente nominal en el secundario

I_r = Corriente nominal del relé de sobre corriente a tierra.

I_{op} = Corriente de operación o de disparo

$I_{3\emptyset}$ = Corriente de falla 3 \emptyset

K = Corriente nominal en el primario.

I_g = Corriente a tierra

- Ajuste por tensión para los del tipo (PSG)

Para la calibración de este relé tenemos que tener presente las tensiones en el delta -abierto en el estado estable, y en el estado de falla a tierra.

De la figura 55 pt del acápite 7.2.2. obtenemos, las siguientes expresiones fasoriales:

$$E_a \underline{10^\circ} + E_b \underline{-120^\circ} + E_c \underline{120^\circ} = E_1 \quad (\text{Estable})$$

$$E_a \underline{10^\circ} + (E_b + E_g) \underline{-120^\circ} + E_c \underline{120^\circ} = E_2 = E_g \quad (\text{Falla})$$

$$P (\%) = \frac{E_g}{E_1} \times 100 \quad (\text{Ajuste por tensión para el disparo})$$

Donde : E_a, E_b, E_c , son las tensiones inducidas en los devanados del secundario de los transformadores de corriente, debido al paso de las corrientes I_a, I_b, I_c .

E_1 = tensión nominal del relé

E_2 = Tensión máxima para disparo instantáneo

- Ajuste del relé direccional a tierra

Para el ajuste del relé direccional a tierra, se tiene en cuenta las magnitudes de tensión y corriente homopolar,

y del ángulo que forman ambas magnitudes.

El filtro de tensión estrella - serie, que detecta la tensión homopolar, tiene la siguiente relación de transformación :

$$\left(\frac{E_n}{\sqrt{3}} \right) / \left(\frac{E_o}{3} \right) = K \text{ (Véase figura 30 pt. Secc. 3)}$$

En estado estable al relé le llegará una tensión de ;

$$\frac{\frac{E_n}{\sqrt{3}}}{K} = \frac{E_o}{3}$$

y en condiciones de falla, el relé tendrá una tensión de

$$\frac{\frac{3 E_n}{\sqrt{3}}}{K} = E_o$$

∴ La calibración del relé se hace para una tensión no detectable de $\frac{E_o}{3}$, y para una máxima tensión E_o

Donde: E_n = tensión nominal del sistema

E_o = Tensión homopolar detectable

Para el ajuste del relé direccional a tierra por corriente, se tomará en cuenta la conexión ~~Mol~~ mgreen

$$I_{op} = I_t \left(\frac{I_g}{I_n} \right) \quad I_g = 3 I_o$$

Donde : I_o = corriente homopolar al secundario

I_{op} = corriente de operación del rele direccional a tierra.

I_r = Corriente nominal del rele direccional a tierra.

I_g = Corriente de falla a tierra al secundario

I_n = Corriente nominal del sistema.

El desfase (θ) entre los fasores $3I_0$, $3V_0$ es muy importante para la operación del rele, debido a que dicho ángulo nos da el torque máximo en caso de falla, y el mínimo en estado estable, habíamos dicho que cuando $\theta = 45^\circ$, el torque es máximo, y si $\theta = 0^\circ$, el torque es mínimo o sea

$$VI = (3E_0) (3I_0) \cos(45^\circ - \theta)$$

$$(VI)_{max} = 9 E_0 I_0$$

$$(VI)_{min} = 6 E_0 I_0$$

7.4. INTERRUPTORES DE PROTECCION CON DISPARADORES DE SOBREENTENSIDAD PARA BAJA TENSION

Estos interruptores son de potencia, con una capacidad de ruptura suficiente para soportar las sollicitaciones que se establecen al conector y desconector medios de servicio y partes de la instalación en estado normal o de perturbación (especialmente bajo las condiciones de corto circuito).

7.4.1. Tipos de Interruptores de protección

se distinguen entre

- Interruptores sin resistencia contra corto circuitos en estado de cierre. Estos tienen que desconectar sin retardo en caso de producirse un corto circuito, y se efectúan a modo de interruptores sin limitación de la corriente o con ella.
- Interruptores con resistencia contra los cortocircuitos en estado de cierre. Estos pueden soportar durante corto tiempo las sollicitaciones dinámicas y térmicas de los cortos circuitos, y por consiguiente, están provistos de disparadores de sobreintensidad de retardo breve.

7.4.2. Disparadores de Sobreintensidad

El cometido principal de los interruptores de protección provistos de disparadores de sobreintensidad consiste en proteger las partes de la instalación correspondientes - contra sobrecargas y corto circuitos.

Para la protección contra sobrecarga, los interruptores pueden equiparse de disparadores de sobreintensidad con

con retardo térmicos principalmente disparadores bimetálicos. La corriente de reacción de los disparadores se puede distinguir dentro de cierto margen.

Para la protección contra corto circuitos, los interruptores se equipan de disparadores electro magnéticos de sobreintensidad. Entre estos existen los del tipo ajustables o de ajuste fijo sin retardo, y otros ajustables con retardo breve. Los disparadores sin retardo se denominan también rápidos. De la figura 65 p.t.a, tenemos los siguientes resultados:

a = Disparadores de sobreintensidad con retardo térmico (disparadores bimetálicos).

c = Disparadores electromagnéticos de sobreintensidad (disparadores rápidos o lentos).

Para que los interruptores de protección de sobreintensidad sean selectivos entre sí, se pueden emplear adicionalmente relés de puestas a tierras (GSR) para interrumpir y volver a conectar los disparadores (electromagnéticos en caso de fallas a tierra) Véase figura 65 p.t.b.

7.4.3. Funcionamiento de los Interruptores de Protección

En estos interruptores se aprovechan las fuerzas dinámicas de la corriente de corto circuito para abrir rápidos

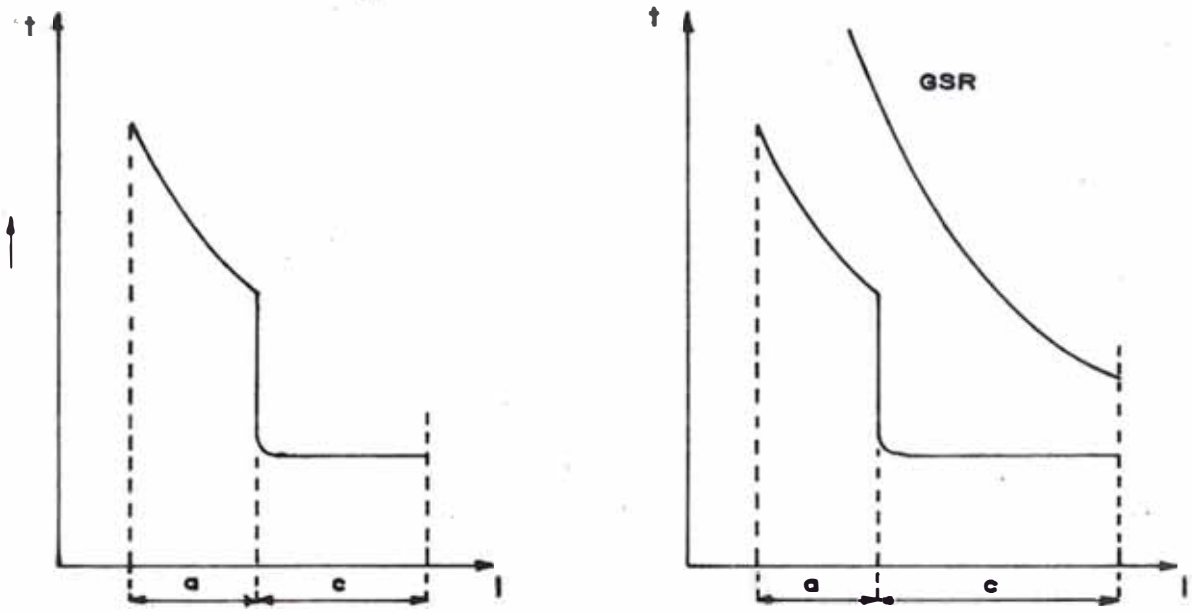


Fig. 65 pt. a.- CARACTERISTICAS DE OPERACION

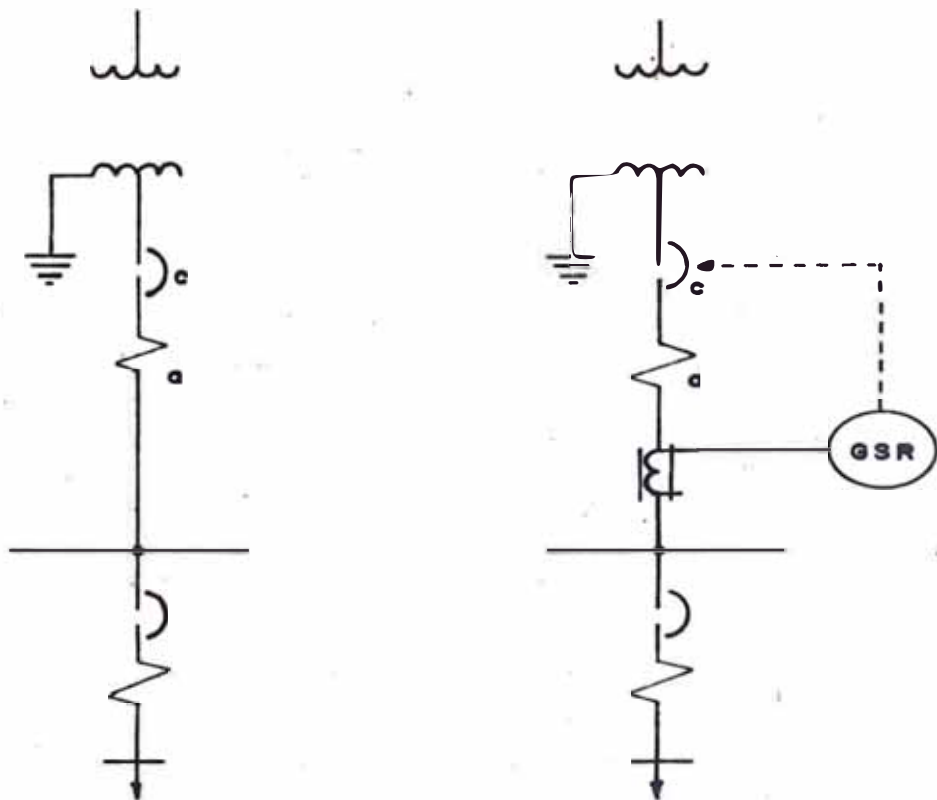


Fig. 65 pt. b.- CIRCUITOS DE PROTECCION EN SISTEMAS DE BAJA TENSION CON NEUTRO PUESTO A TIERRA.

damente los contactos. La corriente de corto circuito se interrumpe antes de alcanzar el valor de cresta , quedando así limitado ,

La limitación del impulso de la corriente de corto - circuito se inicia, según la intensidad nominal del interruptor, tratándose de corrientes alternas iniciales de corto circuito aproximadamente a un valor equivalente a 15-35 veces la intensidad nominal del interruptor.

El tiempo total de ruptura de los interruptores de protección es de unos 10 ms , en caso de desconexión del corto circuito por separación electrodinámica de los contactos, y entre 10 ms. y 30 ms. según el tipo de interruptor y la intensidad nominal , cuando el corto circuito se interrumpe por la acción de los disparadores electromagnéticos de intensidad no retardos.

El tiempo máximo de retardo que puede ajustarse en los disparadores electromagnéticos de sobreintensidad con retardo es de 0.5seg. (Según VDE 0100).

Los interruptores de protección provistos de disparadores electromagnéticos de sobreintensidad pueden proveerse de un denominado bloqueo de corto circuito

que, después de producirse el disparo, impide la -
reconexión al corto circuito existente.

7.5. INTERRUPTORES AUTOMATICOS DIFERENCIALES (SFJ). - PARA BAJA TENSION

Estos interruptores son también conocidos como "interruptores de protección contra fallas a tierra". Es más, estos interruptores no son usados para sistemas funcionales de puestas a tierra, más bien son usados para sistemas de puestas a tierra de equipos en sistemas de baja tensión.

Los interruptores automáticos diferenciales tienen como objeto de impedir la persistencia de una tensión de contacto demasiado elevada en una masa o parte metálica de un receptor o quipo al producirse cualquier corriente de contacto a tierra cuya intensidad alcance el valor nominal de defecto, siendo indiferente que el contacto a tierra o el defecto en el aislamiento conduzca o no a una tensión de contacto peligrosa. Por consiguiente, el interruptor no solamente protege contra las tensiones de contacto sino también contra los posibles incendios debido a las chispas que se originan en caso de corrientes de contacto a tierra.

Finalmente el interruptor diferencial puede utilizarse tam

bién como interruptor principal , teniendo presente de no -
exceder de 20,000 maniobras a la carga nominal .

7.5.1. Constitución y Funcionamiento de los Interruptores Diferenciales (SFJ)

Los interruptores diferenciales está constituído por un transformador de corriente, el disparador y el elemento de maniobra con los contactos correspondientes, (véase figura 66 p.t.a.). A través del transformador de corriente pasan todos los cables necesarios para la conducción de corriente y, por consiguiente, también el neutro en caso de que exista.

El transformador de intensidad vigila la instalación con el neutro puesto a tierra. No habiendo perturbación alguna en la misma, la suma de las corrientes de entrada es igual a la suma de las corrientes de salida (Ley de Kirchhoff). Al producirse un contacto a tierra se destruye este equilibrio. En tal caso se excita el transformador en cuyo secundario una tensión. La desconexión se produce a través del disparador en menos de 0.02 seg.

7.5.2. Aplicación de los Interruptores Diferenciales (SFJ) en Instalaciones Eléctricas

Un interruptor diferencial se puede usar en combinación

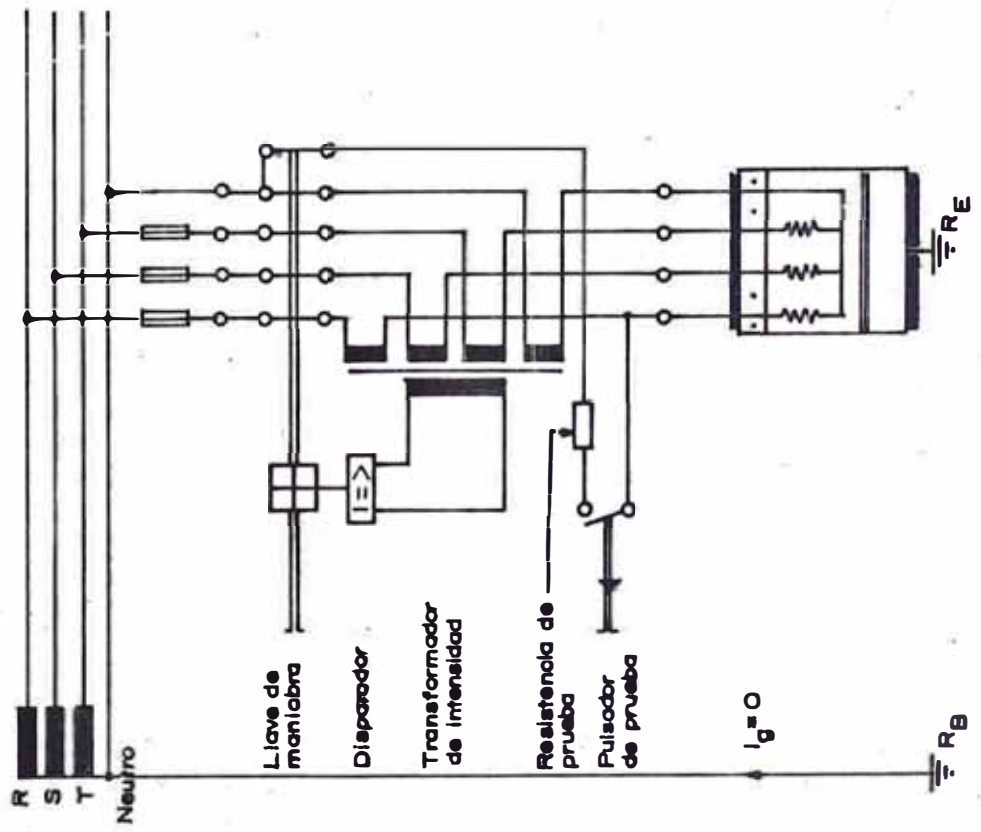
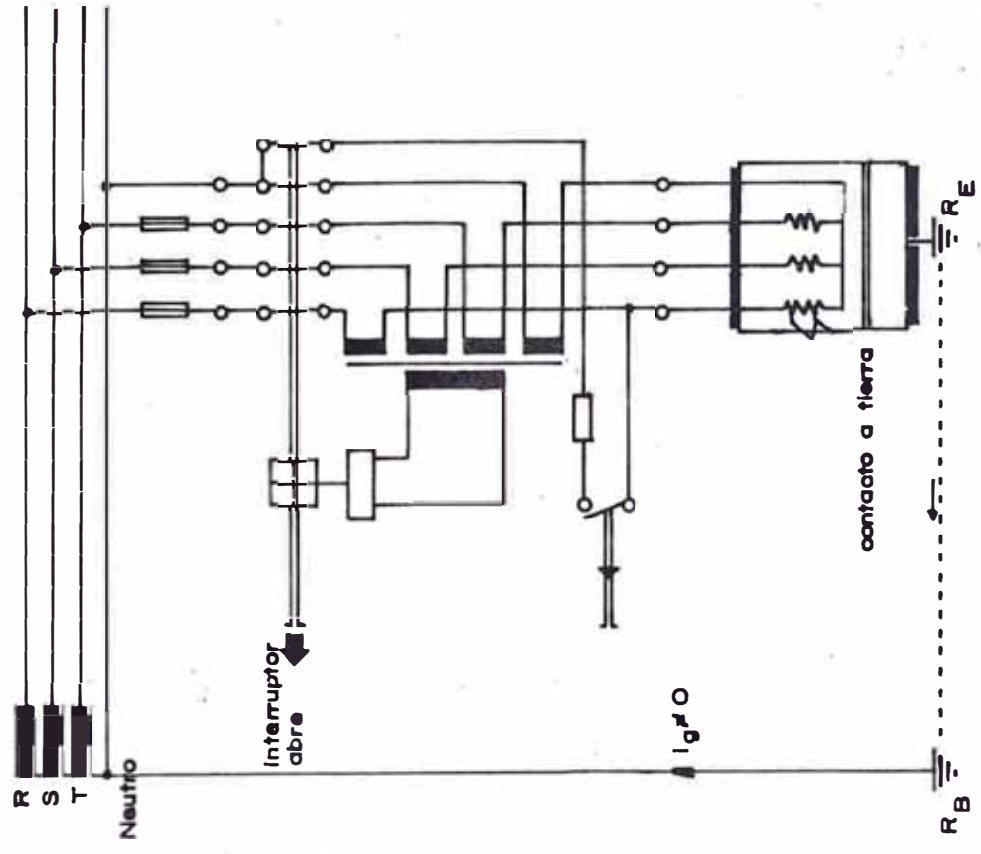
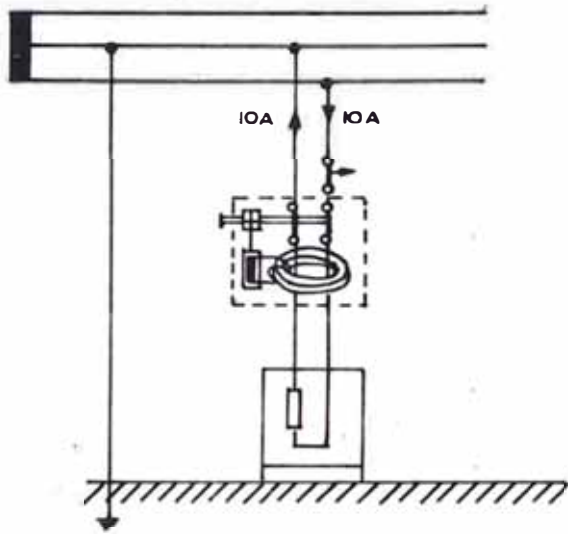
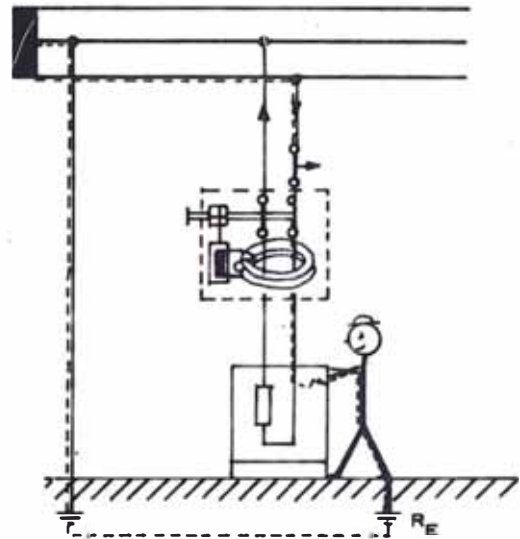


Fig. 66pta - PROTECCION 3Ø CON INTERRUPTOR DIFERENCIAL (SFJ)



Interrupor diferencial en servicio
exento de perturbaciones.
Toda la corriente que pasa por el
conductor principal vuelve por el central.



En caso de haber un defecto en el aislamiento,
fluye una corriente de defecto al punto neutro
del transformador a través del conductor de
puesta a tierra.

Fig. 66 pt. d.- PROTECCION I_0 , CON INTERRUPTOR DIFERENCIAL (SFJ)

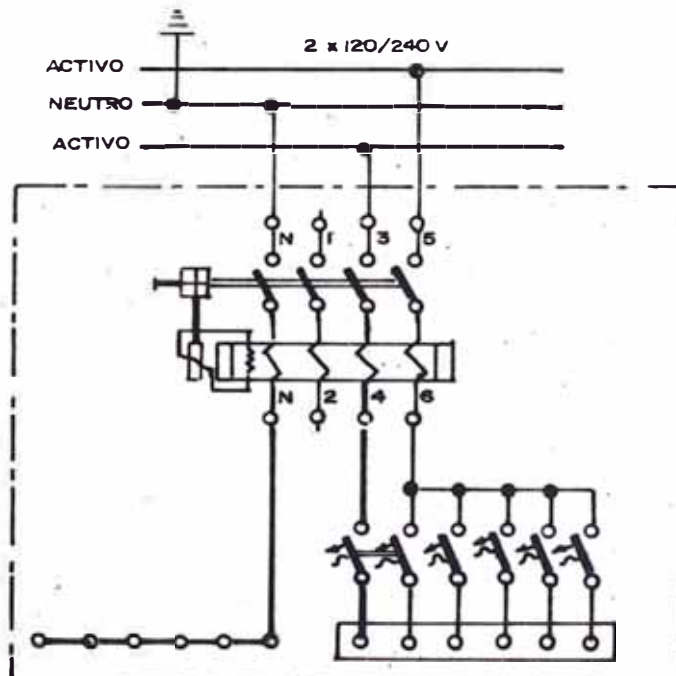


Fig. 66 pt. b.- NUMEROS DE SALIDAS DE UN INTERRUPTOR DIFERENCIAL (SFJ)

con varios interruptores automáticos. (disyuntores) o fusibles para la protección contra corto circuitos. Un interruptor diferencial de 63A permite, por ejemplo la ampliación hasta 6 interruptores automáticos de 20A véase figura 66p.t.b., es más los interruptores diferenciales no tienen aplicación en sistemas eléctricos con neutro aislado, ya que no se produce la corriente a tierra necesaria para producir el disparo correspondiente, siempre y cuando que esta corriente sea menor que 30 mA. Sólo en presencia de un doble contacto directo por una persona o por un defecto a tierra, fluye una corriente de defecto a tierra, que provoca el disparo del interruptor diferencial. Tampoco se produce la desconexión del interruptor diferencial en presencia de una intensa corriente de defecto, si ésta en lugar de retornar por tierra lo hace a través del conductor neutro, ya que en el receptor o el conductor de protección ya existe una unión conductiva con el neutro.

Por tal razón hay que cuidar de que el conductor de puesta a tierra, hacia el interruptor diferencial, no posea ninguna conexión con el neutro.

7.5.3. Elección del Interruptor Diferencial (SFJ)

En las aplicaciones en que se prevea que el interruptor

pueda quedar expuesto a corrientes de corto circuito - intensas, deberá protegerse mediante corto circuitos - fusibles debidamente seleccionados. No obstante esta precaución no será necesaria cuando la corriente de corto circuito no rebase la capacidad de ruptura del - interruptor. (Ver tabla 6 p.t.a.b.). Podemos elegir el interruptor diferencial, teniendo en cuenta, que cuanto menor sea la resistencia de toma a tierra, tanto mayor es la corriente del circuito y, por lo tanto, la del conductor de tierra por consiguiente la tensión en el conductor de tierra siempre será $U_E = I_g R_e$, sólo durante - el tiempo en que el valor de la corriente es inferior a I_g , la tensión en el conductor de la toma de tierra no puede rebasar las 65 V o los 24 V, que es cuando la re sistencia de dicha puesta a tierra cumple justamente - con las exigencias mínimas (ver tabla 6 p.t.c.).

7.6 INTERRUPTORES AUTOMATICOS CON DISPOSITIVOS DE CORTE POR TENSION DE DEFECTO (SFU) PARA BAJA TENSION

Tienen el mismo campo de aplicación que los interruptores diferenciales, con la diferencia que el disparador (relé de tensión) es sensible a la tensión que existe entre la masa y tierra.

TABLA 6pt.a.- CAPACIDAD DE RUPTURA DE LOS INTERRUPTORES DIFERENCIALES A LA TENSION NOMINAL

Intensidad nominal del interruptor (A)	25 - 40	63	100	160
Capacidad de ruptura (A)	1500	2000	3500	4000

TABLA 6pt.b.- CORRIENTE NOMINAL DE LOS INTERRUPTORES DIFERENCIALES A LA CORRIENTE DE FALLA.

Corriente de defecto (A)	Corriente nominal (A)	Nº de Polos	Aplicación
0.03 0.3 0.5	40	2	Principalmente en tableros de contadores y distribuciones
0.03 0.3 0.5	25, 40, 63	4	
0.3 0.5	100, 160	4	En distribuciones a la intemperie en recintos húmedos y polvorientos.

TABLA 6pt.c.- RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA MAXIMA ADMISIBLE UTILIZANDO INTERRUPTORES DIFERENCIALES SEGUN NCRMAS

Corriente de defecto (A)	RESISTENCIA MAXIMA DE PUESTA A TIERRA PARA UNA TENSION DE TOQUE DE :	
	Hasta 65 V (ohm.)	Hasta 24 V (ohm.)
0.3	210	80
0.5	180	48
1.0	65	24
1.5	40	15
3.0	21	8

El circuito de protección se compone del interruptor de protección (disyuntor) provisto de la bobina de tensión detectora del defecto a masa y dispositivo de prueba, - del conductor de protección, del electrodo auxiliar de puesta a tierra; al conductor de protección en este caso es el conductor de unión entre la masa y la bobina de tensión detectora del defecto que se encuentra en el interruptor de protección, y el conductor auxiliar de puesta a tierra es el que une la bobina de tensión con el electrodo auxiliar de tierra, véase figura 67 p.t.a. Este tipo de protección actúa de tal manera que en caso de presentarse un defecto de aislamiento en los aparatos o equipos utiliza la tensión de defecto (tensión entre masa y tierra) para la desconexión. Además esta protección puede también emplearse en redes cuyo centro de estrella no se halle conectado a tierra (o aislado). En este caso la corriente de defecto fluye a través del lugar de defecto hacia otro conductor activo.

Si en otro conductor activo no hay ningún defecto de aislamiento, en tales condiciones no aparece tensión alguna en el conductor de tierra.

La bobina de tensión detectora del defecto a tierra debe-

montarse con arreglo a VDE 0663 de manera que al ensayar el interruptor a una tensión de :

16-24V, con una resistencia adicional de 200 Ohm o bien a 0-65V, con una resistencia adicional de 800 ohm , des - conecte a 0.02 seg. como máximo

De la figura 67 ptb. suponemos una falla de aislamiento del equipo en unas de sus fases, por consiguiente al rele le llega una tensión de :

$$R_t = R_h + R_a + R_f + R_r + R_e$$

$$\therefore V_{\text{relé}} = I_g (R_r + R_h) \quad (\text{Voltaje de operación del relé})$$

Donde :

R_h = Resistencia de la toma a tierra auxiliar

R_a = Resistencia por fase, del alimentador fallado

R_r = Resistencia interna del rele = 400 ohm

R_e = Resistencia de puesta a tierra de la subestación

R_f = Resistencia de falla

R_t = Resistencia total

La tensión en el neutro sera

$$V_n = R_t I_g, \text{ podemos admitir que } V_n \text{ varía entre 24 y 65 voltios, para obtener el disparo inmediato.}$$

Finalmente mostraremos algunos circuitos de baja tensión, donde se utilizan interruptores SFJ y SFU, para detectar corriente y tensión de falla a tierra, véase figuras 68 pt. a,b,c,d,.

7.7. Interruptores Automáticos de Potencia para media Tensión

Los interruptores de potencia son aparatos de corte que permiten efectuar maniobras voluntarias y de cierre ya sea manualmente o automáticamente de circuitos, en condiciones dadas de carga, o en condiciones de falla, Según su forma constructiva los interruptores de potencia para media tensión pueden clasificarse:

- Interruptor de soplado magnético
- Interruptor con auto-formación de gases
- Interruptor de pequeño volumen de aceite.

La diferencia primordial que existe entre ellos es en lo referente a la extinción del arco formado en ellos.

El interruptor de soplado magnético, extingue el arco formado cuando se repela el campo magnético formado por el arco y por el campo magnético formado por la bobina de soplado, es decir el arco sufre un empuje hacia arriba,

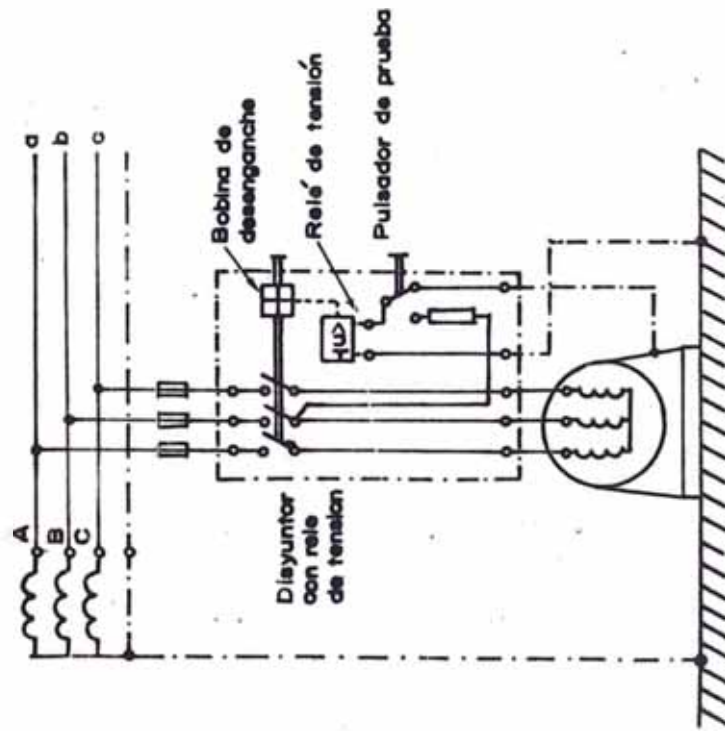


Fig. 67 pt.a.-PROTECCION MEDIANTE RELE DE TENSION EN SISTEMAS DE BAJA TENSION .

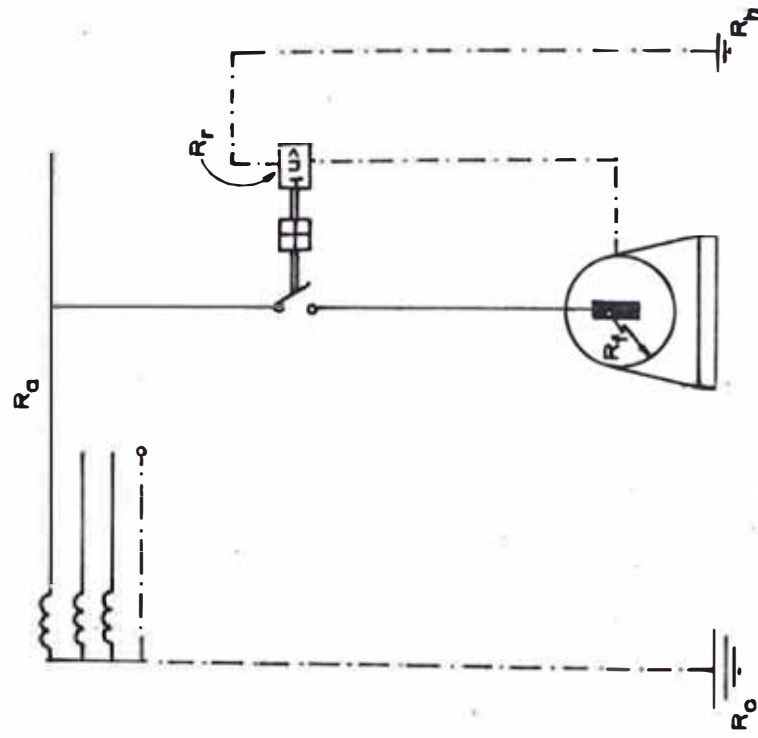


Fig.67 pt.b.- CIRCUITO UNIFILAR DE LA PROTECCION MEDIANTE RELE DE TENSION.

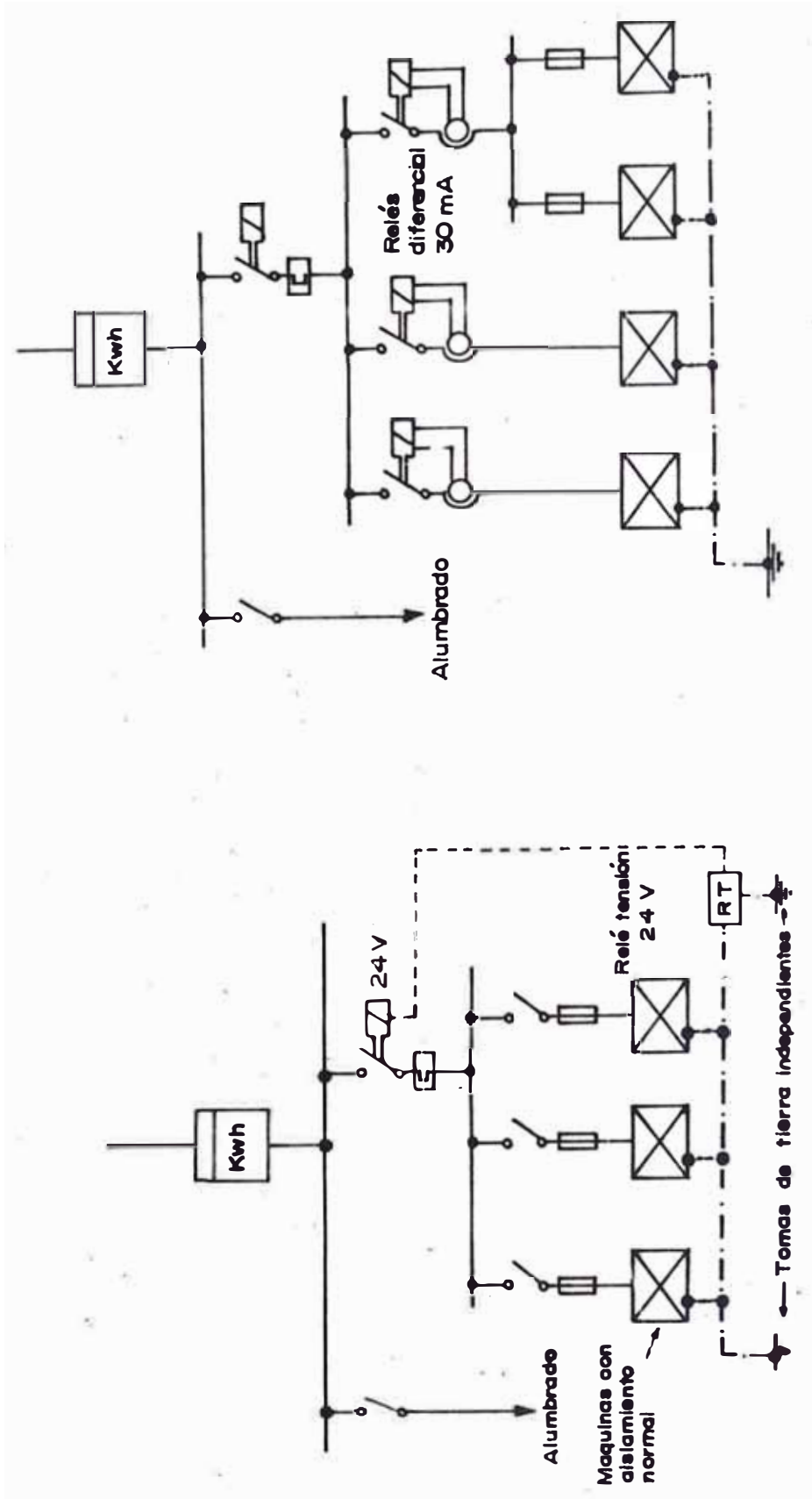


Fig. 68 pt. b.- PROTECCION SELECTIVA CONTRA CONTACTOS INDIRECTOS UTILIZANDO RELES DIFERENCIALES EN SISTEMAS DE BAJA TENSION

Fig. 68 pt. a.- PROTECCION NO SELECTIVA CONTRA CONTACTOS INDIRECTOS UTILIZANDO RELE DE TENSION EN SISTEMAS DE BAJA TENSION.

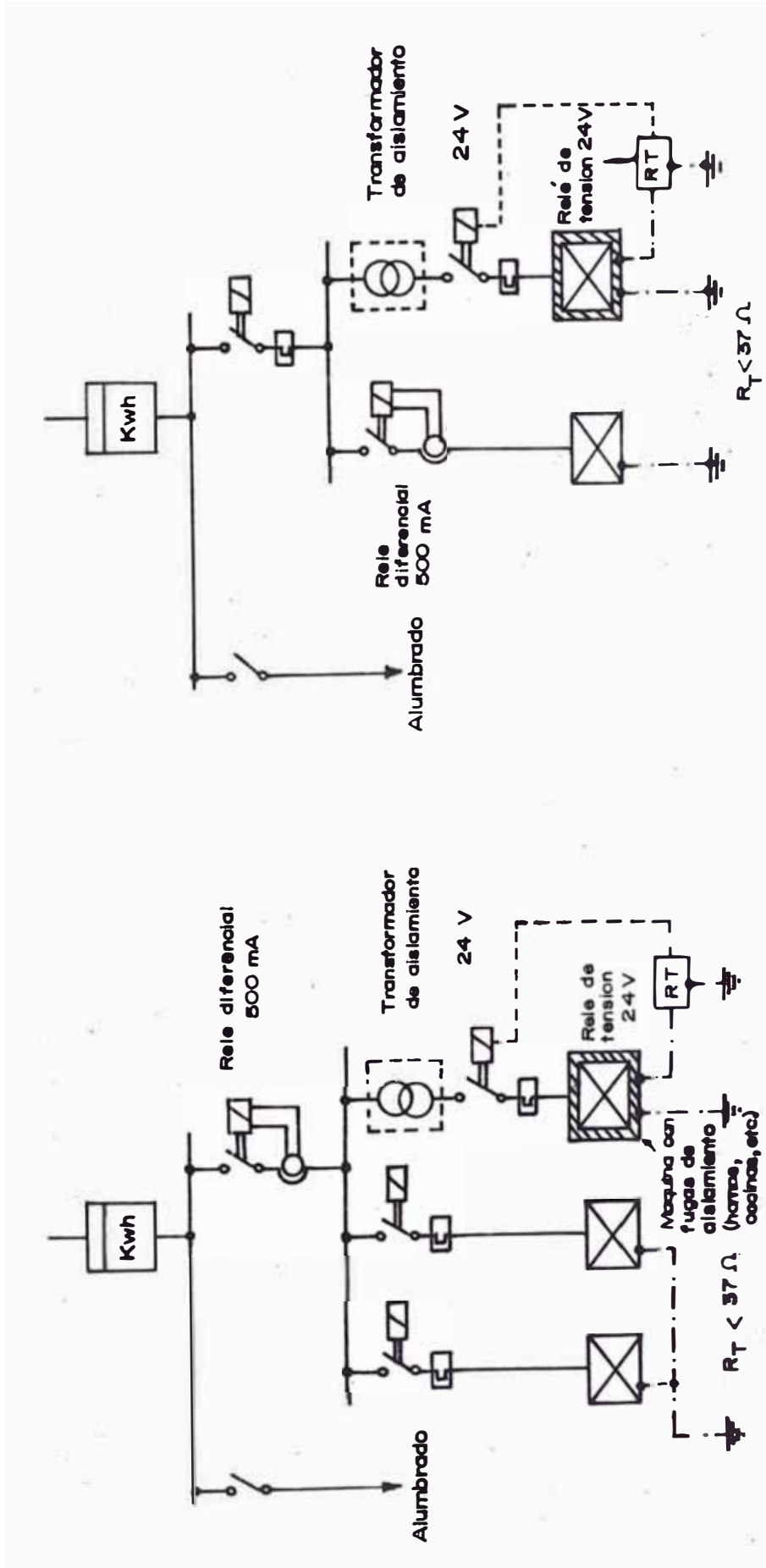


Fig. 68 pt. d.- PROTECCIÓN SELECTIVA CONTRA CONTACTOS INDIRECTOS UTILIZANDO RELES DE TENSION Y DIFERENCIALES EN SISTEMAS DE BAJA TENSION.

Fig. 68 pt. a.- PROTECCION SELECTIVA CONTRA CONTACTOS INDIRECTOS UTILIZANDO RELES DE TENSION Y DIFERENCIALES EN SISTEMAS DE BAJA TENSION.

de esta forma, se hace cada vez más largo, hasta que se acorta. En los interruptores con auto-formación de gases el agente extintor del arco es gas acumulado de forma densa en su cámara de extinción, produciéndose este gas en cada interrupción, por acción térmica y en cantidad suficiente para el soplado. Finalmente los interruptores con pequeño volumen de aceite son los más usados, porque el arco se desioniza rápidamente en un tiempo aproximado de 0.02 seg. y es más la caída de tensión en el arco es excepcionalmente baja, por lo que no hay que temer a sobretensiones en el momento de la extinción.

7.7.1. Disparadores de sobre intensidad

Los interruptores automáticos de potencia, poseen dispositivos de protección sensibles, a las sobrecargas y cortocircuitos, donde la sobrecarga se detectan mediante un relé bimetálico tripolar, y los cortocircuitos mediante tres relés electromagnéticos de disparo rápido, que también pueden actuar con retardo a través de un relé de tiempo, ver figura 69 pt.a; para este tipo de protección tenemos que tener transformadores de corriente para media tensión, cuya intensidad nominal se ha de ajustar a la del trans -

formador principal. Los disparos se pueden hacer por corriente continúa o por transformador de corriente, véase figura 69 ptb,c. Finalmente también existen interruptores automáticos que están equipados sólo con dispositivos de protección sensibles a los corto circuitos, ya que la sobre carga mayormente es detectada por la protección de baja tensión, y su uso es más frecuente en sistemas industriales, véase figura 70pt.

7.7.2. Características de la Capacidad de Ruptura de los Interruptores automáticos de potencia

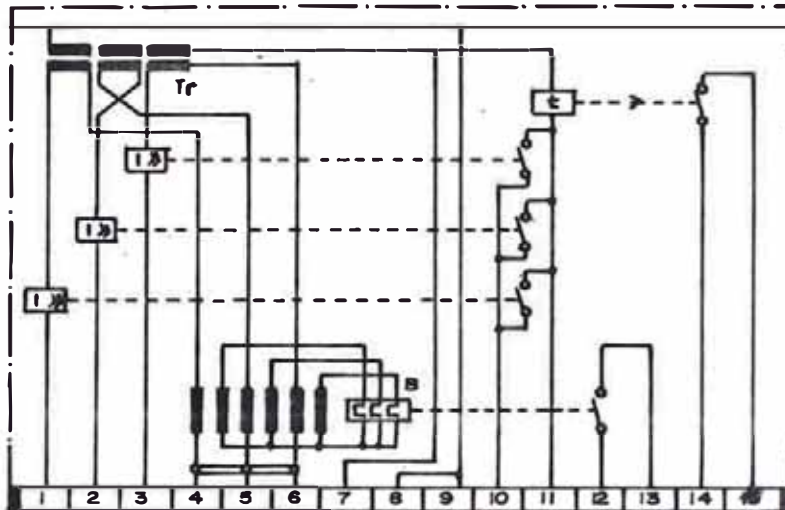
Si los interruptores automáticos de potencia para media tensión para una determinada capacidad nominal, funcionan a una tensión menor que la nominal (U_n) la capacidad de ruptura disminuye proporcionalmente a la tensión de servicio (U_o) o sea:

$$S_n = \sqrt{3} (I_c U_n)$$

$$S_o = \sqrt{3} I_c U_o$$

$$S_o = S_n \left(\frac{U_o}{U_n} \right)$$

Un interruptor de potencia de 10 kv. a una capacidad de ruptura de 250MVA, se emplea en un sistema de 2,3Kv ,



- B** RELE BIMETALICO
- I** » RELE DE DISPARO RAPIDO EN CASO DE CORTOCIRCUITO
- Tr** TRANSFORMADOR INTERMEDIO
- T** RELE DE TIEMPO.

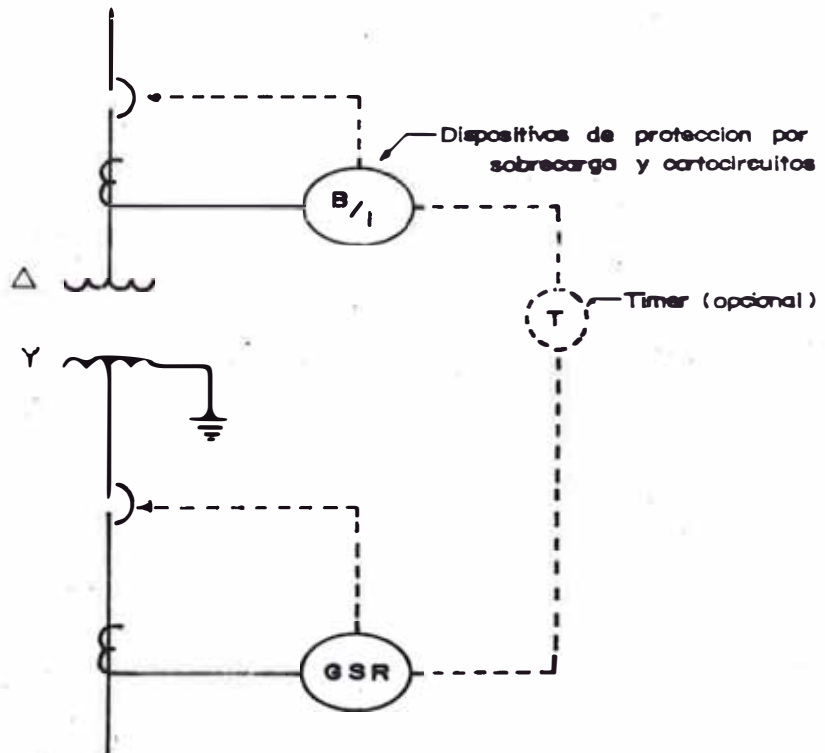


Fig. 69 pt. a.- PROTECCION CONTRA SOBRECARGAS Y CORTOCIRCUITOS (B/I)

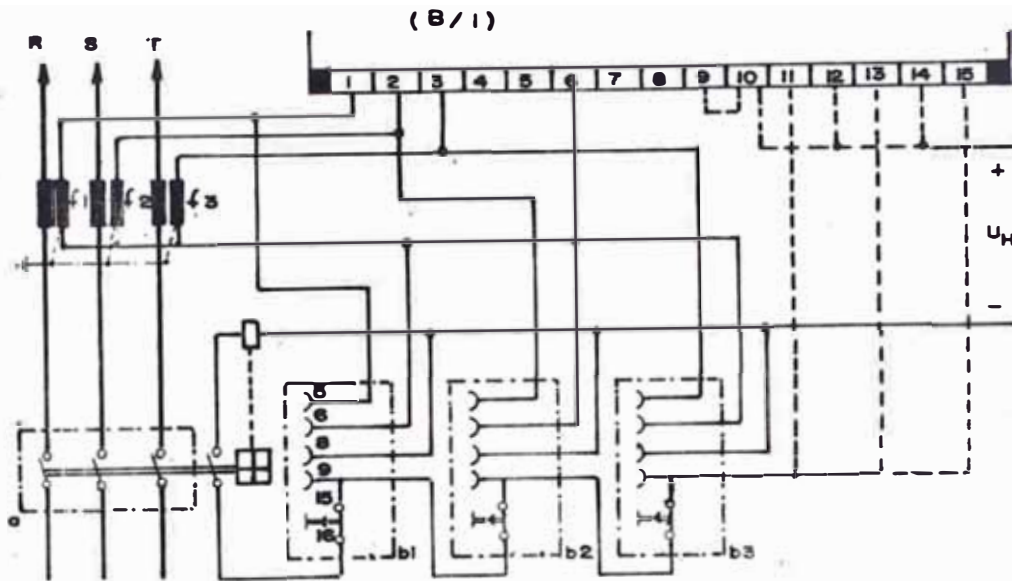


Fig. 69pt.b.- PROTECCION CONTRA SOBRECARGAS Y CORTOCIRCUITOS, ESQUEMA DE CONEXIONES PARA DISPARO POR CORRIENTE CONTINUA (ACOMETIDA TRIPOLAR)

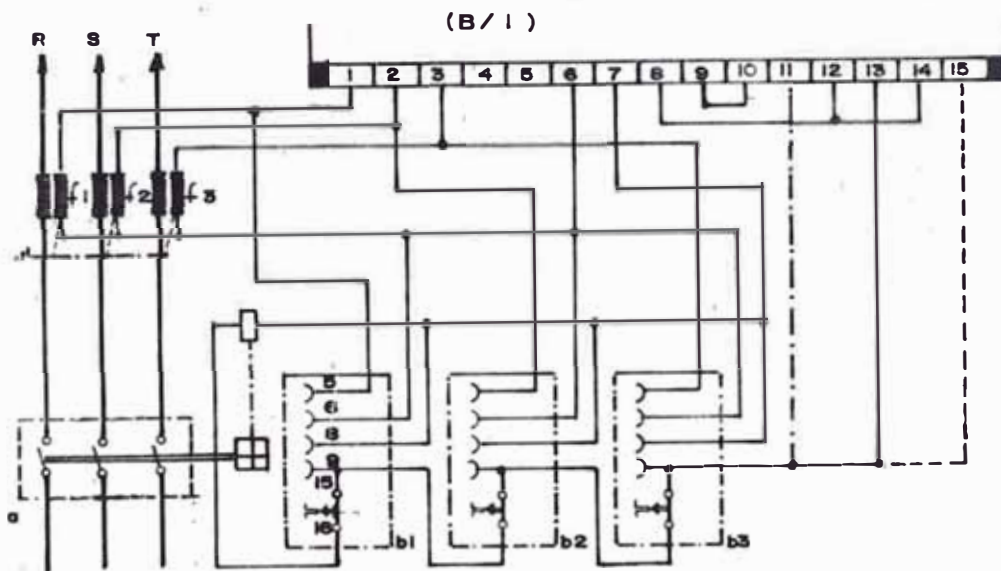


Fig. 69pt.c.- PROTECCION CONTRA SOBRECARGAS Y CORTOCIRCUITOS, ESQUEMA DE CONEXIONES PARA DISPARO POR TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD (ACOMETIDA TRIPOLAR)

por consiguiente la capacidad de ruptura para este sistema sería :

$$S_o = 250 \left(\frac{2.3}{10} \right) = 57.5 \text{ MVA}$$

Siempre y cuando se mantenga la misma corriente de falla.

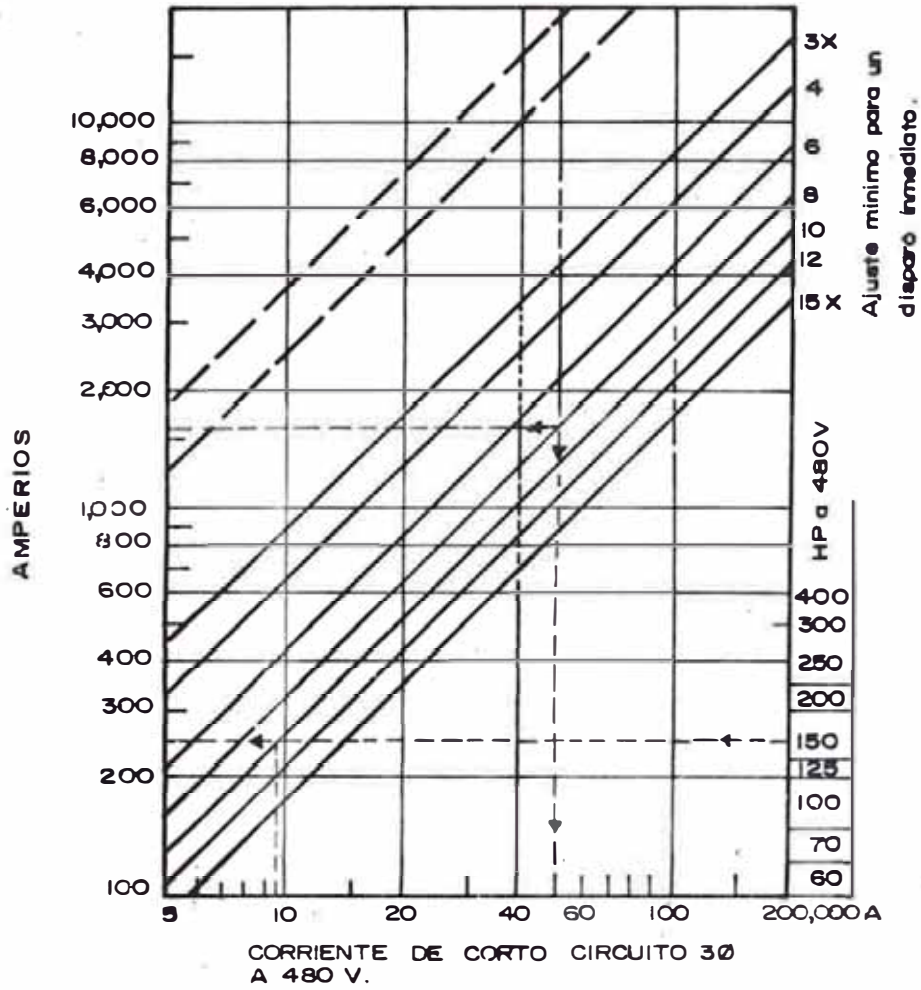
7.8. AJUSTE DE LOS INTERRUPTORES DE PROTECCION CON DISPARADORES DE SOBREENSIDAD

Para el ajuste de los interruptores de protección se debe tener en cuenta la magnitud de la corriente de falla, y el tiempo de escalonamiento del interruptor con respecto a los otros dispositivos de protección.

7.8.1. Ajuste de los dispositivos e Interruptores por Corriente de Falla

Los interruptores de protección con disparadores de sobrecorriente necesitan un ajuste mínimo y máximo por corriente de falla, de tal manera que la corriente del arco originada por una falla a tierra quede localizada en dicho intervalo, de la figura 71 pt,a,b, podemos decir que el ajuste mínimo se hace en función de la corriente nominal del sistema o del dispositivo y el ajuste máximo como -

(a)



(b)

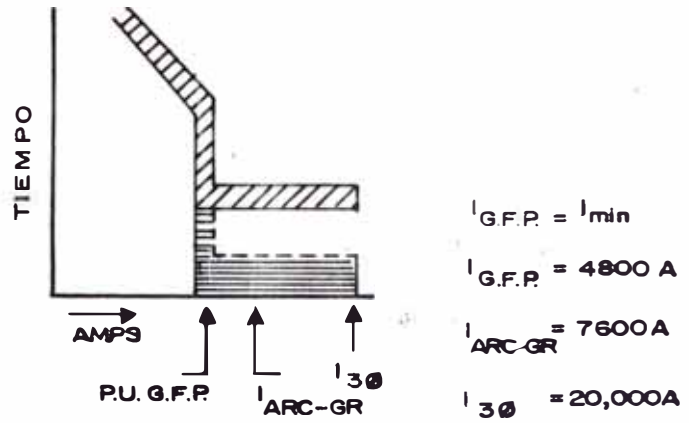


Fig. 71 pt.-AJUSTE DE LOS DISPOSITIVOS E INTERRUPTORES DE PROTECCION POR CORRIENTE DE FALLA (Para una puesta a tierra solida y una impedancia de retorno pequeña).

una función de la corriente de falla trifásica.

Del sistema de baja tensión mostrada en la figura 72pt. a, hallaremos el ajuste del interruptor de protección (1) ubicado en el alimentador, supongamos que la corriente nominal de dicho interruptor es de 400A, de la figura 71 pta, tenemos que la corriente mínima sería : $12 \times 400 = 4800A$, para una falla 3ϕ de 20,000A la corriente del arco sería $38\% \times 20,000 = 7,600A$, o sea según las normas VDE0100 el ajuste mínimo de los interruptores de protección de sobre intensidad varia desde 3 a 15 veces la corriente nominal .

7.8.2. Ajuste de los Dispositivos e Interruptores de Protección por tiempo de Escalonamiento

Si en el lado de baja tensión se conectan en serie varios interruptores de protección con disparadores electromagnéticos de sobreintensidad, se realiza el escalonamiento a intervalo de 0.15seg.(VDE0100), tratándose de interruptores de protección y fusibles posconectados y el intervalo de tiempo en los puntos de a -

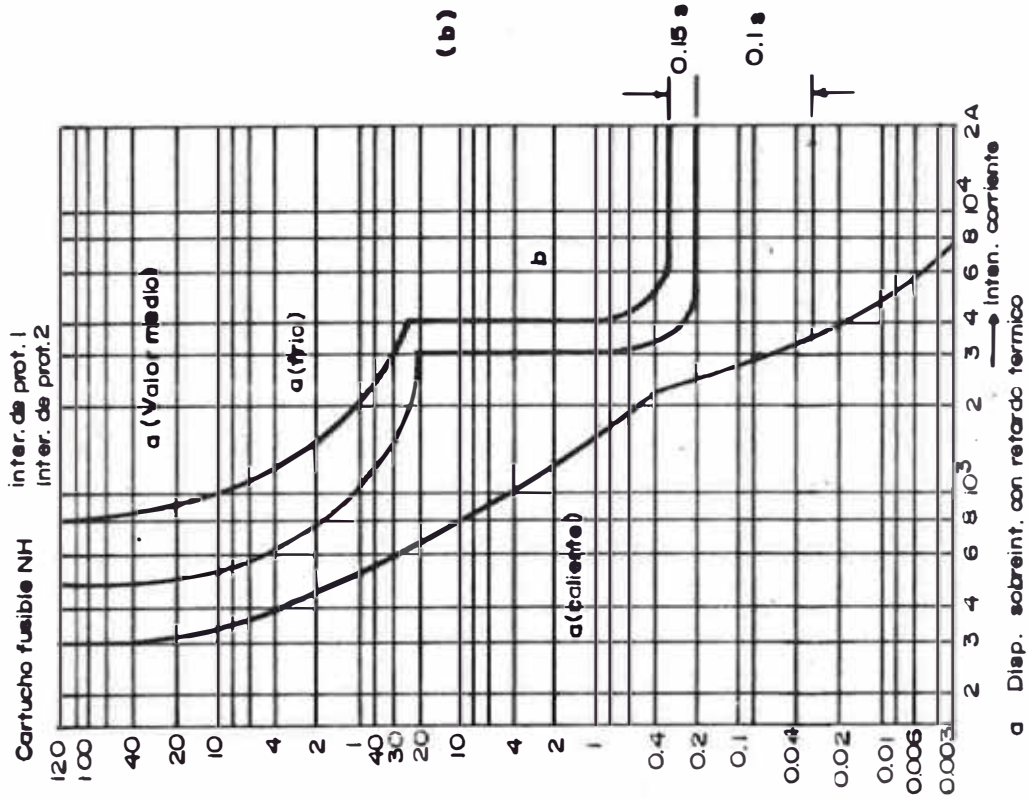
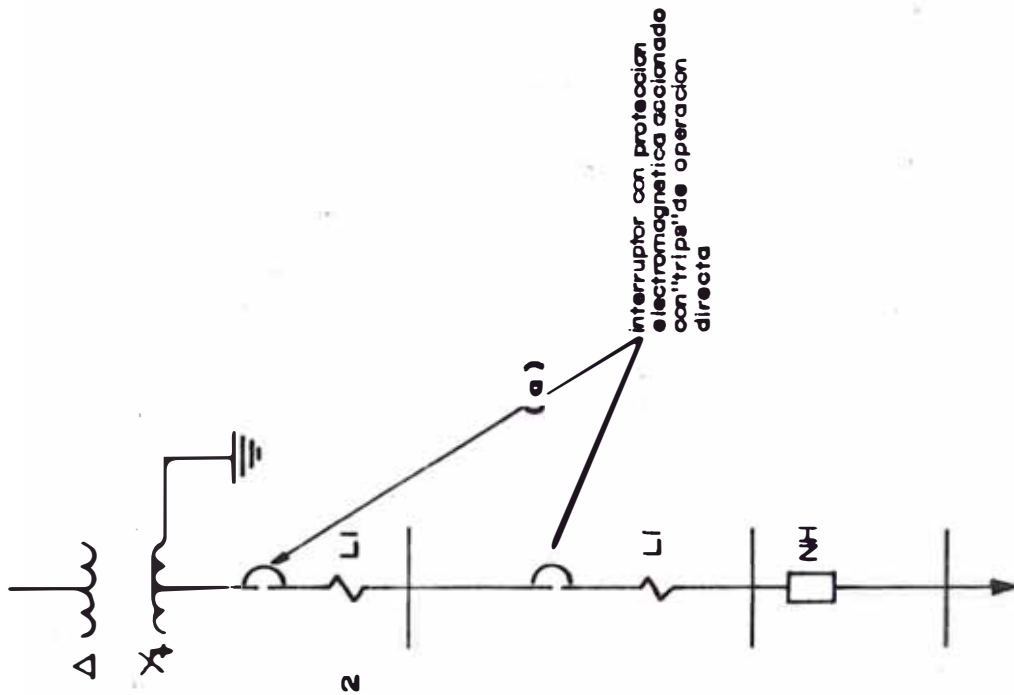


Fig. 2. a. b. - CARACTERÍSTICAS DE DISPARO DE TRES ORGANOS DE PROTECCION CONECTADOS EN SERIE, ESCALONADAS CON 0.15 SEG. ENTRE LOS DISPARADORES DE SOBREENTENSIDAD "b" DE LOS INTERRUPTORES DE PROTECCION y 2, ASI COMO MAYOR QUE 0.1 SEG. ENTRE EL DISPARADOR DE SOBREENTENSIDAD "b" DEL INTERRUPTOR 1 Y EL CARTUCHO FUSIBLE NH

proximación de las líneas características ha de ser igual a 0.1 seg. ya veremos con más detalle el ajuste de los dispositivos e interruptores de protección por escalonamiento en los siguientes acapites.

7.9. SELECTIVIDAD ENTRE LOS DIFERENTES INTERRUPTORES Y DISPOSITIVOS DE PROTECCION

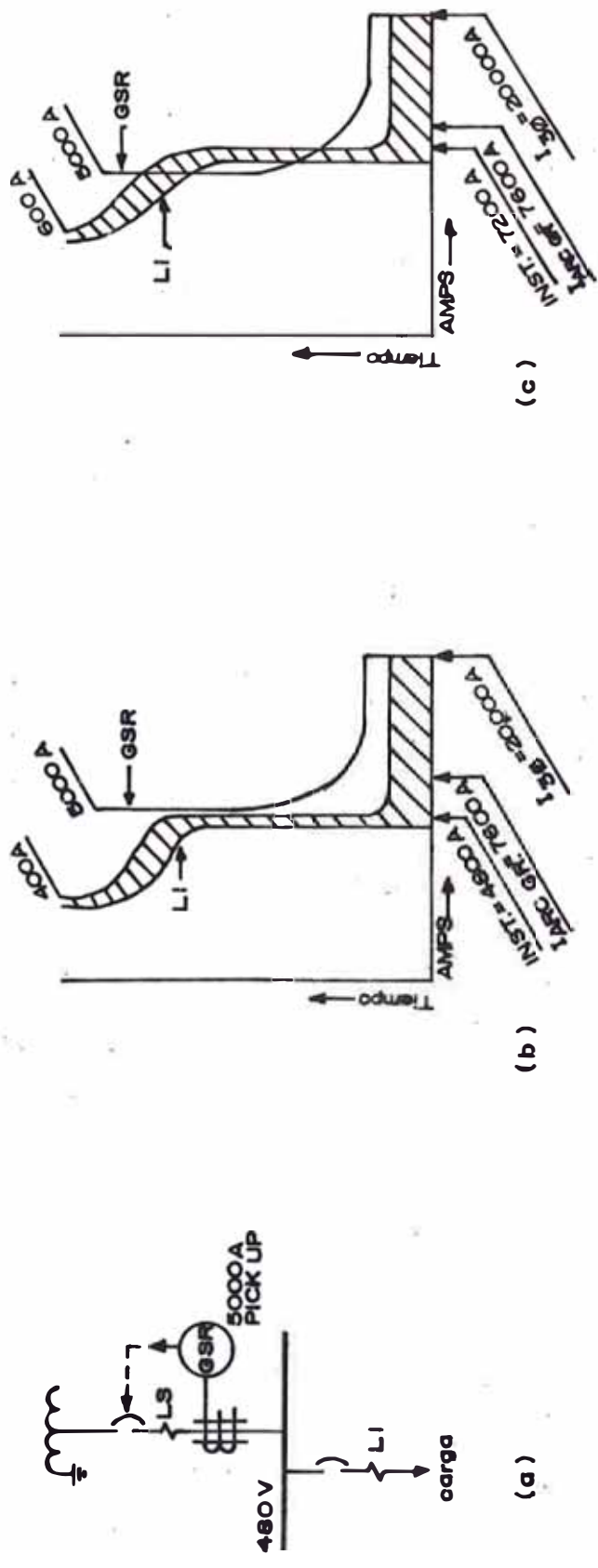
Habríamos dicho cuando se disponen varios interruptores en serie ya sea con rele incorporado o no, generalmente se requiere que estos sean selectivos. Un interruptor se considera selectivo con otro, cuando solamente dispara a la falla cercana a él, y en caso de fallar el mismo, tienen que actuar otro de orden superior, si esto cumpliera se diría que ambos guardan selectividad entre sí en relación al tiempo de escalonamiento. Se entiende por tiempo de escalonamiento como el intervalo necesario para que dispare con seguridad sólo el órgano de protección anterior al punto de defecto. Las características de disparo de los diferentes órganos de protección no deben entrecruzarse (Véase figura 72pta,b)

7.9.1 Selectividad entre Interruptores de Protección y relés de

Puestas a tierra

Se dice que existe selectividad entre un interruptor sin relé de protección incorporado, con otro con relé incorporado cuando las características de disparo del interruptor y relé no se solapan, es decir no existe ningún punto común en ambas curvas. Esto se logra haciendo un ajuste por corriente y por tiempo de escalonamiento correctamente. Del ejemplo del acápite 7.8.1., tenemos que si ocurre una falla a tierra en el receptor, el relé (GSR) operará después de un tiempo en el caso de no operar el interruptor del receptor, o sea el relé trabaja como protección de respaldo del interruptor (BACK-UP); ahora se perdería selectividad siempre y cuando se haga equivocadamente el ajuste mínimo del interruptor o sea, si la corriente nominal de interruptor receptor es de 600A, le corresponderá un ajuste de $12 \times 600 = 7200A$; si al relé se le ajusta para 5,000A se perdería selectividad, porque existiría un solapamiento de ambas curvas ya que se ha variado la corriente nominal del interruptor, dando origen a la apertura de cualquier interruptor, véase figura 73a,b,c,

Fig. 73 pt. a. b. c.- CARACTERISTICA DE OPERACION DEL RELE DE PUESTA A TIERRA (GSR) PARA FALLAS A TIERRA, EN COORDINACION CON INTERRUPTORES DEL TIPO .LS Y LI



L.S. : INTERRUPTOR CON PROTECCION ELECTROMAGNETICA ACCIONADOS CON TRIPS LENTOS O RAPIDOS.

7.9.2. Selectividad entre Los Interruptores , y Dispositivos de Protección de Baja y Media Tensión

Para obtener una buena selectividad entre los interruptores y dispositivos de protección de baja y media tensión se hace uso de los "timer" montados en el secundario, y es más éste tiene la finalidad de enviar una señal al "trip" de la protección de media tensión, después de un tiempo, o sea al ocurrir una falla en baja tensión y el interruptor queda bloqueado, el "timer" espera un tiempo (5 ciclos) y manda operar el "trip" del primario, obteniendo así la salida del transformador del sistema, al usar este tipo de protección se tiene el inconveniente de que cuando se tiene cargas importantes, y en una de ellas ocurre una falla a tierra las restantes quedan perjudicadas, debido a la salida del transformador , véase figura 74pt.a, .

Por otro lado cuando se tiene fusibles de alto poder de ruptura del tipo (HH) en el lado de media tensión, que es comúnmente usado en sistemas industriales, se debe tener presente que para que el fusible opere es necesario que la corriente de falla a tierra $I_{3\phi}$ calculada en

lado de baja tensión (reflejada al valor correspondiente del lado de media tensión) sea mayor que la corriente mínima de ruptura del mismo, por este motivo hay que elegir con cuidado la intensidad nominal del fusible. En la curva característica del tiempo de fusión del fusible debe existir una distancia de seguridad equivalente al 25% de la corriente de corto circuito (VDE0100), véase figura 74 pt.b.

Podemos añadir que cuando ocurre una falla a tierra en lado de baja tensión y no responde la protección, un fusible operará, originando una alimentación $l\emptyset$; que es perjudicial porque da lugar a la aparición de sobrecargas y desbalance del sistema, es por eso que su uso ya no se recomienda en diseños industriales modernos.

A continuación veremos el comportamiento de las corrientes en los devanados del primario del transformador de distribución cuando opera un fusible, de la figura 75pt.a, b, se supone una falla a tierra en el receptor, y el interruptor se bloquea, por consiguiente las corrientes se

rían

$$I_c = \frac{I_a}{a} \quad a: \text{relac. de transformación}$$

$$I_A \approx I_B \approx 0 \text{ (debido al equilibrio de las f.m.)}$$

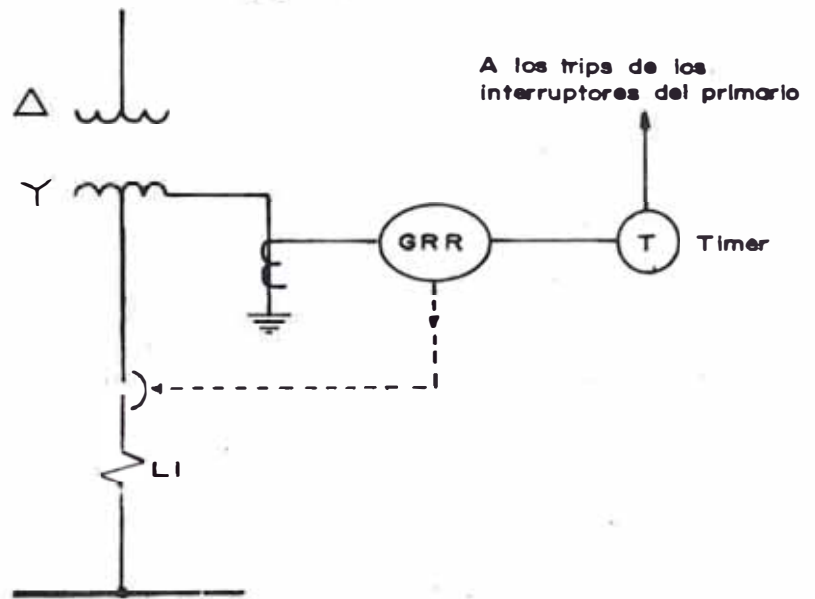


Fig. 74 pt. a.- DISPOSICION CLASICA DE LA PROTECCION DEL SECUNDARIO Y EL PRIMARIO RESPECTIVAMENTE, USANDO TIMER COMO RESPALDO.

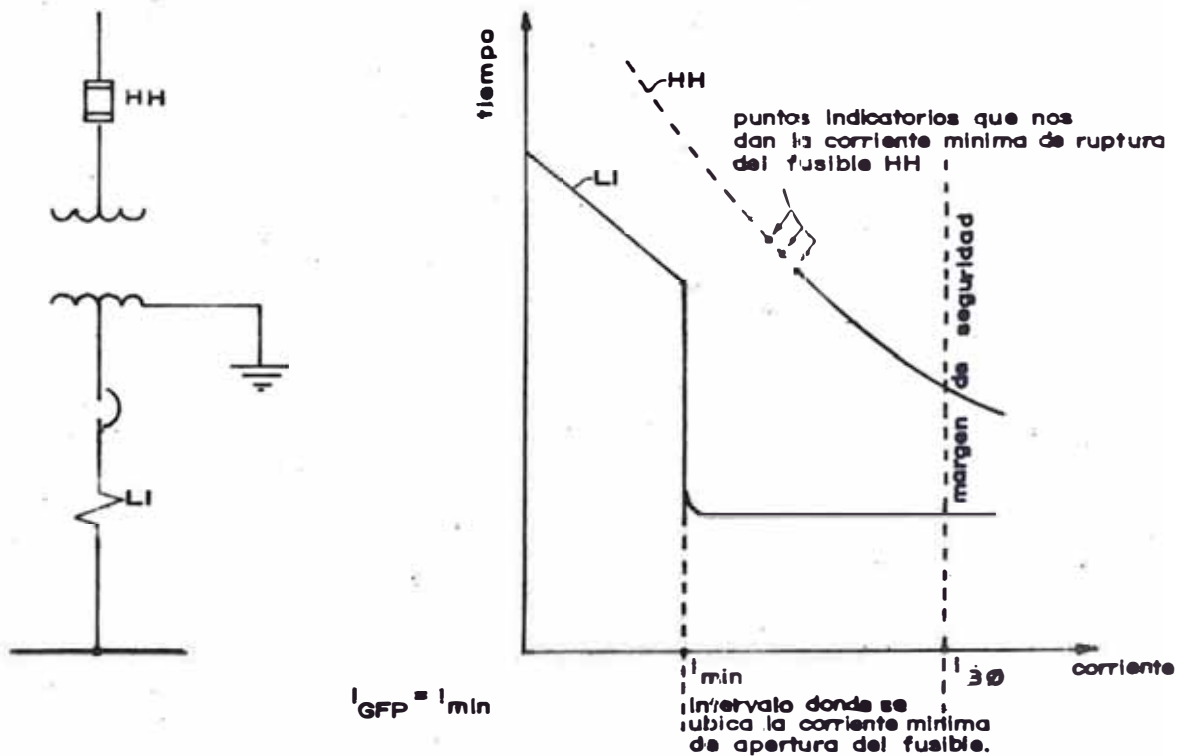


Fig. 74 pt. b.- SELECTIVIDAD ENTRE UN FUSIBLES DEL TIPO HH EN MEDIA TENSION, Y UN INTERRUPTOR DE PROTECCION UBICADO EN BAJA TENSION, EN UN SISTEMA PUESTO A TIERRA SOLIDAMENTE

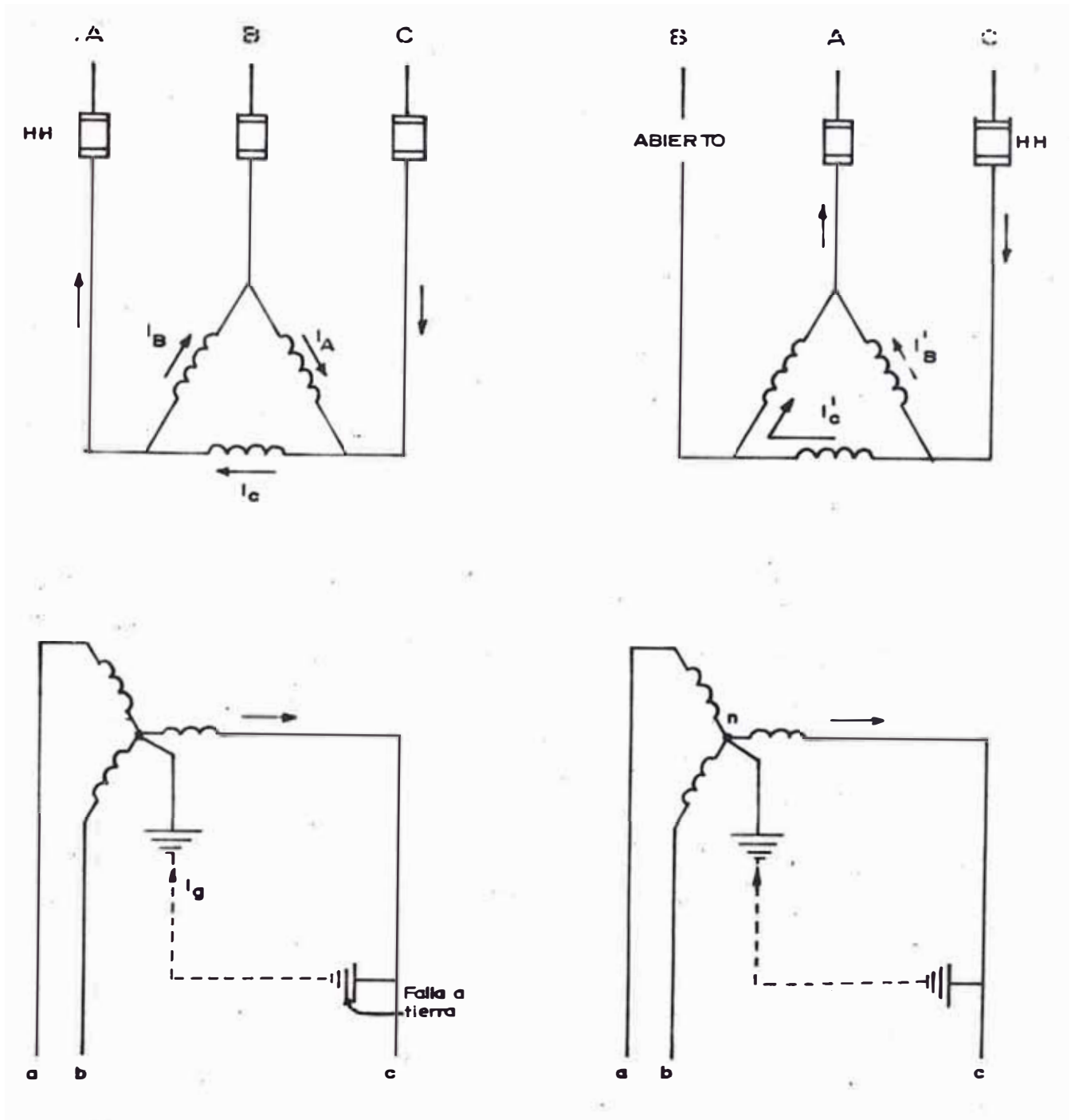


Fig. 76 pt.a.- COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA REFLEJADA EN EL PRIMARIO, ANTES DE QUE OCURRA LA APERTURA DEL FUSIBLE.

Fig. 76 pt.b.- COMPORTAMIENTO DE LA NUEVA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA REFLEJADA EN EL PRIMARIO DEBIDO A LA APERTURA DEL FUSIBLE DE UNA DE LAS FASES.

por consiguiente el fusible de la fase "B" operará con la corriente I_C . como la falla a tierra en el secundario persiste debido a que no han operado todos los fusibles, circulará una nueva corriente por el devanado primario (I'_C). Según estudios y medidas hechas para sistemas de baja y media tensión por la "General Electric" esta corriente puede alcanzar valores de

$$I'_C = 5\% \left(\frac{I_g}{a} \right) \quad \text{cuando el sistema trabaja por debajo de su carga nominal}$$

$$I'_C = 75\% \left(\frac{I_g}{a} \right) \quad \text{cuando el sistema trabaja a plena carga.}$$

y,

$$I'_B = \left(\frac{2I_n}{a} \right) \quad \text{corriente debido a la sobrecarga.}$$

Por los fusibles de las fases sanas circulará la corriente ($I'_C + I'_B$), obviamente que esta corriente no supera la corriente mínima de ruptura del fusible, a no ser que la corriente de sobrecarga sea elevada; por lo tanto circulará indefinidamente (véase figura 75 pt.b.)

7.9.3. Selectividad de los interruptores en dispositivos de protección, cuando se tiene en el sistema transformadores de puesta a tierra

Habíamos dicho en el acápite 3.4. que para detectar fallas a tierra en sistemas industriales con el neutro ais-

lado era necesario crear un neutro artificial, este neutro es creado por transformadores o reactores 3ϕ de puestas a tierra. Estos transformadores al participar en el sistema necesitan de una protección contra los cortocircuitos a tierra, ya que sus devanados no pueden soportar indefinidamente esta corriente; para el ajuste de la protección del reactor se debe tener en cuenta el valor de la corriente magnetizante del reactor de puesta a tierra, ya que esta no debe ser detectada por los sistemas de protección porque provocaría interrupciones indeseables en el sistema, también se debe tener en cuenta la corriente homopolar del sistema. En las figuras 27 pt.a. b. de la sección 3 se tiene dos sistemas típicos de baja y media tensión donde el ajuste de la protección en el alimentador del receptor se hace hasta un valor de $3I_0$, y el ajuste de la protección del secundario del transformador de distribución se hace hasta $2I_0$, y la protección del reactor 3ϕ de puestas a tierra si la tuviese, se ajustaría hasta I_0 ; cabe notar que $(I_g = 3I_0)$ donde I_g es la corriente de falla a tierra. Para obtener una buena selectividad es necesario hacer un buen ajuste de los dispositivos de protección del reactor 3ϕ de tal manera que esta protección sea de respaldo (Back-up) de los e

sistemas de protección, de lo contrario la corriente de falla no será detectada por los otros dispositivos. Lo que debemos recalcar nuevamente es que la corriente del arco debido a la falla a tierra quede localizada - entre I_0 y $3 I_0$, con esto ya estaríamos asegurando una adecuada confiabilidad del sistema, por otro lado la corriente nominal de la protección del reactor juega un papel importante para garantizar la selectividad, ya que debe estar por encima de las otras protecciones del sistema.

A continuación ilustraremos sistemas típicos usados en la industria, véase figura 76 pt.a.b.

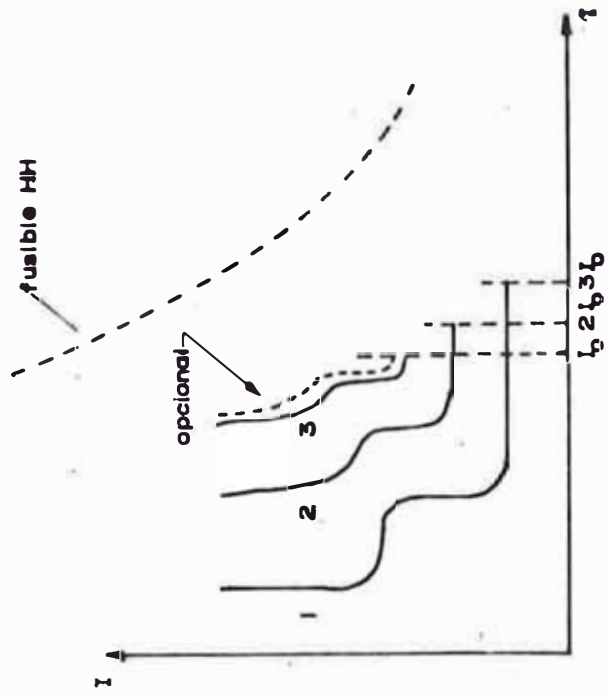
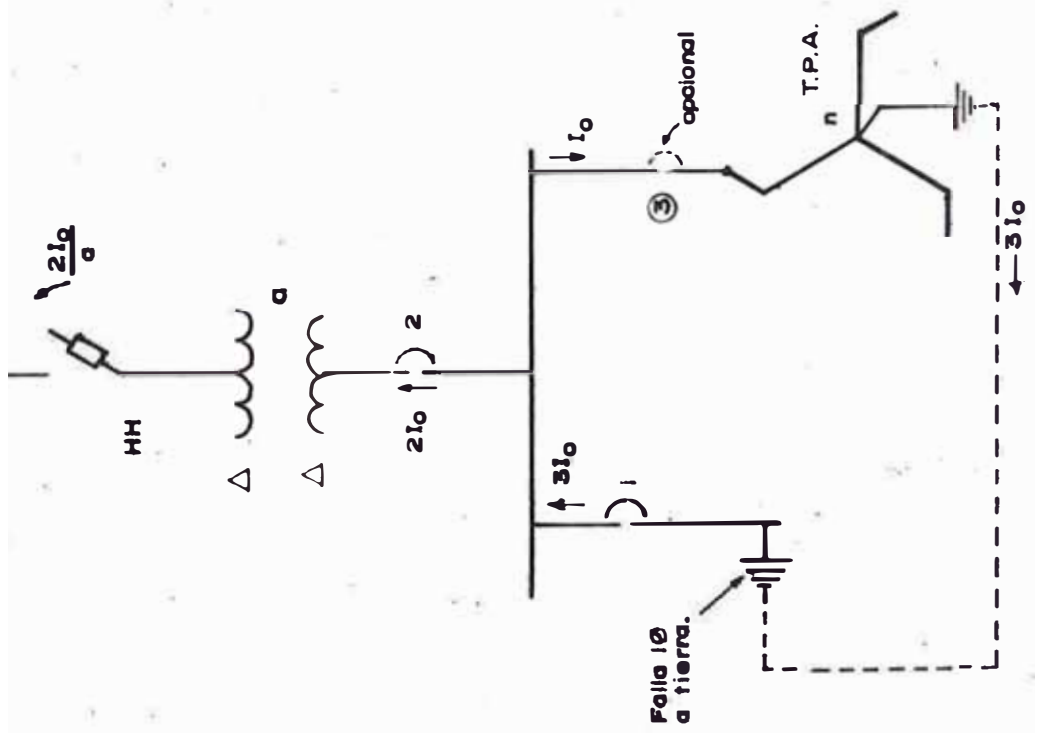


Fig. 76 pt. a.- SISTEMA SELECTIVO TIPO EN BAJA TENSION.

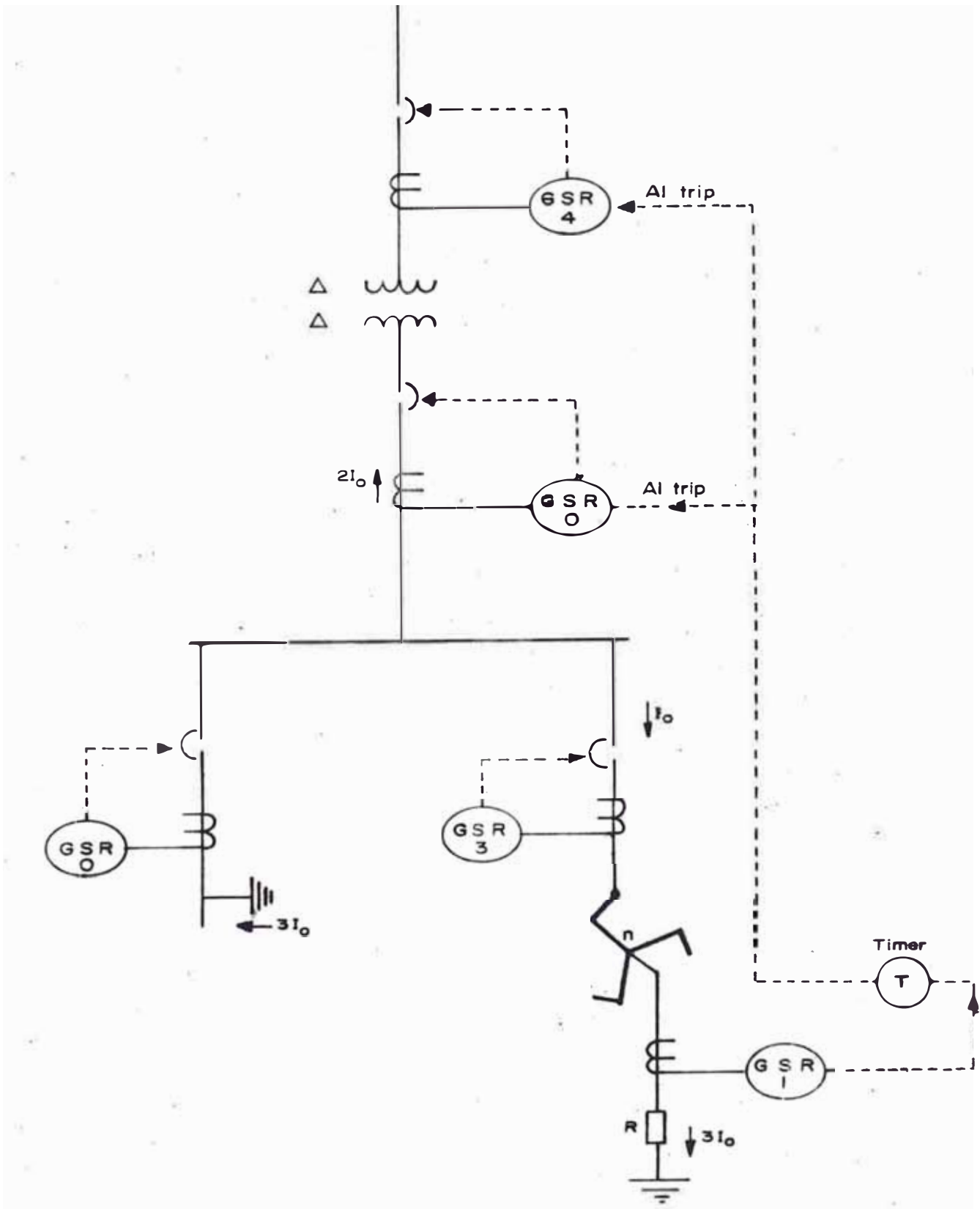


Fig. 76 pt.b- SISTEMA SELECTIVO TIPO EN MEDIA TENSION.

SECCION VIII

8. CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA FUNCIONAL Y PROTECCION PERSONAL

En esta última sección trataremos sobre el cálculo de la resistencia de puesta a tierra en sistemas industriales, este cálculo es realizado en forma aproximada debido a que existen atenuantes en cuestión a la variación de la resistividad del terreno circundante en el lugar de la puesta a tierra, y es por eso que existe diferencia notoria entre los valores experimentales y teóricos.

8.1. RESISTENCIA DE LA TOMA A TIERRA, O DE UNA INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA

Es la resistencia entre el electrodo de tierra o la instalación de puesta a tierra y una toma de tierra de referencia.

La resistencia de una instalación de puesta a tierra depende

ENVIADO

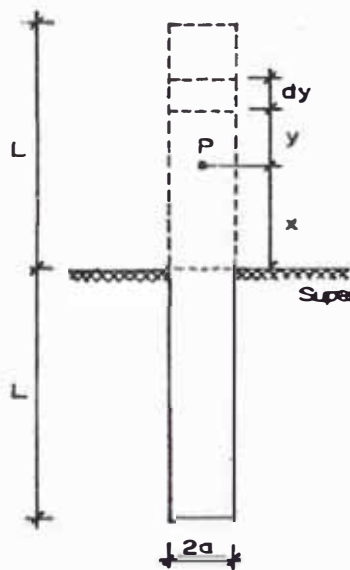
de además del valor de la resistencia de la instalación y del electrodo, muy especialmente de la resistencia-específica de la tierra (resistividad del terreno). Esta última magnitud es la resistencia eléctrica específica del suelo y representa la resistencia entre las dos caras o puestas de un cubo de tierra de un metro de arista.

82. CALCULO ANALITICO DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE UNA JABALINA

La Jabalina es la toma de tierra más usada en sistemas industriales de baja y media tensión, donde los gradientes de potencial son relativamente bajos.

El cálculo consiste en un problema electrostático, de calcular la capacitancia asumiendo una carga uniforme sobre la superficie, esto significa calcular el potencial promedio sobre el electrodo.

De la figura anexa asumamos una jabalina de longitud "L" y diámetro "2a", con su imagen sobre la superficie de la tierra, y con una carga "q"; γ es más la carga en el segmento dy, es qdy. El potencial en cualquier punto "P" debido a esta carga es :



$\frac{q dy}{\sqrt{a^2 + y^2}}$, para obtener el potencial total -

en todo el espacio tendremos que integrar desde :

$$\int_0^{L-x} \frac{q dy}{\sqrt{a^2 + y^2}} + \int_0^{L+x} \frac{q dy}{\sqrt{a^2 + y^2}} \Bigg) \frac{dx}{L}$$

$V = 2q \operatorname{Ln} \frac{4L}{d} - 2q$, y la capacitancia vendría calculada por la siguiente expresión :

$$\frac{1}{C} = \frac{V}{2qL} = \frac{1}{L} \left(\operatorname{Ln} \frac{4L}{a} - 1 \right), \text{ por otro lado la}$$

resistencia de la jabalina y el terreno sería :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\operatorname{Ln} \frac{4L}{a} - 1 \right), \text{ si } d=2a.$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\operatorname{Ln} \frac{8L}{d} - 1 \right) \text{ y/o, } R = \frac{\rho}{2\pi L} \operatorname{Ln} \left(\frac{4L}{d} \right),$$

expresiones que no exceden una de otra en un 6 % .

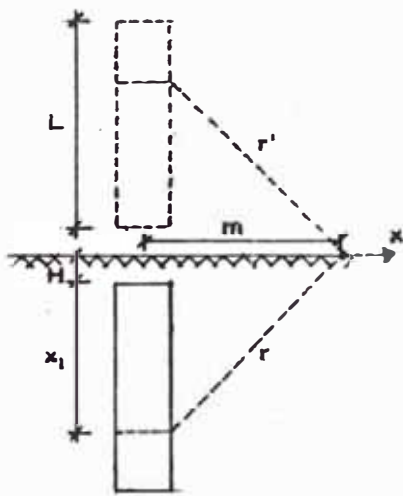
Si se entierra la jabalina a una profundidad (t), la resistencia sería :

$$R = \frac{\rho I}{2\pi L} \operatorname{Ln} \frac{2L}{d} \left(\frac{\sqrt{3L + 4t}}{\sqrt{L + 4t}} \right).$$

Finalmente el potencial en cualquier punto de la superficie sería :

$$V_m = \frac{\rho I}{2\pi L} \ln \frac{2H + L + \sqrt{m^2 + (2H + L)^2}}{2H + \sqrt{m^2 + 4H^2}}$$

Por otro lado, el potencial en cualquier punto de la superficie es taría calculada de la siguiente manera :

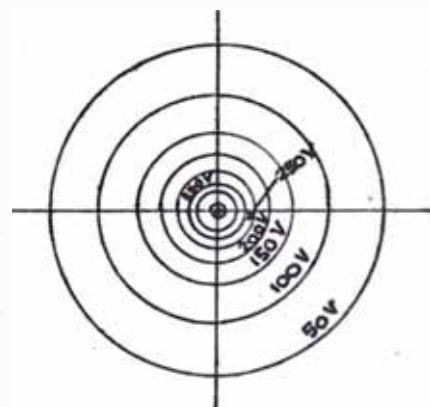
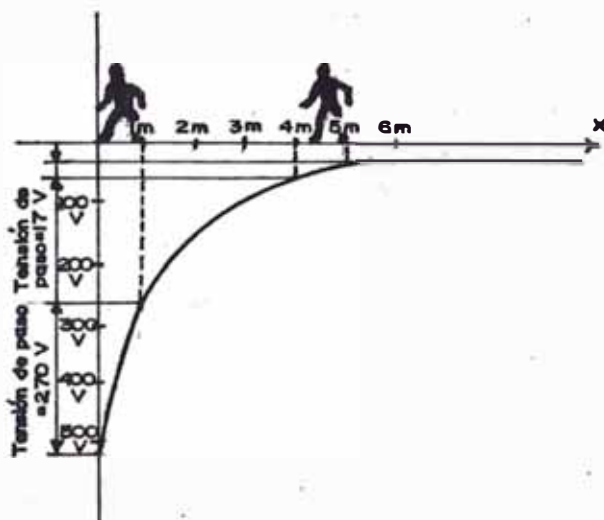


$$dV = \frac{\rho di}{4\pi y} ; \quad di = \frac{I}{L} dX_1$$

$$V = \frac{\rho I}{2\pi L} \left(\int_H^{H+L} \frac{dX_1}{m^2 + (X_1 + H)^2} \right)$$

$$V_x = \frac{\rho I}{2\pi L} \ln \frac{2H + L + \sqrt{m^2 + (2H + L)^2}}{2H + \sqrt{m^2 + 4H^2}}$$

Finalmente con esta última expresión podemos graficar el comportamiento del gradiente de potencial en el terreno circundante a la jabalina.



8.3. CALCULO ANALITICO DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE DOS O MAS JABALINAS (SOLUCION DE "TAGG")

Cuando la resistencia deseada no se puede conseguir con una jabalina, se clavan otra u otras; la distancia entre las jabalinas (a), ha de ser, por lo menos igual o mayor a la profundidad (t) a que están clavadas las jabalinas; de lo contrario, la instalación de las tomas de tierra resultaría contraproducente porque el embudo de tensiones sería peligroso.

Para el cálculo de la resistencia a tierra de dos ó más jabalinas utilizaremos el método analítico de "tagg", que consiste en reemplazar una jabalina por un eléctrodo semi-esférico equivalente, que tenga la misma resistencia. Esta sustitución simplifica el cálculo para un gran número de jabalinas; se asume que cada semi-esfera equivalente lleva la misma carga para el cálculo del potencial promedio del grupo de jabalinas, y teniendo la carga total puede calcularse la capacitancia y por consiguiente la resistencia.

Este método puede ser aplicado solo si el espacio entre jabalinas es igual o mayor que el doble del radio de

la semiesfera equivalente

a) La resistencia de una semi esfera en la superficie es:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi r}$$

Iguando a la resistencia de una jabalina, tenemos

$$\frac{\rho}{2\pi r} = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right)$$

$$r = \frac{L}{\ln \frac{8L}{d} - 1}$$

Si se entierra hasta una profundidad (t) :

$$r = \frac{L}{\ln \frac{2L}{d} \sqrt{\frac{3L+4t}{L+4t}}}$$

donde

r = radio de la semiesfera

d= diámetro de la jabalina

b) Si tenemos en paralelo dos jabalinas separadas a una distancia "a" cada una puede ser reemplazada por su semiesfera equivalente de radio "r" y carga "Q" por consiguiente el potencial de cada jabalina será

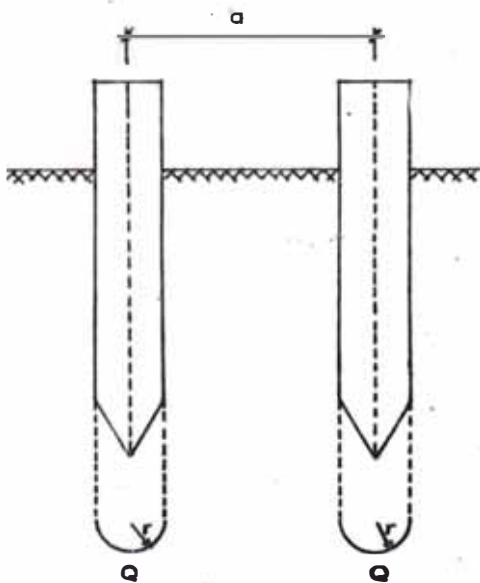
$$V = \frac{Q}{r} + \frac{Q}{a} = Q \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{a} \right) = \frac{Q}{r} \left(1 + \frac{r}{a} \right)$$

$$\text{haciendo : } \alpha = \frac{r}{a}$$

La carga total será : $2Q$

$$CV = 2Q, \quad C = \frac{2Q}{V} = \frac{2Q}{\frac{Q}{r}(1+\alpha)}$$

$$C = \frac{2r}{(1+\alpha)} \quad \text{ó} \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{2r} (1+\alpha)$$



Entonces la resistencia de ambas jabalinas será :

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi C} = \frac{\rho}{4\pi r} (1+\alpha)$$

El factor de reducción con respecto a una jabalina será :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1+\alpha}{2}$$

De igual modo podemos calcular los factores de reducción para 3 o 4 jabalinas conectadas en paralelo :

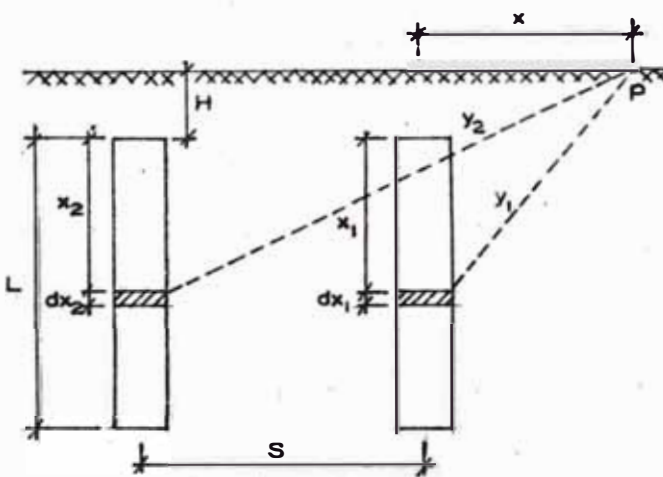
$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{2 + \alpha - 4\alpha^2}{6 - 7} \quad (\text{para 3 jabalinas})$$

$$\frac{R_4}{R_1} = \frac{12 + 16\alpha - 23\alpha^2}{48 - 40\alpha} \quad (\text{para 4 jabalinas})$$

Por otro lado el potencial en cualquier punto de la superficie, para 2 jabalinas conectadas en paralelo sería :

$$Y_1 = \sqrt{X^2 + (X_1 + H)^2}$$

$$Y_2 = \sqrt{X^2 + (X_2 + H)^2}$$



El potencial debido a la jabalina 1 :

$$V_1 = \frac{\rho I}{2\pi L} \int_H^{H+L} \frac{dX_1}{\sqrt{X^2 + (X_1 + H)^2}}$$

$$V_1 = \frac{\rho I}{2\pi L} \left(\text{arc senh} \frac{2H+L}{X} - \text{arc senh} \frac{2H}{X} \right)$$

El potencial debido a la jabalina 2 :

$$V_2 = \frac{\rho I}{2 \pi L} \int_H^{H+L} \frac{dx_2}{\sqrt{(x+s)^2 + (x_2+H)^2}}$$

$$V_2 = \frac{\rho I}{2 \pi L} \left(\operatorname{arc\,senh} \frac{2H+L}{x+s} - \operatorname{arc\,senh} \frac{2H}{x+s} \right)$$

Finalmente el potencial en cualquier punto de la superficie sería :

$$V_X = V_1 + V_2 = \frac{\rho I}{2 \pi L} \left(\operatorname{arc\,senh} \frac{2H+L}{x} + \operatorname{arc\,senh} \frac{2H+L}{x+s} - \operatorname{arc\,senh} \frac{2H}{x} - \operatorname{arc\,senh} \frac{2H}{x+s} \right)$$

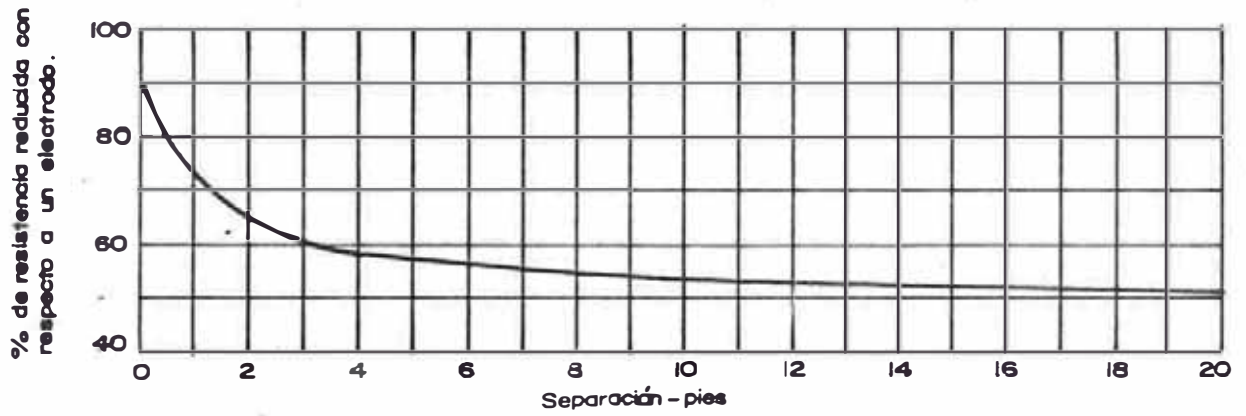


Fig. 77 pt. a.- VARIACION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA CON RESPECTO A LA SEPARACION DE LOS ELECTRODOS.

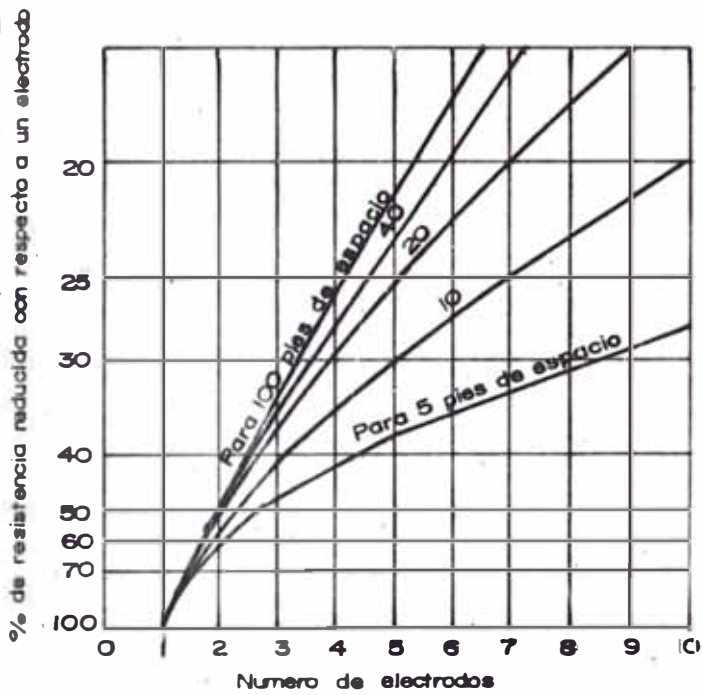


Fig. 77 pt. b.- VARIACION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA SEGUN EL NUMERO DE ELECTRODOS INSTALADOS.

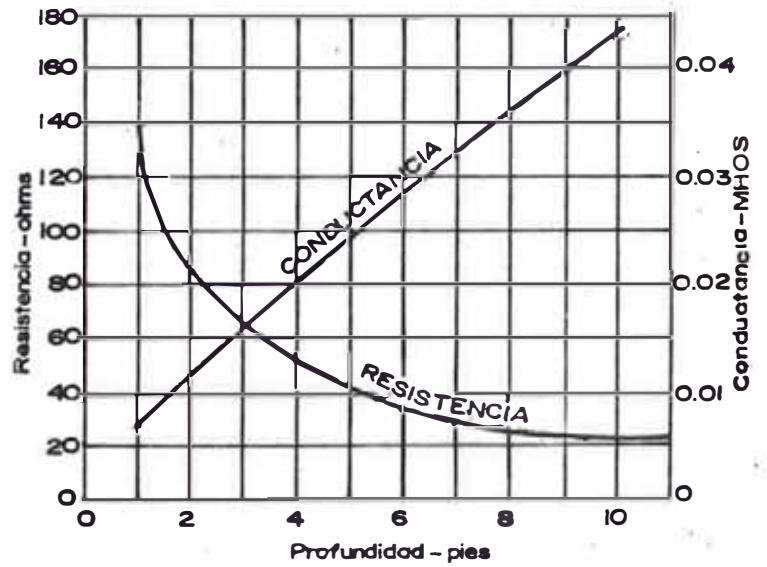


Fig. 77 pt. c.- VARIACION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN FUNCION DE LA PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO.

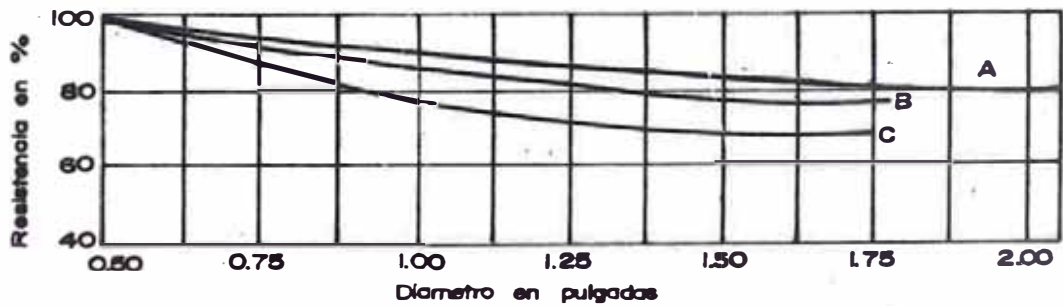


Fig. 77 pt. d.- VARIACION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA SEGUN EL DIAMETRO DE LOS ELECTRODOS

Podemos concluir diciendo , que con las expresiones de los potenciales en cualquier punto de la superficie, podemos calcular la distribución de las caídas de tensión en las tomas de tierra del tipo jabalina , que nos es muy útil para verificar la magnitud de las tensiones de paso en la zona circundante a la toma .

Finalmente mostraremos mediante las figuras 77pta , b , c , d , las diferentes variaciones de la resistencia de puesta a tierra , con respecto a la separación , y números de electrodos , es más también , con respecto a la profundidad de enterramiento de la misma .

8.4. CALCULO ANALITICO DE LA RESISTENCIA A TIERRA CUANDO SE TIENE JABALINAS Y MALLAS (SOLUCION "SCHWARZ").

Existen sistemas de media tensión, donde el gradiente de potencial es muy elevado por causa de una falla a tierra , este gradiente puede ser disminuído , o de lo contrario atenuado , utilizando tomas de tierra profundas constituídas por Jabalinas y mallas , esta última es la llamada toma de tierra de mando , que tiene la finalidad de dis

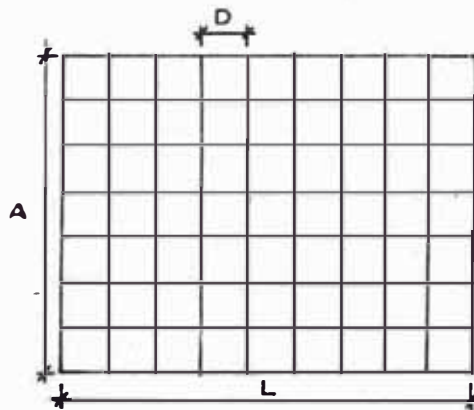
minuír el potencial en las proximidades de la jabalina, -
obviamente, originando una disminución de la tensión -
de paso.

"Schwarz" calcula la resistencia de puesta a tierra aproxima-
mada de esta combinación, teniendo presente la resistencia
mútua de la jabalina con respecto a la malla de la siguiente
manera ;

a) La resistencia de puesta a tierra de una malla o reticu-
lado, según Schwarz, está definida de la siguiente ma-
nera

$$R_1 = \frac{\rho}{L_R} + 0,443 \frac{\rho}{\sqrt{L \times A}}$$

donde:



D = espaciamiento (≤ 15 m)

ρ = resistividad del terreno en ohm-m

L = longitud de la malla en :m

A = Ancho de la malla en : m

L_R = Longitud real del conductor usado para confeccionar la malla en :m.

Por otro lado la sección del conductor para confeccionar la
malla viene expresada por la siguiente expresión:

$$S = \frac{I_g}{1973 \sqrt{\frac{\log \left[\frac{T_m T_a}{234 + T_a} + 1 \right]}{33t}}}$$

S = Sección del conductor en mm^2

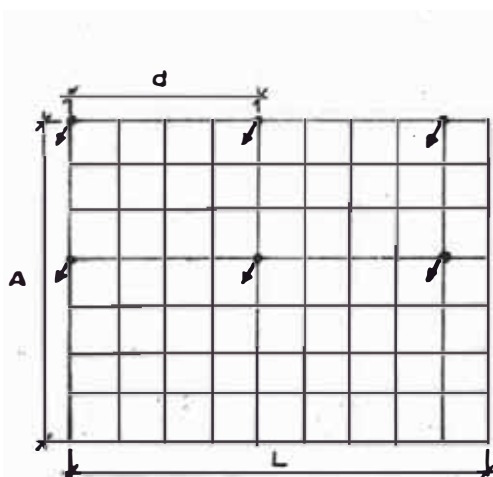
T_m = Máxima temperatura permisible por el conductor en $^{\circ}\text{C}$

T_a = Temperatura ambiente en $^{\circ}\text{C}$

t = Tiempo de apertura de los relés de puesta a tierra en:seg.

A continuación mostraremos figuras que nos relacionan, la sección del conductor, usado para confeccionar la malla y la corriente de falla a tierra, estos abacos son elaborados según Norma VDE (Fig.78 pt., a,b,c,)

- b) La resistencia de puesta a tierra de "n" jabalinas unidas - salidamente en el reticulado según Schwarz, viene expresada según la siguiente expresión



$$R_2 = \frac{\rho}{20n} \left[6.2 + \frac{2.8}{\sqrt{LA}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$$

Donde:

n = número de jabalinas

d = distancia entre Jabalinas (≤ 30 m)

Por otro lado la resistencia mútua (R_{12}) entre la malla y

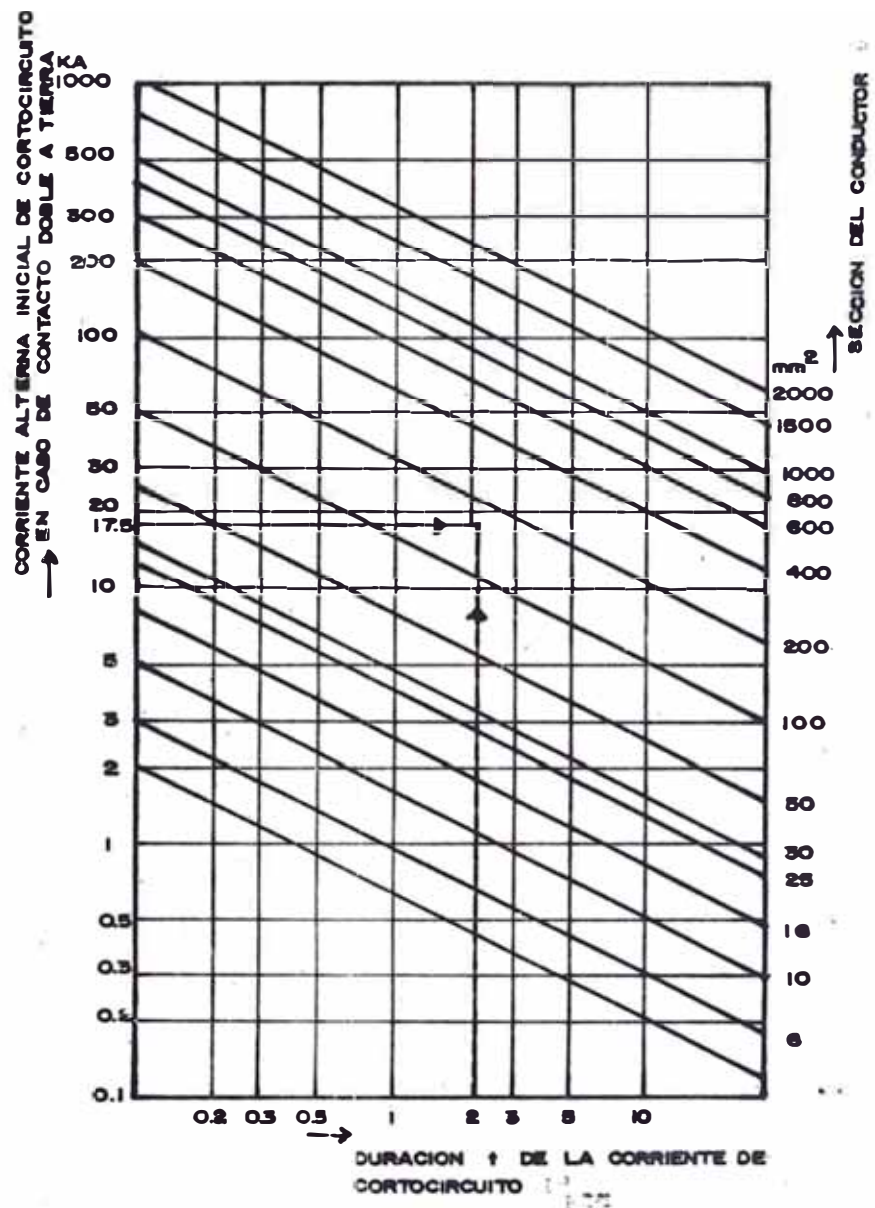


Fig. 78pta.- DIMENSIONAMIENTO DE LOS CONDUCTORES DE COBRE DE PUESTA A TIERRA, PARA UNA TEMPERATURA FINAL DE 200°C. TEMPERATURA INICIAL 20°C, CONVERSION A UNA TEMPERATURA FINAL DE 300°C :

$$I_{300^\circ C} = I_{200^\circ C} \cdot 0.8$$

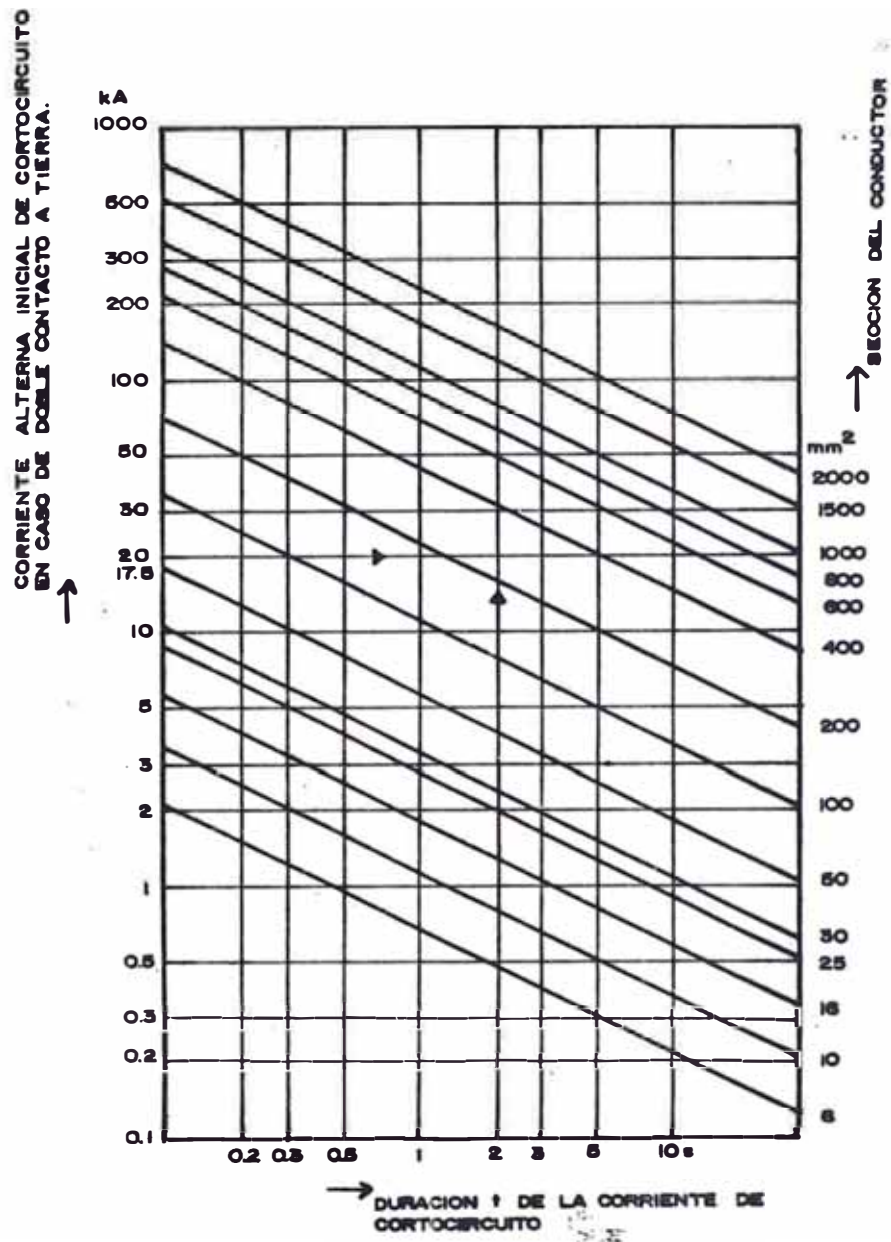


Fig. 78pt. b.- DIMENSIONAMIENTO DE LOS CONDUCTORES DE ALUMINIO DE PUESTA A TIERRA, PARA UNA TEMPERATURA FINAL DE 200° C.

TEMPERATURA INICIAL 20° C.

CONVERSION A LA TEMPERATURA FINAL DE 300° C:

$$I_{300^{\circ}\text{C}} = I_{200^{\circ}\text{C}} \cdot 0.8$$

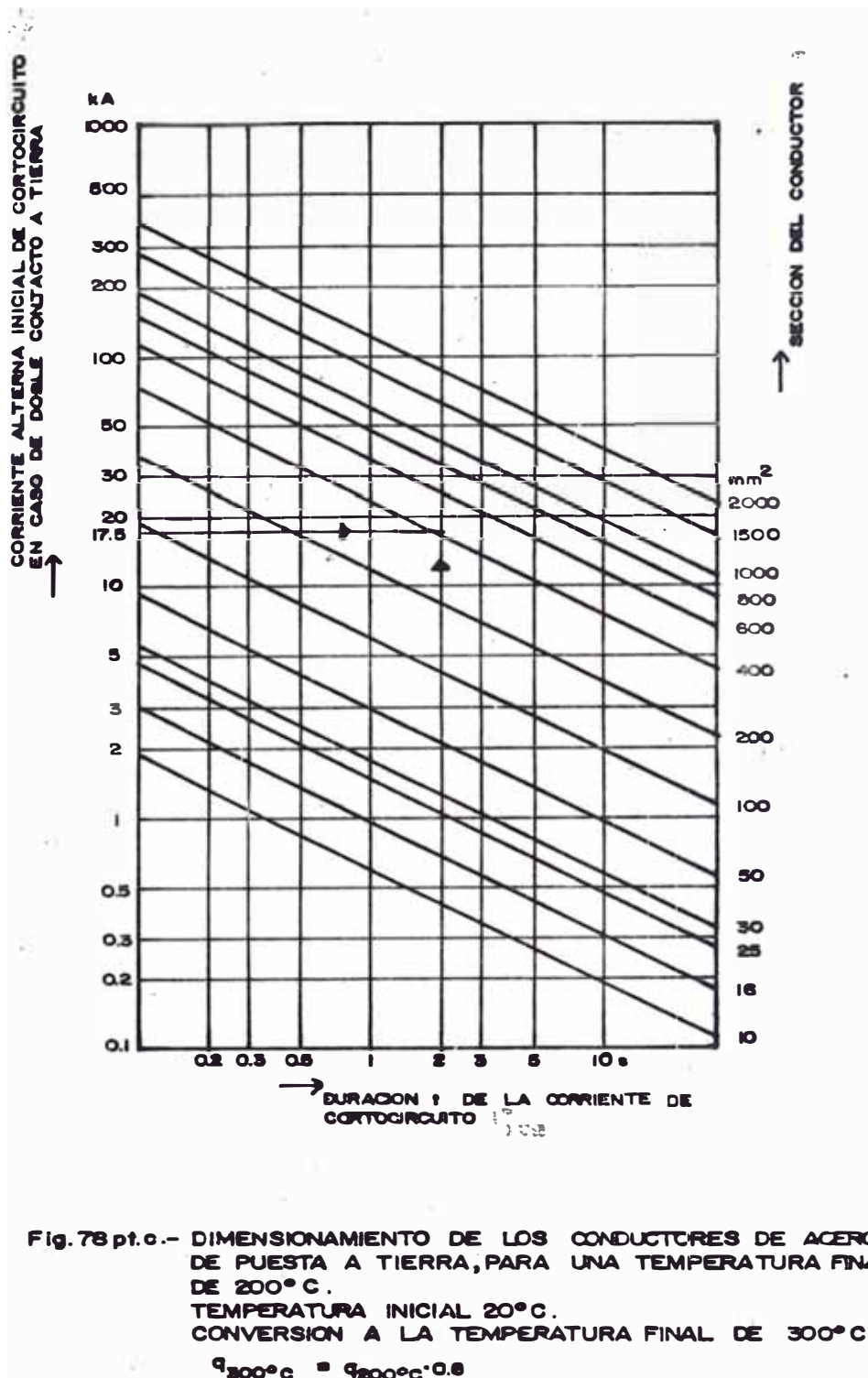


Fig. 78 pt.c.- DIMENSIONAMIENTO DE LOS CONDUCTORES DE ACERO DE PUESTA A TIERRA, PARA UNA TEMPERATURA FINAL DE 200° C.

TEMPERATURA INICIAL 20° C.

CONVERSION A LA TEMPERATURA FINAL DE 300° C

$$i_{300^{\circ}\text{C}} = i_{200^{\circ}\text{C}} \cdot 0.8$$















jabalinas viene expresado de la siguiente manera

$$\begin{aligned}
 R_{12} &= R_1 - 2.4 \cdot \frac{\rho}{L} \\
 &= \frac{\rho}{L_R} + 0.443 \frac{\rho}{\sqrt{LA}} - 2.4 \frac{\rho}{L_R} \\
 &= \rho \left(\frac{1}{L_R} + \frac{0.443}{\sqrt{LA}} - \frac{2.4}{L_R} \right), \text{ ohm}
 \end{aligned}$$

y la resistencia total de la combinación sería :

$$R_t = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2 R_{12}}, \text{ ohm.}$$

CUADRO 5pt.-FORMULAS PARA CALCULAR APROXIMADAMENTE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.

	HEMISFERIO DE RADIO "a"	$R = \frac{\rho}{2\pi a}$
	UNA VARILLA O ELECTRODO DE LONGITUD "L" Y RADIO "a"	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(L_n \frac{4L}{a} - 1 \right)$
	2 VARILLAS O ELECTRODOS SEPARADOS UNA DISTANCIA "S" Y S > L	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(L_n \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 - \frac{L^2}{3S^3} + \frac{2L^4}{5S^4} \dots \right)$
	2 VARILLAS O ELECTRODOS SEPARADOS UNA DISTANCIA "S" Y S < L	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(L_n \frac{4L}{a} + L_n \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \dots \right)$
	ALAMBRE DE LONGITUD "2L" ENTERRADO A UNA PROFUNDIDAD DE "S/2"	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(L_n \frac{4L}{a} + L_n \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \dots \right)$
	2 ALAMBRES EN ANGULO RECTO Y LONGITUDES "L" ENTERRADOS A UNA PROFUNDIDAD DE "S/2"	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(L_n \frac{2L}{a} + L_n \frac{2L}{S} + 0.2373 + 0.2146 \frac{S}{L} + 0.1035 \frac{S^2}{L^2} - 0.0424 \frac{S^4}{L^4} \dots \right)$
	3 ALAMBRES DE LONGITUD "L" COLOCADOS EN ESTRELLA Y ENTERRADOS A UNA PROF. DE "S/2"	$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left(L_n \frac{2L}{a} + L_n \frac{2L}{S} + 1.071 - 0.209 \frac{S}{L} + 0.238 \frac{S^2}{L^2} - 0.054 \frac{S^4}{L^4} \dots \right)$
	4 ALAMBRES DE LONGITUD "L" COLOCADOS EN CRUZ Y ENTERRADOS A UNA PROFUNDIDAD DE "S/2"	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left(L_n \frac{2L}{a} + L_n \frac{2L}{S} + 2.92 - 1.071 \frac{S}{L} + 0.616 \frac{S^2}{L^2} - 0.145 \frac{S^4}{L^4} \dots \right)$
	6 ALAMBRES DE LONGITUD "L" COLOCADOS ESTRELLADAMENTE A UNA PROFUNDIDAD DE "S/2"	$R = \frac{\rho}{12\pi L} \left(L_n \frac{2L}{a} + L_n \frac{2L}{S} + 6.851 - 3.128 \frac{S}{L} + 1.758 \frac{S^2}{L^2} - 0.49 \frac{S^4}{L^4} \dots \right)$
	8 ALAMBRES DE LONGITUD "L" COLOCADOS ESTRELLADAMENTE A UNA PROFUNDIDAD DE "S/2"	$R = \frac{\rho}{16\pi L} \left(L_n \frac{2L}{a} + L_n \frac{2L}{S} + 10.98 - 5.51 \frac{S}{L} + 3.26 \frac{S^2}{L^2} - 1.17 \frac{S^4}{L^4} \dots \right)$
	ALAMBRE EN FORMA CIRCULAR DE DIAMETRO "D" Y ESPESOR "d" A UNA PROFUNDIDAD DE "S/2"	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(L_n \frac{8D}{d} + L_n \frac{4D}{S} \right)$
	PLANCHA METALICA DE LONGITUD "2L" Y SECCION Y SECCION a x b (b < a/8) Y UNA PROFUNDIDAD "S/2"	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(L_n \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - ab}{2(a+b)} + L_n \frac{4L}{S} - 1 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \dots \right)$
	ELECTRODO CIRCULAR PUESTO HORIZONTALMENTE DE RADIO "a" Y PROFUNDIDAD DE "S/2"	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 - \frac{7a^2}{12S^2} + \frac{33a^4}{40S^4} \dots \right)$
	ELECTRODO CIRCULAR PUESTO VERTICALMENTE, DE RADIO "a" Y PROFUNDIDAD "S/2"	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 + \frac{7a^2}{24S^2} + \frac{99a^4}{320S^4} \dots \right)$

Finalmente mencionaremos mediante el cuadro 5pt, las diferentes fórmulas para calcular la resistencia de puesta a tierra en forma aproximada, de los distintas configuraciones de la toma de tierra.

8.5. CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE PROTECCIÓN PERSONAL

El tema de los contactos a masa en las instalaciones eléctricas industriales es de gran interés para el profesional electricista y, por lo general, no se le da la importancia que merece. Son muchos los accidentes laborales que se hubieran podido evitarse si los equipos y dispositivos eléctricos hubieran estado bien protegido contra los contactos indirectos.

Se entiende por contacto a masa a la unión conductiva entre piezas conductoras no pertenecientes al circuito de servicio (masas o piezas inactivas) y piezas de elementos de servicio (piezas activas) sometidas a la tensión propia de servicio.

Si una corriente eléctrica atraviesa el cuerpo humano, puede producirle la muerte. En muchas ocasiones la

causa de la muerte está en el corazón, que sometido a una actividad intensa e irregular, se agota y se para.

Se ha averiguado que una intensidad de 20 mA ya puede producir la muerte, en el supuesto que una parte de esta corriente pase por el corazón.

Como la corriente depende de la tensión y de la resistencia que ofrece el circuito de corriente, si se conoce el valor de la resistencia podrán establecerse los límites de tensión. Si dichos límites se rebasan, la corriente podría resultar peligrosa.

Según ensayos llevados a cabo, las personas con manos secas experimentan las siguientes sensaciones :

a 40 V - cosquilleo en las puntas de los dedos,

a 50 V - cosquilleo en las palmas de la mano

a 60 V- ligero dolor hasta el codo

a 80 V - Contracción de las manos.

En la repetición de esta prueba, pero con las manos húmedas, se pudo comprobar que a 40V ya no era posible abrir las manos por propio esfuerzo.

Se ha demostrado que una corriente alterna a baja fre -

cuencia es menos dañino que a alta frecuencia, y con respecto a la corriente continúa esta se puede soportar hasta 5 veces la corriente con respecto a la alterna pero la electrolisis de la sangre es más severa.

Con todas estas circunstancias, podemos suponer que el cuerpo humano tiene una resistencia de 3,000 ohm, como la corriente de 20 mA comienza ya ha ser peligrosa, podemos afirmar que la tensión de 65 V es la tensión mínima (o de toque), por encima de la cual resulta peligrosa por el cuerpo humano.

A continuación daremos las diferentes medidas de protección para evitar las elevadas tensiones de toque en una pieza conductiva que no forma parte del circuito de servicio.

8.5.1. Conexión Directa a Tierra de las Masas, en sistemas con neutro a tierra

Esta conexión tiene la finalidad de impedir la permanencia de una tensión de toque o de paso demasiado elevada en la masa o en el terreno circundante, es más esta conexión se realiza en sistemas con neutro a tierra o aislado, en esta última la corriente de tierra es muy reducida, puesto que no hay ningún circuito cerrado de corriente, a no ser que la red tenga una resistencia de aislamiento demasiada

baja, que normalmente se presenta en sistemas industriales antiguos; a todo esto sólo se pueden encontrarse muy bajas tensiones de puesta a tierra para este último sistema.

De la figura 79 pt.a vemos que si no estuviese la resistencia de puesta a tierra de protección (R_s), toda la corriente de falla circulará por el cuerpo humano ya que $R_m + R_t > R_s$, originando una tensión de toque (V_B) y de falla (V_f) de :

$$V_B = I_2 R_m$$

$$V_f = I_2 (R_m + R_t)$$

Donde :

R_m = Resistencia del cuerpo humano $\approx 3000\text{ohm}$

R_t = Resistencia de emplazamiento o promedio entre ambos pies $\approx 990\text{ohm}$

R_f = Resistencia de falla : ohm.

R_b = Resistencia funcional $\approx 2\text{ohm}$

R_a = Resistencia de la red: ohm

Lo que se desea con esta conexión es que $R_s \ll R_m + R_t$, obteniendo esta condición, se garantizará una pequeña

tensión de toque.

Habíamos dicho que existe una tensión y corriente de 65V, 5 mA según Normas VDE aceptables por el cuerpo humano, por consiguiente podemos concluir de la siguiente manera:

$$I_2 R_m \leq 65V$$

$$I_2 \leq 20 \text{ mA}$$

Ahora si: $R_m + R_t \gg R_s \cdot I_f \cdot I_1$

$$R_s = \frac{65}{I_f} \quad \text{ó} \quad R_s = \frac{65}{KI_n}$$

Donde : I_n = Corriente nominal del órgano protector de sobrecorriente.

K = Factor de ajuste del órgano protector.

La figura 79pt.b. nos muestra, la puesta a tierra de las masas de 3 motores 3Ø en forma selectiva, en este caso cuando exista una falla a tierra, debe desconectarse automáticamente el elemento afectado.

Las condiciones o recomendaciones de tensión y corriente según las normas VDE, pueden adjuntarse a las siguientes premisas:

- a) Resistencia de puesta a tierra de los equipos conectados a redes con neutro a tierra:

$$R_s \leq \frac{\text{Mitad de la tensión a tierra}}{\text{Intensidad de disparo}}$$

- b) Resistencia de puesta a tierra funcional:

$$R_o \leq \frac{65 \text{ V}}{\text{Intensidad de disparo del mayor elemento consumidor puesto a tierra.}}$$

Estas premisas se basan a que los dispositivos de protección desconecten en forma inmediata a la corriente de falla, y por otro lado la tensión máxima en el neutro no debe ser mayor de 65V, implicando una tensión de paso bastante reducida.

También podríamos haber admitido que la tensión en el neutro sea la tensión de fase o de tierra, y en las masas una tensión con respecto a tierra no mayor que 65V, pero los resultados de ambos casos no difieren mucho.

Seguidamente veremos un ejemplo ilustrativo del primero de los casos.

Se tiene 3 cargas inductivas (figura 79pt.b.) conectadas a una red de 380V con el neutro puesto a tierra, y cuyas intensidades nominales son respectivamente, 3A, 5A, 8A,. El último de los motores lleva fusibles lentos, los otros dos llevan fusibles rápidos.

Carga número 1.-

$$\text{intensidad de disparo: } I_1 = 2.5 \times 3 = 7.5 \text{ A}$$

valor de la resistencia de puesta a tierra a masa:

$$R_{s_1} \ll \frac{110}{7.5} = 14.7 \text{ ohm}$$

Carga número 2.-

$$\text{intensidad de disparo: } I_2 = 2.5 \times 5 = 12.5 \text{ A}$$

valor de la resistencia de puesta a tierra a masa:

$$R_{s_2} \ll \frac{110}{12.5} = 8.8 \text{ ohm.}$$

Carga número 3.-

$$\text{Intensidad de disparo : } I_3 = 6 \times 8 = 48 \text{ A}$$

Valor de la resistencia de puesta a tierra a masa

$$R_{s_3} \ll \frac{110}{48} = 2.3 \text{ ohm}$$

Valor de la resistencia de puesta a tierra funcional :

$$R_o \ll \frac{65}{48} = 1.35 \text{ ohm}$$

De esta manera en caso de un defecto a masa en la primera carga , la corriente resultante será :

$$I = \frac{220}{147 + 1.35} = 13.8A$$

Si el defecto se produce en la segunda carga:

$$I = \frac{220}{8.8 + 1.35} = 21.6A$$

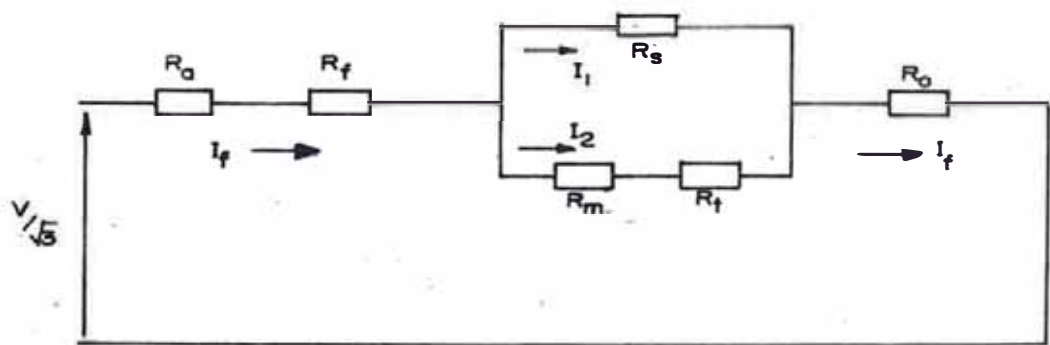
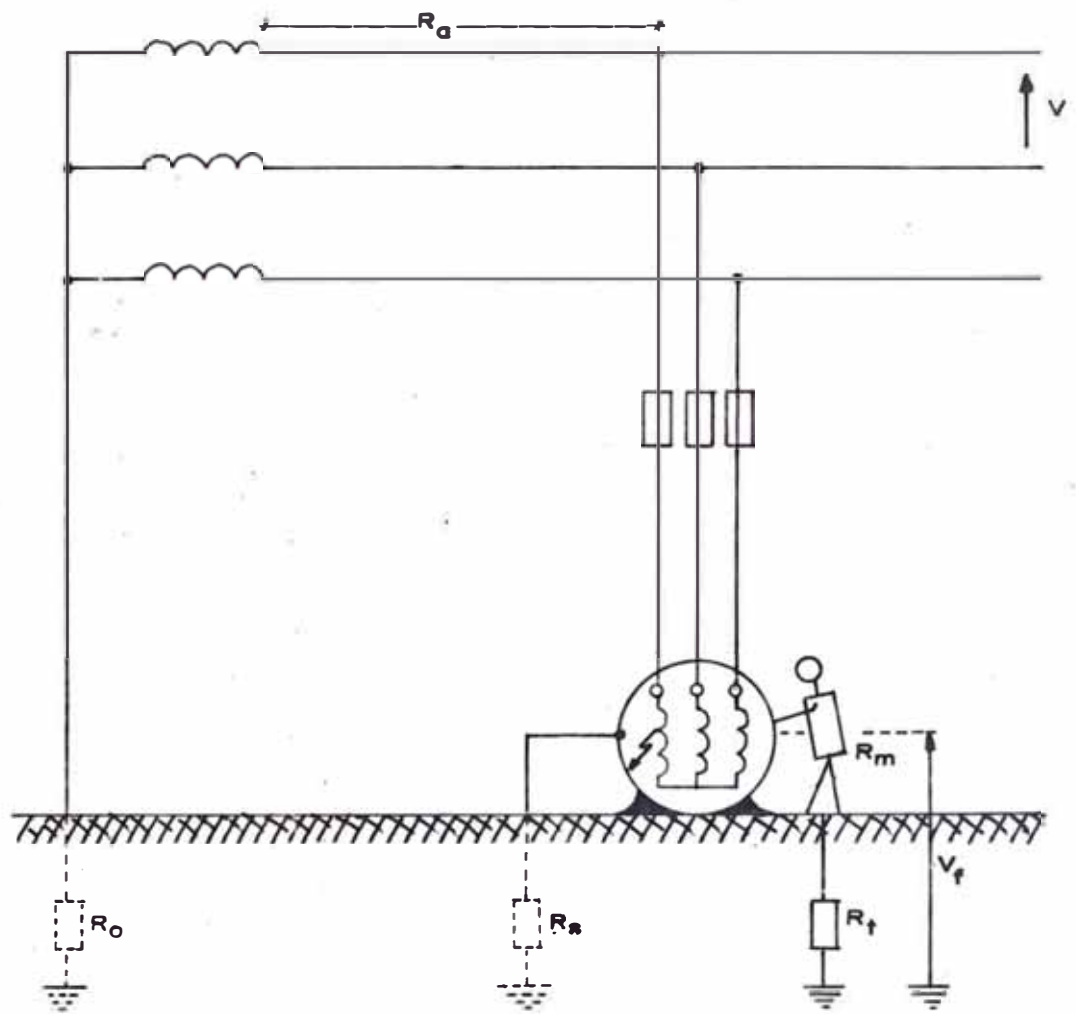
Y , finalmente , si se produce en la tercera carga:

$$I = \frac{220}{2.3 + 1.35} = 60A$$

Como la caída de tensión en el neutro es de 65V, y en cada una de las resistencias de 110V(175V en total), la caída de tensión para la línea y para el terreno será -
pues de :

$$220 - 175 = 45V$$

Finalmente para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra de cargas conectadas en redes sin neutro a tierra , hemos de fijar en primer lugar la tensión considerada no



circuito equivalente

Fig. 79. pt. a.- CONEXION DIRECTA A TIERRA DE LAS MASAS DE LOS EQUIPOS EN UN SISTEMA 3Ø EN ESTRELLA.

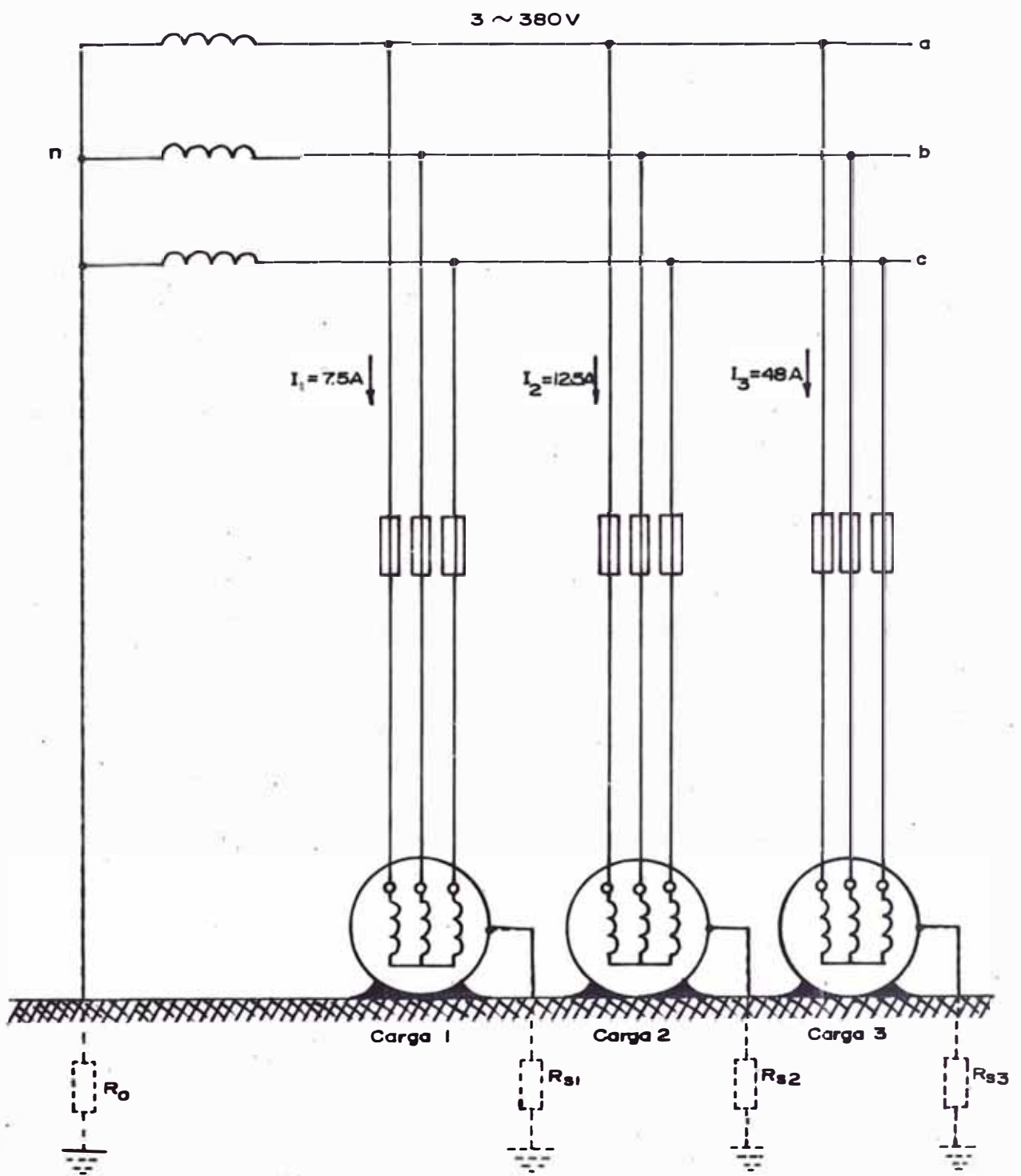
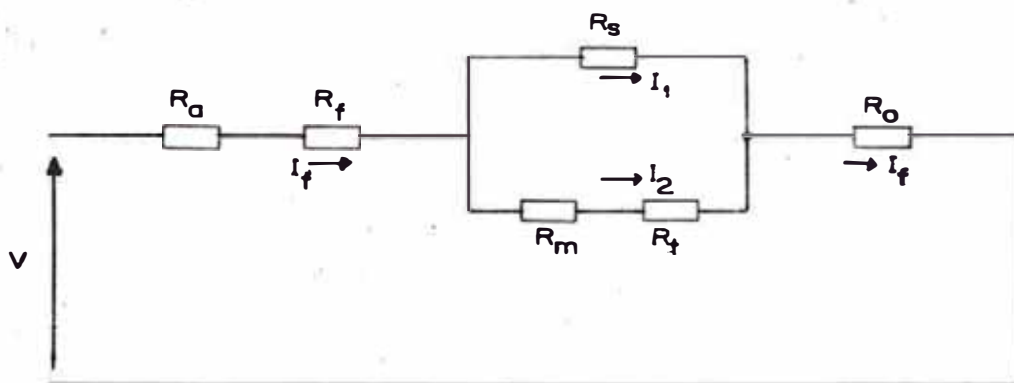
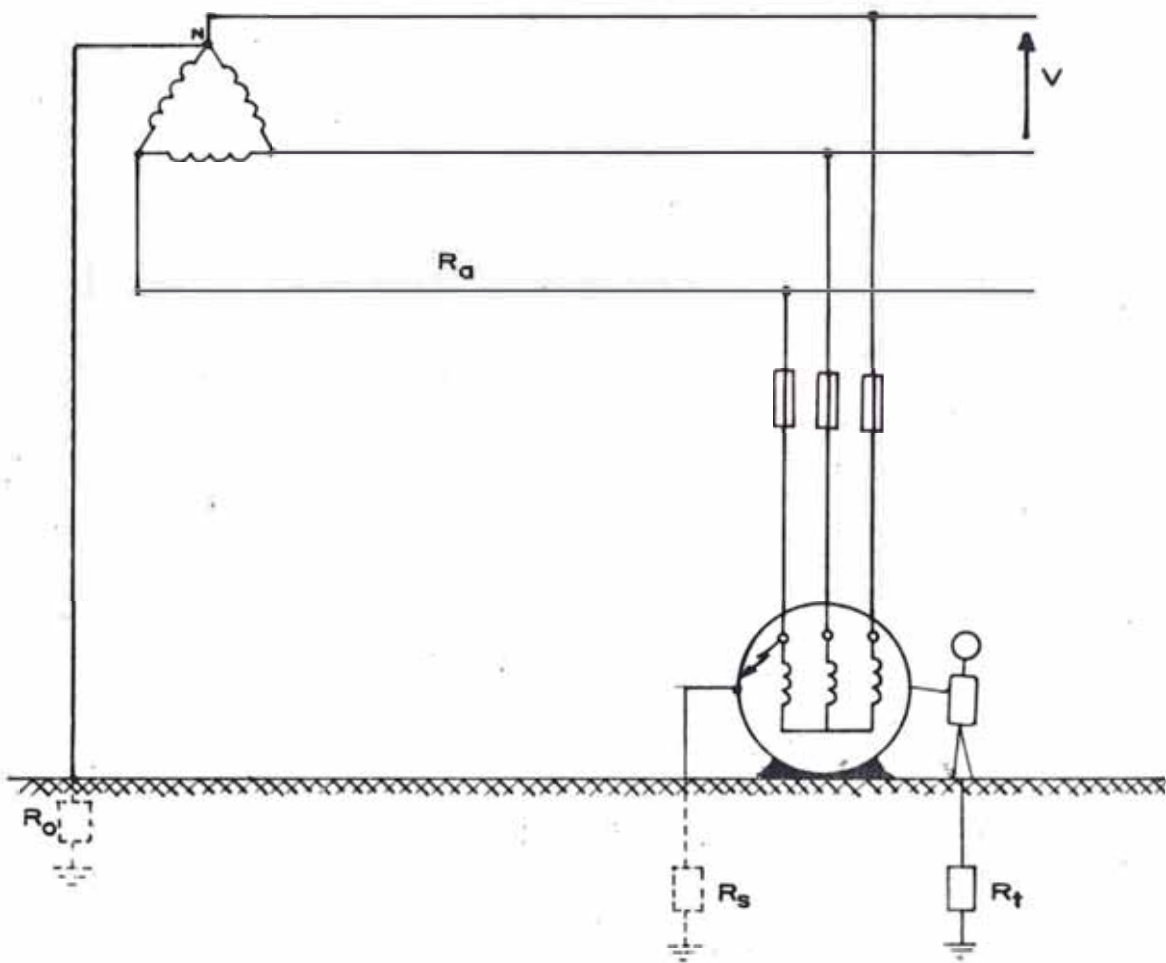


Fig. 79 pt.b.- CONEXION DIRECTA A TIERRA EN FORMA SELECTIVA DE LAS MASAS; DE UN SISTEMA DE CARGAS INDUCTIVAS 3Ø



CIRCUITO EQUIVALENTE

Fig. 79pt. c.- CONEXION DIRECTA A TIERRA DE LAS MASAS DE LOS EQUIPOS, EN UN SISTEMA 3Ø EN DELTA; PUESTO A TIERRA EN UN VERTICE.

no peligrosa (6 SV) y la intensidad de disparo.

$$R \leq \frac{6SV}{\text{Intensidad de disparo}}$$

8.5.2. Conexión de las Masas al Neutro en sistemas con Neutro a tierra

Esta conexión tiene por finalidad de impedir la permanencia de tensiones de toque y de disparo demasiadas elevadas en las partes de la instalación que no pertenezcan al circuito.

Esta protección también es llamada "Protección Por Neutralización" que es bien usada para sistemas de 4 hilos y consiste en unir las masas de la instalación al conductor neutro corrido, y el punto neutro se lleva a tierra en la sub-estación transformadora, a través de una puesta a tierra funcional.

Si debido a un defecto en el aislamiento, se produce un contacto a masa, a una baja corriente de falla, sólo produce una reducida caída de tensión en el neutro, como tensión con respecto a tierra en el aparato. El elemento de servicio así protegido tendrá, en consecuencia,

siempre la tensión con respecto a tierra que también - existe en dicho lugar en el conductor neutro.

Si la corriente de defecto es mayor , también será mayor la caída de tensión en el neutro e igualmente aumentará la tensión con respecto a tierra en el aparato que se proteja .

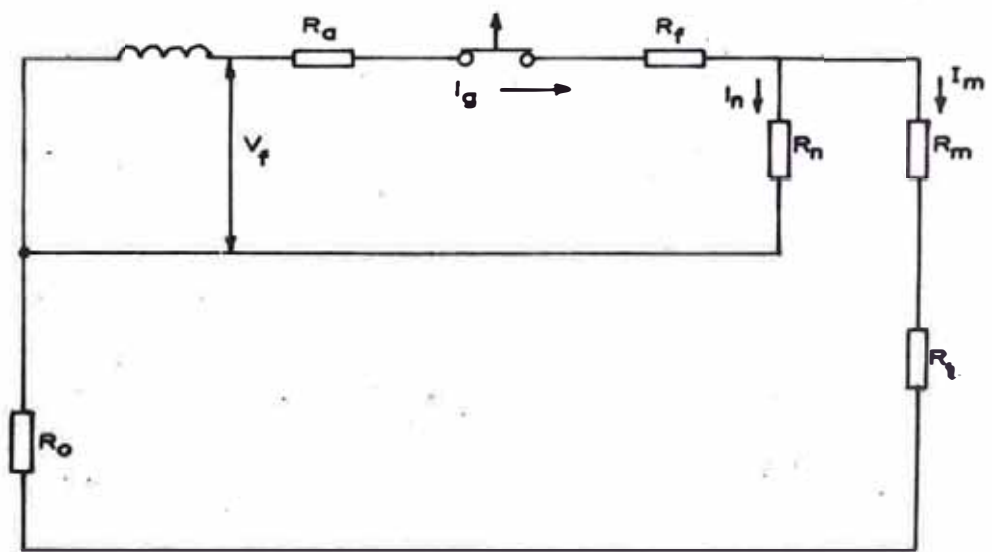
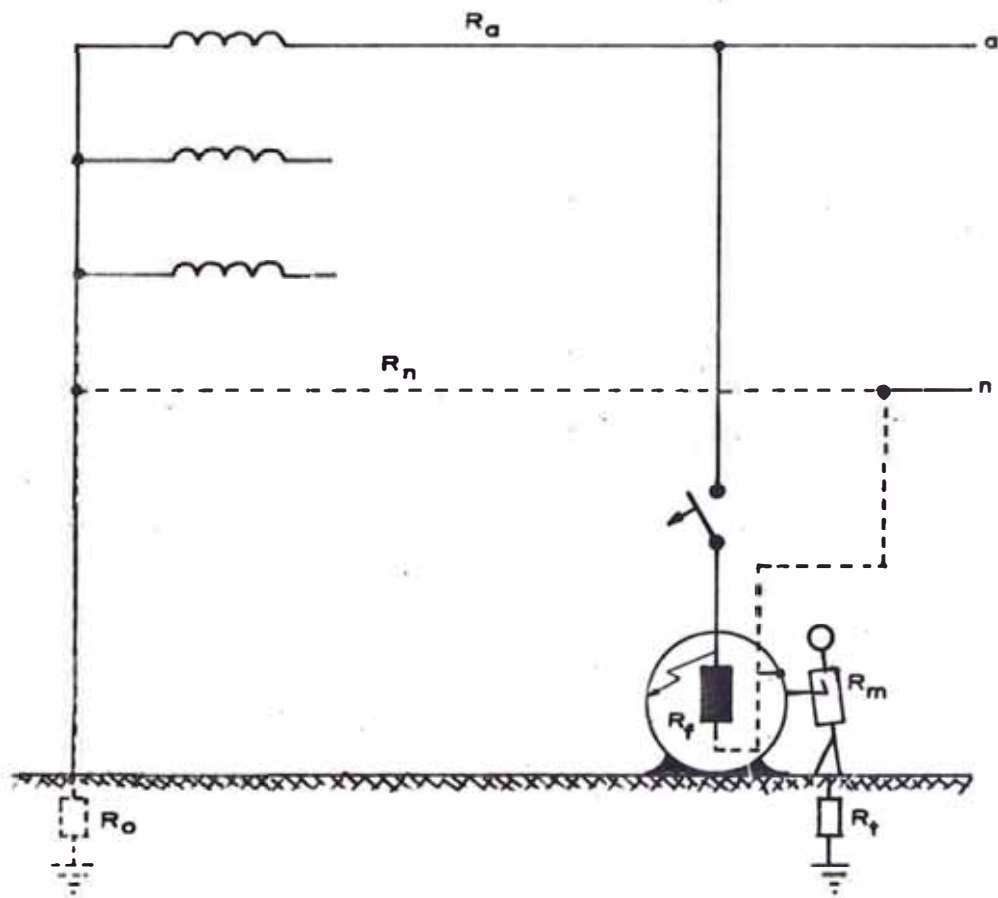
Si la corriente de defecto alcanza una intensidad igual a la de disparo del elemento protector intercalado en el circuito, se producirá el disparo de dicho elemento protector y, por tanto, la desaparición de tensión en el neutro, en muy poco tiempo.

La figura 80 pt, a nos muestra con más detalle un circuito típico de protección por neutralización , con su respectivo circuito equivalente, del que se obtienen lo siguiente:

La resistencia total del circuito sería

$$R_{total} = \frac{(R_m + R_t + R_o)R_n}{R_m + R_t + R_o + R_n} + R_a + R_f$$

R_n = Resistencia del neutro corrido hasta el punto de falla, y la corriente de falla viene expresada de la siguiente



circuito equivalente

Fig. 80 pt. a.- PROTECCION POR NEUTRALIZACION, EN UN SISTEMA 1Ø

te manera

$$I_g = \frac{V_f}{R_{total}} ; V_f = \text{Voltaje de la fase.}$$

Por otro lado la corriente y la tensión de toque en la persona serían :

$$I_m = \frac{V_f R_n}{K_1 K_2 + R_n^2}$$

$$V_B = I_m R_m$$

Donde : $K_1 = (R_m + R_t + R_o + R_n) \text{ ohm}$

$$K_2 = (R_a + R_f + R_n) \text{ ohm.}$$

Con esta conexión debemos también tener presente que la tensión de toque (V_B) en el lugar de emplazamiento, y la corriente que circula por el cuerpo humano admisible (I_m) no deben sobrepasar los límites recomendados por las normas VDE 0100 es decir :

$$V_B \leq 65V$$

$$I_m \leq 20 \text{ mA}$$

Por otro lado I_m depende de básicamente de la resistencia

de emplazamiento (R_t), porque cuanto mayor es la resistencia (R_t) menor es la corriente (I_{mf}), y obviamente menor es la tensión de toque (V_B). Debemos destacar que antes de calcular todos los parámetros mencionados, debemos de hacer medidas en el terreno, de tal manera de averiguar que tal conductor es el mismo al paso de la corriente, de no conseguir una alta resistencia de emplazamiento, deberemos garantizar que los elementos de apertura tengan un disparo instantáneo y así evitar daño personal alguno.

A continuación veremos un ejemplo numérico del cálculo de los parámetros mencionados.

Se tiene una carga 1ϕ (figura 79pt.a) conectada a una red de 380V con el neutro conectado a tierra y corrido; se establece un corto circuito franco cuya resistencia es $R_f = 0$, y las resistencias del conductor activo y del neutro corrido es de 0.082, 0.164 ohmios respectivamente, para este ejemplo asumiremos los siguientes parámetros:

$$R_m = 3,000 \text{ ohm}$$

$$R_o = 2 \text{ ohm}$$

$$R_t = 50,000 \text{ ohm (para un terreno no conduc-$$

tor)

La corriente de falla :

$$I_g = \frac{V_f}{R_{total}} = \frac{220}{0.246} = 890A$$

La caída de tensión en el neutro corrido:

$$V_o = 0.164 \times 890 = 146V$$

La corriente que pasa por la persona:

$$I_m = \frac{146}{53002} = 0.00275 A < 20 mA$$

Como consecuencia tendríamos:

$$V_B = 0.00275 \times 300 = 8.25 \cdot 65V$$

$$V_t = 0.00275 \times 50,000 = 137V$$

$$V_o = 0.00275 \times 2 = 0.0055V$$

De estos resultados, vemos que los valores son menores que los recomendados por las normas VDE 0100, debido primordialmente a que el suelo no es buen conductor .

Ahora supongamos que la resistencia de emplazamiento disminuye hasta 100 ohm :

$$I_m = \frac{146}{3000 + 1000 + 2} = 0.0365A > 20mA$$

$$V_B = 0.0365 \times 3000 = 110 > 65V$$

$$V_t = 0.0365 \times 1000 = 36.5V$$

$$V_O = 0.0365 \times 2 = 0.073V$$

Siendo de unos 30mA la corriente que circula por el cuerpo humano a un puede considerarse como "no peligrosa". Además, el elemento de apertura desconectará instantáneamente ante la presencia de la corriente de falla tan elevada. Incluso la tensión de toque (110 V) tampoco resulta peligrosa para la persona, en especial por su poco tiempo de actuación; por consiguiente la puesta a neutro de las masas cumple con su cometido protector.

Finalmente en la figura 80pt.b. mostramos una protección por neutralización, para un sistema de cargas 3Ø y 1Ø respectivamente.

Recomendaciones de la VDE0100

- Procurar que el conductor neutro no se interrumpa, .
- Además , que la unión de las masas al conductor neutro se realice cuidadosamente de lo que se desprende que :

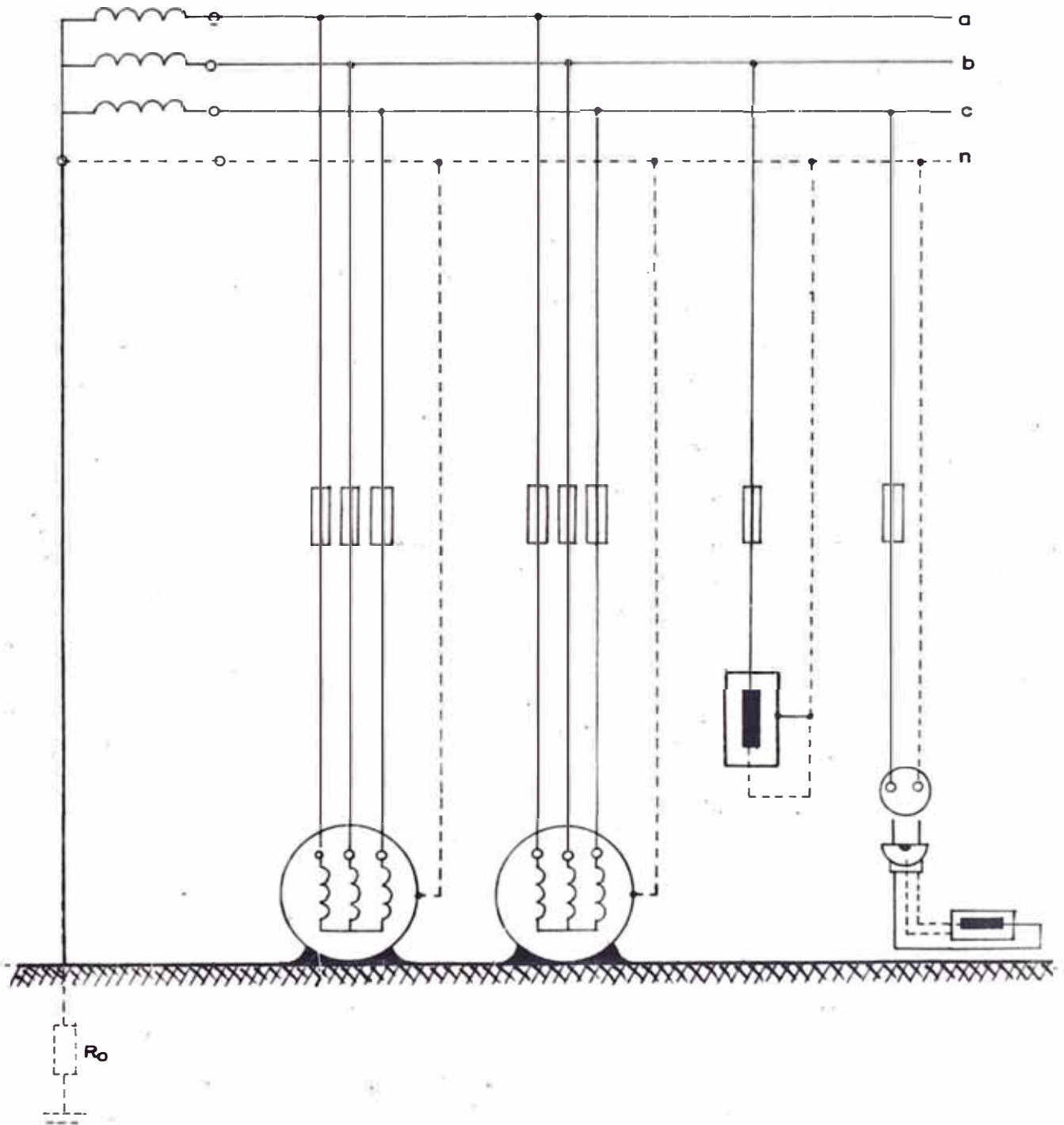


Fig.80pt.b.- PROTECCION POR NEUTRALIZACION EN UN SISTEMA 3Ø

no debe intercalarse en el conductor neutro ninguna clase de corta circuitos, cuando dicho conductor conduce la corriente de falla. En efecto, podría desconectar primero el cortacircuito del conductor neutro, antes que el corto circuito del conductor principal, exponiendo así esta tipo de protección a un gran peligro.

8.5.3. CONEXION DIRECTA DE LAS MASAS EN SISTEMAS CON NEUTRO AISLADO Y CARGADOS

Del exámen atento de la figura 79 pt.a.c., podría deducirse que, en el caso de un transformador no conectado a tierra (es decir sin conductor neutro aislado) como $R_0 = \text{infinito}$, es decir, muy grande la intensidad I_f será prácticamente nula, y por lo tanto, no existe peligro de ninguna clase aunque existan contactos a masa.

Esto solamente es cierto en condiciones muy especiales; por ejemplo en el caso de una fábrica con suministro propio de energía eléctrica y por lo tanto, provista de una red eléctrica con escasos puntos de consumo. Pero éstas consideraciones son erróneas en la mayor parte de los casos que pueden presentarse en la práctica.

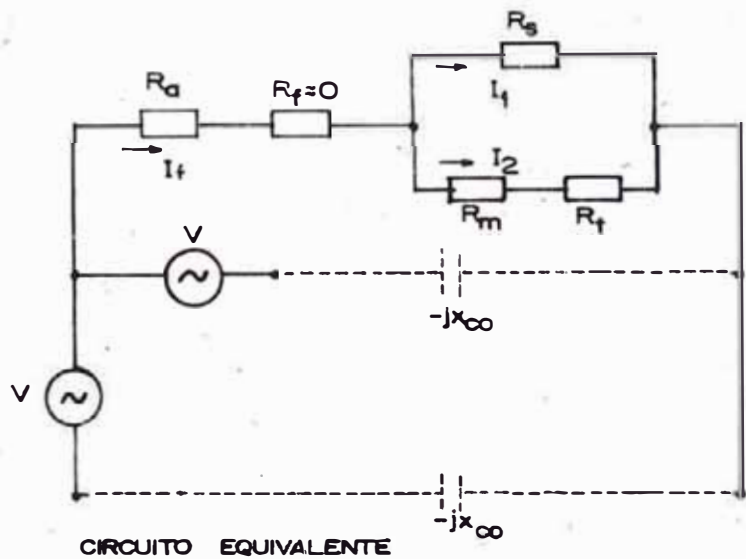
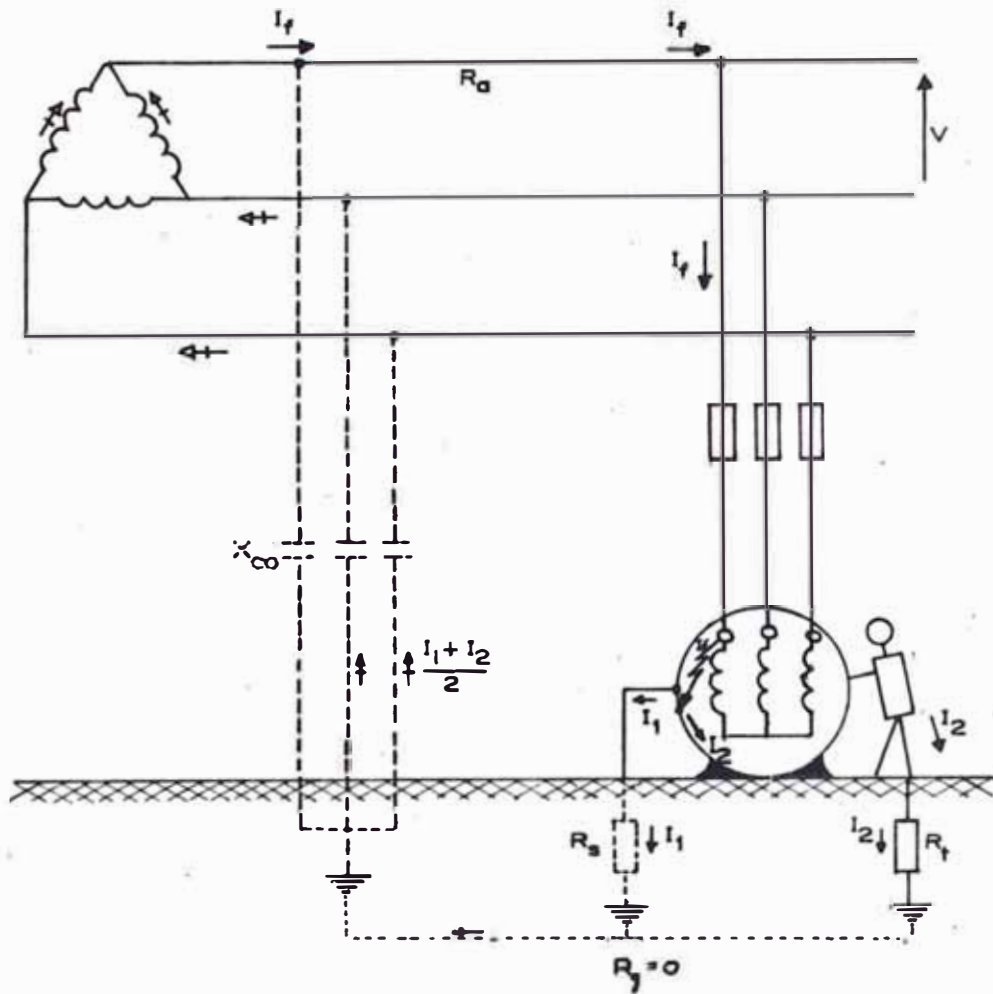
la figura 81 pt. nos muestra el caso más general, es decir, cuando una empresa productora de energía eléctrica suministra esta energía en varios miles de consumidores sobre una red eléctrica de gran extensión (cargados), según las normas de aislamiento establecidas se admite una corriente de fuga máxima de 1 mA por aparato; pero como existen miles de éstos circuitos y son muchos los aparatos o equipos eléctricos conectados simultáneamente a la red; es posible alcanzar corrientes de fuga bastante considerables. Por eso, en la figura 81 pt. hemos dibujado el comportamiento de las corrientes capacitivas originados por una desviación a tierra.

Del circuito equivalente tenemos :

$$R_{eq} = \frac{R_s (R_m + R_t)}{R_s + R_m + R_t}$$

$$I_f = \frac{2V}{2(R_a + R_f + R_{eq}) - jX_{co}} \quad \circ$$

$$I_f = \frac{2V}{\sqrt{4(R_a + R_f + R_{eq})^2 + X_{co}^2}} \quad (\text{módulo})$$



X_{co} = Reactancia capacitiva homopolar del alimentador

V = Tensión de línea

CIRCUITO EQUIVALENTE

Fig. 81 pt.- CONEXION DIRECTA A TIERRA DE UN EQUIPO CONECTADO EN DELTA; EN UN SISTEMA 3 ϕ , 1 ϕ (CARGADO) CON SU NEUTRO AISLADO O NO FISICO.

Por otro lado la corriente que circulará por el cuerpo humano en caso de una falla a tierra en el equipo viene expresada de la manera siguiente :

Del circuito equivalente tenemos

$$I_f = I_1 + I_2$$

$$I_1 = I_f \left(\frac{R_{eq}}{R} \right)$$

$$I_2 = I_f \left(1 - \frac{R_{eq}}{R_S} \right)$$

Podemos afirmar que si no estuviese la puesta a tierra del equipo, toda la corriente de falla pasaría por el cuerpo humano originando una tensión de toque de :

$$V_B = I_f R_m.$$

Para que la puesta a tierra del equipo sea óptima, debemos estar seguros que la corriente I_2 sea menor que 20 mA, y la tensión de toque $I_2 R_m$ sea menor o igual que 65 voltios; según recomendaciones hechas por las normas VDE - E 0100, o de lo contrario debemos garantizar que R_S sea mucho menor que $(R_m + R_t)$.

Del circuito equivalente tenemos

X_{CO} = reactancia capacitiva homopolar del alimentador, (ohm/fase)

V = tensión de línea. (voltios)

I_1 = corriente a tierra ó de evacuación. (Amperios)

I_2 = corriente que circulara por el cuerpo humano.
(Amperios)

8.5.4. CONEXION DIRECTA DE LAS MASA EN SISTEMAS CON NEUTRO AISLADO Y NO CARGADOS

Hemos dicho en la sección 8.5.3., que si R_0 es grande, la corriente I_f será prácticamente nula, esto es considerando una red aislada y cargada; pero puede darse el caso de que la red no esté cargada y que el equipo tenga una elevada reactancia capacitiva homopolar en comparación con la de la red, si esto ocurriese, la corriente de falla ya no circulará por la reactancia homopolar de la red, sino que ya circularía solamente por las reactancias del equipo puesto a tierra.

8.5.4.1. Conexión Directa a Tierra de un Equipo Conectado en Estrella en un Sistema Trifásico no Cargado, con su Neutro Aislado, o no Físico

La figura 82pt.a.b. nos representa el comportamiento de las corrientes capacitivas en un sistema no cargado, donde predomina esencialmente la reactancia capacitiva homopolar del equipo puesto a tierra.

Estas corrientes capacitivas no circularán por la red y es más su valor no es suficiente para interrumpir la protección del equipo, pero su valor no pasará desapercibido por el cuerpo humano.

La figura 82pt.b. nos representa el comportamiento de la corriente capacitiva de tierra, cuando el equipo está aislado de tierra, este tipo de caso es bien común por que en la mayoría de las veces el equipo está montado sobre un material aislante, originando una tensión de toque elevada, (la de línea) en caso de fallar 2 fases a tierra, a no ser que R_S sea bien pequeña; que es lo que óptimamente se quiere para garantizar la puesta a tierra de dicho equipo.

Del circuito equivalente obtenemos las siguientes expresiones :

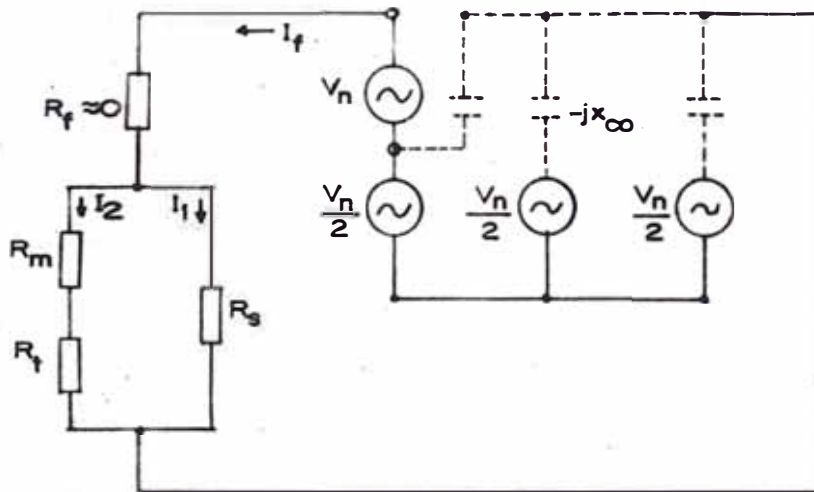
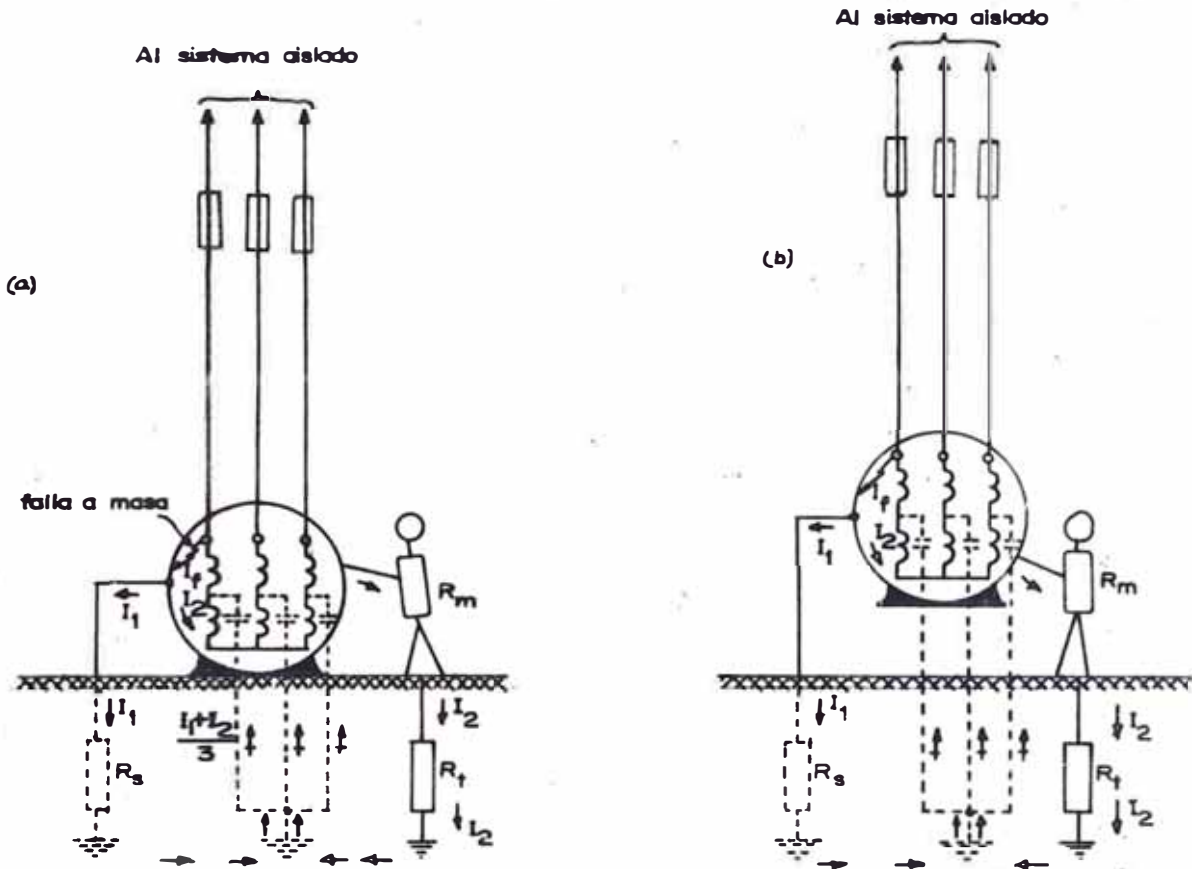
$$I_f = \frac{5 V_n}{3R_f + 3R_{eq} - j 5X_{CO}} \quad \circ$$

$$I_f = \frac{5 V_n}{\sqrt{9 (R_f + R_{eq})^2 + 25 X_{CO}^2}} \quad (\text{módulo})$$

$$R_{eq} = \frac{R_s (R_m + R_t)}{R_s + R_m + R_t}$$

$$I_1 = I_f \left(\frac{R_{eq}}{R_s} \right) \quad ; \quad I_2 = I_f \left(1 - \frac{R_{eq}}{R_s} \right) .$$

Podemos afirmar que si R_{eq}/R_s es menor que uno, pero mayor que cero, estaremos garantizando una tensión de toque recida; y esto se logra, siempre y cuando ($R_m + R_t$) sea el evado, predominando el valor de la resistencia promedio entre los pies de la persona, ya que R_m tiene un valor casi constante, y es más la corriente a tierra aumentaría hasta un valor cercano a la corriente de falla. Finalmente la corriente de falla variaría dependiendo del punto de falla; para fines académicos hemos considerado el punto de falla el borne; podría darse el caso que el punto de falla esté ubicado a $X(\%)$ del devanado de la fase fallada; por consiguiente la tensión de falla sería de $X(\%)5 V_n$; obviamente en una forma aproximada.



X_{co} = Reactancia capacitiva homopolar del equipo conectado en estrella

V_n = Tensión de fase

CIRCUITO EQUIVALENTE

Fig.82 pt.- CONEXION DIRECTA A TIERRA DE UN EQUIPO CONECTADO EN ESTRELLA; EN UN SISTEMA 3Ø (NO CARGADO) CON SU NEUTRO AISLADO, O NO FISICO.

Del circuito equivalente tenemos los siguientes parámetros :

X_{CO} = reactancia capacitiva homopolar del equipo conectado en estrella (ohm/fase).

V_n = tensión de fase (voltios).

8.5.4.2. Conexión Directa a Tierra de un Equipo Conectado en Delta, en un Sistema Trifásico no Cargado, con su Neutro Aislado, o no Físico

La figura 83pt.a.b. nos muestra una conexión directa a tierra típica usada en sistemas industriales de baja- y media tensión, ya que los equipos en dichos sistemas están conectados en delta, al menos cuando estos son motores asincronos de elevada potencia.

Para efecto de estudio, como en el caso anterior, hemos considerado que la reactancia capacitiva homopolar está concentrada en el punto medio de cada devanado, y por la red no circula corriente de fuga alguna, por tratarse de que el sistema no está cargado o de lo contrario la reactancia homopolar del equipo, es menor a la de la red, en un valor considerable. El mismo análisis

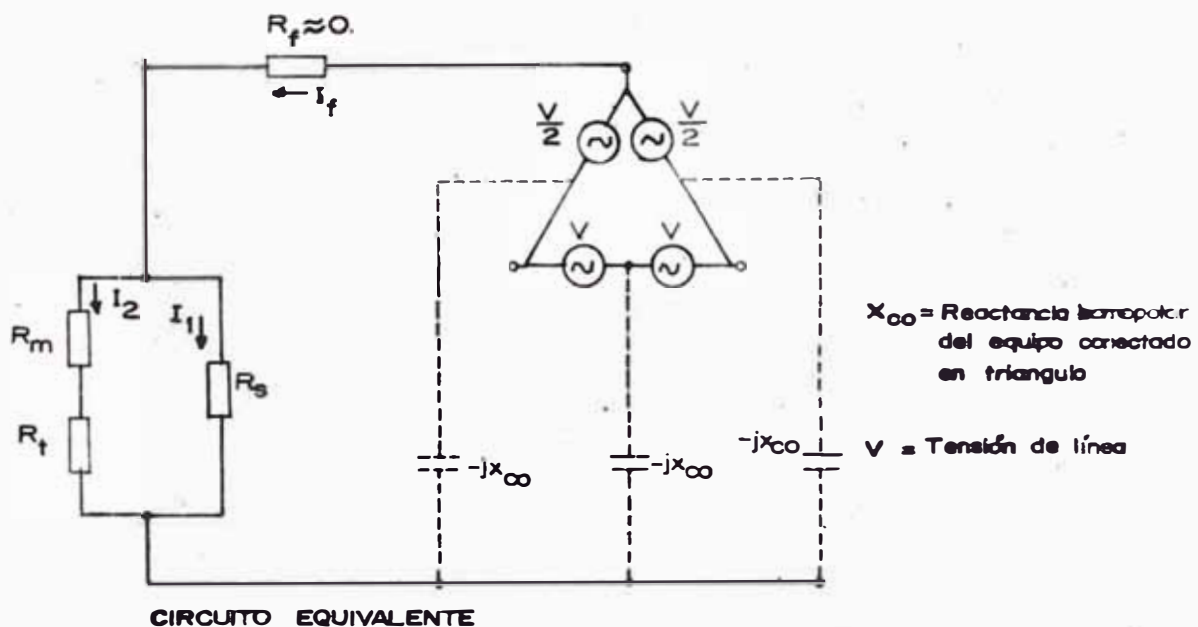
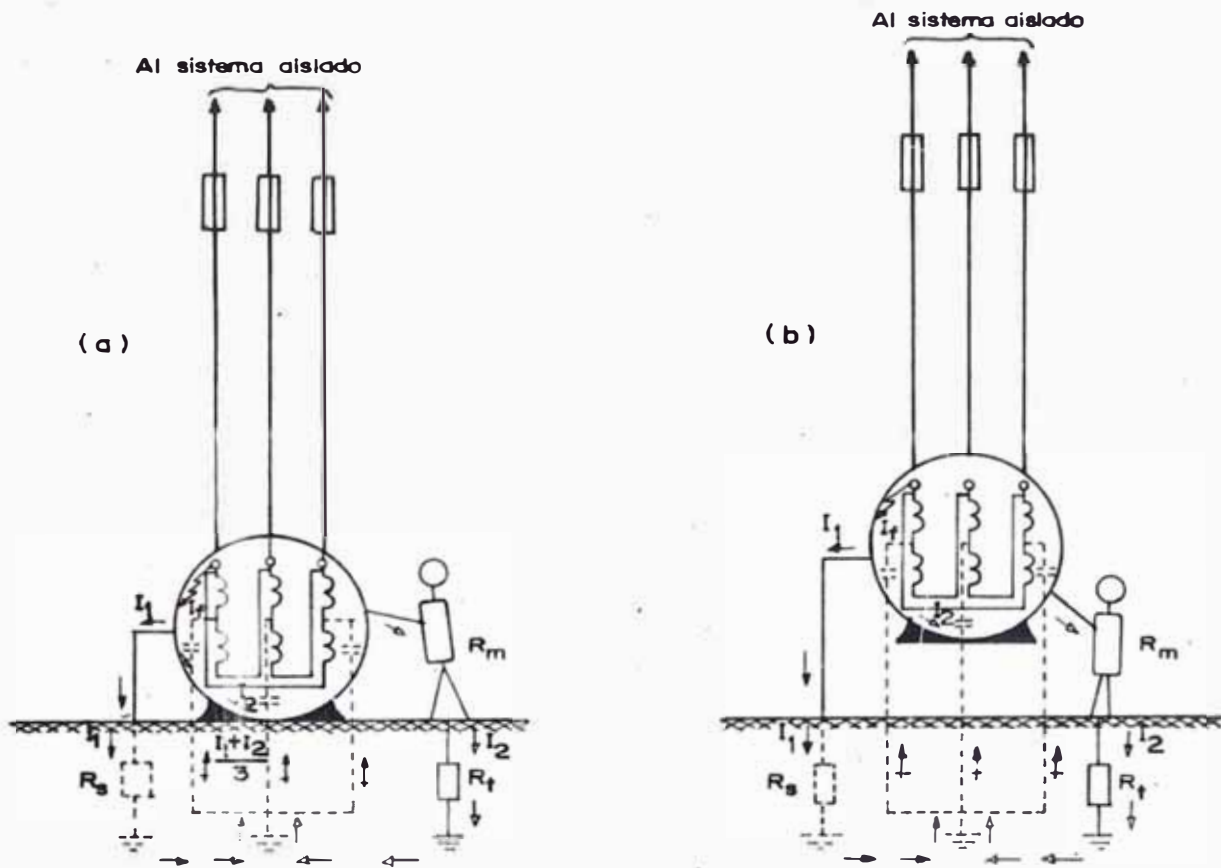


Fig. 83 pt.- CONEXION DIRECTA A TIERRA DE UN EQUIPO CONECTADO EN DELTA; EN UN SISTEMA 3 ϕ (NO CARGADO) CON SU NEUTRO AISLADO, O NO FISICO.

sis hecho en el acápite 8.5.4.1. se podrá decir en cuestión a las resistencias, y al comportamiento de las corrientes capacitivas distribuidas en todo el circuito .

Del circuito equivalente obtenemos las siguientes expresiones

$$I_f = \frac{5V}{6R_f + 6R_{eq} - j2X_{CO}} \quad \circ$$

$$I_f = \frac{5V}{\sqrt{36(R_f + R_{eq})^2 + 4X_{CO}^2}} \quad (\text{módulo})$$

$$R_{eq} = \frac{R_s(R_m + R_t)}{R_s + R_m + R_t}$$

$$I_1 = I_f \left(\frac{R_{eq}}{R_s} \right); \quad I_2 = I_f \left(1 - \frac{R_{eq}}{R_s} \right).$$

Comparando la corriente de falla de equipos en conexión estrella, con la de los equipos en conexión delta, esta última es más perjudicial debido a que la tensión de falla (5V) es con respecto a la tensión plena; ya que la otra es con respecto a la tensión de fase. Además este voltaje pleno variará, teniendo presente el punto de falla; habíamos dicho que para fines académicos hemos considerado una falla a masa en

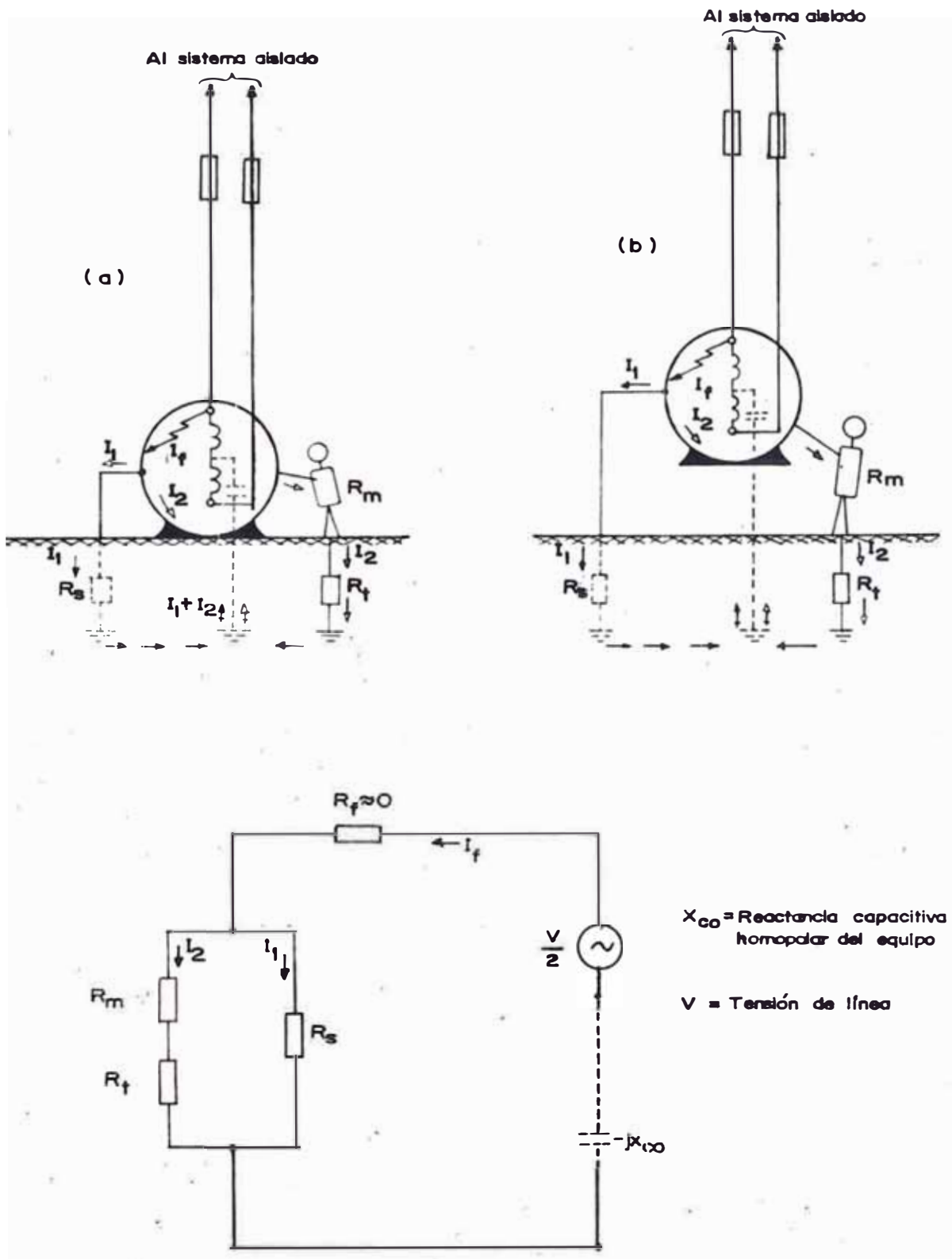


Fig. 84 pt.- CONEXION DIRECTA A TIERRA DE UN EQUIPO; EN UN SISTEMA 10 (NO CARGADO) CON SU NEUTRO AISLADO O NO FISICO.

de considerar la resistencia de aislamiento del equipo.

De la figura 84pt. tenemos

$$I_f = \frac{0.5 V}{(R_{eq} + R_f) - jX_{CO}} \quad \text{ó}$$

$$I_f = \frac{0.5 V}{\sqrt{(R_{eq} + R_f)^2 + X_{CO}^2}} \quad (\text{módulo})$$

$$I_1 = I_f \left(\frac{R_{eq}}{R_S} \right), \quad I_2 = I_f \left(1 - \frac{R_{eq}}{R_S} \right)$$

Si el sistema aislado tiene el neutro corrido al voltaje de falla sería el de fase; y el valor del mismo varía dependiendo del punto de falla.

X_{CO} = reactancia capacitiva homopolar del equipo

V = tensión de línea ó de fase (dependiendo por lo dicho anteriormente).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- a) Podemos afirmar que los diferentes métodos de puestas a tierra usados en sistemas industriales ofrecen ventajas y desventajas muy diferentes entre si, ya sea de orden técnico o económico, es por eso que para elegir el método hay que realizarlo en forma cuidadosa, de tal manera que corresponda a nuestras necesidades.
- b) En secciones precedentes habíamos mencionado que los sistemas industriales con neutro aislado eran sistemas - que brindan una buena continuidad del servicio en caso de fallas a tierra, viéndolo desde el punto de vista de operación, es más en estos sistemas las tensiones inducidas en los circuitos de comunicación son nulas, debido a la no presencia de las terceras armónicas, originadas por la falla mencionada.

Pero presenta grandes problemas desde el punto de vista de protección, debido a que las tensiones de las fases sanas con respecto de tierra se incrementan, y los sistemas de protección para fallas entre fases; no responderan, de-

bido a la pequeña corriente a tierra ; es por eso que existen corrientes de fuga o sistemas industriales que pasan inadvertidas, dando origen a un incremento de la energía facturada de la Planta.

- c) Para el dimensionamiento y ajuste de los sistemas de protección de puestas a tierra hemos partido esencialmente de una falla monofásica a tierra, por que según estadísticas es la falla más común en la industria,

Para hacer un dimensionamiento y ajuste convenientemente partiremos de la relación que guarda la corriente monofásica a tierra, con respecto a la corriente trifásica, por la sencilla razón de obtener el porcentaje de aumento o decremento de la misma, y poder elegir el método o tipo de puesta a tierra más eficiente

- d) Habíamos dicho, que las reactancias de secuencia de los sistemas industriales juegan un papel muy importante en la elección y funcionamiento de la puesta a tierra; se dice que si en un sistema industrial cumple que $\frac{X_0}{X_1} < 3$,

$$\frac{R_0}{X_1} < 1$$

Implicaría el uso de una puesta a tierra efectiva, y estaríamos garantizando la no aparición de transitorias; por otro lado si se cumple que $\frac{X_0}{X_1} \ll 10$, implicaría el uso de una puesta a tierra a través de inductancias o por sistemas resonantes.

- e) Podemos citar que para sistemas de alta tensión, la puesta a tierra por resistencias, e inductancias no tienen gran uso debido a que la corriente capacitiva no es neutralizada; pero si tiene gran uso en estos sistemas, la puesta a tierra por resonancia, que es el sistema más confiable, porque neutraliza la corriente capacitiva a tierra para impedir la formación del arco, y además porque resulta posible la continuación del servicio durante una falla a tierra permanente, de forma que la reparación de una avería de este tipo puede realizarse en el momento más oportuno.

En el presente trabajo hago una pequeña mención, para fines académicos de este método, porque no corresponde al tema a tratar en sí.

- f) Los relés de puestas a tierra juegan un papel importante

en los sistemas de protección, ya que separa la parte fallada del sistema en forma instantánea; pero existen factores ajenos a la falla a tierra (condiciones normales) tal es como transitorios, sobrecargas fluctuantes, que obligan a la apertura inoportuna de dichos relés, es por eso que los relés de estado sólido operan a estos inconvenientes debido a su gran sensibilidad de respuesta, es por eso que tenemos que elegir los relés más óptimos para evitar estos inconvenientes, ya sea utilizando relés electromecánicos o de estado sólido ajustado convenientemente.

- g) La finalidad principal de los relés de puesta a tierra consiste en mejorar la selectiva entre interruptores de protección con o sin rele incorporado, viéndolo desde el punto de vista económico obliga a un desembolso extra de la instalación, pero a la larga el sistema es más seguro, porque con los relés de puesta a tierra se tiene ubicado el punto defectuoso del sistema, lo que no sucede con las protecciones que protegen cortocircuitos 3ϕ .
- h) Hay sistemas industriales con cargas importantes, donde cualquier perturbación del suministro hace variar la configuración de las cargas importantes, por consiguiente para una falla de tierra en el sistema debe tenerse en cuenta que los dispositivos de protección (interruptores) no deben de operar a la misma, sino que se deben incorporar alarmas o sirenas que identifiquen la

la fase fallada ya sea, acústicamente o ópticamente para que posteriormente sea reparada la avería.

- i) Las fórmulas establecidas para el cálculo de la resistencias de puestas a tierra funcionales o de servicio en el presente trabajo, van a diferir en más o menos con las resistencias medidas experimentalmente, esto debido a la naturaleza de la resistividad del terreno, que no es uniforme en toda su extensión; por este motivo se subraya la importancia de hacer un estudio cuidadoso en otro trabajo del comportamiento del suelo.

- j) El tema de contactos, a masa en instalaciones eléctricas es de gran interés para el profesional electricista, por lo general no se le da importancia que merece, es por eso que este trabajo demos recomendaciones mínimas para evitar estos contactos valiéndonos de las normas alemanas,

ANEXO 2.1.4

INTERPRETACION DE LAS CURVAS DE VOLTAJE Y CORRIENTE CON UN EJEMPLO EXPLICATIVO

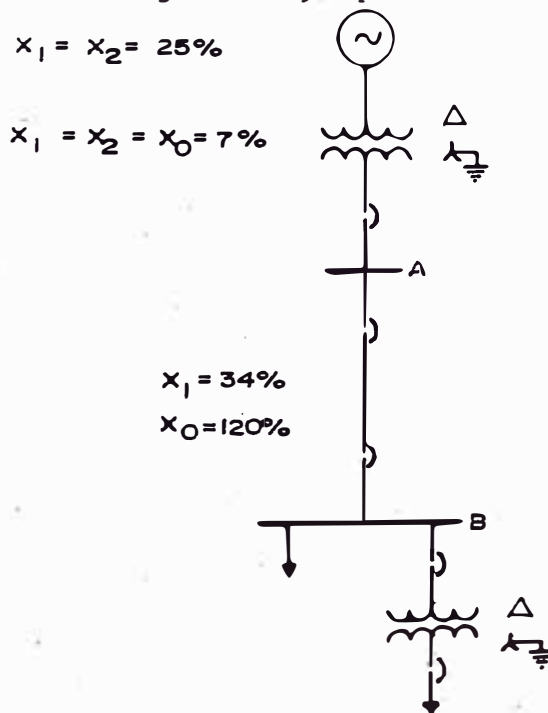
Para la interpretación de las curvas, tocaremos dos situaciones muy importantes.

2.1.4.a Para una puesta a tierra sólida o efectiva.

Hemos dicho en el acápite 2.1.4, que un sistema está pues to a tierra efectivamente, cuando para todos los puntos del sistema o partes de ellos cumplen con las siguientes relaciones :

$$\frac{X_0}{X_1} \ll 3 \quad , \quad \frac{R_0}{X_1} \ll 1$$

A continuación demostraremos las relaciones mencionadas mediante el siguiente ejemplo :



Las reactancias de secuencia positiva y negativa, en caso de una falla en la barra "A" son :

$$X_1 = (2.5 + 7) \% = 32\%$$

$$X_2 = (2.5 + 7) \% = 32\%$$

pero una falla 3 ϕ

$$I_{3\phi} = \frac{E}{X_1} = \frac{X_1}{100} = \frac{100}{32} = 3.12 \text{ p.u.}$$

para una falla 1 ϕ a tierra, $I_g = \frac{3E}{X_1 + X_2 + X_0}$ (según el acápite 4.2)

$$I = \frac{300}{32 + 32 + 7} = 4.23 \text{ p.u.}$$

o sea :

$$\frac{I_{1\phi}}{I_{3\phi}} = \frac{4.23}{3.12} = 1.36, \text{ (factor de corriente)}$$

De las figuras 3.pta, obtenemos que para $\frac{X_0}{X_1} = \frac{7}{12} = 0.219$

y 1.36, obtenemos aproximadamente un valor de $\frac{R_0}{X_1} = 0.11$,

por consiguiente los voltajes de las fases sanas, según las figuras 3 pt.b quedarían afectados por el factor 0.9, cabe - mencionar que estos voltajes son con respecto a tierra.

Si la falla hubiese sido en la barra "B", la reactancia de

secuencia positiva y negativa es incrementada en 31% y 120%, respectivamente debido a que se incluye las reactancias de secuencia de la línea.

para una falla de 3 ϕ

$$I_{3\phi} = \frac{100}{32 + 34} = 1.51 \text{ p.u}$$

para una falla de 1 ϕ a tierra

$$I_{1\phi} = I_g = \frac{300}{66 + 66 + 127} = 1.16 \text{ p.u}$$

o sea

$$\frac{I_{1\phi}}{I_{3\phi}} = \frac{1.16}{1.51} = 0.77 \text{ (factor de corriente)}$$

De las figuras 3 pt.a obtenemos que para $\frac{X_0}{X_1} = \frac{127}{66} = 1.92$

y 0.77 se obtiene aproximadamente un valor de $\frac{R_0}{X_1} = 1.05$,

de tal manera que los voltajes de las fases sanas con respecto a tierra quedan aumentadas según las figuras 3 pt.b en 1.22 veces el voltaje de fase del sistema.

Se puede concluir que para una falla lejana de los transformadores puestos a tierra, la reactancia de secuencia cero puede ser relativamente alta y la relación $\frac{X_0}{X_1}$ puede ser mayor que 1, obligando a que las tensiones de las fases sanas aumenten.

2.1.4.b. Para una puesta a tierra a través de una reactancia inductiva.

Cuando no es imposible ejecutar una puesta a tierra efectiva o sólida debido a que la relación

$$\frac{X_0}{X_1} \ll 3 \quad \text{no cumple, es necesario poner a tierra}$$

los neutros del sistema o parte de ellos, a tra-

vés de una reactancia inductiva, debido a que ésta

es diseñada para sistemas que cumplen con $\frac{X_0}{X_1} \ll 10$

(véase acápite 2.4.2.)

Si en el sistema mostrado en la figura del Anexo a tratar se hubiese hecho una puesta a tierra a través de una reactancia de 16 ohmios medida a (8.4% y 69 Kv), y las corrientes de falla 3 ϕ y 1 ϕ en la barra "A" son iguales, entonces en la barra "B" se obtendrá las siguientes expresiones :

$$\begin{aligned} I_{1\phi} = I_g &= \frac{3 E}{X_1 + X_2 + X_0 + 3X_n} \\ &= \frac{1 \times 3 \times 100}{66 + 66 + 127 + 3 \times 8.4} = 1.06 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$y, \quad X_0 + 3X_n = 152 \%$$

$$\therefore \frac{X_0}{X_1} \approx \frac{152}{66} = 2.3$$

Según las figuras 3pt.b. las fases sanas sufren un aumento de 1.18 veces la tensión de fase para una corriente máxima a tierra ($I_{1\phi} = I_{3\phi}$)

Finalmente si aumentamos el valor de la reactancia a 50 ohmios (26.3 % a 25 MVA, 69K_v), los valores de las relaciones para los diferentes casos de falla serían

$$\text{Para una falla en "A" : } \frac{X_0 + 3X_n}{X_1} = \frac{7 + 3 \times 26.3}{32} = 2.7$$

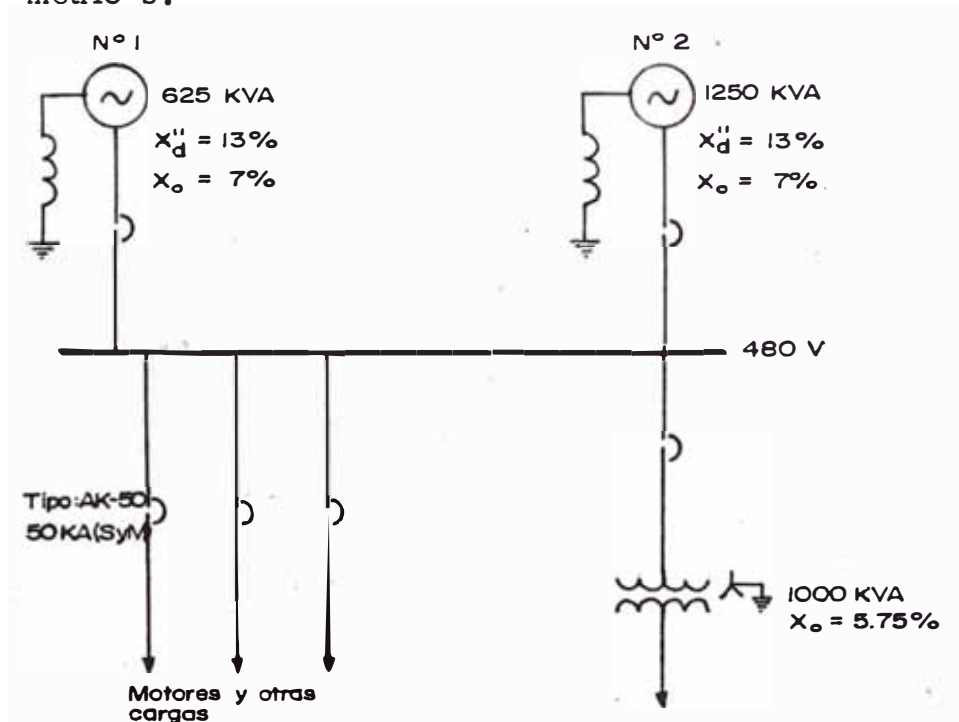
$$\text{Para una falla en "B" : } \frac{X_0 + 3X_n}{X_1} = \frac{127 + 3 \times 26.3}{66} = 3.1$$

Vemos que para una falla "B" el sistema se comporta como si estuviese puesto a tierra efectivamente, ya que los valores no difieren mucho al aumentar el valor de la resistencia.

ANEXO 2.4.2.

CALCULO DE LA REACTANCIA DE PUESTA A TIERRA EN
FUNCION DE LOS PARAMETROS DE SECUENCIA

De la figura mostrada calcularemos las reactancias de puesta a tierra de los generadores de baja tensión y de las corrientes de falla monofásica a tierra distribuidas en todo el circuito, valiéndonos de los componentes simétricos.



Del acápite 2.4.2. se demostró que

$$X_n = \frac{2X_1 - X_2 - X_0}{3}$$

, siempre y cuando que la corriente monofásica a tierra sea igual o aproximadamente igual a la corriente de falla trifásica.

Asumiendo para el cálculo que $X_1 = X_2$, es igual a la reactancia sub-transitoria de los generadores, es más las reactancias deben ser puestas a otra base valiéndonos de la siguiente expresión:

$$X_{(\text{ohm})} = \frac{X(\%) K_V^2}{\text{Base KVA}} \times 10 \text{ (Ohm/fase)}$$

Generador No. 1

$$X_1 = \frac{13 \times 0.48^2 \times 10}{625} = 0.0479 \text{ ohm}$$

$$X_0 = \frac{7 \times 0.48^2 \times 10}{625} = 0.0258 \text{ ohm.}$$

$$X_n = \frac{0.0479 - 0.0258}{3} = 0.00736 \text{ ohm.}$$

Generador No.2

$$X_1 = \frac{13 \times 0.48^2 \times 10}{1250} = 0.0239 \text{ ohm.}$$

$$X_0 = \frac{7 \times 0.48^2 \times 10}{1250} = 0.0129 \text{ ohm.}$$

$$X_n = \frac{0.0239 - 0.0129}{3} = 0.0037 \text{ ohm.}$$

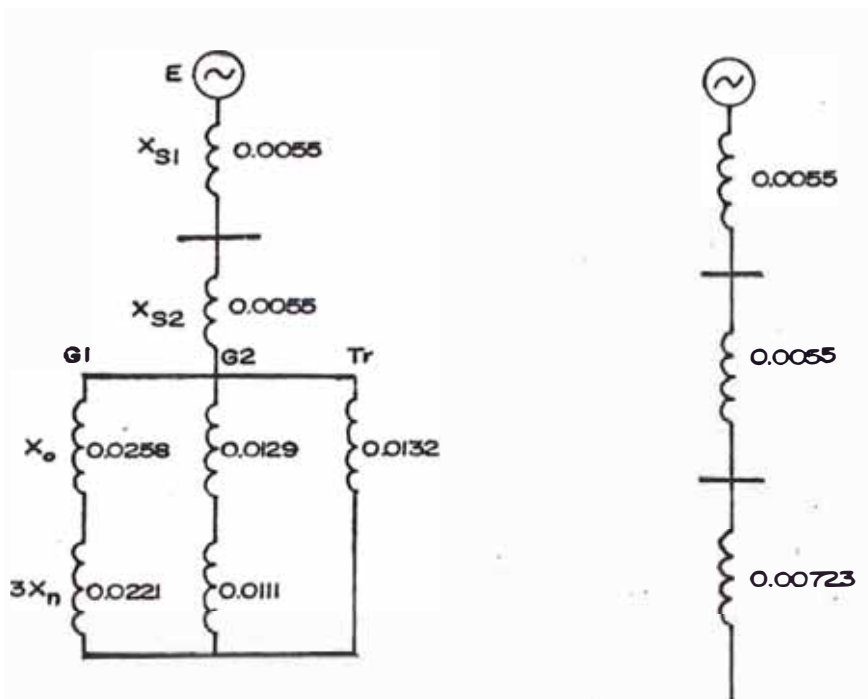
Se sabe que los interruptores de protección tienen un poder de ruptura de 50 KA simétricos a 480 Voltios, por lo tanto las reactancias de secuencia positiva y negativa del sistema será:

$$X_{s1} = X_{s2} = \frac{E}{I_{3\phi}} = \frac{480/\sqrt{3}}{50,000} = 0.00555 \text{ ohm.}$$

Transformador :

$$X_0 = \frac{5.75 \times 0.48^2 \times 10}{1,000} = 0.0132 \text{ ohm.}$$

Por otro lado el circuito de secuencia del sistema sería:



La corriente de falla a tierra total será :

$$I_g = \frac{3E}{X_1 + X_2 + X_0} = \frac{3 \left(\frac{480}{\sqrt{3}} \right)}{0.0055 + 0.0055 + 0.00723} = 45,300A$$

$$\text{Generador N}^\circ 1 : I_{g1} = \frac{0.00723}{0.0479} \times 45,300 = 6800A$$

$$\text{Generador N}^\circ 2 : I_{g2} = \frac{0.00723}{0.024} \times 45,300 = 13,600A$$

$$\text{Transformador} : I_{gT} = \frac{0.00273}{0.0132} \times 45,300 = 24,900A$$

Vemos que al ocurrir una falla a tierra 1ϕ de 45,300 A, por los reactores de puesta a tierra de cada generador circularán 6,800 A, 13,600 A respectivamente.

En el acápite 2.1.4. se dijo que para elegir una reactancia de puesta a tierra, deberíamos tener presente que $\frac{X_0}{X_1} \leq 10$; si se logra esta condición se estaría garantizando la no apa

rición de sobretensiones por resonancia en caso de fallas a tie
 rra o sea :

$$\frac{X_0}{X_1} = \frac{0.00723}{0.0055} = 1.3 \quad (\text{cumple con la condición establecida.})$$

Cabe mencionar que si se hubiese hecho una puesta a tierra -
 franca o efectiva los resultados hubiesen sido parecidos, y es
 más

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 3.$$

A N E X O 7.7.9, 7.7.10

APLICACIONES Y ESPECIFICACIONES BASICAS DE RELES DE PUESTA A TIERRA USADOS EN SISTEMAS INDUSTRIALES

7.7.9.1. Marca : Brown Boveri

Tipo : GR - 5, GR-200 (GSR), secundarios

Bol etín 7.1.1.-1C

Aplicación : Los relés del tipo GR-5, GR-200 son reles de puesta a tierra sensibles a la corriente homopolar, producida por una falla a tierra en sistemas con su neutro puesto a tierra solidamente, o través de resistencias ohmicas. Sus aplicaciones típicas son mostradas en las figuras 61 pt., 62 pt, 76 pt. de la sección VII.

Especificaciones:

Corriente de operación

Tipo GR-5 (2 - 40A, 5 -50-A, 20-200A, 100-
1000A)

Tipo GR-200 (200 - 1200A)

Tiempo de Operación :

TIPO GR-5 (0.033, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 seg.)

Tipo GR-200 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5 seg.)

Frecuencia Industrial

50/60 HZ

Fuente de voltaje auxiliar (o de control)

120 V AC (+10% , -40%)

125, 48, 32, 24 V DC (+10%, -20%)

Sistemas de mando :

Alarmas o trip (c/u es opcional)

7.7.9.2. Marca Brown Boveri

Tipo I-T-E. 59 G (GRR), secundario

Boletín 7.4.2. - 1 B.

Aplicación

El rele ITE -59 G es un relé sensible a la tensión homopolar producida por una falla a tierra, en sistemas cuyo neutro puede estar puesto a tierra o aislado.

Este relé tiene un diseño tal que no responde a las terceras armónicas originadas por sobretensiones o sobrecorrientes pasajeras.

Sus aplicaciones típicas son mostradas en las figuras 14 pt.b, 29 pt.a de las secciones II y III respectivamente.

Especificaciones:

Voltaje de operación:

3,6,9,12,15, 18 voltios

Voltaje de entrada

208 voltios (en estado de falla)

480 voltios (durante 10 seg.)

Tiempo de Operación

1, 2, 3, 4, 5, 6, seg.

Consumo

3,6 VA (Medido a 208V)

Fuente de voltaje auxiliar (o de control)

48/125 V DC o 120 VAC

Sistemas de mando :

Alarmas o trips (c/u opcional)

Marca : Brown Boveri

Tipo : PM 2 gn 0/90, (secundario)

Boletín CH = ES61 - 51.3E

7.7.11.1. Aplicación : Los relés del tipo PM2gn 0/90, son relés direccionales, utilizados para detectar fallas a tierra en sistemas con su neutro aislado ó puesto a tierra, a través de resistencias o inductancias.

Su sensibilidad se basa en el desfase que hacen los fasores de corriente y voltaje homopolar residual

Tiene una aplicación típica en la protección contra fallas a tierra en alimentadores (Véase fig.80 pt.c. de la Sección III.)

Especificaciones :

Corriente normal .

0.5, 1, 2.5, 5 A.

Voltaje nominal

100 (110) ó 200 (220) V.

Frecuencia industrial

50/60 HZ.

Consumo de la bobina de corriente (a
la falla)

2.5 a 3.2 VA

Consumo de la bobina de voltaje (a la
falla)

10 a 15 VA

Angulos detectables

0° a 90 °

Fuente de voltaje auxiliar (ó de control)

24, 36, 48, 60, 100, 110, 125, 220V

en AC/DC

Sistemas de mando

Alarmas o trips (c/u opcional)

BIBLIOGRAFIA

1. Low voltage grounding practices and ground fault protection
(General Electric Co.)
By: J.R. Dunki Jacobs, *igr.*, August-1970.
2. Some effects of conceptual desing principles on power System
Reliabil ity.
By: J.R. Dunki Jacobs, IEEE Transactios on Industry
and General Applications, vol .IGA-4, #2, March/
April , 1968.
3. Determination of ground-Fault current on common A-C grounded-
Neutral Systems in standard steel or aluminun conduit.
By: J.A. Gienger, O.C. Davidson, R.W. Brendel
AIEE, January 31 ,1960.
4. High resistance grounding of 2400-volt Delta systems with ground
fault alarm and traceable signal to fault.
By: F.K. Fox, H.J. Grotts and C.M. Tipton, IEEE
Transactions on industry and General Applications,
Vol . IGA-1 #5, Sept/Oct. 1965.
5. Applied Protective Delaying (Westinhouse, 1966)
System grounding and protective relayin 6, Chapter 11
By: J.L. Blackburn and J.V. Kremer

6. Electrical Transmission and distribution, Reference book
(Westinhouse, 1966).
Grounding of power system neutrals, Chapter 19.
By: S. B. Griscom.
7. Electrical transmission and distribution, Reference Book.
(Westinhouse, 1966)
Power System Voltages and currents during abnormal conditions.
By : R. L. Witzke.
8. Grounding Principles and practice (II -Establishing ground)
By : Claude Jensen, AIEE, Transactions pages 14-20.
9. Detection of high impedance faults on multi-grounded.
Primary distribution systems.
By : J. Carr, IEEE Transactions on Power Apparatus
and systems, vol . PAS-100, No.4, April ,1981 .
10. IEEE Recommended practice for grounding of Industrial and Commercial Power Systems.
Sponsor : Industrial and commercial power systems
Committee of the, IEEE Industry Applications Society, 1972.
11. Electrical construction and maintenance (megavattios), "Protección contra fallas a tierra para sistemas de Distribución aislados",
Por : Arthur Freund, Mzo, 1983-pag.40-49.
12. Sobretensiones, coordinación de la Aislación
Por Franco Vasquez Prablert, comisión de integración Eléctrica Regional (CIER)

13. " Industrial Power Systems data Handbook "
Edited by D.L. Brennan 1954.
14. Estaciones de transformación y distribución, protección de sistemas eléctricos.
Por: Ediciones CEAC, S.A.1977-Barcelona-España
15. Manual de puestas a tierra de equipos eléctricos.
Por: Francisco Ruiz Vasallo, Ediciones CEAC,S.A.
1966, Barcelona-España.
16. Interruptores Automáticos Diferenciales, SFJ.
Por Siemens S.A.Caracas, Setb.1977
17. Máquinas Eléctricas I
Por : M.P. Kostenko
L.P. Piotrovski, cap. 1 Acápit 19-12.
- 18 Normas VDE 0100 de Protección Eléctrica.
Por : Horning - Schneider, Setiembre de 1968.
19. El Arte y Ciencia de la Protección por Relevadores
Por :Russell Mason.
20. Protective Relaying in electric power system
By M. Titorenko.
21. Normas VDE 0211
22. Normas VDE: 0141
23. Determinaciones VDE
24. Código Eléctrico del Perú.