

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

"EFECTOS EN SISTEMAS DE POTENCIA A NIVELES DE MEDIA TEN-
SION POR FALLAS A TIERRA OCURRIDA A NIVELES DE ALTATENSION"

TESIS DE GRADO
Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD
ESPECIALIZACION POTENCIA

Presentada por:
VICTOR HUGO BRAVO S.

GUAYAQUIL - ECUADOR

1.987



ING. GUSTAVO BERMUDEZ F.
SUBDECANO DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA



ING. JORGE CHIRIBOGA V.
DIRECTOR DE TESIS



ING. ALBERTO HANZE B.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



ING. JORGE FLORES M.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

A G R A D E C I M I E N T O

AL ING. JORGE CHIRIBOGA V.,
Director de Tesis, por su
ayuda y colaboración para
la realización de este tra-
bajo.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).


.....
VICTOR HUGO BRAVO S.

R E S U M E N

En el Capítulo I se realiza un breve análisis teórico sobre las fallas de línea a línea, de doble línea a tierra, y de una línea a tierra en un sistema de potencia, este análisis se encuentra más detallado en el Anexo A. Además se realiza un estudio de los esfuerzos provocados por las corrientes de cortocircuito y su influencia sobre el servicio.

Como es de gran importancia la conexión a tierra del neutro de los transformadores y en general de las instalaciones del sistema eléctrico; en el Capítulo II se realiza un estudio teórico de la puesta a tierra del sistema de potencia, ya que las tomas de tierra son muy importantes cuando en el sistema se produce un cortocircuito a tierra, al igual que los efectos que producen tales aterrizamientos.

En el Capítulo III se realiza un estudio de los sobretajes transientes provocados por fallas a tierra y la influencia de la conexión a tierra del neutro en la magnitud de los mismos, así como la caída de tensión provoca-

da por las fallas y su efecto sobre la carga.

Por último para tener una idea práctica, en el Capítulo IV se utiliza el sistema Guayaquil 69/13.8 Kv., en donde se analiza los efectos que producen los diferentes tipos de falla en el sistema, cuando éstas ocurren en el lado de alta tensión (69 Kv.) y cuyos resultados se encuentran indicados en sus respectivas tablas.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	6
INDICE GENERAL	8
INDICE DE FIGURAS	13
INDICE TABLAS	17
SIMBOLOGIA	
INTRODUCCION	19
I. CAPITULO	22
ANALISIS DE FALLAS	22
1.1 Introducci3n	22
1.1.1 Corrientes de corto circuito y su influencia sobre el servicio	23
1.1.2 Esfuerzos provocados por las co rrientes de corto circuito. ...	27
1.1.3 Breve an3lisis de componentes sim3tricos.	38
1.2 Fallos asim3tricos en sistemas de po- tencia.	39
1.3 Fallo l3nea a l3nea en un sistema de potencia.	40
1.3.1 Redes de secuencia	40
1.4 Fallo doble l3nea a tierra en un siste ma de potencia.	41

	Pág.
1.4.1 Redes de secuencia	42
1.5 Fallo simple línea a tierra en un sistema de potencia.	42
1.5.1 Redes de secuencia	43
II. CAPITULO	44
TOMAS DE TIERRA	44
2.1 Introducción	44
2.1.1 Prescripciones referentes a las tomas de tierra.	45
2.1.2 Partes que comprenden las tomas de tierra.	46
2.1.3 Sección mínima y disposición de los circuitos de tierra.	47
2.2 Tendido de los circuitos de tierra ..	49
2.2.1 Contacto de los conductores de los circuitos de tierra con las partes metálicas y con los electrodos o placas.	50
2.2.2 Agrupación de los diferentes elementos de una instalación eléctrica en distintos circuitos de tierra.	50
2.3 Puesta a tierra del neutro de la instalación.	52
2.3.1 Instalación con neutro aislado	53

	Pág.	
2.3.2	Instalación con neutro a tierra por intermedio de un reactor. .	58
2.3.3	Instalación con neutro unido directamente a tierra.	62
2.3.4	Instalación a tierra por medio del neutralizador de falla a tierra.	64
2.4	Aterrizamiento del neutro de sistemas de potencia.	65
2.4.1	Principios fundamentales de aterrizamiento de sistemas.	66
2.4.2	Sistema de distribución aterrizado.	68
2.4.3	Razones para la puesta a tierra de el sistema de distribución..	68
2.4.4	Métodos aconsejables de puesta a tierra para el sistema de distribución.	69
2.4.5	Efectos del aterrizamiento del neutro.	71
III.	CAPITULO	72
	EFFECTOS POR FALLAS A TIERRA	72
3.1	Introducción	72
3.1.1	Corriente por diseño de sistemas aterrizado.	73
3.1.2	Resonancia de sistemas aterrizados.	81

3.1.3	Influencia de las pérdidas a tierra por defecto de aislamiento y por otra clase de aislamientos..	86
3.1.4	Disonancia	86
3.2	Efectos de sistemas aterrizados sobre voltajes línea a tierra durante falla..	89
3.2.1	Voltajes transientes y aterrizamientos prácticos.	91
3.2.2	Sobrevoltajes transientes	96
3.2.3	Voltaje inducido por accidentes en líneas de distribución.	111
3.2.4	Minimización de los efectos de declives de voltaje.	112
3.3	Análisis de los efectos de fallas del sistema en el suministro a fábricas de consumidores.	115
3.3.1	Efecto de la depresión de voltaje.	116
3.3.2	Niveles de voltajes de el transformador con una sola fase cortocircuitada.	118
3.4	Efecto de el declive de voltaje sobre la carga.	119
3.4.1	Fallas y fallas compensadas ...	120
3.4.2	Medios por medio del cual el distribuidor puede reducir el declive de voltaje y su justificación económica.	122

	Pág.
3.4.3 Medios por medio del cual el consumidor puede reducir disturbios causados por un declive de voltaje dado.	123
IV. CAPITULO	126
ANALISIS PRACTICO DEL PROBLEMA. SISTEMA GUA YAQUIL 69/13.8 Kv.	126
4.1 Introducción	126
4.2 Cálculo de corto circuito	127
4.3 Corto circuito trifásico	131
4.4 Corto circuito línea-línea	132
4.5 Corto circuito doble línea a tierra ..	132
4.6 Corto circuito simple línea a tierra .	133
4.7 Análisis de resultados	133
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	190
ANEXOS	172
BIBLIOGRAFIA	193

INDICE DE FIGURAS

Nº		Pág.
1.1	Dos conductores paralelos que transportan corrientes del mismo sentido.	28
1.2	Aplicación de los valores de b y h en barras de sección rectangular.	31
2.1	Red trifásica con neutro aislado. Servicio normal.	53
2.2	Diagrama vectorial de tensiones de fase y corrientes en una red trifásica con neutro aislado. Servicio normal.	55
2.3	Red trifásica con neutro aislado y falla a tierra en la fase C.	56
2.4	Diagrama vectorial en una red trifásica con neutro aislado, y falla a tierra en la fase C.	57
2.5	Red trifásica con un reactor en el neutro y falla a tierra en la fase C.	59
2.6	Diagrama vectorial en una red trifásica con reactor en el neutro, y falla a tierra en la fase C.	60
3.1a)	Subestación elevadora conexión Delta-Estrella aterrizada.	77

Nº	Pág.
3.1b) Subestación intermedia conexión Estrella aterrizada-Estrella aterrizada.	77
3.1c) Subestación intermedia conexión con auto-transformador.	78
3.1d) Subestación intermedia conexión Delta-Delta	78
3.1e) Subestación intermedia conexión Delta-Estrella aterrizada.	79
3.2 Diagrama vectorial de tensiones y corrientes en una red trifásica protegida con falla a tierra en la fase C. Para el caso de resonancia.	82
3.3 Diagrama vectorial de tensiones y corrientes en una red trifásica protegida con falla a tierra en la fase C. Para el caso de disonancia.	88
3.4 Voltajes de línea a tierra durante falla de la fase "A" a tierra. Neutro aterrizado directamente.	90
3.5 Voltajes de línea a tierra durante falla de la fase "A" a tierra con resistencia en el neutro.	91
3.6 Voltajes de línea a tierra durante falla de la fase "A" a tierra. Con el neutro aislado.	92
3.7 Voltaje a tierra de frecuencia fundamental y transiente en las fases no falladas. Con reactancia en el neutro.	94

Nº		Pág.
3.8	Voltaje a tierra de frecuencia fundamental y transiente en las fases no falladas. Con resistencia en el neutro.	95
3.9	Voltaje a tierra de frecuencia fundamental y transiente en el neutro. Con reactancia en el neutro.	97
3.10	Voltaje a tierra de frecuencia fundamental y transiente en el neutro. Con resistencia en el neutro.	98
3.11	Valor absoluto de $\frac{V_b, c}{E g}$ en función de $\frac{X_0}{X_1}$; $\frac{R_0}{X_1}$	110
3.12	Voltaje inducido por la línea de potencia al circuito de comunicación.	113
3.13	Comportamiento del motor a causa de la depresión de voltaje,	117
4.1	Sistema de la ciudad de Guayaquil 69/13.8 Kv.	130
A.1	Diagrama vectorial del operador a.	175
A.2	Sistema de voltajes trifásicos desbalanceados.	176
A.3	Componentes de secuencia positiva, negativa y cero correspondientes al sistema desbalanceado de la Figura A.2.	177
A.4	Suma gráfica de los componentes representados en la Figura A.3, para obtener tres	

Nº		Pág.
	vectores desequilibrados.	177
A.5	Diagrama para un fallo de línea a línea ..	180
A.6	Red de secuencia para un fallo de línea a línea.	182
A.7	Diagrama para un fallo de doble línea a tierra.	183
A.8	Red de secuencia para una falla de dos lí- neas a tierra.	185
A.9	Diagrama para un fallo de línea a tierra .	187
A.10	Red de secuencia para una falla de línea a tierra.	188

INDICE DE TABLAS

Nº	Pág.
I. Falla trifásica en barra Nº 20	137
II. Falla trifásica en barra Nº 43	138
III. Falla entre fases (Fase B y C) en barra Nº 20.	139
IV. Falla entre fases (Fase B y C) en barra Nº 43.	143
V. Falla de 2 fases a tierra (Fase B y C) en barra Nº 20.	147
VI. Falla de 2 fases a tierra (Fase B y C) en barra Nº 43.	151
VII. Falla de 2 fases a tierra (Fase B y C) en barra Nº 20 con cambio de conexión del trans- formador.	155
VIII. Falla de 2 fases a tierra (B y C) en barra Nº 43 con cambio del transformador.	159
IX. Falla de una fase (A) a tierra en barra Nº 20.	160
X. Falla de una fase (A) a tierra en barra Nº 43.	163
XI. Falla de una fase (A) a tierra en barra Nº 20 con cambio de conexión en el transforma- dor.	166

XVIII

Nº	Pág.
XII. Falla de una fase (A) a tierra en barra Nº 43 con cambio de conexión en el transformador.	169
XIII. Voltaje en las barras de baja tensión cuando ocurre los distintos tipos de fallas. .	170
XIV. Corrientes máxima de cortocircuito	171

I N T R O D U C C I O N

Todo sistema de potencia se ve expuesto en determinados momentos a la presencia de fallas en sus instalaciones las mismas que son originadas por diversas causas.

Tales fallas o cortocircuitos provocan graves efectos en el lugar de ocurrencia, así como en los lugares del sistema que están adyacentes al punto de falla. Estos efectos pueden en algunos casos provocar serias averías en los equipos e instalaciones del sistema si no existe la protección necesaria y eficaz.

Los disyuntores y fusibles deben tener una capacidad de ruptura adecuada, para que durante un cortocircuito puedan funcionar y cumplir su cometido con rapidez y seguridad, sin sufrir ningún tipo de avería, y que al mismo tiempo pueda resistir los efectos de los valores máximos de las corrientes de cortocircuito en los momentos iniciales de la falla.

En general la presencia de cortocircuitos sobre un sis-

tema de potencia, provoca sobreintensidades, caídas de tensión, desequilibrios en las tensiones y corrientes de las tres fases, así como sobrevoltajes que pueden ser transferidos desde el lado de alto voltaje al lado de bajo voltaje de un transformador.

Las sobretensiones pueden manifestarse entre los conductores de la instalación y la tierra, y por consiguiente entre la tierra y los arrollamientos de las máquinas o de los equipos del sistema, si estas tensiones sobrepasan los valores para los cuales están diseñados los aisladores de la línea, los aislantes de los arrollamientos, y si además duran un tiempo apreciable dan lugar a la existencia de averías. Estas se manifiestan generalmente por el deterioro lento o rápido, o con perforación de los aislantes, que en un tiempo corto pueden poner fuera de servicio los cables, las máquinas o los equipos en los que se haya manifestado la sobretensión.

Las sobretensiones surgen tanto en las instalaciones de baja tensión como en las de alta tensión, aunque en las primeras, por lo general, no tienen tanta importancia como en las últimas. Así pues es necesario prevenirse empleando protecciones, que si no evitan la formación de sobretensiones, impiden al menos que al producirse no sobrepasen el nivel básico de aislamiento (BIL), y al

mismo tiempo se procura se descargen a tierra lo más rápidamente posible haciéndolas inofensivas.

Fallas a tierra ocurridas en el lado de alta tensión causan sobrevoltajes en el lado de baja tensión del transformador cuando el neutro de estos está conectado en el lado de alta en estrella aterrizado y en el lado de baja en estrella aterrizado. La disminución del nivel de los sobrevoltajes, se logra cambiando la conexión del neutro del transformador en el lado de alta, de estrella aterrizado a estrella aislado.

Debido a que las corrientes de cortocircuito al atravesar los diferentes elementos de las redes provocan caídas de tensión, causan la pérdida de velocidad de los motores (o la operación de los relés de bajo voltaje), y cuando el voltaje del suministro es restaurado los motores aceleran y tratan de alcanzar su condición previa de operación.

En este trabajo se realiza un estudio de los efectos que provocan las fallas ocurridas en el lado de alta tensión de los transformadores y un análisis general de los efectos producidos por los cortocircuitos en el sistema y en especial los producidos por cortocircuitos a tierra.

CAPITULO I

ANALISIS DE FALLAS

1.1 INTRODUCCION.-

Se conoce con el nombre de cortocircuito a todas las fallas provocadas por un contacto de un conductor o varios conductores y tierra, o cualquier pieza metálica unida a ella; o bien entre conductores.

En las instalaciones de alta tensión este contacto da lugar a la formación de un arco.

Las causas que producen cortocircuito son múltiples y estas pueden ser:

a) De origen eléctrico:

Por alteración de un aislante que resulta incapaz de soportar la tensión.

b) De origen mecánico:

Cuando existe una rotura de conductores o aisladores; la caída de algún cuerpo sobre la línea aérea como la rama de un árbol, o por un golpe de pico sobre un cable subterráneo, etc.

c) De origen atmosférico:

Originados por una descarga atmosférica (rayo) que alcanza los conductores de una línea, por la niebla, el hielo los mismos que producen efectos mecánicos, tales como aproximación de conductores, o eléctricos con la alteración de las superficies de los aisladores, etc.

d) De origen interno:

Originadas debido a falsas maniobras como la apertura de un seccionador en carga, etc.

1.1.1 Corrientes de cortocircuito y su influencia sobre el servicio.-

La corriente de cortocircuito tiene dos consecuencias principales:

- a) El desarrollo de una gran cantidad de calor localizado por el arco en el punto de avería, y en el resto del circuito.
- b) La aparición de esfuerzos electrodinámicos y de esfuerzos térmicos en el punto de avería como en el resto del circuito, incluidos los generadores, transformadores e interruptores.

La acción térmica provoca el desperfecto de los materiales aislantes, como la porcelana, baquelita, etc., e incluso, en los conductores mismos en donde el arco se produce.

La acción térmica es especialmente perjudicial para los contactos, de los interruptores, desconectores, terminales, etc.

Por la presencia de la corriente de cortocircuito la temperatura de dichos contactos aumenta en proporción extraordinaria, debido a

Inv. No. _____

la disminución local de presión por efecto de los esfuerzos electrodinámicos, llegando a desprenderse vapores metálicos de las superficies incandescentes.

Los arcos de cortocircuitos con intensidades muy fuertes y de gran longitud, como son los que pueden presentarse en los centros de partida de las redes de tensión media, en donde existe una gran concentración de energía, han llegado a producir quemaduras mortales y ondas explosivas destructoras a causa del calentamiento instantáneo que provocan sobre grandes masas de aire.

Cuando el valor eficaz de la corriente de cortocircuito excede de 20.000 Amperios, los esfuerzos electrodinámicos en las redes se hacen peligrosas, esto hace que en las instalaciones eléctricas insuficientemente dimensionadas existan desperfectos en las barras colectoras, contactos entre los conductores aéreos, apertura de los desconectores, etc.

En los devanados de los transformadores, don

de los esfuerzos electrodinámicos pueden alcanzar valores de muchas toneladas, los efectos llegan a ser desastrosos si la construcción no está bien dimensionada.

Los cortocircuitos de gran intensidad están acompañados por el descenso de tensión en determinados sectores de la red. Los efectos alcanzan a todos los ramales conectados al punto en donde se produce el cortocircuito por inductancias apreciables.

Como consecuencia se produce la pérdida de sincronismo en los motores de este género, y el accionamiento intempestivo de los mecanismos de tensión nula, en todos los interruptores afectados que van provistos de ellos.

Por lo tanto es conveniente disponer cuidadosamente la repartición de las inductancias naturales de la red, así como los relés y las protecciones adecuadas para de esta manera tratar de limitar en duración y extensión los efectos de tales perturbaciones.

1.1.2 Esfuerzos provocados por las corrientes de corto circuito.-

- Esfuerzos electrodinámicos desarrollados por el corto circuito.

Las barras, apoyos, aisladores y demás elementos de los circuitos recorridos por las corrientes de corto circuito se ven afectados por la existencia de esfuerzos electrodinámicos cuyo conocimiento resulta esencial para poder dimensionar y seleccionar los sistemas de barras colectoras, los aisladores de apoyo, la distancia entre apoyo, etc., de acuerdo con los esfuerzos producidos.

En la Figura 1.1 se representa esquemáticamente, dos conductores largos, rectilíneos y paralelos separados por una distancia d expresada en cm, y que están recorridos por una corriente i . Puesto que cada conductor se encuentra en el campo magnético creado por el otro; experimenta una fuerza.

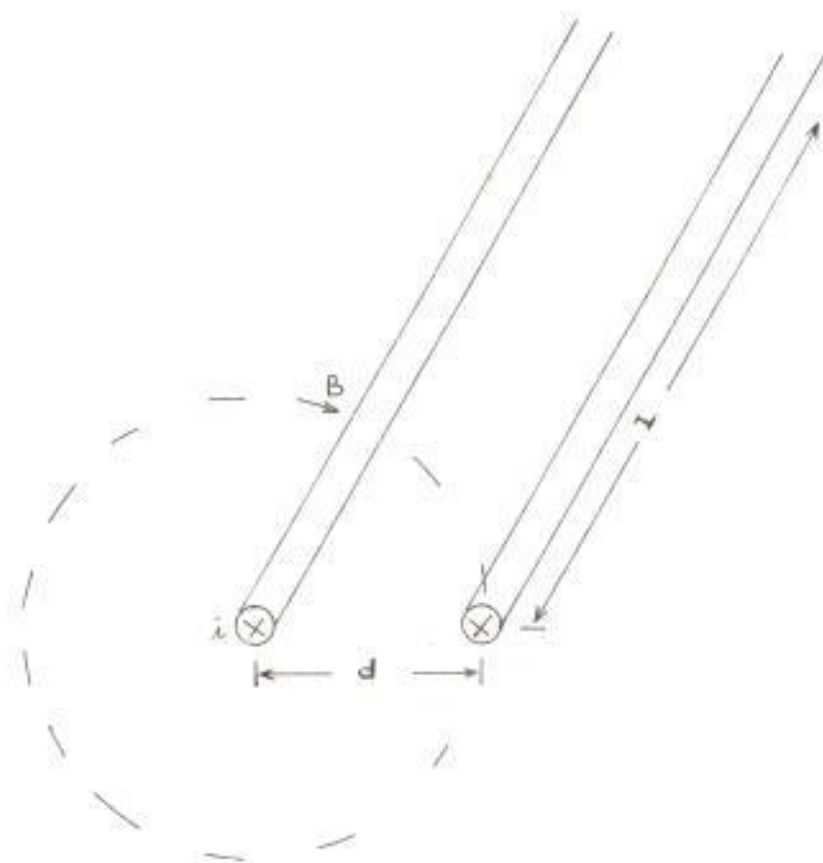


FIGURA 1.1.- DOS CONDUCTORES PARALELOS QUE TRANSPORTAN CORRIENTES DEL MISMO SENTIDO.

Si l es la longitud de los conductores expresada en cm, y B la inducción magnética engendrada por el conductor de la izquierda, la fuerza ejercida sobre el conductor de la derecha es:

$$F = i l B \quad (1)$$

La inducción magnética B es:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2 \pi d}$$

Sustituyendo este valor en la fórmula (1):

$$\frac{F}{L} = 2 \times 10^{-7} \frac{i^2}{d} \quad (\text{Newton})$$

$$F = 2.04 \frac{i^2 L}{d} 10^{-8} \text{ Kg} \quad (2)$$

Los máximos esfuerzos aparecen cuando fluye la corriente de choque I_{ch} .

Si se sustituye el valor de i en la fórmula anterior (2), por la de la corriente de choque expresada en kiloamperios y para una longitud de conductor de 100 centímetros, el esfuerzo electrodinámico; es:

$$F = 2.04 \frac{I_{ch}}{d} \text{ Kg/m}$$

F = Esfuerzo electrodinámico

I_{ch} = Corriente de choque

d = Distancia entre conductores

Cuando el cortocircuito es de tres fases a tierra, el cálculo de los esfuerzos electrodinámicos es más complicado, por lo que generalmente se adoptan los resultados que se obtienen en el supuesto de un cortocircuito de dos fases a tierra, teniendo en cuenta además que este es el caso más desfavorable.

La resistencia mecánica de las barras colectoras se determina a partir de su momento resistente. Para barras rectangulares, que son las más utilizadas, el momento resistente de una sección rectangular; es:

$$W = \frac{h b^2}{6} \text{ cm}^3$$

W = Momento resistente

b, h = Dimensiones de la barra rectangular.

En la Figura 1.2 se muestra la aplicación de los valores de b y h de acuerdo con las disposiciones de las barras expresadas en dicha figura.

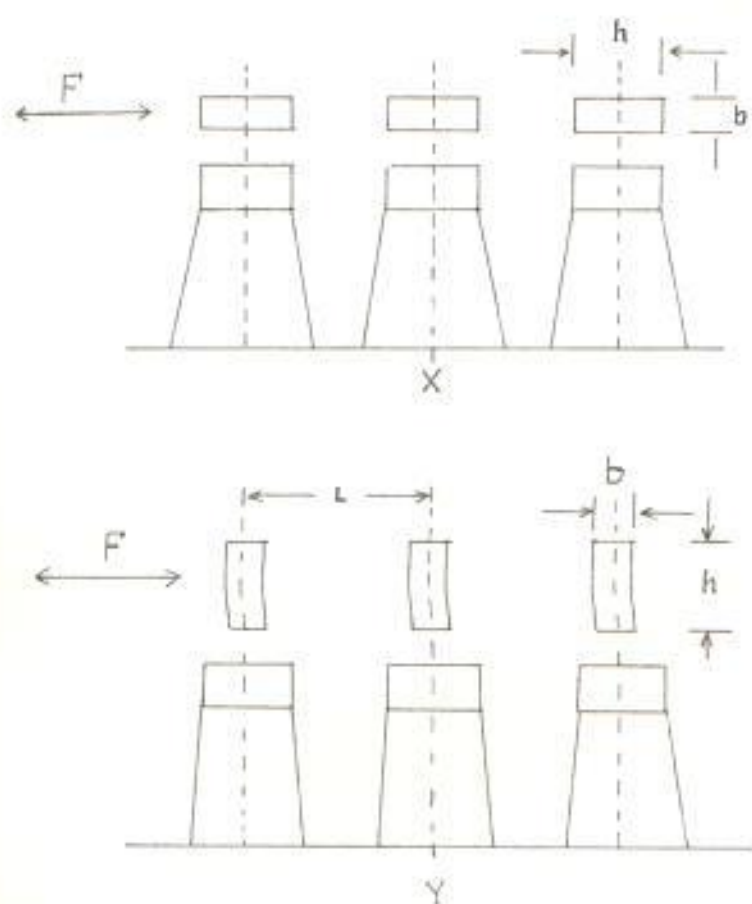


FIGURA 1.2.- APLICACION DE LOS VALORES DE b Y h EN BARRAS DE SECCION RECTANGULAR.

Las barras se consideran como vigas sometidas a una carga uniformemente repartida. Según la forma en que están montadas, el momento de flexión M se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Barras colectoras: } M = \frac{F \cdot L}{16} \text{ Kg. cm.}$$

$$\text{Derivaciones : } M = \frac{F \cdot L}{10} \text{ Kg. cm.}$$

M = Momento de flexión

F = Esfuerzo electrodinámico

L = Distancia entre apoyos

La carga admisible K, es:

Para el cobre : K = 1000 a 1200 Kg/cm²

Para el aluminio : K = 400 a 600 Kg/cm²

El momento resistente necesario es:

$$W = \frac{M}{K} \text{ cm}^3$$

Para que el valor del momento resistente resultante sea correcto, se debe cumplir la siguiente condición:

$$\frac{M}{K} \leq \frac{h b^2}{6}$$

En el caso de que la sección de las barras no sea rectangular, se determina el momento resistente correspondiente.

Habiendo adoptado previamente una distancia entre conductores d , y con el cálculo anterior, se determina la distancia entre apoyos L necesaria, la sección más apropiada de barras, etc.

- Esfuerzos térmicos desarrollados por el cortocircuito:

A causa de la corriente de cortocircuito se produce un brusco aumento de temperatura de los devanados de los alternadores, transformadores y de los diferentes aparatos eléctricos. Por consiguiente experi-

mentan un esfuerzo térmico adicional, que depende esencialmente del cuadrado de la intensidad y de la duración del cortocircuito. Debe comprobarse si el calentamiento sufrido por las distintas partes de la instalación, está dentro de los límites establecidos para cada una de dichas partes, ya que el calentamiento es causa, si no de una carbonización inmediata, al menos de una disminución del poder dieléctrico de la materia aislante.

Como base para la determinación del calentamiento, se toma el valor de la corriente permanente de cortocircuito I_p , y el tiempo t , desde la iniciación del cortocircuito hasta la desconexión de los disyuntores correspondientes.

Para tomar en cuenta el calentamiento producido por la corriente de cortocircuito de choque I_{ch} , que en muchas ocasiones resulta ser mayor que el propio calentamiento producido por la corriente permanente de cortocircuito, se introduce en los

cálculos un tiempo adicional Δt ; cuyo valor es:

$$\Delta t = \left(\frac{I_{ch}}{I_p} \right)^2 T \quad \text{Segundos}$$

En donde:

- I_{ch} = Corriente de cortocircuito de choque en amperios.
- I_p = Corriente permanente de cortocircuito en amperios.
- T = Factor de tiempo de las máquinas en segundos.

Los valores de T se adoptan tanto menores cuanto mayor sea la distancia del punto afectado, al punto donde se ha producido el cortocircuito.

Para simplificar los cálculos, se admiten las siguientes condiciones previas:

1. Se puede despreciar la cesión de calor, de las barras al ambiente en que están

situados los conductores, debido al breve tiempo del cortocircuito.

2. El calor específico del material permanece constante, a pesar de la creciente temperatura que toma dicho material.

Teniendo en cuenta estas condiciones, el calentamiento es:

$$\theta = \frac{K}{S^2} I_p^2 (t + \Delta t) \text{ } ^\circ\text{C}$$

En donde:

θ = Calentamiento en grados centígrados
 $^\circ\text{C}$.

S = Sección del conductor en mm^2

K = Constante del material

Para el cobre $K = 0.0058$

Para el aluminio $K = 0.0135$

I_p = Corriente permanente de cortocircuito

t = Tiempo desde la iniciación del cortocircuito hasta la desconexión del disyuntor, en segundos.

Δt = Tiempo adicional para tener en cuenta el calentamiento producido por la corriente de cortocircuito de choque I_{ch} , en segundos.

Las máximas temperaturas admisibles en caso de cortocircuito son las siguientes:

Conductores desnudos:

De cobre	200 °C
De aluminio	180 °C

En los cables de baja tensión se puede admitir un calentamiento bastante elevado (hasta unos 150°C).

En cables de alta tensión, debe tenerse muy en cuenta la buena conservación del medio dieléctrico; por tal razón con el aumento de la tensión de servicio se reduce los calentamientos.

Se puede tomar como valores de estos calentamientos:

Para cables de 6 Kv	120°C
Para cables de 10 Kv	115°C
Para cables de 20 Kv	100°C

1.1.3 Breve análisis de componentes simétricos.-

Cuando el circuito no es simétrico, como el resultado de cargas desbalanceadas, fallas desbalanceadas o cortocircuitos, el método de los componentes simétricos, es el que generalmente ahora se utiliza para calcular tales circuitos.

Este método consiste en descomponer el sistema desbalanceado en tres sistemas balanceados, y para que de esta manera tanto las tensiones como las corrientes desequilibradas sean descompuestas en sus componentes simétricos.

Los problemas pueden ser resueltos, considerando separadamente cada conjunto de componentes y por superposición de los resultados. Un análisis más detallado se indica en el Anexo A.

1.2 FALLOS ASIMÉTRICOS EN SISTEMAS DE POTENCIA.-

En los sistemas de potencia la mayor cantidad de fallas son asimétricos, como cortocircuitos asimétricos, fallas asimétricas a través de impedancias, o conductores abiertos.

Tales fallas son de línea a línea, doble línea a tierra, o de una línea a tierra, al igual que uno o dos conductores abiertos.

Cuando ocurre cualquiera de las fallas antes mencionadas, por el sistema circulan corrientes desequilibradas, razón por la que es muy útil el método de los componentes simétricos, para analizar y determinar los voltajes y corrientes en todas las partes del sistema. Además este método da origen a la necesidad de tener un circuito independiente por el cual circulan las corrientes de secuencia positiva, negativa y cero.

Se define de esta manera las tres redes de secuencia que son necesarias para analizar un sistema trifásico en condiciones desbalanceadas.

1.3 FALLA LINEA A LINEA EN UN SISTEMA DE POTENCIA.-

Cuando se produce una falla de línea a línea en un sistema de potencia, y si las fases falladas son la fase b y la fase c, se cumple que:

$$V_b = V_c \quad I_a = 0 \quad I_b = - I_c$$

$$V_{a_1} = V_{a_2} \quad V_{a_0} = 0$$

La corriente de falla I_f ; es:

$$I_f = - j\sqrt{3} I_{a_1}$$

$$I_{a_1} = \frac{E_G}{Z_1 + Z_2}$$

Ver Anexo A, literal 3

1.3.1 Redes de secuencia.-

Del resultado de las ecuaciones (1.10) y (1.11) indicadas en el Anexo A se concluye que la red de secuencia cero no existe, por lo

que la red de secuencia positiva y la red de secuencia negativa, van conectadas en paralelo como se muestra en la Figura A.6, del Anexo A.

1.4 FALLO DOBLE LINEA A TIERRA EN UN SISTEMA DE POTENCIA.-

Si en un sistema de potencia se produce una falla entre dos líneas y tierra, y si las fases falladas son la fase b y la fase c, se cumple que:

$$I_a = 0 \qquad V_b = 0 \qquad V_c = 0$$

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

La corriente de falla I_f ; es:

$$I_f = I_b + I_c$$

$$I_b = I_{a_0} + a^2 I_{a_1} + a I_{a_2}$$

$$I_c = I_{a_0} + a I_{a_1} + a^2 I_{a_2}$$

Ver anexo A , literal 4

1.4.1 Redes de secuencia.-

De la ecuación (1.12) indicada en el Anexo A se concluye que las redes de secuencia positiva, negativa y cero deben estar conectadas en paralelo, como se muestra en la Figura A.8 del Anexo A.

1.5 FALLO SIMPLE LINEA A TIERRA EN UN SISTEMA DE POTENCIA.-

La Figura A.9 del Anexo A, muestra el caso de una falla a tierra de la fase a de un sistema de potencia; para este tipo de falla se cumple que:

$$V_a = 0 \qquad I_b = 0 \qquad I_c = 0$$

$$I_{a_0} = I_{a_1} = I_{a_2}$$

$$I_{a_1} = \frac{1}{3} I_a$$

La corriente de falla I_f ; es:

$$I_f = I_a$$

Ver Anexo A , literal 5

1.5.1 Redes de secuencia.-

De la ecuación (1.13), indicada en el Anexo A , se concluye que las redes de secuencia positiva, negativa y cero, se conectan en serie, como se muestra en la Figura A.10 del Anexo A.

CAPITULO II

TOMAS DE TIERRA

2.1 INTRODUCCION.-

Las tomas de tierra o tomas de puesta a tierra, son una parte importante de la instalación, y de las que depende la seguridad de la misma. Son necesarias en los sistemas de generación, transmisión, subtransmisión y distribución de energía eléctrica, así como también en los sistemas telefónicos.

La puesta a tierra constituye la conexión metálica directa sin fusible ni protección alguna, entre determinados elementos de la instalación y un electrodo o grupo de electrodos enterrados en el suelo, con el propósito de que no exista diferencia de potencial entre las instalaciones y la superficie del terreno, y al mismo tiempo permita el paso de corrientes de falla a tierra.

En operación normal las tomas de puesta a tierra

conducen corrientes de pequeña intensidad, que son debidas a pequeños desequilibrios en las líneas de transmisión y redes de distribución; pero en los cortos períodos de fallas o cuando se presentan repentinas sobretensiones ocasionadas por descargas atmosféricas, o por fenómenos transitorios por el cierre y apertura de interruptores, los conductores a tierra se ven expuestos a la circulación de corrientes que pueden ser de muchos miles de amperios.

El neutro de los diversos equipos del sistema de potencia está conectado a tierra, y dependiendo del equipo o sección del sistema y de la metas que se quieran obtener, existen diversas formas de conectar dicho neutro a tierra.

2.1.1 Prescripciones referentes a las tomas de tierra.-

Existen reglamentos y normas que prescriben las condiciones que deben cumplir las tomas de puesta a tierra, su número, la forma de los electrodos y su colocación en el terreno.

En este trabajo se hace referencia a las normas publicadas en Estaciones Transformadoras y de Distribución por Gaudencio Zoppetti.

En las redes de baja tensión, las resistencias de las tomas de puesta a tierra, para que rindan eficazmente deben tener un valor no superior a 10 o 15 ohmios. En las redes de alta tensión el valor no debe pasar de 20 ohmios, y se debe también tomar en consideración que el terreno se comporta como una resistencia de tipo aglomerado y que en estas condiciones dicha resistencia disminuye en función de la tensión aplicada.

2.1.2 Partes que comprenden las tomas de tierra.-

Un sistema de puesta a tierra está comprendido por tres partes:

- a) Circuito de conductores de unión
- b) Electrodo o toma de tierra
- c) Tierra propiamente dicha

2.1.3 Sección mínima y disposición de los circuitos de tierra.-

La sección de los conductores de los circuitos de puesta a tierra debe ser apropiada a la intensidad de corriente, que se prevee va a circular por ellos, y de esta manera se evita las fusiones por efecto Joule, en el caso de secciones insuficientes.

Las secciones que se refieren al circuito de tierra propiamente dicho o circuito principal, deben tener como mínimo 35 mm^2 en el caso de ser de cobre y 100 mm^2 en el caso de ser de hierro galvanizado.

Los demás circuitos que agrupados en paralelo, convergen al circuito de puesta a tierra principal tienen que ser por lo menos de 25 mm^2 de sección si son de cobre o su equivalente según el material metálico empleado.

Los electrodos de puesta a tierra deben estar constituidos por placas, tubos, barras de metal resistente a la acción del material del suelo.

Los electrodos de puesta a tierra pueden ser de cobre o de hierro galvanizado, cuando se emplea placas de cobre éstas deben tener como espesor mínimo 2 mm, y las placas de hierro galvanizado deben tener 2.5 mm de espesor. En ninguno de los casos la superficie útil de la placa debe ser inferior a 0.5 m².

Los tubos deben tener un diámetro interior de 25 mm, y su longitud de 2 m, como mínimo.

Las barras deben ser de 16 mm de diámetro y con 2 m de longitud como mínimo.

Los tubos o barras que conectadas en paralelo estén formando parte de un electrodo común, deben estar a una distancia de por lo menos 2 m unos de otros.

La sección de los elementos metálicos en paralelo con los circuitos de tierra, no debe ser tomada en cuenta, ni se concideran como tomas eficaces de puesta a tierra, a menos que su resistencia a tierra sea en todo tiempo prácticamente nula.

2.2 TENDIDO DE LOS CIRCUITOS DE TIERRA.-

El tendido de los conductores de los circuitos de puesta a tierra, debe ser efectuado con conductores desnudos, al descubierto, en forma visible y de tal manera que no sea fácil su deterioro por acciones mecánicas o químicas.

Los electrodos de puesta a tierra deben estar enterrados a una profundidad mínima de 50 cm., y no simplemente sumergidos en agua, de tal manera que por toda su superficie circule la corriente a tierra.

Se debe procurar colocar los electrodos en un terreno de naturaleza apropiada (sitios húmedos). Además es imprescindible el establecimiento de una malla, para hacer más uniforme el potencial de los elementos de la instalación que han de ser conectados a tierra.

Cuando las condiciones naturales del terreno no son favorables para lograr una baja resistencia de la toma de tierra, se debe realizar un tratamiento del terreno utilizando cualquiera de los métodos establecidos por la práctica.

2.2.1 Contacto de los conductores de los circuitos de tierra con las partes metálicas y con los electrodos o placas.-

Los conductores de los circuitos de tierra deben tener un contacto eléctrico perfecto, tanto con las partes metálicas que se desea poner a tierra, como con la placa o electrodo que constituye la toma de puesta a tierra propiamente dicha.

Las conexiones deben ser hechas con mucho cuidado y con piezas de empalme adecuado, que aseguren la eficacia del contacto.

2.2.2 Agrupación de los diferentes elementos de una instalación eléctrica en distintos circuitos de tierra.-

El paso de tensiones elevadas de unas partes de la instalación a otras, a través de una tierra común, trae consigo la existencia de posibles accidentes.

Estos accidentes pueden ser evitados si se

agrupan los diferentes elementos de la instalación, en dos circuitos de puesta a tierra:

Circuito de puesta a tierra de protección; y
Circuito de puesta a tierra de servicio

Estos circuitos a su vez deben converger en sus tomas de puesta a tierra respectivas.

Al circuito de tierra de protección están conectadas las partes de la instalación, que normalmente no están sometidas a tensión alguna (armaduras metálicas, armazones de motores, cubas de transformadores y de interruptores, soportes de aisladores, etc.) y aquellas otras que aún estando sometidas a tensión, ésta es tan reducida, que el contacto con ellas no representa peligro para las personas (circuitos secundarios de los transformadores de medida, instalaciones de corriente débil y de baja tensión).

Al circuito de puesta a tierra de servicio están conectados los pararrayos, descargadores, cables de guarda de la líneas aéreas de

alta tensión, el neutro de los generadores, transformadores y demás equipos del sistema de potencia, cuando se crea conveniente conectarlos a tierra. Es decir los circuitos por donde se prevee pasen altas corrientes.

2.3 PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO DE LA INSTALACION.- ✕

Toda la información técnica que trata sobre este tópicó hace resaltar la importancia de la conexión del neutro a tierra.

Como una cosa primordial hay que pensar que en el caso de producirse un cortocircuito a tierra, en las fases no falladas se dan lugar sobretensiones que pueden llegar a un valor de 2.1 veces el voltaje normal de línea a tierra.

Es de vital importancia la precaución que se debe tener en un sistema de potencia, para que los sobrevoltajes no causen desperfectos y perturbaciones. Como medio de protección se acude exclusivamente a la puesta a tierra del punto neutro de los generadores o transformadores.

2.3.1 Instalación con neutro aislado.-

Considerando una línea trifásica con el neutro del transformador elevador aislado, como se indica en la Figura 2.1

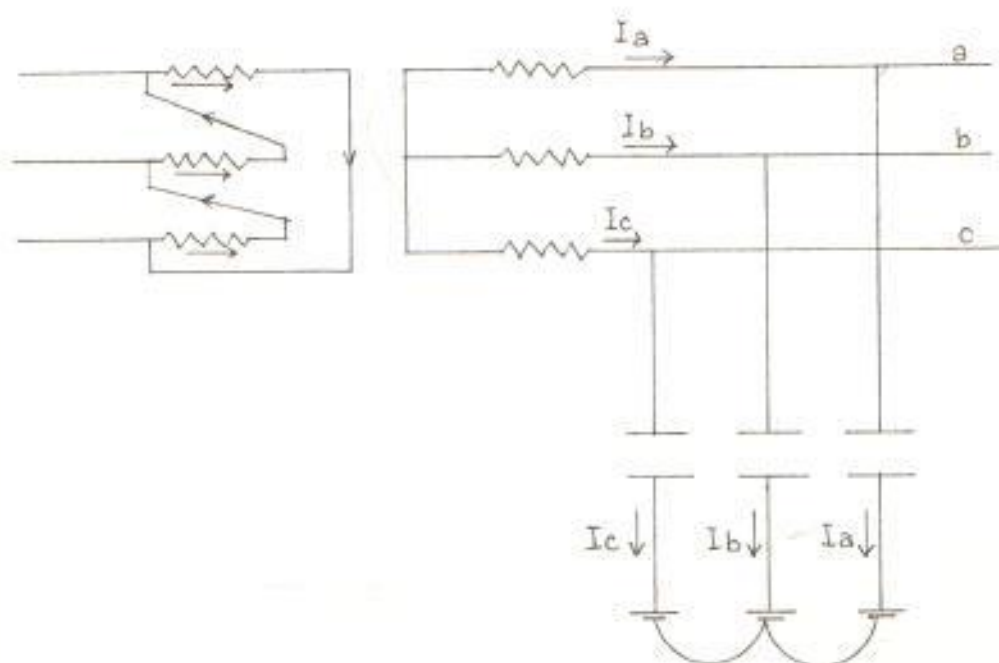


FIGURA 2.1.- RED TRIFASICA CON NEUTRO AISLADO SERVICIO NORMAL.

Cada conductor tiene una capacitancia con respecto a tierra, que dan origen a las correspondientes corrientes a tierra I_a , I_b , I_c , indicadas en la Figura 2.1.

En la Figura 2.2 se muestra el diagrama vectorial de las tensiones de fase y las corrientes capacitivas, desfasadas 90° en adelanto con respecto a aquellas tensiones.

Cada una de las corrientes tienen un valor de:

$$I_a = I_b = I_c = W C V$$

En donde:

$W = 2 \pi f$ (f es la frecuencia en hercios)

$C =$ Capacitancia con respecto a tierra del conductor.

$V =$ Tensión de fase

Cuando se produce una falla a tierra en la fase C como se indica en la Figura 2.3.

El diagrama de tensiones de fase y corrientes es el representado en la Figura 2.4; en donde se puede apreciar el desequilibrio resultante del sistema.

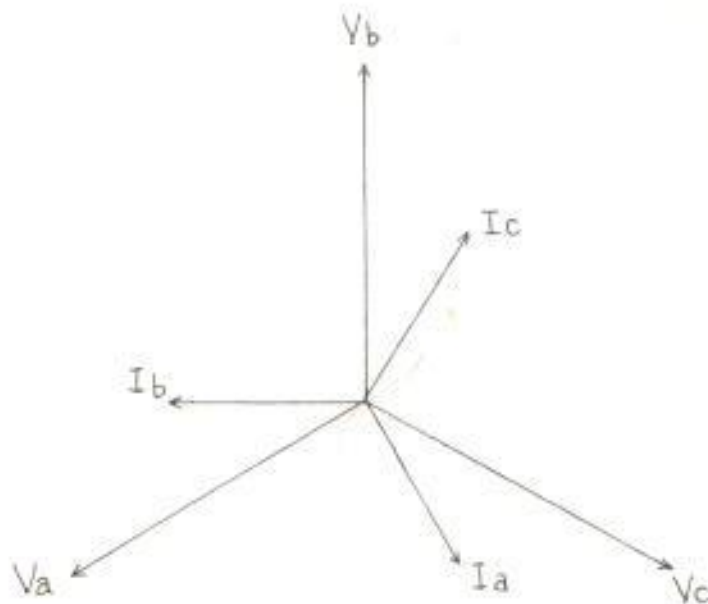


FIGURA 2.2.- DIAGRAMA VECTORIAL DE TENSIONES DE FASE Y CORRIENTES EN UNA RED TRIFASICA CON NEUTRO AISLADO. SERVICIO NORMAL.

Debido a la falla a tierra de la fase C, las corrientes I_a , I_b , I_c , tienen ahora los siguientes valores:

$$I_a = \sqrt{3} \ W \ C \ V$$

$$I_b = \sqrt{3} \ W \ C \ V$$

$$I_c = 3 \ W \ C \ V$$

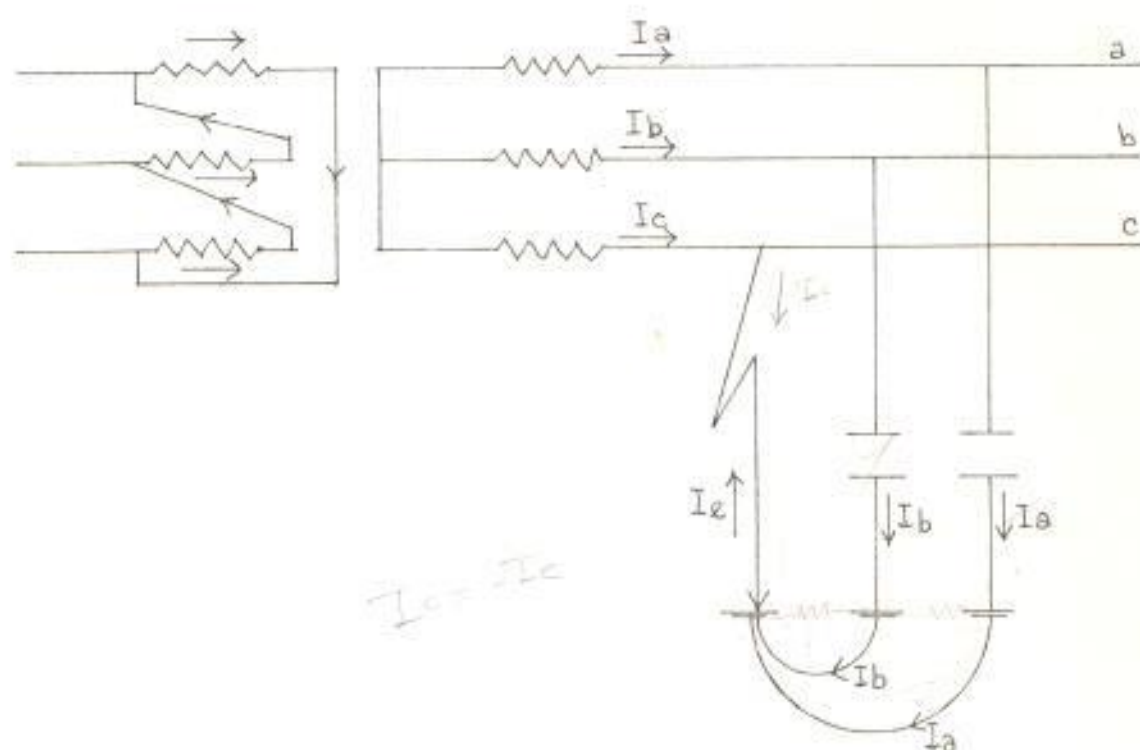


FIGURA 2.3.- RED TRIFASICA CON NEUTRO AISLADO Y FALLA A TIERRA EN LA FASE C.

En la Figura 2.3, se observa que las corrientes de las fases no falladas, I_a e I_b , se juntan en el punto en donde se produce la falla, y la suma geométrica de las mismas, dan como resultado la corriente I_e .

Por el hecho de estar aislado el neutro de la instalación y en el caso de producirse una falla a tierra de uno de los conductores,

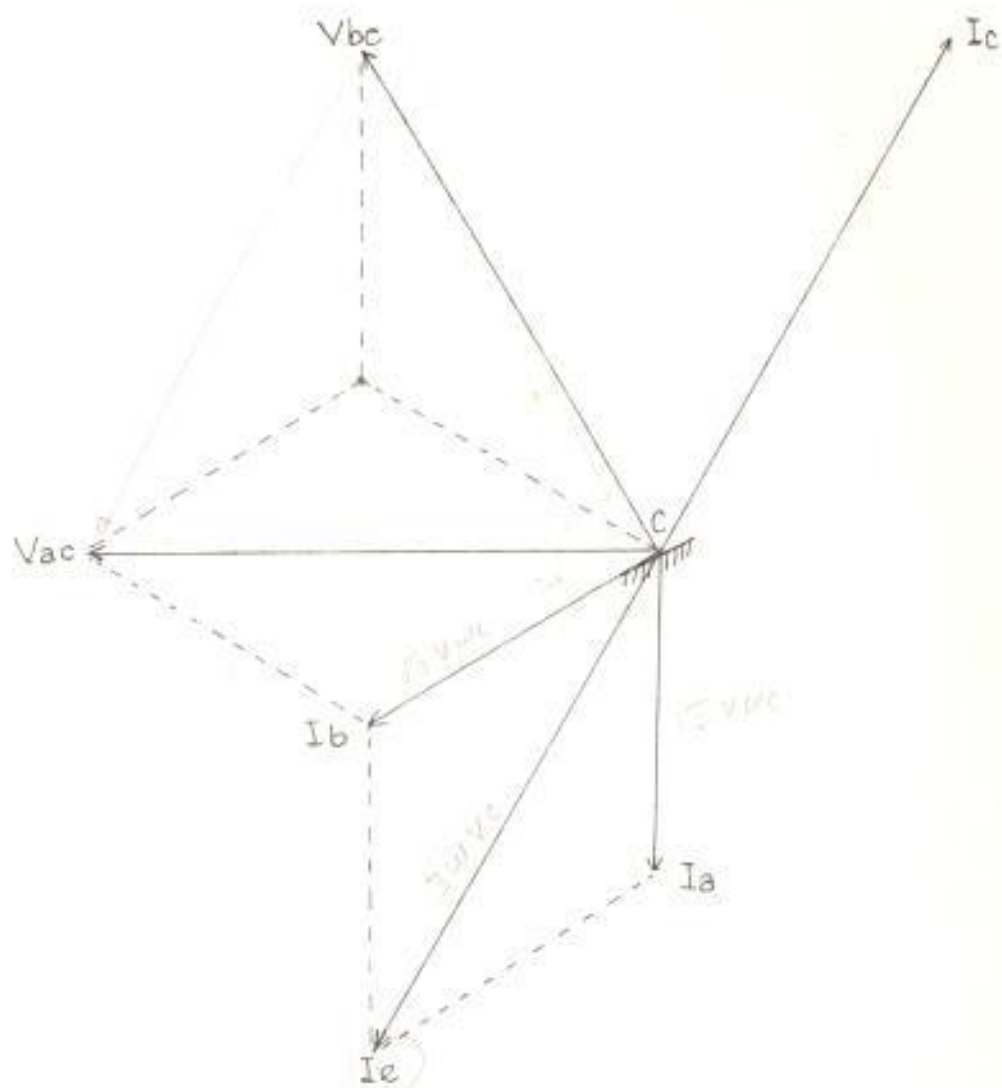


FIGURA 2.4.- DIAGRAMA VECTORIAL EN UNA RED TRIFÁSICA CON NEUTRO AISLADO, Y FALLA A TIERRA EN LA FASE C.

trae como consecuencia:

- a) La elevación de la tensión con respecto a tierra de las fases no falladas, pasando del valor V (tensión de fase) al valor $V\sqrt{3}$.

b) Existe una elevación rápida de la tensión del punto neutro con respecto a tierra. Esto provoca sobretensiones producidas por la carga brusca de las capacitancias respecto a tierra en las dos fases no falladas.

c) Caídas de tensión peligrosas a lo largo del suelo, en las proximidades al punto en donde se produce la falla a tierra.

Estas caídas de tensión son tanto más peligrosas cuanto mayor es la corriente de tierra o cuanto mayores son las resistencias o impedancia de falla.

d) Ruptura de líneas, especialmente en las redes extensas que tienen una elevada corriente de tierra. La rotura de los conductores como consecuencia de su fusión por la acción de la corriente de tierra, conduce a bruscas interrupciones del servicio.

* 2.3.2 Instalación con neutro a tierra por medio de un reactor.-

Consiste en poner el neutro de la instalación conectado a tierra, por medio de una bobina de inducción (reactor).

Considerando una línea trifásica en la cual el neutro del transformador elevador se conecta a tierra, y si se produce una falla a tierra en la fase C, se tiene las corrientes I_a , I_b , I_B e I_e , como se indica en la Figura 2.5.

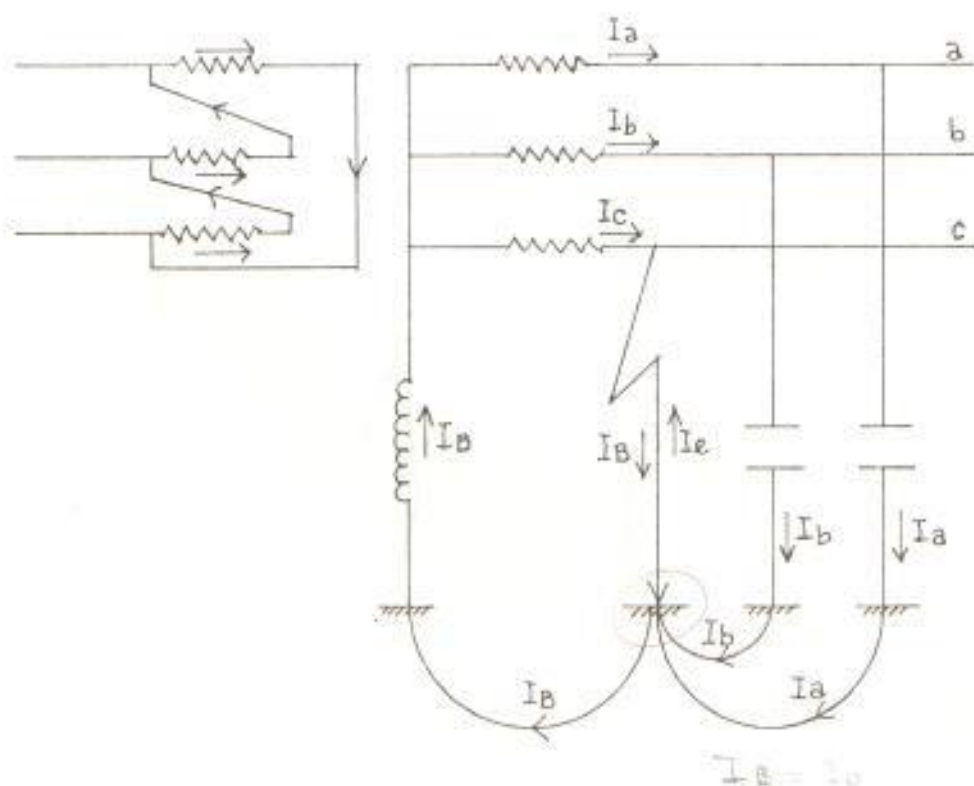


FIGURA 2.5.- RED TRIFASICA CON UN REACTOR EN EL NEUTRO Y FALLA A TIERRA EN LA FASE C.

El diagrama vectorial tanto de las tensiones como las corrientes se muestra en la Figura 2.6.

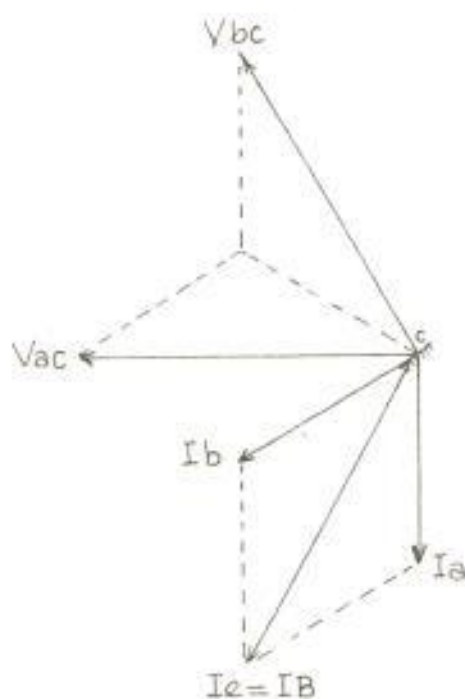


FIGURA 2.6.- DIAGRAMA VECTORIAL EN UNA RED TRIFÁSICA CON REACTOR EN EL NEUTRO Y FALLA A TIERRA EN LA FASE C.

El reactor en el neutro conectado a tierra permite limitar en forma efectiva la corriente de falla y los sobrevoltajes de carácter transitorio de tal forma que el voltaje a tierra en las fases no falladas no exceden

de 1.73 del voltaje de línea a neutro.

El aterrizamiento del neutro por medio de un reactor está definido en término de la razón entre la reactancia de secuencia cero (X_0) y la reactancia de secuencia positiva (X_1).

Un sistema se considera aterrizado por medio de un reactor si $X_0/X_1 > 3$, pero es menor que el valor necesario para que esté en resonancia, y en los casos normales cuando el neutro se conecta a tierra a través de reactancia, se debe procurar que la relación X_0/X_1 sea próxima a:

$$3 \leq \frac{X_0}{X_1} \leq 10$$

Con la puesta a tierra del neutro mediante un reactor y en comparación con la instalación de neutro aislado, los resultados son los siguientes:

- a) Subsiste la elevación de tensión en las fases no falladas.

- b) Las caídas de tensión peligrosas en el punto en donde se produce la falla a tierra, prácticamente desaparecen, ya que debido a la compensación no puede subsistir más que una pequeña fracción de la corriente de tierra.

- c) Las roturas de líneas por fusión a causa de la corriente de tierra, o por el arco de tierra, son imposibles ya que la corriente en el lugar en donde se produce la falla, no es suficiente para ello.

- d) El arco a tierra desaparece rápidamente, y no se produce la extensión a las fases no falladas.

- e) Cuando la falla a tierra tenga la propiedad de ser permanente, puede mantenerse el servicio con una fase a tierra, mientras tiene lugar la localización del punto de falla y su reparación.

2.3.3 Instalación con neutro unido directamente a tierra.-

dición de operación y para cualquier cantidad de capacidad de generación.

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 3 \quad \frac{R_0}{X_1} \leq 1$$

2.3.4 Instalación a tierra por medio del neutralizador de falla a tierra.-

Este método consiste en conectar el neutro a tierra con un reactor, el mismo que tiene la característica particular de que la reactancia inductiva de la bobina (X_b) es igual a la reactancia capacitiva (X_c) del generador o del punto considerado.

Se logra con esto tener un circuito en resonancia que amortigue las oscilaciones de voltaje de frecuencias elevadas presentadas durante el transitorio.

El neutralizador de falla a tierra está provisto de derivaciones, de tal forma que su reactancia en la práctica puede ser ajustada, para de esta manera obtener mínimas corrien-

La puesta a tierra directa del neutro, no disminuye en gran medida las sobretensiones de frecuencia media, pero sí en cambio el voltaje a frecuencia normal de las fases no falladas.

Además de igual forma disminuye las sobretensiones de maniobra, reduce la influencia capacitiva sobre las líneas de comunicación, aunque aumenta los efectos dinámicos y así mismo no se limita la corriente de falla a tierra.

Cuando el neutro de los transformadores, interruptores etc., están conectados directamente a tierra, precisan aislamientos más reducidos, que representa un ahorro económico considerable.

Se tiene un sistema directamente aterrizado, cuando la razón entre la reactancia de secuencia cero (X_0) y la reactancia de secuencia positiva (X_1), no es mayor que tres; y que la razón entre la resistencia de secuencia cero (R_0) y la reactancia de secuencia positiva (X_1), no es mayor que uno para cualquier con-

tes de falla, cuando se produce una falla de línea a tierra.

El neutralizador de falla a tierra es aplicado a un sistema de potencia para extinguir las fallas a tierra, y para limitar el valor de las corrientes de tierra especialmente en las líneas de transmisión de alta tensión con capacitancias elevadas y en donde se pueden presentar corrientes a tierra de gran magnitud por descargas atmosféricas.

2.4 ATERRIZAMIENTO DEL NEUTRO DE SISTEMAS DE POTENCIA.-

En un sistema de potencia el aterrizamiento del neutro, se lo realiza con el propósito de que tanto las corrientes a tierra como las sobretensiones que se pueden producir cuando ocurra una falla a tierra en el sistema, éstas puedan ser limitadas y de esta forma no constituyen peligro alguno para los diferentes equipos del sistema de potencia.

En el sistema de generación cuando se tiene que el neutro del generador se encuentra aislado de tierra, al producirse una falla a tierra, se dice que no

existe retorno de la corriente de falla a tierra al generador a través del neutro, esto hace que la corriente de falla sea muy pequeña pero en cambio los voltajes de las fases no falladas se incrementan debido a que el generador se encuentra acoplado a tierra, por medio de las capacitancias a tierra de las fases no falladas.

En general al igual que el sistema de generación en los sistemas de transmisión, subtransmisión y distribución, la importancia del aterrizamiento del neutro se debe a que:

- Se puede limitar los sobrevoltajes transientes
- Limitación en las corrientes de falla
- Mayor coordinación inductiva; lo cual hace que se tenga menos disturbios en los sistemas de comunicación próximos.
- Se obtiene una buena sensibilidad y selectividad de los relés, logrando con esto aislar la parte fallada del resto del sistema.

2.4.1 Principios fundamentales de aterrizamiento de sistemas.-

En los sistemas de potencia, el gran objeti-

vo es seleccionar el tipo de aterrizamiento del neutro, de tal forma se asegure el mejor entendimiento de las ventajas y desventajas de los varios métodos.

Un gran número de factores deben ser tomados en cuenta para la selección de cualquiera de los métodos de aterrizamiento del neutro. Individualmente cada uno de los métodos no pueden ser considerados en términos económicos, sin un análisis técnico previo.

Los sistemas de potencia pueden fijar su neutro a la malla de tierra de diferentes maneras:

- Directamente
- A través de resistencia
- A través de reactor
- A través de neutralizador de falla a tierra
- A través de transformadores de distribución con resistencia en el devanado secundario.
- A través de un banco de transformadores de puesta a tierra (conexión estrella aterrizada-delta).

2.4.2 Sistema de distribución aterrizado.-

La fijación a tierra en el sistema de distribución, se hace en el lado de baja tensión de las subestaciones de reducción, para lo cual se utiliza cualquiera de los diversos métodos de aterrizamiento antes mencionados.

En el sistema Guayaquil se fija directamente a tierra en las subestaciones que tienen transformador con conexión delta-estrella, y en las que tienen transformador con conexión estrella-delta; se trata de crear un neutro ficticio a través de un banco de transformadores de distribución, conectado en el lado de alta tensión en estrella aterrizada y el lado de baja tensión en delta, y de esta manera conseguir que los relés de protección sean sensibles y sensitivos cuando exista un contacto a tierra de una de las fases.

2.4.3 Razones para la puesta a tierra del sistema de distribución.-

La importancia de la puesta a tierra del sis

tema de distribución se debe en especial a que:

- Se limita las corrientes de corto circuito debido a una falla a tierra.
- Se consigue una buena sensibilidad y selectividad de los relés de protección, en el caso de producirse una falla a tierra.
- Se disminuye las perturbaciones en los circuitos de comunicación que se encuentran próximos.
- Se limitan los sobrevoltajes presentados al producirse una falla a tierra.

2.4.4 Métodos aconsejables de puesta a tierra para el sistema de distribución.-

Los sistemas de distribución tienen diversas formas de aterrizamiento:

- Conectado a través de alta resistencia

- Conectado a través de baja resistencia
- Conectado directamente a tierra

La conexión a través de alta resistencia se lo hace generalmente, cuando se quiere limitar la corriente de falla a tierra a valores muy bajos, para que no causen daño a los equipos, y lo suficiente para compensar a la corriente de carga del circuito capacitivo, para de esta manera impedir la formación de sobrevoltajes transitorios.

La conexión a través de una resistencia baja, de la misma manera permite limitar la corriente de falla a un valor lo suficientemente grande, para que los relés operen confiablemente, y se interrumpan los circuitos afectados.

En los sistemas de distribución la conexión directa a tierra, es la más empleada, la misma que se le hace en el neutro del devanado en estrella del transformador que alimenta al sistema. Con esta conexión se logra que la corriente de falla a tierra sea lo más

grande posible, para de esta manera facilitar su detección y la protección de los circuitos afectados.

2.4.5 Efectos del aterrizamiento del neutro.-

El método de aterrizamiento del neutro afecta considerablemente en la magnitud de los sobrevoltajes.

El neutro aislado presenta graves inconvenientes, por las sobretensiones y la extinción del arco a tierra, que se dan lugar cuando se produce una falla a tierra.

Los sistemas que tienen el neutro directamente aterrizados son más probables a tener sobrevoltajes de menor magnitud, que aquellos que utilizan otro método de aterrizamiento.

CAPITULO III

EFFECTOS POR FALLAS A TIERRA

3.1 INTRODUCCION.-

Actualmente con el uso de tensiones cada vez más elevadas para la transmisión de energía en los sistemas de potencia, el problema de fenómenos transitorios, como fallas a tierra traen como consecuencia la presencia de tensiones muy elevadas en las fases no falladas, y si éstas sobrepasan los valores para los cuales los aisladores de la línea, o los aislantes de los arrollamientos están diseñados, pueden producir averías muy graves.

Los casos de sobretensiones transmitidas desde la línea de alta tensión, son más frecuentes, pudiendo hacerse inofensivas, por la simple conexión a tierra del neutro del transformador o mediante pararrayos de descarga. Es de vital importancia evitar la transmisión de las sobretensiones del lado de alta al de baja tensión.

Fallas o cortocircuitos pueden ocurrir sobre el sistema de potencia por muchas razones, y por causa de la magnitud de la corriente de cortocircuito se producen grandes caídas de voltaje en todo el sistema.

Fallas sobre el sistema de subtransmisión, causan una caída de voltaje en las barras adyacentes al punto de falla, así como a las barras de baja tensión de las subestaciones. Esta caída de voltaje afecta a los diferentes tipos de consumidores, que están conectados al sistema.

3.1.1 Corriente por diseño de sistemas aterrizados

Cuando el neutro de las estaciones de alto voltaje van a ser aterrizadas, es necesario conocer el valor real de la corriente de falla, la misma que sirve para la determinación de:

- a) El tamaño del conductor de aterrizamiento
- b) El paso y transferencia de potencial a tierra.

Para determinar el tamaño del conductor de aterrizamiento es necesario conocer la máxi-

ma corriente que puede fluir en cualquier sección del sistema de aterrizamiento, y para evaluar el potencial la máxima corriente que puede ser descargada a tierra por el sistema de aterrizamiento.

I_c = Máxima corriente que pueda fluir en cualquier sección del sistema de aterrizamiento.

I_G = Máxima corriente que puede ser descargada a tierra por el sistema de aterrizamiento.

La falla de línea a tierra es considerada en el mayor de los casos, como la que da origen a la más alta corriente de secuencia cero. La corriente total de falla retorna al sistema por varios caminos. Solamente la corriente que fluye a la tierra a través del sistema de aterrizamiento de la estación, constituye la corriente I_G .

La localización de la falla, la cual produce la máxima corriente I_c e I_G , puede ser en el

lado de alto voltaje o en el lado de bajo voltaje de la estación transformadora. Esto puede ser en uno u otro lado, en el interior o afuera de la estación sobre una línea de transmisión.

Cuando la falla se produce en el interior de la estación, la corriente suministrada a la falla por el transformador local circula en la estación por sí misma y no forma parte de IG, mientras que la corriente suministrada a la falla a través de la línea de transmisión retorna al sistema a través del aterrizamiento del sistema y tierra, o por medio del hilo de guarda de las líneas de transmisión.

Cuando la falla se produce fuera de la estación, la corriente suministrada a la falla a través de la línea de transmisión desde la siguiente estación, tiene insignificante contribución a IG.

La componente de la corriente de falla, suministrada por el transformador local, retorna al sistema a través de:

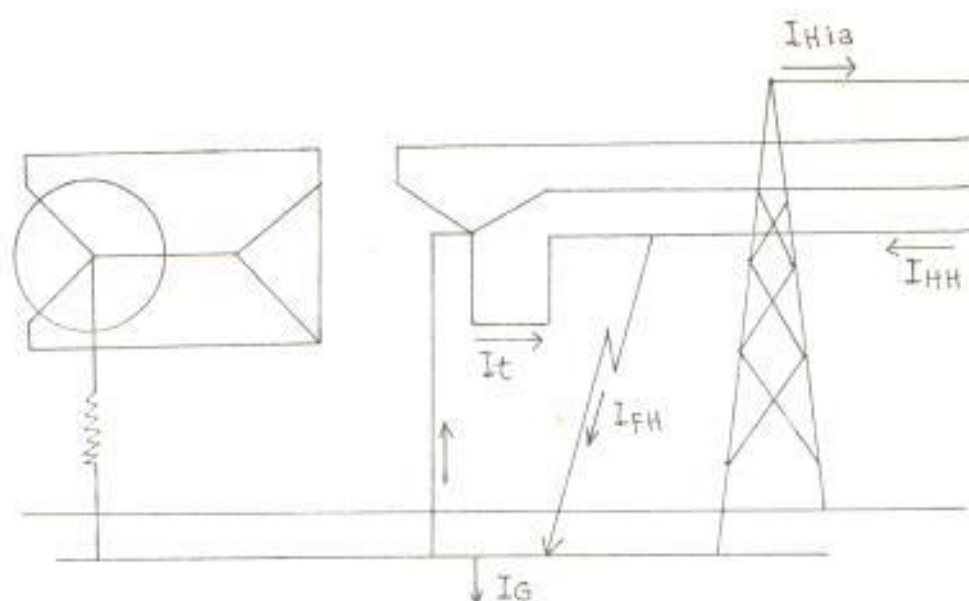
- 1) Cables a tierra sobrecargados, los cuales tienen conexión al neutro a través de la estructura metálica de la estación.

- 2) La base de la torre y el sistema de aterrizamiento de la estación.

La corriente que fluye a través de la torre y el sistema de aterrizamiento constituye la corriente IG.

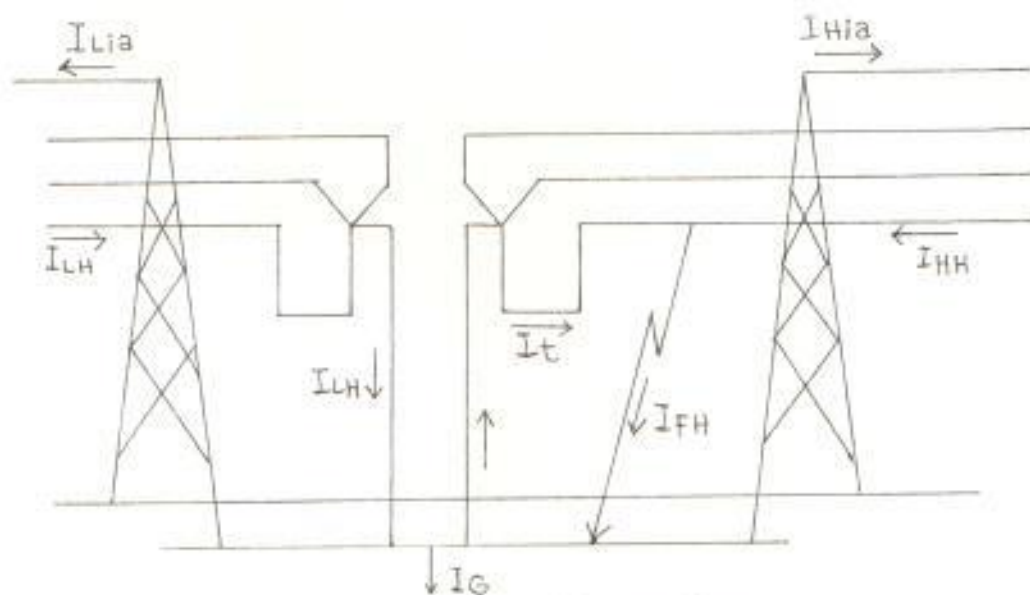
Si la falla se produce cerca de la estación, la mayor parte de la corriente suministrada por la estación, retorna a través de los cables a tierra sobrecargados, y si la falla se produce lejos de la estación, la magnitud de la corriente suministrada por la estación es menor, debido a la impedancia de la línea.

La Figura 3.1 literales a, b, c, d y e, muestran la componente de la corriente de falla de línea a tierra en varios caminos, por falla sobre el lado de alto voltaje del transformador, en diferentes tipos de subestaciones.



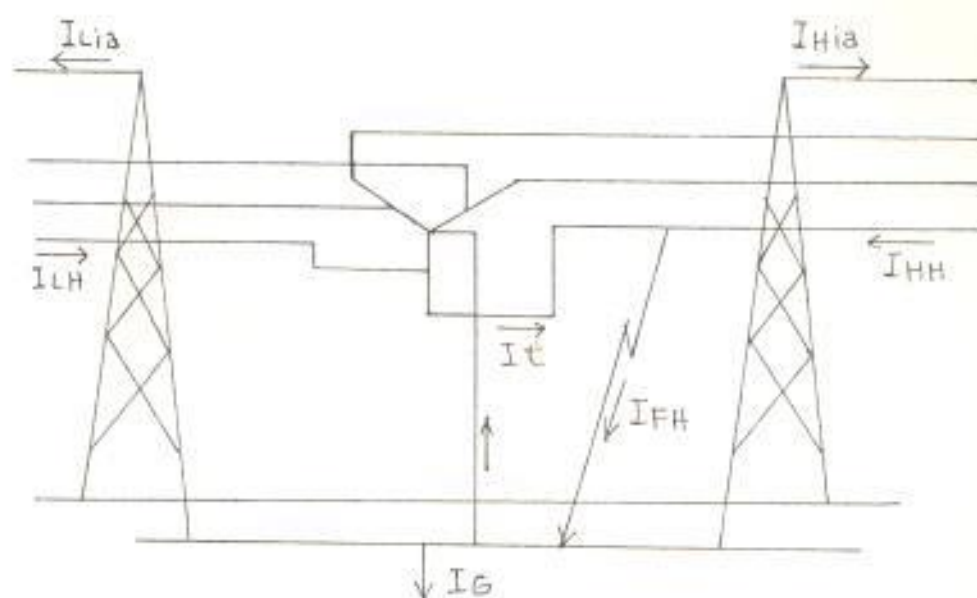
$$I_G = I_{H1H} - I_{H1a}$$

FIGURA 3.1 a).- SUBESTACION ELEVADORA CONEXION DELTA-ESTRELLA ATERRIZADA.



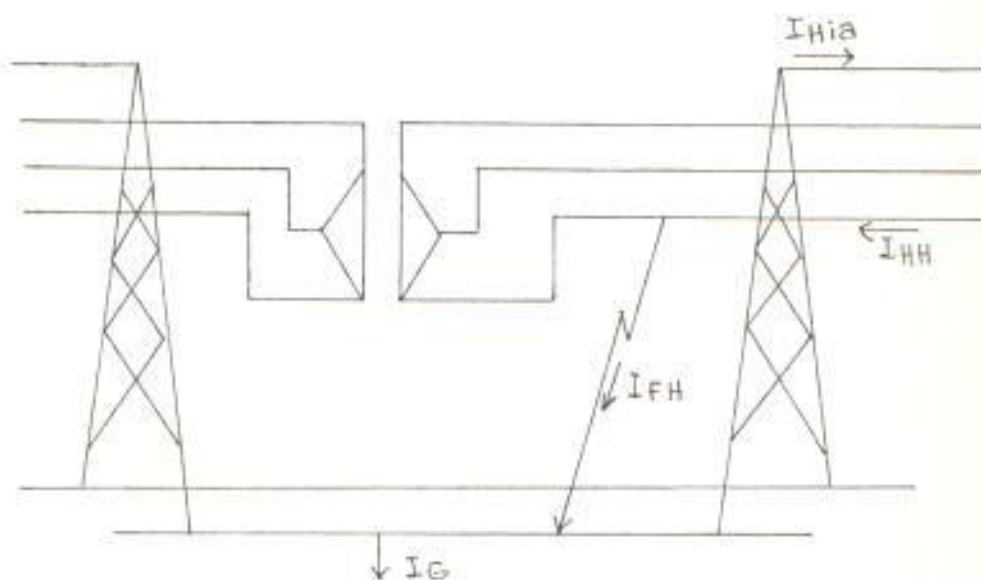
$$I_G = I_{H1H} + I_{L1H} - I_{H1a} - I_{L1a}$$

FIGURA 3.1 b).- SUBESTACION INTERMEDIA CONEXION ESTRELLA ATERRIZADA-ESTRELLA ATERRIZADA.



$$I_G = I_{HH} + I_{LH} - I_{Hia} - I_{Lia}$$

FIGURA 3.1 c).- SUBSTACION INTERMEDIA CONEXION CON AUTOTRANSFORMADOR.



$$I_G = I_{HH} - I_{Hia}$$

FIGURA 3.1 d).- SUBSTACION INTERMEDIA CONEXION DELTA-DELTA.

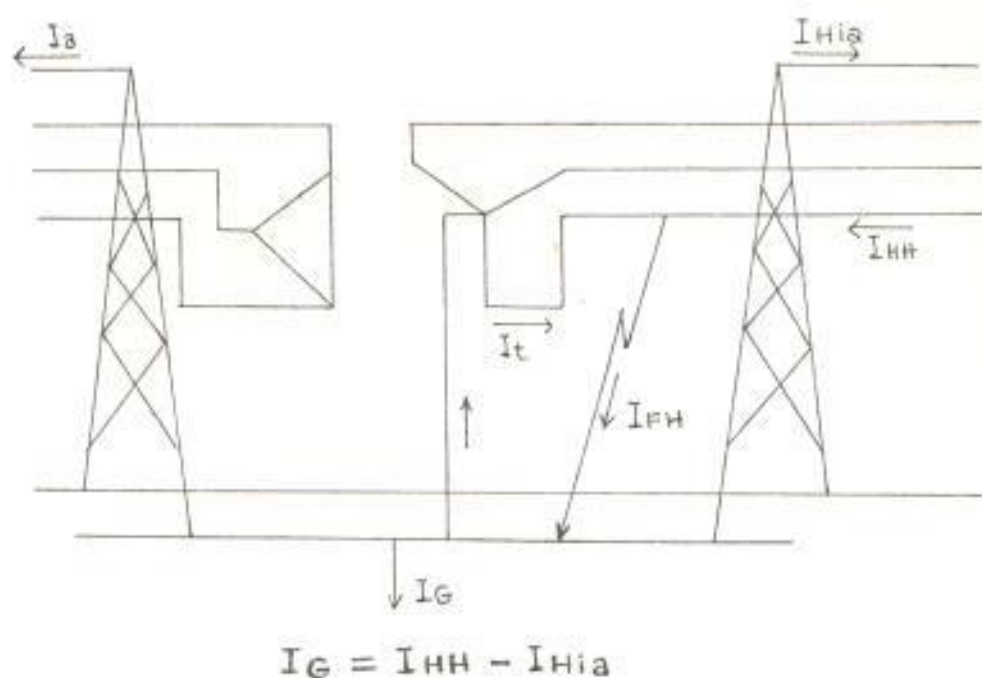


FIGURA 3.1 (e),- SUBESTACION INTERMEDIA CONEXION DELTA-ESTRELLA ATERRIZADA.

Las notaciones usadas para las corrientes mostradas en la Figura 3.1 a, b, c, d, e, representan:

$$I_{HIa} = I_{HI} + I_a$$

$$I_{LIa} = I_{LI} + I_a$$

I_{HI} = Corriente en los hilos de guarda de las líneas de alto voltaje, debido a inducción.

- I_{Li} = Corriente en los hilos de guarda de las líneas de bajo voltaje.
- I_a = Corriente derivada desde la estación a través de los hilos de guarda de todas las líneas de transmisión, por conducción.
- I_{FH} = Corriente de falla total, por falla sobre el lado de alto voltaje del transformador.
- I_{HH} = Corriente alimentada a la falla desde otra estación, por las líneas de alto voltaje.
- I_{LH} = Corriente alimentada a la falla desde otra estación por las líneas de bajo voltaje.
- I_t = Corriente suministrada por el transformador local.

El máximo valor de la corriente I_c es la corriente total de falla, y el máximo valor de la corriente I_G está dado por la suma en amperios de las corrientes suministradas por otras estaciones a través de las líneas de transmisión a tierra menos la corriente sobre los hilos de guarda de las líneas de transmisión debido a inducción y conducción.

3.1.2 Resonancia de sistemas aterrizados.-

Debido al aterrizamiento del neutro por medio de un reactor o de un neutralizador de falla a tierra, en el momento que se produce una falla a tierra fluye una corriente reactiva en retraso desde el reactor y desde allí a tierra, pero al mismo tiempo fluye una corriente capacitiva en adelanto desde la línea a tierra.

Tanto la resistencia de aislamiento de las líneas y de los dieléctricos, como las pérdidas propias de la bobina, hacen que el retraso y el adelanto no sean exactamente de noventa grados, por lo que las corrientes compuestas dan una corriente resultante residual.

La bobina de inducción está en resonancia cuando la reactancia inductiva de la bobina es igual a la reactancia capacitiva de la línea, es decir que la componente capacitiva de la corriente de tierra se compensa completamente por la corriente inductiva del reactor, de modo que solo subsiste la corriente

residual en el lugar de la falla a tierra.

La Figura 3.2 muestra el diagrama vectorial de las corrientes y tensiones, cuando el neutro está conectado a tierra por un reactor en resonancia, tomando en cuenta la resistencia de las pérdidas por defecto de aislamiento de la red y la resistencia del reactor.

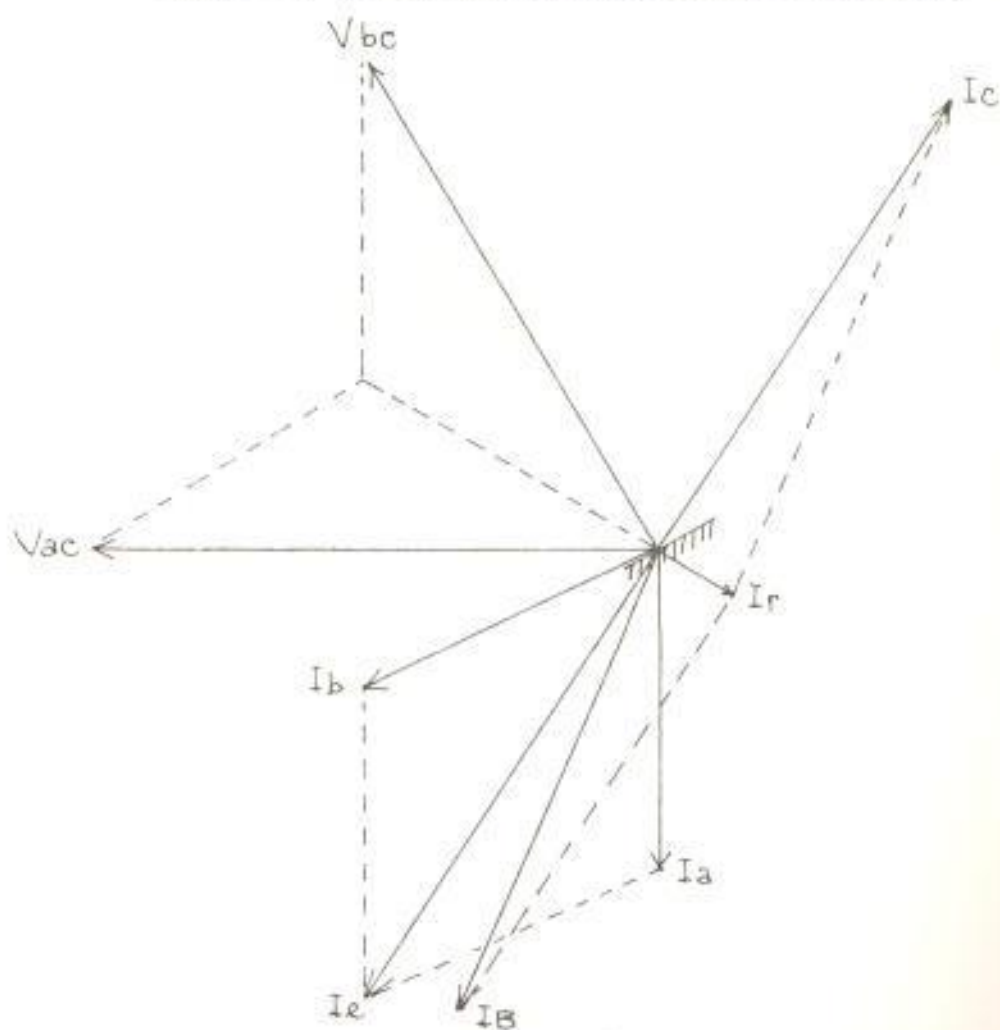


FIGURA 3.2.- DIAGRAMA VECTORIAL DE TENSIONES Y CORRIENTES EN UNA RED TRIFASICA PROTEGIDA CON FALLA A TIERRA EN LA FASE C PARA EL CASO DE RESONANCIA.

La resonancia causa tensiones que pueden adquirir valores extraordinariamente elevados, constituyendo por tanto una sobretensión. Para realizar un estudio de estas sobretensiones de resonancia se parte de un circuito que tenga a una resistencia ohmica en serie con una inductancia y una capacidad; luego la tensión normal del circuito está expresada por:

$$V = I \sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2} \quad (3.1)$$

V = Tensión normal del circuito

Si variamos la frecuencia de tal manera que se obtenga:

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

de donde:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

y se tiene que f_0 es la frecuencia de resonancia, la misma que coincide con la frecuencia propia del sistema.

La tensión de autoinducción vale:

$$V_L = 2\pi f_0 L I = 2\pi L I \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} = I \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Y la tensión del condensador:

$$V_C = \frac{1}{2\pi f_0 C} I = \frac{I}{2\pi C \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{C}{L}}} I = I \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Es decir que en resonancia las tensiones de autoinducción y del condensador son iguales:

$$V_S = V_L = V_C = I \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Donde V_S es la tensión de resonancia

Para resonancia de la fórmula 3.1 se tiene que:

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

Cuyo valor es muy elevada ya que depende solamente de la resistencia y como las tensiones del condensador y de autoinducción son proporcionales a la intensidad, estas son también elevadas.

El factor de sobretensión está dado por:

$$K_s = \frac{V_s}{V}$$

Reemplazando se tiene:

$$K_s = \frac{I \sqrt{\frac{L}{C}}}{IR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Por lo tanto se produce sobretensión solamente en el caso que:

$$\frac{1}{R} < \sqrt{\frac{L}{C}}$$

3.1.3 Influencia de las pérdidas a tierra por defecto de aislamiento y por otra clase de aislamiento.-

Las pérdidas por defecto de aislamiento en las líneas, en las resistencias de paso en el punto de la falla a tierra y en los hilos de tierra, en la bobina de extinción (reactor) y en los transformadores, necesitan para ser compensados una corriente activa. Esta corriente no puede compensarse o eliminarse, aún cuando la corriente reactiva del reactor, esté completamente compensada. Se indicó anteriormente que a esta corriente se lo llama residual, cuyo valor es variable para una red determinada, porque las pérdidas por defecto de aislamiento varían con las condiciones meteorológicas.

La corriente residual oscila para las redes aéreas entre el 4 y el 15% de la corriente de tierra aproximadamente.

3.1.4 Disonancia.-

Cuando la componente reactiva de la corriente de tierra no está completamente compensada, circula en el punto de contacto a tierra además de la corriente residual activa una corriente residual reactiva, que puede ser inductiva o capacitiva si la inductancia de la bobina es más pequeña o más grande que la correspondiente a la resonancia. Se dice en este caso que la bobina está en disonancia.

La Figura 3.3 muestra el diagrama vectorial de las corrientes y tensiones, cuando se produce una falla a tierra en la fase c tomando en cuenta las pérdidas indicadas anteriormente.

El grado de disonancia en tanto por ciento está dado por:

$$E = \frac{X_c - X_b}{X_b} \times 100$$

El mismo que puede ser nulo, positivo o negativo. Es nulo cuando la bobina está en resonancia y positiva o negativa para la disonancia.

La disonancia dificulta la extinción de los arcos a tierra, sin embargo, dicha extinción se asegura casi siempre hasta valores de la disonancia del 30 por ciento.

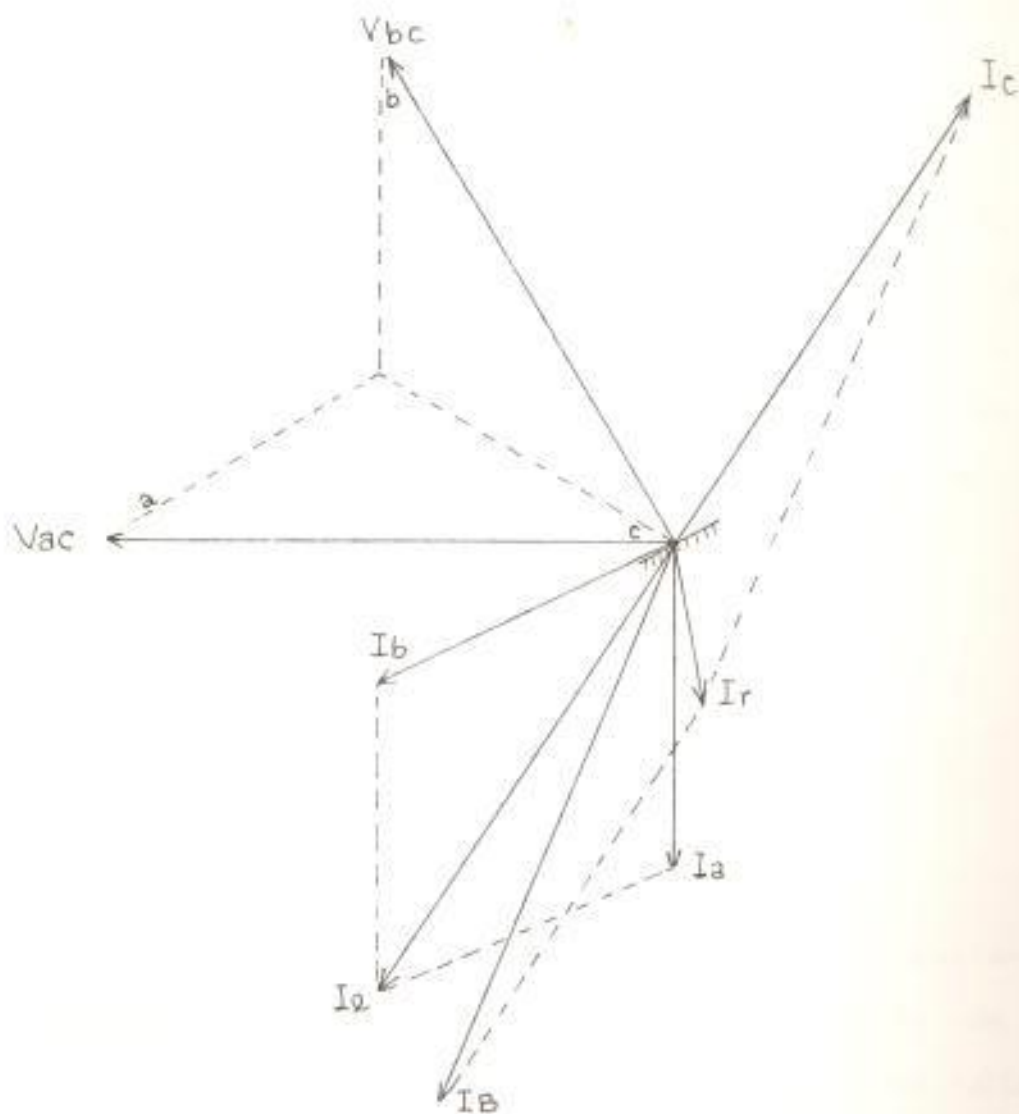


FIGURA 3.3.- DIAGRAMA VECTORIAL DE TENSIONES Y CORRIENTES EN UNA RED TRIFÁSICA PROTEGIDA CON FALLA A TIERRA EN LA FASE C.PARA EL CASO DE DISONANCIA.

3.2 EFECTOS DE SISTEMAS ATERRIZADOS SOBRE VOLTAJE LINEA A TIERRA DURANTE FALLA.-

El aterrizamiento del neutro del sistema produce efecto en los voltajes de línea a tierra, cuando se produce una falla de línea a tierra.

Si se tiene un sistema con el neutro aterrizado directamente como se indica en la Figura 3.4 a). Cuando existe una falla de línea a tierra en la Fase A, existe un colapso completo de voltaje en esta fase. La fase A y el neutro permanecen al potencial de tierra.

Los voltajes de fase a tierra en las fases B y C, permanecen inalterados de la condición normal de operación, como se indica en la Figura 3.4 c).

Conectando el neutro a tierra a través de una resistencia o un reactor, para limitar la corriente de falla como se indica en la Figura 3.5 a). Una falla de línea a tierra en la fase A, produce el desplazamiento del neutro con respecto a tierra, por causa de la caída de voltaje en la resistencia.

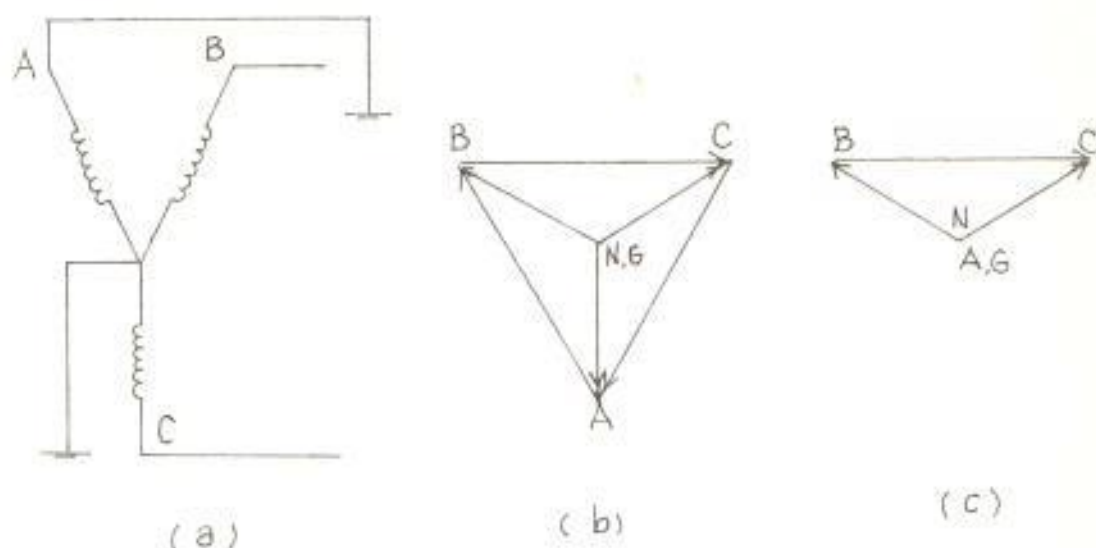


FIGURA 3.4.- VOLTAJES DE LÍNEA A TIERRA DURANTE FALLA DE LA FASE "A" A TIERRA, NEUTRO ATERRIZADO DIRECTAMENTE.

Los voltajes de línea a tierra de las fases B y C, son ahora más altos que durante el sistema de operación, como se indica en la Figura 3.5 c).

Si el neutro del sistema anterior está aislado, con la asunción de que la capacitancia entre líneas y desde línea a tierra son balanceadas, hace que el neutro coincida con tierra.

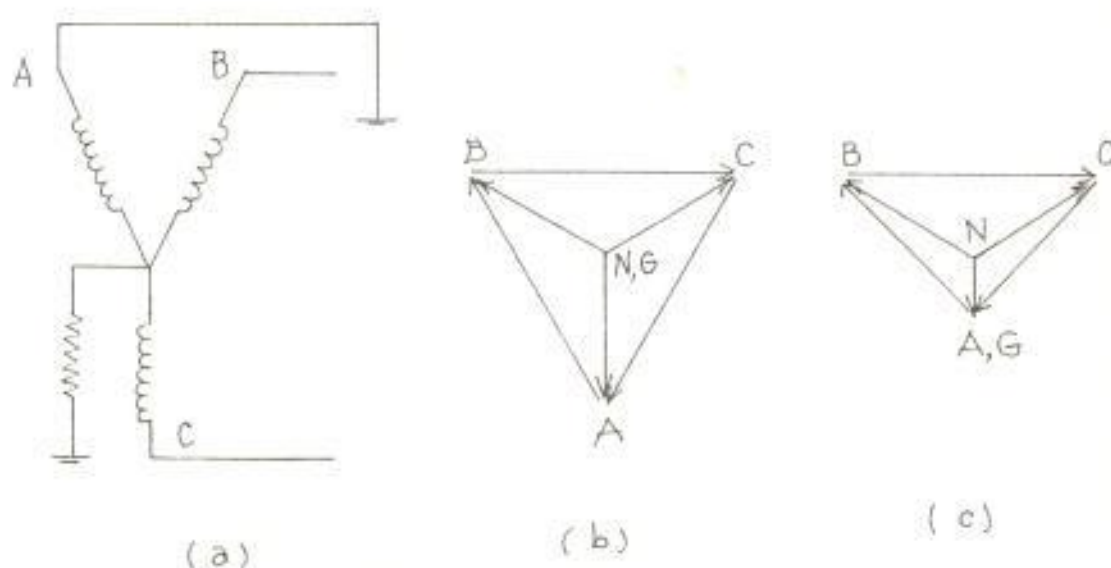


FIGURA 3.5.- VOLTAJES DE LÍNEA A TIERRA DURANTE FALLA DE LA FASE "A" A TIERRA CON RESISTENCIA EN EL NEUTRO.

Una falla a tierra sobre la fase A, desplaza el potencial de esta fase a tierra, y los voltajes de línea a tierra en las fases B y C son iguales al voltaje línea a línea del sistema durante operación normal, como se indica en la Figura 3.6 c).

3.2.1 Voltajes transientes y aterrizamientos prácticos.-

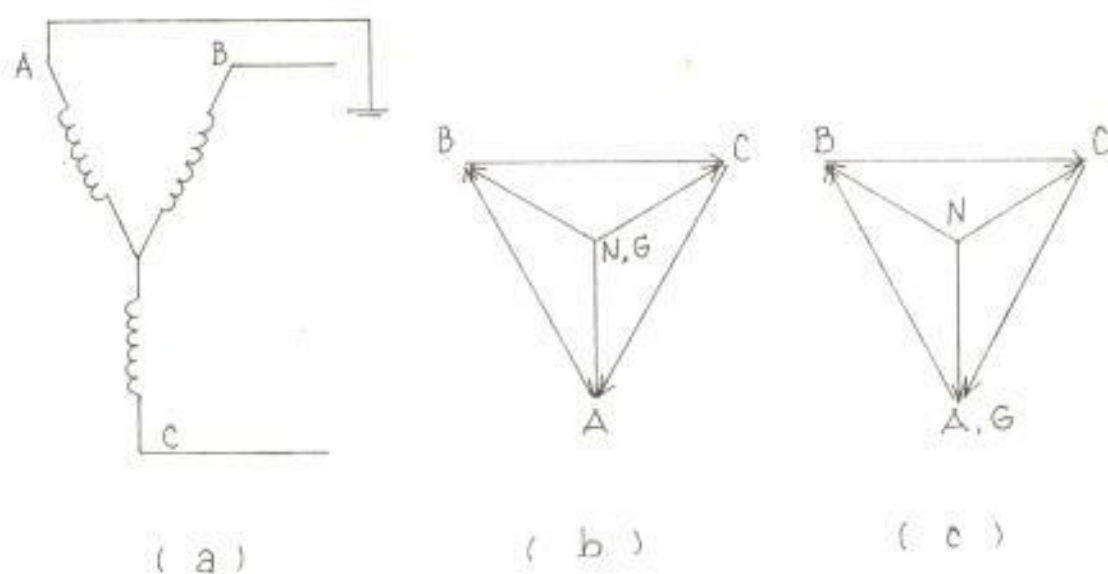


FIGURA 3.6.- VOLTAJES DE LÍNEA A TIERRA DURANTE FALLA DE LA FASE "A" A TIERRA CON EL NEUTRO AISLADO.

Los aterrizamientos del neutro de los generadores y transformadores, afectan en los voltajes transientes ocasionados por una falla de línea a tierra.

Para comparar los efectos del aterrizamiento por medio de una resistencia y por medio de un reactor en los sobrevoltajes transientes,

se utilizan las curvas de las figuras 3.7 y 3.8.

En las Figuras 3.7 y 3.8, se nota que voltajes transientes, no exceden del doble de los voltajes de frecuencia fundamental, con cualquiera de los dos métodos de aterrizamiento:

Los voltajes experimentados en sistemas aterrizados con resistencia son generalmente más altos que aquellos que corresponden a sistemas aterrizados con reactancia. Esto es particularmente verdad si los ohmios de aterrizamiento del neutro son seleccionados para dar el mismo valor de corriente de cortocircuito.

Para valores altos en ohmios de la impedancia de aterrizamiento del neutro, los voltajes transientes pueden ser más grandes para sistemas aterrizados por reactancia que por resistencia. Para valores bajos en ohmios, la componente de voltaje a frecuencia natural, para sistemas aterrizados por resistencias decrece y llega a ser insignificante para valores de:

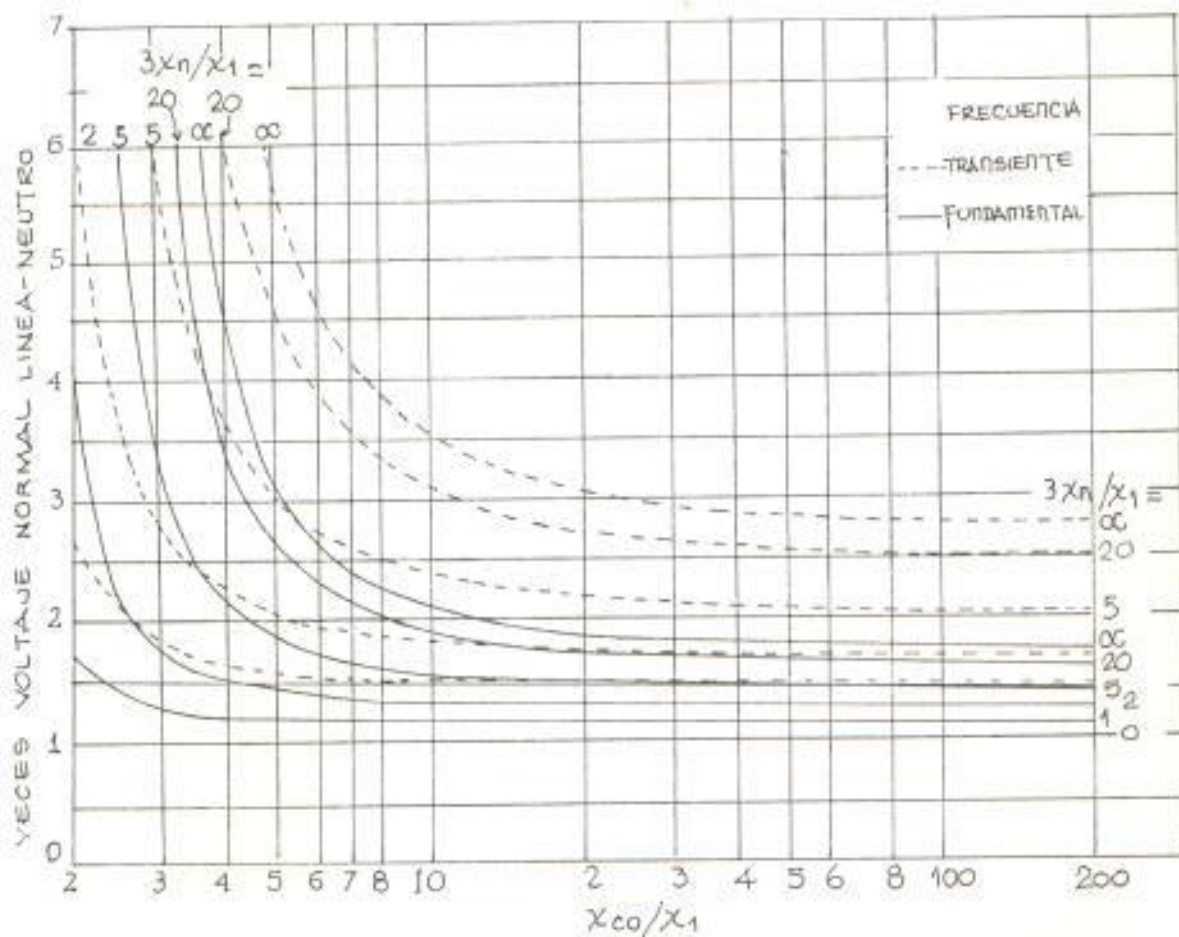


FIGURA 3.7.-

VOLTAJE A TIERRA DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL Y TRANSIENTE EN LAS FASES NO FALLADAS, CON REACTANCIA EN EL NEUTRO.

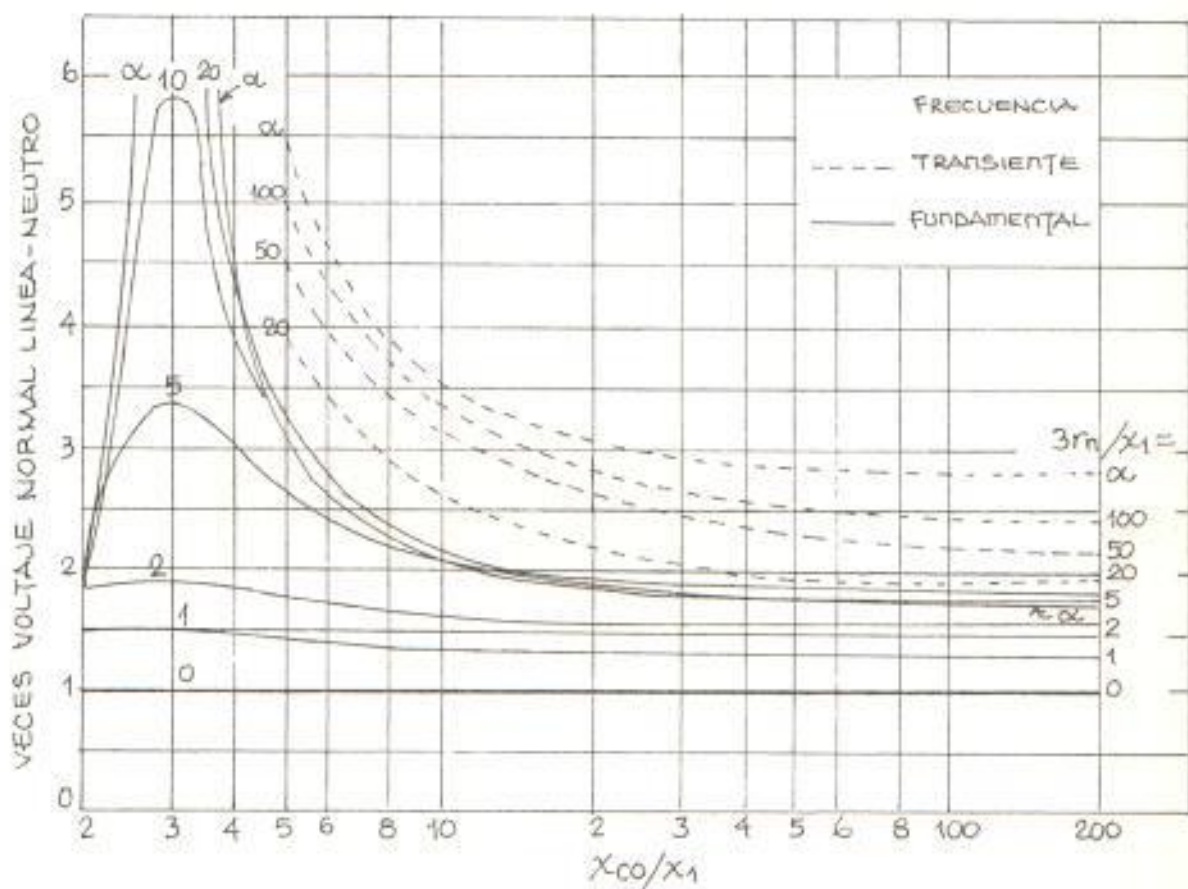


FIGURA 3.8.- VOLTAJE A TIERRA DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL Y TRANSIENTE EN LAS FASES NO FALLADAS, CON RESISTENCIA EN EL NEUTRO.

$$\frac{3 r_n}{X_1} < 5$$

En conexión con la impedancia de aterrizamiento del neutro, los voltajes del neutro son de importancia, por tanto las Figuras 3.9 y 3.10, muestran los máximos voltajes transientes como también los voltajes de frecuencia fundamental en el neutro.

No se obtienen altos voltajes en el neutro excepto en sistemas que tienen relativamente una gran cantidad de líneas conectadas en proporción a la reactancia inductiva de frecuencia positiva.

3.3.2 Sobrevoltajes transientes.-

Los sobrevoltajes transientes o transitorios son aquellos que se presentan, cuando ocurre una falla, conexión o desconexión de un circuito.

Cuando se tiene un cortocircuito en un siste

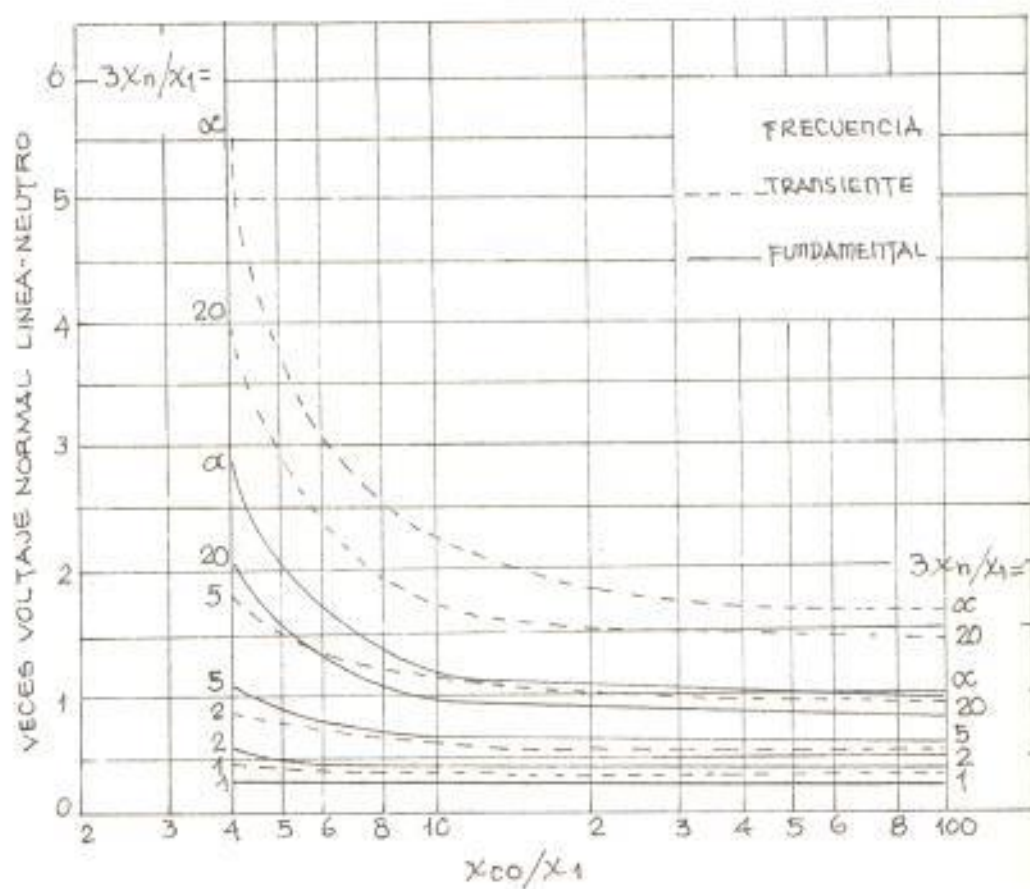


FIGURA 3.9.- VOLTAJE A TIERRA DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL Y TRANSIENTE EN EL NEUTRO, CON REACTANCIA EN EL NEUTRO.

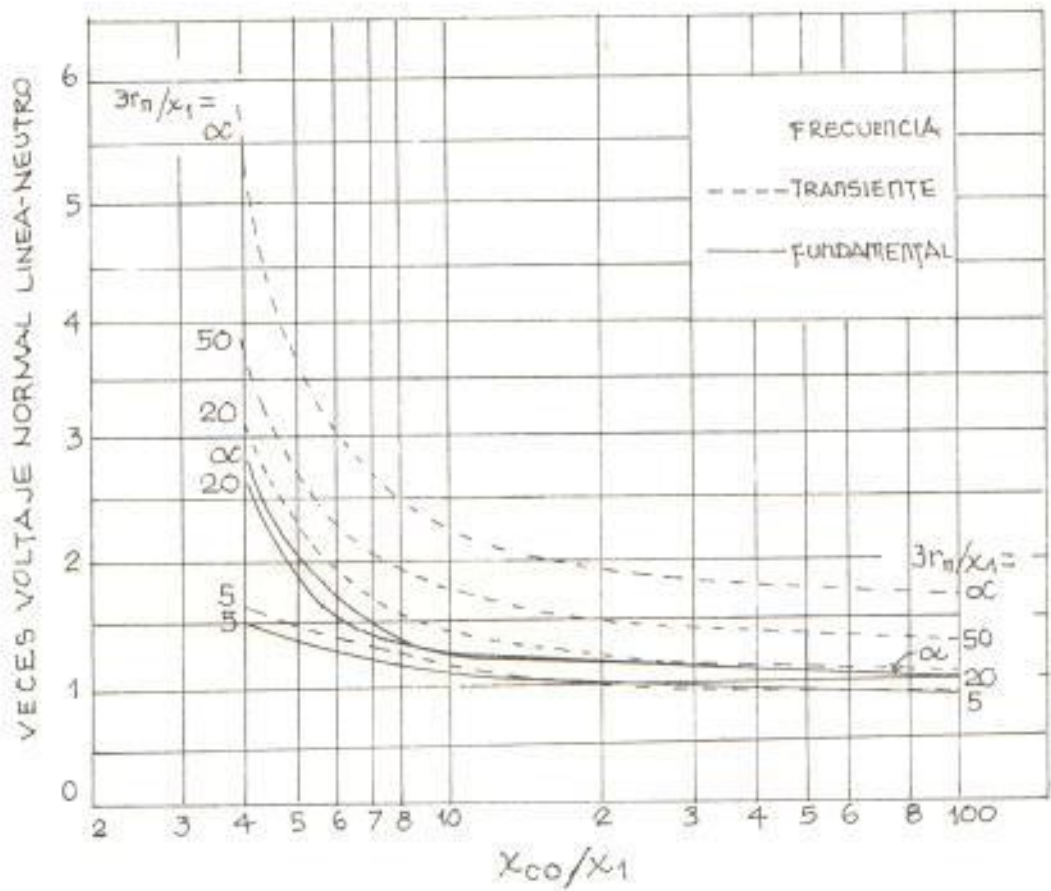


FIGURA 3.10.- VOLTAJE A TIERRA DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL Y TRANSIENTE EN EL NEUTRO, CON RESISTENCIA EN EL NEUTRO.

ma eléctrico, debido a una falla de aislamiento, se produce cambios de las corrientes y voltajes del sistema.

Estos cambios dependen del lugar de la falla y las características del sistema eléctrico. Este cambio va acompañado de un período transitorio de corta duración.

Se distinguen dos componentes en los sobrevoltajes causados por cortocircuito :

- Una componente de frecuencia fundamental (cincuenta o sesenta ciclos generalmente);
y
- Una componente de frecuencia igual a la frecuencia natural del sistema.

La magnitud que tenga los sobrevoltajes de frecuencia fundamental, depende del tipo de falla. Las fallas de dos fases a tierra y las de una fase a tierra, causan sobrevoltajes en las fases que no han fallado; siendo la falla de una fase a tierra la que presenta sobrevoltajes de mayor magnitud.

Los sobrevoltajes en las fases no falladas son función de las reactancias de secuencia positiva y secuencia **cero** y partiendo del análisis realizado en el literal 5 del Anexo A, se tiene que para una falla de una fase a tierra las redes de secuencia se conectan en serie (figura A.10), del análisis de componentes simétricas se llega a los siguientes resultados:

$$I_{a_1} = I_{a_2} = I_{a_0} = \frac{E_g}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$V_{a_0} = - Z_0 I_{a_0}$$

$$V_{a_2} = - Z_2 I_{a_0}$$

$$V_{a_1} = E_g - Z_1 I_{a_1}$$

De donde:

$$V_{a_1} = E_g \left(\frac{Z_2 + Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \right)$$

Los voltajes entre fases son:

$$V_a = 0 \quad (\text{Fase fallada a tierra})$$

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

$$V_b = -Z_0 I_{a1} + a^2 (E_g - Z_1 I_{a1}) + a (-Z_2 I_{a1})$$

$$V_b = a^2 E_g - I_{a1} (Z_0 + a^2 Z_1 + a Z_2)$$

$$V_b = E_g \left(a^2 - \frac{Z_0 + a^2 Z_1 + a Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \right)$$

Generalmente: $Z_1 = Z_2$

$$V_b = E_g \left(a^2 - \frac{Z_0 + (a^2 + a) Z_1}{Z_0 + 2Z_1} \right)$$

$$V_b = E_g \left(a^2 - \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + 2Z_1} \right)$$

Dividiendo para Z_0 el cociente:

$$V_D = E_g \left(a^2 - \frac{1 - \frac{Z_1}{Z_0}}{1 + 2 \frac{Z_1}{Z_0}} \right)$$

$$V_D = E_g \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1 - \frac{Z_1}{Z_0}}{1 + 2 \frac{Z_1}{Z_0}} \right)$$

El voltaje en la fase C:

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

$$V_C = Z_0 I_{a0} + a(E_g - Z_1 I_{a1}) - a^2 Z_2 I_{a2}$$

$$V_C = aE_g - I_{a1} (Z_0 + aZ_1 + a^2 Z_2)$$

$$V_C = E_g \left(a - \frac{Z_0 + aZ_1 + a^2 Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \right)$$

$$V_C = E_g \left(a - \frac{Z_0 + (a + a^2) Z_1}{Z_0 + 2Z_1} \right)$$

Dividiendo para Z_0 el cociente:

$$V_c = E_g \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1 - \frac{Z_1}{Z_0}}{1 + 2 \frac{Z_1}{Z_0}} \right)$$

Para el estudio de una falla de línea a tierra se consideran solamente la reactancia inductiva de cada una de las redes de frecuencia, y para el caso en que se trate de determinar los sobrevoltajes se considera también la reactancia capacitiva en el punto de falla.

$$V_b = E_g \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1 - \frac{X_1}{X_0}}{1 + 2 \frac{X_1}{X_0}} \right) \quad (3.2)$$

$$V_b = E_g \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{X_0 - X_1}{X_0 + 2X_1} \right)$$

Dividiendo para X_1 el cociente:

$$V_b = E_g \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\frac{X_0}{X_1} - 1}{\frac{X_0}{X_1} + 2} \right) \quad (3.3)$$

Análogamente para V_c :

$$V_c = E_g \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\frac{X_0}{X_1} - 1}{\frac{X_0}{X_1} + 2} \right) \quad (3.4)$$

La forma de conexión a tierra del neutro afecta en los voltajes siguientes a una falla a tierra, en las fases no falladas; por consiguiente:

a) Neutro aislado de tierra.-

Para casos de neutro aislado se puede tener valores de $\frac{X_0}{X_1} = -2$, y utilizando

las fórmulas (3.3) y (3.4) se tiene que:

$$V_b = E_g \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{-2 - 1}{-2 + 2} \right)$$

$$V_b \rightarrow \infty$$

$$V_c = E_g \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{-2 - 1}{-2 + 2} \right)$$

$$V_c \rightarrow \infty$$

Por lo que para esta relación de reactancias los voltajes en las fases no falladas tienden a ser muy grandes.

b) Neutro aterrizado por medio de una reactancia.-

Para $\frac{X_0}{X_1} < 4$ el efecto es capacitivo y se tiene voltajes muy elevados. Prácticamente se usan relaciones de X_0/X_1 iguales a 4 hasta 10, para limitaciones de corriente.

De acuerdo a las fórmulas (3.3) y (3.4) se tiene para :

$$\frac{X_0}{X_1} = 4$$

$$V_b = E_g (-1 - j \frac{\sqrt{3}}{2})$$

$$|V_b| = 1.13 E_g$$

$$|V_c| = 1.13 E_g$$

$$\text{Para } \frac{X_0}{X_1} = 10$$

$$V_D = E_g \left(-\frac{5}{4} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$|V_D| = 1.52 E_g$$

$$|V_C| = 1.52 E_g$$

c) Neutro aterrizado por medio de resistencia.-

Depende de el valor que debe tener la resistencia para limitar la corriente de falla a tierra por lo tanto.

$$V_D = E_g \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\frac{Z_0}{Z_1} - 1}{\frac{Z_0}{Z_1} + 2} \right)$$

$$Z_0 = X_{g0} + 3R_n$$

$$V_b = E_g \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\frac{Z_0}{Z_1} - 1}{\frac{X_{EO}}{X_1} + 2 + 3 \frac{R_n}{X_1}} \right)$$

$$V_c = E_g \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\frac{Z_0}{Z_1} - 1}{\frac{X_{EO}}{X_1} + 2 + 3 \frac{R_n}{X_1}} \right)$$

d) Neutro directamente aterrizado.-

Se considera directamente aterrizado si

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 3; \quad \frac{R_0}{X_1} \leq 1$$

$$V_b = E_g \left(-\frac{9}{10} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$|V_b| = 1.25 E_g$$

$$|V_c| = 1.25 E_g$$

e) Neutro aterrizado con neutralizador de falla a tierra.-

Para este sistema de aterrizamiento se tiene:

$$X_L = X_C$$

$$j\omega L = \frac{j}{\omega C}$$

$$X_0 = \frac{(j\omega L) \left(-\frac{j}{\omega C}\right)}{j\omega L - \frac{j}{\omega C}}$$

Utilizando la fórmula (3.2):

$$V_D = \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1 - \frac{X_1}{X_0}}{1 + 2 \frac{X_1}{X_0}} \right) E_g$$

Tomando $\lim X_0$

$$V_D = \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{1} \right) E_g$$

$$V_D = \left(-\frac{3}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) E_g$$

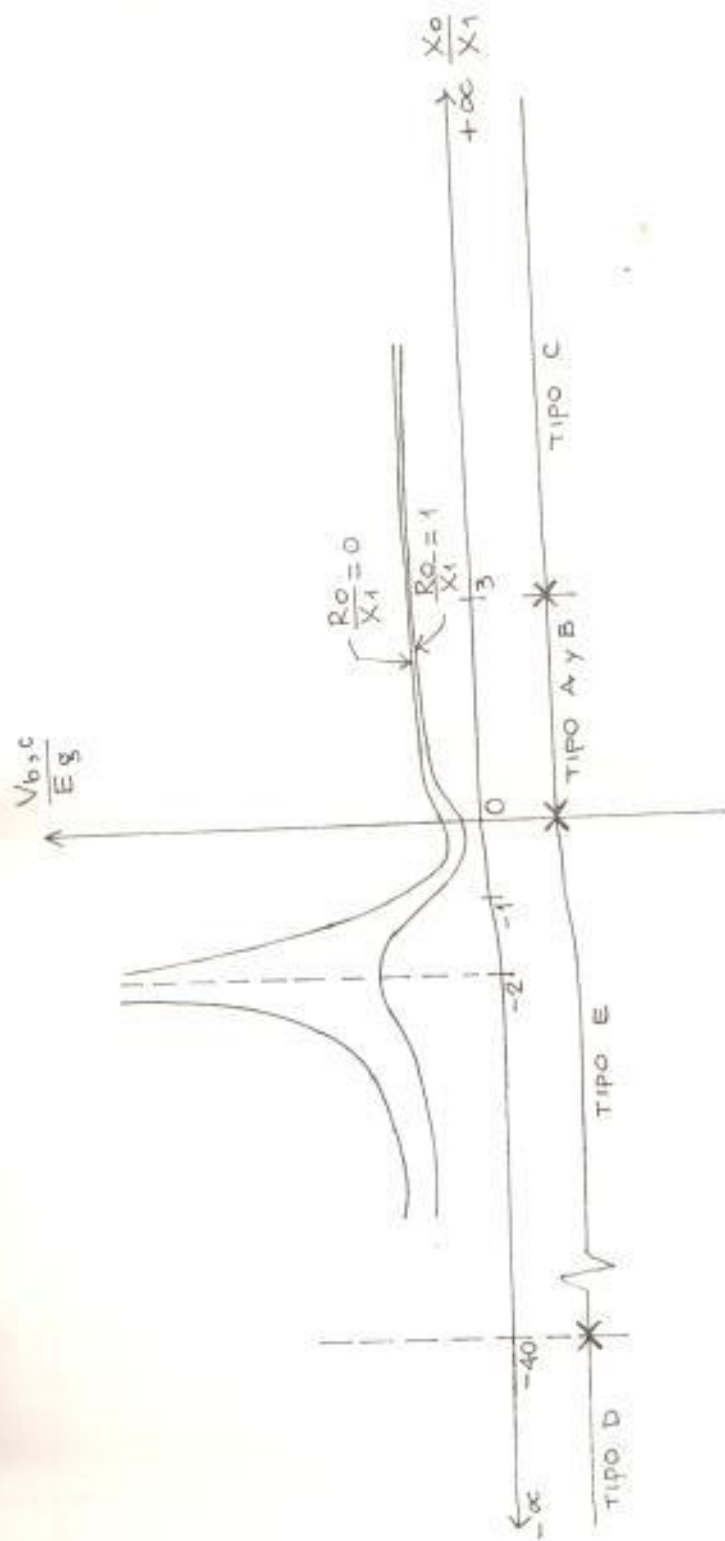
$$|V_b| = 1.73 E_g$$

$$|V_c| = 1.73 E_g$$

De estas fórmulas se observa que los voltajes dependen de la relación $\frac{X_0}{X_1}$. La Figura 3.11 muestra que los sobrevoltajes debido a fallas a tierra varían, dependiendo de las características del sistema.

Observando la Figura 3.11, se ve que los sistemas tipo B son los que tienen la relación $\frac{X_0}{X_1}$ positiva e igual o menor que tres, en cualquier punto del sistema y corresponden a los sistemas conectados efectivamente a tierra.

Los sistemas tipo A son aquellos que tienen la relación $\frac{X_0}{X_1}$ positivas y menores que las del sistema B, pero cuyas constantes no se conocen con suficiente precisión como para poder establecer límites bien definidos. Corresponden a sistemas de distribución con conexión en estrella con neutro a tierra.



$V_{D,C} / E_{\xi}$ EN FUNCIÓN DE

TIPO D TIPO E TIPO A y B TIPO C

$$\frac{X_0}{X_1} ; \frac{R_0}{X_1}$$

FIGURA 3.11.- VALOR ABSOLUTO DE

Los sistemas tipo C tienen el neutro conectado a tierra, pero la relación $\frac{X_0}{X_1}$ es mayor que tres. Los sistemas donde se emplean bobinas Petersen quedan incluidos en este grupo.

Los sistemas tipo D tienen el neutro aislado y la relación $\frac{X_0}{X_1}$ es negativa e inferior a menos cuarenta.

Los sistemas tipo E tienen el neutro aislado y la relación $\frac{X_0}{X_1}$ está comprendida entre cero y menos cuarenta. Este caso corresponde a sistemas con capacitancia elevada o con reactancia de secuencia positiva muy alta.

3.2.3 Voltaje inducido por accidentes en líneas de distribución.-

Cuando las líneas telefónicas aéreas, o incluso subterráneas transcurren durante largas distancias en las proximidades de las líneas de potencia (Transmisión, Subtransmisión, Distribución), pueden derivarse graves trastornos para el sistema de comunicaciones, esto es causado por un desequilibrio magnético

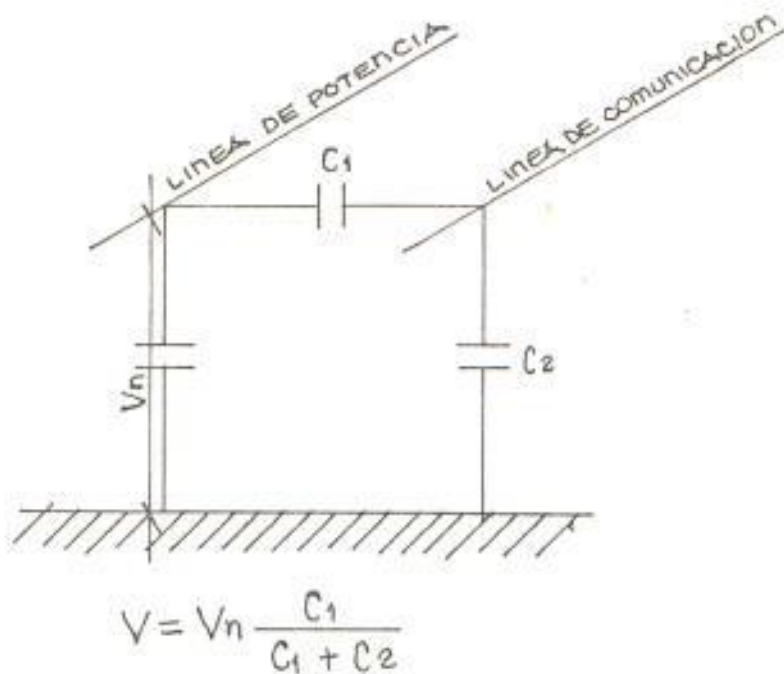
y electrostático en las líneas de potencia, especialmente si armónicos están presentes.

El mayor problema se da cuando existe una falla a tierra en las líneas de potencia, produciéndose grandes corrientes de secuencia cero, las cuales inductivamente inducen voltaje en el circuito de comunicación y las interferencias sonoras en los receptores.

El valor de el voltaje inducido depende de la distancia entre los circuitos de comunicación y las líneas de potencia; la resistencia de la tierra y la frecuencia.

3.2.4 Minimización de los efectos de declives de voltaje.-

Actualmente la sociedad está pendiente de una alta y segura calidad de suministro de la energía eléctrica, pero a pesar del alto nivel de confianza y de continuidad en el servicio, fallas ocasionadas en el sistema de potencia afectan a los consumidores en general.



$V =$ VOLTAJE INDUCIDO ENTRE LINEA DE POTENCIA Y COMUNICACION,

FIGURA 3.12.- VOLTAJE INDUCIDO POR LA LINEA DE POTENCIA AL CIRCUITO DE COMUNICACION.

Para dar un índice muy alto de continuidad en el suministro de energía, por razones económicas y otras circunstancias externas, las estaciones de generación cuentan con generadores de gran capacidad, los mismos que son conectados a sistemas de alto voltaje, y aquellas estaciones de potencia son interconectadas con otras estaciones, a través de

los circuitos de transmisión para de esta forma tener varios caminos para suministrar energía al sistema de distribución.

Es de gran importancia tener alguna indicación de la composición actual de la carga, especialmente en cuanto a la cantidad de la carga que es sensitiva a las interrupciones transientes que ocurren sobre el circuito de transmisión, subtransmisión y distribución. Tales interrupciones provocan el declive o caída de voltaje, el mismo que ocasionan graves efectos sobre la carga como en los motores de las industrias por ejemplo; en donde la continuidad de operación es de primordial importancia y la salida de los motores, durante falla en el sistema, puede ser de seria importancia.

Muchas de estas fallas, particularmente aquellas en alto voltaje causan solamente unas muy cortas interrupciones de el suministro, y si se tiene un mejor entendimiento de tales fallas puede permitir a muchos consumidores reducir la interrupción a sus operaciones por la apropiada selección de su protección.

3.3 ANALISIS DE LOS EFECTOS DE FALLAS DEL SISTEMA EN EL SUMINISTRO A FABRICAS DE CONSUMIDORES.-

Las grandes fábricas e industrias de los consumidores se ven afectados por fallas sobre el circuito de transmisión y distribución y por fallas eléctricas en las propias instalaciones o en las instalaciones adyacentes a ellas. Por lo tanto, el voltaje suministrado es disminuido hasta que la falla sea despejada y esto puede tomar aproximadamente de 100-200 milisegundos para un normal despeje, pero en circunstancias excepcionales 800 milisegundos.

Luego estas fallas en el sistema de potencia son la causa para que el circuito sea interrumpido, si la falla es transiente, el suministro puede ser restaurado por dispositivos automáticos en tiempos sobre los 30 segundos, sin embargo tales fallas causan depresión de voltaje que es experimentado por todos los consumidores conectados a este punto de distribución.

La severidad de la depresión depende de el nivel de voltaje sobre el que existe la falla, la posición y tipo de falla en el circuito y la impedancia de falla.

3.3.1 Efecto de la depresión de voltaje.-

Los motores y los equipos electrónicos son los más susceptibles a la interferencia por la depresión de voltaje.

Durante la falla la reducción de voltaje causa que los motores disminuyan su velocidad hasta que el nivel de voltaje sea normal, y allí existe un torque inadecuado para acelerar los motores y ellos continúan disminuyendo su velocidad.

Analizando la Figura 3.13, cuando se produce una falla sobre el tiempo T_0 ; existe una caída de voltaje y los motores comienzan a disminuir su velocidad a un valor que depende de su inercia y de su carga. Cuando la falla es despejada los motores atraen una corriente que tiene que incrementarse, dependiendo de su corriente de arranque y la cantidad que ha decaído durante el período de falla.

Si la falla es despejada en T_1 , el decaimiento a incrementarse es pequeño, la corriente

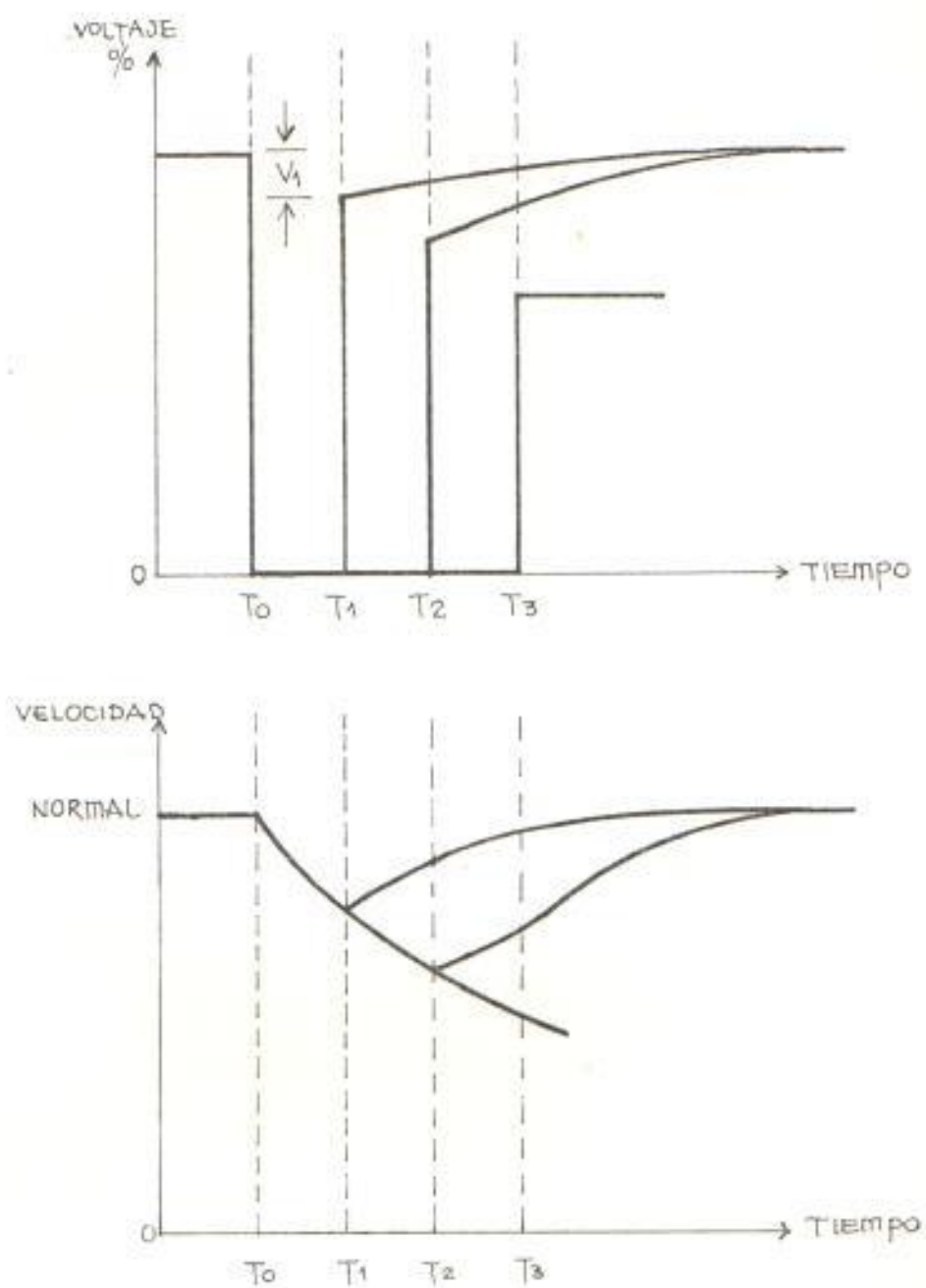


FIGURA 3.13.- COMPORTAMIENTO DEL MOTOR A CAUSA DE LA DEPRESION DE VOLTAJE.

de aceleración causa una caída de voltaje V_1 en los terminales del motor, y el voltaje es lo suficiente como para acelerar los motores de nuevo a la velocidad normal.

Si la falla es despejada en T_3 , la corriente de aceleración disminuida por los motores son tales que el voltaje en sus terminales es insuficiente para acelerar, y por lo tanto generalmente será disparado la protección de sobrecorriente, y consecuentemente la salida de servicio de los motores.

3.3.2 Niveles de voltajes del transformador con una sola fase cortocircuitada.-

La mayoría de las fallas son de una fase a tierra, y la depresión de voltaje sobre las varias fases de suministro de energía, son entonces una función de la conexión de fases de cualquier transformador intermedio.

Es necesario entonces tener en cuenta la depresión de voltaje, la cual puede variar desde cero hacia arriba por diferencia entre fases.

3.4 EFECTO DE EL DECLIVE DE VOLTAJE SOBRE LA CARGA.-

Como es bien conocido, hay otros tipos de carga además de los motores, que son sensitivos a fallas e interrupciones transientes. Particularmente son de importancia las lámparas de descarga de Sodio y las de Mercurio.

En cuanto a la lámpara de descarga de Sodio trabajando a baja presión, pruebas con cortas interrupciones del suministro no pueden ser advertidas por algunas lámparas, mientras que en otros casos la lámpara permanece obscura por algunos minutos.

La lámpara de descarga de Sodio trabajando a alta presión, y la lámpara de Mercurio, pruebas muestran que siempre aparece un período de obscurecimiento de algunos minutos, siguientes no solamente a una corta interrupción del suministro, sino igual a una caída de voltaje alrededor del 20 por ciento del voltaje normal y con una duración de 0.1 segundos.

Consecuentemente la caída de voltaje durante la falla, es generalmente suficiente para extinguir estos tipos de lámparas, no solamente sobre la línea fa-

llada, sino también -y esto es más serio- sobre la gran mayoría de las líneas no falladas.

3.4.1 Fallas y fallas compensadas.-

Cuando en un sistema de potencia existe una falla de línea a tierra, en el lugar del contacto a tierra, fluye una corriente puramente capacitiva que origina un arco, el mismo que tiene una extinción muy dificultosa debido al desplazamiento angular existente entre la tensión aplicada a la capacitancia y la corriente que circula a través de ella. El arco se origina nuevamente cada vez que tiene de a extinguirse. Esto es un inconveniente de los sistemas que operan con el neutro aislado, pero cuando la corriente capacitiva no es muy alta, el arco se extingue más rápidamente, y como consecuencia el sistema puede seguir operando, sin existir ningún tipo de interrupción.

Luego el objetivo es hacer que se anule la corriente que circula por el punto de contacto a tierra, y esto puede lograrse mediante

la conexión de una bobina de PETERSEN en el neutro del transformador, estos elementos se aplican a líneas de medio voltaje, es decir de 6 a 110 Kv.

Debido a que la bobina de PETERSEN solo compensa la onda fundamental, aunque exista, no impide el rápido apagado del arco inherente al contacto a tierra, ya que dado el carácter óhmico de la corriente residual y de la tensión, ambas pasan por cero al mismo tiempo, y la tensión en el lugar de avería sólo crece despacio, a causa de la oscilación del circuito de la capacitancia de la red con la bobina.

En caso de producirse un contacto directo a tierra, debido a la pequeñez de la corriente residual, no hay que lamentar una fusión o destrucción local inadmisibles, aunque el contacto a tierra subsista largo tiempo. Del mismo modo se evitan tanto las sobretensiones que se producen con contacto a tierra no compensado (puesto que el arco eléctrico no vuelve a encenderse) como las asimetrías en el sistema de tensiones.

3.4.2 Medios por medio del cual el distribuidor puede reducir la caída de voltaje y su justificación económica.-

El hecho de que fallas transientes de una fase a tierra sobre circuitos de alto y medio voltaje son eliminados a través de una apertura trifásica, y esto es ciertamente una de las más importantes causas de la caída de voltaje. Por otro lado una apertura de simple fase, puede ser, no solamente costosa sino difícilmente efectiva, y en cierto modo inquietante.

Los disturbios causados por una apertura trifásica, es más serio en circuitos con neutros aislados, por lo que el uso de un SHUNT-BREAKER o una bobina de PETERSEN, puede ser muy efectiva en esta conexión, naturalmente esto involucra un cierto costo.

El SHUNT-BREAKER es un circuito que tiene control fase por fase, y el propósito es el de desviar la falla a tierra por un corto tiempo, el cual es generalmente suficiente

para extinguir el arco a tierra. Este circuito conectado entre fase y tierra es normalmente abierto, y debe interrumpir la corriente de fase a tierra.

Los pasos a ser tomados sobre el circuito difícilmente pueden eliminar la caída de voltaje, pero son generalmente efectivos solamente en reducir su duración.

3.4.3 Medios por medio del cual el consumidor pueda reducir los disturbios causados por una caída de voltaje dado.-

En los párrafos anteriores se ha examinado los pasos a ser tomados por el distribuidor de energía, para tratar de eliminar la caída de voltaje por sí mismo. Pero hay otros pasos a ser tomados por el consumidor de la energía, con el objeto de intentar reducir los disturbios causados por una caída de voltaje.

En las instalaciones de los consumidores por razones de seguridad, relés de bajo voltaje

son instalados en el circuito de control del motor, para evitar daño al motor y/o daño al personal, en el caso de una repentina salida y restablecimiento del suministro. Una vez que el voltaje caiga abajo del nivel de operación del relé de bajo voltaje, los motores son desconectados hasta que el voltaje llegue a los niveles normales.

Con pocas excepciones, esta repentina desconexión de los motores, no es necesario, así que una pronunciada reducción en los disturbios producidos por fallas transientes, pueden ser obtenidas, con la instalación de relés de bajo voltaje con un suficiente tiempo de retardo, o relés de bajo voltaje instantáneos acoplados con otros relés, debiendo ser utilizado el más óptimo, ya que la disminución de la velocidad de los motores debido a la caída de voltaje cuando se produce una falla, no es aceptable con ciertos tipos de trabajos.

Se puede conservar la disminución de la velocidad dentro de límites aceptables, acoplando a los motores de ruedas volantes y si

es apropiado también incrementando la potencia nominal de los motores.

Todos los posibles medios para reducir los disturbios producidos por la caída de voltaje en la carga, algunos tales como el uso de adecuados relés de bajo voltaje tienen un insignificante costo, mientras otros, tales como el uso de motores acoplados con ruedas volantes, o de motores con potencia nominal incrementada, o de otros instrumentos eléctricos con características adelantadas, ocasionan un gasto considerable.

Luego una importante parte de los disturbios presentados en la carga, debido a la caída de voltaje cuando se produce una falla puede ser probablemente eliminado, tomando pasos directamente sobre la carga o tomando pasos sobre el circuito, la preferencia debe ser hecha en base a una comparación técnica y económica.

CAPITULO IV

ANALISIS PRACTICO DEL PROBLEMA, SISTEMA GUAYAQUIL 69 / 13.8 Kv.

4.1 INTRODUCCION.-

Para tener una idea práctica de los efectos producidos por fallas sobre el sistema de potencia, se utiliza el sistema Guayaquil a nivel de 69/13.8 Kv., en donde se simula en el lado de alto voltaje, los distintos tipos de fallas, para de esta manera comprobar los efectos que producen tales fallas en las barras de alto voltaje, en las de bajo voltaje, al igual que en las otras barras adyacentes al punto de falla.

En un sistema de potencia es de vital importancia, conocer los valores, tanto de voltaje como de corriente en el punto de falla y en cada una de las barras, así como también las contribuciones de corriente entre ellas, puesto que con estos valores se puede seleccionar la respectiva y eficaz protección del sistema de potencia.

4.2 CALCULO DE CORTOCIRCUITO .-

Aut. No. _____

Para el cálculo de cortocircuito, se utiliza el programa de cortocircuito PCC elaborado por el Ing. Gonzalo Procel existente en la ESPOL, el mismo que permite tener los resultados para fallas trifásicas, de línea a línea, de doble línea a tierra y de simple línea a tierra.

El sistema de la ciudad de Guayaquil 69/13.8 Kv, está compuesto de dos centros de generación, la central generadora Guayaquil y la central generadora Estero Salado. Estos centros de generación están interconectados entre sí a través de líneas de subtransmisión a un nivel de 69 Kv.

La central generadora Guayaquil, consta de cinco unidades, las mismas que alcanzan una capacidad de generación total de 46.5 Mw, de los cuales 33 Mw corresponden a cuatro unidades a vapor y 13.5 Mw generados con una unidad a gas.

La central generadora Estero Salado, está conformada por seis unidades que alcanzan una capacidad de generación total de 142 Mw, de los cuales 107 Mw co

responden a cinco unidades a gas y 35 Mw generados con una unidad a vapor. Además esta central generadora tiene interconexión con INECEL (Planta Gonzalo Cevallos) que cuenta con tres unidades, de las cuales dos son a vapor y una a gas, también tienen interconexión a fin de alimentar al sistema con el Sistema Nacional Interconectado (SNI).

Las unidades de los centros de generación, generan a un nivel de voltaje de 13.8 Kv, y es elevado a un nivel de voltaje de 69 Kv a través de transformadores elevadores de 13.8/69 Kv conexión Delta-Estrella aterrizada, a excepción de la unidad a vapor V_1 de la central generadora Guayaquil que genera a un nivel de 4.16 Kv y es elevado a un nivel de voltaje de 13.8 Kv por medio de transformador elevador de 4.16/13.8 Kv conexión Delta-Estrella aterrizada.

De los centros de generación parten varias líneas de subtransmisión a nivel de 69 Kv, que llegan a las diferentes subestaciones de distribución en donde el nivel de voltaje es reducido a través de transformadores de 69 a 13.8 Kv.

La figura 4.1 muestra el Sistema de la ciudad de

Guayaquil antes descrito. En este trabajo para propósitos de estudio se toma una parte del sistema, en donde se analiza los tipos de falla previamente indicados.

La parte del sistema sometido a estudio comprende las siguientes barras:

BARRA	VOLTAJE
<u>Nº</u>	<u>Kv.</u>
2	13.8
3	13.8
1	69.0
20	69.0
30	69.0
85	13.8
86	13.8
41	69.0
43	69.0
89	13.8
90	13.8
91	13.8
42	69.0
51	69.0
92	13.8
93	13.8

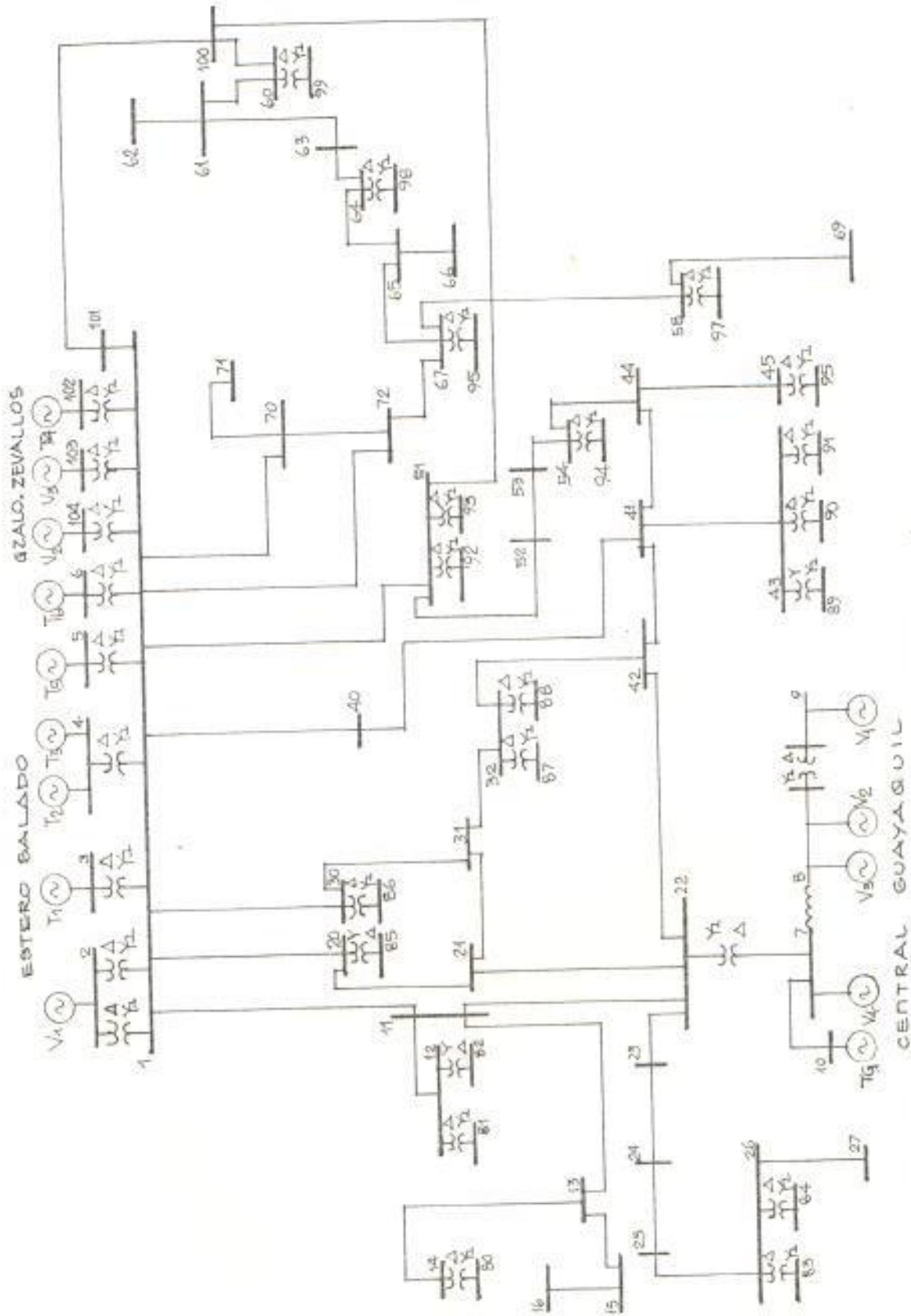


FIGURA 4.1.- SISTEMA DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL 6S/13.8 KV.

El estudio de cortocircuitos se realiza en las barras N^o 20 y N^o 43, las mismas que se encuentran a un nivel de voltaje de 69 Kv.

4.3 CORTOCIRCUITO TRIFASICO.-

Primeramente se simula la falla trifásica en la barra N^o 20 teniendo el transformador de 69/13.8 Kv, localizado entre las barras N^o 20 y N^o 85, la conexión Estrella aislada-Delta ($\gamma - \Delta$), los resultados obtenidos se indican en la Tabla I.

Con el propósito de estudio se cambia la conexión del transformador antes indicado por la de Estrella aterrizada-Delta ($\gamma_n - \Delta$), y simulando la falla trifásica en la barra N^o 20, se observa que los resultados no varían.

Los resultados para la falla trifásica en la barra N^o 43, teniendo el transformador de 69/13.8 Kv, localizado entre las barras N^o 43 y N^o 89, la conexión Estrella aislado-Estrella aterrizada ($\gamma - \gamma_n$), se indica en la Tabla II.

Si se cambia de conexión al transformador de Estre-

lla aislada-Estrella aterrizada ($\gamma - \gamma_n$), a Estrella aterrizada-Estrella aterrizada ($\gamma_n - \gamma_n$), se simula la falla trifásica en la barra N^o 43, se observa que los resultados no varían.

4.4 CORTOCIRCUITO DE LINEA A LINEA.-

Para este tipo de falla se asume que las fases B y C son las falladas, y con la misma secuencia seguida para el cortocircuito trifásico, los resultados para falla de línea a línea en la barra N^o 20 y en la barra N^o 43 se indican en las Tablas III-IV respectivamente. El cambio de conexión de los transformadores indicados no produce alteración en los resultados obtenidos con la conexión original, para falla de línea a línea.

4.5 CORTOCIRCUITO DOBLE LINEA A TIERRA.-

Para la falla de doble línea a tierra se asume que las fases falladas son las fases B y C. Los resultados obtenidos se encuentran indicados en las Tablas V y VI para falla en la barra N^o 20 y barra N^o 43, respectivamente.

Las Tablas VII y VIII indican los resultados obtenidos para falla de doble línea a tierra en las barras N^o 20 y N^o 43 respectivamente con cambio de conexión de los transformadores correspondientes.

4.6 CORTOCIRCUITOS SIMPLE LINEA A TIERRA.-

Se asume que la fase fallada es la fase A, los resultados para la falla en la barra N^o 20 y N^o 43, sin y con cambio de conexión de los transformadores se indican en las Tablas IX, X, XI, XII respectivamente.

4.7 ANALISIS DE RESULTADOS.-

Los resultados obtenidos en el estudio de cortocircuito, permiten analizar los efectos producidos por los mismos, en el sistema considerado, en cuanto se refiere a niveles de voltaje y de corriente.

Los resultados muestran que fallas producidas, tanto en la barra N^o 20 como en la barra N^o 43, ocasionan una considerable caída de voltaje en las barras adyacentes que se encuentran a un mismo nivel de voltaje, así como en las barras de bajo voltaje del sistema.

Con el cambio de conexión de los transformadores indicados anteriormente, cuando se produce una falla trifásica y una falla de línea a línea en la barra de alto voltaje del transformador los resultados no varían con respecto a los obtenidos con la conexión original del transformador, esto es debido a que el aterrizamiento del neutro del transformador no interviene en el cálculo de cortocircuito para las fallas indicadas, puesto que como se explica en el Capítulo I y en el Anexo A, el circuito de secuencia cero no forma parte en el análisis.

El aterrizamiento del neutro del transformador, si afecta en los resultados, cuando se produce una falla de doble línea a tierra o de una línea a tierra en las barras N^o 20 y N^o 43.

Cuando la falla se produce en la barra N^o 20, los valores de los niveles de voltaje en esta barra, así como en las barras adyacentes disminuyen con respecto a los obtenidos con el neutro del transformador aislado.

Cuando la falla de doble línea a tierra o de una línea a tierra, se produce en la barra N^o 43, el ate-

rrizamiento del neutro en el lado de alto voltaje, ocasiona que el nivel de voltaje aumente únicamente en la barra de bajo voltaje (barra N° 89) del transformador. Los valores de los niveles de voltaje en las demás barras del sistema permanecen iguales a los obtenidos con el neutro del transformador aislado.

La Tabla XIII muestra los valores de los niveles de voltaje en las barras de bajo voltaje de los transformadores, en donde se da el cambio de conexión.

En cuanto a valores de corriente, se observa en los resultados, que para falla en la barra N° 20, la máxima corriente se da cuando se produce una falla de doble línea a tierra, la misma que aumenta cuando se aterriza el neutro del transformador.

La corriente más alta para fallas en la barra N° 43 es la correspondiente a la falla trifásica. La Tabla XIV muestra los valores máximos de corriente para los diferentes tipos de falla.

Los diferentes tipos de fallas, ocurridos en las barras de alto voltaje causan un desbalance tanto de

corriente como de voltaje en las fases de las barras del sistema analizado.

TABLA I
FALLA TRIFASICA EN BARRA NO. 20

CORRIENTE DE FALLA EN LA FASE A: 11.0083 P.U 9211.08 AMP.							
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.
2	A	0.5291	4.22	1	A	0.6965	2913.76
				1	A	0.5946	2487.51
				0	A	1.2910	5401.23
3	A	0.5748	4.58	1;0	A	0.8074	3377.84
1	A	0.2451	9.77	3	A	0.8074	675.57
				2	A	0.6965	582.75
				2	A	0.5946	497.50
				20	A	6.7640	5659.70
				30	A	1.1867	992.97
				41	A	0.5721	479.52
				51	A	0.5200	435.14
20	A	0.0000	0.00	85	A	0.0000	0.00
				1	A	6.7640	992.97
85	A	0.000	0.00	20	A	0.0000	0.00
30	A	0.1933	7.70	86	A	0.0000	0.00
				1	A	1.1867	992.97
86	A	0.1933	1.54	30	A	0.0000	0.00
41	A	0.1891	7.53	1	A	0.5731	479.52
				42	A	1.0928	914.35
				43	A	0.0000	0.00
43	A	0.1891	7.53	41;91	A	0.0000	0.00
				90;89	A	0.0000	0.00
89;	A	0.1891	1.51	43	A	0.0000	0.00
90;							
91	A	0.1795	7.15	41	A	1.0982	914.35
42							
92;93	A	0.2208	1.76	93;92	A	0.0000	0.00
				1	A	0.5200	435.14
				51	A	0.0000	0.00

TABLA II

FALLA TRIFASICA EN BARRA NO. 43

CORRIENTE DE FALLA EN LA FASE A: 9.9224 P.U. 8302.45 AMPS.							
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.
2	A	0.5851	4.66	1	A	0.6729	2606.15
				1	A	0.5318	2224.89
				0	A	1.1547	4831.00
3	A	0.6552	4.98	0;1	A	0.7221	3021.23
1	A	0.3383	13.48	3	A	0.7221	604.25
				2	A	0.6229	521.23
				2	A	0.5318	444.98
				20	A	1.5514	1298.15
				30	A	1.5906	1330.96
				41	A	2.2800	1097.73
				51	A	2.0689	1731.09
20	A	0.2829	11.27	85	A	0.0000	0.00
				1	A	1.5514	1298.15
85	A	0.2829	2.25	20	A	0.0000	0.00
30	A	0.2690	10.72	86	A	0.0000	0.00
				1	A	1.5906	1330.96
86	A	0.2690	2.14	30	A	0.0000	0.00
41	A	0.1183	4.71	1	A	2.2800	1907.73
				42	A	5.5771	4666.56
				43	A	9.9223	8302.36
43	A	0.000	0.00	41	A	9.9223	8302.36
				91;90	A	0.0000	0.00
				89			
89;90	A	0.0000	0.00				
91							
42	A	0.1659	6.61	43	A	0.0000	0.00
51	A	0.2427	9.67	41	A	5.5771	4666.56
				93;92	A	0.0000	0.00
92;93	A	0.2427	1.93	1	A	2.0689	1731.09
				51	A	0.0000	0.00

TABLA III
 FALLA ENTRE FASES (FASE B Y C) EN BARRA NO. 20

De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES		Fase	Corriente (P.U)	Corriente (AMPS.)
				B	C			
2	A	0.8823	7.03	9.5335	P.U	7977.02	AMPS	
	B	0.9282	7.40	9.5335	P.U	7977.02	AMPS	
	C	0.5291	4.22					
3	A	0.8906	7.10					1456.88
	B	0.9338	7.44					2913.76
	C	0.5748	4.58					1243.75
1	A	1.000	39.84					2487.50
	B	0.5889	23.46					2700.61
	C	0.4932	19.65					5301.22
	A			1; 0		A; B	0.4037	1688.92
	B					C	0.8074	3377.84
	C							
	A			3		A	0.0000	0.00
	B			2		B; C	0.6992	585.06
	C			2		A	0.0000	0.00
	A			2		B; C	0.6032	504.68
	B					A	0.0000	0.00
	C					B; C	0.5149	430.85

CONTINUACION TABLA III

CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES		B		C		9.5335 P.U.		9.5335 P.U.		7977.02 AMPS.		7977.02 AMPS.						
De Barra	Fase	Voltaje (P.U.)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente (AMPS.)	De Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente (AMPS.)	De Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente (AMPS.)			
20	A	1.0000	39.84	20	A	0.0000	0.00	20	A	0.0000	0.00	20	A	0.0000	0.00			
	B; C	0.5000	19.92		B; C	B; C	5.8578		4901.43	B; C	B; C		5.8578	4901.43	B; C	B; C	5.8578	4901.43
85	A; B	0.8660	6.90	85	A	0.0000	0.00	85	A	0.0000	0.00	85	A	0.0000	0.00			
	C	0.0000	0.00		B; C	B; C	5.8578		4901.43	B; C	B; C		5.8578	4901.43	B; C	B; C	5.8578	4901.43
30	A	1.0000	39.84	20	A	0.0000	0.00	20	A	0.0000	0.00	20	A	0.0000	0.00			
	B	0.5643	22.48		B; C	B; C	0.0000		0.00	B; C	B; C		0.0000	0.00	B; C	B; C	0.0000	0.00
	C	0.4874	19.42		B; C	B; C	1.0277		859.93	B; C	B; C		1.0277	859.93	B; C	B; C	1.0277	859.93

CONTINUACION TABLA III

CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES		B		C		7977.02		7977.02	
CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES		9.5335 P.U.		9.5335 P.U.		AMPS		AMPS	
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente (AMPS.)	Corriente (P.U)	Corriente (AMPS.)
86	A	0.8479	6.76	30	A; B; C	0.0000	0.00	0.0000	0.00
	B	0.8943	7.13						
	C	0.1933	1.54						
41	A	1.0000	39.84	1	A	0.0000	0.00	0.0000	0.00
	B	0.5647	22.30						
	C	0.4845	19.30						
43	A	1.0000	39.84	42	B; C	0.0000	415.28	0.0000	0.00
	B	0.5647	22.50						
	C	0.4845	19.30						
89	A	1.0000	7.97	43	A; B; C	0.0000	0.00	0.0000	0.00
	B	0.5647	4.30						
	C	0.4845	3.86						
90; 91	A	0.8467	6.75	43	A; B; C	0.0000	0.00	0.0000	0.00
	B	0.8950	7.13						
	C	0.1891	1.51						

CONTINUACION TABLA III

CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES		B		C		9.5335 P.U.		7977.02 AMPS.	
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente (AMPS.)	7977.02 AMPS.	7977.02 AMPS.
42	A	1.000	39.84	41	A B; C	0.0000 0.9464	0.00 791.85	0.00	0.00
	B	0.5604	22.32						
	C	0.4841	19.29						
51	A	1.0000	39.84	93;92 1	A; B; C A B; C	0.0000 0.0000 0.4504	0.00 0.00 375.84	0.00	0.00
	B	0.5790	23.07						
	C	0.4877	19.43						
92;93	A	0.8447	6.78	51	A; B; C	0.0000	0.00	0.00	0.00
	B	0.9005	7.17						
	C	0.2208	1.76						

TABLA IV
FALLA ENTRE FASES (FASE B Y C) EN BARRA NO. 43

CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES		B		8.5930 P.U.		7		190.12 AMPS.			
C		8.5940 P.U.		7		190.12		AMPS.			
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U.)	Corriente (AMPS)				
2	A	0.8795	7.01	1	A; B	0.3115	1303.07				
	B	0.9473	7.55		C			0.6229	2606.15		
	C	0.5851	4.66		A; B			0.2659	1112.45		
3	A	0.8889	7.08	0	C	0.5318	2224.89				
	B	0.9515	7.58		A; B			0.5774	2415.50		
	C	0.6252	4.98		C			1.1547	4831.00		
1	A	1.0000	39.84	1; 0	A; B	0.3641	1510.62				
	B	0.6495	25.88		C			0.7221	3021.28		
	C	0.4998	19.91		A			0.0000	0.00		
				3	B; C	0.6254	523.29				
				2	A	0.0000	0.00				
				2	B; C	0.5395	451.40				
					A	0.0000	0.00				
					B; C	0.4606	385.36				

CONTINUACION TABLA IV

CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES		B		7 190.12			
CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES		C		7 190.12			
De Barra	Fase	Voltaje (P.U.)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U.)	Corriente (AMPS.)
86	A	0.8342	6.65	30	A; B; C	0.0000	0.00
	B	0.9167	7.30				
	C	0.2690	2.14				
41	A	1.0000	39.84	1	A; B; C	0.0000	0.00
	B	0.5555	22.13				
	C	0.4609	18.36				
89	A	1.000	7.97	43	A; B; C	0.0000	0.00
	B; C	0.5000	3.98				
90; 91	A; B	0.8660	6.90	43	A; B; C	0.0000	0.00
	A	1.0000	39.84				
	B	0.5732	22.83				
42	C	0.4613	18.36	41	A; B; C	0.0000	0.00

CONTINUACION TABLA IV

CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES							7 190.12 AMPS.	
CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES							7 190.12 AMPS.	
CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES							7 190.12 AMPS.	
De Barra	Fase	Voltaje (P.U.)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente (AMPS.)	
20	A	1.000	39.84	20	A	0.0000	0.00	
	B	0.5239	24.85	30	B; C	1.3436	1124.23	
	C	0.4805	19.14	41	A	0.0000	0.00	
				51	B; C	1.3775	1152.64	
85	A	1.000	39.84	20	A	0.0000	0.00	
	B	0.5239	24.85	30	B; C	1.3436	1124.23	
	C	0.4805	19.14	41	A	0.0000	0.00	
30	A	1.0000	39.84	20	A	0.0000	0.00	
	B	0.6136	24.45	30	B; C	1.3775	1152.64	
	C	0.4817	19.19	41	A	0.0000	0.00	

CONTINUACION TABLA IV

CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES		B 8.5930 P.U.		7 190.12 AMPS.			
CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES		C 8.5940 P.U.		7 190.12 AMPS.			
De Barra	Fase	Voltaje (P.U.)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U.)	Corriente (AMPS)
51	A	1.000	39.84	93;92 1	A; B; C A B; C	0.0000 0.0000 1.7917	0.00 0.00 1499.17
	B	0.6070	24.18				
	C	0.4690	18.64				
92;93	A	0.8310	6.62	51	A; B; C	0.0000	0.00
	B	0.1959	7.30				
	C	0.2427	1.93				

TABLA V

FALLA DE 2 FASES A TIERRA (FASES B Y C) EN BARRA NO. 20

CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES B 11.5383 P.U. 9654.56 AMPS. C 10.9340 AU 9148.91 AMPS.								
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS	
2	A	0.7526	6.00	1	A	0.3994	1670.91	
	B	0.7811	6.22		B	0.4215	1763.26	
	C	0.5291	4.22		C	0.6965	2913.76	
	3	A B C	0.7751 0.8914 0.5748	6.18 6.38 4.58	1	A	0.3410	1426.47
						B	0.3598	1505.31
						C	0.5946	2487.50
					0	A	0.7403	3097.35
						B	0.7813	3268.55
						C	1.2910	5401.23
	3	A B C	0.7751 0.8914 0.5748	6.18 6.38 4.58	1;0	A	0.4630	1937.03
						B	0.4886	2044.09
						C	0.8074	2377.84
1	A B C	0.8228 0.3626 0.3235	32.78 14.44 12.89	3	A	0.0266	22.27	
					B	0.8309	695.21	
					C	0.7899	660.90	
Neutro				2	Tierr	0.7936	664.07	
					A	0.0134	11.22	
					B	0.7374	616.97	
Neutro				2	C	0.6988	584.69	
					Ti	0.7936	664.07	
					A	0.0072	6.00	
Neutro				2	B	0.6284	525.83	
					C	0.5927	495.98	
					T	0.6643	555.82	

CONTINUACION TABLA V

CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES B							
C							
11.5383 P.U. 9654.56 AMPS.							
10.9340 AU 9148.91 AMPS.							
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS
20	A B;C	0.9606 0.0000	38.27 0.00	20	A	0.0388	32.48
					B	7.1284	5964.61
					C	6.6993	5605.56
					3xIo	7.3080	6173.42
				30	A	0.0729	61.01
					B	1.2751	1066.93
					e	1.2269	1026.59
					3xIo	1.4994	1254.59
				41	A	0.0559	46.73
					B	0.5667	474.20
					C	0.5486	458.99
					3xIo	0.4533	379.33
				51	A	0.0485	40.55
					B	0.5139	430.01
					C	0.5004	418.74
					3xIo	0.4189	350.50
85	A;B C	0.5546 0.0000	4.42 0.00	85	A;B;C	0.0000	0.00
				1	A	0.0388	32.48
					B	7.1284	5964.61
					c	6.6993	5605.56
	3xIo	7.3780	6173.42				
30	A B C	0.8574 0.2804 0.2522	34.16 11.17 10.05	20	A;B;C	0.0000	0.00
				86	A;B;C	0.0000	0.00
					1	A	0.0729
	B	1.2751	1066.93				
	C	1.2269	1026.59				

CONTINUACION TABLA V

CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES B 11.5383 P.U 9654.56 AMPS. C 10.9340 AU 9148.91 AMPS								
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Vltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.	
86	A	0.8398	33.45	1	A	0.0559	48.73	
	B	0.2927	11.66		B	0.5667	474.20	
	C	0.2593	10.33		C	0.5486	458.99	
					3xIo	0.4533	379.33	
					42	A	0.1042	87.20
						B	1.0803	903.97
						C	1.0486	877.40
						3xIo	0.8720	729.66
						A;B;C	0.0000	0.00
43	A	0.8398	33.45	41;91	A;B;C	0.0000	0.00	
	B	0.2927	11.66		90;89	A;B;C	0.0000	0.00
	C	0.2593	10.33					
89	A	0.7077	5.64	43	A;B;C	0.0000	0.00	
	B	0.4198	3.34					
	C	0.3576	2.85					
90;91	A	0.6004	4.78	43	A;B;C	0.0000	0.00	
	B	0.6394	5.09					
	C	0.1891	1.51					
51	A	0.8302	33.97	93;92	A;B;C	0.0000	0.00	
	B	0.3323	13.24		1	A	0.485	40.55
	C	0.2954	11.77			B	0.5139	430.01
						C	0.5004	418.74
						3x10	0.4189	350.50

CONTINUACION TABLA V

CORRIENTE DE FALLA EN LAS FASES B 11.5383 P.U 9654.56 AMPS. C 10.9340 AU 9148.91 AMPS.							
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.
42	A	0.8426	33.57				
	B	0.2808	11.19				
	C	0.2487	9.91				
92;93				41	A	0.1042	87.20
					B	1.0803	903.97
					C	1.0486	877.40
					3xIo	0.8720	739.66
	A	0.6099	4.86				
	B	0.6543	5.21				
	C	0.2208	1.76				
				51	A;B;C	0.0000	0.00

CONTINUACION TABLA VI

Corriente de falla en las fases											
				B	10.0068 P.U	8373.12	AMPS.				
				C	9.4611 P.U	7 916.44	AMPS.				
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS				
20	A B C	0.8785 0.4146 0.3411	35.00 16.52 13.59	20	C	0.5056	423.09				
						0.4948	414.05				
					A	0.1392	116.50				
					B	1.4951	1250.99				
					C	1.4287	1195.45				
					3xIo	1.050	849.25				
				30	A	0.1606	134.41				
					B	1.5115	1264.72				
					C	1.4738	1233.17				
					3xIo	0.9915	829.63				
					41	A	0.0872	72.93			
						B	2.3597	1974.49			
				C		2.1952	1836.81				
				3xIo		2.3615	1975.99				
				51	A	0.0909	76.05				
					B	2.1410	1791.49				
					C	2.0058	1678.33				
					3xIo	2.1821	1825.81				
				85	A B C	0.6502 0.7251 0.2829	5.18 5.78 2.25	85	A;B;C	0.0000	0.00
									A	0.1392	116.50
B	1.4951	1250.99									
C	1.4287	1195.45									
3xIo	1.0150	849.25									
1											
30	A B C	0.8786 0.4000 0.3309	35.00 15.94 13.18	20	A;B;C	0.0000	0.00				

CONTINUACION TABLA VI

Corriente de falla en las fases B 10.0068 P.U 8373.12 AMPS. C 9.4611 P.U 7 916.44 AMPS.							
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.
86	A B C	0.6488 0.7173 0.2690	5.17 5.71 2.14	86	A;B;C	0.0000	0.00
				1	A	0.1606	134.41
					B	1.5115	1264.72
					C	1.4738	1233.17
					3xIo	0.9915	829.63
41	A B C	0.9902 0.1598 0.1297	39.45 6.36 5.17	30	A;B;C	0.0000	0.00
				1	A	0.0872	72.93
					B	2.3597	1974.49
					C	2.1952	1836.81
					3xIo	2.3615	1975.99
43	A B;C	1.0399 0.0000	41.42 0.00		A	0.1779	148.86
					B	5.5186	4617.65
					C	5.2632	4403.91
					3xIo	4.6193	3865.15
				43	A	0.0000	0.00
					B	10.068	8373.05
					C	9.1616	7916.35
	3xIo	9.1616	7665.87				
89	A B;C	0.6932 0.3466	5.52 2.76	41	A	0.0000	0.00
					B	10.0068	8373.05
					C	9.4610	7916.35
					3xIo	9.1616	7665.87
				91,90	A;B;C	0.0000	0.00
				89			
				43	A;B;C	0.0000	0.00

CONTINUACION TABLA VI

Corriente de falla en las fases							
				B	10.0068 P.U	8373.12	AMPS.
				C	9.4611 P.u	7 916.44	AMPS.
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.
90;91	A;B C	0.6004 0.0000	4.78 0.00	43	A;B;C	0.0000	0.00
42	A B C	0.9722 0.2206 0.1837	38.73 8.79 7.82	41	A B C 3xIo	0.1779 5.5186 5.2632 4.6193	148.86 4617.65 4403.91 3865.15
51	A B C	0.9192 0.3396 0.2831	36.62 13.53 11.28	93;92 1	A;B;C A B C 3xIo	0.0000 0.0909 2.1410 2.0058 2.1821	0.00 76.05 1791.49 1678.33 1825.81
92;93	A B C	0.6371 0.7090 0.2427	5.08 5.65 1.93	51	A;B;C	0.0000	0.00

TABLA VII

FALLA DE 2 FASES A TIERRA (FASES B Y C) EN BARRA 20 CON CAMBIO DE CONEXION DEL TRANSFORMADOR

Corriente de falla en las fases B 11.7588 P.U. 9839.02 AMPS. C 11.3131 P.U. 9466.15 AMPS.							
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.
2	A	0.7394	5.89	1	A	0.4132	1728.85
	B	0.7682	6.12		B	0.4295	1796.94
	C	0.5291	4.22		C	0.6965	2913.76
3	A	0.7634	6.08	1	A	0.3528	1475.93
					B	0.3667	1530.07
					C	0.5946	2487.51
	B	0.7898	6.29	0	A	0.7660	3204.75
					B	0.7962	3330.99
					C	1.2910	5401.23
C	0.5748	4.58	1;0	A	0.4791	2004.20	
				B	0.4979	2083.15	
				C	0.8874	3377.84	
1	A	0.7919	31.55	3	A	0.0673	56.35
					B	0.8296	694.15
					C	0.7906	661.57
	B	0.3563	14.19	2	A	0.7522	629.39
					B	0.0242	20.26
					C	0.7553	615.29
	C	0.3174	12.65	2	A	0.6987	584.27
					B	0.7522	629.39
					C	0.0252	21.07
	A	0.7919	31.55	2	A	0.6267	524.42
					B	0.5925	495.81
					C	0.6296	526.79

CONTINUACION TABLA VII

Corriente de falla en las fases B. 11.7588 P.U. 9839.02 AMPS. C. 11.3131 P.U. 9466.15 AMPS.								
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.	
20	A; B;C	0.9104 0.0000	36.27 0.00	20	A	0.3451	288.78	
					B	7.1101	5949.26	
					C	6.6997	5605.90	
				30	3xIo	6.9926	5851.02	
					A	0.0066	5.56	
					B	1.2709	1063.39	
				41	C	1.2238	1023.99	
					3xIo	1.4211	1189.07	
					A	0.0824	68.91	
				51	B	0.5668	474.26	
					C	0.5500	460.17	
					3xIo	0.4297	359.02	
				85	A	0.0724	60.60	
					B	0.5140	430.68	
					C	0.5016	419.68	
1	3xIo	0.3970	332.19					
	A;B;C	0.5795	484.88					
		1.7385	1454.65					
85	A;B; C	0.5256 0.0000	4.19 0.00	1	A	0.3451	288.78	
					B	7.1101	5949.26	
					C	6.6977	5605.90	
					3xIo	6.9926	5851.02	
30	A; B; C	0.8222 0.2758 0.2477	32.76 10.99 9.87	20	A;B;C	0.0000	0.00	
					86	A;B;C	0.0000	0.00
						A	0.0066	5.56
1	B	0.2477	9.87	1	B	1.2709	1063.39	

CONTINUACION TABLA VII

Corriente de falla en las fases							
				B	11.7588 P.U.	9839.02 AMPS.	
				C	11.3131 P.U.	9466.15 AMPS.	
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.
86	A	0.5795	4.62	30	C	1.2238	1023.99
	B	0.6169	4.92		3xIo	1.4211	1189.07
	C	0.1933	1.54		A;B;C	0.0000	0.00
41	A	0.8952	32.08	1	A	0.0824	68.91
	B	0.2872	11.44		B	0.5668	474.26
	C	0.2539	10.12		C	0.5500	460.17
43	A	0.8052	32.08	42	3xIo	0.4297	359.52
	B	0.2872	11.44		A	0.1547	129.44
	C	0.2539	10.12		B	1.0805	904.11
89;90 91	A	0.6802	5.42	43	C	1.0115	879.53
	B	0.4073	3.25		3xIo	0.8265	691.54
	C	0.3450	2.75		A;B;C	0.0000	0.00
42	A	0.8074	32.17	41;91 90;87	A;B;C	0.0000	0.00
	B	0.2754	10.97		A;B;C	0.0000	0.00
	C	0.2434	9.70		A;B;C	0.0000	0.00
41	A	0.1547	129.44	43	A	0.1547	129.44
	B	1.0805	904.11		B	1.0805	904.11
	C	1.0511	879.53		C	1.0511	879.53
	3xIo	0.8265	691.54		3xIo	0.8265	691.54

CONTINUACION TABLA VII

Corriente de falla en las fases							
				B	11.7588 P.U.	9839.02 AMPS.	
				C	11.3131 P.U.	9466.15 AMPS.	
De Barra	Fase	Voltaje (P.U.)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U.)	Corriente AMPS.
51	A	0.7977	31.78				
	B	0.3264	13.00				
	C	0.2897	11.34				
				93;92	A;B;C	0.0000	0.00
				1	A	0.0724	60.60
				B	0.5140	430.10	
				C	0.5016	419.68	
					3xIc	0.3970	332.19
92;93	A	0.5871	4.68				
	B	0.6317	5.03				
	C	0.2208	1.76				
				51	A;B;C	0.0000	0.00

TABLA VIII
 FALLA DE 2 FASES A TIERRA (FASES B Y C) EN BARRA NO. 43 CON CAMBIO DE CONEXION DEL TRANSFORMADOR

De Barra	Fase	Voltaje (P.U.)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U.)	Corriente (AMPS)
* 89	A B;C	1.0399 0.0000	8.28 0.00	43	A; B; C	0.0000	0.00

* Es la única barra en la cual se produce un cambio en los resultados

TABLA IX
FALLA DE UNA FASE (A) A TIERRA EN BARRA No. 20

CORRIENTE DE FALLA EN LA FASE A 11.446 P.U. 9577.33 AMPS.

De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.
2	A	0.7926	6.31	1	A;B	0.4181	1749.15
	B	0.7445	5.93		C	0.0000	0.00
	C	1.000	7.57		A;B	0.3569	1493.27
3	A	0.8116	6.47	0	C	0.0000	0.00
	B	0.7677	6.12		A;B	0.7750	3242.40
	C	1.0000	7.97		C	0.0000	0.00
1	A	0.3869	15.41	1;0	A;B	0.4847	2027.74
	B	0.9114	36.31		C	0.0000	0.00
	C	0.9413	37.50		3	A	0.8139
2	A	0.7628	638.26	B;C		0.0255	21.40
				2		A	0.7370
					B;C	0.0129	10.78
20	A	0.7628	638.26	2	A	0.6250	522.93
					B;C	0.0069	5.77
					0.6384	534.22	
30	A	7.0522	5900.86	30	B;C	0.0373	31.72
					3xIo	7.0912	5933.47
					A	1.3029	1090.15
	B;C	0.0701	58.65		B;C	0.0701	58.65
					3xIo	1.4411	1205.83

CONTINUACION TABLA IX

CORRIENTE DE FALLA EN LA FASE A 11.496 P.U. 9577.33 AMPS.

De Barra	Fase	Voltaje (P.U.)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.					
20	A B C	0.0000 0.9546 1.0074	0.00 38.03 40.13	41	A	0.5424	453.87					
					B;C	0.0537	44.92					
					3xIo	0.4357	364.58					
				51	A	0.4946	413.83					
					B;C	0.0466	38.98					
					3xIo	0.4026	336.87					
				85	A B C	0.5816 0.5512 1.0000	4.63 4.39 7.97	85	A;B;C	0.0000	0.00	
									A	7.0522	5900.86	
									B;C	0.0373	31.22	
								1	3xIo	7.0912	5933.47	
									20	A;B;C	0.0000	0.00
										30	A	0.3000
B	0.9218	36.72										
C	0.9555	38.07										
86	A B C	0.6616 0.5947 1.0000	5.27 4.74 7.97	86	A;B;C	0.0000	0.00					
					A	1.3029	1090.15					
					B;C	0.0701	58.65					
				1	3xIo	1.4411	1205.83					
					30	A;B;C	0.0000	0.00				
						41	A	0.3123	12.44			
B	0.9161	36.50										
C	0.9484	37.78										
1	A B;C	0.5424 0.0537	453.87 44.92	A	0.5424	453.87						
				B;C	0.0537	44.92						

CONTINUACION TABLA IX

CORRIENTE DE FALLA EN LA FASE A 11.446 P.U. 9577.33 AMPS.								
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.	
43	A B C	0.3123 0.9161 0.9784	12.44 36.50 37.78	42	3xIo	0.4357	364.58	
					A	1.0367	867.44	
					B;C	0.1002	83.81	
				43	A;B;C	0.0000	0.00	
					41;91 90;89	A;B;C	0.0000	0.00
						A;B;C	0.0000	0.00
89	A B C	0.4376 0.8647 0.9171	3.49 6.92 7.31	43	A;B;C	0.0000	0.00	
					90;91	A	0.6609	5.27
						B	0.5919	4.72
42	A B C	0.2997 0.9168 0.9497	11.94 36.52 37.83	43	A;B;C	0.0000	0.00	
					41	A	1.0367	867.44
						B;C	0.1002	83.81
51	A B C	0.3545 0.9139 0.9439	14.12 36.41 37.60	41	3xIo	0.8381	701.30	
					92;93	A	0.6750	5.38
						B	0.6009	4.79
92;93	A B C	0.6750 0.6009 1.0000	5.38 4.79 7.97	31	A;B;C	0.0000	0.00	

TABLA X
FALLA DE UNA FASE (A) A TIERRA EN BARRA NO. 43

CORRIENTE DE FALLA EN LA FASE A 9.5323 P.U. 7976.03 AMPS.									
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.		
2	A	0.8385	6.68	1	A;B	0.3453	1445.51		
	B	0.7796	6.21		C	0.0000	0.00		
	C	1.0000	7.97		A;B	0.2950	1234.04		
					C	0.0000	0.00		
					A;B	0.6405	2679.53		
					C	0.0000	0.00		
	3	A	0.8535		6.80	1;0	A;B	0.4005	1675.73
		B	0.8001		6.37		C	0.0000	0.00
		C	1.0000		7.97				
1	A	0.5047	20.11	3	A	0.6675	558.56		
	B	0.9153	38.46		B;C	0.0262	21.94		
	C	0.9589	38.20						
				2	A	0.6040	505.39		
					B;C	0.0057	4.73		
				2	A	0.5122	514.71		
					B;C	0.0026	428.58		
				20	A	0.5149	2.19		
					A	1.3456	430.81		
					B;C	0.1448	1125.93		
				30	3xIo	1.0560	121.20		
					A	1.0560	883.61		
					B;C	1.3622	1139.81		
				A	0.1671	139.84			
				3xIo	1.0316	863.19			

CONTINUACION TABLA X

CORRIENTE DE FALLA EN LA FASE A 9.5323 P.U. 7976.03 AMPS

De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS					
20	A B C	0.4368 0.9210 0.9644	17.40 36.69 38.42	41	A	2.2791	1907.01					
					B;C	0.0907	75.88					
					3xIo	2.4571	2055.92					
				51	A	2.0818	1741.89					
					B;C	0.0946	79.13					
					3xIo	2.2703	1899.67					
				85	A B C	0.7297 0.6345 1.0000	5.81 5.06 7.97	85	A;B;C	0.0000	0.00	
									1	A	1.3456	1125.23
									B;C	0.1448	121.20	
								20	A;B;C	0.0000	883.61	
									3xIo	1.0560	0.00	
									A;B;C	0.0000	0.00	
30	A B C	0.4337 0.9210 0.9646	16.88 36.69 38.43					20	A;B;C	0.0000	0.00	
									86	A;B;C	0.0000	0.00
										1	A	1.3622
								B;C		0.1671	139.84	
								30	A;B;C	0.0000	863.19	
									3xIo	1.0316	0.00	
				A;B;C	0.0000	0.00						
				41	A B C	0.1640 0.9724 1.0166	6.53 38.74 40.50	86	A;B;C	0.0000	0.00	
									1	A	1.3622	1139.81
									B;C	0.1671	139.84	
								30	A;B;C	0.0000	863.19	
									3xIo	1.0316	0.00	
A;B;C	0.0000	0.00										
41	A B C	0.1640 0.9724 1.0166	6.53 38.74 40.50					1	A	2.2791	1907.01	
									B;C	0.0707	75.88	
									3xIo	2.4571	2055.92	
								42	A	5.1738	4329.16	
									B;C	0.1851	154.88	
									3xIo	4.8062	4021.52	

CONTINUACION DE TABLA X

CORRIENTE DE FALLA EN LA FASE A 9.5323 P.U. 7976.03 AMPS.							
De Barra	Fase	Voltaje (P.U.)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U.)	Corriente AMPS.
43	A	0.0000	0.00	43	A	9.5322	7975.96
	B	0.9921	39.52		B;C	0.0000	0.00
	C	1.0493	41.80		3xIo	9.5322	7975.96
89	A	0.3606	2.87	41 91;90 89	A;3xIo	9.5322	7975.96
	B	0.8735	6.96		B;C	0.0000	0.00
	C	0.8955	7.14		A;B;C	0.0000	0.00
70;91	A	0.6058	4.83	43	A;B;C	0.0000	0.00
	B	0.5728	4.56				
	C	1.0000	7.97				
42	A	0.2286	9.10	43	A;B;C	0.0000	0.00
	B	0.9642	38.41				
	C	1.0066	40.10				
51	A	0.3568	14.22	41	A;B;C	0.0000	0.00
	B	0.9418	37.52				
	C	0.9789	39.00				
92;93	A	0.7137	5.69	93;92 1	A;B;C	0.0000	0.00
	B	0.6199	4.94		A	2.0818	1741.89
	C	1.0000	7.97		B;C	0.0946	79.13
					3xIo	2.2708	1899.67
				51	A;B;C	0.0000	0.00

TABLA XI

FALLA DE UNA FASE (A) A TIERRA EN BARRA NO. 2) CON CAMBIO DE CONEXION EN EL TRANSFORMADOR

CORRIENTE DE FALLA EN LA FASE A 11.9235 P.U 9976.84 AMPS.								
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.	
2	A	0.7827	6.24	1	A;B	0.4355	1822.12	
	B	0.7359	5.86		C	0.0000	0.00	
	C	1.0000	7.97		A;B	0.3718	1555.56	
3	A	0.8026	6.39	0	C	0.0000	0.00	
	B	0.7956	6.05		A;B	0.8073	3377.61	
	C	1.0000	7.97		C	0.0000	0.00	
1	A	0.3731	14.86	1;0	A;B	0.5049	2112.33	
	B	0.9058	36.08		C	0.0000	0.00	
	C	0.9329	37.17		3	A	0.8130	680.23
20	A	0.0000	0.00	2		B;C	0.0618	51.69
						2	A	0.6900
					B;C		0.7329	613.21
85	A;B;C	0.5316	444.78	2	B;C	0.0222	18.58	
					2	A	0.6900	577.33
						B;C	0.6218	520.26
20	A	0.0000	0.00	20	B;C	0.0231	19.33	
					20	A	0.5775	483.22
						B;C	7.0212	5674.90
20	A	0.0000	0.00	30	B;C	0.3166	264.89	
					30	3xIo	6.4143	5367.09
						A	1.2914	1080.58
20	A	0.0000	0.00	41	B;C	0.0061	5.11	
					41	3xIo	1.3035	1090.72
						A	0.5452	456.18
20	A	0.0000	0.00	51	B;C	0.0755	63.21	
					51	3xIo	0.3941	329.78
						A	0.4969	415.76
20	A	0.0000	0.00	85	B;C	0.0664	55.59	
					85	3xIo	0.3642	304.72
						A;B;C	1.5947	1334.34

CONTINUACION TABLA XI

CORRIENTE DE FALLA EN LA FASE A 11.9235 P.U 9976.84 AMPS								
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS	
85	A	0.5657	4.51	1	A	7.0212	5874.90	
	B	0.5443	4.34		B;C	0.3166	264.89	
	C	1.0000	7.97		3xIo	6.4143	5637.09	
30	A	0.2896	11.54	20	A;B;C	0.0000	0.00	
	B	0.9151	36.45					
	C	0.9430	37.57					
86	A	0.6473	5.16	86	A;B;C	0.0000	0.00	
	B	0.5842	4.65		1	A	1.2914	1080.58
	C	1.0000	7.97		B;C	0.0061	5.11	
41	A	0.3003	11.96	30	3xIo	1.3035	1090.72	
	B	0.9099	36.25		A;B;C	0.0000	0.00	
	C	0.9371	37.33					
43	A	0.3003	11.96	1	A	0.5452	456.18	
	B	0.9099	36.25		B;C	0.0755	63.21	
	C	0.9371	37.33		3xIo	0.3941	329.78	
89	A	0.4132	3.29	42	A	1.0418	371.68	
	B	0.8675	6.91		B;C	0.1419	118.73	
	C	0.9126	7.27		3xIo	0.7581	634.34	
43	A	0.3003	11.96	43	A;B;C	0.0000	0.00	
	B	0.9099	36.25		41;91	A;B;C	0.0000	0.00
	C	0.9371	37.33		90;89	A;B;C	0.0000	0.00
89	A	0.4132	3.29	43	A;B;C	0.0000	0.00	
	B	0.8675	6.91					
	C	0.9126	7.27					

CONTINUACION TABLA XI

CORRIENTE DE FALLA EN LA FASE A 11.9235 P.U. 9976.84 AMPS.							
De Barra	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente AMPS.
90;9	A	0.6467	5.15				
	B	0.5814	4.63				
	C	1.0000	7.97				
				43	A;B;C	0.0000	0.00
42	A	0.2880	11.47				
	B	0.9105	36.27				
	C	0.9379	37.36				
				41	A	1.04118	871.68
					B;C	0.1419	118.73
					3xIo	0.7581	634.34
51	A	0.3415	13.60				
	B	0.9080	36.17				
	C	0.9349	37.22				
				93;92	A;B;C	0.0000	0.00
				1'	A	0.4969	415.76
					B;C	0.0664	55.59
					3xIo	0.3642	304.72
92;93	A	0.6611	5.27				
	B	0.5900	4.70				
	C	1.0000	7.97				
				51	A;B;C	0.0000	0.00

TABLA XII

FALLA DE UNA FASE (A) A TIERRA EN BARRA NO. 43 CON CAMBIO DE CONEXION EN EL TRANSFORMADOR

CORRIENTE DE FALLA EN LA FASE A 0.5323 P.U. 7976.03 AMPS.							
Dé Barra	Fase	Voltaje (P.U.)	Voltaje (Kvol)	A Barra	Fase	Corriente (P.U)	Corriente (AMPS.)
# 89	A	0.0000	0.00			0.0000	0.00
	B	0.9291	7.90				
	C	1.0493	8.36	43	A;B;C	0.0000	0.00

* Es la única barra en la cual se produce un cambio de los resultados

TABLA XIII
 VOLTAJE EN LAS BARRAS DE BAJA TENSION CUANDO OCURRE LOS DISTINTOS
 TIPOS DE FALLAS

SIMU- LACION	VALORES DE VOLTAJE EN LA BARRA DE BAJA TENSION								
	Falla en ba- rra #	Tipo de falla	NEUTRO DEL TRANSFORMADOR AISLA- DO				NEUTRO DEL TRANSFORMADOR ATE- RRIZADO		
			Barra Nº	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)	Fase	Voltaje (P.U)	Voltaje (Kvol)
20	Trifá- sica.	85	A	0.0000	0.00	A	0.0000	0.00	
20	Línea Línea	85	A	0.8660	6.90	A	0.8660	6.90	
			B	0.8660	6.90	B	0.8660	6.90	
			C	0.0000	0.00	C	0.0000	0.00	
20	Doble fase a tierra	85	A	0.5546	4.42	A	0.5256	4.19	
			B	0.5546	4.42	B	0.5256	4.19	
			C	0.0000	0.00	C	0.0000	0.00	
20	Una fa- se a tierra	85	A	0.5816	4.63	A	0.5657	4.51	
			B	0.5512	4.39	B	0.5443	4.34	
			C	1.0000	7.97	C	1.0000	7.97	
43	Trifá- sica.	89	A	0.0000	0.00	A	0.0000	0.00	
43	Línea Línea	89	A	1.0000	7.97	A	1.0000	7.97	
			B	0.5000	3.98	B	0.5000	3.98	
			C	0.5000	3.98	C	0.5000	3.98	
43	Doble fase a tierra	89	A	0.6932	5.52	A	1.0399	8.28	
			B	0.3466	2.76	B	0.0000	0.00	
			C	0.3466	2.76	C	0.0000	0.00	
43	Una fa- se a tierra	89	A	0.3606	2.87	A	0.0000	0.00	
			B	0.8735	6.96	B	0.9921	7.98	
			C	0.8955	7.14	C	1.0493	8.36	

TABLA XIV
CORRIENTES MAXIMA DE CORTOCIRCUITO

LOCALIZACION DE LA FALLA	NIVEL DE VOLTAJE (Kvol)	TIPO DE FALLA	NEUTRO DEL TRANSFORMADOR AISLADO		NEUTRO DEL TRANSFORMADOR ATERRIZADO.	
			Corriente (P.U.)	Corriente (AMPS.)	Corriente (P.U.)	Corriente (AMPS.)
Barra N° 20	69.00	Trifásica Línea-Línea	11.0083	9211.08	11.0083	9211.08
			9.5335	7977.02	9.5335	7977.02
Barra N° 43	69.00	Doble fase a tierra.	11.9083	9964.64	12.9986	10876.41
			11.4060	9577.33	11.9235	9976.84
		Una fase a tierra	9.9224	8302.45	9.9224	8302.45
			8.5930	7190.12	8.5930	7190.12
Doble fase a tierra.	9.1616	7665.91	9.1616	7665.91		
	9.5323	7976.03	9.5323	7976.03		

A N E X O S

ANEXO A

1. ANALISIS DE COMPONENTES SIMETRICOS.-

El principio fundamental de componentes simétricos aplicado a un circuito trifásico consiste en descomponer el sistema desbalanceado en tres sistemas balanceados, que son:

- a) Componentes de secuencia positiva, que está compuesto por tres vectores de igual magnitud y desfasados entre si 120° , la secuencia de fases de este sistema es la misma que la de los tres vectores desbalanceados originales.

- b) Componentes de secuencia negativa que está compuesto por tres vectores de igual magnitud y también desfasados por 120° entre si. La secuencia de fases es opuesta a la de los vectores desbalanceados originales.

- c) Componentes de secuencia cero; que también está

compuesto por tres vectores de igual magnitud pero que no se encuentran desfasados entre ellos.

2. EL VECTOR OPERADOR a .-

Por conveniencia en notación y manipulación, un vector operador es introducido; y este es conocido como el vector a y es definido como:

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ} = 1 \angle 120^\circ$$

Esto indica que el vector a tiene como magnitud la unidad y está orientada 120° en dirección positiva desde el eje de referencia.

El vector a operando no cambia de magnitud sino que solamente está rotando en la posición de 120° hacia adelante, por ejemplo $V' = aV$ es un vector que tiene la misma magnitud que el vector V , pero que ha rotado 120° hacia adelante desde el vector V ; al igual que el vector $V'' = a^2 V$, que tiene la misma magnitud que el vector V pero que está orientado 120° en una dirección negativa del vector de referencia V ; u orientado 240° hacia adelante en dirección positiva como se muestra en la Figura A.1

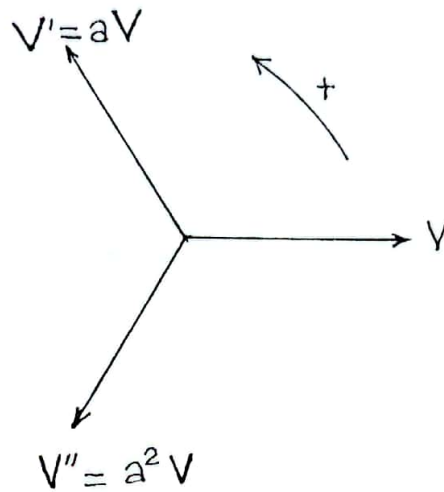


FIGURA A.1.- DIAGRAMA VECTORIAL DEL OPERADOR a .

Los tres vectores $1 + j0$, a^2 , y a (tomados en este orden) forman un juego de vectores simétricos de rotación de fase de secuencia positiva.

Los tres vectores $1 + j0$, a , y a^2 (tomados en este orden) forman un juego de vectores simétricos de rotación de fase de secuencia negativa.

Este concepto de resolución es aplicado para la rotación de vectores tales como voltajes o corrientes. Los componentes de secuencia positiva, negativa y cero se distinguen por un subíndice 1, 2, 0, respectivamente. En la Figura A.2, se muestra un sistema

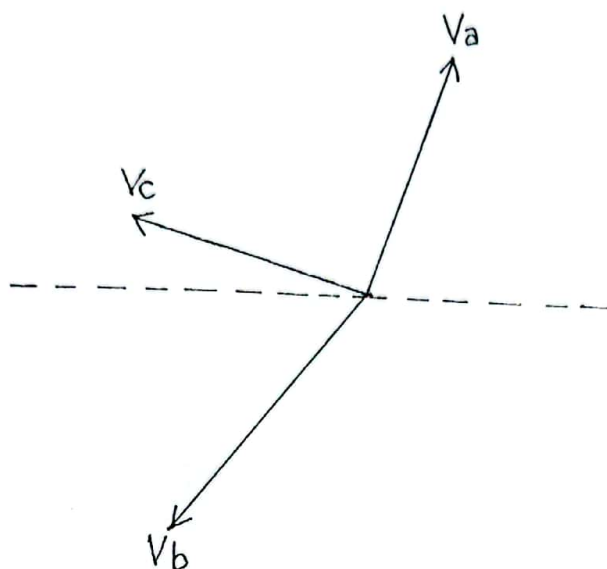


FIGURA A.2.- SISTEMA DE VOLTAJES TRIFASICOS DESBALANCEADOS.

desbalanceado de voltajes el mismo que puede ser descompuesto en sus correspondientes componentes simétricos como se observa en la Figura A.3.

La síntesis de un conjunto de 3 vectores desequilibradas a partir de los tres conjuntos de componentes simétricos de la Figura A.3 se indica en la Figura A.4.

Analizando la representación gráfica de la Figura A.4 se deduce que:

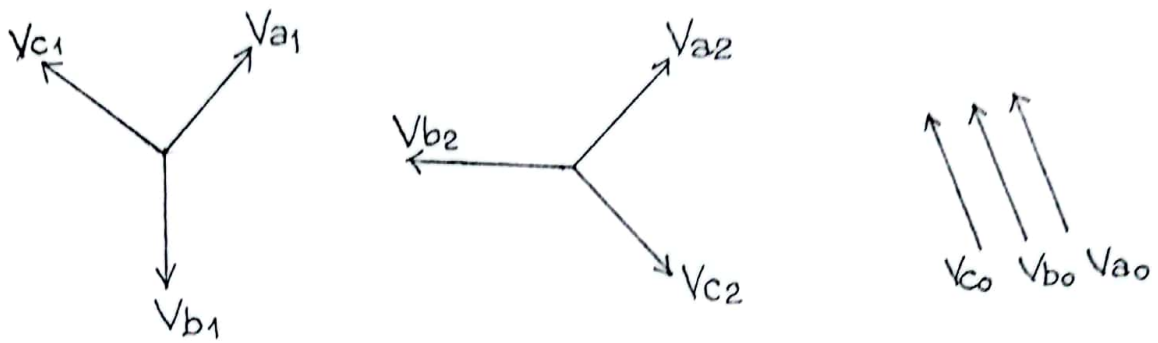


FIGURA A.3.- COMPONENTES DE SECUENCIA POSITIVA, NEGATIVA Y CERO CORRESPONDIENTES AL SISTEMA DESBALANCEADO DE LA FIGURA A.2.

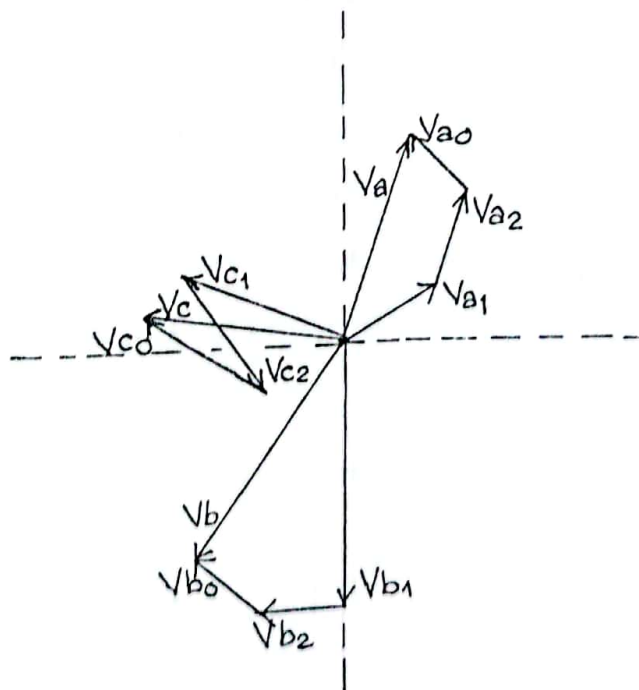


FIGURA A.4 - SUMA GRAFICA DE LOS COMPONENTES REPRESENTADOS EN LA FIGURA A.3 PARA OBTENER TRES VECTORES DESEQUILIBRADOS.

$$V_a = V_{a_1} + V_{a_2} + V_{a_0} \quad (1 - 1)$$

$$V_b = V_{b_1} + V_{b_2} + V_{b_0} \quad (1 - 2)$$

$$V_c = V_{c_1} + V_{c_2} + V_{c_0} \quad (1 - 3)$$

Ahora si expresamos cada componente de V_b y V_c como el producto de una función del operador a y un componente de V_a y con relación a la Figura A.3 se deduce que:

$$\begin{aligned} V_{b_1} &= a^2 V_{a_1} & V_{c_1} &= a V_{a_1} \\ V_{b_2} &= a V_{a_2} & V_{c_2} &= a^2 V_{a_2} \quad (1 - 4) \\ V_{b_0} &= V_{a_0} & V_{c_0} &= V_{a_0} \end{aligned}$$

Sustituyendo las relaciones (1-4) en las ecuaciones (1 - 1); (1 - 2); (1 - 3) se obtiene:

$$V_a = V_{a_0} + V_{a_1} + V_{a_2} \quad (1 - 5)$$

$$V_b = V_{a_0} + a^2 V_{a_1} + a V_{a_2} \quad (1 - 6)$$

$$V_c = V_{a_0} + a V_{a_1} + a^2 V_{a_2} \quad (1 - 7)$$

En forma matricial se tiene:

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{a_0} \\ V_{a_1} \\ V_{a_2} \end{pmatrix} \quad (1 - 8)$$

De la cual se puede deducir las ecuaciones que nos enseña como descomponer tres vectores asimétricos en sus componentes simétricos.

$$\begin{vmatrix} V_{a_0} \\ V_{a_1} \\ V_{a_2} \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{vmatrix} \quad (1 - 9)$$

$$V_{a_0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c)$$

$$V_{a_1} = \frac{1}{3} (V_a + a V_b + a^2 V_c)$$

$$V_{a_2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2 V_b + a V_c)$$

Para determinar las demás componentes se utilizan las fórmulas (1-4).

Las conclusiones hasta ahora obtenidas pueden ser también aplicadas a vectores de corriente.

3. FALLO LINEA A LINEA.-

En el diagrama de la Figura A.5, se considera el caso en que las fases b y c están en falla.

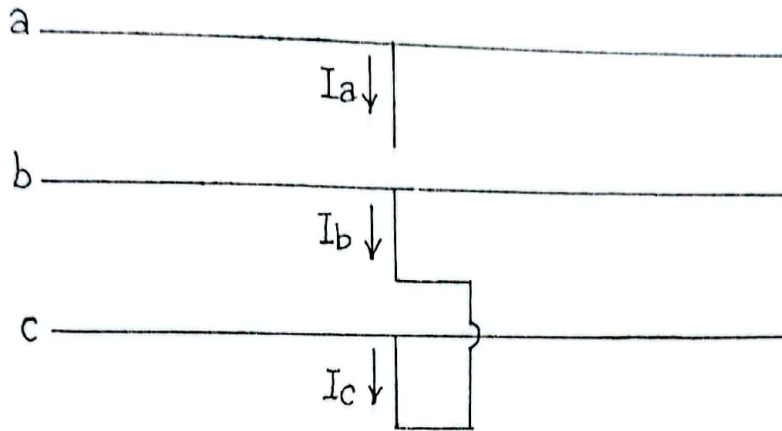


FIGURA A.5.- DIAGRAMA PARA UN FALLO DE LINEA A LINEA

Durante el fallo se cumplen las relaciones siguientes:

$$I_a = 0; \quad I_b = I_c; \quad V_c = V_b$$

De las ecuaciones en forma de matrices (1-9) para las corrientes se tiene.

$$\begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ a & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ I_c \\ -I_c \end{pmatrix}$$

Obteniéndose la siguiente información

$$I_{a_0} = 0 \qquad I_{a_1} = \frac{1}{3} (a^2 - a) I_c \qquad (1.10)$$

$$I_{a_1} = -I_{a_2} \qquad I_{a_2} = \frac{1}{3} (a - a^2) I_c$$

De lo que se deduce que no existe red de secuencia cero.

De la misma manera se tiene para los voltajes

$$\begin{array}{rcccccl} V_{a_0} & & 1 & 1 & 1 & V_a \\ V_{a_1} & = & \frac{1}{3} & 1 & a & a^2 & V_b \\ V_{a_2} & & & 1 & a^2 & a & V_b \end{array}$$

De donde se tiene que:

$$V_{a_1} = V_{a_2} \qquad (1-11)$$

$$V_{a_0} = 0 \qquad \text{ya que } I_{a_0} = 0$$

Esto hace deducir que las redes de secuencia positiva y negativa del sistema están en paralelo.

REDES DE SECUENCIA.-

Del resultado de las ecuaciones (1.10) y (1.11), se concluye que las conexiones de las redes de secuencia es como se indica en la Figura A.6.

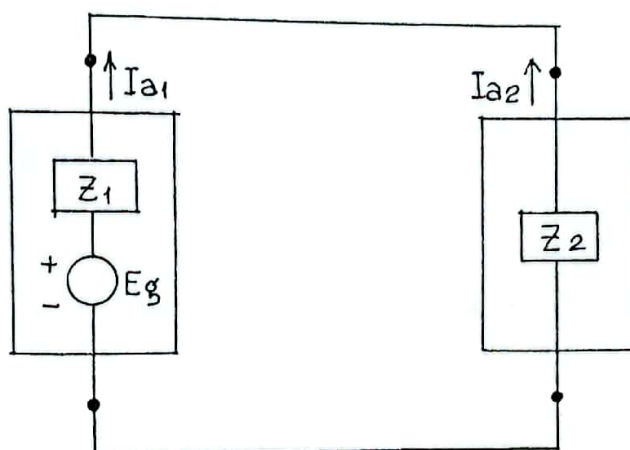


FIGURA A.6.- RED DE SECUENCIA PARA UN FALLO DE LINEA A LINEA.

De la Figura A.6;

$$I_{a1} = \frac{E_g}{Z_1 + Z_2}$$

De la ecuación (1.10)

$$I_c = \frac{3 I_{a1}}{(a^2 - a)}$$

$$I_c = \frac{3 E_g}{(a^2 - a) (Z_1 + Z_2)}$$

$$I_c = \frac{3}{\sqrt{3}} \frac{E_g}{Z_1 + Z_2}$$

$$I_c = -j \frac{\sqrt{3} E_g}{Z_1 + Z_2} = I_f$$

4. FALLO DOBLE LINEA A TIERRA.-

En el diagrama de la Figura A.7 se considera el caso en que se produce una falla entre dos líneas (b y c) y tierra.

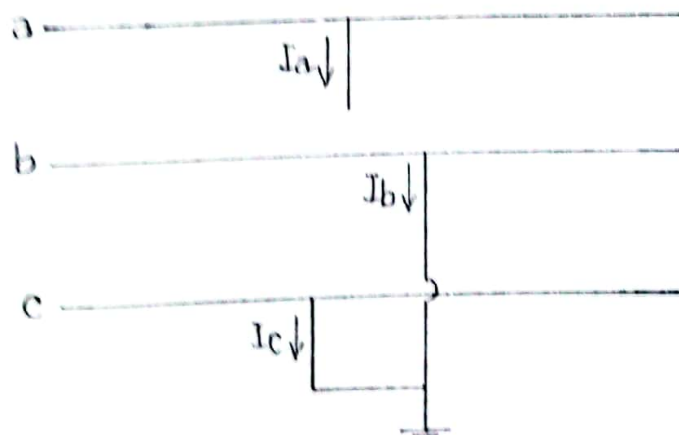


FIGURA A.7.- DIAGRAMA PARA UN FALLO DE DOBLE LINEA A TIERRA.

Durante el fallo se cumple las relaciones siguientes

$$I_a = 0 \qquad V_b = 0 \qquad V_c = 0$$

De las ecuaciones matriciales de las componentes simétricas (1 - 9) para el voltaje se tiene:

$$\begin{vmatrix} V_{a_0} \\ V_{a_1} \\ V_{a_2} \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

De donde se obtiene la siguiente información:

$$V_{a_0} = V_{a_1} = V_{a_2} = \frac{1}{3} V_a \qquad (1.12)$$

Siendo los voltajes de las tres secuencias iguales, se deduce que sus correspondientes redes de secuencia están conectadas en paralelo.

REDES DE SECUENCIA.-

Del resultado de las ecuaciones (1.12) se concluye que las conexiones de las redes de secuencia es como se indica en la Figura A.8.

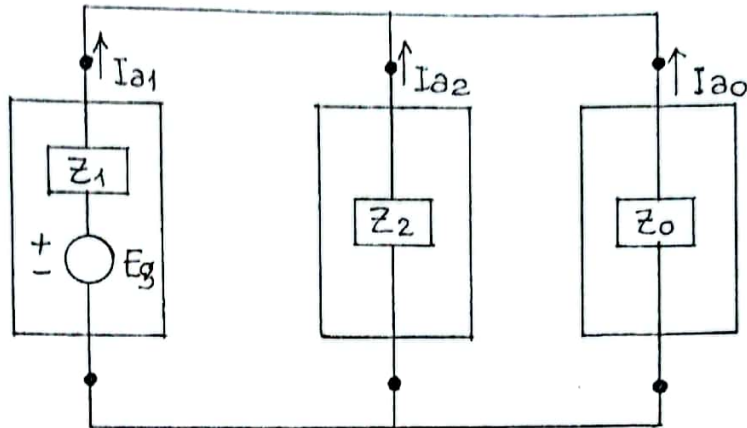


FIGURA A.8 .- RED DE SECUENCIA PARA UNA FALLA DE DOS LINEAS A TIERRA.

De la Figura A.8

$$I_{a1} = \frac{E_g}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}} \quad (1.13)$$

$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} \quad (1.14)$$

$$I_{a0} = -I_{a1} \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0} \quad (1.15)$$

Por medio de las relaciones (1.8) para las corrientes se encuentran los valores de las corrientes I_b e I_c .

La corriente en el fallo es:

$$I_f = I_b + I_c$$

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

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

5. FALLO SIMPLE LINEA A TIERRA.-

En el diagrama de la Figura A.9, se considera el caso en que la fase "a" está a tierra.

Al producir el fallo se tiene las siguientes condiciones:

$$V_a = 0 \qquad I_b = 0 \qquad I_c = 0$$

Aplicando la ecuación (1.9) para las corrientes se tiene:

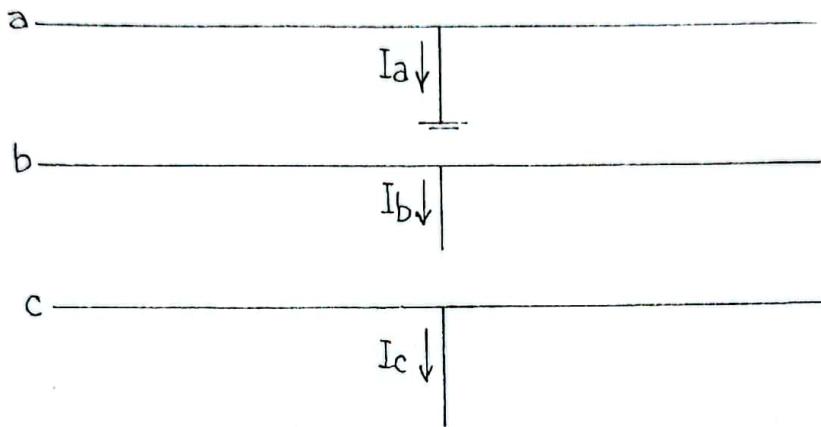


FIGURA A.9.- DIAGRAMA PARA UN FALLO DE LÍNEA A TIERRA.

$$\begin{vmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

De donde se deduce que:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} I_a \quad (1.16)$$

Lo cual implica que las tres redes de secuencia deben conectarse en serie.

Redes de secuencia.-

De el resultado de la ecuación (1.16) se concluye que la conexión de las redes de secuencia es como se muestra en la Figura A.10 .

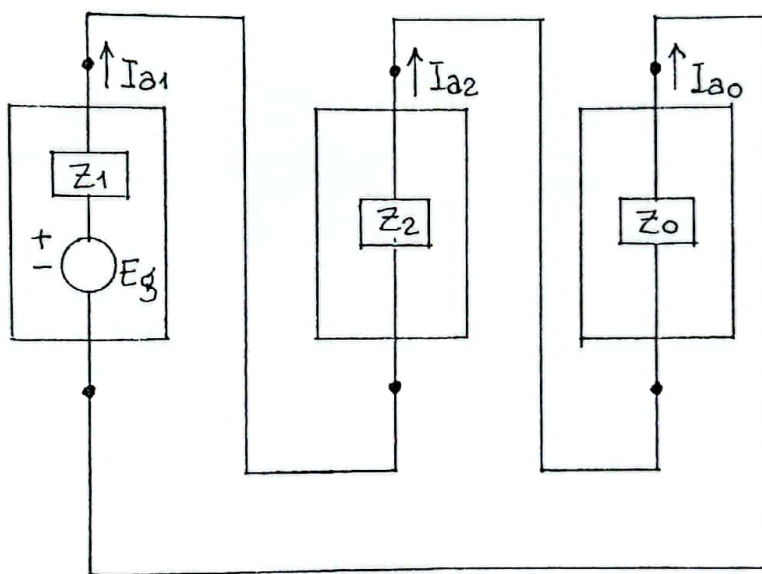


FIGURA A.10.- RED DE SECUENCIA PARA UNA FALLA DE LINEA A TIERRA.

De la Figura A.10 se deduce que:

$$I_{a1} = \frac{E_g}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

La corriente de falla es:

$$I_f = I_a = 3I_{a_1}$$

$$I_a = \frac{3 E_g}{Z_0 + Z_1 + Z_2} = I_f$$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las fallas o cortocircuitos ocurridos en el sistema de potencia, afectan a este de diferentes maneras, por lo que es necesario tener un conocimiento claro de tales efectos, para de esta forma se pueda dar la necesaria y efectiva protección al sistema.

Es necesario conocer tanto los esfuerzos electrodinámicos así como los térmicos y demás efectos que son producidos por las corrientes de cortocircuito, para de esta manera dimensionar en forma correcta los diferentes equipos e instalaciones del sistema de potencia.

La importancia que tienen las tomas de tierra de las instalaciones, para la seguridad de las mismas en el momento que exista una falla, ya que estas se ven expuestas a la circulación de corrientes muy altas; al igual que la conexión del neutro a tierra de los diferentes equipos del sistema, que puede realizarse de diversas maneras tomando en cuenta el equipo o sección del sistema y de las metas que se quieran obtener.

sobrevoltajes pueden ser transmitidos desde el lado de alta tensión al lado de baja tensión, en el momento que ocurre una falla a tierra en el lado de alta, esto se da cuando, tanto en el lado de alta del transformador como en el de baja, el neutro se encuentra aterrizado.

En la parte práctica de este trabajo se comprueba que los niveles de voltaje son reducidos si se cambia la conexión del transformador de Estrella aislada-Delta ($\gamma-\Delta$) a Estrella aterrizada-Delta ($\gamma_H-\Delta$), cuando se produce una falla en el lado de alta tensión; así como los niveles de voltaje aumentan si se cambia de conexión de Estrella aislada-Estrella aterrizada ($\gamma-\gamma_H$), a Estrella aterrizada-Estrella aterrizada ($\gamma_H-\gamma_H$), y la falla ocurre en el lado de alta tensión del transformador.

Las fallas que ocurren en el sistema de potencia, provocan que el suministro sea interrumpido, y si estas fallas son transientes el suministro será restaurado luego de un intervalo de tiempo muy corto, pero tales fallas ocasionan la caída de voltaje en las diferentes barras del sistema tanto en el lado de alta como en el lado de baja tensión, la misma que afecta en general a todos los consumidores y dependiendo de la importancia de cada uno de ellos, el efecto será más serio.

En las grandes industrias en donde se utilizan máquinas

eléctricas de gran capacidad, en algunos casos se ven en la necesidad de desconectar, o sacar fuera de servicio las máquinas por efecto de la caída de voltaje, y por en de esta salida repercute en cuanto tiene que ver con la producción. Por lo que es necesario que el industrial tenga un mejor entendimiento de tales fallas y sus efectos, para que de esta forma pueda seleccionar la apropia da protección de sus equipos y maquinaria.

B I B L I O G R A F I A

1. WESTINGHOUSE E.C., Distribution Systems (First Edition Pittsburgh, P.A. 1959, 1965), pp. 344-346.
2. WESTINGHOUSE E.C., Transmission and Distribution (Fourth Edition Pittsburgh, P.A. 1964), pp. 643-654.
3. A. ROTH, Técnica de la alta tensión (Editorial Labor S.A., 1966), pp. 488-492; 637-639; 725-736.
4. A.E.GUILE y W.PATERSON, Electrical Power Systems, Volume One (Second Edition; 1977), pp. 283-308.
5. B.G.A SKROTZKI, Editor; Electric Transmission and Distribution (New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1954), pp. 367-371.
6. J.R. EATON, Sistemas de transmisión de energía eléctrica (Editorial Prentice-Hall International, 1973), pp. 305-318.

7. IEE, Sources and Effects of Power System Disturbances, International Conference 22-24 April 1974 (London: Institution of Electric Engineers, 1974) pp. 29-33.
8. G.ZOPPETI, Estaciones transformadoras y de distribución (2da. edición ampliada, Editorial Gustavo GILI S.A., 1963), pp. 380-400.
9. D.BEEMAN, Editor: Industrial Power Systems Handbook (New York: Mc Graw-Hill Book Company Inc., 1955), pp. 205-215.
10. B.M WEEDY, Electric Power Systems (Second Edition, 1967), pp. 244-248.
11. A.GREENWOOD, Electrical Transients in Power Systems (John Wiley y Sons, Inc., 1971), pp. 337-340.
12. BUCHHOLD y HAPPOLDT, Centrales y redes eléctricas (Editorial Labor S.A., 1971), pp. 451-457.
13. R.T. LYTALL, The Switchgear Book (Seventh Edition General Editor. C.A. Worth, 1972), pp. 184-192.

14. F. CHARD; Electricity Supply: Transmission and Distribution (First Published by Longman Group Limited, 1976), pp. 305-334.

15. H. PETERSON, Transients in Power Systems (New York: Dover Publications Inc., 1951); pp. 23-29.